SD 入門セミナー

（シリーズ 2）

2014 年 10 月~2015 年 3 月実施

目　次

1. 趣旨と内容 …… 2
2. SD の歴史とエネルギー・モデルの歴史 …… 4
3. なぜモデルを使うのか？ …… 37
4. システムの基本的な振る舞い …… 57
5. システムの基本的な振る舞いの表現方法
（指数的増加、指数的減少、収斂と振動） …… 90
6. マネジメント・フライト・シミュレーター …… 111
7. モデルを改善していく方法 …… 125
8. SD 学習のための情報 …… 145

日本未来研究センター
研究員
末武　透

1. 趣旨と内容

(1) セミナーの目的と趣旨

本稿は、日本未来研究センター及びシステム・ダイナッミクス学会日本支部との共催で2014 年 10 月~2015 年 3 月に実施した、SD 入門コース（第 2 シリーズ）の説明内容をまとめたものです。

本セミナー・ワークショップは、ST/SD の紹介、入門、そして、ST/SD に関心のある人が集まって、情報交換を行ったり、教え合ったりできる場として実施しています。なお、使った Radzicki のテキストの中で使われているモデルは Powersim で作成されていますが、セミナーでは、Vensim PLE を使いました。

(2) セミナーで使ったテキスト

テキストは、
Michael J. Radzicki, “Introduction to System Dynamucs”, Version 1, U.S. Department of Energy, 1997
を使いました。このテキストは、SD の入門書として、国際システム・ダイナミックス学会から紹介されていたもので、2014 年 9 月の時点では、同学会の HP にリンクが張られていて、以下のサイトから閲覧できます。
http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn/

Michael J. Radzicki は WPI の教授で、SD 学会では経済学研究分科会議長、SD 学会会長を務めています。専門は経済です。

彼のこの本は、もともとは米国エネルギー省から出版されたもので、それを電子出版物として、無料で広く SD を紹介するために、SD 学会の HP で、SD の入門書として紹介されていました。イラストや図が変化するなど、非常に楽しめる構造になっています。

(3) 構成

第 2 章（第 1 回目実施）では、SD の歴史と、米国でのエネルギー・モデル発達の歴史が述べられています。併せて、日本における SD 普及の歴史も説明しました。

第 3 章（第 2 回目実施）では、人間の頭の中にある、物の考え方（メンタル・モデル）と、メンタル・モデルを SD モデルにし、その SD モデルを使って他の人と、対象に対する理解を共通にするやり方について説明しています。SD が特徴的な点は、対象をしくみ（システム）として捉える点です。従って、SD モデルは、対象をしくみと捉え、メンタル・モデルで理解したしくみをモデルにしたものとなります。

第 4 章では、世の中のシステムの振る舞いは、直線変化、指数変化、振動、収斂、S 字型変化の 5 種類のどれか、あるいはそれを組み合わせた変化になるということを、新聞や雑誌に掲載された記事のグラフの形が、先の 5 つのどれかのパターンになっていることで示しました。つまり、この 5 種類、あるいはそれを組み合わせた振る舞いを再現するモデルを使って、対象とする社会システムを表現できると SD では考えています。

そこで、SD では、対象をシステムとして捉え、それを、ストックとフローを使って、フィードバックがあるようなメカニズムを作ります。この作られたメカニズムがモデルであり、このモデルが、対象としているシステムの振る舞いを再現できたのであれば、モデルで考えたメカニズムが妥当であり、対象としたシステムは、モデルで想定したメカニズムの通りに働いた、従って、モデルとして表現した仮説は妥当であるというように理解します。

社会的システムのほとんどは非線型であり、非均衡です。非線型で非均衡なものは、一

般的には取り扱うことが難しいので、多くは、線型で均衡なモデルを近似的に使って対象を取り扱っています。しかし、SD は、システムを非線型であり、非均衡であるものとして直接取り扱っている点が、その他の定量モデルでのアプローチと違っている点です。

第 5 章では、システムの振る舞いの基本形である直線変化、指数変化、収斂型変化、振動、S 字型変化の 5 つの基本的な変化のパターンの基本的な表現方法を説明しています。直線変化は、ストックにフローが単誦に、入力、あるいは出力する形で表現できます。シス変化は、ストックに入力、あるいは出力するフローに対し、ストックからのフィードバックがある形で表現でき、正のフィードバック（増強ループ）であれば増加し、負のフィードバック（均衡ループで、ストックに対してフローがマイナス値を取る）であれば、収斂します。収斂は、目標に対し、ストックとのギャップを埋めるような均衡ループを設けることでも可能です。振動は、ストックとフローの組み合わせに、遅延を干渉させることで発生させることができます。S 型変化は、増強ループに均衡ループを干渉させ、増強ループの、システムを増加させようとする動きを、途中から均衡ループが取って代わり、収斂させるようにすれば、表現できます。

SD を使えば、仮想実験で確かめながら最適な政策代替案を選べること、モデルを使って対象としているシステムのメカニズムを理解できること、その理解によって意思決定の能力を培うことができることを以て、SD の利点、あるいは SD 利用の意義と考えています。しかし、そのモデルを作っていない人には必ずしも、モデル構築者が得られた知見は理解できないので、それを他人に理解させることが時として必要になります。このようなことができるよう、最後には、経営フライト・シミュレーターにすることが望まれます。第 6 章では、この手順について説明しています。

第 7 章では、コンセプチュアルな段階から、実務的なモデルにまでどんどん改善し、経営フライトシュミュレーターにまで完成させる方法を説明しています。

最後の第 8 章では、SD 学習のための情報にどのようなものがあるかを紹介しています。

本稿は、日本未来研究センターの研究員である末武透がまとめたものですが、本稿で述べた見解や意見等に関し、私が全面的に責任を負うものであり、日本未来研究センターやシステムダイナッミスク学会日本支部の見解を表したものではないことを述べておきます。
また、本稿で使われている写真や図には、教育や研究に限定して利用することとして使っているものがあります。十分注意を払って取り扱って下さい。
クレジットの記載のない図は、基本的には私が作成したものです。

2. SD の歴史とエネルギー・モデルの歴史

この章では、
・SD の歴史
・エネルギー・モデル
について説明を行っています。

(1) SD の歴史
1) 概略としての SD の歴史

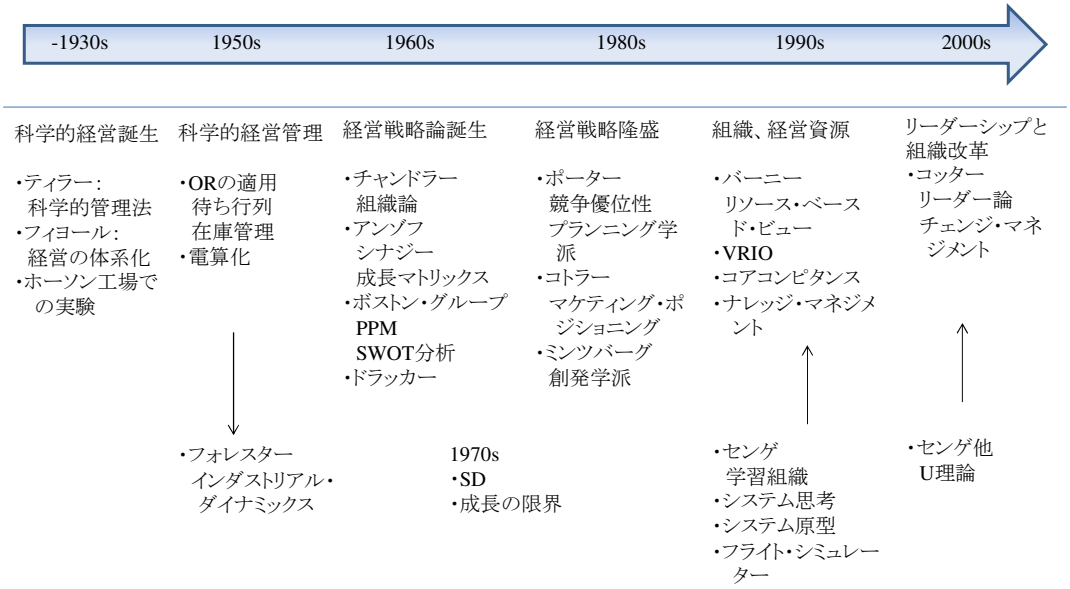


図 2-1：SD の歴史

図 2-1 は SD 入門セミナー、シリーズ 1 での、経営学的に見た SD の概略としての歴史で、私のプレゼンに使った図です。SD は、1930 年代に米国のティラーが始めた科学的管理法や、ホーソン工場での実験などの、科学的、合理的に経営を行っていこうとする試みからスタートし、1950 年代の OR の経営への応用、適用の流れの中で、モデルとシミュレーションという考え方を持ち込んだものとして始まりました。これは、SD の創設者、ジェイ・フォレスターが電算機開発のパイオニアであったことも影響し、当時から始まった電算機の経営への応用、適用という流れにも乗り、電算機を使って、シミュレーションを行い、仮説の検証を仮想的に行いながら経営を進めるというやり方を確立しました。しかし、SD は、当時は主に、在庫管理やマーケティングなど、基本的な経営問題への応用が主で、戦略分野にはあまり適応が見られませんでした。しかし、1990 年代になり、センゲなどが、システム思考という SD の新分野を切り開き、組織学習や組織改革に適応し、再び注目を浴びるようになりました。

1970 年代から 1980 年代は、SD は停滞しているように見えますが、経営学への適用ではなく、「成長の限界」に見られるような、地球規模の社会・経済・環境問題や、アーバン・ダイナミックスから始まった地域開発などへ応用、適用が広がっています。

自然科学の分野は私の専門外なのでよく知りませんが、社会科学では、シミュレーションという仮想実験を行うことができる手法は意外に少なく、SD 以外でよく用いられるものとしては、財務モデルや計量経済モデルぐらいしかありません。そういった意味では、有効な手法と私自身は考えています。

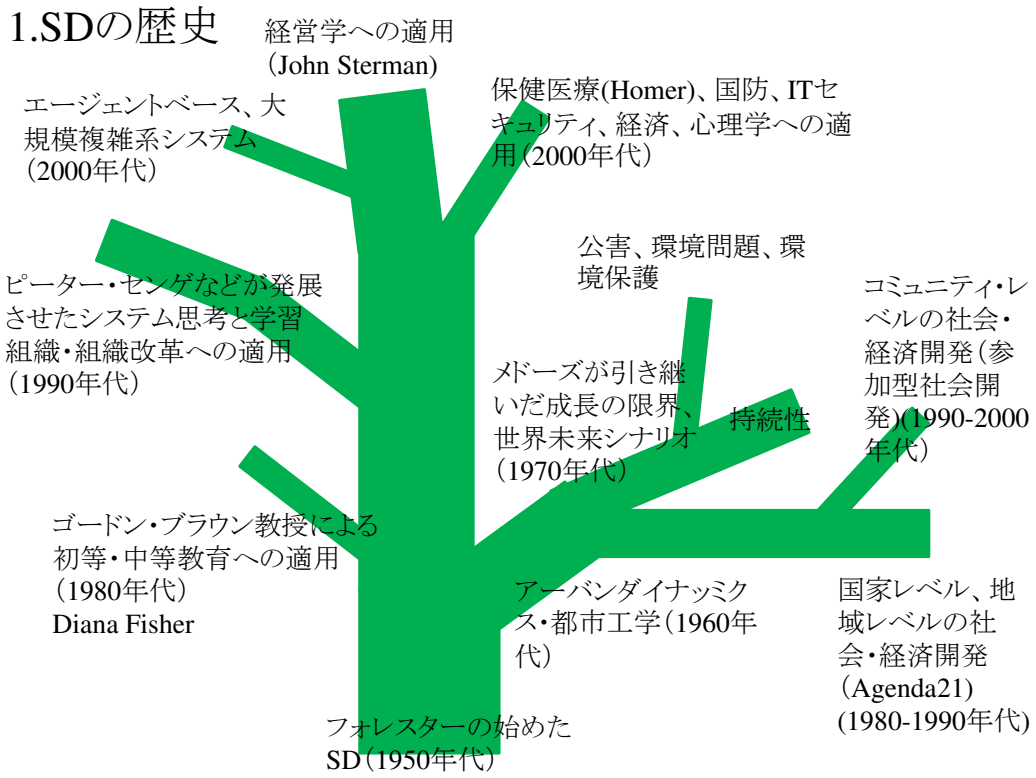


図 2-2：SD の系統図

図 2-2 は、いわゆる SD の系統図です。フォレスターが 1950 年代に、企業を対象に開発した SD は、1960 年代に、アーバン・ダイナミックスとして、都市開発に適用されます。これは、1970 年に、フォレスターの弟子のメドースなどが引き継いだ、「成長の限界」での地球規模の SD モデルとしてさらに発展し、地球温暖化モデルなど、地球規模の社会・環境モデルや地球規模の社会・環境研究はもちろん、1980 年代から 1990 年代に、国連地域開発部の国家開発シミュレーション研修モデルである Pangea Model や世銀の Agenda21 などの国レベルの SD モデル、さらには、地域レベルの開発、参加型開発といった手法と合体し、開発途上国などで地域開発、コミュニティ開発などにと適用されています。環境学や社会開発学では、シミュレーションによる検討抜きの理想論的議論はもう成立しないので、汎用されるシミュレーション・ツールの一つとなっています。

1980 年には、フォレスターの MIT の上司で、指導教官でもあったゴードン・ブラウン教授が、SD を初等・中等教育に適応することを始め、この分野でもいろいろ SD を使った授業が行われています。これらの、初等・中等教育の教材は CLE を通じて広く公開されていますし、2 年毎に、SD の初等・中等教育への適用に関する国際会議が米国で開催されています。

1990 年には先に述べた、ピータ・センゲなどの始めたシステム思考や組織改革への適用が、経営学の中で一つの流れを作っています。

1990 年後半から 2000 年に入ってから、SD はエージェント・モデルや、スーパー・コンピューターでないとシミュレーションを実施できない大規模モデルの研究分野を切り開いています。例えば、国防問題で、200 以上ある国をそれぞれエージェントとする SD モデルでは、スーパー・コンピューターを使わないとシミュレーションできません。複雑系を扱う場合も、計算が膨大になります。

また、SD の適用分野もさらに広がり、保健・医療、軍事・国防、IT セキュリティ、心理学などの分野に適用されています。もちろん、今でも SD の適用分野の主流は経営学で、国際会議での研究発表で見ると、SD 研究論文の 5 割は企業経営に関するもの、3 割が、保健・医療制度、エネルギー政策などの社会政策、1 割が経済、残り 1 割が防衛、IT セキュリティ、地域開発といったその他の分野になっています。

2) ジェイ・フォレスターが SD を創設するまで：

SD の創設者、ジェイ・フォレスターは、1918 年、ネブラスカ州の牧場で生まれました。高校生時代、彼の住んでいた農場には電気が来ていなかったので、自分で風力発電を制作したそうです。最初は、級友の多くが進学する農学部に行くつもりだったのですが、風力発電装置を自作するなどの経験から、電気の方が面白いと、電機工学科に志望を変え、ネブラスカ大学工学部、電気工学科に進学し、1939 年、ネブラスカ大学工学部、電気工学科を卒業します。そして、1939 年に MIT の電子工学部、博士課程に入学し、研究助手に採択されます。フォレスターの指導教官は Gordon Brown 教授で、制御科学の一人者でした。Brown 教授は、MIT 内にサーボ機構研究所を創設者しています。当時は、軍事技術、特に大砲やレーダーに制御（サーボ機構、自動照準機能等）を取り込むことが米軍で盛んに研究されていて、MIT のサーボ機構研究所はその最先端を行く研究所だったので、米国海軍から研究を受け持って、レーダーと大砲の連動自動照準器の研究開発を行っていました。フォレスターは、開発チームのリーダーになり、1942 年、空母レキシントンにフォレスターが関係し開発した水圧式サーボメカニズムを組み込んだ艦砲・レーダー・システムが搭載されます。フォレスターはその調整・修理作業のため、空母レキシントンに乗り込みます。空母レキシントンは、日本軍の攻撃を受けましたが、幸い沈没は免れました。フォレスターはよく、もしこの時、レキシントンが沈没していたら SD は無かったと冗談を言っています。

ちなみに、フォレスターの上司だった Gordon 教授は、MIT を定年後に、出身地の教育委員に招かれます。そこで、教育委員会が抱えるいろんな経営問題を、フォレスターの確立した SD を使って解決した経験を踏まえ、SD を初等・中等教育に適応することを始めます。

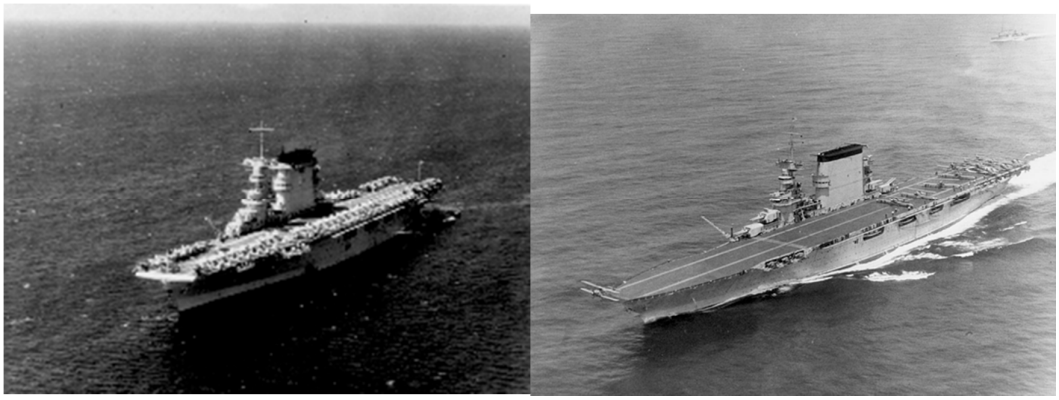


図 2-3：空母レキシントン

第 2 次大戦終了期、海軍は戦闘機パイロットの訓練用航空シミュレーターを作ることに感心を持ち、MIT に打診しました。MIT のサーボ機構研究所は検討の結果、それは可能と回答し、海軍は、Project Whirlwind としてプロジェクトを発足し、MIT に発注しました。ただ、当時は ENIAC 以外にはデジタル式電算機がなく、ENIAC は軍事機密たったので、大型アナログ電算機を使ったパイロットの訓練用航空シミュレーターを開発することが試みられました。このプロジェクトの責任者はフォレスターでした。1945 年、MIT でのフォレスターの同僚のジェリー・クローフォードが、ENIAC のデモンストレーションを見てデジタ

ル式コンピューターにすることを提案し、1947、MIT にデジタル・コンピューター研究所が設立され、フォレスターが所長になり、デジタル式汎用電算機 WHIRLWIND I の設計が始まります。WHIRLWIND I の制作は 1958 年からで 3 年かけて、1951 年に完成します。

図 2-4：WHIRLWIND 1

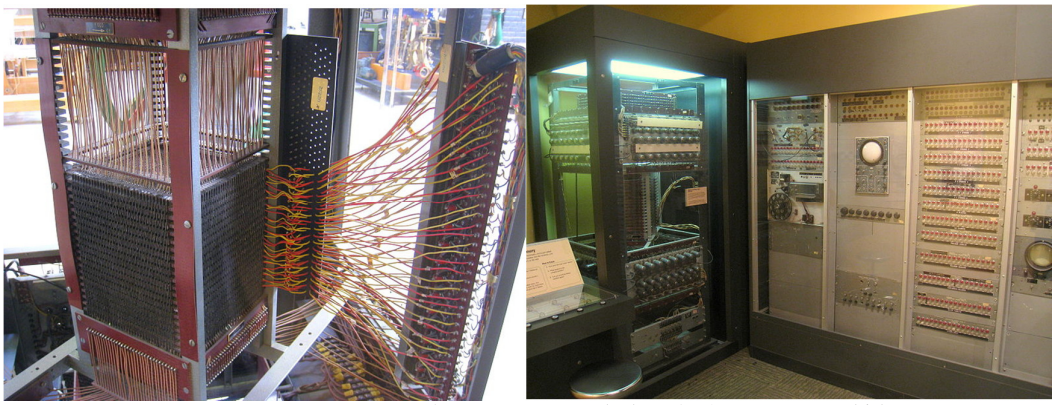


図 2-5：WHIRLWIND 1 磁気コアメモリー（左）と操作コンソール（右）

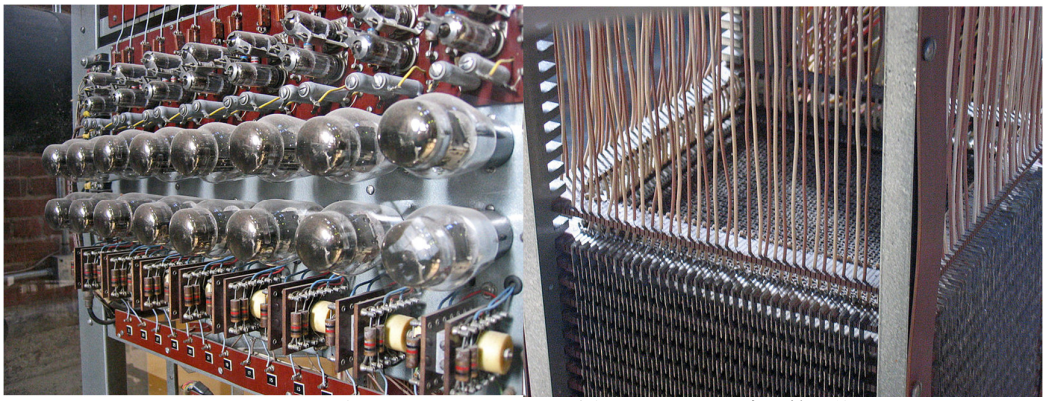


図 2-6：WHIRLWIND 1 磁気コア・メモリーの回路部。5 千本もの真空管が使われていた。

図 2-7：ウィリアムス管（左）、磁気ドラム・メモリ（右）

こうして、MIT で、最初の汎用電算機、WHIRLWIND I が作られ、先の戦闘情報システムのテストに使われます。しかし、このプロジェクトは金くい虫で、完成にも時間がかかったので、海軍は興味を失っていき、開発プロジェクトも中止の危機に陥ります。しかし、幸いなことに､空軍が防衛システムとして興味を示し、改良機種の WHIRLWIND II が SAGE システムとして使われることになります。

第 2 次世界大戦で原爆が開発され、やがて米国の競争相手であったソビエトも原爆や水爆の開発に成功します。こうなると、ミサイル攻撃や原爆を積んだ敵国の飛行機が米国領空に侵入し、核攻撃を行うという可能性が出てきて、空軍は、米国領空侵入に対する防衛識別をスピーディに処理するという課題を抱えることになります。WHIRLWIND は当時最高速の電算機で、かつ、リアルタイム処理ができ、モニター端末から操作ができる機械だったので、空軍はそれに飛びつきました。MIT はリンカーン研究所を設立し、フォレスターはその初代所長になり、WHIRLWIND II の開発を推進します。

ちなみに、SAGE: Semi Automatic Ground Environment) air defense system は、1950 年代に導入され、真空管からトランジスターへの変換などの改良は行われましたが、その電算機の基本システムは変わらず、その後 25 年以上稼働し続けます。

フォレスターは､WHIRLWIND I と WHIRLWIND II というこの汎用電算機開発の過程で、デジタル式機械制御の技術を確立し、電算制御の一人者になり、RAM（ランダム・アクセス・メモリー）の技術を発明し、特許を取っています。この技術は、電算機での標準となり、その後 20 年以上使われ続けています。

WHIRLWIND II では、主記憶装置のために磁気コア・メモリーが開発されました。それまでは、主記憶装置にはウィリアムス管や磁気ドラム・メモリが使われていて、磁気ドラ

ム・メモリで 8,500 マイクロ秒のアクセスタイムが、磁気コア・メモリーを使うことで 8 マイクロ秒に短縮され、当時では最高速のコンピューターを実現しました。磁気ドラムスは、汎用電算機の補助メモリーとしても使われていて、私も 1960 年代後半に、電算機センターで学生アルバイトをしていた時に見た記憶があります。電気掃除機のような形状で、結構重く、キャスターでごろごろ転がして運びました。

また、処理も、それまでは 1 ビットづつ、48 ビット分とか 60 ビット分を直列処理していましたが、高速化のため、WHIRLWIND II では 16 ビット並列処理を行いました。他にも、それまではバッチ処理だったものをリアルタイム処理に変え、モニター端末処理ができるようにしました。これらによって、WHILWIND は当時としては画期的な電算機になりました。

この WHILWIND は、その後のコンピューターの基本的な構造になっていきます。まず、WHILWIND II は SAGE 用の電算機 AN/FSQ-7 として（多量）製造されることになり、RCA と IMB が競合し、IMB が受注に成功します。IBM はこの受注で得たリアルタイム技術を SABRE システム（航空機のチケット予約システム）で商用化します。IBM の SABRE システム（航空機のチケット予約システム）は、IBM の担当技術者とアメリカン航空の社員がたまたま隣り合わせの飛行機の席に乗り、そこでアメリカン航空の座席予約の悩みを聞いた IBM の担当者が、開発を持ちかけ、成功したという逸話があります。このアメリカン航空のオンライン予約システムは、そのシステムに繋がるホテルやレストランの予約も同時にできるしくみで、1960 年から稼働し、その後、このシステムの成功を知った他の航空会社もシステム開発を行い、1980 年代から、他の航空会社とも連結し、AA 以外の航空会社の便も予約できるようになりました。AA はそれまではどちらかと言えば UA や PanNam などに比べ売上が低迷していましたが、航空券予約ではアルファベット順に航空会社のフライトが端末表示されるので、どうしてもトップに来る航空会社のフライトが優先的に選ばれることから、AA はどんどん業績を改善し、トップに躍り出ることができるようになったそうです。

Whirlwind には約 5000 本の真空管が使われていました、これをトランジスター化する作業がケン・オルセンによって行われ、新しい機種 TX-0 になりました。それを基に TX-1 が計画されましたが挫折し、規模を縮小して TX-2 が完成しました。ケン・オルセンは途中でプロジェクトを抜けてデジタル・イクイップメント・コーポレーション社（DEC）を設立し、TX-0 と TX-2 のコンセプトを集め DEC の PDP-1 を完成させました。DEC のミニ・コンピューターと呼ばれるこれらの機種は、科学技術用や工業用の計算をさせる機種として一世を風靡し、その電算機の設計思想は現在の PC にも引き継がれています。電算機メーカーは興亡が激しいので、初期のメーカーはほとんど生き残っていないようですが、IBM、UNIVAC などの大手汎用機メーカーと並び、DEC も科学工業用ミニコン・メーカーとして大手になり、この系列からクレイなどのスーパー・コンピューターのメーカーが生まれていきます。

しかし、1956 年までいろんなプロジェクトを率いてきたフォレスター自身は、プロジェクトをいろいろマネージしてきた経験から、技術的な問題よりも経営的な問題の方が大変という経験を持ち、技術開発よりもむしろ経営に感心を向けるようになります。丁度そのころの 1956 年に、新しく創設された MIT スローン経営大学院に、工学、特に電算機を経営に応用した科学的経営の研究を行うということで教授として迎えられます。 MIT スローン経営大学院は、工学的・科学的経営学を研究し、教えるために、GM の社長であったスローンの資金提供によって設立された経営大学院です。正確には 1952 年に MIT スクール・オブ・インダストリアル・マネジメントとして開校していますが、工学的・科学的経営学を研究

し、教育するビジネス・スクールとして、1957 年、MIT スローン・スクール・オブ・マネジメントと改名し、スタートします。

3) Industrial Dynamics, 1961

I) インダストリアル・ダイナッミクス

SD は、1950 年代の GE のケンタッキー工場経営の研究から始まります。当時、GE のこの工場経営者は､労働者の雇用サイクルが 3 年周期で変動し安定した雇用ができないこと、そして、これはビジネス・サイクルで、景気がいいので他に労働者が行ってしまうとか、景気が悪いので応募者が多く、余計に雇用したといったことではなく発生することに悩んでいました。フォレスターは、これは外部要因で起きるのではなく、内部構造で、雇用や解雇の意思決定メカニズムから引き起こされるものだということをストックとフローを使って解明しました。

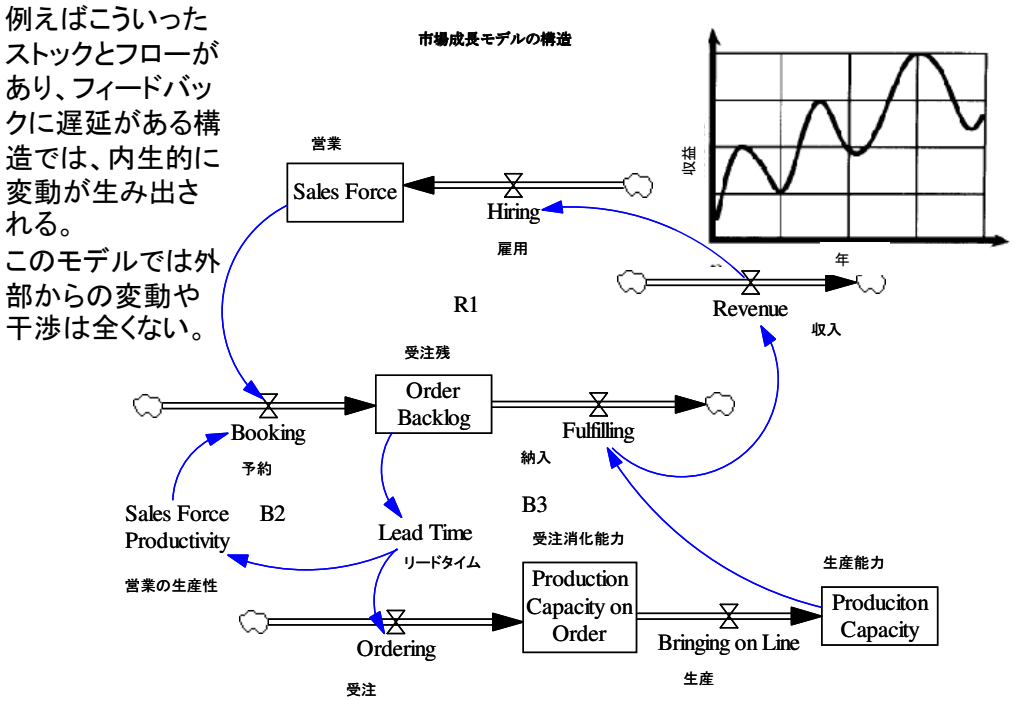


図 2-8：内製変動

例えば、図 2-8 はよく知られている雇用と生産に関するモデルですが、このモデルでは、外部変数が一切無いモデルとなっています。従って、変化は外部から与えられて起きているわけではありません。まず、予約を受けてから、受注残によって時間遅れが生じ、そこで変動が生まれます。生産とそれに伴う収入は傾向としては増加しますが、変動します。生産とそれに伴う収益が変動するので、雇用も当然ながらその変動を受け、変動します。雇用が変動すれば、受注残での時間遅れを伴い、さらに生産での時間遅れを伴いながら、さらに雇用変動が増強されます。こうして、工場側が雇用調整を行なわなくとも、システムの構造から、雇用の振動が生まれます。

図 2-9：インダストリアル・ダイナミックス（左）とシステム・ダイナミックス入門―複雑な社会システムに挑む科学（右）

この時は電算機を使って行ったものではなく、手描きのモデルを使った解明でしたが、1950 年後半から 1960 年前半にかけて電算機を使って解析しようということになりました。この作業は、フィレスターの弟子が実施していきます。まず、1958 年、Richard Bennett が、最初の SD 言語、SIMPLE: Simulation of Industrial Management Problems with Lots of Equations を開発します。続いて、1959 年、Phyllis Fox と Alexander Pugh が、SIMPLE を改良し、最初の版の DYNAMO 言語を開発します。DYNAMO は DYNAmic Models の略です。その後この DYNAMO はいろいろ改善され、また、さまざまな電算機に搭載できるようになっていき、1980 年代前半まで、SD は DYNAMO によってモデルを作り、電算機にかけてシミュレーションを行っていました。ちなみに、Pugh は、PA コンサルティングという、最初の SD を使った経営コンサルを行うコンサルティング会社を設立しています。

II) 日本でのインダストリアル・ダイナミックスの普及

日本では、1967 年に、坂倉・渡辺著で、「インダストリアル・ダイナミックス」が出版され、これが最初の書籍での SD の紹介になります。当時は、SD とは呼ばれていなく、インダストリアル・ダイナミックスと呼ばれていました。

まず書籍関係ですが、フォレスターの著書は主に小玉陽一先生によって翻訳されています。しかし、「インダストリアル・ダイナッミクス」だけは、石田先生が訳しています。

・「インダストリアル・ダイナッミクス」－石田・小林訳、1972 年
・「アーバン・ダイナミックス」－小玉訳、1970 年
・「ワールド・ダイナミックス」－小玉訳、1972 年
・「成長の限界」－大来監訳、1971 年

フォレスターが 1961 年に出版した Industrial Dynamics は、J.W.フォレスター (著)、石田晴久、小林秀雄 訳、「インダストリアル・ダイナミックス」紀伊国屋書店、1971 年として、紀伊国屋書店から出版されています。翻訳者の石田先生は、イリノイ大学の大型コンピュ

ーター・センターに留学していて、東京大学に戻り、東京大学大型コンピューター・センターを立ち上げていました。先生の話では、最初、友人の小林先生が翻訳していたが、なかなか進まなく、それを見かねて石田先生が翻訳を完成させたとのことでした。図 1-9 に表紙の写真を掲げています。私は、亀山先生の蔵書をコピーさせてもらいましたが、今でも古本屋で入手できるそうです。

2 冊目の Urban Dynamics、3 冊目の World Dynamics は小玉先生が翻訳しています。メドースの Limit to Growth は、大来先生が、ローマ・クラブの理事を務めていた関係から、コメントを書き、翻訳の監督を取って完成させたもので、折からの石油危機というタイミングもあり日本でも大ベストセラーになりました。

SD の解説の本は：

・「インダストリアル・ダイナミックス」－坂倉・渡辺、1967 年
・「インダストリアル・ダイナミックスの基礎理論」－渡辺、1969
・「インダストリアル・ダイナミックス入門」－坂倉、1971
・小玉 陽一　(著) 、「システム･ダイナミックス入門―複雑な社会システムに挑む科学 」、講談社ブルーバックス (B‐557)、1984

いずれも現在は絶版になっています。最後の小玉先生のブルーバックスの本は、私は松本さんから借りて読ましてもらいましたが、一時期、神田の古本屋で 1 冊当り 100 円で大量に売られていたそうです。松本さんが、日本 SD 学会の事務局長時代、日本 SD 学会で所有し、販売していないかという問い合わせを何度も受けたそうです。図 1-9 に表紙を掲げておきました。

日本では、1960 年代末から 1970 年代初頭にかけて、日科技連などを中心に盛んに SD の企業導入のための講習が行なわれていて、先の小玉陽一先生などが講師になって、SD の紹介を行っています。ただ、当時は、インダストリアル・ダイナッミクスで SD の名称になったのは 1972 年以降のことです。

また、IBM、日立、NEC などの電算機メーカーは、SD の企業導入事例集を作成し、顧客に配布しています。IBM は季刊の広報宣伝雑誌で、日立と NEC のものは、ユーザーに配布用の簡易製本の形でまとめていて、1990 年代に、かって日立や NEC で SD のシステム開発に携わっていたという人を招いての研究会で、講師が持参したものを見せてもらいました。

日科技連による SD セミナーですが、「日科技連システム・ダイナッミクス研究委員会」が設立され、この研究委員会によって、システム・ダイナッミクス・セミナーが以下のように実施されています。

・1971 年：第 1 回目－この当時は、「インダストリアル・ダイナミックス・セミナー」
・1972 年：第 2 回目－この年から「システム・ダイナミックス・セミナー」に改められる
・1973 年：第 3 回

この日科技連システム・ダイナッミクス研究委員会の委員・講師は：

・運営委員長	渡辺　茂	東京大学教授・工学部機械工学科
・運営委員	小玉陽一	日本システム・ダイナッミクス研究所長
	丸田正樹	いすゞ自動車（株）・企画本部電算室主査
	渡辺一司	光洋精工（株）・経営調査室長兼東京理工学研究所長
	上田慶四郎	（株）大丸・本部システム推進室権経理本部付課次長
	大沢　光	たばこ総合研究センター・研究員
	宍戸俊一	日本電気（株）・情報処理システム本部第 2 共通システム技術課

堀比呂志　　関西電力（株）・企画部次長
といったメンバーでした。

ちなみに、1973 年実施の財団法人日本科学技術連盟主催の、「第 3 回システム・ダイナッミクス・セミナー」の内容ですが：
（前期）－SD 技法の手ほどきを受ける
・システム・ダイナミックス概論：システム・スタティスティックからシステム・ダイナミックスへ－渡辺茂
・SD の基礎 I － システム観察からフロー・ダイアグラムへ－小玉陽一
・SD の基礎 II－ 演習（フロー・ダイアグラムの作成まで）－丸田正樹
・SD の基礎 III－演習（ダイナモ法的式の作成）－丸田正樹
（中期）－SD の典型的な事例を分析・評価する
・事例研究 I － たばこの世界モデル－大沢光
・事例研究 II－ 環境モデル－堀比呂志
・事例研究 III－流通・在庫モデル－宍戸俊一
・事例研究 IV－ピック・サイクル・モデル－宍戸俊一
・事例研究 V －資金計画シミュレーション・モデル－上田慶四郎
・文献紹介 － Dynamics of Commodity Production Cycles (Dennis Meadows)－小玉陽一
（後期）－演習問題を自ら解いてみる
・応用演習 I － 企業モデル－小玉陽一
・応用演習 II－ 生産・在庫モデル－丸田正樹
・応用演習 III－合板価格モデル－小玉陽一
といった内容になっています。

こうした熱心な SD 啓蒙活動により、関西電力が電力モデルを構築し、電電公社(NTT)など大手企業が軒並み SD を導入していて、企業が抱える在庫問題などの問題を、SD を使って解決しようとしました。日立や NEC の事例集をざっと見た限りでは、在庫問題などは、MIT で課題としていろいろ研究されていたので、それをどう日本で適用するかといった内容が主であるという感想を持っています。

日本でも 1970 年代初頭には SD が大学での OR の事業の中で取り上げられていて、私が興味半分で参加した OR の授業では、SD として適正在庫の問題が取り上げられていました。ただ、私自身は、GPSS による待ち行列のシミュレーションの事例の方が、インパクトが強く、当時は SD に興味を示すことはありませんでした。非常に残念なことです。日本における大学での SD の講義は早稲田大学他で行われ、1960 年代後半から 1970 年代初頭にかけて、経営工学部（あるいは経営工学科）の創設が盛んに行われ、経営工学部（経営工学科）でインダストリアル・ダイナッミクスの授業が行われています。早稲田大学での授業では、LP：線形計画法、待ち行列などと共に OR、さらには工学手法として SD も紹介され、当時は在庫モデルなどが主に SD モデルの例として取り上げられています。これも、しばらくはインダストリアル・ダイナミックスという名称で講義が行われ、SD になったのは 1972 年以降からです。

最後に日本での SD 言語について解説を行っておきます。1980 年までは、大型機で DYNAMO を FORTRAN に翻訳し、FORTRAN を実行するタイプが一般的で、IBM、富士通、日立、NEC の汎用機で稼働しました。DYNAMO が実行できる機械が限られていて、IBM などでは、先に予約し、IBM 計算機センターに予約した日時に出かけていって、パンチしたカードをかけて実施していました。大学以外では、SD のシミュレーションを実施するとなると、こういった形でないと日本では実施できなかったと聞いています。また、大学で

も DYNAMO を走らせられる電算機を所有しているところは少なく、さらに、明治大学の島田先生によれば、富士通の機械と IBM の機械では同じ DYNAMO を走らせても微妙に計算結果が違うこともあったようです。

この点、米国の、例えば MIT やダートマス大学、アリゾナ大学などではかなり自由に学生が電算機を使うことができ、さらに、卒業生が卒業後も、必要であれば、卒業した大学の電算機を使うことが可能だったそうで、こういった環境の違いが 1980 年代に日本では SD が衰退していった理由の一つだったのではないかと思っています。

その後 1980 年代に、DYNAMO を BASIC に翻訳し、BASIC を実行するタイプが、小玉陽一先生、小林先生によって開発されています。小林先生のものは、DYNAMOP-III と呼ばれ、PC 上で稼働するもので、この小林先生のものは、その後、EXCEL のマクロで動くものも開発されています。

ただ、DYNAMO は、等式方式でグラフィック・インターフェイス方式ではなく、最近のユーザーは、グラフィック・インターフェイス方式の方がモデルを作りやすいでしょう。もっとも、連立微分法的式に慣れている人にはこちらの方が分かりやすいと思われます。

現在では、その後は日本語が使えるグラフィック型の Stella/ithink、Powersim、Vensim、そして、エージェント型の AnyLog、SimTaKN＋などが出回っています。

4) Urban Dynamics、1969

I) アーバン・ダイナッミクス

前ボストン市長 John F. Collins が MIT の都市問題研究の授業の講師に招かれ、都市問題に関する講座を持つことになりました。John F. Collins の MIT での研究室がたまたまフォレスターの隣の席で、そのため、Collins とフォレスターはしょっちゅう会話を交わすことになり、そのやりとりの中から、SD を年問題に応用しようという試みになり、1969 年にアーバン・ダイナミックスとして完成します。

この本の中で、フォレスターは、なぜ、都市を改善しようとする政策がうまくいかないのか、なぜ、都市の状況は悪化する一方なのかを解明していて、例えば、低所得者用集合住宅建設は、貧困層地域の固定化を招き、貧困層が都市中心部を占めることにより、都市開発が停滞するというマイナス現象が現れる一方、低所得者でも住める住宅開発は就業機会をもたらし、収入が増えることで、都市全体としての住民の生活性向は、統計上、上昇するというプラスの現象をもたらします。従って、都市開発では正の効果も負の効果も複雑に関係してくることになります。

このアーバン・ダイナミックスの出版は、地域開発関係者の関心を呼び、その延長として、ローマ・クラブから、地球問題への解明をモデリングによって解明するという要請を受けることになり、「成長の限界」に発展していきます。

II) 日本でのアーバン・ダイナミックスの普及：

Urban Dynamics はジェイ・W.フォレスター (著)、小玉 陽一 (翻訳)、「アーバン・ダイナミックス ― 都市のシステム構造と動的挙動モデル」、日本経営出版会、1970 年として出版されて、発売されていますが、現在絶版です。

日本では、東京工業大学、工学部、都市工学科で教えられていましたが、先生の流出で、今では教えられていないと聞いています。

日本でのアーバン・ダイナッミクスの普及では、1970 年代後半から 1980 年代にかけて、地方自治体が SD モデルを構築しはじめていることが注目されます。これらのモデル構築では、A)学会や研究会、大学などが研究を目的として開発したもの、B)自治体が、大学や電算機メーカーなどの支援を得て開発したものの大きく 2 つに大別できます。まず、A)の学会などが主体で構築したものでは、OR 学会が、近頃 OR ではやっている SD を使って自治体モデルを開発してみようという学術的、実験的な試みで、埼玉県モデルを作っていて、

OR 学会の学会誌に特集号として、その内容が紹介されています。

B)のものでは、自治体が、自分自身が抱えている問題に対し、中長期的な政策を模索したもので、例えば、滋賀モデルは、汚染が進む琵琶湖を抱えていた滋賀県が IBM の支援を得て開発したもので、日本で最初の実務的な環境モデルとなっていますし、その後の中性洗剤使用制限令などの政策に繋がっていく政策の検討が行われています。千葉県モデルは、東京側は人口が急速に増え、社会サービスが追い付かなく、他方、茨木側は人口が急速に減り、過疎化に直面するという 2 面性に対する政策を模索したものです。京都市モデルは京大が開発したもので、交通と土地開発という開発需要の一方で京都の文化的環境を守るというジレンマに対する政策を模索したものとなっています。

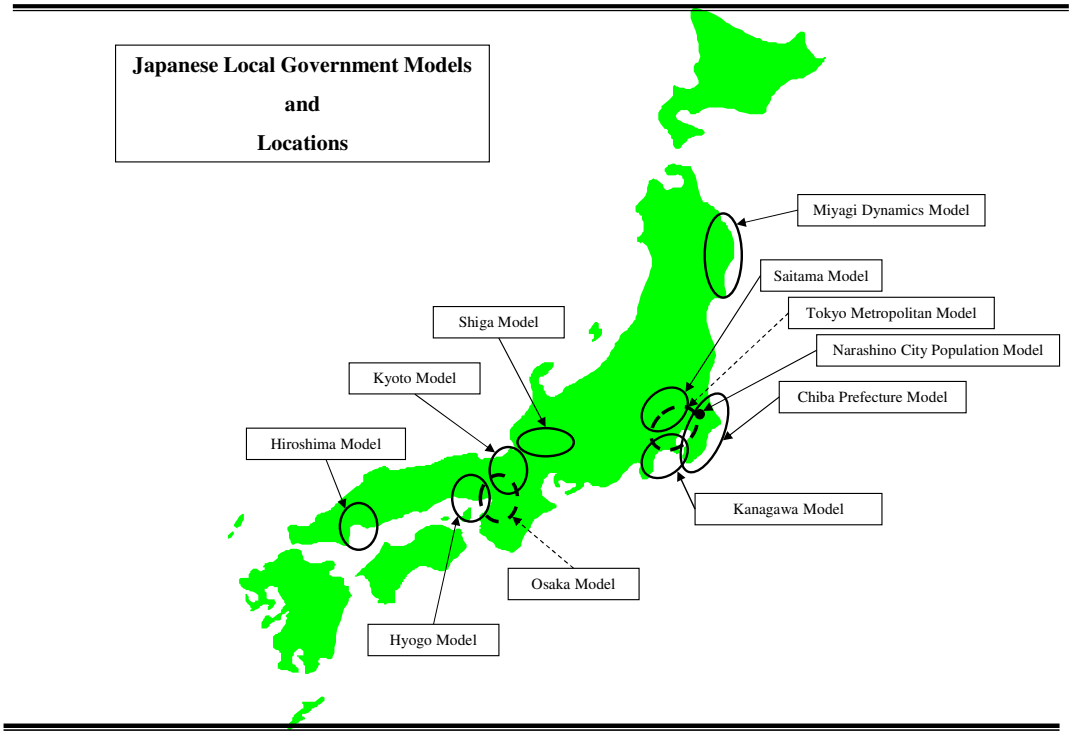


図 2-10：自治体モデル

1970 年代～1980 年代前半にかけて行われた日本の地方自治体のモデルには以下のようなものがあります。

・宮城県（1977 年）
・埼玉県（1975 年、日本 OR 学界）
・千葉県（1980 年、日本長期信用銀行）
・首都圏モデル（1976-1977 年、1981 年島田先生他）
・習志野市人口モデル（1982 年、千葉工大）
・神奈川県
・滋賀県（1977 年、環境モデル）
・京都市（1974 から 1976 年、交通及び土地利用モデル）
・大阪府（1974 年）
・兵庫県（1973 年）
・広島県(1980 年)

・津市（1995 年、今泉先生）

当時の考え方や時代精神、問題に対する捉え方の制約があるので、しかたがないことですが、第一次産業を中心とする県（宮城県など）は、人口減少、高齢化による地域経済の減速を問題視していました。また、人口集中都市を近くに抱える県（埼玉県、千葉県、神奈川県など）は、急速化する人口増加地域とやはり急速化する人口減少地域という問題を抱えていました。大都市を抱える都道府県（大阪府、京都市など）は急激に進行する都市化問題にやはり危機感を抱いていました。また、滋賀県は琵琶湖の汚染問題を抱えていました。いずれもこういった問題を抱えての長期的な県の将来像を模索していて、将来像を描くことに関心があり、報告書を読む限りでは、いろんな政策を当てはめた場合にどうなるという細かい政策検討にはあまり活用されていないような印象を持っています。

また、ほとんどが純粋な SD モデルではなく、計量経済モデルとのハイブリッド・モデルである点も現在から見て奇妙に思えます。多分､SD を研究する経済学者がほとんどいなく、SD の経済モデルのことがよく分からなく、この部分は計量経済モデルで作ってしまったのだと思われます。そのため、実測値と比べると、人口などの SD モデルで計算した予測値はほとんど合っているのに、経済の予測値は大きく違っています。

例えば宮城県モデルですが、基準年は 1975 年で 50 年間をシミュレーション計算しています。そこで、20 年後の 1995 年の実測値と比較してみたのが、表 2-1 です。人口はほぼ合っていますが県民総生産など経済関係の将来計算値は大きく違っています。人口などの部分の SD モデルは、典型的な SD のパイプライン構造のモデルとなっていますが、マクロ経済モジュールは計量経済モデルで、その両者を合わせたハイブリッド型のモデルで、しかも、人口などの SD モデルから経済などへのマクロ・モジュールにはフィードバックがありません。このモデル構造のために、予測値が大きく違ってきたものと考えられます。

表 2 Miyagi Dynamics Model and Statistical Data（Review and validation of early Japanese local government SD models より）

	Simulation Standard	Simulation Case I	Statistics
Population (thousand)	2,783	2,786	2,338*1)
Population age 0-14	21.9%	21.9%	16.5%
Population age 15-64	67.2%	67.2%	68.5%
Population age 65-	10.9%	10.9%	15.1%
Household (thousand)	876	876	787*2)
Population Density*3)	381.7	382.2	321
Labor population *4)	1,285	1,287	1,164
Agriculture	10.9%	10.8%	8.2%
Industry	29.6%	29.8%	27.5%
Services	59.5%	59.4%	63.9%
GNP (100 million Yen)	42,446	42,434	64,000*5)
Agriculture	2,025	2,021	2,699
Industry	13,420	13,446	36,923
Services	27,000	26,968	26,815*5)

*1) population in 1996
*2) household in 1997
*3) person per square kilometers
*4) thousand
*5) GNP in 1994
*) GNP of simulation use price index in 1970
*) Standard case consider the limitation of green area and try to keep more than 75% but CASE I do not consider any conditionality of green rate.
*) Consumer index price in 1975 is 55.3 as 100.0 in 1997 seem to almost double.

表 2-1：宮城県モデルの予測値と実測値の比較

残念ながら、1980 年代後半からは、自治体がモデルを構築し、政策を仮想実験して効果を確かめながら実施するという試みは下火になっていったことは非常に残念ですし、今ではほとんど顧みられないことも非常に残念です。1999 年に、先の、自治体モデルによる予測値と実測値の比較を含むモデル検証を行った際に、その後、SD モデルが開発した自治体でどのように使われているかというアンケート調査を実施しましたが、どの自治体からも回答をもらえませんでした。

III) 日本における業界・政府または政策への SD 応用(1970 年代～1980 年代前半)

自治体だけではなく、政府機関に対しても SD モデル構築や SD を使った政策検討の試みが 1970 年代から 1980 年代にかけていろいろ行われています。

運輸省関係
・1973 年：「自動車の都心乗り入れに関するシステム分析」
・1976 年：阪神高速道路公団・京都大学工学部：「料金収入予測に関する調査研究」
通産省関係
・1972 年：「中小商業の効率化に関するシステム分析」
・1978 年：「新産業の発展パターンに関する調査研究」
医療関係
・1976 年：「システム・ダイナッミクスと医療システム」
・1977 年：「日本の医療のアクロモデルの作成に関する理論的研究」
・医科歯科モデル（島田先生）
大学関係
・大学モデル（島田先生）
・1985 年：「システム・ダイナッミクス法による大学モデルの構築と分析(1)－フロー・ダイヤグラフと BASIC 方程式の設定」（工学院大学）

その後、ポージーの松本さんが、東京都から、府中空港の民間と米軍の共同利用の研究で、私も、2000 年代初頭に経済産業省から 1 件受注を受けて SD モデルを開発しました。また小林先生に依頼し、JICA からの受注で 1 件 SD モデルを開発しています。私自身は、開発途上国での社会開発で SD モデルをいろいろ開発しています。松本さんは、先のもの以外にもいろいろ受注していると思いますので、この分野に関しては、いろいろ SD モデルが開発されていると思われます。

しかしながら、いくつか参加した政府の諮問委員会での政策検討では、モデルを作ってシミュレーションするというよりは、有識者を集め、意見を聞き、まとめるというやり方がされていて、日本では、こういった手法はなかなか試みられないのだという印象を持っています。

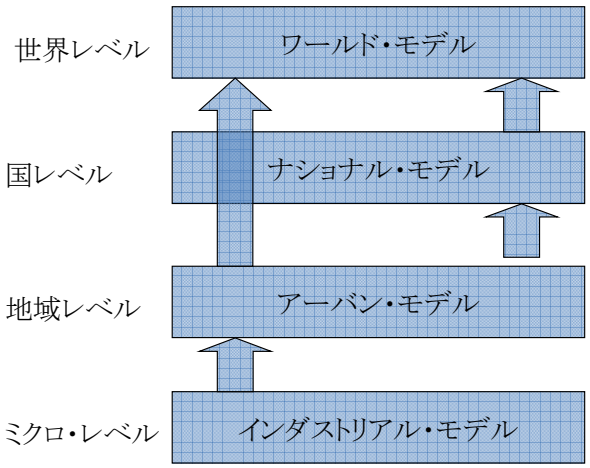
IV) その後の世界での発展：

成長の限界の世界モデルなのか、Urban Dynamics の都市開発のモデルから発展したものなのかが難しい部分がありますが、1980 年後半から国連、世銀などにより、地域開発、社会経済開発などのモデルが開発され、社会開発に活用されていきます。

例えば、国連地域開発センター(United Nations Center for Regional Development)は、1998 年に Pangaea という、ある架空の国を取り上げ、いろんな政策でどう国造りをするのかをシミュレーションを通じて学ばせる試みを行っています。パソコン・ゲームにも、「シム・シティ」という、どう都市を作っていくかというゲームがあり、戦争などがあって少し違うのですが、「信長の野望」などという、どう国造りをしていくかというものもあるので、大ざっぱには似たようなものと言えるでしょう。もっとも、Pangea の方は、真面目に、経済政策をどうするかなど、実務的なものであることは言うまでもありません。ただ、地域開発を、SD を使って計画することをゲーム感覚で学ぶものという観点、経営フライト・シミュレーター的感覚は面白いし、将来の国造りの担う、若い官僚の教育・訓練という意味では有益と考えています。もっともこの Pangea 教材の残念な点は、まだグラフィック・インターフェイス型の SD 言語が出回る前のことなので、DYNAMO 言語によって記載されたモデルを DYNAMO 言語で修正していくというやり方になっています。「シム・シティ」のような水準のものがこの分野で開発されるといいと思っています。

世銀でも、1990 年代に Agenda21 というメニューの中で、Threshold 21 というプロジェクトとしていろんな国の SD モデルが開発され、中国、ブラジルなど約 40 ケ国のモデルがすでに開発されています。中国は GM がスポンサーかつ開発の中心になり、車社会化を念頭に置いたモデルになっています。全部の国ではないのですが、国によっては、Threshold 21 のモデルがあり、国家レベルで政策検討が可能なので、それを前提に、途上国での外国援助による地域開発では、Threshold 21 のモデルを前提に、それを少し変える、あるいは一部を使うなどで、当該開発途上国での開発問題に取り組んでいます。注 2-1)

ただ、フォレスターは、世界モデルの発表以降、意志決定は国家レベルで行われ、国際的なレベルでは行われないことを理由に、米国の National Model 開発を試みますが、挫折してしまいます。



地球規模に係る政策は国レベルで決定されるのだが、SDではこのナショナル・モデルの問題をすっ飛ばしていきなり、アーバン・ダイナミックスからワールド・ダイナミックスにジャンプしてしまった。このことはフォレスターも意識していて、ワールド・ダイナミックスの発表後、ナショナル・ダイナミックスに取り組むが未だ完成していない。このあたりの事情などは亀山先生がMITを訪問したりフォレスターに合って話しを聞くなどいろいろ調査して、JSD月例会で発表されている。

図 2-11：フォレスターのモデルの試み

インダストリアル・モデルが企業レベル、つまりミクロ・レベルで、次に、アーバン・モデルで、地域というセミ・マクロを取り上げることに成功し、その後、ワールド・モデルで、地球規模の大マクロ・レベルを取り扱うことに成功したので、国家レベルというマクロ・レベルも彼自身の手で SD 化を成功させたかったのでしょうが、成功できなかったことは、彼としては非常に残念なことだったと思います。

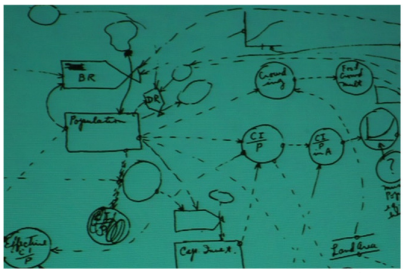
最近の SD 研究などを見ていると、国家モデルも、先進国のものでは、汎用的なものは複雑すぎて作れないし、例えば防衛と外交だけのモデルであっても、関係する国が多いので、スパコンなどでシミュレーションを実施するしかなく、本格的な国家 SD モデルの構築は飛躍的に難しいということが分かってきています。その点、開発途上国では、モデルに組み込むのは、隣接する国と、欧米の先進国だけで、しかも、先進国の政策や方針が大きく効いてきますので、モデルも単純にすることができます。開発途上国だから、ナショナル・モデルを SD で作ることができたのだとも言えます。フォレスターが、国家モデルを、それも一番複雑な米国を取り上げたことは、非常に無謀な試みだったと言えるように思われます。

5) World Dynamics、1970

I) ワールド・ダイナミックス

World Dynamics は、ジェイ W.フォレスター (著)、小玉 陽一 (翻訳)、「ワールド・ダイナミックス―システム・ダイナミックス(SD)による人類危機の解明」、日本経営出版会として、1972 年に出版されていますが、現在絶版です。

フォレスターは、Urban Dynamics の発表で、都市開発関係や社会開発関係者と知り合い、その関係で、ローマ・クラブの創立者と会います。ローマ・クラブに招かれ、ローマでローマ・クラブとのミーティングを行い、グローバルな持続可能性に関する議論を行います。そして、米国への帰国の飛行機の中で、ワールド・モデルの着想を紙ナプキンに描きます。



フォレスターが欧州からボストンへ戻る機中でナプキンに書きとめたワールド・モデルのアイデア

図 2-12：フォレスターが機中でナプキンに書き留めた World Model のモデルのスケッチ

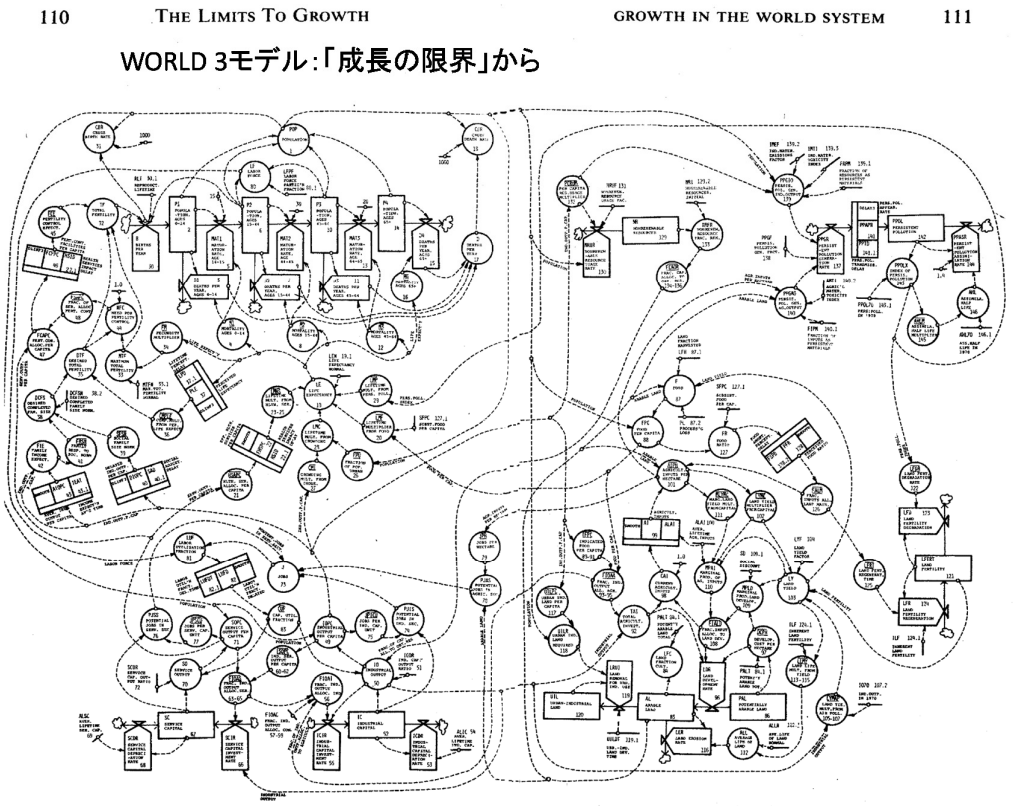


図 2-13：World Model 3 のモデル

このスケッチを基に、彼は World Model 1 を開発します。そして、この World Model 1 を改良し、World Model 2 を構築します。

II) 成長の限界

しかし、当時、Urban Dynamics 関係の相談などで謀殺され、この World Model 改良に十分時間を割けなかったフォレスターは、大学院生の Meadows たちにその仕事を引き継ぎます。1972 年、Meadows たちは、 World Model 3 を完成させ、これを使って、ローマ・クラブへ

の報告書を完成させます。「成長の限界」、原題 Limits to Growth として同年発表され、大きな反響を呼びます。報告に対して、批判、否定が多かったのですが、モデルとシミュレーションを使って反論したものはほぼゼロでした。

日本では、大来三武郎監訳で 1972 年に出版され、おりしも石油ショックで、将来のネルギー不安が高まる中で大ベストセラーになります。このダイアモンド出版の本はまだ絶版にはなっていません。1960 年代後半から SD は日本の実業界で知られていて、翻訳もほぼ同時出版に近く、早かったのが印象的です。内野先生は、大学に入る前に出版されたばかりのこの本を読んで SD を知ったそうです。

メドースは、その後、ほぼ 10 年毎に、「成長の限界」で述べたシミュレーション結果の検証やモデル改定を行っています。1991 年に Beyond the Limits を発表し、その時の版が、WORLD3-91 で Vensim や Stella での版が提供されています。メドース自身は Stella を使っていて、最新版は、彼にコンタクトを取れば、Stella の版を送付してくれます。

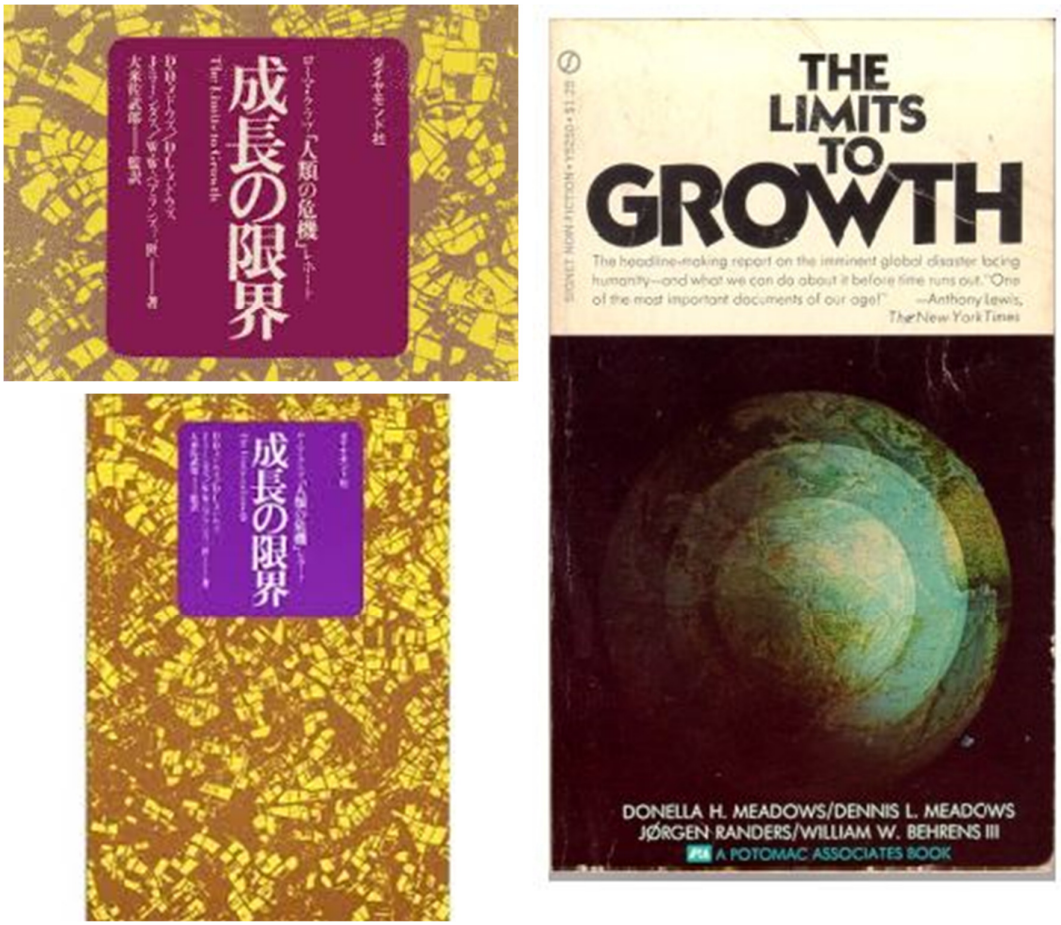


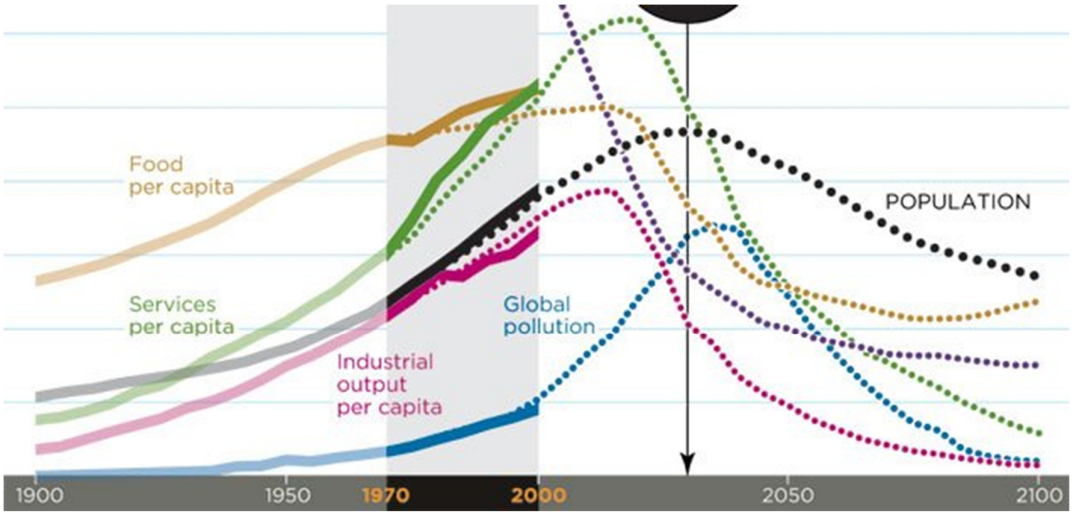
図 2-14：成長の限界の表紙

WORLD 3 モデルの Vensim 版は public/help/models/Sample/WRLD3-3 の中にあるので、Vensim をダウンロードする時、ヘルプがダウンロードされて、一緒にダウンロードしてくれます。ちなみに、Urban Dynamics も同じ Sample のフォルダー内にあります。

Stella/ithink 版は、モデル例の中にあり、HP からダウンロードできたのですが、最近は私は isee 社の HP を見ていないので分かりません。

III) 成長の限界のその後

World 3 のシミュレーション結果は、その後、約半世紀経過し、実データとの比較もできるようになり、概ね、成長の限界で予測した通りの経過を辿っていることがいろんな研究者の研究で明らかになってきています。図 1-15 はそのような研究の一つで、Smithsonian という科学啓蒙雑誌に掲載されたものです。



Smithsonianに掲載されたものだが、人口ピークを2040年としている。それはともかくも、このSmithsonianの指摘は、これまでの所、概ね、1972年の予測に沿った形で経過しているというもの。他方、Science, 9/19では、2040-2050年の人口ピークはなく、2100年には人口は123億人に達するという。

図 2-15：成長の限界の検証

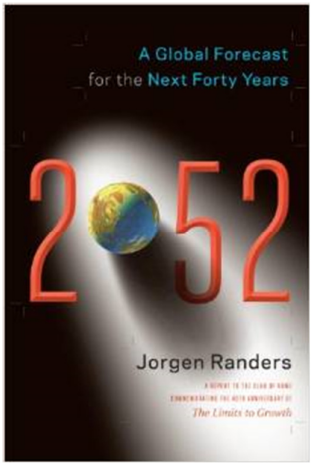


図 2-16：2052

「成長の限界」モデルは、メドースによって、現在でも検証や検討が継続されていますが、それと共に、成長の限界で共著者であった Jorgen Randers が“2052: A Global Forecast for the Next Forty Years, 2012 を発表しています。日本語訳では、「2052 今後 40 年のグローバル予測」ヨルゲン・ランダース(著)、竹中平蔵　解説 (その他)、野中香方子 (翻訳)、日経 BP 社で出版されています。

ランダースは、「成長の限界」で予測している 2050 年前後のピークアウトの直前、直後までの時期を扱っていて、その後の破局や混乱が起きるであろうと想像される 21 世紀末を取り扱っていませんが、それでも、彼の 2052 の著書の内容、特にエネルギーの部分は、私にはかなり楽観的すぎるように思われます。

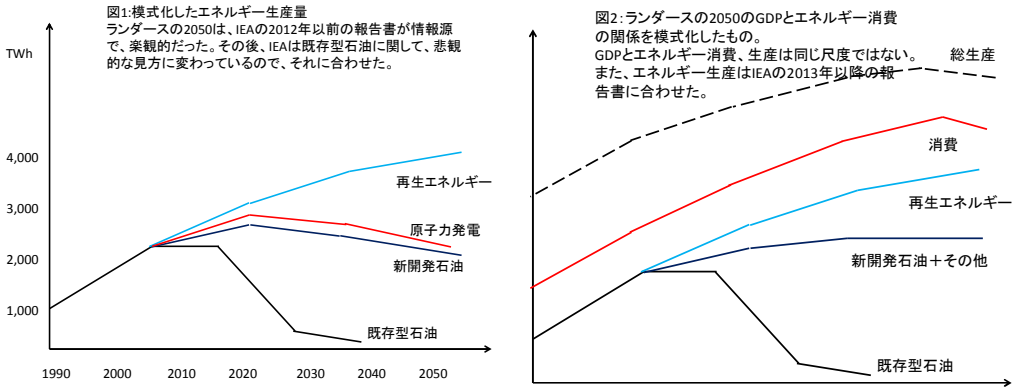


図 2-17：ランダースの 2052 の経済成長とエネルギーの伸び率の模式図

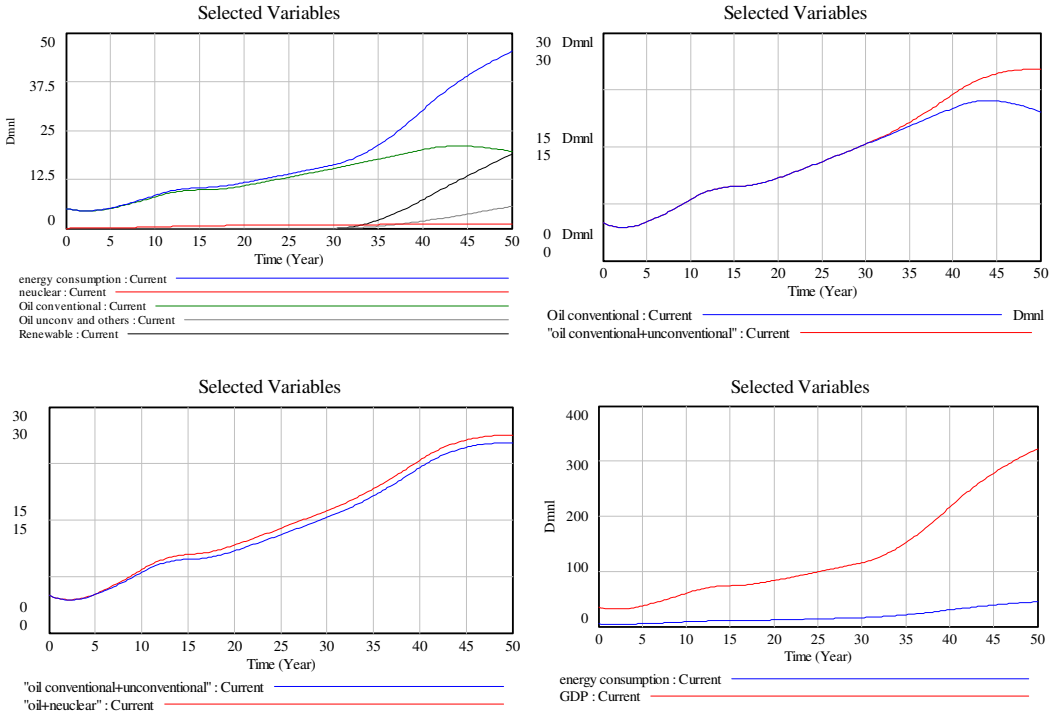
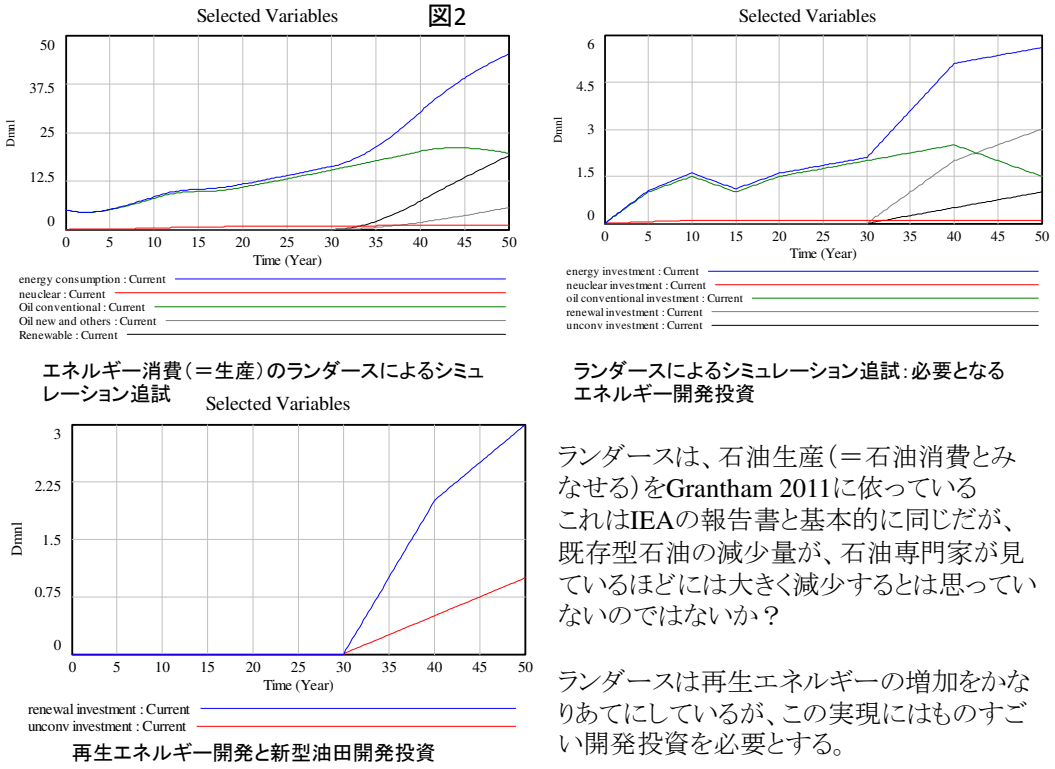


図 2-18：ランダースの 2052 でのエネルギーの伸び率の検証(1)

図 2-17 は、ランダースが著書 2052 の中で記載している経済成長と、それを支えるエネルギー生産を模式化したものです。その中で、既存型と呼ばれる石油などは、生産がピークを迎え、今後急速に減産していきます。しかし、経済成長を支えるためには、エネルギー効率を高めるだけでなく、エネルギー生産を増やしていく必要があります。既存型油田は急速に生産が落ち込み、さらに、ランダースは、原子力発電を減らす政策を進めるとして

います。既存型石油生産の落ち込みと、原子力発電の落ち込みを、新型の石油開発を進めながら、再生エネルギーを大幅に増やすことで、落ち込みを補って、エネルギー生産を増やすことができ、経済成長を支えていけるとしています。

図 2-18、2-19 は、私が彼の著書を読んで、疑問に感じて、モデルを作って検証してみたものです。かなり大ざっぱなモデルでの検証ですが、彼が主張するような経済成長を実現するためには、図 1-19 に示したように、急速かつ膨大な、再生エネルギー開発投資が必要であり、こんな投資ができるわけがないというのが私の感想です。



ランダースは、石油生産（＝石油消費とみなせる）をGrantham 2011に依っている
これはIEAの報告書と基本的に同じだが、既存型石油の減少量が、石油専門家が見ているほどには大きく減少するとは思っていないのではないか？

ランダースは再生エネルギーの増加をかなりあてにしているが、この実現にはものすごい開発投資を必要とする。

図 2-19：ランダースの 2052 でのエネルギーの伸び率の検証(2)

また、新規油田開発などをかなりあてにしている予測ですが、この投資もこんなにできるのか、さらには、仮にそれだけ投資しても、それだけ採掘できるのかというのが私の感想です。陸地での目ぼしい地域の石油探査はほぼ終わっていますので、今後、中東にあるような豊富な油田が発見される可能性は少ないでしょう。豊富な埋蔵量の深海油田が発見される可能性はありますが、技術的に採掘が難しく、また、コストも高いものについてしまいます。シェル・オイルなどはまだ陸地での採掘が豊富にできるとされていますが、コスト面でどこまで採算が合うのか不明です。技術開発で、エネルギー効率が改善されていくでしょうが、コストも高くなり、採掘がどんどん難しくなり、石油ビジネスは「規模の経済」というしくみでは、そうもうからない産業になっていくように思われます。軍事用など、金銭に糸目をつけない用途向けの生産やビジネスはあるでしょうが、脱石油化に向かっていった場合、石油産業はどんどんすたれていくように思われます。従って、ランダースが思い描く経済成長を、新型油田開発で実現できる可能性は、投資という面から見た場合、薄いように思われます。

再生エネルギーは、確かに、急激な集中投資を行い、技術革新を進めれば、予測した需要を満たせる可能性はありますが、これだけの投資ができるのか疑問ですし、仮に実現したとしても、新型油田開発が伸び悩むと思われるので、全体のエネルギー供給は、フラッ

トあるいは落ち込むと思います。従って、経済成長のピークは、エネルギーの制約から、もっと早まると思います。

「成長の限界」後は、地球規模 SD モデルの開発では、ジョン・スターマンの「温暖化ガス・モデル」が有名になりました。しかし、彼の熱意にも係らず、世界第 2 位の温暖化ガス産出国である米国は、まだ温暖化ガス削減条約には加わっていないことは残念です。

地球規模にまでは至りませんが、「成長の限界」から発展していった、持続可能性を追求したモデルが、地域開発、持続可能な地域開発、自然環境保護などの分野で開発されています。

IV) 日本での研究

私があまりこの分野に詳しくないこともあり、日本での SD のこの分野への適合事例をよく知らないのですが、関西電力の掘比呂志氏の作った環境モデルや滋賀県の滋賀モデルが 1970 年初期にすでに開発されていることが注目されます。

6) K-12、初等・中等教育への SD の適用

K-12 は、Kindergarten（幼稚園）から Grade-12（高校 3 年生）までという意味で、初等・中等教育を意味します。1973 年、フォレスターの指導教師で、上司でもあった Gordon 教授が、MIT を定年退職後、地元のアリゾナ州 Tucson 教育委員会に招かれ、教育委員になります。そこで、彼は、教育システムの問題に直面することになり、SD を導入して解決しようとし、その関連で、高校教師や教育委員に SD を紹介したのが、SD の初等・中等教育への適用のきっかけです。フォレスター自身も、この動きに賛同し、いろいろ支援を行っています。1980 年代には、この動きがいろんな先生の間に広まっていき、初等・中等教育に SD を取れた教材が開発され､SD を取り入れた授業が行われるようになっていきます｡そして、教材の普及を目的として CLE: Creative Learning Exchange が設立され、CLE の HP で教材や情報が公開されるようになりました。小学生用として、「変化の形」（Shape of Change）といった SD 教材が開発されています｡この教科書では､指数変化やロジスティック的変化など､変化に注目した教育を行った後に、システム思考を教えています。

高校生用には、Diana Fisher 先生の本が何冊か出版されています。Diana Fisher は、高校の数学の教師で、SD をうまく使って数学を、さらには SD を教えています。こういった、SD 教育に従事する先生たちの全国会議が 2 年毎に米国で開催されています。また、K12 での学生研究の成果は、SD 国際会議などでも紹介、発表されています。

SD の初等･中等教育への適用では､数学や理科などの科目を SD を使って教えるものと、ST/SD を科目として教えるものの 2 種類があります。

科目に ST を適用して教科を教えるやり方では、以下のような科目で、SD 教材が開発されています。

－数学
－理科
－社会
－英語（日本の国語）

一方、ST/SD でモデル開発などを行うという授業も行われています。

Stella/ithink の開発者、バリー・リッチモンドなどが、主に高校生を対象に、学校への銃の持ち込み、麻薬問題などの時事問題などを取り上げ、ST でどう考えるのかということを教えています。今でも米国で時々事件になりますが、生徒が学校へ銃を持ち込み、同級生を射殺するという事件や、高校で麻薬が取引され、麻薬中毒になる生徒の問題などが新聞に載ります。こういった事件は、学校側が禁止するだけではなかなか防止できません。リッチモンドは、どう考えるべきなのか、何が問題でそういった事件が起きるのか、教師や教育員会だけではなく、生徒や親もどう考え、向き合うべきなのかを、モデルを使って対

話し、解決方法を見出し、行動することを教えています。

7) その後のフォレスター

SD の開発者のフォレスターですが、現在でも現役の MIT の教授で、SD を学生に教えています。

・1972 年に IEEE 栄誉賞、
・1989 年にアメリカ国家技術賞を受賞
・1995 年、コンピューター歴史博物館フェローに選ばれた。
・2006 年、Operational Research Hall of Fame に選ばれた。

(2) エネルギー・モデル

1) エネルギー・モデルの開発に従事した SD の第一人者たち

テキストを読んでいて、SD の第一人者と呼ばれる人たちが多く、エネルギー・モデル開発に従事していた経歴を持っていることに驚かされます。以下は、テキストに載っていた、エネルギー・モデル開発に係ったことがある、SD の第一人者たちです。Sterman、Ford、Wolstemholm、Feedaman は SD 学会の最高賞であるフォレスター賞を受賞していますし、Ford、Lyneis、Radzicki は SD 学会の会長を務めています。Sterman、Ford、Morecroft、Coyle は SD に関する本を書いています。SD のメッカ MIT の教授で、いわば、SD 研究、SD 教育のトップにいる Sterman ですが、その経歴の始まりは、MIT で博士号取得後、エネルギー・モデル開発のプロジェクトに従事したことからだというから、いかにエンルギー・モデル開発が、SD の第一人者たちを育てたかが伺われます。

・メドース：最初のエネルギー・モデルの指導。彼は World 3 モデルと成長の限界で有名
・Sterman：MIT 教授で、Business Dynamics、温暖化ガス・モデルで有名
・Richardson：アルバニーで教授、Group Modeling で有名
・Davidsen：ベルゲン大学 SD センター長
・Morecroft：ロンドン・ビジネス・スクール教授
・Ford:ワシントン州立大学教授
・Wolstenholm：システム原型で有名
・Coyle：英国で SD を広めた。軍事などへの SD 応用、歴史への適用など新分野への SD 適用で有名
・Lyneis：CLE の理事、K-12 や優れた SD モデル普及に尽くしている
・Radzicki：WPI 教授、テキストの著者
・Tom Feedaman：Vensim 開発主任。多量の SD モデルや情報を集約した HP で有名（Tom Fiddaman‘s System Dynamics Library)

2) エネルギー・モデル開発のはじまり

エネルギー関係の SD モデル構築は、そもそもは、ローマ・クラブの依頼による成長の限界の報告のために作成した World 2 及び World 3 に起因しています。このモデルでは、天然資源は有限で、その消費が現在のように指数的に増加していくと、どこかで枯渇し、天然資源の枯渇が社会・経済の成長を阻害すると仮定しています。しかし、これに対して、いろいろ反論があり、天然資源を種類に分けて議論すべきというものもありましたが、いろいろ検討した結果、大まかな議論では、いろんな資源も天然資源で一括して取り扱ってもいいという結論になり、一括して、天然資源として取り扱い、天然資源全体では、やがて枯渇するとしています。

当時の米国の石油業界や専門家は、石油資源は無限という見方をしていて、それが定説になっていました。無限というのは正確ではないのですが、埋蔵量は膨大であり、消費が急速に伸び、それに合わせて採掘したとしても、100-200 年程度では埋蔵量はほとんど減少

しなく、従って、生産がピークアウトすることなどありえないと考えられていました。
しかし、Hubbert だけは、これに対し、石油資源が無限であっても生産がピークアウトすることを予言していました。1972 から 1973 年にかけて、MIT の大学院生だった Roger Naill が、この Hubbert の主張に基づき、石油と天然ガスの発見と採掘に関するモデルを、メドースの指導の下で開発しました。これが米国のエネルギー・モデルの始まりです。

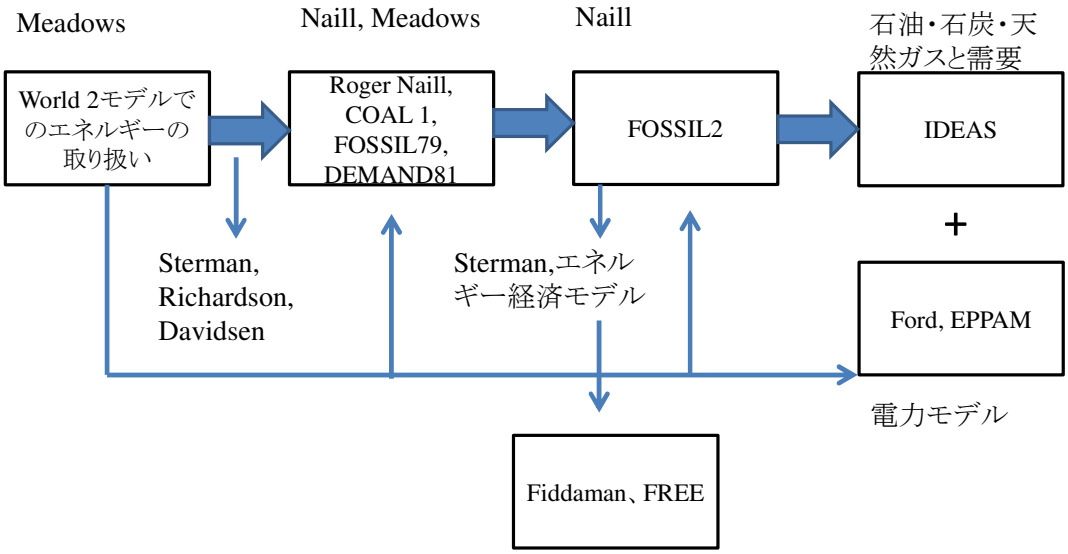


図 2-20：米国エネルギー・モデルの変遷

3) 当時の石油業界の頑迷な主張

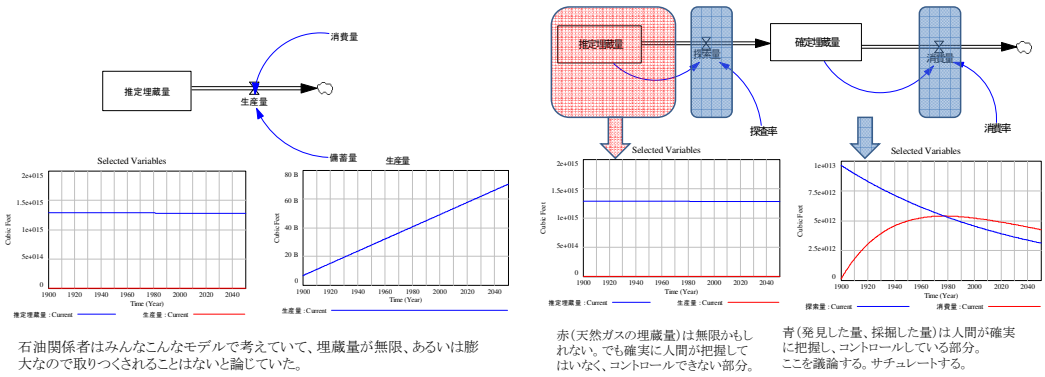


図 2-21：米国の石油業界の見方と Hubbert の見方

図 2-21 の左に示したのが、当時の米国の石油業界の、米国内に埋蔵されている石油及び天然ガスの見方をモデル化したものです。埋蔵量から生産され、消費され、一部備蓄されます。モデルの下に 2 つのグラフが示されています。右は消費を示しています。この場合、生産＝消費と考えても構いません。生産は急速に増加していますが、それでも、ストックである埋蔵量が膨大なので、埋蔵量と生産量を比べた左のグラフでは、ほとんどどちらも変化なく、並行しているように見えます。

図 2-21 の右のモデルは、Hubbert の主張を基に Naill が開発したものの SD 概念モデルです。Hubbert は、確かに推定埋蔵量は無限に近い膨大な量かもしれないが、推定埋蔵量が、探査によって確定され、確定埋蔵量になり、そこから生産されるというプロセスに注目し、探査される量、確定埋蔵量、生産量は有限で、その関係では生産量はピークアウトするこ

とがあることを示しました。やはり、2 つのグラフをモデルの下に示していますが、左の、推定埋蔵量と生産量の関係を見ると、推定埋蔵量が膨大なので、生産量と推定埋蔵量を絶対比較したこの図では両者は並行していて、何も変化がないように見えます。(膨大なものと微小なものを比較しているのでこうなる。) しかし、右のグラフに示した、探査量と生産量の関係では、探査量は減少し、生産量は 1970 年でピークアウトしています。

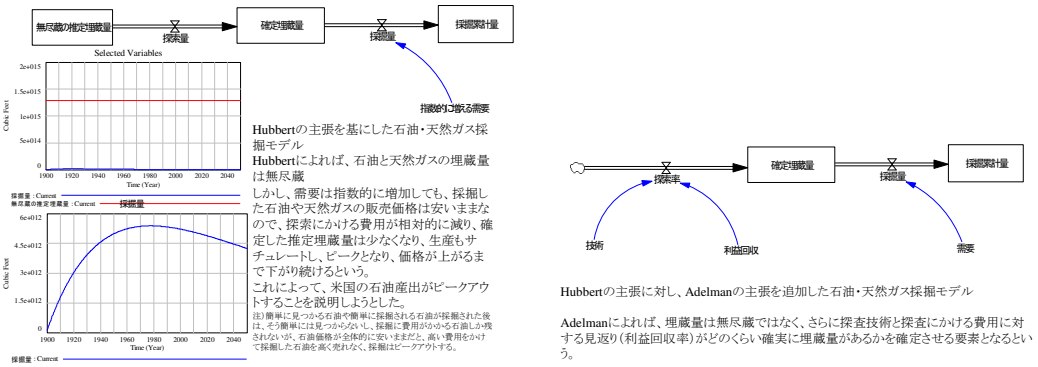


図 2-23：Hubbert のモデルと Adelman のモデル

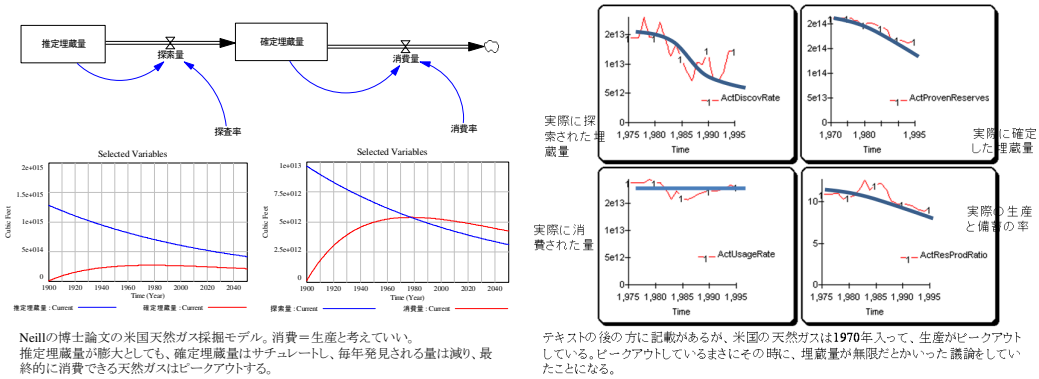


図 2-24：Naill のモデルと実際の米国の天然ガスの生産量の変化

Hubbert の 1956 年の論文によれば、石油と天然ガスの埋蔵量は無尽蔵と言えることは認めていて、しかし、需要は指数的に増加しても、採掘した石油や天然ガスの販売価格は安いままなので、探索にかける費用が相対的に減り、確定した推定埋蔵量は少なくなり、生産もサチュレートし、ピークとなり、価格が上がるまで下がり続けると主張しています。つまり、簡単に見つかる石油や簡単に採掘される石油が採掘された後は、そう簡単には見つからないし、採掘に費用がかかる石油しか残されないが、石油価格が全体的に安いままだと、高い費用をかけて採掘しても石油を高く売れなく、採掘はピークアウトするということだと思います。

さらに、Adelman が、Hubbert のこの主張に修正を加え、推定埋蔵量に注目すべきではなく、確定埋蔵量に注目すべきであり、その量は無尽蔵ではなく、さらに探査技術と探査にかける費用に対する見返り（利益回収率）がどのくらい確実に埋蔵量があるかを確定させる要素となるという主張を行いました。Hubbert とこの Adelman の主張を基に、Naille は図 2-21 右のモデルを開発し、このコンセプトを基にどんどんモデルを精緻化していきます。

繰り返しになりますが、図 2-24 左に Naille のモデルとそのシミュレーション結果を示しました。無尽蔵と思われる膨大な推定埋蔵量も、やはり膨大な確定埋蔵量と比べると、ス

ケールが合うので、減少していることが分かりますし、確定埋蔵量はサチュレートしています。探査量と消費量（生産量）を比べるともっと顕著で、探査量が減っているので、確定埋蔵量がピークアウトし、それ以上増加しなく、従って、生産量はピークアウトし、減少あるいは増加しなくなることが明確に分かります。実は、このストックを直列に 2 つ繋いだシステムは、普及モデルと呼ばれている形で、必ずサチュレートし、ロジスティク曲線か釣鐘型曲線になることが知られています。

図 2-24 右に、実際の米国の天然ガスの生産量を示していますが、1970 年になってから、消費量は変わらないのに、生産量がサチュレートし、下降しています。これは、探査量が下がり、確定埋蔵量が下がっていった結果です。政治的に必要と考え、強固な主張を行ったのでしょうが、実際に生産量が下がっていて、それを一番よく、かつ正確に知っていたはずの石油業界が、生産量が下がっているその真っ只中で、米国の天然ガスの埋蔵量は無限と考えていいと頑迷に主張していたのですから、彼らは一体何を見て、何を感じていたのでしょうか。

1990 年代になると、さすがに、米国内で採掘される石油も天然ガスもピークアウトし、輸入に全面的に頼っているという事実を無視して、米国に埋蔵されている石油と天然ガスは無尽蔵と馬鹿なことを主著する石油関係者は皆無になりましたが、それでも、まだ、世界の石油埋蔵量は無限だと主張する馬鹿な石油関係者が存在することにあきれます。

4) 米国エネルギー庁でのエネルギー・モデル開発とエネルギー政策の検討

それはともかく、1970 年代、エネルギー・モデルの開発の指導を行っていたメドースは、MIT からダートマス大学に移ります。それにともない、Naill もメドースについてダートマス大学に移り、ダートマス大学内にエネルギー政策グループを設立します。Roger Naill がメドースの指導の基に作成した最初の石油と天然ガスのモデルは、エネルギー種別に細かく分けていなく、荒っぽいものだったので、彼は、それをエネルギー種別に分けたモデルに改良します。これが 1975 年に完成した COAL 1 と呼ばれるモデルです。Naill はこの COAL 1 をさらに改良して COAL 2 モデルに、さらに COAL 2 をもっと改良し、FOSSIL 1 というモデルを構築します。

FOSSIL 1 は：

－エネルギー需要セクター
－石油・天然ガス・セクター
－石炭セクター
－電力セクター

に分かれていました。そして、FOSSIL 1 では、次の疑問を解き明かそうかそうとしました：

－米国は国内生産でエネルギー需要を賄えるか？もし、賄えなく、輸入せざるを得ないとすれば、それはいつか？
－米国のエネルギー政策として、国内のエネルギー資源を保護するのがいいのか、それとも生産を増やす方がいいのか？
－どの種類のエネルギー生産を加速すべきか？

FOSSIL 1 を使った計算結果から：

－これまでのエネルギー政策から新エネルギー政策に切り替えても急に効果が表れるわけでもなく、継続性もあるので、短期的には、米国が抱えているエネルギー問題は解決できない
－供給側だけの政策も需要側だけの政策も単独では有効性を発揮できない
－スムーズなエネルギー政策の切り替えに際し、需要側でエネルギー消費を安定化させ変動させないこと、新たなエネルギーの供給（輸入）を増やすことが重要

という結論を出しています。

1977 年に、米国は最初のエネルギー危機を迎えます。カーター政権は最初の米国国家エネルギー計画を策定します。米国議会の要請で、SD を使った米国国家エネルギー計画の検証をダートマス大学エネルギー政策グループが請け負うことになります。エネルギー・モデルで第一人者になっていたNaillは米国エネルギー庁に移り、FOSSIL 1を改良してFOSSIL 2 を構築します。そして、1970 年代から 1990 年代にかけて、FOSSIL 2 を活用してエネルギー政策の検討が行われます。FOSSILE 2 を使った政策検討として、次のようなことが行われました：

－米国の原油輸入における価格操作、輸出量制限を含む供給側の行動の影響
－中近東の政治的不安定さや原油価格が 2 倍に高騰した時の米国内のガソリン供給への影響
－米国内の燃料製品の流通活性化のための価格政策
－エネルギー・システムにおける課税（炭素税、プロパン・ガス税、ガソリン税、原油輸入税）のエネルギー政策誘導効果
－Coope-Synar CO2 法案の影響

Coope-Synar CO2 法案は、1990 年にテネシー州上院議員 Jim Cooper によって提案された温暖化ガス削減に向けた炭素税導入等の法案で、もしこの法案が可決されれば、米国は温暖化ガス削減協定に加わっていて、今日の地球温暖化をめぐる議論も大きく変わっていたのでしょうが、残念ながら、1990 年 10 月の国会で否決され、その後米国は今日まで、温暖化削減協定に加わってはいません。

温暖化ガス削減に関する議論が浮かび上がってきたので、1989 年に、米国議会は、エネルギー庁に、温暖化ガス削減に関する技術や政策の有効性や影響を調査するように依頼しています。この依頼を受けて、ネルギー庁は、FOSSIL 2 を活用して技術やエネルギー政策の影響を研究します。そして、
－費用効果を勘案した温暖化ガス発生抑制政策が必要
－電力セクターでは、現行の石炭による火力発電から、長期的に原子力及び再生エネルギーへの完全移行が必要
－米国のエネルギー・システムにはフィードバックが存在するので、地球温暖化への対応では、複数の政策をうまく組み合わせて実施することが有効で、単一の政策では、反作用を受けてうまくいかない
－どこか一つのセクターに対して政策を行っても、政策変更はその他のセクターにも影響を及ぼすので、そのことに気を配り、どこか一つだけのセクターに対するエネルギー政策の変更は避けるべきである。
という報告を行っています。米国が、重要な政策に関し、有識者を集め意見を聞き、それをまとめるというやり方だけではなく、モデルを作り、その仮想実験を参考に、政策を決めていくというやり方を採択していることに、ある種うらやましさを感じます。

その後、FOSSIL 2 の電力セクターの部分を改良し、IDEAS モデルが構築されます。IDEAS: Integrated Dynamic Energy Analysis Simulation の略です。

1970 年代、John Sterman はダートマス大学を卒業し、MIT で Ph.D.を取得後、Naill に雇われ、FOSSIL 1 を FPSSIL 2 に改良する作業に従事します。そして、Sterman は FOSSIL 2 にはエネルギーと経済との相互フィードバック関係が十分考慮されていないことを発見し、エネルギー経済モデルを開発します。彼の指摘によれば、FOSSIL 2 の欠点として：

－GDP が外部変数扱いで、エネルギー供給や供給価格を反映していない
－石油以外のエネルギー技術の費用に関する部分が外部変数扱い

－エネルギー投資は他の経済セクターでの投資需要と整合性を持っていない
－投資回収率が外部変数扱い
－国内のエネルギー価格やエネルギー生産、エネルギー政策にインフレが考慮されていない
－国際原油価格が米国でのエネルギー価格やエネルギー生産、エネルギー政策に連携して変化するようになっていない
といった指摘を行っています。ここで原油(conventional)と言っているのは、既存の埋蔵が発見されている石油のことで、石油以外(unconventional)と言っているのは、まだ発見されていない石油、天然ガス、シェル・オイルなどを言います。まだ発見されていない石油は、海底油田などで、高度な採掘技術が必要となるものです。それはともかくも、Sterman は彼のエネルギー経済モデルで：

－エネルギー源の移行期、変動期（最長 2030 年まで）にかなり影響力のある経済的な停滞が起きる
－このエネルギー危機による経済不況は、失業、インフレ、利子高騰、一人当たり GDP の低下を招く
－徐々にであれ、急激にであれ、エネルギー価格が上昇したからと言って、インフレが収まるわけではない。通貨供給の増加と実際の経済活動の相対的鎮静化が伴わないとインフレは収まらない。
－モデルによれば、エネルギー税を上げると所得分が減り、所得税が減る。所得税が軽減されれば経済効率が改善する。エネルギー価格が下がると、OPEC の外貨収入が減る。短期的にはインフレはさらに悪化する。この変化の期間のみ所得税が減る。
といった指摘を行っています。

1997 年、Tom Fiddaman は MIT の博士論文として、エネルギー・経済と温暖ガスの関係の SD モデルを構築します。これが彼の FREE：Feedback-Rich Energy Economy model です。

その後、Sterman も温暖化ガス・モデルを作り、2010 年頃から盛んに、温暖化ガス削減政策の必要性を主張しています。

1980 年代初頭に Gorge Richardson は英国の石油アナリストと議論の機会を持ちます。この石油アナリストの主張は、「世界全体の石油の量は年ごとに増えている」というもので、Richardson は、「世界の石油備蓄量は確かに増えているし、世界の推定石油埋蔵量も増えているかもしれないが、実際には世界の石油の埋蔵量は減っているはず」というものでしたが、Richardson は、この英国の石油アナリストを納得させることができませんでした。
そこで、Richardson は Sterman、Paul Davidsen と共同して、Hubbert の理論を基に、地質学的な石油発見や採掘のデータを入れた新しいエネルギー・モデルを構築します。Hubbert は 1956 年に、米国の石油生産のピークアウトは 1966-1971 年の間に起きると予言しましたし、その予言をうまく SD モデルで表現することにも成功しています。ただ、当時は、世界の石油生産がピークアウトしているわけでありませんでしたし、Naill などが構築した SD エネルギー・モデルも米国に限ったものでした。しかし、米国に限って言えば、Hubbert の予測通り、1970 年代に生産のピークアウトが起き、米国は石油、天然ガスの調達を輸入に切り替えざるを得なくなりました。

Naill の化石燃料を中心としたエネルギー・モデルとは少し別系統で、Ford などが電力を中心とした SD エネルギー・モデルを開発し、電力政策の検討に使われています。図 2-1 にこれまで述べたエネルギー・モデル開発の変遷をまとめていますが、成長の限界での World 2 モデルでの天然資源の取り扱いから、Naill が中心になってエネルギー・モデルが開発さ

れ、それに多くの SD 第一人者が参画し、いくつかのモデルとして改良され続けてきたことが分かってもらえればと思います。

5) 石油の生産ピークアウト：

1980 年代の Gorge Richardson と英国の石油アナリストとの議論当時は、世界の石油生産はピークアウトしていたわけではありませんが、世界の石油生産も 2005-2007 年にピークアウトしています。これを受けて、資源獲得競争が激化しています。中国は最も熱心で、ODA などを絡ませて、積極的に天然資源獲得を、アフリカや南米などで展開していますし、もちろん、ロシアや中央アジアなどの国からの資源確保にも積極的です。こういった資源獲得が露骨になり、それを巡って、直接的、間接的に紛争が起き、激化しているといわれています。最近の軍事研究などでは、ドイツや英国などは、石油の確保を巡って紛争が起きるというシナリオを研究していて、その報告書が発表されています。SD でも、コンフリクト研究として、資源獲得紛争を取り扱ったモデル構築や研究が行われています。

第二次世界大戦で米国に日本が宣戦布告を行った一つの理由は、当時、石油は米国とインドネシアでしか産出されていなく、日本は石油を米国からの輸入に全面依存していました。しかし、米国が石油を日本に輸出することを禁止したため、戦争になってしまいました。

世界の石油生産はとっくにピークアウト（Peak Oil）しているのですが、それでもまだ原油の埋蔵量は無尽蔵、少なくとも膨大な量があり、21 世紀末まで消費する上では十分あるという神話があり、なぜか固く、広く信じられています。1960 年代から、何度も石油はあと 10 年しか持たないとかいった話が出るのですが、その度に大規模な石油埋蔵地が発見され、石油消費が指数的に増加している中で、安価な価格で 50 年以上石油が提供され続けてきました。この「あと石油は 10 年しかない」説が何度も否定されたことから来る印象が大きいのでしょうが、私自身は、石油生産のピークアウトし、今後、エネルギー危機が多発すると思っています。

EIA が最も信頼されている、エネルギーに関する世界的研究機関ですが、その EIA の年次に発表される報告書では、2012 年までは、楽観的なエネルギー供給予測を行っていました。しかし、2013 年のものからは、既存型石油の供給に関してはピークアウトし、今後は大幅に供給が減少するであろうという予測に切り替わっています。EIA の報告書は、消費国の統計に関しては、消費の大半を占めるのが先進国ということもあり正確ですが、産油に関しては、産油国の思惑もあるのかもしれませんが、かなり不正確です。不正確な産油統計をそのまま使っているので、将来予測は楽観的で、その楽観的な将来予想が 2012 年までずっと続いた後に、急に 2013 年になって、少し悲観的な予測に変わって、困惑する点もあると思います。

この一因として、探査技術の問題があり、正確な石油埋蔵量の計算ができないことがあります。また、どの産油国もまじめにやっていなく、上乗せ、あるいは楽観的な値を報告するので、産油国からの石油埋蔵量の予想は不正確です。それを、IEA を含む石油研究機関は統計値として使っています。従って、石油の埋蔵量は正確には分かっていないというのが実情です。分かっているのは、現在採掘中の油田に関する埋蔵量のみと考えていいでしょう。

地表近くに埋蔵されている、あるいは浅海に埋蔵されている海底油田からの石油採掘にはあまりコストがかからないので、従って、採掘した石油を安価で販売できることになります。しかし、そういった場所にある石油の採掘は現在ピークアウトしています。残っているのは、シェル・オイル、深海石油などですが、こういったものの採掘やこういった場所からの採掘には膨大なコストがかかります。従って、こういった種類の石油やこういった場所から採掘した石油は、石油価格が上昇しないと投資したコストに見合わないことになります。シェル・オイルは石油価格が上昇したので、採掘が投資コストに見合うように

なってきたものです。深海油田は、探索にも採掘にも、もっと費用がかかります。探索にもっと費用をかければ、深海油田などはもっと見つかるかも知れませんが、そこまでしても、採掘にもコストがかかり、コストに見合う価格で販売できるかどうか分からないことが、石油メーカーから見ての問題です。ちなみに、既存型油田からの石油採掘コストはバレル当り 1-5 ドル、しかし、既存型海底油田だと 10-20 ドル、深海油田になると 50-70 ドルかかると言われています。ここに、精油、運送などの費用、精油スタンドなどのシステム運営費がさらに加わるので、販売価格をもっと上げないと経営は難しいと言われていますが、生活必需品なので、そう簡単に値上げできません。こういった事情から、大手石油会社の近年の新しい石油埋蔵地発見が急減していることが懸念されます。また、石油会社によっては、多角化、多事業分野へのシフトを始めたと見られる動きを取る会社もあります。石油価格が上昇すると。原価が上昇し、うまく販売価格に転嫁できないと、製品が売れなく、経済低迷の原因になります。もっとも、経済活動は、投資や株式取引などを含む、金融取引の額の方が工業生産の額よりも圧倒的に大きいので、こちらの変動で、世界経済は影響を受けているのですが、、、

テキストには、センゲのシステム思考と組織学習、そしてマネジメント・フライト・シミュレーターのことも記載されていますが、これらは、後で説明する機会があると思いますので、今回は説明を省きます。ただ、シェル石油は、昔から、シナリオ分析で有名で、石油危機が訪れる前から、いくつかの危機的シナリオを用意し、そういった状況になった際にはどうするかということを、経営幹部候補生の研修で実施していました。実際に石油危機が起きた時、その危機的シナリオ分析の結果や訓練が役に立ち、シェル石油は有利に状況に立ち向かえたそうです。

(3)セミナー実施中の質問

ナショナル・モデルの説明に関連し、参加者から、日本の自治体は、例えば自治体モデルのようなものを構築して、シミュレーションで結果を確かめながら政策を行っているのかという質問がありました。EXCEL による財務モデルで、自治体の財務状態がどうなるかというシミュレーションを行っていることは知っていますが、残念ながら、SD を使って政策をシミュレーションし、有効性を確認しながら政策を実施している日本の自治体も、中央政府も私は知りません。外国、特に開発途上国では、かなり SD モデルにより政策を検討する技術が知られていて、私が開発援助の仕事に従事していると、時々、そういったモデルに出会うことがありますし、大きな枠組みでは、そのモデルに従って欲しいという要望が出されることもあります。

ある参加者からは、米国の海兵隊で使われていて、例えば、大きな枠組みでの防衛システムを考えていく時などに使われているという話が出ました。私が参加した SD 国際会議でも、ウェスト・ポイント陸軍士官学校では、SD の授業が行われているといった紹介がありました。軍隊のロジスティック（兵站）などの問題には SD は最適の手法だということでした。

モデルの話の中で、SD でのモデル化は対象を単純化することではなく、むしろ全体を把握することに意義があるのではないかという議論もなされました。これに対し、ある参加者からは、そういったことよりも、モデルがコミュニケーションや共通理解の仲介になっていることが重要で、モデル開発者が考えたある考えをモデルで表現すると、グループ・モデル・ビルディングなどでの参加者から、違うことを言われ、それをどう取り込むかで、考える。その場で取り込めなかった事項を、自分の職場に戻って、職場の仲間と議論しながら、どう対処するか考え、再び、モデル・ビルディングに戻って、対処したモデルでディスカッションする、そういったことが重要であり、それがモデルの意義ではないかという指摘がありました。

注 2-1：ナショナル・モデルと、社会・経済開発に SD がどう使われているかに関する質問があり、前回、世銀が Agenda 21 というナショナル・モデルを開発し、それを基に援助を行っていると説明しましたが、この説明は、正確ではなく、また説明が不足していたので、今回、その補足説明を行いました。

1) T21 モデル

国連や世銀などの国際援助機関が、貧困撲滅プロジェクトを立ち上げ、この関連で、貧困撲滅地球サミット、「Agenda 21」を行いました。この中で、MDG: Millennium Development Goal という、貧困を減らす目標を、国毎に、設定し、それをどう実現するかを、貧困撲滅戦略（計画）(Poverty Reduction Strategic Paper)によって実現することになりました。その実現のための SD モデルを、Millennium Institute が作成し、Millennium Institute だけでなく、国連開発機構（UNDP)、世銀などの雇用したコンサルタントが、このモデルを使って、貧困撲滅戦略を策定し、実施しました。モデルは Threshold 21（T21)と呼ばれています。

もちろん、2014 年現在、MDG の全てが実現できたわけではなく、実現できなかった項目の方が多かったのですが、例えば、安全な水を利用できるようにしようという目標は達成できています。しかし、水セクターでは、下水や衛生タンク、トイレなどの普及では目標は達成できませんでした。

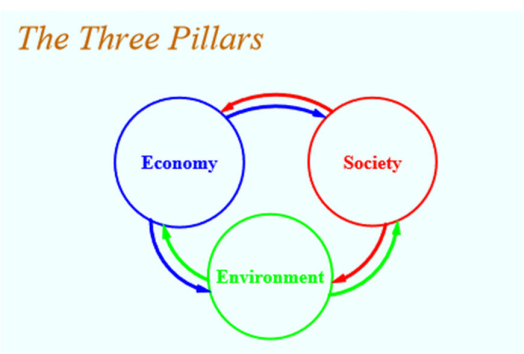
2012 年の数字では、約 33 ケ国のこの T21 モデルが作成されています。もっとも、バルカン諸国のように、地域で作られているものもあるので、何ケ国というのは難しい部分もあります。また、社会・経済開発に焦点を当てたものと、環境やエネルギーに焦点を当てたものがあり、純粋に経済・社会開発モデルにという単純なものでもないものもあります。

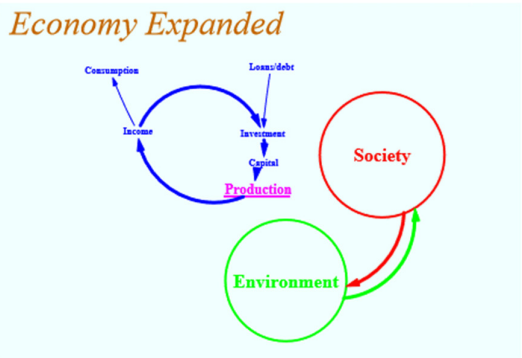
地域別に見ていくと、北米モデルという、米国とカナダをカバーしたモデル、及びエネルギーに特化した、米国のナショナル・モデルが開発されています。

地域で一番多いのが、アフリカで、モザンビーク、マリ、マラウイ、ナイジェリア、ケニア、ガーナ、チュニジア、南アフリカ、ベニン、シーシェルといった国のモデルが開発されています。アジアでは、中国、インド、ブータン、インドネシア、台湾、カンボジア、ラオス、ベトナム、フィージ、パプア・ニューギニア、トンガ、マーシャル諸島、そしてタイ、南米では、メキシコ、ギニア、ジャマイカ、キューバ、トニダード・トバゴ、欧州では、デンマークとバルカン諸国、中欧、ルーマニア、イタリアのモデルが開発されています。これらの一部は、Millennium Institute の HP で公開されています。

2) T21 のコンセプト

T21 のモデルのコンセプトは、経済、社会、環境の 3 分野で考えています。典型的なものは決まっていて、モジュールになっていますが、細分化項目はその国の事情や取り組むべき課題によって決めています。





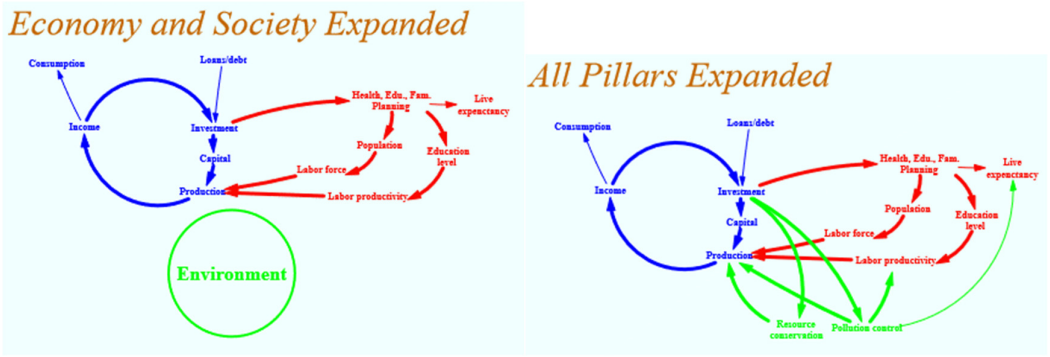


図 2-25：T21 のシステムのコンセプト

図 2-25 は、そのコンセプトですが、まず、最初の柱である経済モジュールでは、資本投資→生産→収入→消費という流れで考えます。投資は世銀などの融資（ローン）で実施し、資本投資で生産が伸び、収入が増え、それに伴い消費も増えていきます（図右上）。これは、2 本目の柱である、社会モジュールに結びついてきます。社会モジュールでは、経済モジュールからの投資が、保健・医療・教育計画に対する予算配分に、それがさらに、人口と、教育水準、平均寿命に分解され、人口からは、さらに、労働力に、教育水準からは労働生産性に分解されます。これらは、経済モジュールの生産に結びついていきます（左下）。環境モジュールでは、経済モジュールの投資が、自然の保護、公害防止に対する予算配分に分解され、公害防止は、社会モジュールの、労働生産性や平均寿命に、自然保護は経済モジュールの生産に結びついていきます（右下）。こうして、右下のような定性モデルを完成させ、これを基に定量モデルを開発していきます。

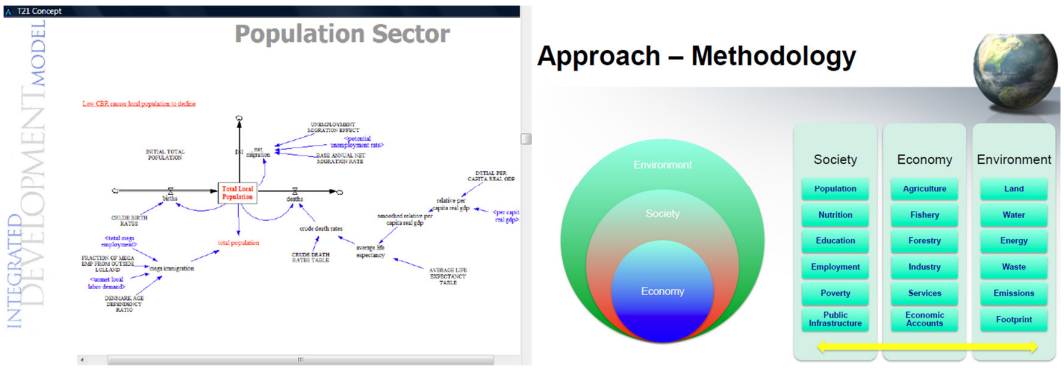


図 2-26：T21 の定量モデルとフライトシミュレーター化されたメニュー

図 2-26、左にそのような定量モデルの部分である人口のモジュールを示しています。先のようにして定性モデルを開発していっても、かなりの部分は、人口などのように共通のものとなり、すでに開発されている、典型的な定量モデルのモジュールを利用できることになります。

こうして開発していった定量モデルは、図 2-26 右に示したように、経営フライト・シミュレーターにし、パネルなバーなどで、政策立案者や国家政策の学習者が、自由にパラメーターを選んで、政策をいろいろ試してみることができるようになっています。

この T21 は、現在は、オーストラリアの大学の先生が、コースを設け、訓練を実施していますし、まだ T21 のモデルが作られていない国では、政策関係者を集め、T21 開発チームが、それぞれ約 1-2 週間のワークショップを何回も行いながら、コンセプト、定性モデリ、

定量モデルとレベルを上げてモデルを開発していきます。私が観察した、そういったワークショップでは、作成した定性モデルで政策を議論していました。また、従事していた開発プロジェクトで、世銀の担当者に、フレームワークとしてこういった、すでに開発された定性モデルを提供され、これで私がやっている開発を進めてくれと言われたこともあります。ただ、その時は、定性モデルでの政策の議論だったので、正直、突っ込みようがなく、あまり議論になりませんでした。本当は、定量モデルを作成しているチームと話し合いたかったのですが、定量モデルは SD チームや開発のために契約した研究者グループが作成しているようで、こちらには、合って議論することができませんでした。

定量モデルまで完成すると、経営フライト・シミュレーターのようにまで作り込まれていて、開発途上国の政策担当者研修などでは、それを、政策意思決定の研修に使っています。現在、ジャマイカ、モザンビークなど約 12 ケ国のこういった経営フライト・シミュレーターにまで完成されたものが公開されていて、Millennium Institute の HP からダウンロード可能です。また、オーストラリアの大学の先生がやっているワークショップも、まだ毎年続いているようで、申込み可能だと思います。

3) ワンダータンド・モデル

これとは別に、Wonderland Model が SD 関係者で好まれ、使われています。これは、もともとは、Sanderson の 1994 の経済、人口、公害と環境保護の 3 つのパラメーターによる数学モデルの論文をベースにした SD モデルで、数学モデルという観点からは、World 3 に似た構造で、数学的な意味でのモデルとしてしっかりしていて、美しく、小さく簡単なので、経済学者や環境学者、政策学者などからは好評を受けています。ここで、数学的に美しいという意味は、知られている解法ですっきり解けるという意味です。World 3 はテーブル関数を使っていて、数学モデルとしては美しくないと数学者は考えます。Wonderland は、テーブル関数など使っていなく、全て暫定式で、暫定式で解ければ、差分法でも解けるので、SD 向きのモデルです。また、T21 は、ボトムアップでモデルが作られているので、対象になった国独特の問題や性格のようなものを含んでいます。このため、こういった特殊事情と、純粋な開発問題とを区別しにくい部分がありますが、Wonderland Model には、そういったものがそもそも含まれていないので、理想的な国をどう作るかという話で、現実の国を対象にしていないので、そのため、もっと議論（分析）がやりやすいという特徴があります。

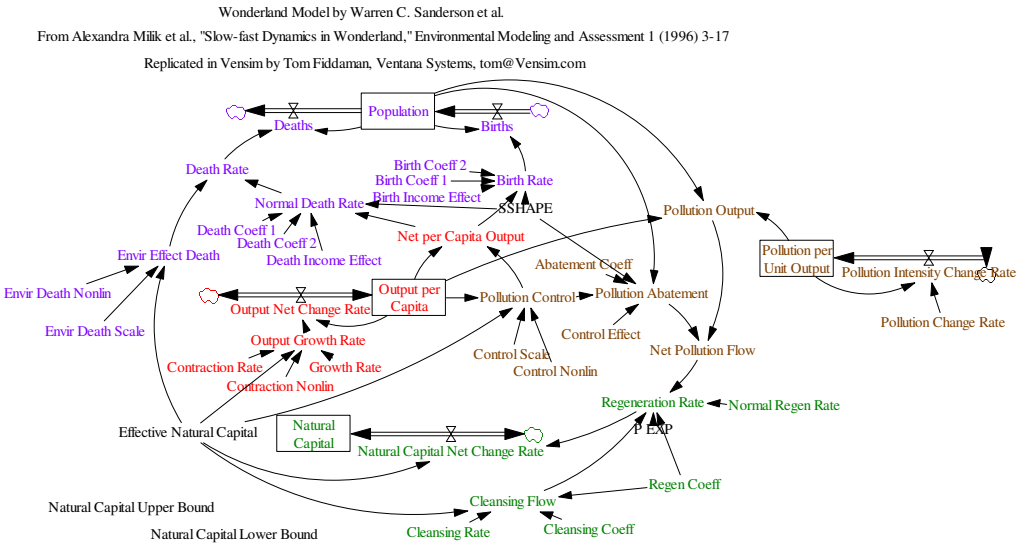


図 2-27：Tom Fidderman が作ったワンダータンド・モデル

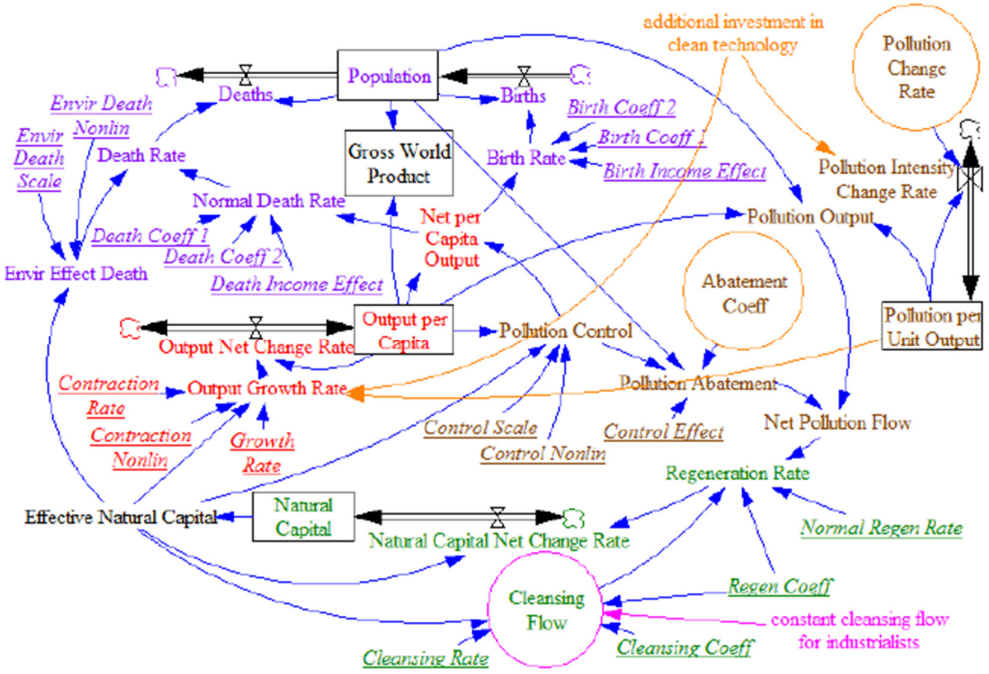


図 2-28：Eric Pruyt, 2007 に載っていたモデル。Fidderman のものを変えたとあった。

図 2-27 は、トム・フリードマンが作ったモデルで、彼の SD モデルの HP からダウンロードできます。図 1-4 は、Erick Pruyt が作ったもので、彼の論文から引用したものです。人口、天然資源、生産（人口当たり）、公害のたった 4 つのストックしかなく、しかも、その関係もシンプルなので、そういった辺りが、議論しやすさになっていると思います。2000 年から 2010 年にかけては、T21 もそうですが、こちらのモデルでの開発モデルの議論も活発でした。しかし、現在では議論は下火になっているように感じています。

この Wonderland Model を政策研修に使うという話もあり、かってほどには活発ではないものの、未だに、開発モデルとして話が出てきます。かって、まだ Vensimm、Stella も無かった、Dynamo の時代に、国連が、Pangea model という、理想国の SD モデルを作り、それを基に、社会政策研修を実施していましたが、その代替のようなものというように捉えています。

注 2-2：Photo Credit：
図 2-3：Pictures of United States Navy Ships 1775-1941", Lexington, National Archives and Records Administration, Washington, DC 20408
図 2-4~2-6：Museum of Science, Boston, Massachusetts, USA, copy from Wikipedia
図 2-7：copy from Wikipedia
図 2-12：copy from HP of System Dynamics Society
図 2-13：copy from Jay W. Forrester, 1970, World Dynamics, Portland, Oregon: Productivity Press

3 なぜモデルを使うのか？

(1) なぜモデルなのか？

この講習は、SD モデルを構築する上で必要な概念、知識、技術を伝達することを目的としています。そこで、最初に、なぜ、SD ではモデルに拘るのか、なぜ、SD では、最初にモデルありきなのか、モデルを作る、モデルを使うということにどんな利点があるのかという点について述べてみたいと思います。

1) なぜ、最初にモデルありきなのか？

普通に言われている、あるいは、俗に巷で言われているモデルにはどんなものがあるのか考えてみましょう。実は、いわゆる「モデル」はだれしもが作っているし、使っています。子供が砂場で作るお城や山は、城や山のモデルです。子供が遊びで、レゴで作るものは、モデルです。子供が積木で作っているものもモデルです。

1980 年代までで、私が知っている限りでは、当時は、エンジニアは、まず粘土で自動車の形を作っていました。コンピューターが発達したので、さすがに、今ではやっていないだろうと思っていたら、このセミナー参加者の細川さんから、実は、日本の自動車メーカーは、クレイ・モデルを作るという作業を再びやりだしたとのことです。コンピューターだけの世界では、どうもうまく作れなく、クレイ・モデル、木型などを作って、溶接などをすると少し変わってくるなどの実感を取り入れながら開発を進めていく方が、作業の手戻りがなく、スムーズに開発を進めていくことができるとのことでした。

やはり、1980 年代までで、私が知っている限りでは、建築学科などでは、設計した橋や建物の模型を木で作ってみるということをやっていました。最近ではコンピューターでグラフィック・モデルを作ってやっているようですが、これらは、モデルです。

自然科学では分子模型、人体模型、宇宙モデル、数式による宇宙の進化のモデルといったものを作っていますし、社会科学の方でも経済モデルとか古代文明モデルを作っています。経営の方では、財務モデルを表計算ソフトで作っています。

戯曲で表現された人物も人間の特徴を表現したもので、モデルと考えられています。例えば、シェークスピアのハムレットという戯曲に登場する主人公であるハムレット王子は、優柔不断で悩める人間のモデルと言われていて、そういった性格の人物を指して、「彼はハムレットのような人間だ」などと言われることがあります。こういったものが、普通に言われているモデルです。

つまりは、モデルはどこにでもあり、子供に至っては日常的に使っているものなのです。

2) モデルを作る、モデルを使うということの利点

モデルは実際を単純化したもので、単純化することで自分の考えを明確にすることができます。また、単純化して理解することで世界観や理解を深めることができ、さらには、実験してみることができます。例えば、コンピューターの中で作られたモデルを考えてみましょう。コンピューターを使うことで実際に起きていることを観測するよりも時間短縮して見ることができますし、条件を違えてテストしてみることができます。実際の世界でやったら、ひょっとしたらとんでもないことになるかも知れない実験も、コンピューター上の計算で条件を違えて計算してみても、実害はありません。例えば、経営で、実際に実験を行ったらその企業は失敗し、倒産するかも知れませんが、コンピューター上の経営モデルを使った実験であれば、どんなに、その仮想の企業が赤字になろうと、実害を受けることはありません。経営を行っていくためには、経験とか経験を積み重ねて得られた勘のようなものが必要ですが、コンピューター上で、仮想的にいろいろ失敗してみて、どの方法で成功できるか、どの方法で失敗を避けられるかを経験的に知っておくことで、実際の世界でうまくやれる可能性が高くなります。

3) メンタル・モデル

人間が生活している家族、会社、都市、国家といったものは、実は人間の頭の中にある概念、あるいは概念モデルと考えられます。つまり、人間が概念として理解し、その理解している概念をベースに生活しているとも言えます。家族とか会社、都市、国家といったものはこういったものだと思っている、そういった観念の上に成立し、それをみんなが共有していることで成立しているとも言えます。こういった考え方がいいとか、反社会的でけしからんといった話ではなく、こういった「概念」、こういった「世界観」、こういった「物の見方」、を SD ではメンタル・モデルと呼んでいます。

つまり、SD では、対象をモデルにする（単純化する、エッセンス化する）ことが問題ではなく、どのようなメンタル・モデル（概念）を用いるかが問題だと考えています。

人間は、概念（メンタル・モデル）を使って判断を行う、あるいは概念といわゆるモデルの両方を使って判断していると SD では考えていて、判断基準に用いているメンタル・モデル、物の見方、解釈のやり方を通して、対象をモデルにしていく過程、あるいは、そもそもの物の捉え方を重要視し、それを理解しなければ、モデルを言語のように介してのコミュニケーションができないと考えています。つまり、モデルを介して、相手が見ている世界、考えている世界を理解し、こちらが見ている世界、考えている世界を相手に伝え、その上で、見ている世界、考えている世界を共有化する、あるいは許容することができるし、それには、相手のメンタル・モデルを知ることが必要と考えています。

昔、ある SD 関係の人にメンタル・モデルの話をしたら、メンタル・モデルは精神病の話なのかと思っていたそうです。また、あるとんでもない翻訳者は、メンタル・モデルを、「思い込みの世界」と訳していて、それを馬鹿な経営コンサルタントが、そのまま「思い込みの世界」と説明していて、苦労させられたことがあります。精神病の話でもなく、思い込みの世界でもなく、相手が見ている世界を概念モデルにしたもの、それがメンタル・モデルです。

自動車の町、米国デトロイト市のある自動車工場に、ある日、宇宙人がやってきました。この宇宙人は、最高の品質の車を最も効率的に作ろうと考え、そして、今まで働いていた従業員を全員首にし、ものすごく優秀な労働者を代わりに雇って働いてもらうことにしました。ただ、このすごく優秀な人は、自動車をどう作るかを知らないまま雇われました。さて、この工場はうまくいき、最高の品質の車を最も効率的に作ることができたでしょうか？

教科書の著者の答えですが、うまくいかない。なぜならば、自動車の作り方のメンタルな部分の知識は、優秀ではない労働者が、「自動車ってこんなもんで、こんな感じで作るんだ」といったメンタルな知識でできていて、自動車をどう作るかを知らない、優秀な新しく雇われた労働者は、自動車を作った経験がある、しかし優秀ではない労働者から、自動車の作り方を、「自動車ってこんなもんで、こんな感じで作るんだ」といった（優秀ではないやり方を）メンタルな知識を通じて学ばなければならないから、だそうです。

だから、トヨタは現場での改善、ムダ、ムリの削除に拘わり、「自動車ってこんなもので、こんな感じで作っていくんだ」という、慣れとか習慣、物の見方を排除しようと努力しているのだと私は理解しています。

ただ、参加者の細川さんによれば、日本企業が中国に進出し、最初に車を作った際には、逆に、「自動車ってこんなもんで、こんな感じで作るんだ」というやり方を徹底的に利用し、作業工程を細分化し、それぞれについて、日本の作業員に中国人の作業員を何十人も付け、「自動車ってこんなもんで、こんな感じで作るんだ」というやり方で教え、工場を稼働させたそうです。それと逆なのが、パナソニックの無人工場で、無人工場自体は無人にできたけれども、そのバック・オフィスに何百人ものエンジニアが詰め、工場を無人で稼働させるために努力し、モニタリングし続けなければならなく、トヨタなどから、人に作業させる工場の方がずっと効率的で製品の品質管理もずっとうまくいくと批判されたとのこと

です。

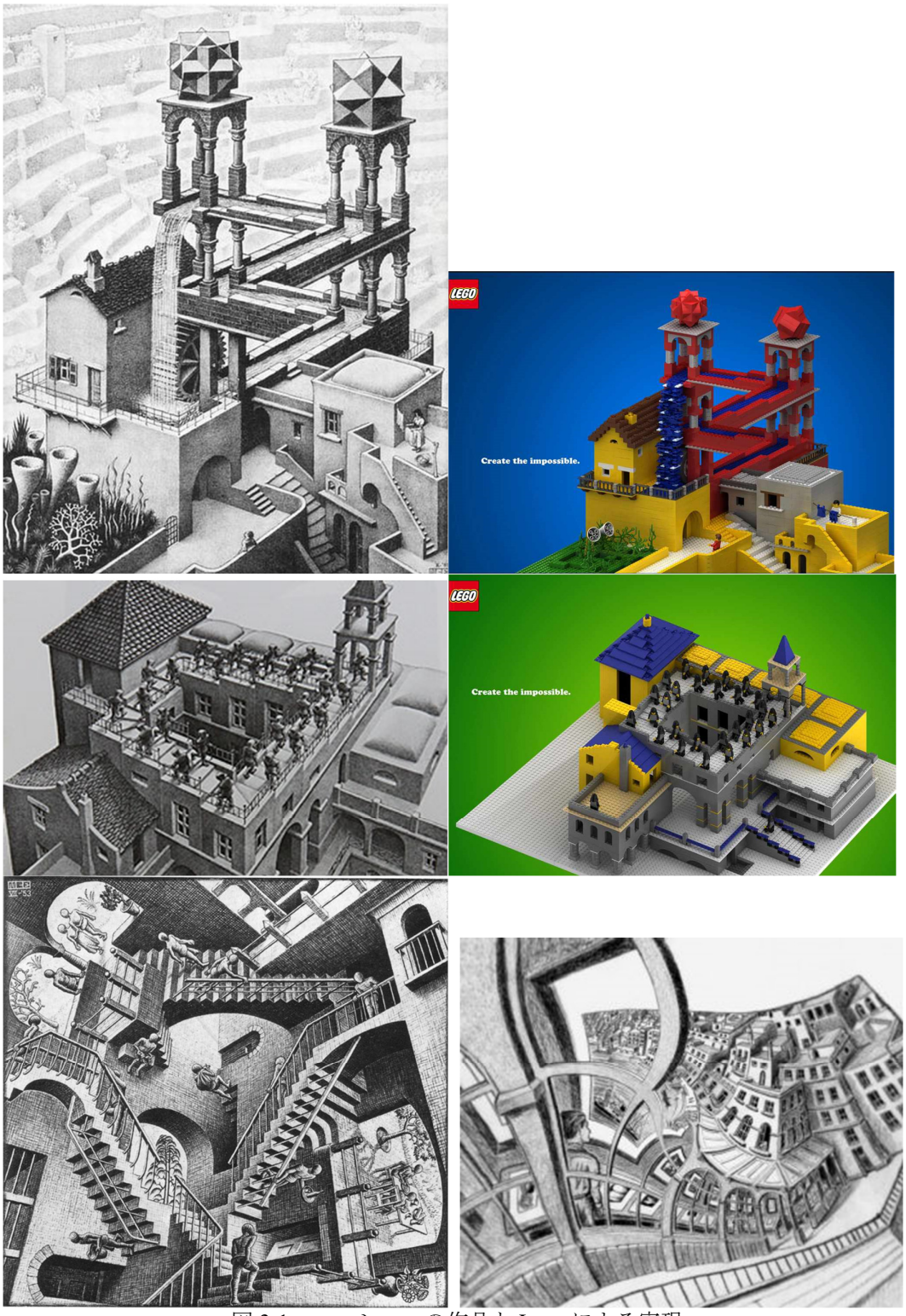


図 3-1：エッシャーの作品と Lego による実現

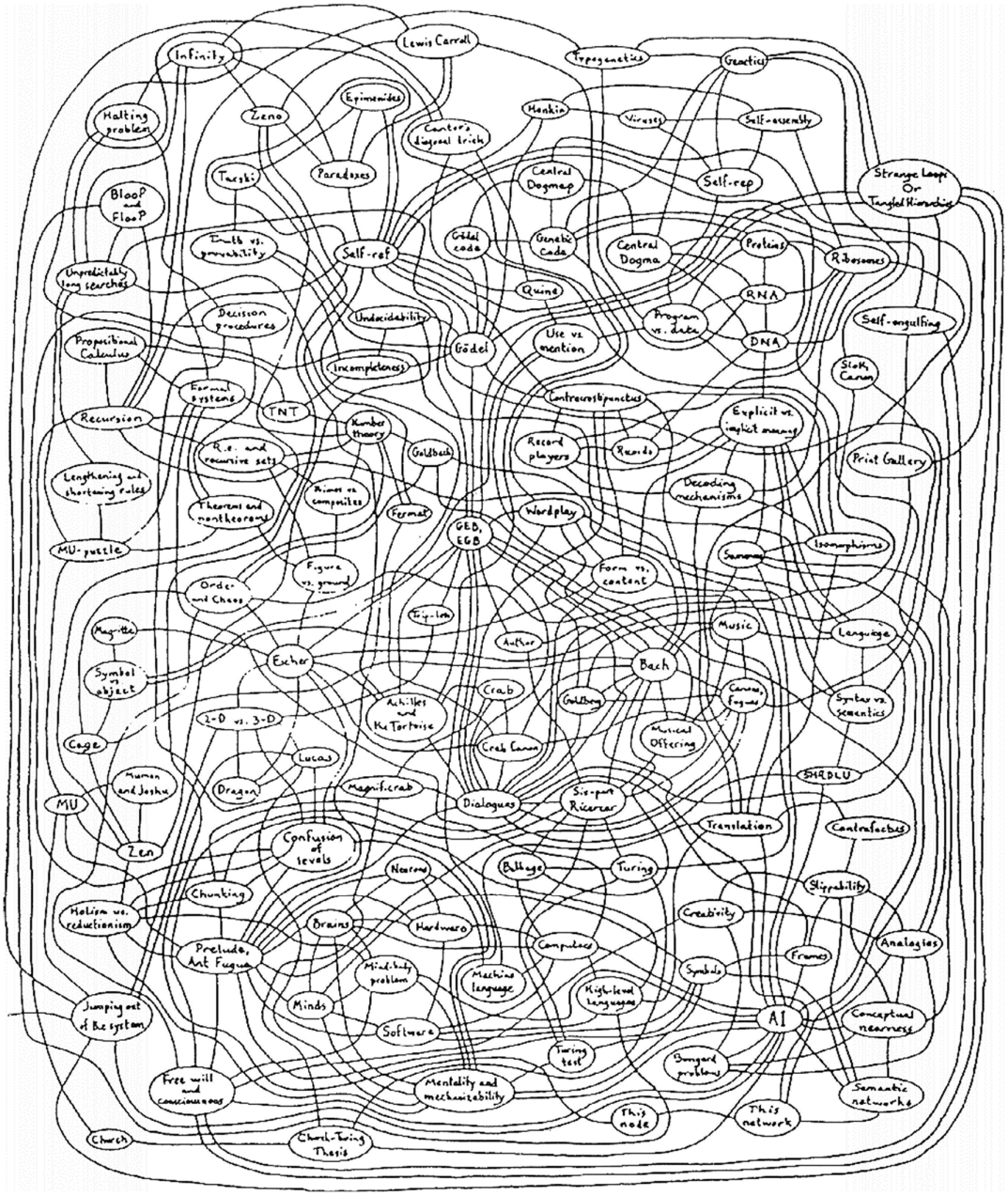


図 3-2：ゲーデル、エッシャー、バッハの著者 Hofstadter の作品メンタル・モデル

メンタル・モデルは、まだそれを SD モデルにする前の段階のものなので、曖昧で、不完全で、不十分で、あまり明確ではない仮定や前提、目標のようなものを渾然と含んでいます。また、固定的なものではなく、違ったメンタル・モデルを持っている人と議論して変わることもあります。

メンタル・モデルには弱点もありますが長所もあります。長所としては、柔軟で、類推などを許容する部分でしょう。Hofstadter は、音楽家のバッハの作品と数学者のゲーデルの思考、そして芸術家のエッシャーの作品に共通する創造性を見出し、「ゲーデル、エッシャー、バッハ」という本を書きました。

私自身は、実は、この本を読んだ時は分かったつもりだったのですが、今振り返って考えてみると、実はまだよく分からっていないように思います。バッハの作品は幾何学的でかなり理論的で、音楽の美しさを積み上げて構成していて、それは、数学の中の古典幾何学に通じる部分があるように思っています。もっとも、当時の音楽作品は、フーガという手法に則って作曲されていたわけで、バッハはその一人者で、最高域に高めた作曲家でもあったわけです。しかし、それゆえに、幾何学的、理論的な雰囲気を濃厚に感じてしまいます。それと対照的な作曲家がモーツアルトで、彼は、美しさを自由さ、意表をつく意外さ、奔放さで表していて、数学の中でもトポロジーなどに通じる部分があるように思っています。エッシャーはだまし絵と同反転の絵しかよく知らないのですが、こちらも計算され設計されていく美で、バッハの音楽の作り方に似ているように思います。これと対照的な画家は、雪舟とか白雲、あるいは南画の自由奔放の絵のスタイルでしょうか？図 2-1 に、エッシャーの代表的な作品と、それを Logo で表現したものを掲げました。Logo の作品は、一体どうやって作ったのか、私にはとても不思議に思えます。福田繁雄も、彫刻で同じような作品を作っています。図 3-1 の下の 2 つの絵は、酔っぱらった時に、私には世界がこのように見えるので、私にはお馴染みの世界です。

図 3-2 に、Hofstadter のメンタル・モデルという教科書に載っていた図を掲げます。このメンタル・モデル上部左には、無限、「不思議の国のアリス」の著者ルイス・キャロル、ゲーデル、フェルマーなど数学関係、右には、蛋白質、DNA、RNA、自己再生などの生物学関係の単語が見られ。中部左には、2 次元、3 次元、エッシャーなどの単語が、右にはバッハ、音楽、言語、翻訳などの音楽や言語学関係の単語が見られます。このメンタル・モデル下部左には、善、意識などの精神科学関係の単語が、右には、人口知能(AI)、コンピューター、ネットワークなどの電算関係の単語が見られます。細部についてはよくは分かりませんが、著者がこういった科目、項目に興味を持っていて、そういった科目や項目の理解の世界の中から、「ゲーデル、エッシャー、バッハ」という作品が生まれてきたということだけは理解できます。

メンタル・モデルを説明することは少し難しい面がありますが、メンタル・モデルを私は以下のように説明しています。

男である私は、街を歩いていると美しいとかカッコいい女性につい目が行ってしまいます。彼女が着ている服とかは実はどうでもよくて、顔立ちがいか、スタイルがいいかとかしか見ていません。しかし、女性はそうではなく、着ている服とか付けているアクセサリーに目が行ってしまうらしいということを体験しています。

私は、財務関係の仕事が多いので、収入がいくらで支出がいくら、それで儲けがいくらと考える習慣のようなものが身についてしまっている部分があります。普通の人は最初に、儲けがなんぼで、次に収入がいくらと考えるようで、私のような順番では考えないということも経験しています。もっとも、考えない人もいるらしいのですが、、、

こういった物の見方がメンタル・モデルであると説明しています。従って、メンタル・モデルの半分は、その人の育った環境、生活している環境から生まれたもので、残り半分は、その人の意識でそうしたものです。ただし、意識と言っているのは、こっちの方がいいといった嗜好や選択も含みます。従って、習慣のようになってしまっているものです。ただし本人の意志で変えられます。

問題は、考え方です。SD は、その人が対象をどう見たかを、SD モデルで表現（記述）したものなので、見方、捉え方が問題になってきます。SD でモデルを記述すること自体は難しくないと思っています。ある人曰く、「SD とえらそうに言うが、単に差分連立方定式を解いているだけであり、何でも差分連立方定式で表現できる」そうなので、まあ、そんなものなのかと思っています。問題は、メカニズムで理解し、理解したメカニズムを表現する習慣を身につけるかどうかではないかと思っています。

普通の人は別に物事をメカニズムで理解しようとなどはしていません。メカニズムなど疑問にすら思わないのではないでしょうか？そもそも、「何で？」などとは考えないのではないでしょうか。多分、フェルミ以外には、シカゴ市に何人ピアノ調律師がいるなんて考えないでしょうし、店で買い物をする時に、この店はどれくらい儲かるのかなんて考えないでしょう。仕事でお客を訪ねても、その会社が「どのくらい儲かっているか」とか、「うまく経営できているか」とかすら考えないでしょう。疑問に思ったら、会社四季報とかを調べて、そこに載っている数字を見て、それで分かったとして終わりにするのが普通ですし。フェルミ推計で考え、自分の数字と比較してみるということはまずはしないでしょう。

ですから、何も考えていないという、このメンタル・モデルを明確にすることが SD では最初に重要になってくるのです。町を歩いて、女性の顔立ちがいいとかしか見ていない馬鹿な男である私に、違う見方や世界観があるということを教え、理解させる必要があり、そのためには、私のメンタル・モデルを改善することが必要なのです。

なお、この説明が、女性侮辱になっているとしたら、これも、私の馬鹿で、何も考えていない低俗なメンタル・モデルに起因していることなので、平にお許しを願います。

3) メンタル・モデルを SD モデルにしていく

問題があるメンタル・モデルを何とかするためには、意思決定を行う人間のメンタル・モデルを SD モデルで表現し、コンピューターを使ってトレースしてみることが有効です。コンピューターを使っていろいろ仮想実験してみて、その試行錯誤の経験の中から、システムをどうコントロールすればいいかを学習することができますし、SD モデルを構築するその作業から一番多く学ぶことができると思います。SD モデルを構築するためには、頭の中にあるものを SD のモデルとして、グラフィック化し、等式で定義する作業が必要です。さらには、最後に、SD モデルをゲーム、あるいはマネジメント・フライト・シミュレーターとして完成させることで、こうしてできたものを、経営の学習や訓練に使うことができます。マネジメント・フライト・シミュレーターを使って訓練することで、メンタル・モデルを変えることができ、これが学習になります。あるいは、マネジメント・フライト・シミュレーターの作ったモデル構築者と同じメンタル・モデルを共有することができるようになります。

ここの部分を、私はこれを以下のように説明しています。まず、慣れていない人間には、ストックが絡んで変化することに関する知覚障害のようなものがあり、モデルにし、コンピューターを使って仮想実験し、結果を示してみないと対象を理解できないこと、やはり、モデルとか、理論とか、体系とかがないと、議論を進めていけないことがあるからだと思います。

A) 慣れていない人間のストックに関する知覚障害

例えば、ストックの動きは普通の人には感覚的に掴めないことが多いということが、これまでの SD の研究で分かっています。サラ金業者は、「といち」、つまり「1 万円借りて、10 日たって千円ぽっちがなぜ返せない」と言います。複利で指数的に増えていく感覚が無いから、サラ金から金を借りてしまい、とんでもない目に合うわけです。よくあるとんち話で、昔ある家来が機転によって手柄をたてたので、喜んだ殿様が、何でも欲しい物を褒美に上げると約束したそうです。そこで、その家来は、「それでは、最初の日は 1 円、ただし次の日はその 2 倍づつ 1 ケ月間、お金が欲しい」といったどうです。殿様は、「何と欲が無い、もっとでもいい」と言ったそうですが、家来は「それでいい」といったそうです。最初の 1 週間はどうということはなかったのですが、ところが、、、、、、こういったストックの指数的な増加は、体験してみないと理解できないのではないでしょうか。逆に、フローはそういったことがないので、比較的分かるのですが、それでも単純な場合だけで、複雑

になると分からないことが多いように思います。さらには、構造はモデルにしてみないと分からないことも多いように思います。

日	円
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128
9	256
10	512
11	1,024
12	2,048
13	4,096
14	8,192
15	16,384
16	32,768
17	65,536
18	131,072
19	262,144
20	524,288
21	1,048,576
22	2,097,152
23	4,194,304
24	8,388,608
25	16,777,216
26	33,554,432
27	67,108,864
28	134,217,728
29	268,435,456
30	536,870,912
31	1,073,741,824

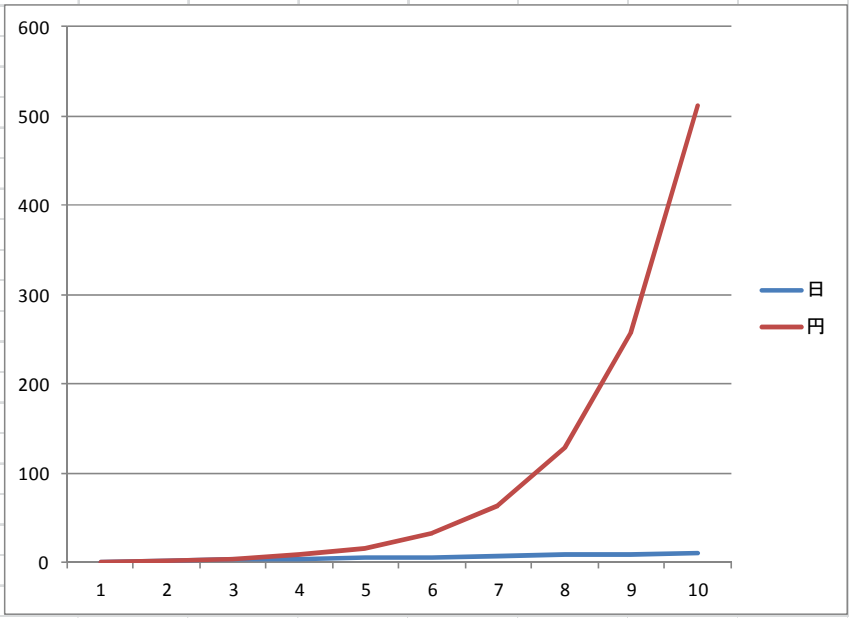


図 3-3 と表 3-1：指数変化

表 2-1 に、先のとんち話を数字にしてみたものを示しました。最初は 1 円、10 日でもわずか 512 円です。しかし、31 日目には、10 億円になってしまい、ちょっと簡単に払える金額ではなくなっています。

この他にも、こういった例もあります。池に小さな水草が 1 個浮かんでいました。池の番人は、たいしたことはないと全く気にも留めず放置しておきました。番人は、28 日目に、少し池に水草が目立つように思え、水草を除去しなければならないかなあと思いました。ただ、次の日は少し忙しく、また、水草も、ぎっしり池を覆っているわけではないので、そうあわてることもないだろうと思いました。やっと、それでは水草を除去しようと 3 日後に池に来てみると、池は全面水草に覆われていました。3 日前には池は 2 割しか水草に覆われていないのですが、次の日には水草は池を半分覆い、そして、3 日後には池の全部を覆うというようになってしまうのです。

B) やはり、モデルとか、理論とか、体系とかがないと、議論を進めていけない。

共通（共有）できるそういったものがないと、水掛け論、あるいは、議論のための議論

になってしまいがちです。例えば、人によっては、議論のための議論をする人がいて、頭に来ることがあります。「ああ言えばこう言う」的屁理屈だけで、結論、あるいは合意ができなく、こちらはもてあそばれているだけのような気分に陥ります。当方は、結論、あるいは合意を得るために議論しているつもりですが、相手にその気がなく、ただ私の時間を無駄に使い、私に徒労感を味あわせるための行為をされただけのように思えてきます。そこまで行かなくとも、共通できるモデルとか、共通できる理論、体系のようなものがないと、認識が違い、同床異夢になりがちです。SD には、違った体系や理論でも取り込める融通無碍な性格があり、こういった場合でも有利に話を進めることができます。

多くの場合、議論する相手は、モデルとか、理論とか、体系とかを持っていいないので、水掛け論や議論のための議論でも、こちら側としてははっきりできます。従って、「貴方が、感情的にそう信じているだけでしょう。」と言い切れる利点があります。もっとも、言い逃れをしているだけの相手には、何を言ってもどうしようもありませんが。

C) メンタル・モデルを SD モデルにしていく

先の中で、ある結論や合意に至るための土台としての、モデルや理論、体系は、私自身は何であってもいいと思っていますが、だた、このセミナーの趣旨として、ST/SD を推薦しています。さて、メンタルモデルをモデルにしていくにはいろんな手段や次のようなステップがあると思っています。

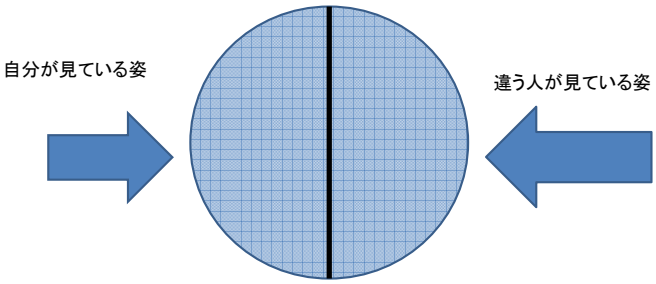


図 3-4：自分が見ている世界と相手が見ている世界

表 3-2：メンタル・モデルを SD モデルにしていくステップ

	ステップ:	手段	モデル
1)	・状況や情報を正しく理解する	Ladder of Inference	
	・メッセージを明確に相手に伝える		
2)	・理解をあるモデルにして理解していく	MECI	ツリー・モデル
			集合
		相手の見方/世界	リッチピクチャー
		SSM(ソフトシステム)	
		因果関係	ST/SDモデル
			論理ツリー・モデル
3)	・理解をモデルを使ってコミュニケーションする	手段と目的	ST/SDモデル
			論理ツリー・モデル
4)	・ソリューションを発見する	シナリオ	マルコフ連関
	・ソリューションの導入効果を計算する		論理ツリー・モデル
			財務モデル
			計量経済モデル
			SDモデル

自分のメンタル・モデルは、自分のことですから、何かしら SD モデルとして表現できるでしょう。しかし、SD モデルを作りシミュレーションするということは、相手のメンタル・モデルで理解していることを、自分の理解で作ったモデルに取り入れるということなので、

相手がどう理解しているか、さらには相手のメンタル・モデルを知らなければなりません。その最初は、相手が考えてことを正確に理解し、自分がどう考えているかを正確に相手に伝えることだと思います。

その上で、お互いの理解をモデルとして表現し、そのモデルを使ってコミュニケートし、コミュニケートしながらソリューションを導きだし、合意に至れるようにするのだと思います。表 3-2 に、このステップと、ステップの作業を支援する手段やモデルを挙げておきました。

ステップ 1)：相手が考えてことを正確に理解し、自分がどう考えているかを正確に相手に伝える

ここでは、相手がこう理解しているに違いないという、自分の思い込みを避けることが重要です。それには、相手のメッセージを正確に理解することが重要です。同じことが、相手側にも言えます。従って、相手の思い込みを防止することが重要で、はっきりと言うなどの工夫で、明確に自分の意味を伝えるという努力だけではなく、メッセージが相手に伝わったか確認する必要があります。このための道具として、推理のはしご(ladder of inference)がよく使われます。

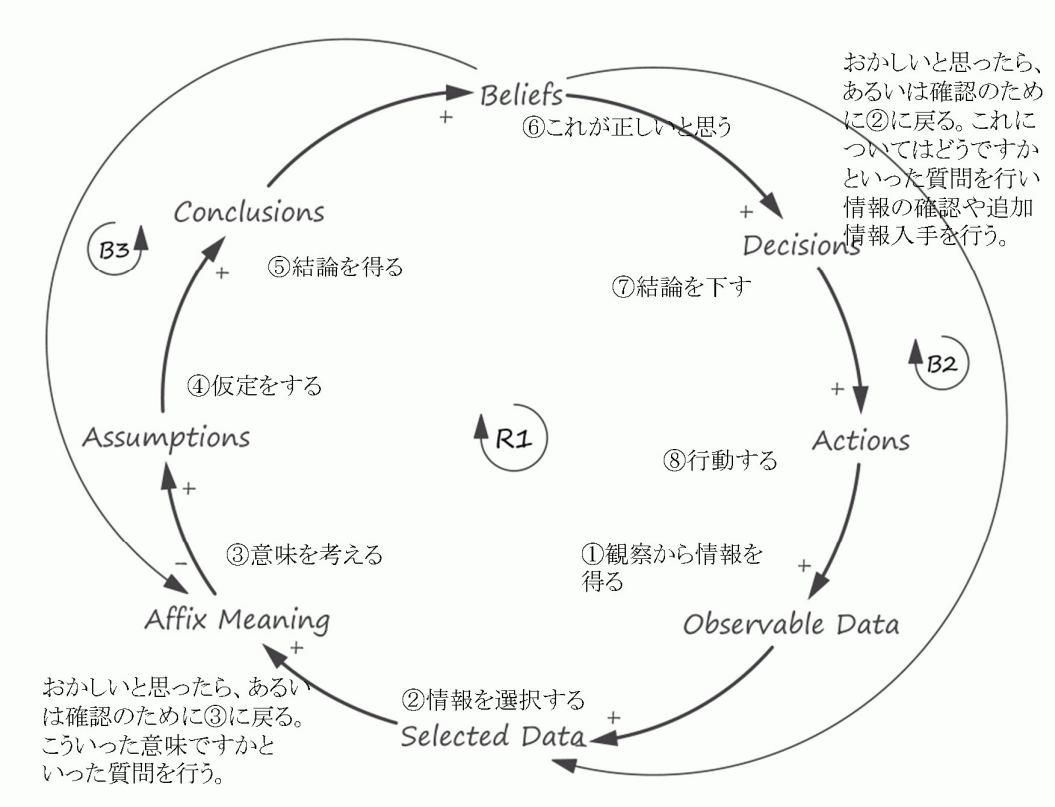


図 3-5：推理のはしご

この推理のはしごは、図 3-5 に示しましたが、人間は、通常、①観察から、あるいは相手の発言から情報を得ています。そして、得られた情報の中から、②必要あるいは有効と思われるものを選択し、③意味にする、あるいは意味を考えます。考えた意味から、④仮定を行い、仮定のもとに⑤結論付けます。そして、⑥結論が正しいと思い、⑦それを結論と決めます。結論が出たので、その結論に基づき⑧行動を起こします。結論が正しければい

いのですが、そうでない場合、誤解に基づいた行動になってしまいます。⑥の結論ではないかと思ったことを、再度③に戻って再確認し、意味を確認するとか、②に戻り、選択した情報が妥当であったかどうかを確認して、⑦に進むことで、相手が考えてことを正確に理解し、自分がどう考えているかを正確に相手に伝えることが可能となります。

ステップ 2)：理解をあるモデルにして理解していく

理解の思考方法に多分 3 つの種類があると思います。一つは分解していく、細分化していくという理解方法で、デカルトは、「分解していくと、最終的には単純なものになるので、その分解された単純なものは理解可能」と主張しています。

とは言っても、言語で、分解していくという理解方法は、時として不可能なことがあります。言葉だけでは十分理解できないことがあり、分解ではなく、全体の繋がりの中で理解する必要があることもあります。それをイメージやパターン、絵で表現する、あるいは、イメージやパターン、絵としてとして理解するということが行われます。このサポート・ツールに、リッチ・ピクチャーがあります。

3 番目は、全体のしくみとして理解するやり方で、ST/SD などはこの例です。「部分の集合では全体にはならない」とは複雑系でよく言われる言葉ですが、そこで、ST/SD では、部分のお互いの相互作用や因果関係で理解するというやり方を採択しています。

A) 分解法

図 3-6 は分解法でよく用いられる MECI という方法の例です。MECI は、分解していって、部分的には独立で重複がなく、かつ全体では漏れがないという意味です。

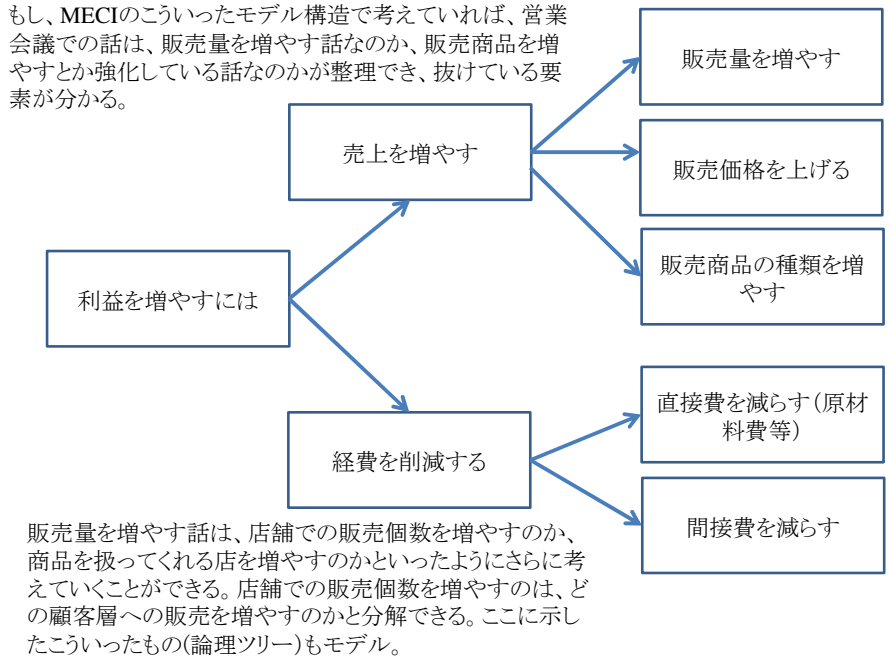


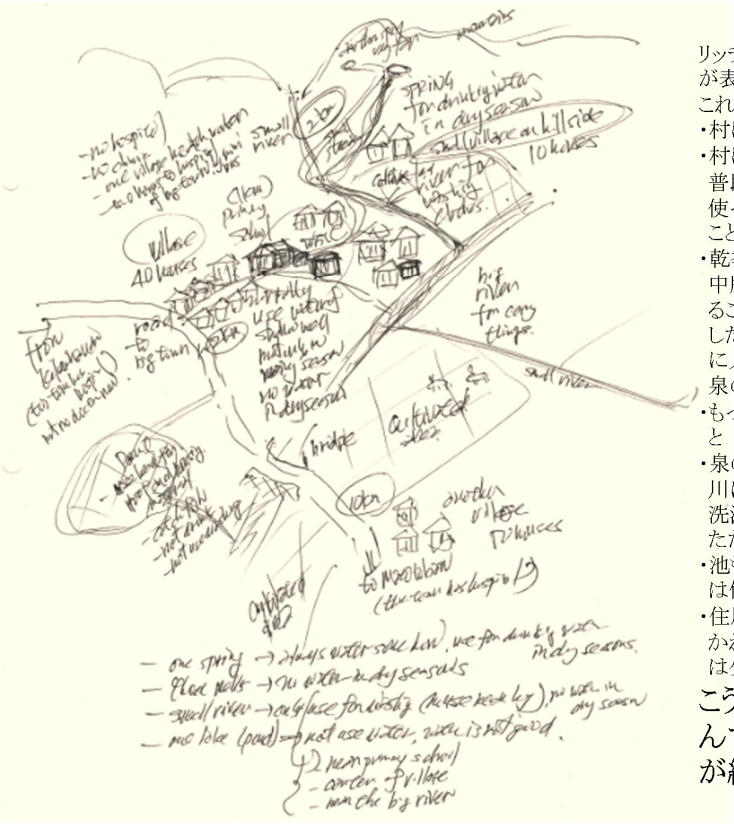
図 3-6：MECI

利益を増やすには、売上を増やすか、経費を節減するか、あるいはその両方を行う必要があり、これ以外の方法はありません。売上を増やすには、販売量を増やす、販売価格を上げる、販売する商品の種類を増やすの 3 つしかありません。そのどれかを、あるいは、そのどれかの組み合わせを行うことしかありません。経費を削減するには、直接費を減ら

す、間接費を減らす、のどれか、あるいはその両方しかありません。こうして、独立し、かつ、全体で漏れがないように分解して理解していきます。

B) 絵やパターン、イメージで理解する

図 3-7 は、リッチ・ピクチャーの例で、ある村の水の利用を示しています。この村では、通常、人々は井戸の水を飲料用や洗濯などの生活用水に使っています。ただ、乾季には、井戸の水が枯れることがあり、村から約 2km 離れた泉の水を、乾季には使っています。



リッチピクチャーでは、描いた人の世界が表現される。
これは、ある村の水源の絵だが、
・村には約40件の家があること
・村には井戸が3つあり、40件の家庭は、普段はこの井戸の水を生活用水に使っているが、乾季には水が無くなること。
・乾季には、村から約2kmはなれた山の中腹にある泉を飲料水用に使っていること。この泉の水は乾季でも水枯れしたことがないこと。この泉に行く途中に人家が約10件あり、この10件はこの泉の水を生活用水に使っていること。
・もっと先にも泉があるが、とても遠いこと
・泉の水は途中で小川と合流し、大きな川に流れ込んでいること。小川の水は洗濯用に近くの家庭が使っていること。ただし飲料用には使っていないこと。
・池もあるが、水質が悪く、生活用水には使っていないこと。
・住居区と農耕地区とは川を隔てて分かれていること（従って農業による汚染は少ない）

こういった、コミュニティに住んでいる人の目からの世界が絵で分かる。

図 3-7：リッチ・ピクチャー

この村では、川の水は飲料用には使っていなく、洗濯用にしか使っていません。水は、村の前を流れる大きな川、そしてそこに流れ込む 2 本の小川、村はずれにある池、井戸のものが使われています。こういった情報を、絵を通じて得ることができます。私の海外の村落部の仕事では、言葉が通じないことがあるので、そのような場合、こういった方法で必要な情報を得ています。

参加者の明神さんによれば、日本語で十分コミュニケート可能であるはずの日本でも、IT 関係ではリッチ・ピクチャーを使って、ユーザーにとってどう見えているかの理解に使っているそうです。

C) 因果関係として理解する

因果関係として理解するというやり方もよく用いられる方法です。図 3-8 は、問題を分解し、その要素にされた問題を、因果関係で結び付けていったもので、全体として、ツリー型構造になります。これを、問題構造図、あるいは As-Is モデルと呼んでいます。

因果関係ツリー・モデルの例：なぜ、対象水道局は赤字になるのかの分析例。水道事業は非利益事業なので、膨大な黒字にする必要はないが、多少の黒字を継続することが必要。赤字では水道事業を維持できない。

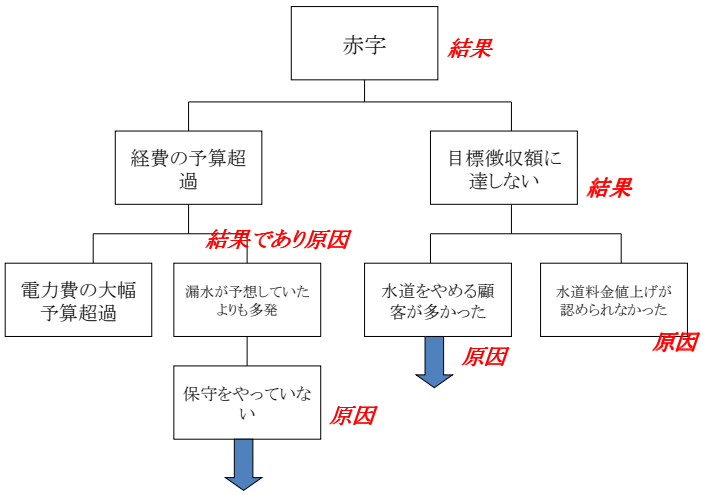


図 3-8：問題構造モデル

図 3-8 では、なぜ赤字が起きるのかを、経費が予算を超えたこと、売上が目標を上回ったことで説明しています。図 3-9 はお馴染みの ST モデルです。こうした、問題を、その原因と結果という因果関係のモデルで全体を捉え、理解する方法がこの 3 番目のカテゴリーのやり方です。

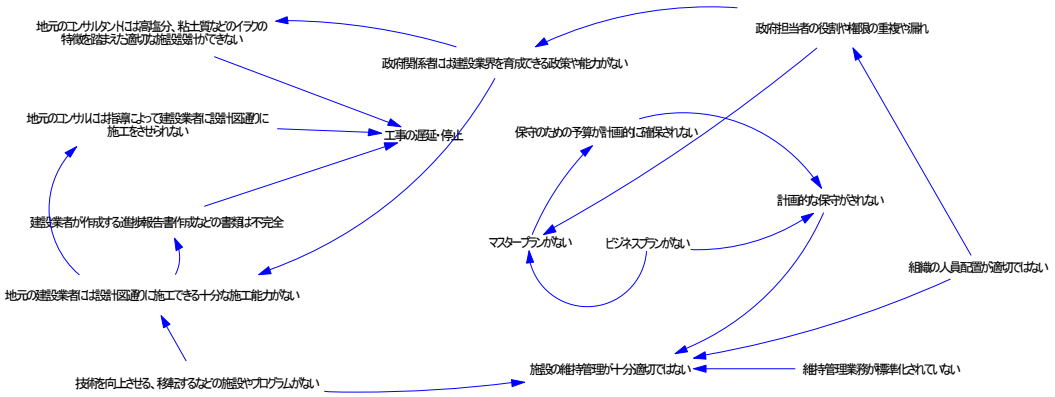


図 3-9：ST モデル

ステップ 3) モデルを使ってコミュニケーションする

理解を、モデルを使ってコミュニケーションするということで、ここでは、主に、ST/SD モデル、論理ツリー・モデルなどを使い、どこをどう変えたらどうなるかを、モデルを使いながら検討するという思考実験を行います。この検討によって、新たな問題が発見されることもあり、場合によってはステップ 2 に戻ることもあります。ステップ 4 とで曖昧な部分がありますが、この段階では、試行錯誤している段階と理解してもらっても構いません。ステップ 4 は、ある程度結論が固まった段階と言えるでしょう。

この、粗削りでもいいから、考えたモデルを使って、いろいろ関係者と議論し、問題が解決された状態とはどういった状態であり、それにはどのようなやり方があるかを探って

いきます。

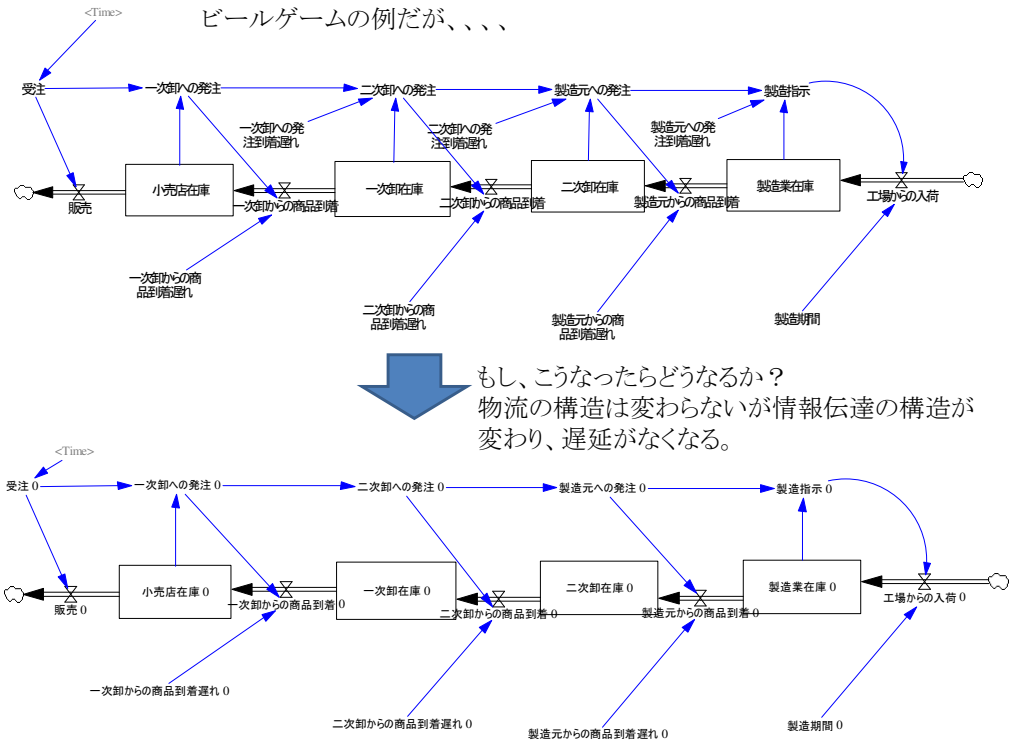


図 3-10：ビール・ゲームでの思考実験(1)

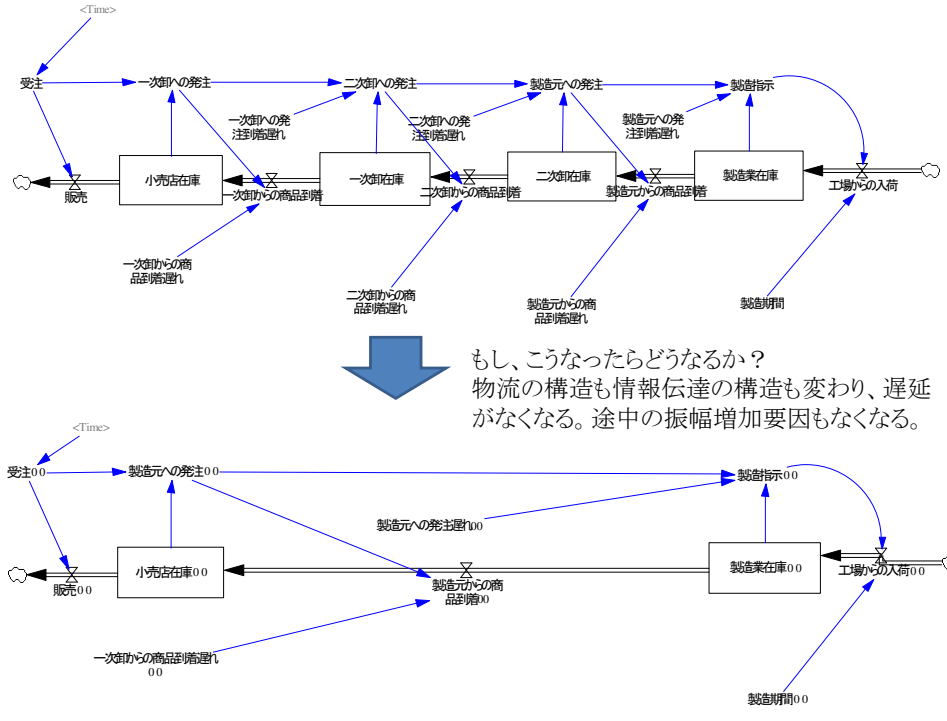


図 3-11：ビール・ゲームでの思考実験(2)

最初に ST/SD の例を挙げましょう。ビール・ゲームはお馴染みのものだと思います。そのモデルは、図 3-10 の上に示したようになっています。そこで、ST/SD のスキルで必要なことは、ビール・ゲームの構造が、図 3-10 のようなものになっていることを頭の中で、モデルとして理解することです。次に、こういった構造でどうメカニズムとして問題が起きているのかを理解することです。そして、その理解の上で、図 3-10、及び図 3-11 の下の図に示したような、ソリューションを考え、それが機能するかどうか思考実験してみることです。ビール・ゲームでは、発注時にそれぞれ 2 週間の遅延が起き、発送時にも 2 週間の時間遅れが発生するようになっています。この遅延が問題であるとするのであれば、例えば、図 3-10 の下のように、情報を共有化し、発注の時間遅れを無くしたらどうなるでしょうか。あるいは、卸の介入が問題であれば、図 3-11 の下のように、工場直売にしてみたらどうなるでしょうか。こういった思考実験を、モデルを使って行います。

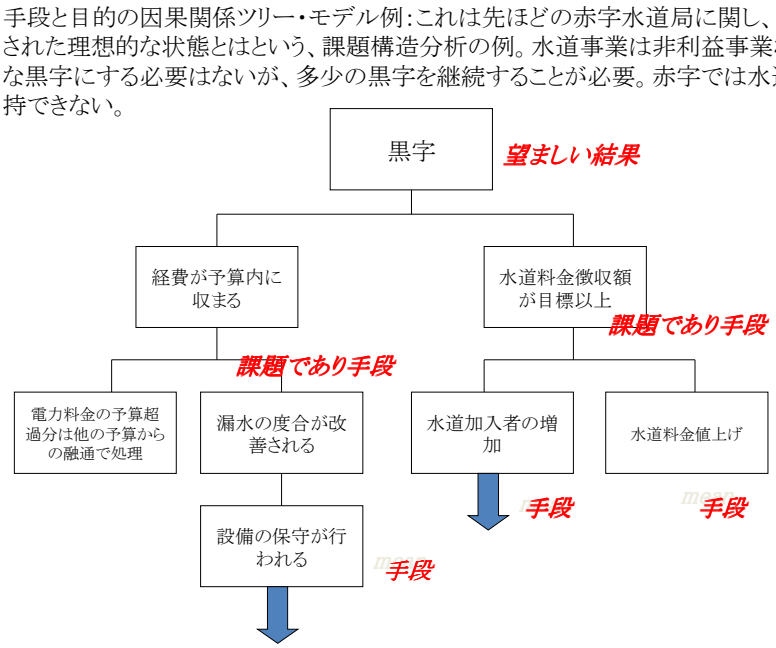


図 3-12：課題構造モデル

図 3-12 は、課題構造モデル、あるいは To-Be モデルと呼ばれているものです。実は、この図は、図 3-8 の問題構造図を逆転させたもので、赤字という問題が解決された、理想的な状態を示しています。先の図 3-8 を使って、あるいは図 3-8 の問題構造の理解を踏まえ、関係者と議論を行い、こういった理想像をモデルとして作っていきます。ただ、実際には、経営資源に制約があったり、時間的にできないとか、プロジェクトでそもそも対象にしていないなどの理由で、この全てを実現できないことの方が多く、そのどれを選び、どう実現させるかを、ソリューションと呼んでいます。これは、次のステップで検討します。

ここには示していませんが、ST でも同じような、理想的な状況を表現する To-Be モデルを描くことがあります。最初に問題構造を示した As-Is モデルを示し、その問題構造のどこを叩いて問題を解決し、To-Be モデルにするかを検討します。

このステップでは、単純でも、しょぼくてもいいから、モデルで表現してみることが重要です。モデルがしょぼく、プレゼンやレポートに耐えられないのであれば、必要に応じて後で詳細化すればいいだけのことです。ここでは、それよりも、コンセプトが重要になります。コンセプトを表現したモデル、それがメンタル・モデルをモデル化したものとな

ります。

以上の話は、論理展開法とは別の話です。論理展開法も考え方ではあり、①演繹法という、事実や細部を積み上げて結論を導き出す方法、細部を積み上げて結論を導き出す三段論法もとりあえず、ここに含めていて、多くの場合、この方法で考えるでしょう。

これに対して、②帰納法という、結論ありきで、結論を妥当たらしめるためにその理由を述べていくやり方があり、分解法もここに含めています。これも、思い込みの激しい人には特によくある方法です。

これとは別に、③推理という、対象からある結論を導き出すものがあり、帰納、演繹は比喩と含め間接推理とされています。また、④弁証法という、ある仮説に対し、それに反対する仮説があれば、その反対する仮説も含め、うまく対象を説明できる上位の仮説を考え出していくというやり方もあります。

こういった思考方法は重要であり、これらの思考方法で考えていくのですが、そういった方法で、何を考えていくかというのが、今説明している事項です。

ステップ 4)：ソリューションを発見する

As-Is（問題構造）モデルができ、To-Be（問題が解決された状態）モデルができ、問題が解決できた状態が理解できた後、最後に、その To-Be モデルに至る最善のプロセスを考えます。これをソリューションと言っています。簡単な問題では、To-Be が分かった段階で、このソリューションになっていることもあり、そういった場合は、あるいは、このステップは不要かも知れません。

一般には、To-Be を実現させるためには、いくつかの方法ややり方、道筋があり、これをシナリオと呼んでいます。あるいは、投入できる経営資源（人、物、金）の制約があり、To-Be モデルのその全てを実現できるわけでもないので、一番効果がある部分、できる部分から順番に改善していきます。その対象範囲の選択もここに含まれます。

対象範囲の選択や、どこを最初に叩くかも含め、これをシナリオにし、モデルで効果を検証しながら、ソリューションにまとめ、改善提案を行う、あるいは、改善の実行計画にまとめるというところまで作業を行います。なお、モデルで効果を検証するのは、必ずしも、定量分析を行うという意味ではありません。定性分析でも効果を検証することは可能です。

シナリオは、いくつであってもいいのですが、単純化する場合は、上、中、下の 3 通りのものを考えるのが普通です。上は、最良の場合、あるいは、経営資源が十分あり、多くの問題を解決できる場合です。中は、通常の資源投入でできるもの、下は、経営資源にかなり制限があり、これだけは何とかしたいというものに限られたものです。

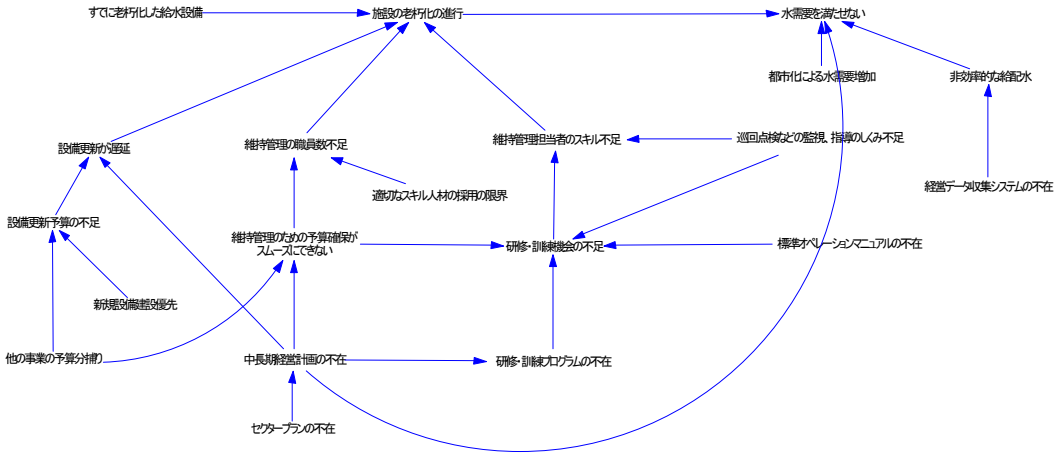
シナリオに沿ってソリューションを発見し、検討するものには、マルコフ連関や、論理ツリー・モデル（手段と目的）、財務モデル（財務的に費用と効果が計測できる）、計量経済モデル、そして SD モデルがあります。

ここは、少し例を挙げて説明しないと分かりにくいかも知れませんので、昨日まで従事していたイラクの上下水道のプロジェクトを事例にして説明しましょう。

図 3-13 は、最初に作成した、問題構造図です。これを基に、図 3-14、図 3-15 に示したように、どこをどう叩くかを議論していきました。この段階で、問題視していたのは、各上下水道システム毎に中長期経営計画が策定されていないという点でした。このため、大規模修繕予算が確保できなく、施設が壊れても放置される、あるいは、簡単な修理では手が負えなくなるまで、故障や不具合が放置されているのではないかという推測を行っていました。もし、適切に保守修理が行われていれば、手に負えなくなるまで施設や設備の状態

が悪化するわけではありません。

問題解決のレバレッジを発見する。



・最初に想定していた問題分析
・ただ、この段階では、悪循環構造が存在するのか不明だった。
・中心課題は、施設の整備が不十分で、故障しても放置されていることではないかという仮説

図 3-13：問題構造モデル(1)

さらに、各上下水道システムの中長期経営計画を集めれば、必要な予算がどれだけで、いつ必要なのか分かります。それと、開発計画を組み合わせることで、適切に水道セクター開発計画を策定できます。しかし、その水道セクター開発計画（マスター・プランと呼んでいます）すら無いので、現在は、上下水道の需要に現行の施設の能力が追い付かないから、新しい上下水道施設を作れ、作れというだけで、作られた施設の整備や保守にはなかなか目がいかなく、予算も十分ではありません。そこで、ここを最初に叩くのがいいのではないかという仮説を持って、イラクに出張し、いろいろ議論しました。

二番目の仮説は、訓練が不十分で、現行のスタッフがきちんと施設の保守管理をしてないのではないかというものでした。きちんとした訓練を受け、ちゃんと、チェックを行っていれば、機械が壊れる前に異常に気がつき、手に負えなくなるような壊れ方をする前に、部品交換するとか、調整することで、施設や機械を正常に運転し続けることができます。こういった、正常運転させるということがやられていないのではないかと思っていました。

また、経営情報システムが無く、上下水道システムの管理者であれば当然頭に入っていなければならない数字、今日何トンの水を処理し、配ったか、といった情報を持っていないことも問題と考えていました。上下水道だとわかりにくいかも知れませんが、例えば、普通の企業で、今日の売上はいくらで、回収はいくらが頭に入っていない経営者は経営者失格でしょう。数字で経営を捉えていることは、どこの社会であれ、経営者の最低条件ですが、それができていないのが、イラクの上下水道システムの現状です。このことも問題と考えていました。

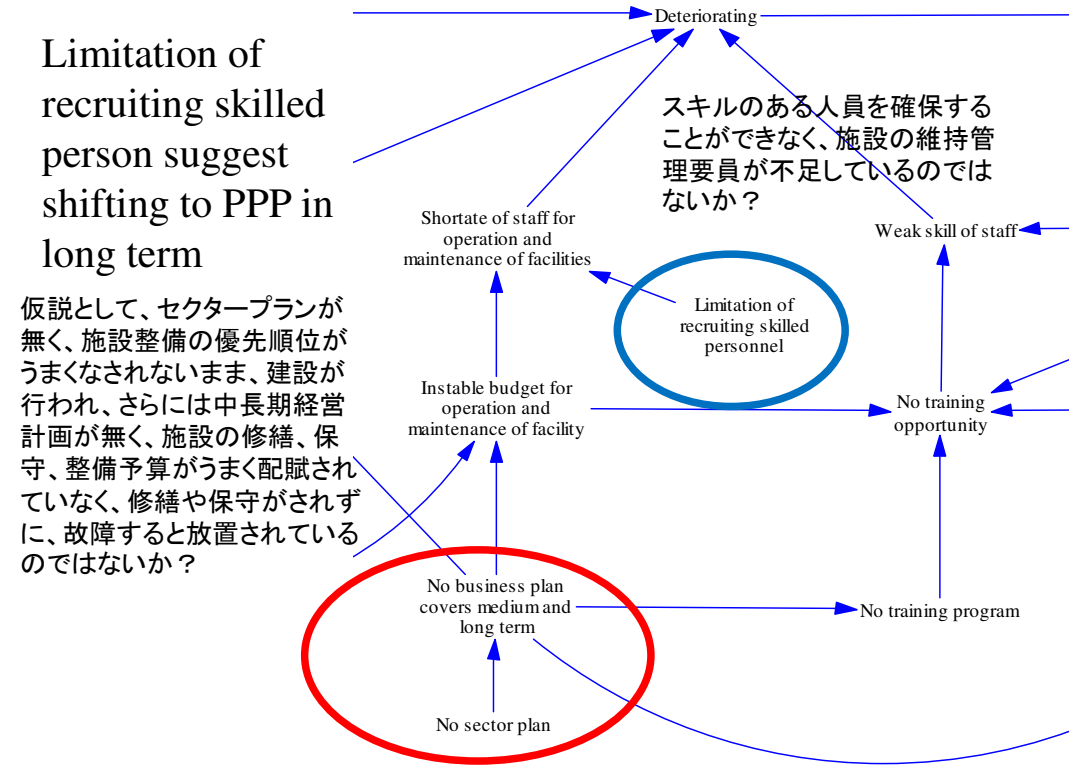


図 3-14：問題構造モデル(2)

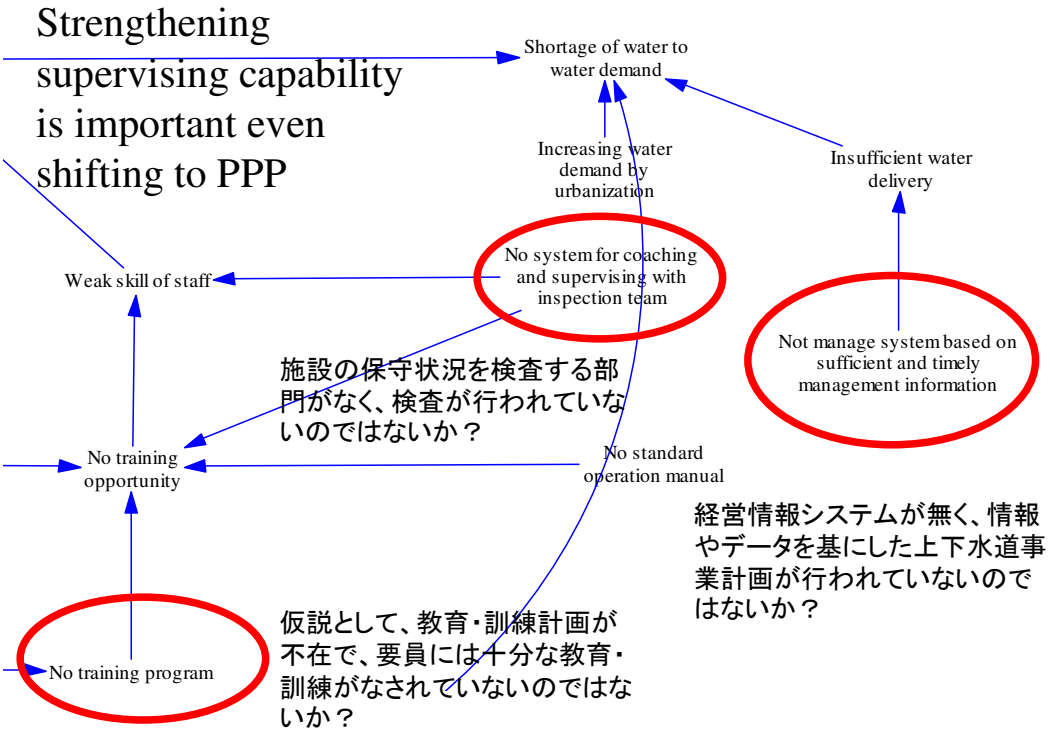


図 3-15：問題構造モデル(3)

これらの問題や課題を総括し、以下のように要約しました。
・適切なマスター・プラン（セクター・プラン）が無い
・適切な中長期経営計画（ビジネス・プラン）が無い
・取水量や生産量などの経営情報を収集するしくみが不十分で、日次で経営情報が把握されていない。
・人員配置に問題があり、配置されている職員数が不足
・配置されている職員のスキルに脆弱さが見られる
・日常業務が標準化されていなく、管理にしにくく、また、効率性も良くない
・灌漑に飲料用の水道を使う、盗水などの違法行為
ここまでが、すでに説明したステップ 2 の作業の話です。

これに対する短期的対応策として：
・計画を策定し、計画に沿って上下水道事業を推進していく体制整備が望まれる：
・セクター・プラン：まずは、セクター・プランを策定し、その中で建設プロジェクトの優先順位付けと、普及率などの目標値を県レベルで決め、中期的に予算を確保する。
・中長期経営計画：各上下水道事業(water supply and sewerage system)毎に、短期、中期、長期をカバーする経営計画を策定し、それに基づき、必要な施設拡張や整備、維持管理を行い、進捗状況をモニタリングする。
・経営情報システム：取水量、生産量、配水量、水道栓数、消費量などの基本的な経営情報を日常業務の推進の中で収集し、モニタリングする。
・業務標準化：SOP(Standard Operational Procedure)などの標準化された施設の運転維持管理や水質管理に関する手続きや方法をマニュアルとしてまとめ、それに沿って職員を訓練し、また、それに沿って運転維持管理や業務報告が行われるようにする。
・経営に関する訓練：経営計画策定や顧客サービス、衛生と水道の役割などの利用者に対するアウェアネス教育などの訓練を行い、スキルや知識を高める。
・組織の見直し：職員配置や業務推進に必要なスキル、業務量を再検討し、適切な職員配置や職務分掌規程に基づく業務執行、業務管理を行い、また、スキルを高める訓練を行うことが望まれる。
・アウェアネス：節水の必要性や水道の役割、盗水などの禁止行為などを利用者に理解してもらうための、アウェアネス教育の実施が望まれる。
・水道メータの設置：ユーザーに対する節水意識の推進や、消費量把握のために、水道メータの設置を行う。
・巡回チームの編成：電気機械エンジニア、水質専門家などによる巡回チームを編成し、各上下水道機関を巡回し、電気機械設備の点検や保守整備状況をチェックする。そのチェックに基づき、保守整備を現場指導すると共に、職員の能力強化必要事項を洗い出し、別プログラムとして研修計画を策定し、強化する。優秀な上下水道施設に関しては、表彰制度を設け、インテンティブを図ることもある。
といったソリューションを考えました。ここまでは、ステップ 3 の話です。

これらを、どう具体的に進めていくかを表 3-3 のようにまとめ、表 3-4 のように導入スケジュールを考えました。図 3-16 には、中長期経営計画策定と、水道セクターのマスター・プランの開発を、フロー・チャートにしたものですが、各ソリューション毎に、作業の流れを示したものを作成します。ここでは、費用や導入効果などはまだ示していませんが、図 3-16、表 3-3、3-4 が、ここで述べているステップ 4 のソリューションのイメージです。
もちろん、簡単な問題では、ここまでしつこくやる必要はないでしょう。

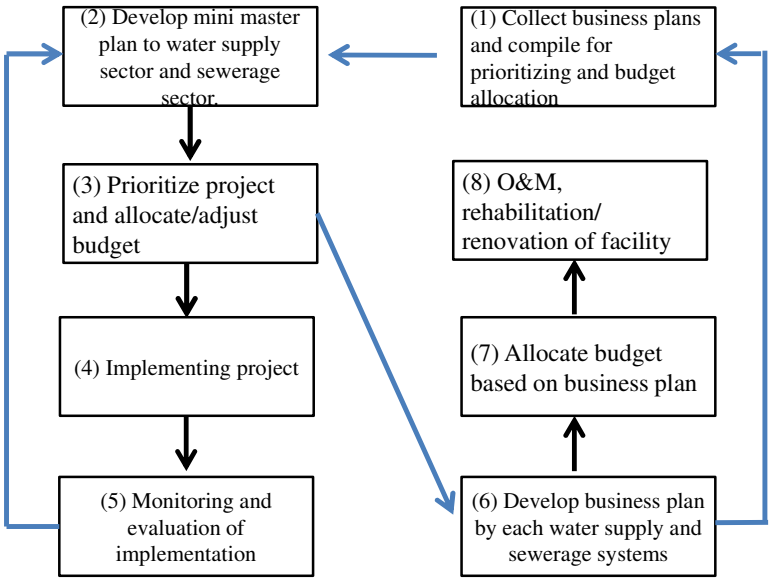


図 3-16：ソリューション例（中長期経営計画とセクター開発計画）

MMPWの組織強化

項目	内容	目的、問題・課題、範囲等	注釈
1 コンサルタント雇用 コントラクター雇用	・標準的なコンサルタント雇用ガイドラインのレビュー ・事例、判例、対応等の洗い出しとまとめ ・組み込むべきイランの特別状況の洗い出し ・イランの特別条項の盛り込み ・研修実施 ・国際コンサルから地元コンサルや地元建設業者への技術移転 ・国際コントラクターから地元コントラクターへの技術移転	・イラクの状況に合った、優秀な国際コンサルタントを雇用できない ・イラクの地元コンサルタントや建設業者がなかなか育成されない ・イラクの地元コンサルタントに対しての国際コンサルからの技術移転が進まない	
2 組織のレビュー	・機能の見直し ・権限の見直し ・組織構造の見直し ・人員配置の見直し ・職員のスキルのアセスメント ・企画（マスタープラン担当）部門の設立 ・業績評価やモニタリングなどの評価実施部門の設立 ・研修部門の設立	・公共事業省及び県が対象 ・権限移譲されていなかったり、権限や機能の重複がプロジェクト実施の障害になってい ・職員のスキル不足が、計画策定や計画遂行の障害になっている ・計画の遂行状態、状況などがモニタリングされていなく、放置されたままになっている	
3 マスター・プラン開発	・マスター・プランの作成 ・プロジェクトの優先付け ・概算予算の確保	・施設建設や予算配賦が合理的ではない	
ビジネス・プランの開発	・ビジネス・プランの作成 ・事業予算の確保 ・計画に則った施設の整備、保守 ・ビジネス・プラン導入のモニタリングと評価	・各上下水道機関ごとの事業計画が策定されていない ・大規模修繕や大規模保守が計画的に実施されていない ・必要な予算が予め予測できなく、予算配賦で問題が生じる ・需要変化に応じた計画修正ができない	
4 職員研修	・必要な研修事項、内容のアセスメント ・研修方針作成 ・研修科目設定 ・研修教材開発 ・研修計画策定 ・研修計画実施 ・研修効果の評価	・職員のスキル不足が、計画策定や計画遂行の障害になっている ・研修方針や研修計画がなく、研修が計画的に実施されていない	
研修センター設立	・必要な研修事項、内容のアセスメント ・訓練施設の確保 ・研修講師の育成 ・知識、経験等を蓄積するしくみ作り	・職員のスキル不足が、計画策定や計画遂行の障害になっている ・研修機関がなく、研修が計画的に実施されていない	*
5 SOP(**) Standard Operation Proc	・業務標準化の検討 ・SOPの開発 ・SOPを基にした座学実施 ・SOPを基にした施設の保守状況の検査	・上下水道の施設の維持管理のやり方が標準化されていなく、不適切で不十分 ・上下水道の施設の維持管理要員のスキル不足	
インスペクション・チーム	・インスペクション・チーム編成、人員選択 ・インスペクション・チームに対する研修 ・インスペクション実施 ・褒章制度の開発 ・維持管理に関する現場指導	・上下水道施設の維持管理が不十分 ・上下水道施設の維持管理の状況がモニタリングされていない	

＊ パスラ大学等の教育機関内に設立し、研修実施者を確保することも一案
対象者として、政府職員だけではなく、民間への業務委託も考え、民間企業も対象に加えることも一案
**Standard Operation Procedure

表 3-3：ソリューションのリスト

		導入スケジュール(案)															
		2015				2016				2017				2018			
	項目	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	コンサルタント雇用																
2	組織のレビュー																
3	ミニ・マスター・プラン開発																
4	ビジネス・プランの開発																
5	職員研修																
6	研修センター設立																
7	SOP																
8	インスペクション・チーム																

表 3-4：ソリューションの導入スケジュール

(2) 第 3 章のまとめ

メンタルモデルとそれをどうモデル化するかという説明を行いました。人間の頭の中にある、物の考え方のことをメンタル・モデルと呼んでいます。メンタル・モデルは人によって違っています。それは、その人の経験や性向などで決まるものですが、必ずしも固定したものではなく、違う考えなどを受け入れた際に変化することもあり、柔軟なものです。

人間は、対象を理解するために、そして自分が理解した対象を表現するために、モデルを使っています。SD は、メンタル・モデルを SD モデルにし、その SD モデルを使って他の人と、対象に対する理解を共通にするやり方と言えます。ただ、SD が特徴的な点は、対象をしくみ（システム）として捉える点です。従って、SD モデルは、対象をしくみと捉え、その理解したしくみをモデルにしたものとなります。

注 3-1：Photo Credit

図 3-1：Escher's "Relativity" in LEGO®より及び M.C. Escher Official Website より

図 3-2：Douglas R. Hofstadter, 1989, Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid, New York: Vintage Books

4. システムの基本的な振る舞い

この章では、システムの基本的な振る舞いに関し、以下の項目によって説明します。
－直線的変化
－指数的変化
－ゴール・シーキング
－振動
－S 型変化
－実際の世界で見られる変化
－ストックとフロー
－フィードバック
－因果関係
－予測不能

(1) この章の趣旨

SD は対象をシステム（しくみ）として理解する方法であることは前章で説明しました。システムの振る舞いは、基本的に、直線変化、指数変化、収斂型変化、振動、S 字型変化の 5 つの基本的な変化のパターンに収まります。逆にこの 5 つ振る舞いを再現するようなシステムを設計できれば、対象としているもののしくみをシステムとして説明できると考えられます。この 5 つの振る舞いを再現するようなシステム設計の基礎として、ストックとフローという要素を考え、この 2 つの要素の組み合わせでシステムができていると考えます。また、システムは構造として、フィードバック構造であると考えられます。従って、ストックとフローを使ってフィードバック構造を設計し、先の振る舞いを再現できれば、対象をしくみとして理解できたと考えられます。これが SD の考え方であり、アプローチです。

(2) 時間に対する変化（ダイナッミクス）

何かに対して変化する現象をダイナミックス（動的変化）と呼んでいます。何かは、温度変化とか、圧力変化でもいいのですが、社会科学では、通常は時間変化（時間軸 t に対する変化）と考えます。もちろん、SD では、時間変化に拘るものではなく、顧客数に対する労務量など、時間以外のものを変化軸とするモデルを作ってももちろん構いません。

1) 時間変化

システムの変化を集め、分類してみて、5 つのタイプの変化の形があることが分かっています。5 つの変化は、
－直線的変化
－指数的変化
－ゴール・シーキング（収斂型変化）
－振動
－S 型変化（釣鐘型変化）

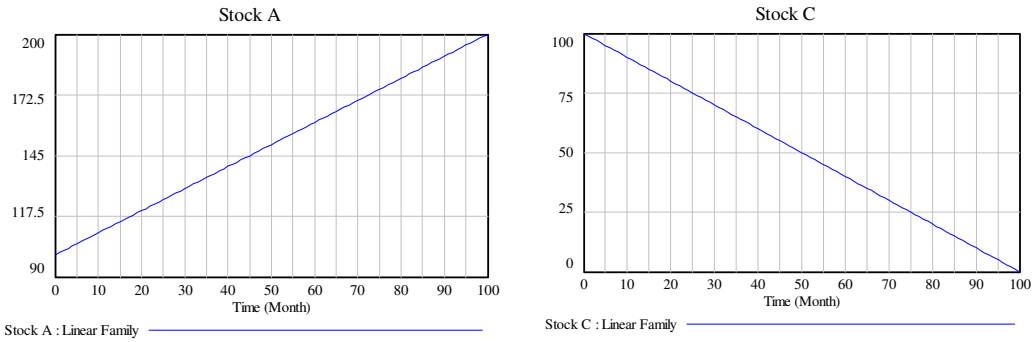
です。実際の事象の時間変化は、概ね、この 5 つのどれか、あるいは、その組み合わせになっています。つまり、システムの振る舞いを分解すれば、基本となる振る舞いは、概ねこの 5 つの変化の形に分けられます。逆に、この 5 つの変化を起こすようなものを組み合せば、対象のシステムとしての振る舞いになりますので、概ね、世の中の社会変化は表現できます。それでは、この 5 つの振る舞いについて説明しましょう。

I) 直線的変化

時間軸(x)に対し、y が直線的に変化するという変化です。

$y=\pm ax+b$

で表現されます。その変化の形は、図 4-1 に示したような直線になります。



$y=ax+b$　　$y=-ax+b$

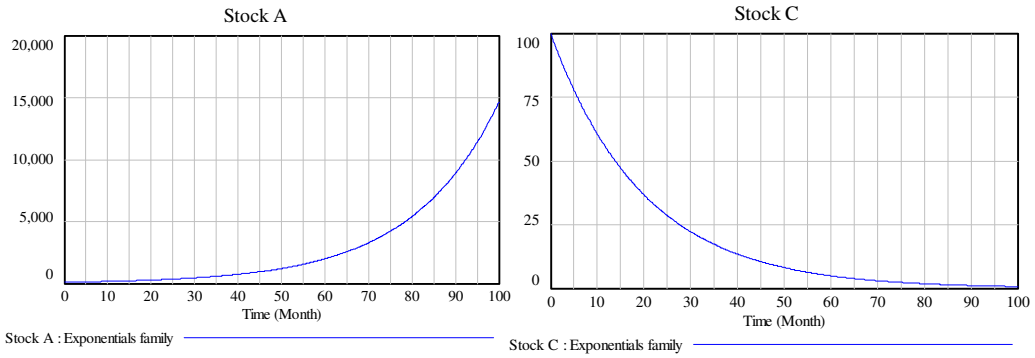
図 4-1：直線的変化

II) 指数的変化

時間軸(x)に対し、y が指数的に変化するもので

y=±ax^b+c

という数式で表現されるものです。その変化の形は、図 4-2 左に示したような、急激に立ち上がるカーブになります。負の場合は、右に示したように、急激に下降するカーブになります。



$y=ax^b+c$　　$y=-ax^b+c$

図 4-2：指数的変化

III) ゴール・シーキング（収斂型変化）

ある値に向かって収斂していくもので、数学的には成長曲線と呼ばれるものの一種のモノモレキュラー成長曲線と呼ばれるものです。その変化の形は、図 4-3 に示したようなものになります。正の場合は、増加が最初は急速に進みますが、やがて減速し、頭打ちになります。負の場合は、最初は減少が大きいのですが、それもやがて少なくなり、ある値、例えば図 1-3 の右では 80 に限りなく近づいていきます。ある値に収斂することから、収斂型変化と呼ばれています。

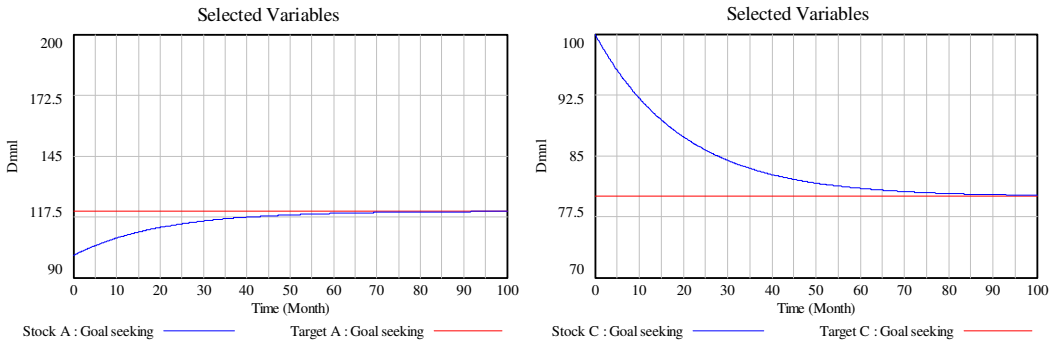


図 4-3：収斂型変化

IV) 振動

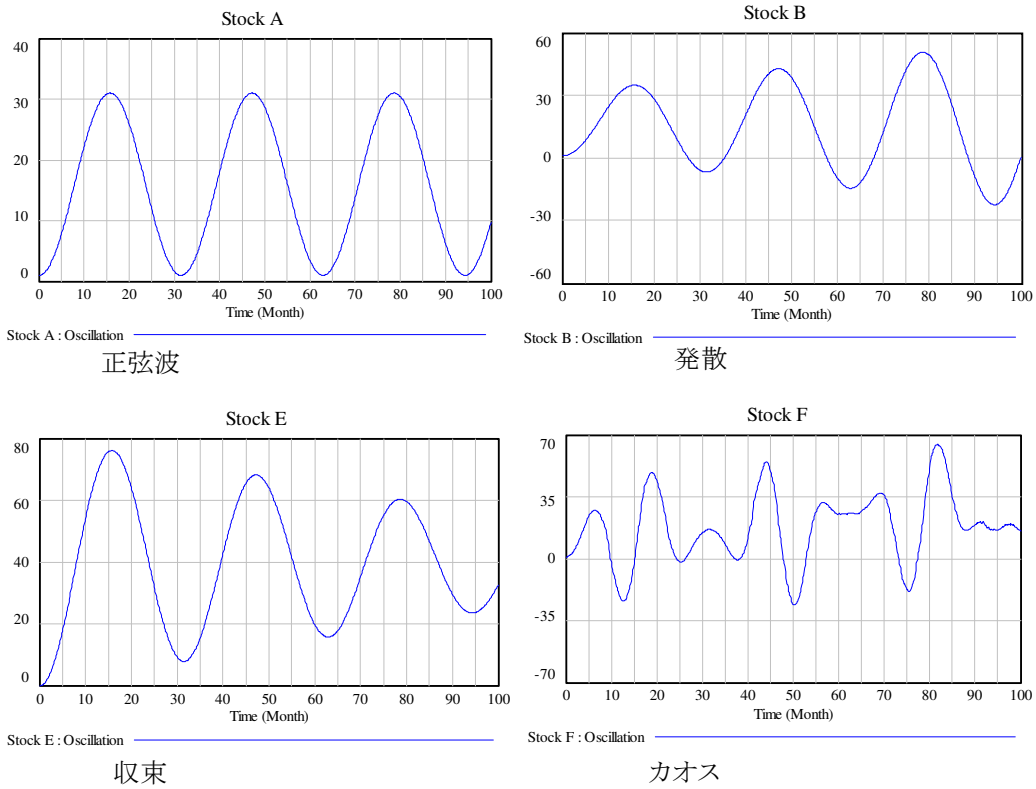


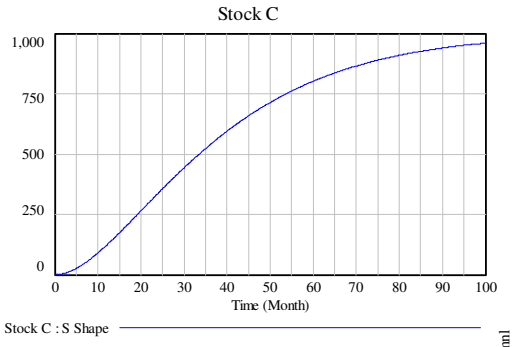
図 4-4：振動

波動的な変化を起こすものです。図 4-4 左上は正弦波と呼ばれるものです。同じ周期で増減を繰り返します。右上になると、振動の幅が大きくなっていきます。これが発散と呼ばれる振る舞いです。左下になると、振動の幅が小さくなっていきます。これが減衰または収束と呼ばれる振る舞いです。振動は、ものによって周期にも変動幅も規則性が見られなく、ただ振動しているだけのものがあります。これをカオス（無秩序）と呼んでいます。

V) S 型変化（釣鐘型変化）

よく釣鐘型、あるいは S 型変化と呼ばれるものです。図 4-5 の左上の曲線が S 型変化と呼ばれるもので、S の字の半分を斜めにしたような形、最初はゆっくり変化し、やがて変化量

が大きくなり、最後は変化量が減少し、収束するような形を示します。これを反対にしたものと合成したものが、釣鐘の形をしていることから、釣鐘型変化と呼ばれることもあります。統計を習った人であれば、正規分布型曲線でお馴染みの形でしょう。これら S 型変化は、ロジスティック曲線とかゴンベルツ曲線などと呼ばれる曲線群に属します。



上は、ちょっと明確ではないかも知れないが、一応S型の成長曲線になっている。右は、温度100度に設定したボイラーのモデルで、100度を超えると、蒸気で抜けて100度に下がる。オーバー・シュートと呼ばれる現象

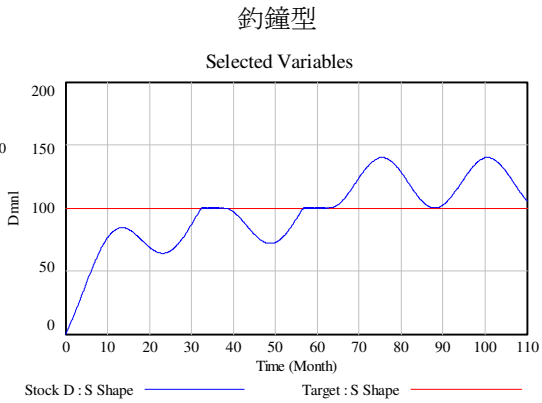


図 4-5：S 型変化

ロジスティック曲線や成長曲線と呼ばれるものは、一般的に、

$$N(t) = K\,\varsigma_1(rK(t_0 - t)) = \frac{K}{1 + \exp(rK(t_0 - t))}$$

という式で表現できるので、EXP 関数を使って表現できるのですが、曲率 r の算定が難しいので、SD では、普通は、ストックとフローを使って表現するか、あるいはテーブル関数を使って表現します。一応、これら、成長曲線と呼ばれる曲線の電算機による計算方法を、参考までに、American Phytopathological Society の HP からコピーしました。最初の列が差分法による計算式で、2 列目が積分形式、最後の列が対数形式です。

表 1-1：成長曲線群の数式

Growth Curve Models

Model	Differential Equation Form	Integrated Form	Linearized Form
Exponential	$\log y = \log y_0 + rt$	$y = y_0 \exp(rt)$	$\log y = \log y_0 + rt$
Monomolecular	$\ln\{1/(1-y)\} = \ln\{1/(1-y_0)\} + rt$	$y = 1-(1-y_0)\exp(-rt)$	$\ln\{1/(1-y)\} = \ln\{1/(1-y_0)\} + rt$
Logistic	$y = 1/[1 + \{-\ln y_0/(1-y_0) + rt\}]$	$y = 1/[1 + \exp\{-\ln y_0/(1-y_0) + rt\}]$	$\ln(y/(1-y) = \ln\{y_0/(1-y_0) + rt\}$
Gompertz	$dy/dt = ry \ln(1/y) = ry(-\ln y)$	$y = \exp(\ln y_0 \exp(-rt))$	$-\ln(-\ln y) = -\ln(-\ln y_0) + rt$
Weibull	$dy/dt = c/b\{(t-a)/b\}^{(c-1)}\exp[-\{(t-a)/b\}^c]$	$y = 1-\exp[-\{(t-a)/b\}^c]$	$\ln[\ln\{1/(1-y)\}] = -c\ln b + \ln(t-a)$

VI) 実際の世界で見られる変化

実際の世界でも、こういった変化は、新聞や雑誌などに載っているグラフなどで普通に見ることができます。そして、こういった、新聞や雑誌で普通に見られるグラフは、先に述べた 5 つの変化のどれかに基本的に分類できます。そのことを、新聞や雑誌に載っていたグラフを取り上げ、見てみましょう。フォレスターが、「SD を学ぶと、新聞に掲載してあることが違った風に見えてくる」と言っていましたが、そのことが実感できると思います。

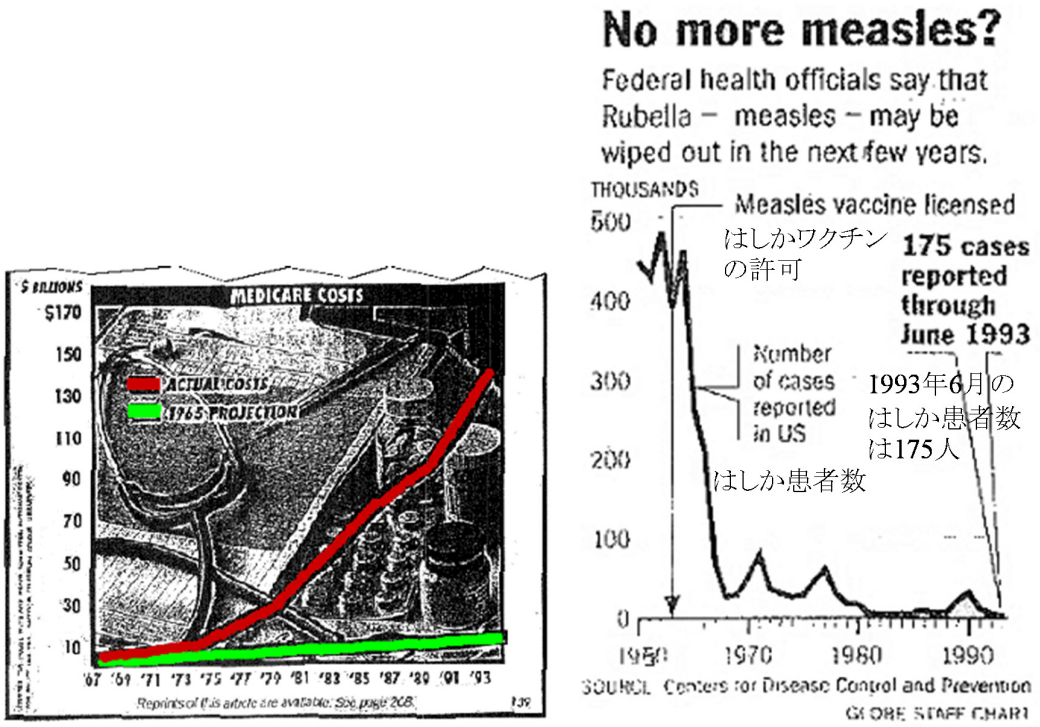


図 4-6：米国の医療費（左）とはしか患者数（右）

図 4-6 左は、1967 年から 1994 年までの医療費のグラフです。緑の線は 1965 年の実測値を使って 1967 年から 1994 年までを予測したものですが、1967 年から 1994 年までをただ 1965 年から直線で延長しただけとなっています。これは SD を知らない人がよく犯す間違いで、素人はよく、このように、単純にそれまでの伸びをそのまま将来に延長して、将来の値を予測します。赤線は実際の医療費の伸びを示していますが、明らかに指数的に増加しています。SD を知った人であれば、赤線のように予測したでしょう。

図 4-6 の右は、「はしかは終焉？」という記事に付けられたグラフで、「連邦厚生省の高官は、はしかは数年以内に終焉するだろうと語る。」と書かれています。そして、1960 年から 1993 年までの米国のはしかの患者数のグラフが記事に付けられています。このグラフの患者数の変化からは、明らかに指数的に減少していることが見て取れます。

図 4-7 左は、1988 年から 1993 年までの NBA のバスケットボールの試合観客数を示したものです。1990-1991 年に少し乱れが見られますが、ゴール・シーキング（収斂型）の振る舞いをしていることが見てとれます。同じく、図 1-7 右は、米国で販売されている 486 機種のデスクトップ型コンピューターの平均販売価格を調査したものですが、やはりゴール・シーキング（収斂型）の振る舞いをしていることが見て取れます。

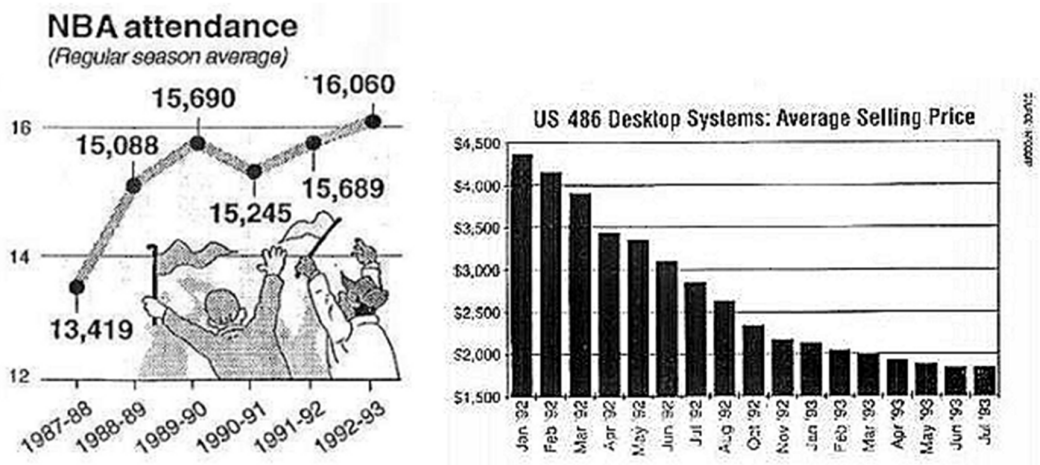


図 4-7 : NBA のバスケットボールの試合観客数（左）と 486 機種のデスクトップ型コンピューターの平均販売価格（右）

図 4-8 左は、1821 年から 1933 年までのカナダにおける Lynx の利用者数（ログ数）を示したものです。少しノイズ（乱れ）はあるものの波動的変化を示していることが見て取れます。同じく、図 4-8 右は、1957 年から 1978 年までのノルゥエーにおけるパルプ製品の在庫、生産、販売を示したものです。パルプ製品の在庫量の変化は振動型で、その振動幅が発散していることが見て取れます。

図 4-9 左は、1981 年から 1991 年までの米国の第 3 種郵便物の配達量（単位 : 10 億通）を示したものですが、明らかに S 型曲線となっていることが見て取れます。このダイレクト・メールの減少には、電子メールの普及も影響しているのかも知れません。同じく、図 1-9 の右には、1900 年から 1992 年までの米国の原材料消費の変動を示しています。ノイズ（乱れ）はあるものの、波動型で収斂していることが見て取れます。

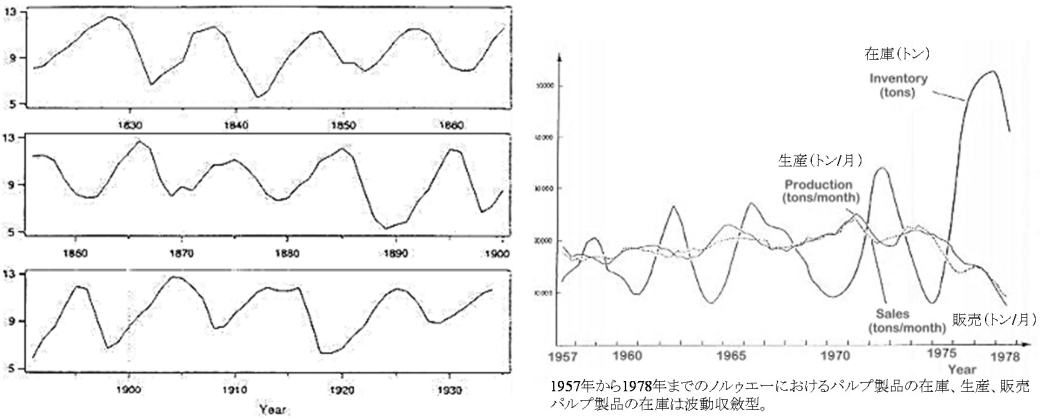


図 4-8 : Lynx の利用者数（ログ数）（左）とノルゥエーにおけるパルプ製品の在庫、生産、販売（右）

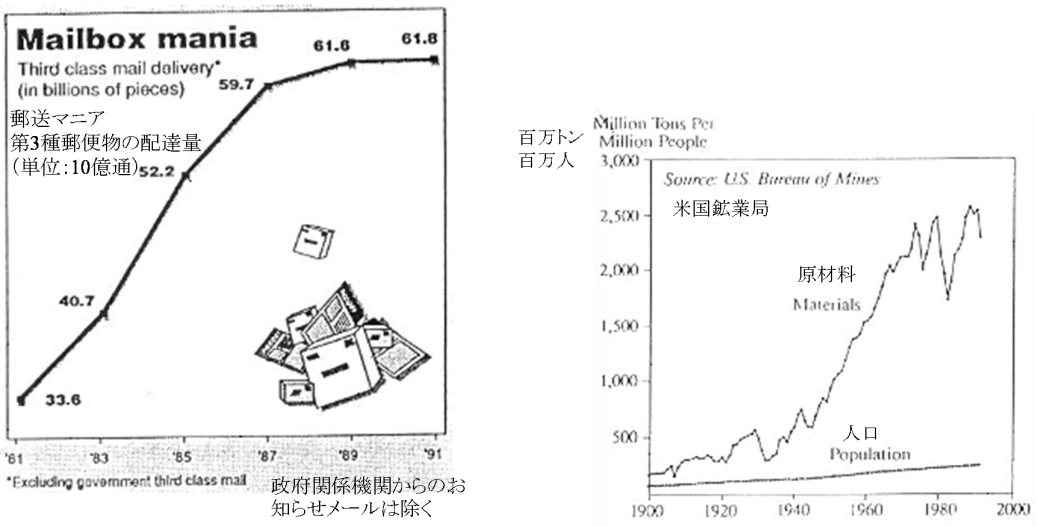


図 4-9：米国の第 3 種郵便物の配達量（左）と米国の原材料消費（右）

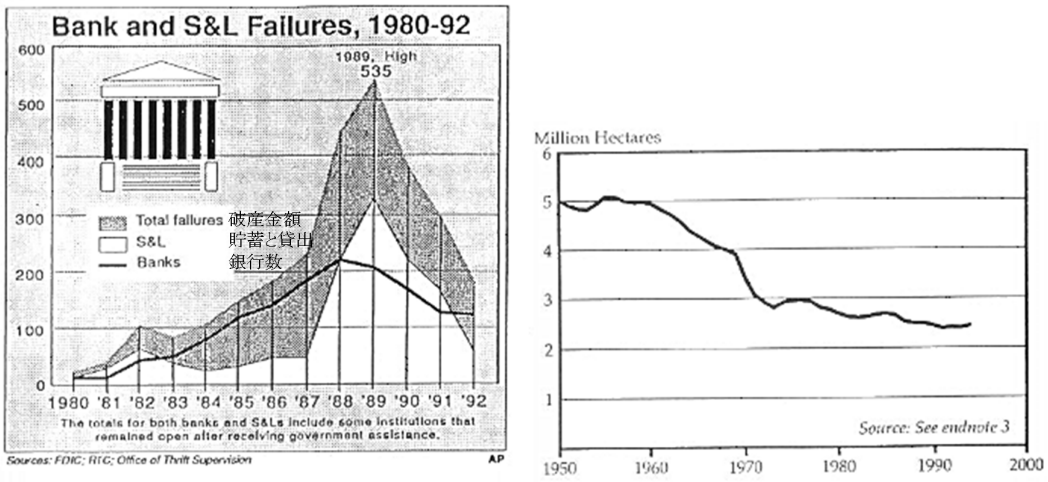


図 4-10：米国の銀行数、貯蓄と貸出金額、破産額（左）と日本の水耕地面積の推移（右）

図 4-10 左は、1980 年から 1992 年までの米国の銀行数、貯蓄と貸出金額、破産額を示しています。3 本の曲線が釣鐘型に、オーバーシュートと破局というパターンを示していることが見て取れます。

同じく図 4-10 右は 1950 年から 1994 年までの日本の水耕地面積の推移を示したものですが、明らかに反 S 型曲線となっていることが見て取れます。

これまで見てきたように、振る舞いは、5 つのパターンのどれか、あるいはこの 5 つのパターンの組み合わせになっていることが理解されたと思います。とすれば、SD モデルでこれらのパターンを表現でき、こういった変化をもたらすものの原因やしくみを、SD モデルを使って探ることができると考えられます。

SD モデルは、ストックとフローという素子で作られています。そこで、ストック（蓄積）とフロー(変化量）というコンセプトを理解することにしましょう。また、ストックとフローという素子を使って、フィードバック構造を作ることができます。SD モデルでは、システムはフィードバック構造であると考えています。そこで、フィードバックという性質を、

次に理解することにしましょう。フィードバック構造を理解することで、変化がどう作り出されるかが理解できるでしょう。SD では、フィードバックがループになり、複数干渉し合うようなものをモデルにしています。フィードバック・ループの影響の強度によって、振る舞いに複雑な動きが現れます。

さらに、SD モデルが取り扱っている世界は、非線形と呼ばれる性格のものです。フィードバック構造を理解した後に、非線形というシステムの振る舞いの性格を考えてみます。

(3) ストックとフロー

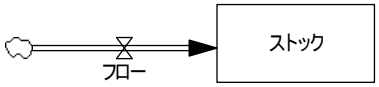


図 4-11：ストックとフロー

動的変化は、量が蓄積されることで発生すると考えられます。つまり、変化量が蓄積されるので、動的な変化が発生します。そこで、ストックという変化量を蓄積する素子を考えます。これは浴槽のようなものと考えて下さい。そのストックに対する入出力を司るものを考え、これをフローと呼びます。フローはストックという風呂桶に例えられるものに対して蛇口、あるいは排水栓というように例えられます。

ストックとフローという概念でモデルを作っていくのですが、人によって、何がストックで何がフローかの理解が難しいかも知れないかも知れません。英語では、ストック、フローは普通の言葉で、専門用語というわけではないので、この何がストックで、何がフローなのかが SD を学び始めた人がよく最初に誤解するものになっています。例えば、入力値（フロー）がマイナスであれば、ストックが負になるという理解は正しいのですが、しかし、この理解で、フローであるインフレーション（価格上昇）が小さくなれば、一般的に、ストックである価格が下がると考えると、これは間違いです。インフレーション（価格上昇）が下がると、物の価値が下がり、物価の上昇はあるのですが、上昇率が下がるというのが正解になります。このように、初心者はよく、ストックとフローを間違えたり、その性格をよく誤解します。（このグラフによる説明は、図 4-15 左を見て下さい。）

以下の指針が、ストックとフローを区別する上で有効でしょう：

－ストックは名詞でフローは動詞（これは英語の場合、日本語はあいまいなので、そうとは言えないこともあるので、ストックは「量」を、フローには「する」をつけて、名詞と動詞にしてしまう。例えば、「貯金する」はフロー、「貯金量」はストック。）

－時間が止まっても、ストックは存在し続けるが、フローは時間が止まってしまうと、消滅する。（仮の話。時間が停止すると、時間に関して行う動作が無くなるので、動詞であるフローは無くなる。「貯金する」は、時間をかけてお金を貯める動作なので、時間が無くなれば、時間をかけてお金を貯める行為も存在し得なくなる。）

－ストックはシステムの状態に関する情報や信号を送る。（「貯金量」は溜まったお金の量という情報を発信している。）

ただ、私の個人的意見ですが、明白にストック、フローが決まっている場合もあるが、モデルの作り方次第でストックにもフローにもなる日本語の名詞や動詞があるし、通常は要素の名前には曖昧な表現しかしません。先の例も、普通、モデルでは「貯金」としか書かないでしょう。「貯金」としか書かないと、動詞の「貯金する」なのか、名詞の「貯金量」なのか、これだけでは区別できません。従って、モデル作りを多く経験し、自動的に、ス

トック、フローの区別ができるようになるしかないのではないかと思っています。逆に、そんなものなので、あまり拘らなく、モデルを作っていきながら、やっぱりストックで表現する方がいいと変数をストックに変える、といった感覚でいいのではないかと思っています。

I) ストック

ストックには以下のような性格があります。

・ストックは記憶を持つ
・フローの時間軸に対する変化の形を変える
・フローと対になる
・遅延を起こす

(A) ストックは記憶を持つ

もし、入力（フロー）がストップしたら、ストック値は変化を止め、そのままの値を保ちます。出力（フロー）が入力以上にある場合のみストックが減ります。ただ、このことがなかなか感覚では人々に理解されていなく、人はよく、入力（問題の種）をストップしたのだから問題（ストック）が解決されたと思いがちです。例えば、温暖化ガスの問題でも、排出量を削減すれば問題が解決すると誤解しがちですが、ストックとして溜まった大気中の温暖化ガスの量を減らさないと問題は解決しません。

図 4-12 は 1930 年から 1993 年までの米国の連邦政府の赤字と債務を示したものです。左が赤字で右が債務です。つまり、左はフローで、右がストックになります。フローである、年次の赤字により、ストックとしての債務が溜まっていきます。しかし、よく感覚的に勘違いされるのですが、赤字幅を減らしても、赤字である限りは右のストックは増加していきます。また、フローである、年度の赤字を解消し、赤字が仮にゼロになっても、ストックである滞留した債務がそれ以上増えないだけで減るわけではありません。これは、日本の政府が抱えている巨大債務についても同じです。予算で赤字にならなくなっても、それまでの、予算不足を補う手段として発行した国債などの返済が債務として累積されています。この累積債務はストックなので、ゼロになるわけでも減少するわけでもありません。

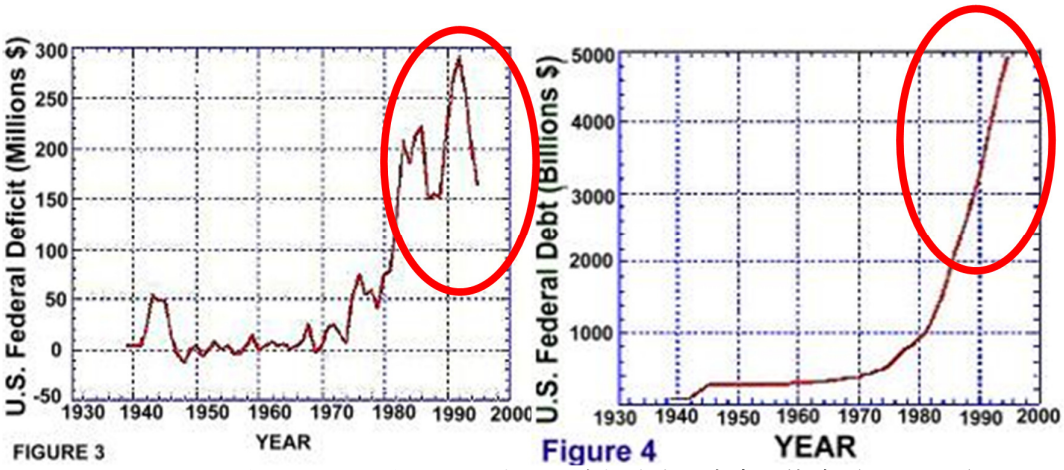


図 4-12：1930 年から 1993 年までの米国の連邦政府の赤字と債務（百万ドル）

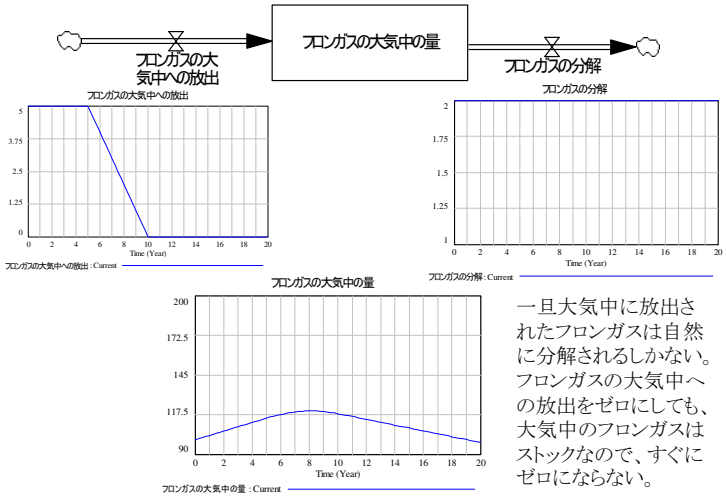


図 4-13：大気中のフロンガスのモデル

図 4-13 は大気中のフロンガスのモデルです。図の左上がフロンガスの発生を示しています。この例では、排出量が 5 あり、5 年目から排出量を削減し、10 年目で排出量をゼロにしています。しかし、大気中のフロンガスは、自然の作用で毎年 2 しか消滅しないとします。中央にストックである大気中のフロンガスの量を示していますが、削減量を減らした 5 年目でも、排出量がゼロになったわけではないので、大気中のフロンガスの量は増え続けます。排出量が自然に消滅する量である 2 を下回った 8 年目からやっと減少します。しかし、排出量がゼロになった 10 年目でも、大気中のフロンガスはまだ多量に溜まっています。排出量をゼロにした後 10 年経過しても、完全に消滅するわけではありません。

(B) フローの時間軸に対する変化の形を変える

ストックではフローの値が累積されるので、フローの時間軸に対する形は、ストックでは変わってしまいます。図 4-14 の左の例では、フローは、5 のまま変わらない（水平線）のですが、ストックは増加し、斜線になっています。

図 4-14 の右の例では、フローでは直線だが、累積効果を生かし、ストックでは指数曲線になっています。

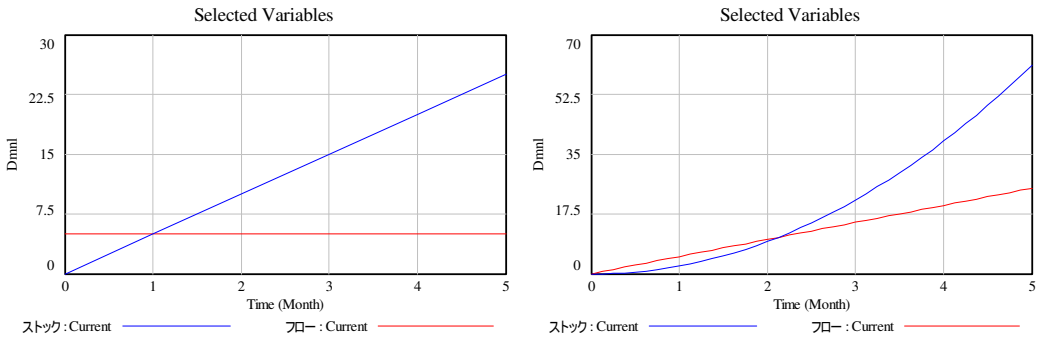


図 4-14：フローの変化をストックが変える例

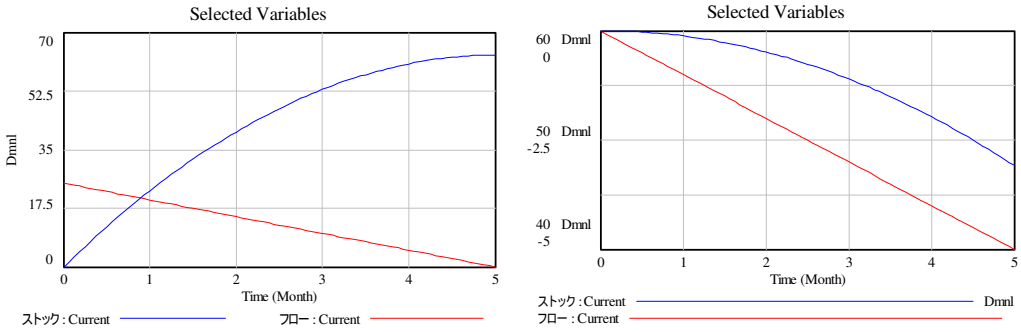


図 4-15：フローの変化をストックが変える例

同じくフローでは直線だが、ストックでは成長曲線にすることもできます。図 4-15 左では、赤線で示した直線のフローの形を、ストックで成長曲線に変えています。この例の、フローは減少するのだが、ストックが増加するという現象は、例えば、インフレは収縮しているのだが、それでも価格の上昇が続くといった例に見ることができます。もっとも、ストックである価格の上昇率は、フローであるインフレの低下と共に、それほど上昇しなくなり、収束に向かいます。

もちろん、フローが減少し、ストックも減少することもできます。図 4-15 右では、フローが常にマイナス値を取るので、ストックを減少させ続けています。これは、流出の方が流入よりも多いことを意味しているので、流出がプラスというように見ることもできます。

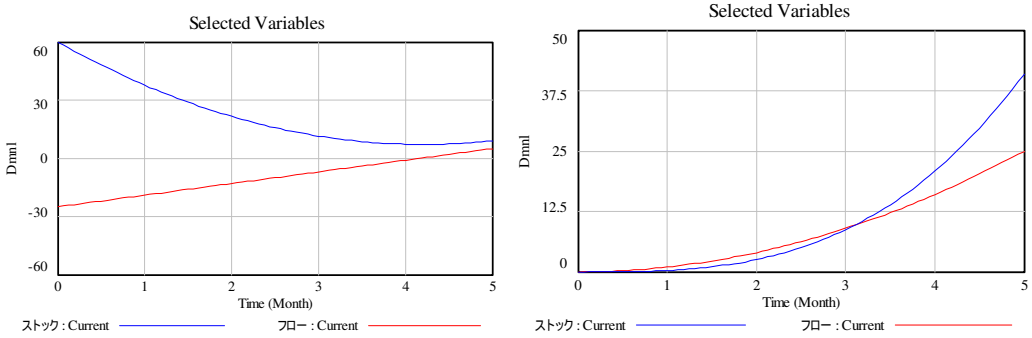


図 4-16：フローの変化をストックが変える例

フローが増加しているにも関わらず、ストックを減少させることもできます。図 4-16 左に示していますが、フローがマイナス値を取る間は、ストックを減少させ続けます。

図 4-16 右に示したように、フローもストックも指数曲線にすることもできます。

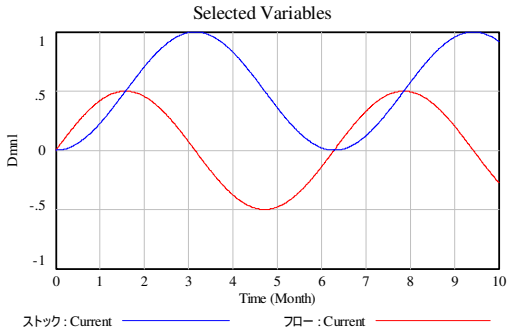


図 4-17：フローの変化をストックが変える例

図 4-17 に示したように、フローを波動曲線にして、ストックも波動曲線に、かつ、周期をずらすことができます。フローが最大値を取った後、時間遅れでストックが最大値に達します。

(C) フローはストックと対になる

フローとストックは必ず組になって変化を表現します。つまり、入力を加工し、出力として取り出すことができ、出力は、入力とは違ったものにできます。図 4-18 の一番上の例では、ストックがフローと対になっていて、象の生誕が象の頭数と組になり、象の頭数を増やします。また象の頭数と象の死亡が組になり、象の頭数を減少させます。

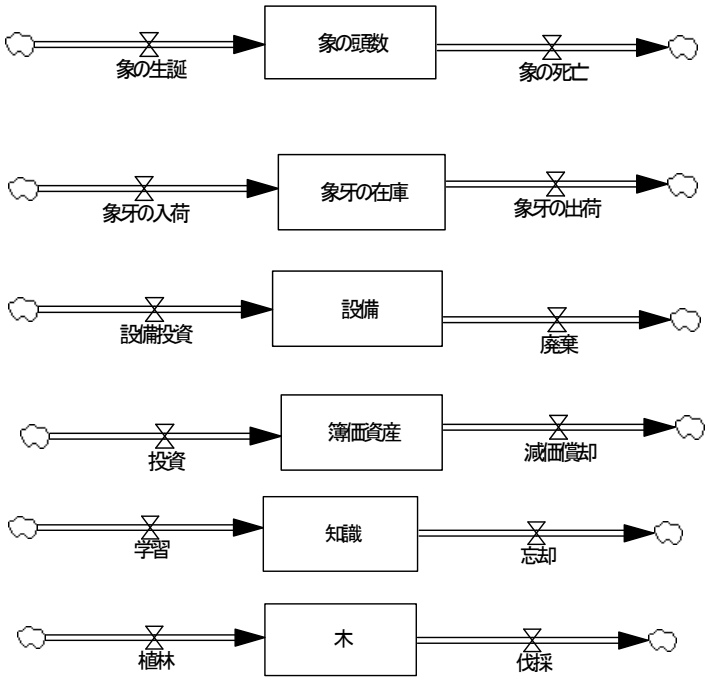


図 4-18：フローとストックのペアの例

2 番目のものは、象牙という商品のストックが、入荷というフロー、出航というフローとペアを組んでいます。もっとも、現在は、象牙取引は国際的に禁止されていますので、このモデルも架空のものとなってしまいました。

3 番目のものは、設備の例で、設備投資を行い、設備を増やす一方、設備は劣化しますので、廃棄します。設備というストックが、設備投資、廃棄というフローとペアになっています。

4 番目のものは、簿価による資産総額の例です。投資により資産が増え、しかし減価償却により資産額は減っていきます。資産というストックと投資、減価償却というフローがペアになっています。もっとも、会計では、簿価とは別に時価を使いますので、時価では、時価による資産評価により、ストックである資産の総額が変わってしまうことが難点です。

5 番目のものは知識の例で、学習により知識が増え、しかし忘却により知識を忘れてしまいます。知識というストックに学習、忘却というフローがペアになっています。私などは、もともと記憶力が悪いので、学習してもなかなか知識がたまらない上に、老化が進み、忘却の方はスピードが速くなっています。SD ではストックはマイナスの値を取ることができ

ます。このモデルを私に当てはめた場合、知識がマイナスになった場合、私は果たしてどうなるのかと考え、悩んでいます。

最後は木と植林、伐採の例で、木というストックは植林で増え、伐採で減っていきます。木というストックと植林、伐採というフローがペアになっています。

もっとも、ペアというと 2 人で組になるというイメージが強いので、ストックを愛してくれる入力側のフローという恋人を持ち、ストックが愛し、奉仕している出力側のフローという恋人を持つ 3 人の関係と理解するのがいいのかも知れません。

モデルによっては、入力フローとストックで、出力フローが無いもの、出力フローとストックで入力フローが無いものもありますが、通常は、ストックには、入力フローと出力フローが付くものと考えて下さい。

(D) ストックは遅延（時間遅れ）を作り出す

ストックは遅延を作り出します。下の図の図 1-17 は、前に、フローを振動型変化にし、ストックも変動型の変化を示す例として使ったものですが、フローが最大値を取った後、時間遅れでストックが最大値に達していることが見て取れます。原因となる事象が現れ、それが結果を引き起こすまでに時間がかかる、つまり遅延がある様子を表しています。もし、この原因と結果の間に大きな時間差があれば、意思決定者には、原因が結果を招いていること、両者に繋がりがあることが認知できないでしょう。そして、遅延があるので、現象だけを見て、原因が特定できなく、間違った対応策を取ってしまうことは、実際の世の中ではよくあることです。

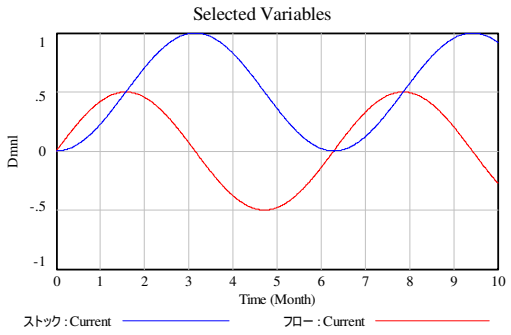


図 4-17：フローの変化をストックが変える例（再出）

以下の例は、ストックとフローや、ストックと次のストックの間にかなり大きな時間的ずれがあるものを示しています。最初のモデルでは、象が育つまでに 10 年近くかかります。また、象は 50 年以上の寿命を持つと言われています。象の生誕から象の死亡まで 50 年以上の時間遅れがあることになります。

2 番目のモデルは、ハンターが経験豊かなハンターになるものです。ハンターになったばかりでは、まだ、未熟ですが、5 年、10 年と経験を積み、経験豊かなハンターになります。しかし、やがて年老い、ハンターのようなきつい仕事を続けることは難しくなり、引退します。ハンターになってから引退するまで 30 年ぐらいは働くとすれば、ハンターになってから引退するまでに 30 年の遅延があることになります。

3 番目のモデルは大学院の博士コースの院生数のモデルです。せっかく大学院に入学しても、1 年目でドロップアウトする学生がいて、それが 2 年目でも、3 年目でも 4 年目でもあり、残った院生だけが終了できます。大学院に入ってから終了まで 4 年もの時間遅れがあります。

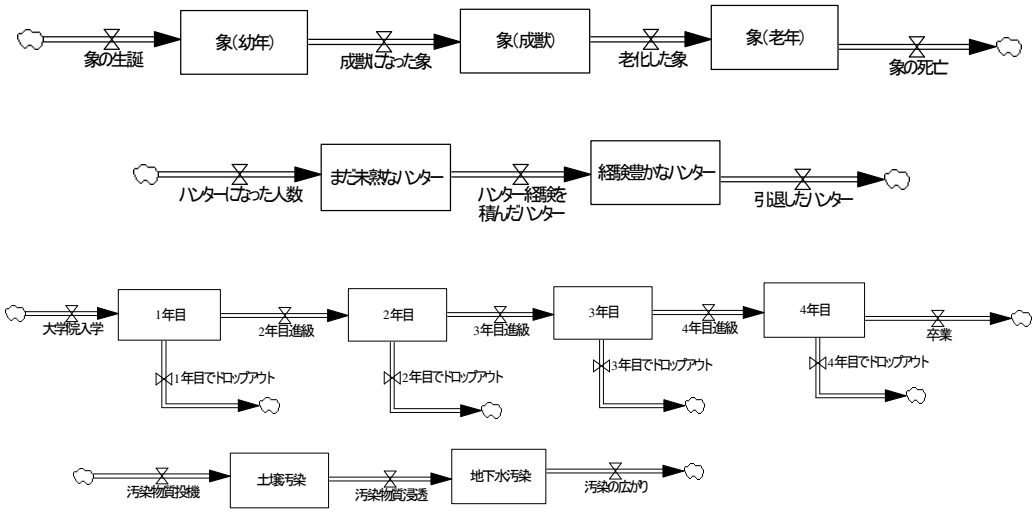


図 4-18：ストックとフローの間に大きな時間差があるものの例

最後のモデルは土壌侵食の例です。化学物質などの無処理投機を行うと、まず土壌が汚染され、それが地下に広がり、地下水を汚染します、こうして、地下水を介して広域に汚染が広がっていきます。地盤亀裂などがない状態であっても、10 年もすると土壌汚染が地下水域に達すると言われていますので、10 年もすると地下水が汚染され、修復不可能な状態になってしまいます。土壌汚染だけであれば、汚染された土を掘り、それを処理することで汚染を食い止められますが、地下水まで達してしまうと、どうしようもありません。

(4) フィードバック

SD の大きな特徴は、対象をシステムとして捉えるという考え方にあります。ここで SD では、システムとして、フィードバックがある構造を考えています。さらには、フィードバックの中には、ループ状になっているもの、フィードバック・ループになっているものもあると考えています。つまり、先に説明した、ストックとフローは、このフィードバック・ループという大きな流れの一部を構成するものと考えています。前に、ストックを浴槽に、フローを蛇口に例えましたが、図 1-19 のように、蛇口（フロー）で浴槽（ストック）に水を満たすモデルを考えます。このモデルでは、浴槽の水の溜まり具合という情報を、フローである蛇口に与え、水の量を調整します。浴槽の水があまり溜まっていない状態では、蛇口は解放のままで、水が流れ、浴槽に供給されます。浴槽の水が十分溜まった場合、十分溜まったという情報で、蛇口を閉め、水の供給を止めます。蛇口→浴槽→蛇口というフィードバック・ループが存在することがこのモデルに示されています。

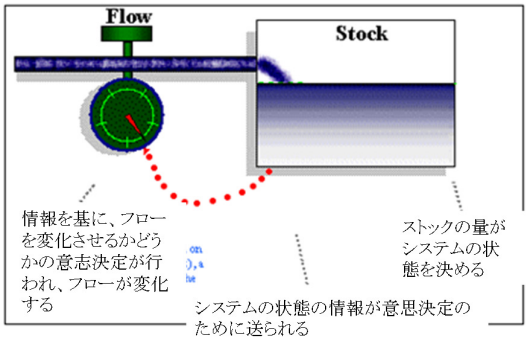


図 4-19：ストックとフロー、フィードバック・ループ

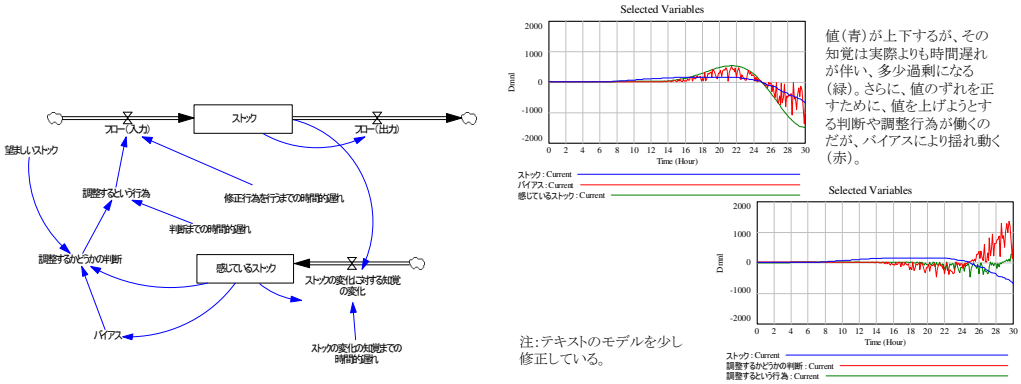


図 4-20：ストックとフロー、フィードバック・ループ

図 4-19 のようなフィードバック・ループは他にもよく見られるものですが、システムの状態の情報が、しばしば遅延やゆがみを伴ってフローに届くことで複雑になったり、ゆがみや遅延が問題を引き起こします。図 4-20 にそのような例を示しています。この例では、タンクの水面をゼロに合わせるという調整を目測で行うものですが、実際のストックの変化を感じるが、そこにまず時間遅れがあり、さらに、ある程度に知覚が蓄積されないと、調整するかどうかの判断が行われません。また、バイアスが加わり、判断がゆれます。その上、判断から、調整するという行為までの間に遅延が伴って調整するので、調整は遅れて行われます。青線が実際のタンクの水面ですが、これがわずかに上昇しただけなのに、過大調整に至ってしまいます。まず、上昇が遅れて知覚されます。また、赤線で示したバイアスで判断が揺れていることが見て取れます。こうして、過大修正が発生します。

こうしたフィードバック・ループはしばしば非線形的なものとなり、その振る舞いは、直観に反したものとなることが知られています。また、システムはオープン（開放）なものと、クローズ（閉鎖）なものに分けられます。

I) 正のフィードバック・ループ、負のフィードバック・ループ

正のフィードバック・ループは、増強ループと呼ばれています。これは、ある構成要素の増加が、他の構成要素を増強させ、その関係で、ループ全体として、増強が増幅されるものです。ここで、ある構成要素の増加が、他の構成要素を増強させると書きましたが、これは、ある構成要素の減少が、他の構成要素をさらに減少させることも意味しています。従って、ループ全体では、どんどん増幅していくだけではなく、どんどん減少していくこともあります。悪循環はこの典型的な例です。増強ループでは、一般に、現状からどんどん離脱するような振る舞いを示します。ただし、このことによって、理想的な状態になっていくこともあるので、いいとか悪いとかという意味ではありません。

一方、負のフィードバック・ループは均衡ループと呼ばれています。これは、ある構成要素の増加は、他の構成要素を減少させる、あるいは、ある構成要素の減少は、他の構成要素を増加させていき、ループ全体では、増強や振動が収束していくという性質を持ちます。ただし、この性格によって、振動し、なかなか収束しないということも起きるので、これもいいとか悪いとかという意味ではありません。

II) 因果関係図

こういった増強ループや均衡ループは、因果関係図(CLD: Causal Loop Diagram)という手法で描く図で表現されます。システム思考でお馴染みでしょう。これは、しばしば ST モデ

ル、あるいは定性モデルなどとも呼ばれます。
この因果関係図では、要素の間を矢印で結びます。要素は、最終的にはストックやフローに分解されますが、その前の段階のキーワードと考えて下さい。

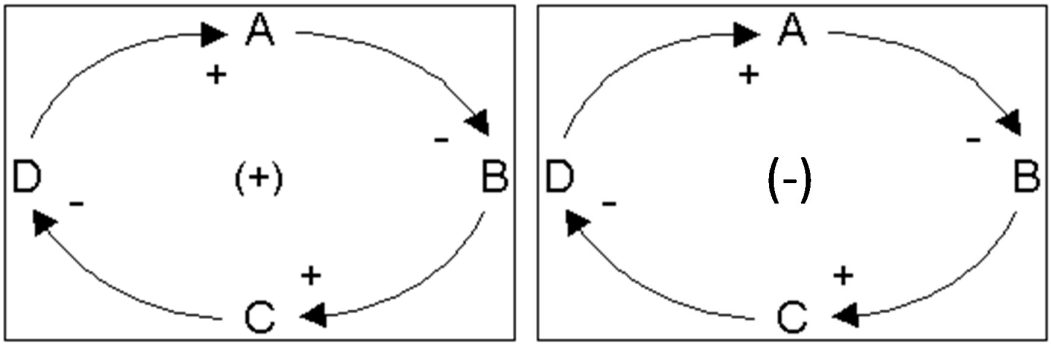
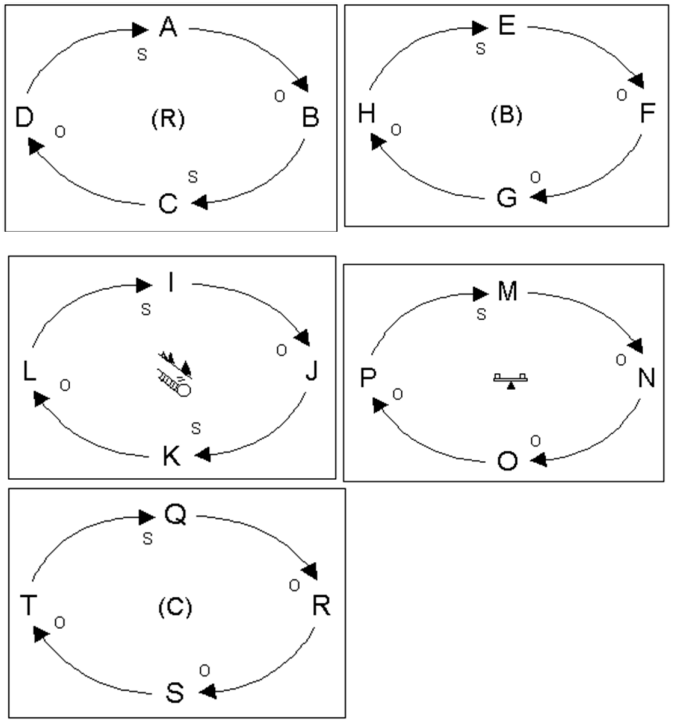


図 4-21：増強ループ（左）と均衡ループ（右）

例えば、図 4-21 で見てみましょう。ここでは、A、B、C、D の 4 つの要素がそれぞれ矢印で結ばれています。要素 A と B、要素 B と C、要素 C と要素 D、そして要素 D と要素 A が因果関係を持っています。つまり、要素 B は要素 A が変化することが原因で、変化します。同じく、要素 C は要素 B の変化が原因で要素 B も変化します。このように、A により B が影響を受けることを、A から B に引かれた矢印で表現しています。
また、A により B は影響を受け、A が増加すると B は減少するような影響の関係になることを、A から B に引かれた矢印の先に「－」を付けて表現しています。C は B から影響を受けますが、B が増加すると C も増加するような影響を受けることを、B から C に引かれた矢印の先の「＋」で示しています。



・増強ループや均衡ループを表現するさまざまなやり方。上から、増強ループにはRを、均衡ループにはBを用いる。中は、増強ループには雪崩を、均衡ループにはシーソーを用いる、下は、均衡ループにのみCを用いる。

・私は、フィードバック・ループが複数ある場合、番号付けをして区別する関係から、R1、R2、B1、B2というように、増強ループにはRを、均衡ループにはBを使っている。

図 4-22：増強ループと均衡ループのさまざまな表現方法

図 4-21 左では、ループ全体で増強関係（正のループ）になるので、増強ループを示すために、フィードバック・ループの中央に、「＋」を記して、正のフィードバック・ループであることを表現しています。図 1-21 の右では、均衡ループ（負のループ）になることを示すために、ループの中央に「－」を付けています。

増強ループを表現する方法として「＋」ではなく、「R」や雪崩などのイラストを用いる人もいます。均衡ループでは、「－」ではなく、「B」やシーソーなどを使う人もいます（図 4-21 中段）。ちなみに、「R」は Reinforce（増強）という英語の頭文字を、「B」は、Balance（均衡）という英語の頭文字を取ったものです。要素間の関係も、「＋」、「－」だけではなく、Straight の S である「S」、Opposite の「O」を用いる人もいます。中には、均衡ループにのみ、「C」を用い、増強ループには何も記載しないというやり方を採用している人もいます（図 4-21 下段）。

私自身は、フィードバック・ループが複数ある場合、番号付けをして区別する関係から、R1、R2、B1、B2 というように、増強ループには R を、均衡ループには B を使っています。

III) 増強ループの例

増強ループの例を見ていきましょう。図 4-23 左は、そのような例としての象のモデルです。象の子供が生まれ、順調に育てば、時間経過後、象の成獣になり、象の頭数が増えます。成獣が増えれば、半数の雌の数も増え、生まれる子供も多くなります。しかし、象の子供の生まれる数が減れば、成獣になる象の数も減り、成獣の数が減少します。成獣、特に雌の数の減少は、生まれる子供の数の減少に繋がります。このように、生まれる象の数と成獣との間には正の関係（一方が降れば他方も増える）があり、フィードバック・ループは増強ループとなります。ここでは、増強ループであることを、中央の「＋」で示しています。

図 4-23 右は国の財政赤字のモデルです。財政赤字は、国債などからの借金で穴埋めし、その返済に利子を払っています。従って、財政赤字が増えれば、支払わなければならない利子も増えます。しかし、財政赤字を減らすことができれば、支払うべき利子の額も減ります。ここでは、増強ループであることを、中央の「R」で示しています。

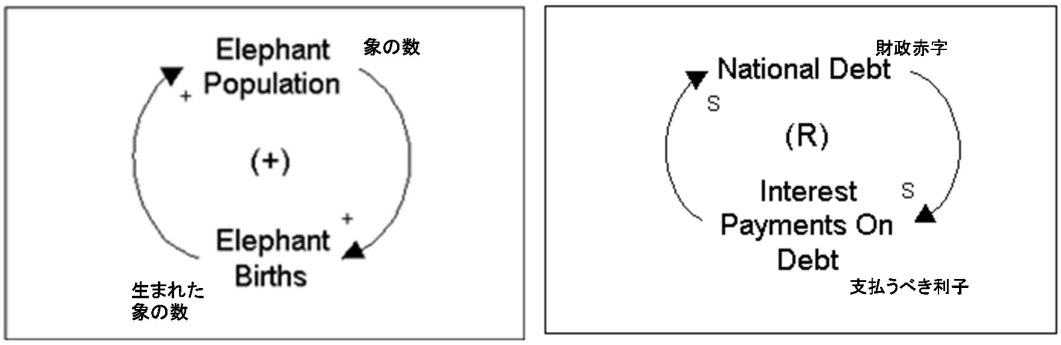


図 4-23：象のモデル（左）と財政赤字（右）

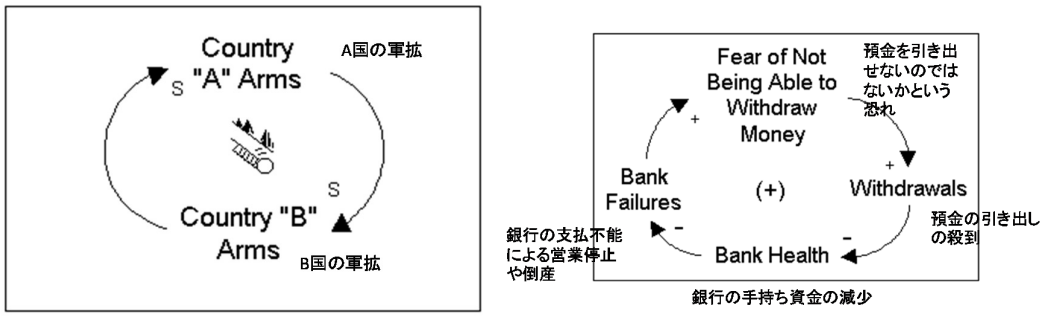


図 4-24：軍拡モデル（左）と銀行取付けパニック（右）

図 4-24 左は軍拡競争のモデルです。A 国が軍拡を行うと、その競合相手である B 国も、脅威を感じ、軍拡を行います。B 国が軍拡を行うと、A 国は、それを脅威と感じ、さらに軍拡を進めます。こうして、全体では、軍拡が進んでいきます。冷戦時代の米国とソ連の関係をこのような増強モデルとして表現できます。ここでは、増強ループであることを、中央の雪崩の絵で示しています。

図 4-24 右は、1930 年代に米国で起きた銀行の取り付けパニックのモデルです。預金を引き出せないのではないかという恐れがあり、預金者が自分の預金を引き出そうとしました。預金が引き出されると、銀行は手持ちのお金が減り、みんなが引き出すと、お金が無くなり、支払停止や閉店休業することになります。こうなると、預けていた預金が引き出せないのではないかというパニックが広がり、預金引き出し者が増え、銀行に殺到します。銀行の手持ちのお金がどんどん減り、倒産する銀行が増えていきます。倒産する銀行が増えると、パニックがどんどん広がっていきました。この金融パニックに対し、米国連邦政府は、多量に紙幣を印刷し、切り抜けることに成功しました。同じような金融パニックは、戦前の日本でも起きていて、当時の蔵相だった高橋是清も同じように多量の紙幣印刷で切り抜けています。

図 4-25 は、米国の学校での麻薬拡大のモデルです。1980 年代から 1990 年代にかけて、米国では、学校に銃が持ち込まれ、同級生が射殺されるとか、学校に麻薬が持ち込まれ、暴力や金銭をめぐる脅しなどの問題が起き、社会問題となっていました。

バリー・リッチモンドなどがこの問題を取り上げ、モデルにし、こういった問題は、学校側が禁止するだけでは解決しなく、学校と教師、親、学生が、例えばモデルを使いながら、問題の構造を理解し、それぞれがどう努力することでこういった問題を解決できるか話し合い、解決に向けて努力していくことが重要と訴えています。この図 1-25 のモデルでは、校則の厳しさに反発する学生が、仲間から誘惑され、麻薬に手を染め、麻薬患者になり、麻薬を買う金が必要になり、手に入れた麻薬の一部を仲間の学生に売ります。こうして麻薬を扱う学生が増え、麻薬が簡単に買えるようになると、麻薬を常用する学生の数が増えていき、いろんな問題をひきおこすようなります。この因果図は、3 つの増強ループが干渉し合い、問題を深刻化させている例です。

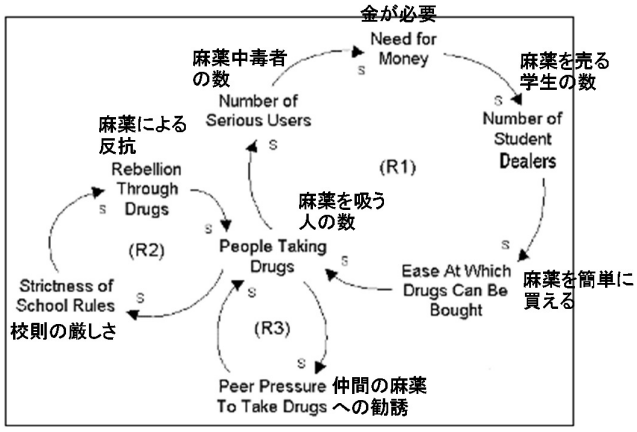


図 4-25：麻薬モデル

IV) 均衡ループの例

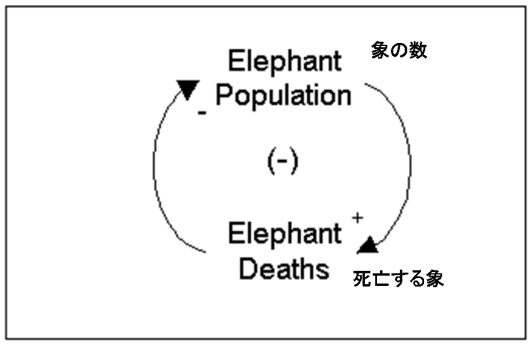


図 4-26：象の死亡モデル

図 4-26 は、前に取り上げた、象の増強ループに付随する残り半分で、こちらは均衡モデルになっています。象が増えると死亡する象も増えます。逆に、死亡する象が減少すると、象の数が増えます。こうして、フィードバック・ループの構成要因が増強しようとすると、他方の構成要因が逆に働くので、増え続けるとか、減り続けるということがなく、増加や減少に歯止めがかかり、どこかに安定していく、(均衡していく）ことになります。ここでは、均衡ループであることを、中央の「ー」で示しています。

図 4-27 左は、痒みのモデルです。かゆみが増すと掻き、掻くとかゆみが収まるというモデルで、かゆいのに、掻けないと、かゆみが大きくなります。ここでは、均衡ループであることを、中央の「B」で示しています。

図 4-27 右は、腹が減ると食べ、食べると、空腹が収まる、しかし、空腹なのに、食べられないと、空腹が大きくなるというモデルです。察するに、テキストの著者は、このテキストを執筆時、空腹で、しかも蚊にでも刺されたものと思われます。ここでは、均衡ループであることを、中央のシーソーの絵で示しています。

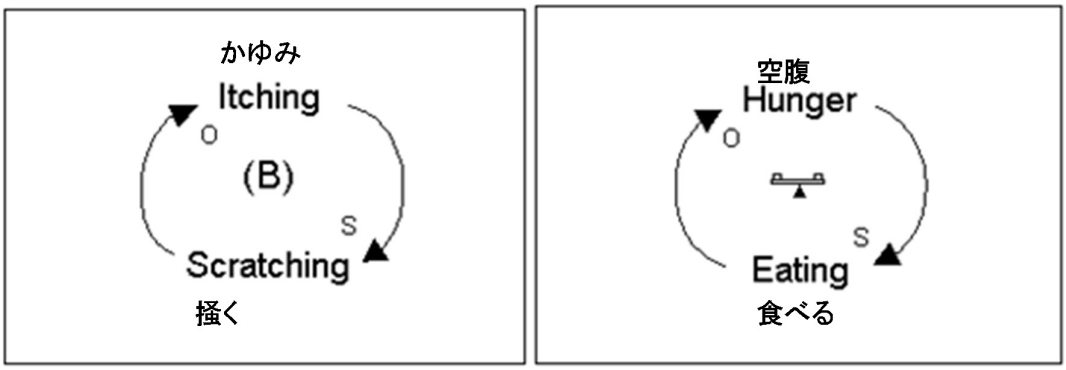


図 4-27：かゆみのモデル（左）と空腹のモデル（右）

図 4-28 左は、麻薬取締のモデルです。地域に麻薬取扱人が増えると、それを取り締まる警官が多く配備されるようになります。警官が多く配備され、麻薬取引をどしどし摘発するようになると、地域の麻薬取扱人が減少していきます。

図 4-28 右は、車の共用のモデルで、石油価格が上がると、車の共有が増え、車の共有が増えると、道路を走る車の数が減り、石油消費が全体として減少します。理由は石油消費ではなく、大気汚染対策だったのですが、1980 年代のロスアンジェルスでは、大気汚染を減らすためや、ラッシュアワーを規制するために、月曜から金曜までは、日によって、奇数のプレート・ナンバーだけが、次の日は偶数のプレート・ナンバーだけが市内に入れるようなしくみを作っていました。私もそのころ、ロスで働いていて、車で通勤していましたので、この規制には大分悩まされました。そのため、市内にある会社に通うために、これにひっかかる日は友人の車に乗せてもらったという経験をしています。この規制によって、ロスでは、石油消費が減っていったことも間違いがないでしょう。ただし、このモデルの通りにガソリン価格が下がったかどうかはよく記憶していません。

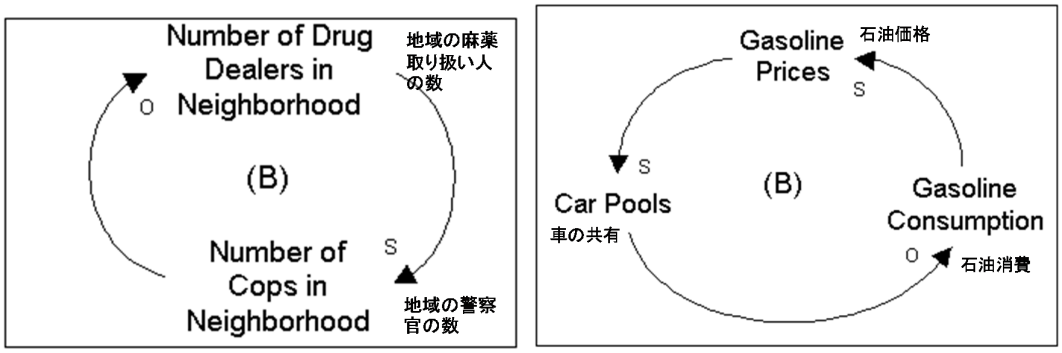


図 4-28：麻薬取締のモデル（左）車の共有モデル（右）

なお、一般的には、フィードバック・ループは、増強ループか均衡ループのどれかにわけられるのですが、複雑系などの特殊なモデルでは、増強ループが時間経過で均衡ループになったり、均衡ループが増強ループになるようなフィードバック・ループも知られています。

V) 目標の内的、外的（内製変数、外製変数）

これまで例として示してきた均衡ループのモデル例は、目標値が内的（システムの内部に暗黙的に含まれている。内製変数）なので、あるいは誤解を招いたかもしれません。例

えば、図 4-26 の象の死亡モデルでは、この均衡ループの最終目標値はゼロで、このループが単独で稼働し続ければ、象は死亡し続け、最終的には象の頭数がゼロになり、そこで均衡します。同じことが、痒いから掻くというモデルや空腹モデルについても言え、痒みが無くなる、空腹でなくなると、このモデルでの痒みや空風は均衡し、解消します。つまり、最終値がゼロになることが暗黙的にモデルに示されています。ただし、暗黙的に示されている最終値がいつもゼロであるというわけではなく、図 4-28 の麻薬のモデルや車の共用モデルでは、実際の所、目標値は、「許容できる」、あるいは「がまんできる」程度になってしまって、ゼロにはなりません。麻薬取扱人の数はゼロにはならないし、石油価格も、安いにこしたことはないが、実際の所、ただにはならならないでしょう。

図 4-19 のような、ストック、フロー、ストックの状態を基にしてフローの変化を行う意志決定が、一つのシステムの中に収まっているものを、クローズド（閉鎖）システムと呼んでいます。このようなシステムでは、目標値が内製されます。SD では、なるべく目標値も内製するようなモデルを推奨しています。

それに対し、収まるべき最終値や目標値のようなものがシステムの外から与えられ、それによってシステムが動くものをオープン（開放）システムと呼んでいます。

図 4-29 左に示したものが代表的なオープン・システムのモデルですが、この例では、目標値として、「望ましいシステムの状態」を、外的に与え（外製変数）、システムの状態と望ましい状態を比べ、システムが望ましい状態でなかったならば、望ましい状態になるまで修正を行い、望ましい状態にするというものです。システムは、この、外から与えられた望ましい状態に収斂（均衡）していきます。

図 4-29 右は、象の生息環境から、望ましい象の数を外的に決め、多すぎれば象の頭数を調整することで、生息環境に合った象の頭数にするというものです。1980 年代のアフリカの自然公園では、象が多くなりすぎると、象は大量に食物を食べるので、植物が減少し、環境悪化を及ぼし、やがて、他の野生動物だけではなく、象も餓死するのではないかと考えられていました。そのため、象の数をある範囲内にすることが自然公園の管理業務の一つと考えられ、ある値を超えて増えれば、ハンターを雇って象を殺し、象の数を減らすということが行われていました。しかし、現在では、その象も絶滅が危惧されていて、象が増えすぎるといった議論は過去のものとなっていると聞いています。

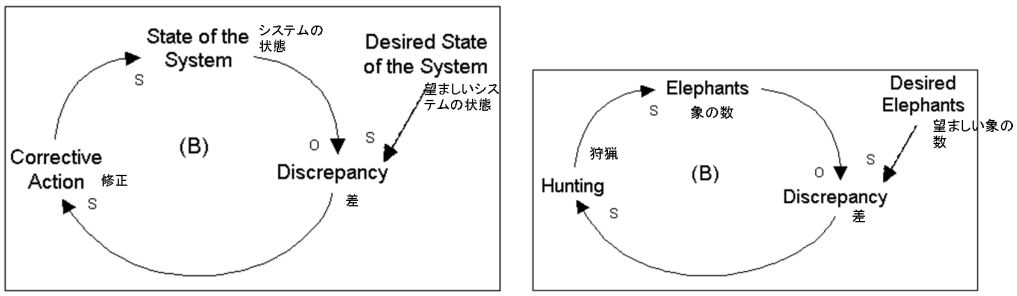


図 4-29：オープン・システム・モデル（左）象の数のコントロールのモデル（右）

VI) ネスト（入れ子）構造による増強ループと均衡ループの干渉

増強ループと均衡ループはネスト（入れ子）構造になって、干渉するということもよくある構造です。特に、きちんと細部まで議論しないで、モデル開発者のアイデアだけでモデルを作ると、こうなりがちですし、ネスト構造になると、複雑すぎて、他人にはなかなか理解しにくくなります。

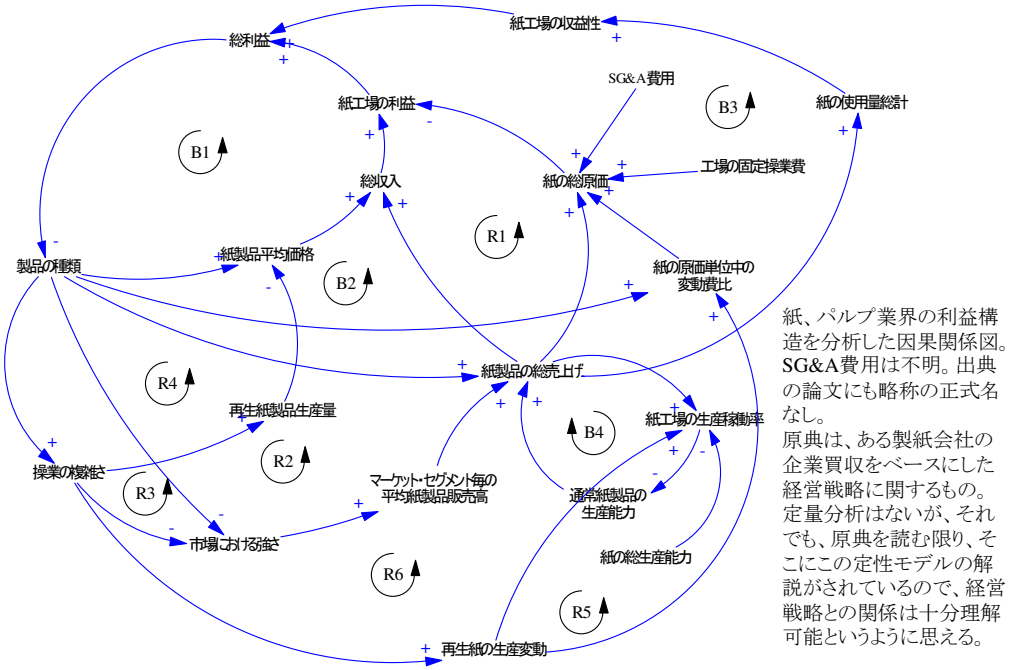


図 4-30：紙、パルプ業界の利益構造を分析した因果関係図

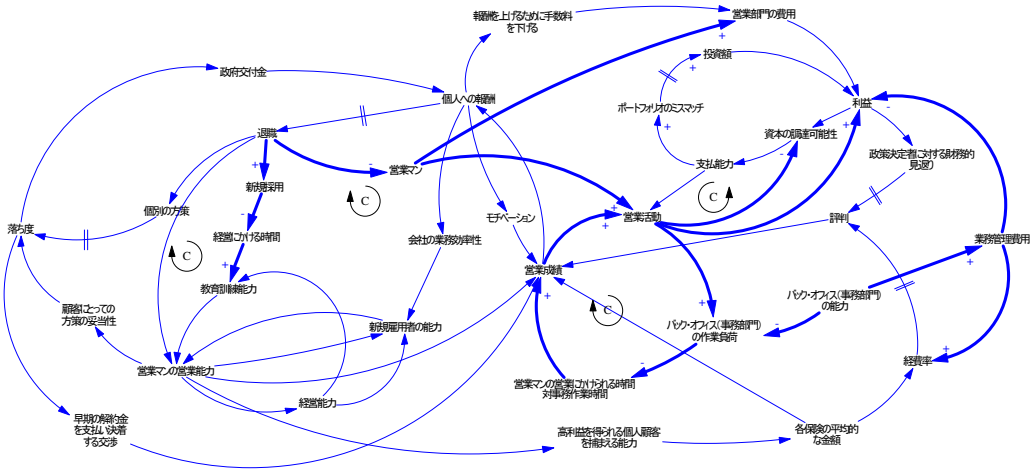


図 4-31：英国の生命保険業界を分析した因果関係図

図 4-30、図 4-31 に、System Dynamics Review という SD 学会の学会誌に掲載された論文に載っていた、紙、パルプ業界の利益構造を分析した因果関係図と英国の生命保険業界を分析した因果関係図を示しています。図 1-30 の紙、パルプ業界の利益構造を分析した因果関係図では、フィードバック・ループに数字を付けて、それぞれのフィードバック・ループを区別できるようにしていますし、因子の名前の付け方にも気を配り、因子の名前だけで、モデル開発者が何を言いたいのか分かるように工夫していますが、それでも、紙、パルプ業界のダイナミックな動きはこれでは理解しづらいように思います。

図 4-31 は英国の生命保険業界を分析した因果関係図で、ここでは、増強ループには何も

記号を付けなく、負のフィードバック・ループ（均衡ループ）に反対方向を意味する C を使って強調しています。また、注目して欲しいループを太線にしていて、大きな遅延があるループにのみ遅延記号をつけています。こういった工夫がしてはあるのですが、しかし、これを見ただけで、意思決定者が何か意志決定できるとは思えません。

テキストでは、これを見てもよく分からないだろうとあるのですが、原点の論文では、太線の関係で、成長の限界が生じていることを論じています。メインとなるべきループは、利益が資本を増加させていくものですが、それを営業費用の調整のループが取り囲んでいます。そして、内隣する、営業マンの営業に掛けられる時間のループが均衡ループで、事務部門の能力の限界と営業マンの活動時間限界によって成長の限界を産むということが述べられています。図 4-30、図 4-31 の原典の論文を読む限り、説明を理解しながら、これらの因果関係図で関連性を追っかけていくと、私自身はモデルやその趣旨を理解できました。もっとも、このモデルだけを見せられたのでは、何が趣旨で何を結論付けているのかよく分からないというのも事実です。

私自身の考えでは、普通に存在する社会・経済的な問題は、こういった図 4-30 や図 4-31 のようなもので、ネスト構造になるのは当たり前だと思っています。これは、開発途上国に特に言えることですが、ネスト構造になっているので、悪循環が性質の悪いものになっています。一つの悪循環を断ち切っても、他の悪循環が絡まっているので、悪循環がなかなか解消されません。中には、5 重、6 重のネスト構造になる例もあります。こういった性質の悪い悪循環構造なので、開発途上国の経済・社会問題はそう簡単に解決できません。これが、開発国であれば、潤沢にお金や経営資源をかけて解決するといったことができるし、そもそも、そういった解決策が存在するので、性質の悪いネスト構造の問題にはなっていません。ネスト構造と言っても、せいぜい 2 重程度です。

テキストの著者は因果関係図のモデルに対してかなり否定的で、定量モデルを作ってシミュレーションしてみなければ分からないという主張には 100%同意できるのですが、それでもあえて反論すれば、因果関係図は、そもそも説明を伴わないと理解できないものではないかと思っています。もちろん単純化すれば、説明抜きにだれでも理解できるものになりますが、それだと、実務レベルとしては単純化されすぎていて、どこをどう改善するかという議論には使えなくなります。ただ、トップ向けには単純化し、一目で理解できるものが望ましいでしょう。

VII) システム原型

システム原型がシステム思考の分野でいろいろ議論されています。これは、民間企業、政府などの組織で見られるフィードバック・ループの状況を典型化したもので、センゲなどは、意思決定者が、こういった振る舞いが自分の組織で見られることを認識し、その根本原因を探って、意思決定を行う上で有効と主張しています。センゲの Fifth Discipline という著書では、

・遅延を伴う均衡 (Balancing loop with delay)
・成長の限界 (Limit of growth)
・問題の転嫁 (Shifting the burden)
・目標のなし崩し (Eroding Goals/ Drifting goals)
・エスカレート (Escalation)
・成功には成功を(Success to the success)
・共有化の悲劇 (Tragedy of commons)
・応急処置の失敗 (Fixes that fail)

・成長と投資不足 (Growth underinvestment)
の 9 個のシステム原型が紹介されています。
さらに、センゲの Fifth Discipline Field Book には、次の 2 つも記載されています。
・昨日の友は明日の敵（Accidental adversaries）
・魅力の基本（Attractiveness principle）

システム原型について最初に主張した、ウォールステイン・ホルムは、突き詰めていけば、システム原型は次の 4 つしかないと主張しています。

・成長を意図し、停滞し、落ち込むタイプ
・成長を意図し、予期しなかった成長になるタイプ
・成長を意図し、妥協するタイプ
・成長を意図し、他に依存するタイプ

テキストの著者は少し否定的に見ていて、いくつシステム原型があるのかはともかく、意志決定者が抱えている組織の問題をシステム原型がどう解決してくれるかは、依然不明であると述べています。

著者は少しシステム原型を否定的に見ていますが、私は、有効と考えています。思惑がはずれると危険な面もあるのですが、モデルがシステム原型の振る舞いになることが分かっている時には、コアになる部分を、システム原型の振る舞いになるようにモデルを作ることがあり、モデル構築の時間短縮になっています。もっとも、システム原型は、定性モデルに対して言えることであり、定量モデルで、システム原型を表す一般的なものはない、あるいは、それは具体的なモデルにはならなく、具体的なモデルでは、いろんな要素を入れて、現状を説明できるようなものにしなければならないので、何かシステム原型の標準的な定量モデルがあり、それを基に作れるわけではありません。とはいえ、こういう風に振る舞うということが分かっているモデルを作ることができますので、振る舞いが最初には分からないモデルを作るよりははるかに精神的に楽になります。

VIII) 因果関係図の問題点

因果関係図は、SD モデルを作成する時に必ずと言っていいほど使われる道具であり、Vensim などのソフトを使ってこれを描くことができます。ブレーン・ストーミングなどで使い、議論を進めたり、アイデアを検討することに使われ、開発したモデルを説明する際にも有効です。しかし、システム原型も含め、意思決定者がこれを使って意志決定できるかどうかは疑問で、やはりきちんとした定量モデルを構築し、シミュレーションして確かめることが必要です。

因果関係図には、情報と情報ではないものが混在し、流れを作るので、図では、情報と情報ではないものが区別されていない点が弱点です。ストックとフローの組み合わせで動的な振る舞いが作成されるのであり、因果関係の矢印の図で動的な振る舞いが作成されるわけではありません。従って、因果関係図から動的な振る舞いを読み取ることが難しいのが弱点です。

また、細かいフィードバック・ループや明白なフィードバック・ループなどはいちいち表現しないし、原因を受けての結果の変化の度合いなども表現できないので、これで何かを予測することはできません。結論として、定量モデルでシミュレーションを行い、その結果で意志決定を下すことが重要だと思います。

定量モデルを使ってシミュレーションしてみなければ分からないという著者の主張には同意できるのですが、私の主張としては、それでも、あえて反論すれば、定性分析でもい

ろんなことが分かると思います。数あるフィードバック・ループのどれが一番効いて、全体に影響を及ぼすのかは、ループを追跡していくとかなり分かります。さらに、定性モデルはより広く対象を扱えるし、短時間で作成でき、短時間で分析できるという長所を持っています。従って、ブレーン・ストーミング向きで、その場で議論しながら、どんどん、要素やループを追加したり、削除したりできるので、私自身は、コミュニケーションの道具、その場で対象を理解するための道具と考えています。これに対し、定量モデルはそうはいきません。作成に時間がかかり、議論しながら作成することはまず不可能です。

また、SD を知らない人でも、因果の流れを説明されれば理解できるし、それを使った議論に参加できるという点も長所です。定量モデルはそうはいきません、ストックって何、フローって何という話から始めなければならなく、これではモデルの作り方の説明で終わってしまって、モデルの構造が妥当かとか、論理が妥当かとか、何か要素として欠けているものがないかといった議論にはなかなか進めません。

(5) 非線形性

SD モデルを作るに際し、人が持っている常識とか通常の感覚というものを基本にするのですが、モデルとして構築されたシステムは、時として、常識とか通常の感覚を裏切るような振る舞いを示します。このような場合、多くはモデルが間違っているので、そうなるのですが、時には人間の常識や感覚が間違っていることも多くあります。

SD モデルでモデルを構築し、その中にストックがあるとして、ストックの値はマイナス値になることもあれば、無限大（無限小）になることもあるのですが、人の常識では、無限大になるようなものは日常には存在しないので、システムが無限大になることはあり得ないと思っています。こういった、人間の常識に合うようなモデルにするために、値が無限大になるようなモデルや、値がマイナスになるようなものを組み立てるべきではないと思います。例えば、在庫がマイナスということは、受注残（バックログ）という意味なのでしょうが、SD のモデルでは、このような場合、在庫と受注残を分けて、どちらもマイナスにならないような工夫をしたモデルが望ましいでしょう。

そういった、常識に合う SD モデルを構築しても、システムに非線形性が含まれることがあり、非線形性がシステムに存在すると、常識に反した振る舞いを示すことがあります。非線形性があると、主流のフィードバック・ループが時間経過で別のループに取って代わられることがあり、常識では予測できないものになってしまうこともよくあります。従って、SD モデル構築では、ストック、フロー、フィードバック・ループと非線形性を認識し、モデルに組み立て、シミュレーションを行うことが重要です。

この、主流のフィードバック・ループが時間経過で別のループに取って代わられる例は、次回の第 4 章で説明していますが、例えば、そこでの象のモデルでは、増強ループが最初は主流となるループで、象が増えるのですが、象が増えるにつれ、主流が均衡ループに取って代わられ、象の数がそれ以上増えないようになるといったモデルになっています。こういった現象を引き起こすモデルは特に珍しいものではなく、増強ループと均衡ループが隣り合って存在するような SD モデルではよくあることです。

(6) システムの構造

SD では、人の持つメンタル・モデルを SD のモデルに翻訳するようなことをしているのですが、その際に、メンタル・モデルが複雑であるということに苦労させられるでしょう。メンタル・モデルが複雑なのは、人間が理解しようとしている実世界が極めて複雑であるからでもあるのですが、システムの持つ性質によって、システムはそう人間に簡単に感覚的に分かるようなものではないことにも起因します。

SD では、長年、実世界、特に社会をシステムとして理解しようと試みてきました。その

長年の研究から分かってきたこととして：
－システムが問題から現象を作り出すが、時間経過や現れる場所が違うことで、その表れかたが、最初の現象や、実際の問題からイメージできるものと違ってくる。
－システムが複雑になると、その振る舞いは、人間の直感に反したものとなる
－複雑なシステムが背後に存在する問題に対する対処は、短期的に成功しても長期的には失敗するか、あるいはその逆であることが多い
－システム外から何等かの政策変更を行うと、システム内の対応のしくみが、それに対抗するように働く
－実世界のシステムの複雑性は、常に変化する
ということが分かってきました。

これは、社会システムでのストック、フロー、フィードバック構造の非線形性から、先のようなことが起きるので、システムの性格とも言えます。

システムはこういった性格を持つので、モデルにした際に、前に述べた内製、外製の箇所で説明した、モデルに与えるショックや規定するものの取扱いが問題になります。SD では、そういったことも含め、もし可能であれば、いきなりシステムの外部からシステムのショックをそのまま受け入れるのではなく、それを予測できるような構造をモデルに組み込む方がいいと考えられています。このことは、後でさらに詳しく説明しましょう。

I) 問題の生み出す現象が、時間や表出する場所で違ってくること

原因が問題を作るのですが、時間や問題が表出する場所で、現れ方が違い、原因そのものと切り離なされている（＝原因がすでに最初のものとは性格が違うものとなっている）ので、解決を難しくしていると言う現象はよくあることです。遅延とシステム内部の要素の相互作用に起因するので、こうなります。

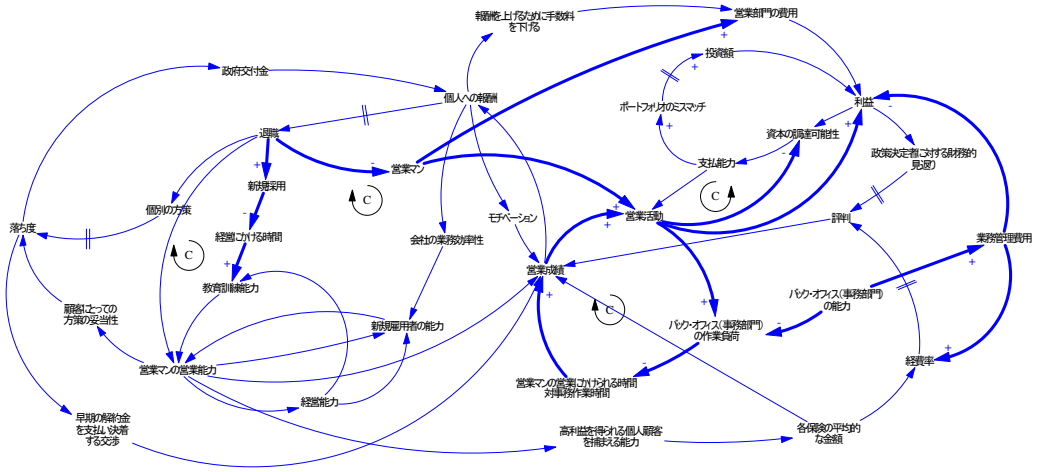


図 4-31：英国の生命保険業界を分析した因果関係図（再出）

図 4-31 に挙げた英国の保険会社のモデルで主張されていることですが、投資金額が変動し、その変動がポートフォリオのミスマッチに直接影響するのですが、遅延があり拡大化されるので、保険会社の成功を左右します。もちろん、保険会社の成功を左右する要因は、このポートフォリオのミスマッチだけではなく、他の要素もあるのですが、それらは、保険会社の成績に間接的には影響しますが、直接的には影響しないようになっています。実際の保険会社の経営者が、こういった要素や関係を意識しているかはともかく、こういった構造では、保険会社の業績に何か問題が起きた場合、意思決定者が、それを永続的に修正し続けることは難しいでしょう。そもそも、多くの関連性や遅延を、時間を追って追跡

し続けることは、人間の感覚や性格として難しいものです。また、問題の生み出す現象が、時間や表出する場所で違ってくるので、総合的な見方やシステムとして考えるアプローチが必要になってきます。しかし、伝統的な問題解決のやり方では、管理可能な構成要素に分解し、それぞれに分解された要素を、単独で独立したものとして取り扱うということしか教わってきていません。しかし、これでは、要素の繋がりが失われてしまいます。全体の振る舞いは、この要素間の繋りから生まれるので、分解するというアプローチでは、繋がりが無視されてしまいます。

もし、対象が線形であれば、全体は部分の集合や合成に等しいので、従って、部分を足せば全体になります。従って、先のアプローチも正しいのですが、対象が非線形だと、部分の集合が単純に全体にはならないので、先のアプローチはどんでもなく間違った方法になります。

スゥフィーに、有名な象に関する教訓話が伝わっています。これは：

インドのゴールの町の先に、ある町があり、ここの住民は全員盲者だった。近郊の王国の王が、兵を引き連れ、この都市の近くに遠征にやってきて、砂漠にキャンプを張った。この王は攻撃に使う象を引き連れていて、それが住民の関心を引いていた。人々は、この強力な兵器だと言われている象のことを知りたいと思い、何人かの住民がグループで出かけていって、象を触った。象の形状すら知らなかった住民たちは、手で象を触り、手で触った感覚で情報を得ようし、手で触ることができたので、触った感触から、象とはどんなものかを理解したと思った。

彼らが、他の住民が待っている町に帰ると、人々は彼らを取り囲み、象とはどんなものかについて、それぞれが言うことを聞いた。しかし、彼らの言うことは、人々の象の形についての判断を混乱させるだけだった。

象の耳を触った人は、「大きく、平べったく、絨毯のようなものだ」と言い、鼻を触った人は、「長く伸びた空洞のあるパイプで、それが恐ろしい破壊力を持つんだ」と主張し。そして、足を触った人は、「それは堅い柱のようなものだ」と主張した。

というものです。

象を触って理解しようとした盲人たちは、それぞれ部分しか触っていなく、知覚したものが違っているので、こうなってしまいます。部分の理解がいくら正しくても、その理解を総合するだけでは全体の理解は得られません。統合的に理解する方法でないと、全体は理解できないのです。

先の象の教訓話は、日本も含めいろんな国にあることが知られています。

II) 直観に反した振る舞い

非線形システムは、意志決定者が持っている常識に反した振る舞いをすることがあります。特に、方向性を大きく変えようとすると、メンタル・モデルに反した振る舞いを示すことがあります。フォレスターは、梃になる部分がシステムに存在し、意志決定者が強制的にシステムを変えようとすると、意志決定者の意図に反した振る舞いを示すと述べています。システムに負のフィードバック・ループ（均衡ループ）が存在する場合、よくこの、意志に反した振る舞いが起きます。

例えば、船乗りが船首を右に向けようと思ったら、船尾にある舵を左に切る必要があります。つまり、（組織などの）方向性を変えようと思ったら、（組織の底辺などの）最もそこから遠い部分に対し、組織的には、全体の意図と反することを行うことも必要であることを示しています。船は一種の均衡ループで、望む方向に船先を変えようと思ったら、船尾を反対方向に向けなければなりません。また、望ましい方向と実際の方向に差があれば、舵の角度を、進行させたい方向とは逆の方向に調整しなければなりません。

もう一つの例として、室温調整のサーモスタットを考えてみましょう。部屋が少し寒いようなので、部屋を暖めたいと思います。でも、温度調節のダイヤルは効かなく、サーモ

スタットに直接何かショックを与えないと、サーモスタットが動いてくれそうもありません。さて、このサーモスタットを動かそうと思ったら、煙草の火をサーモスタットに近づける方がいいのか、氷をサーモスタットに近付ける方がいいのか、どちらでしょうか？

もちろん、氷で、サーモスタットは氷に反応して、ヒーターのスイッチをオンにします。煙草の火では逆に、クーラーにスイッチが切り替わってしまうので部屋は冷やされてしまいます。部屋を暖めたいのだからと、単純に煙草の火をサーモスタットに近づければいいなどと考えないで下さい。

III) 悪くなる前に良くなる、良くなる前に悪くなる

複雑なシステムでは、悪化する前に良くなり、改善される前に状態が悪化することがあります。これは、システムが複雑で、フィードバックに時間がかかるためです。この、システムのフィードバックに時間がかかることを無視すると、方向修正や政策修正を行っても、その効果が現れるまでに時間がかかるので、その修正前の現象が先に現れ、これを予期しない現象として捉え、とまどうことになってしまいます。

例えば、都市が発達し、郊外から都心の勤務先に通勤する人も増えたので、都心に直結する急行列車の本数を増やすことを考えます。もし、どんと急行列車の本数を増やしたら、短期的には通勤ラッシュの混雑を改善でき、利用客は気持ちよく列車で通勤できるようになります。しかし、通勤時間があまり変わらないので、長距離通勤にはなるが、通勤客は、都心ではなく、郊外に住むようになります。こうなると、今度は、急行が混むようになり、前よりも混雑は悪化するようになります。もちろん、こうなると、システムが逆に働き、長期的には、人々は都心に住居を移すようになりますし、あるいは、さらに公共交通機関（新しい路線）が開発されるようになります。

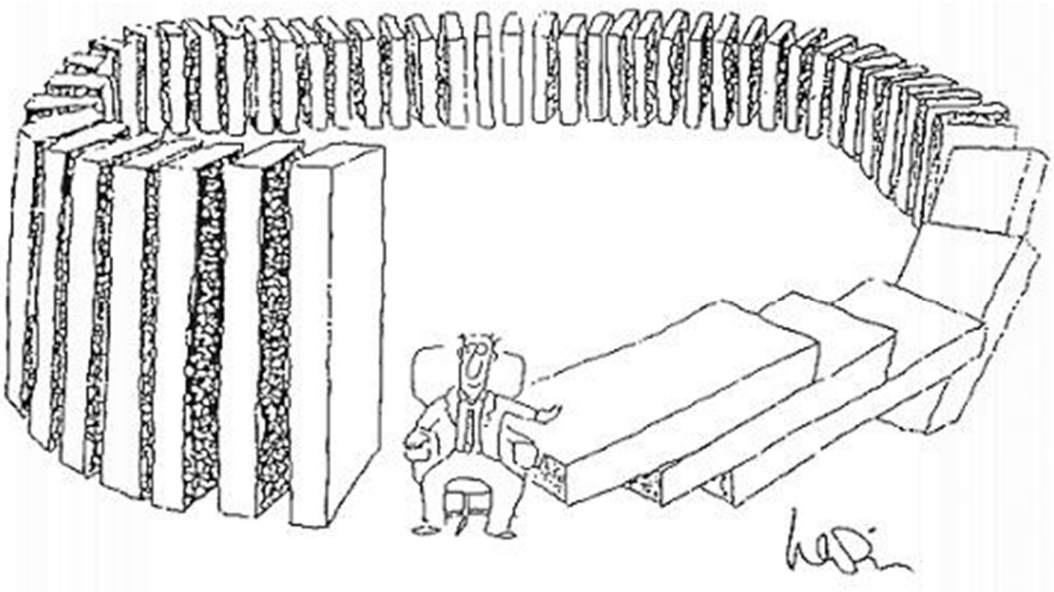


図 4-32：悪くなる前に良くなる。もっとゆったりしたいと、左側にスペースを作ると、、、、

システムのフィードバックに時間がかかることを無視すると、方向修正や政策修正を行っても、その効果が現れるまでに時間がかかるので、その修正前の現象が先に現れ、これを予期しない現象として捉え、とまどうことになります。図 4-32 は SD の教科書で好んで使われるイラストですが、自分が座っているスペースが窮屈なので、左の方にもっとスペースを作ろうとすると、まわりまわって、かなり時間が経ってから右から押しつぶされることになります。

VI) 政策変更に抵抗する

非線形システムは、短期的には政策変更に従うのですが、やがて、政策変更に抵抗して元に戻ろうとする性格があります。これは、負のフィードバック（均衡ループ）の構造によって起きる現象です。

図 4-33 のグラフは、ボストンでの 1968－1992 年の白人学生が黒人主流の学校にどれだけ入学したかを示したものです。当時の黒人人権運度の動きもあり、1974 年に、白人主流の学校にも黒人を受け入れるべきであり、黒人主流の学校でも白人を受け入れるべきであるという法律と政策が発令され、学校への指導が行われました。このことを受けて、黒人主流の学校への白人学生の入学が増えましたが、徐々に減少し、1982 年には、その政策実施前の水準に戻ってしまいました。

こういった政策への抵抗は、負のフィードバック（均衡ループ）が主流で、政策変更は、負のフィードバック（均衡ループ）にとって理想的ではない状態のシステムで発生する現象です。

先の学校の例でも、例えば、自分の子供が通う学校が黒人主体で、そこに通わせないと罰せられても、白人の親にとっては、自分の子供を黒人ではなく他の白人と共に学校に行かせる方が望ましいので、罰則があるからといって、自分の子供を白人主流の学校に通わせるという望みを変更しようとは思いません。そのため、罰則が執行されると、白人の親は郊外の白人主流の場所に引っ越し、子供を白人主流の学校に転校させるようになりました。

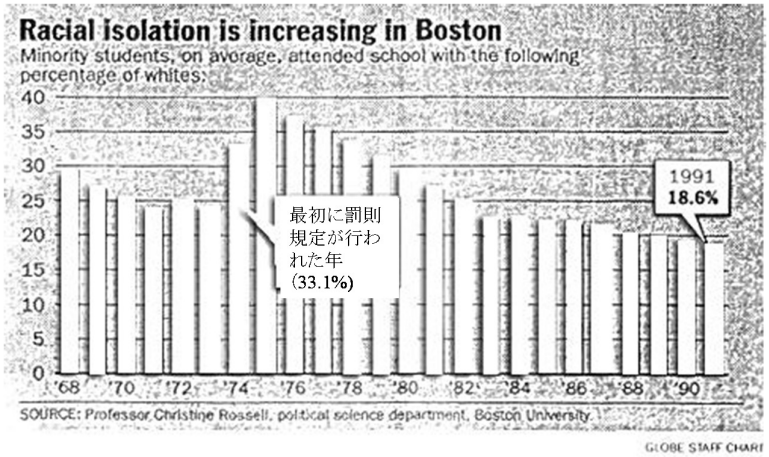


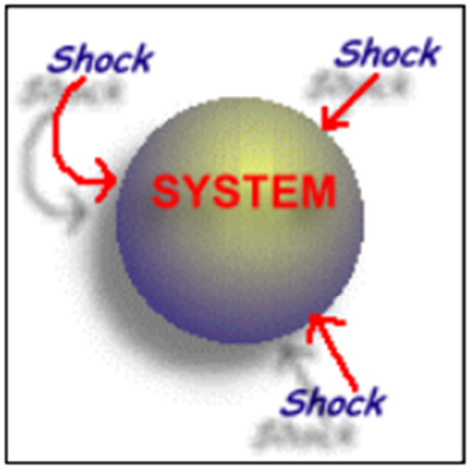
図 4-33：ボストンでの白人学生が黒人主流の学校にどれだけ入学したかを示したもの。

(7) 予測不能

多くの意思決定者が、膨大な時間とお金を投入して、正確な将来の状態を予想するためのモデルを開発しようとしていますが、これは SD 的には無駄なことと言えます。短期的には別ですが、長期的には、正確に将来を予測することは、非線形システムでは不可能だからです。例え、長期予測が可能であったとしても、SD では、将来を予測すること自体にはあまり意味はないと考えています。SD では、そうではなく、長期的な問題を引き起こす構造を SD モデルで理解することの方が重要であり、それが SD の目的であると考えています。従って、これから実行しようとしている政策に対するシステムの反応の分析や、より実施しようとしている政策が目的通りに成果を上げられるシステムの設計に力を入れた方が効果的でしょう。

物理的なシステムであれ、生物学的なシステムであれ、社会システムであれ、どんなシ

ステムも外部からのショックや力を受け続けていると言えます。例えば、飛行機は風の力をショックとして受けていますし、人間の体は温度変化（例：冷たいシャワーを浴びる）をショックとして受けています。企業は、顧客の嗜好の変化を受け、製品需要が急に変わるといったショックを受けています。



システムには、外部からショックや圧力が不規則的にかかる。圧力の大きさ、時間、種類、かかり方はそれぞれまちまち。

図 4-34：システムに加わるショック

意思決定者が将来の状況を予測しようとする際には、システムに混乱をもたらすショック入力の時期、影響の大きさ、方向などを予測し、それに対応しようとしているというように解釈できます。意思決定者は、外部から与えられたショックがシステムの振る舞いに影響を及ぼすというようにマインドがセットされていて、ショックが外からやってくるとしか考えなく、外からのショックは単にきっかけであり、ショックは実は、ストックとフローによるシステム構造自体の振る舞いの結果とは思いません。つまり、意思決定者は、システムの問題を、外の原因、あるいは外からの圧力に求め、内部に弱さがあり、外からの圧力で問題として顕在化する、あるいはストックとフローというシステム構造に問題があり、そこへの変化圧力によって問題が顕在化したというようには考えません。

意思決定者がショックの予想のために膨大な経営資源を費やすのであれば、SD の見方からは、ストック、フロー、フィードバックというシステム構造の再設計を行い、いつ外部からショックが来ようとも、それがどれだけ大きくとも、どの方向からやってきても、ショックに耐えられるようにする方法を探る方がいいと思えます。

SD では、外部、あるいは外製ではなく、内部あるいは内製に注目します。

非線形システムでは予測は不可能ということを示すために図 4-35 に、実際と予測の違いを表す簡単なモデルを紹介しましょう。このモデルでは、象とハンターの相互作用を示しています。実際のシステムを忠実に複製したモデルを構築します。次に、このモデルを元に、ストックとフロー、フィードバックで非線形性を表現し、実際のシステムを再現できるように、初期値や変動をセットします。こうしてできたモデルは、実際のシステムよりもより将来を予測しやすいはずです。

こうして 2 つのシステムを動かしてみると、20 ケ月目からちょっとした差から、結果が違い始めることがシミュレーション結果から見てとれます。20 ケ月より前の期間では、モデルでも、実際のシステムでも完全に次を予測できます。しかし、20 ケ月より後の期間で

は、モデルの構造が変わったわけではないのですが、結果が違ってきていて、予測ができなくなります。ちょっとした変化の違いが、後で大きな違いをもたらします。実は、ハンターの人数調節機能が、ちょっとした象の頭数の変化に反応して、この差を生み出しています。この実験から明らかなように、どんな完全なシステムであっても、非線形のフィードバック・システムを含んでいるようなシステムであれば、短期間であれば別ですが、長期間では予測不可能です。非線形システムでは、正確な予想など原理的に不可能なのです。

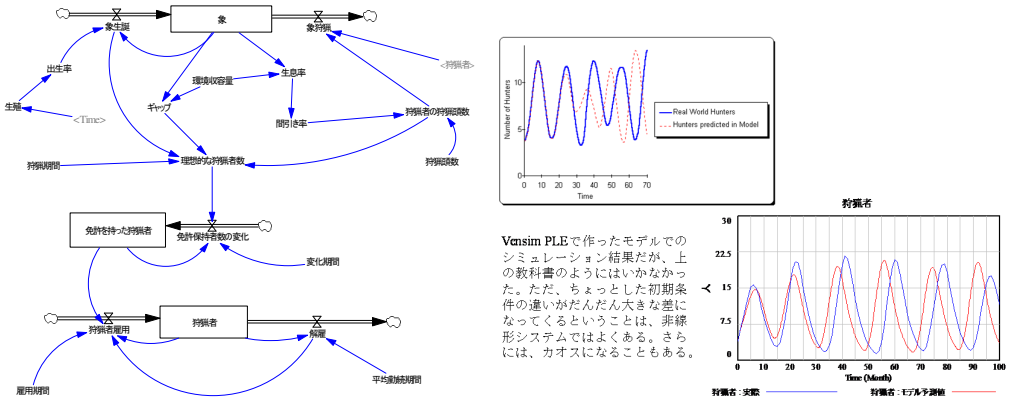


図 4-35：予測不能

SD のモデルでは、初期条件のちょっとした違いがシミュレーション結果では大きな違いになることは良くあることです。カオス理論や複雑系などでも、そのことはいろいろ研究されています。従って、将来に関し、傾向とか構造は分かるのですが、正確な予想は不可能なのです。

VII) 不均衡

全ての実際の社会システムには不均衡状態が存在します。変化への圧力は常にあり、入力側のフローは、ストックが介入し、出力側のフローとは同じではないというのは当たり前のようなものです。SD 以外にも将来予測としていろんなモデルが使われています。この際に、経済学や経営学で使われている、均衡モデルでは、実際の社会システムの動的な変化をうまく見極めることができません。実際の世界が不均衡なのに、均衡モデルで世界を表現しようとしているからです。

(8) 参加者からの質問

悪循環を断ち切るとはどういうことなのか、悪循環がただそう悪質にならないだけなのではないかという質問とコメントがありました。

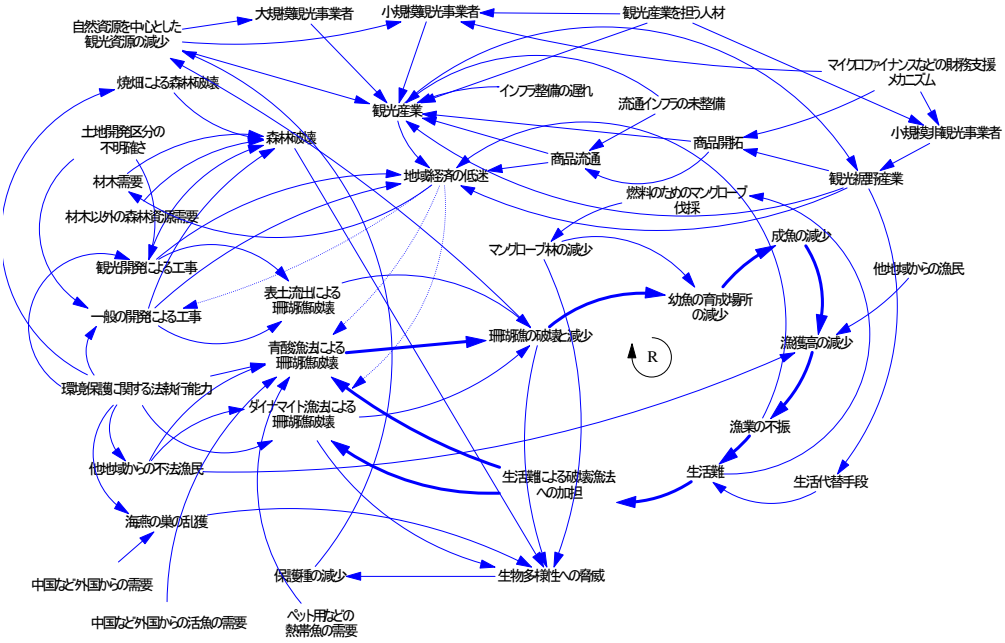
悪循環がある現状を示すモデルを As-Is モデル、あるいは問題構造図などと呼んでいます。これに対し、問題が解決された状態をモデルにしたものを To-Be モデル、あるいはソリューション・モデルなどと呼んでいます。To-Be モデルでは、悪循環を構成する要素が消滅し、循環が無い状態になることもありますし、別の要素に置き換わる、あるいは、別の要素が加わり、例えば増強ループが均衡ループに変わってしまい、問題が解決される、あるいは問題が収束していくということが起きます。あるいは、要素が、問題を表現するものではなく、うまくいっていることを表現するものとなり、悪循環ではなく、好循環になることもあります。先の例が悪循環を断ち切るという例で、後の例が悪循環という性格を変えてしまうという例になります。

例えば、水道料金の徴収が悪い→予算不足→整備不足→水質悪化→顧客の不満→水道料金を払わない→水道料金の徴収が悪いという悪循環を考えてみましょう。予算不足を、補

助金などで解決し、整備不足を解消し、水質が良くなれば顧客の不満も無くなり、水道料金の徴収が悪いというこの悪循環が成立しなくなります。同じく、水道料金を税金に組み込み、税金として取り立てることで、水道料金の徴収の問題を解決できます。こうして、悪循環を断ち切ることができます。

開発途上国では、悪循環が多重になっているという例が知りたい。

これは、「Vensim PLE によるシステム思考及びシステム・ダイナッミクス入門」という私の書いた入門書に載っていますが、こういった 4 重、5 重の悪循環構造になっています。これは開発途上国では普通に見られる現象です。この例では、ダイナマイト漁法や青酸漁法といった破壊的業法を取り締まろうとしても、自治体は貧しく、高速船や機関銃のついた警備艇を配置できるわけでもなく、取り締まれるのは地元の、破壊漁法に手を染める漁民ぐらいです。地元の漁民を取り締まっても、隣国から、高速の漁船で漁民がやってきて、保護している希少品種を採ったり、地元の漁民をそそのかして、青酸漁法などをさせます。そして、取締の船がやってくると高速で逃げてしまいます。近くにはフィリピン沿岸警備隊の基地があり、その沿岸警備隊の助けを借りて、隣国からやってきた不法漁民を逮捕することがありますが、外交圧力ですぐに釈放せざるを得なくなります。こういった隣国からの不法漁民は、逮捕されても、すぐに釈放されるので、何度もやってきます。このように、悪循環が多重化しているので、一つの悪循環を解決しても、残りの悪循環を断ち切れないので、状況は一向に解決しません。



(9) 第 4 章のまとめ

この章では、世の中のシステムの振る舞いは、直線変化、指数変化、振動、収斂、S 字型変化の 5 種類のどれか、あるいはそれを組み合わせた変化になるということを、新聞や雑誌に掲載された記事のグラフの形が、先の 5 つのどれかのパターンになっていることで示しました。つまり、この 5 種類、あるいはそれを組み合わせた振る舞いを再現するモデルを使って、対象とする社会システムを表現できると SD では考えています。

そこで、SD では、対象をシステムとして捉え、それを、ストックとフローを使って、フ

ィードバックがあるようなメカニズムを作ります。この作られたメカニズムがモデルであり、このモデルが、対象としているシステムの振る舞いを再現できたのであれば、モデルで考えたメカニズムが妥当であり、対象としたシステムは、モデルで想定したメカニズムの通りに働いた、従って、モデルとして表現した仮説は妥当であるというように理解します。

社会的システムのほとんどは非線型であり、非均衡です。非線型で非均衡なものは、一般的には取り扱うことが難しいので、多くは、線型で均衡なモデルを近似的に使って対象を取り扱っています。しかし、SD は、システムを非線型であり、非均衡であるものとして直接取り扱っている点が、その他の定量モデルでのアプローチと違っている点です。

5. システムの基本的な振る舞いの表現方法（指数的増加、指数的減少、収斂と振動）

システムの基本的振る舞いとして、指数的増加、指数的減少、収斂、振動、S 型変化があります。それについて、数学的な原理の説明も踏まえ、以下の項目建てで説明していきます。

－分析的解法とシミュレーション的解法
－指数的増加
－ゴール・シーキング
－指数的減少
－振動
－象とハンターのモデル
－S 型成長
－オーバーシュートとなし崩し

(1) この章の趣旨

SD は、システムの振る舞いの基本形である直線変化、指数変化、収斂型変化、振動、S 字型変化の 5 つの基本的な変化のパターンの基本的な表現方法と、その振る舞いを表現する上での数学的根拠を説明します。ただ、私は別に理工系出身というわけではないので、数学的な説明の部分は、テキストの説明をそのまま使っていて、ひょっとして誤解しているとか十分理解していない部分があるかもしれない点を先にお詫び申し上げておきます。

(2) 5 つの変化の基本パターンの表現方法

1) 分析的解法とシミュレーション的解法

I) 分析的方法

少し理屈っぽい話になりますが、時間に対して動的に変化する対象は、一般的に微分方程式のモデルとして表現可能です。もし、微分で表現されていれば、時間に対して積分すれば、システムの状態を知ることができます。例えば、以下のような積分式にして、時間 t=0 から t=∞まで解けばいいわけです。

$$= \lim_{DT \to 0} \left[\sum_{t=0}^{\infty} f(t) * DT \right]$$

$$= \int_{t=0}^{\infty} f(t) * dt$$

ここで、通常の状態、つまり、線型で均衡である場合、多くは積分解が知られていますので、積分解を当てはめて計算すればいいわけです。これが分析的方法と呼ばれている方法です。

II) シミュレーション的解法

しかし、対象が時間に対して線型ではない場合、つまり、時間に対して非線形的な動きをする場合の一般的な積分解は知られていませんので、近似的な方法で計算します。

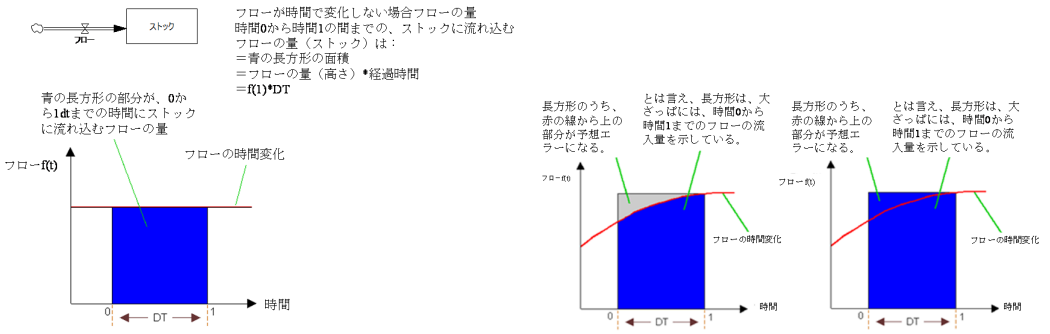


図 5-1：時間変化に対するストックの計算-1

SD では、微分されたものは、フローによって表現し、これを積分するためのものとして、ストックを用意します。従って、微分されたものを積分するには、図 5-1 左上のストックにフローが流れ込む図で示したように表現します。ここで、積分が線型である場合を考えます。例えば、図 5-1 の左下の図では、フローの値が時間変化を受けても変わらない場合を示しています。時間が進んでもフローの値は変わらないので、ストックは、単純に、フローを時間経過数で乗じたものとして計算できます。

フローの値の変化が直線的に変化するとか、円弧や放物線状に変化するなど、変化の形が線型である場合、その変化量は、三角形の面積を計算するとか、円の面積を計算するなどで求められますので、積分の一般解として知られているものを当てはめることで、ストック量を計算できます。しかし、時間変化が先のような直線とか円弧とはならないもの、これを非線型と呼びますが、そのような時間変化を行うものに対しては、この方法は採択できません。

今度は、図 5-1 の左の図のようにフローが変化した場合を考えます。変化は円弧でも楕円でも、放物線でもないが、スムーズに値が増加するものとします。微分で表現されたものは、時間の値が決まれば、その時間に対して取る値を計算することが可能なので、時間 dt=0 の時のフローの値も、時間 dt=1 の時のフローの値も計算可能です。そこで、先のように、時間 dt=1 の時のフローの値に時間経過である、dt=1 を乗じたもの、つまり長方形の面積としてストックの値を計算します。これは、かなり誤差があるのですが、一応、近似値となります。図 5-1、右の 2 つの図のうち、左側にある図で灰色として示した部分が誤差になります。

今度は、図 5-2 の左に示したように、時間刻みを 0.5 にし、前半の時間 0 から 0.5 まで、後半の時間 0.5 から 1 までに 2 分割にして計算してみます。すると、フローの時間 dt=0.5 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積に、フローの時間 dt=1 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積を合わせたものが、ストックの値として計算されます。相変わらず誤差はありますが、図 5-1 の右側に示した、時間刻値を 1 としたものよりも誤差は小さくなります。

もっと進めて、時間刻みを 0.25 にしてみたらどうなるでしょうか。今度は、フローの時間 dt=0.25 の時の値と時間 dt=0.25 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.5 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.75 の時の値と時間 dt=0.75 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=1 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積の 4 つを合わせたものが、ストックの値として計算されます。それが、図 5-2 の右にしめした図です。ここでは、誤差はもっと小さくなります。

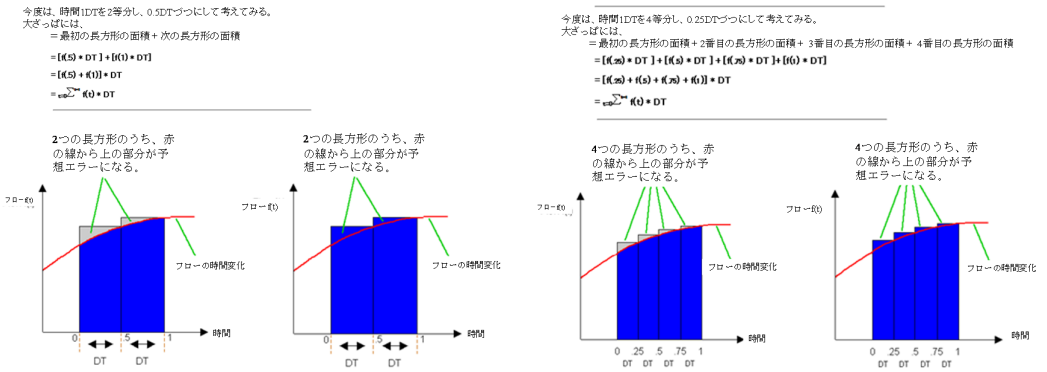


図 5-2：時間変化に対するストックの計算-2

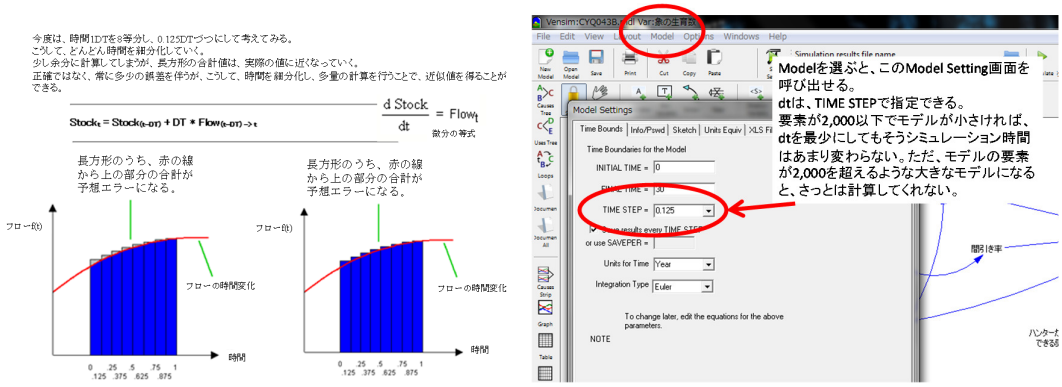


図 5-3：時間変化に対するストックの計算-3

図 5-3 左には、時間刻みを 0.125 にしてみた例を示しています。フローの時間 dt=0.125 の時の値と時間 dt=0.125 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.25 の時の値と時間 dt=0.25 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.375 の時の値と時間 dt=0.375 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.5 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.625 の時の値と時間 dt=0.625 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.75 の時の値と時間 dt=0.75 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=0.875 の時の値と時間 dt=0.875 を乗じた長方形の面積、フローの時間 dt=1 の時の値と時間 dt=0.5 を乗じた長方形の面積の 8 つを合わせたものが、ストックの値として計算されます。誤差はもっと小さくなります。この、長方形の面積で近似してストックを計算するやり方を、オイラー法と呼んでいます。また、時間刻みを小さくすればするほど誤差が小さくなることが理解できたと思います。時間刻みは、Vensim PLE を立ち上げ、モデルを作成しようとすると、図 5-3 の右に示したようなシミュレーション条件設定画面が現れるので、上から 3 番目の時間刻みの欄で時間刻値を選択することで指定できます。このシミュレーション条件設定画面は、メニュー・バーのモデルを選択することでも表示できます。

時間刻みを小さくすれば誤差は小さくなるのですが、ただし、計算時間が多くかかるようになります。シミュレーション計算をさせる期間とモデルの大きさにも影響されますが、モデルの要素が 2,000 を超えるような大きなモデルで、100-200 期間計算させると、計算時間が 1 分以上になることもあります。また、モデルの作り方で、例えば、ストックの値がパイプラインのようにどんどん何段にも他のストックに蓄積される構造にすると、誤差がどんどん後の方に位置するストックに蓄積されていきます。（ただし、人口などの離散値を取る場合は、INTEGER などを使い、整数出力にすることで、この問題は解決できます。）従って、どこまで誤差を許容するかということも含め、時間刻値をただ小さくすればいい

というわけでもない点はご理解下さい。社会・経済モデルや経営モデルでは、通常は、時間刻値は 0.125 程度で十分と思います。

説明がややっこしかったかもしれませんが、要は、SD では、ストックとフローを使いモデルを作ります。ここで、ストックを使う、そしてシミュレーションをするという意味は、ストックに流れ込むフローの量を積分（まま）しているという意味です。つまり SD は連立微分方程式で、それを時間について積分しています。これがシミュレーションしているとか、計算しているというものの実態です。その時、シミュレーション計算に指定した時間刻みを底辺とする長方形の面積を計算しています。こうして、近似計算を行っています。この近似で計算するやり方をシミュレーション的方法と呼んでいます。

2) 直線的変化の表現方法

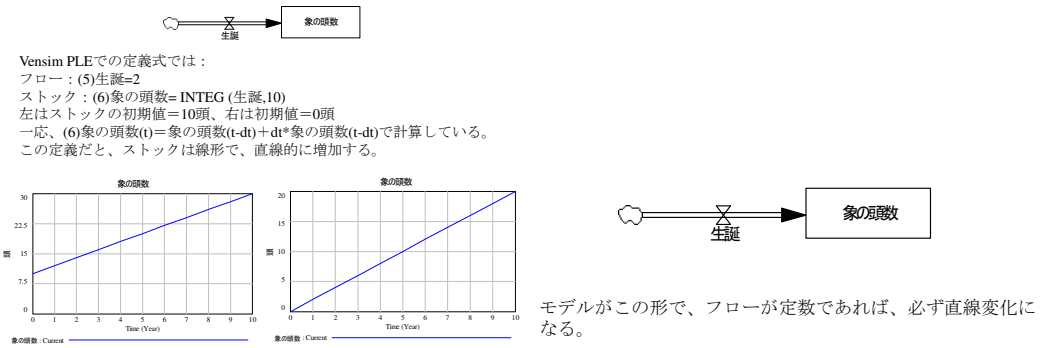


図 5-4：直線的変化

図 5-4 右に、象の頭数というストックに生誕というフローが流れ込む形のモデルを示しています。この単純に、ストックにフローが流れ込む（あるいは流出する）形であれば、そして、ストックにもフローにも複雑な定義式を与えなければ、図 5-4 の左に示したように、これをシミュレーションした結果（ストックの値の変化）は必ず直線的変化になります。このモデルでは、単純に年 2 頭象が増えるとしていますので、傾き 2 の直線として象の頭数が増えていきます。つまり、直線的な変化は、この、単純に、ストックにフローが流れ込む（あるいは流出する）形として表現します。

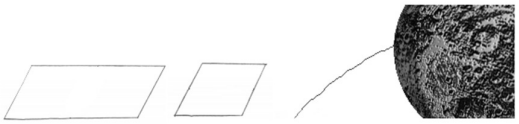
もちろん、ストックとフローを全く使わないで、時間関数 Time を使って、
変数 A＝係数 B*Time
のように、直接変数に記載することで直線的変化を記述しても構いません。

3) 指数的変化

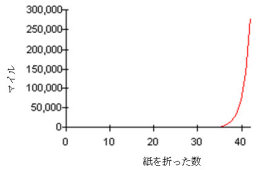
一枚の紙を 2 つに折っていきます。これを 42 回繰り返すととどうなるでしょうか？　実は、42 回折っただけで、約 280,000 マイルの厚さになり、これは、地球と月の間の距離よりも長くなります。つまり、一枚の紙をたった 42 回折っただけで、地球から月まで届く高さになってしまいます。この紙の厚さの変化をグラフで示すと、図 5-5 の左に示したような急に立ち上がる形になります。これが指数変化と呼ばれているもので、

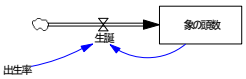
$$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * t}$$

のようにネイピア数(*e*) と呼ばれているものを使った指数で表現されます。



紙を何度も折っていくと、、、





Vensim PLEでの定義式では：
ストック：(7)象の頭数= INTEG (生誕,0)
フロー：　(6)生誕=象の頭数*出生率
　　(5)出生率=0.02
左はストックの初期値＝0頭、右は初期値＝10頭
一応、(7)象の頭数(t)＝象の頭数(t-dt)＋dt*象の頭数(t-dt)で計算している。
この定義だと、象の頭数は変わらないが、10頭にするとストックは指数的に増加する。

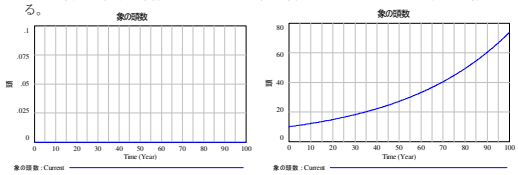
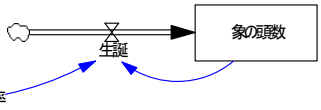
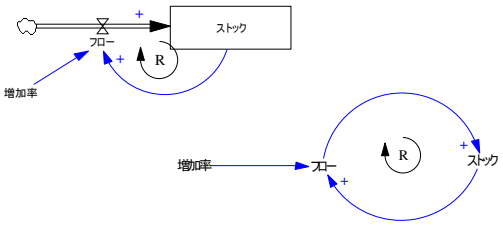


図 5-5：指数的変化



モデルがこの形で、フローが、ストック値に定数を掛けたものであれば、ストックは必ず指数変化する。
また、基本的に増強ループになる。



先の式は：
ストック：ストック(t)＝ストック(t-dt)＋dt*ストック(t-dt)
ストックの初期値＝10
フロー：フロー(t)＝ストック(t)*増加率
増加率＝0.02
という意味だが、これは、フローとストックの増強フィードバック・ループになっていることを意味する。

図 5-6：指数的変化の表現方法

図 5-6 の右上に、フローに、ストックがフィードバックしている形のモデルをしめしていますが、モデルがこの形で、フローが、ストック値に定数を掛けたものであれば、ストックは必ず指数変化します。従って、指数変化するものは、このようにフローにストック値を戻す形で表現できます。また、基本的に、この形は増強ループになります。

もっとも、指数的変化は、ストックとフローを使わないで、指数関数 EXP を使って直接定義することでも表現できます。

この場合は、
変数 A＝EXP（べき乗数 B）
のように定義します。

$$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * t}$$

先に、指数的増加は、上式で表現できると説明しましたが、その数学的証明を下に示しておきました。

Derivation of the Analytical Solution *10)

$Stock_t - Stock_{(t-DT)} = DT * (Flow_{(t-DT)=>t})$

$Stock_t - Stock_{(t-DT)} = Stock_t * Coef * DT$

$\Delta Stock_t = Stock_t * Coef * DT$

$\frac{dStock(t)}{Stock(t)} = Coef * DT$

$\int_0^t \frac{dStock(t)}{Stock(t)} = Coef * \int_0^t DT$

$\ln(Stock_t)_0^t = (Coef * t)_0^t$

$\ln(Stock_t) - \ln(Stock_0) = Coef * (t - 0)$

$\ln\left(\frac{Stock(t)}{Stock(0)}\right) = Coef * t$

$e^{\ln\left(\frac{Stock(t)}{Stock(0)}\right)} = e^{Coef * t}$

$\left(\frac{Stock(t)}{Stock(0)}\right) = e^{Coef * t}$

従って、下記式を得られる：

$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * t}$

例えば、time=50、Coef=0.02、初期値=100として：

$Stock_{50} = 100 * e^{0.02 * 50} = 271.8281828$

Coefは、効率性、率。
状態(t)と状態(t-dt)のストックの差は、以下のように表現できる。
Stock(t)-Stock(t-dt)=dt*[Flow(t-dtT)=>t)]
=Stock(t)*Coef*dt
ここで、dtを微小にすると、
これは、左式の微分解と同じ、さらには
これは、左式で積分していることと同じ

対数で表現すると、左のようになる

これは、左のように書き換えられる。

自然対数*e*を使って左のように表現できる。

これはさらに、左式になる。

4) 計算機での計算方法

計算機で、ストックやフロー、変数の計算をする一般的な手順は、以下の通りです。
まず最初に：

・決められた評価方法により計算すべき等式のリストを作成する。
・評価順にストック、フロー、変数に初期値を設定する

次から、
・計算時間 dt 経過後の、ストックの変化先地点を予測する。
・この変化先地点の予測値に基づき、新しいストック値を計算する
・新しいストック値を基に、フローの値と変数の値を計算する
・時間を dt に移動する
・時間が最終時間値に等しくなるまでこの作業を続ける
という作業を行っています。

いわゆる積分計算、あるいは差分計算に関し、計算方法はいろいろあるのですが、よく用いられるのは、オイラー法とルンゲ・クッター法です。Vensim PLE では、オイラー法とルンゲ・クッター4 階常微分法のどちらかの計算方法が選べます。

オイラー法は一番単純な計算方法なのですが、時として精度はあまり良くないことがあります。もっとも、計算方法として、オイラー法が一番適していることは多いので、通常は、このオイラー法を選択しておけばいいと思います。

この方法だと、最初に、
ΔStock=DT*フローの(t)の時の値
を計算します。

次のステップで、これを加え、以下のように計算し、新しいストック値を求めます。

$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + \Delta\ Stock$$

$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + DT * (Flow_{(t-DT) \Rightarrow t})$$

これに対し、ルンゲ・クッター法 2 階常微分法では、DT の時間経過の前後のフローの平均値を計算します。

F1=DT*フローの(t-dt)の時の値

F2=DT*フローの(t)の時の値　　（これはオイラー法と同じ）

Δストック=1/2*(F1+F2)

こうして、変化の前後の値の平均を計算することで積分解を求めます。

F1 = DT * Flow at Beginning of DT [same as in Euler's method]

F2 = DT * Flow at End of DT = DT * Flow(Stock$_{(t)}$ + F1)

$$\Delta\ Stock = 1/2 * (F1 + F2)$$

$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + \Delta\ Stock$$

$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + 1/2 * (F1 + F2)$$

もっとも、Vensim PLE では、ルンゲ・クッター法 4 階常微分法を使っていて、さらに重み付けをして計算していますので、先のやり方とは少し違っています。従って、単純に時間 t-dt と時間 t の間を直線で結んだ三角形の面積を計算しているわけではなく、少し上（あるいは下）にずれた三角形の面積を計算しています。Powersim のマニュアルによれば、

Δストック=1/3*(F1)+2/3*(F2)

と重み付けをしているそうなので、先とは少し違い、単純に三角形として求めているのではなく、やはり、少し上（あるいは下）にずれた三角形として面積計算をしているようです。また、3 次、4 次のルンゲ・クッター法による計算方法も選択できるとあります。

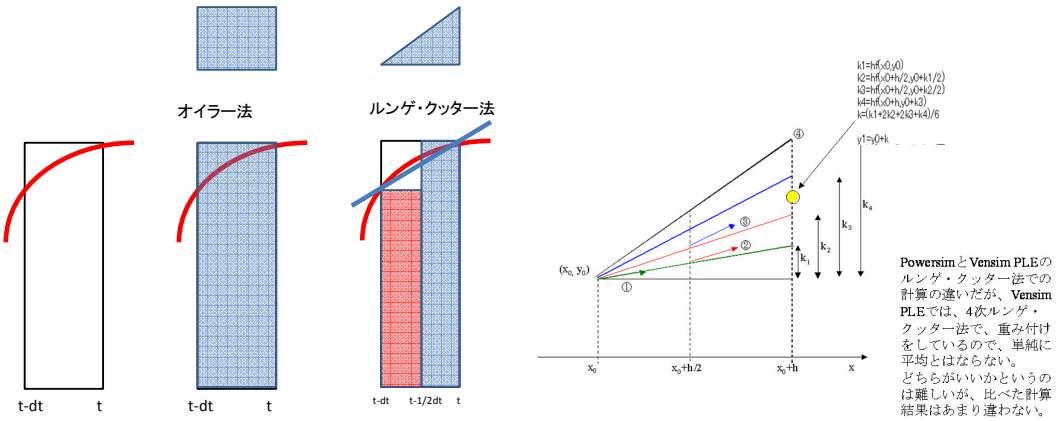


図 5-8：オイラー法とルンゲ・クッター法の計算方法の違い-1

これは、理工系の人には説明するまでもないことなのなのですが、通常、フロー値は、そのまま計算でき、従って、時点 t-dt のフロー値も、時点 t のフロー値も計算できます。しかし、ストックである積分式は通常そのまま計算できません。なぜならば、変化が非線形なので、時点 t-dt から時点 t に至るまでの経路が、時点 t-dt でも、時点 t でも分からないからです。そこで、オイラー法は、t-dt から t までジャンプすると考えます。これに対し、ルンゲ・クッター法は、直線的に行くと考えます。こうした計算方法の違いから、図 5-8 左に示したように、ルンゲ・クッター法の方が、オイラー法よりも誤差が小さくなります。し

かし、値が連続変化するような場合はいいのですが、値が離散的に変化する場合（例えば人口。気持ちは理解できるが 0.5 人などはあり得ない）、変化はまさにオイラー法で想定しているような階段的な変化になりますので、オイラー法の方が計算に適していて、ルンゲ・クッター法ではかえって誤差が大きくなります。

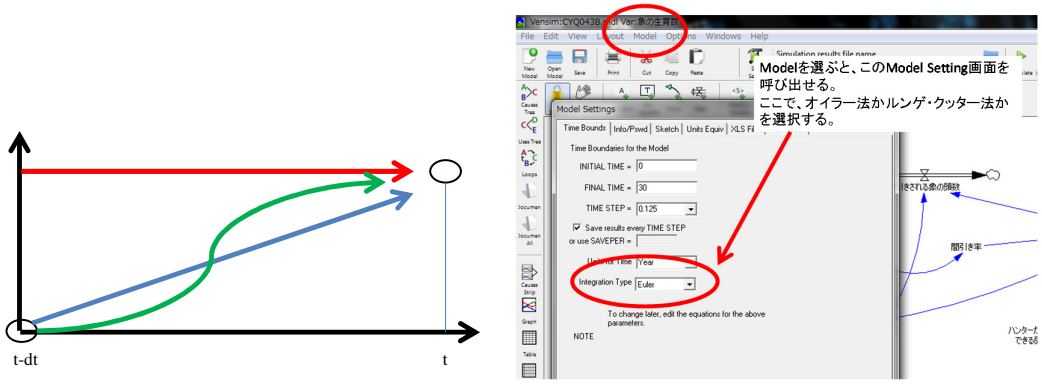


図 5-9：オイラー法とルンゲ・クッター法の計算方法の違い-2

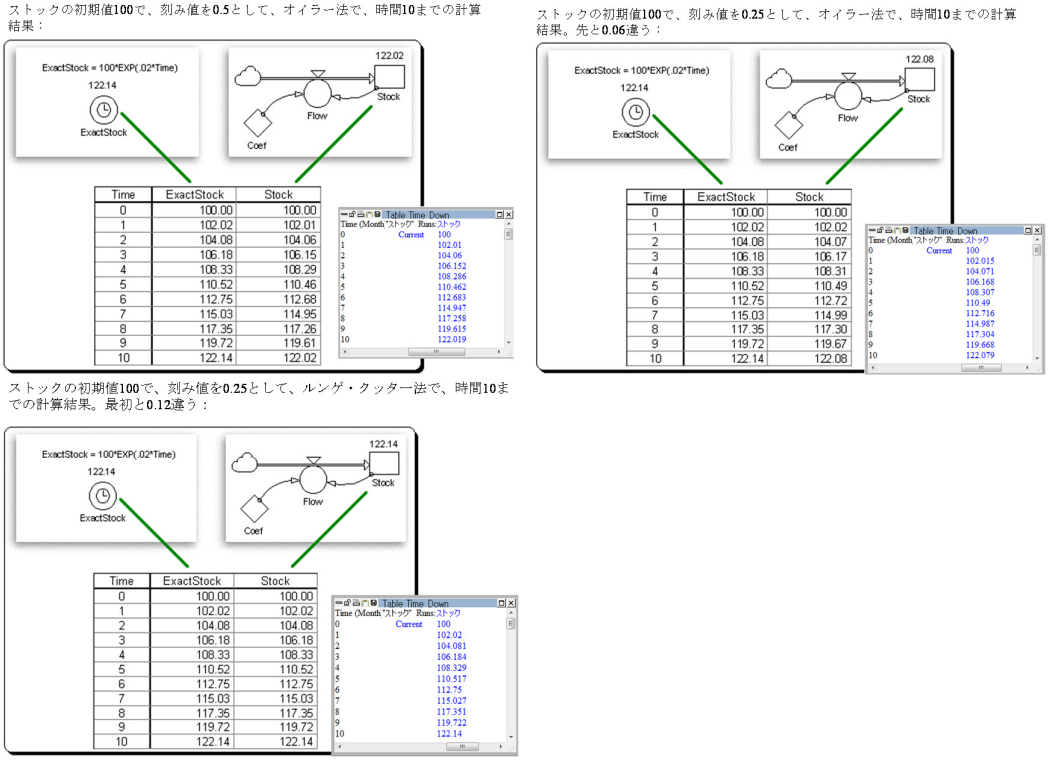


図 5-10：オイラー法とルンゲ・クッター法での計算結果

計算方法の指定は、Vensim PLE を立ち上げ、モデルを作成しようとすると、図 5-9 の右に示したようなシミュレーション条件設定画面が現れるので、一番下の計算方法の欄で、オイラー法かルンゲ・クッター法かを選びます。このシミュレーション条件設定画面は、メニュー・バーのモデルを選択することでも表示できます。

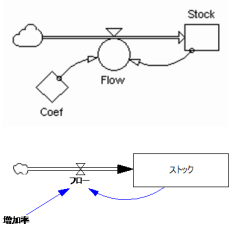
図 5-10 に、オイラー法及びルンゲ・クッター法で指数的に増加するモデルのストック値を計算した結果を示しています。左上は刻値 0.5 で、右上は刻値 0.25 でのオイラー法によ

る計算結果、左下は、ルンゲ・クッター法による計算結果です。これによれば、オイラー法で、時間刻値 0.5 で計算したものと、ルンゲ・クッター法で計算したものとの差は 0.12 になります。なお、テキストのモデルは Powersim を使っていますが、Vensim PLE で計算したものも併記しました。Powersim と Vensim PLE での計算結果には全く差は見られませんでした。

5) 70 の法則

ここで、図 5-11 の左に示した、単純な指数増加をするモデルで考えて、時間が 1 単位増加した場合の指数的な増加量はどれだけになるのでしょうか？

もし、2 倍、4 倍、8 倍というように増えると考えていたら、申し訳ありませんが、間違いです。



このモデルで、時間が1単位増えた場合のストックの指数的増加がどれだけなのか？

$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * t}$ これは、ストックが自然対数*e*の増加率を乗じたものを計算することであり、

$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * T_c}$

$Stock_t = Stock_0 * e^{Coef * (1/Coef)}$

$Stock_t = Stock_0 * e^{1}$ 1単位時間（1冪乗）しか増えないのであれば、自然対数*e*の増量と同じで、

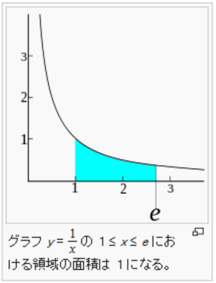
$Stock_t = Stock_0 * 2.71828$ *e*=2.71828なので 2.71828倍に増える。

図 5-11：指数的増加

この説明（増え方）は、理工学系の人には言わずもがなのですが、私のような文化系の人間では、説明が難しいことがあります。一般に、理工学系では、冪乗数や対数は、底にネイピア数 *e* を使います。ネイピア数 *e* は、

e=2.71828

なので、そのため、2.7、7 というように増えていきます。



グラフ $y=\frac{1}{x}$ の $1 \le x \le e$ における領域の面積は 1になる。

1/xを1から積分する、つまり、
1+1/2+1/3+1/4+…..
とやっていくのだが、
それが2になる、つまり、積分して面積が1になる分母の値が自然数の底e

これを使って対数に変換し、微分してしまえば、何でも1/xとして計算できてしまう。
ということで、指数計算、対数計算では、一般的に、ネオピア数eを前提に等式指定する。

図 5-12：ネイピア数

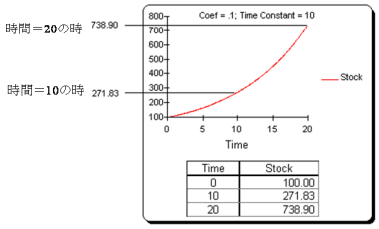
ネイピア数は、例えば、図 5-12 に示したような、指数的に減少する関数で、時間 1 から経過して、面積が 1 になるような値です。この *e* を使えば、

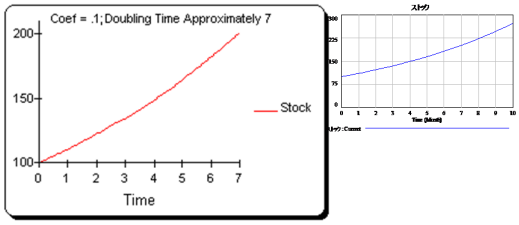
e^x を微分すると e^x になり、対数の $\log_e x$ を微分すると 1/x になって便利なので、多用されています。

1) 70の法則

ここで、冪乗数が2単位に増えると：
2.71828* 2.71828=7.3890倍に増える。

ここでは、1/10にスケールを落としたものを表示。
増加率0.1で初期値100だと、時間10で、271.8、時間20で738.9





つまり、ストックが2倍になる時間を求めていることになる。
これは、ストック*T(t)*が*T(t-dt)*の2倍となることで、*T(t)*=0.7**T(t-dt)*、つまり、*e*を底辺に、70%づつ増加する。

この0.7を使えば、7時間単位で、ストックは100から200（2倍）に増える。
つまり、もし、自然対数での指数増加が2倍に早まれば、こうなる。
これは、社会科学系で、2倍に増える時間を求める法則である、「70の法則」として知られているもので、*T(d)*=(70/増加率)*100という法則式になっている。

図 5-13：70 の法則

Derivation of the Doubling Time for a First Order, Linear, Positive Feedback Loop System

The doubling time for a first order, linear, positive feeback loop system is calculated using Equation 1. If the doubling time, T_d, is defined to be the time it takes to double the initial value of a stock, then:

$$2*Stock_0 = Stock_0 * e^{Coef * T_d}$$

ストックが2倍になるということは左式
これはこう書き直せ

Since the system's time constant, T_c, is 1/Coef, then the system's Coef = 1/T_c. Thus:

$$2 * Stock_0 = Stock_0 * e^{1/Tc * Td}$$

Dividing both sides by $Stock_0$ yields:

$$2 = e^{T_d / T_c}$$

Stock(0)で両辺で割り
Stock(0)を両辺から外す

Taking the natural logarithm of both sides yields:

$$\ln(2) = \ln(e^{T_d/T_c})$$

これは対数表現で
In(2)=0.69

Or:

$$.69 = T_d / T_c$$

0.69=T(d)/T(c)
近似で
0.7=T(d)/T(c)
つまり

Or:

$$.7 = T_d / T_c$$

Or:

$$T_d = .7 * T_c$$

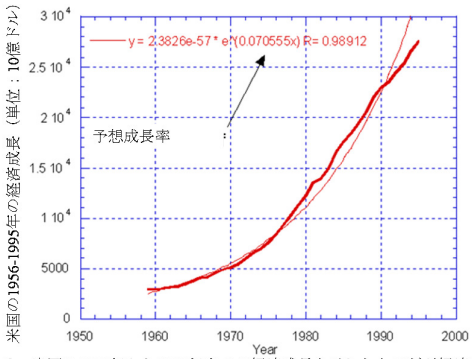
T(d)=0.7*T(c)

Thus, the doubling time of a first order, linear, positive feeback loop system is seventy percent of its time constant.

先の、指数的に増加するということは、単純に 2 倍、4 倍、8 倍と増えていくという意味ではないのであれば、ストックが 2 倍になるのはいつの時点なのでしょうか？

上に数学的な証明を付けていますが、時間が 1 単位経過し、2 になってしまうと 2.7 倍になってしまうので、時間経過 1（つまり図 1-12 で 2 になる）よりも少し前、0.7（つまり図 5-12 で 1.7）ぐらいの所で 2 倍になります。

図 5-14 に、この *e* を使って米国の 1959 年から 1995 年までの経済成長を指数表現していますが、かなりうまく計算式に合うように経済が伸びていることを示しています。また、経済成長率は 0.07055 で、7%と近似すると、米国の GDP が 2 倍になるのは、
(70/0.07055)*100=9.86 年後
というように計算できることが分かります。



これは、米国の1959年から1995年までの経済成長を示したものだが経済成長率は0.07055であり、概ね7%で成長している。これを先の70の法則に当てはめると、経済成長率は0.07055であるので、米国のGDPが2倍になるのは、
(70/0.07055)*100=9.86年後

図 5-14：70 の法則に当てはまる米国経済の成長

実は、この元になった
T(d)=0.7*T(c)
という式は、70 の法則として知られているものです。多分半減期についは放射能関係でご存じだと思います。その反対の概念と考えて下さい。

この 70 の法則は、金融関係で、元本が 2 倍になるような利子率と期間を簡便に求める式として知られていて、しかし、日本では「72 の法則」と呼ばれています。

年利(単位：%)×年数(単位：年) ＝ 72

上記の式の「年利(%)」に年利率[複利]を当てはめると元本が 2 倍になるのに必要な年数が求められ、逆に、「年数」に運用年数を当てはめると元本が 2 倍になるのに必要な年利が求められます。

ただ、実務では、72 では、年利が 8%前後であれば当てはまりがいいのですが、これを外れると誤差が大きいので、72 ではなく、69.3 が使われています。

6) ゴール・シーキング（収斂型変化）

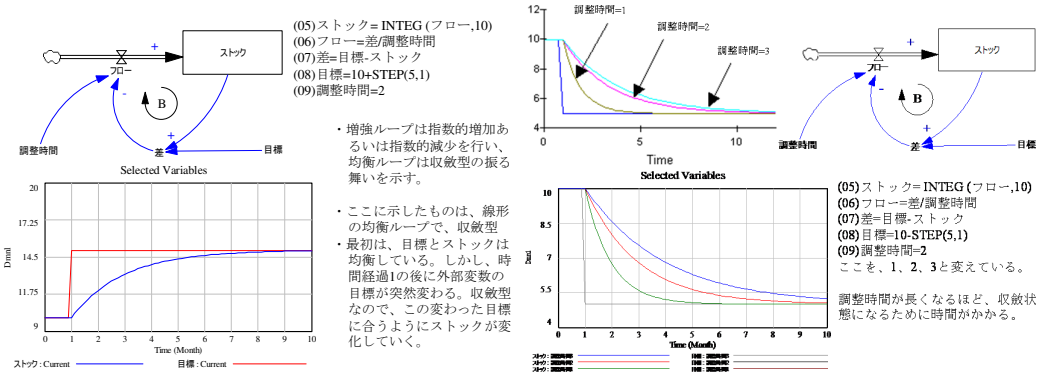


図 5-15：収斂型変化

収斂型変化とは、ある値に向かって収束していくような変化で、図 5-15 にその例を示しています。左がプラス（増加）、右がマイナス（減少）変化です。これは、図 5-15 左の上のモデルで示したように、ストックの値と目標値を比較し、その差を測定し、差を短縮するようにフローに返すことで表現できます。また、この形は基本的に均衡ループになります。

収斂型は、ネイピア数 *e* に負の分数をべき乗することで表現されます。

$$Stock_t = Goal + (Stock_0 - Goal) * e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$

$$Stock_t = Stock_0 * e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$

・この収斂型の等式はこのように表現できる。自然対数*e*での、冪乗が分数になる。

Derivation of the Analytical Solution to the First Orde
Feedback Loop System

基本的には前と同じで、状態(t)のストックは、左のように表現できる。

$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + DT * (Flow_{(t-DT)=>t})$$
$$Stock_t = Stock_{(t-DT)} + DT * (Goal - Stock_t) / TimeCoef$$
$$Stock_t - Stock_{(t-DT)} = [(Goal - Stock_t) / TimeCoef] * DT$$

ここで、dtを微小にすると、これは、左式の微分解と同じ、

$$\Delta Stock_t = (Goal - Stock_t) * (1 / TimeCoef) * DT$$
$$\frac{dStock(t)}{Goal-Stock(t)} = (1 / TimeCoef) * dt$$

さらには
これは、左式で積分していることと同じ

$$\int_0^t \frac{dStock(t)}{Goal-Stock(t)} = (1 / TimeCoef) * \int_0^t dt$$

先のものを対数を使うと、左のようになる

$$-\ln(Goal - Stock_t)\,|_0^t = (1 / TimeCoef) * t\,|_0^t$$
$$\ln(Goal - Stock_t) - \ln(Goal - Stock_0) = -(1 / TimeCoef) * t$$
$$\ln[(Goal - Stock_t) / (Goal - Stock_0)] = -(1 / TimeCoef) * t$$
$$(Goal - Stock_t) / (Goal - Stock_0) = e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$
$$Goal - Stock_t = (Goal - Stock_0) * e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$
$$-Stock_t = -Goal + (Goal - Stock_0) * e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$

The exact analytical solution is:

従って左のようになる

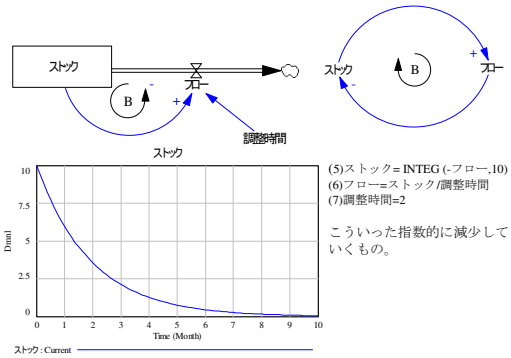
$$Stock_t = Goal + (Stock_0 - Goal) * e^{-(1 / TimeCoef)*t}$$

初期値10、目標値15、時間調整2では、

$$Stock_t = 15 + (10 - 15) * e^{-(1 / 2)*t}$$

上にその数学的証明を記しておきます。

7) 指数的減少と半減期



(5)ストック= INTEG (-フロー,10)
(6)フロー=ストック/調整時間
(7)調整時間=2

こういった指数的に減少していくもの。

$$Stock_t = Stock_0 * e^{-(1 / TimeCoef)*T_c}$$

先の収斂型の数式を使って

$$Stock_t = Stock_0 * e^{-(1/TimeCoef)*TimeCoef}$$

こう変形し、

$$Stock_t = Stock_0 * e^{-1}$$
$$Stock_t = Stock_0 * (1/e)$$
$$Stock_t = Stock_0 * .37$$

指数的減少は、1単位時間進むにつれて0.37を掛けた減少として求められる。

図 5-16：指数的減少

指数的減少は、図 5-16 の左上のようなモデルで、表現できます。ストックの値は、図 5-16 の左下に示したような形になります。先に説明したマイナスの収斂型との違いは、収斂する値（目標）が 0 であること、モデルでは、収斂していく目標値を与える「目標」という

定数（あるいは変数）がモデル上に存在しないことだけです。数学的な表現は、マイナスの収斂型変化と同じです。また、収斂していく目標値が与えられていませんが、暗黙的に、モデルでは 0 に収斂していくように想定されています。いずれにしろ、指数的減少を示すモデル構造は、ストックからフローが出力されていく際に、フロー出力の値が、ストックの値に正比例するような形で表現されますし、この形で表現されたものは、基本的には均衡ループになります。

先に、ストックが 2 倍になるという 70 の法則について説明しました。それでは、その逆に、ストックが半分になる時間はどれだけなのでしょうか？　これは、半減期と呼ばれていて、放射能問題などでお馴染みのものだと思います。これも、時間が 1 単位進んで、1 から 2 になると半分になると考えると、先のストックが 2 倍になる時間が、1 から 1 単位進んだ 2 ではないのと同じで、大間違いです。

図 1-16 の右に示していますが、指数的減少の場合、時間が 1 単位進むと
Stock(1)=Stock(0)*0.37
となるので、63%の量が失われます。

2 単位目では、
Stock(1)=Stock(0)*0.37*0.37=Stock(0)*0.14
となるので、86%が失われます。
3 単位目では
Stock(1)=Stock(0)*0.37*0.37*0.37=Stock(0)*0.05
となるので、95%が失われます。

このことから、時間が 1 単位進むと半分よりももっと減ってしまうので、半減期は、その手前になることが分かります。実は、半減期は、1 単位の手前の、70%過ぎたあたりが半減期になります。以下がその数学的証明です。

Derivation of the Half Life for a First Order, Linear, Negative Feedback Loop System

The half life of a first order, linear, negative feeback loop system is calculated using Equation 2 of Goal Seeking Behavior. If the half life, T_h, is defined to be the time it takes to cut the initial value of a stock in half, then:

$$1/2 * Stock_0 = Stock_0 * e^{-1/Coef * T_h}$$

Since the system's time constant, T_c, is 1/Coef, then the system's Coef = $1/T_c$. Thus:

$$1/2 * Stock_0 = Stock_0 * e^{-T_c * T_h}$$

Dividing both sides by $Stock_0$ yields:

$$1/2 = e^{-T_h/T_c}$$

Taking the natural logarithm of both sides yields:

$$ln(1/2) = ln(e^{-T_h/T_c})$$

Or:

$$ln(1) - ln(2) = ln(e^{-T_h/T_c})$$

Or:

$$0 - .69 = -T_h / T_c$$

Or:

$$T_h = .7 * T_c$$

Thus, the half life of a first order, linear, negative feeback loop system is seventy percent of its time constant.

ストックが半分になるということは、左式と同じ。

これは、こう書き直せる。
この両辺からStockを外すと
左式になる。

対数で表すとこうなる。

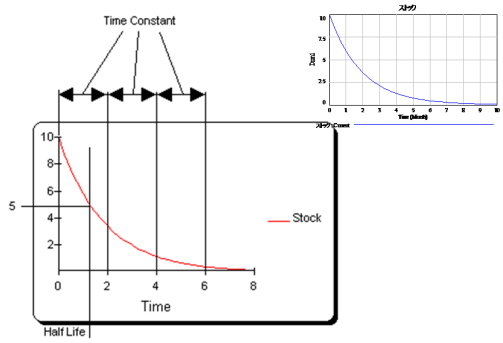
上式は、こう書き直せる。

これは、こうなるから

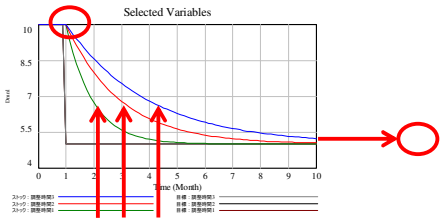
従って
左式になる。

従って、1 単位の手前の、70%過ぎたあたりが半減期になるのですが、これは調整時間によって、単位が違ってきますので、減少するパターンが違ってきます。調整時間が短いほど、急激に減少し、調整時間が長いほどゆっくり減少します。放射能では、原子の種類の

違いによる崩壊時間の違いとして表現されます。



先のモデルでのシミュレーション結果を使っていて、時間調整を2にしているので、
時間軸が2倍になっている。従って、半減期は、この、1と2の中間の1.4ぐらいになる。



・放射能などで騒がれている半減期だが、
・減少のタイプが違うので、最初は同じ量であっても、半減期は違ってくる。
・ただし、完全になくなる時間は同じで無限大の時間

図 5-17：半減期

8) 振動

図 5-18 に示していますが、波動型になるような変動を示すのがこの振動と呼ばれている現象です。図 5-19 左に示したモデル構造が、振動が起きる時のよくある典型的なシステム構造で、遅延と別のストックが絡む構造で起きます。つまり、ストックとフローを 2 組用意し、お互いを干渉させるようにすれば振動が起きます。図 5-18 の右に示したグラフは、図 5-19 左のモデルをシミュレーションしたものですが、図 5-20 の象のモデルと基本的に同じ構造です。図 5-19 でも、象の頭数というストックに関係するストック・フローのモデル単位に、ハンターの数というストック・フローのモデル単位が干渉し、象の生育数のちょっとした変化が、振動を起こしています。このように、2 つの、ストックとフローの組を干渉させることで、振動を生み出すことができます。

実は、ストックとフローの組に対し、遅延を入れてフローに戻せば、ストックとフローを 2 組使わなくともやはり振動を起こすことができます。

振動は、システムの状態が理想的な状態と外れている場合、理想的な状態にしようと調整するのですが、その調整の過程で、遅延が起き、前の値で修正してしまい、過剰修正、あるいは過少修正になって、理想的な状態にはならないので、さらに調整しようとする動きが振動となって表現されます。

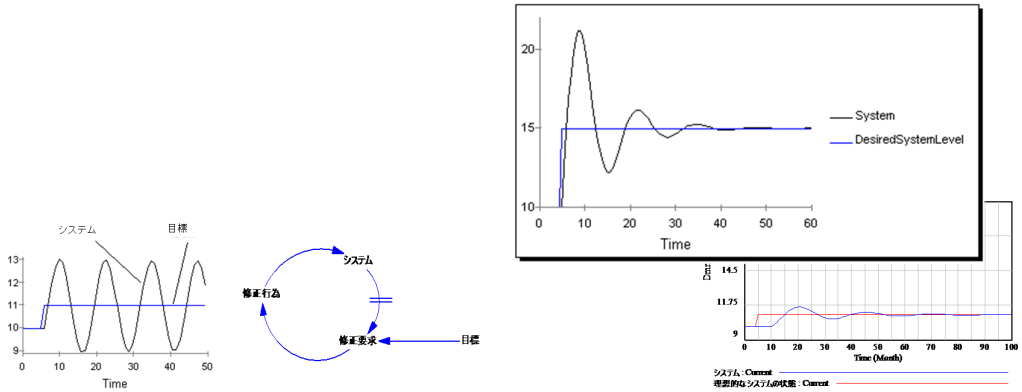


図 5-18：振動

表 5-1 に振動のタイプをまとめています。定期振動は、例えば、正弦波動のような、いつまでも振動が続くもので、これを表現するために、SIN 関数を使うこともできます。

収束は先に示した通りで、ストックに収束目標との差異をフィードバックすることで表現できます。これを逆に使って、収束目標との差異が大きくなるようにフィードバックさせると発散します。これは、遅延などが介入し、収束させる差異の値が、時間単位で前のものを戻すなどによって、ますます収束目標から外れてしまうようにしたモデルで表現できます。

表 5-1：振動のタイプ

振動のタイプ	性格
定期変動	・周期変動する ・一定して振幅される ・均衡に達しない
収束	・時間が経過すると振幅が減少する ・最終的には収束し、振動が止まり、均衡する
発散	・無限大に近い極端な発散はあまり実世界では起きない ・時間が経過すると振幅が増幅する ・システム全体の推進になるか、システムを消耗させる
カオス	・不規則で同じパターンが現れない ・時間が経過しても不規則な増幅と振動が永遠に続く ・自然にはこのカオス的な振る舞いは多く見られる。例：天候

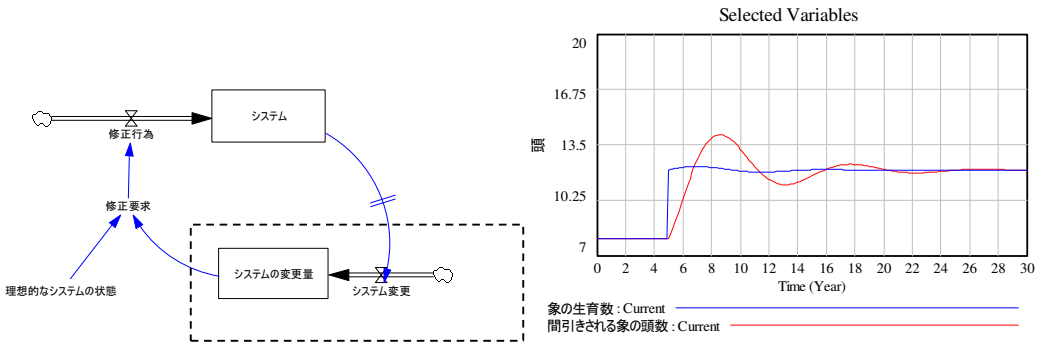


図 5-19：振動

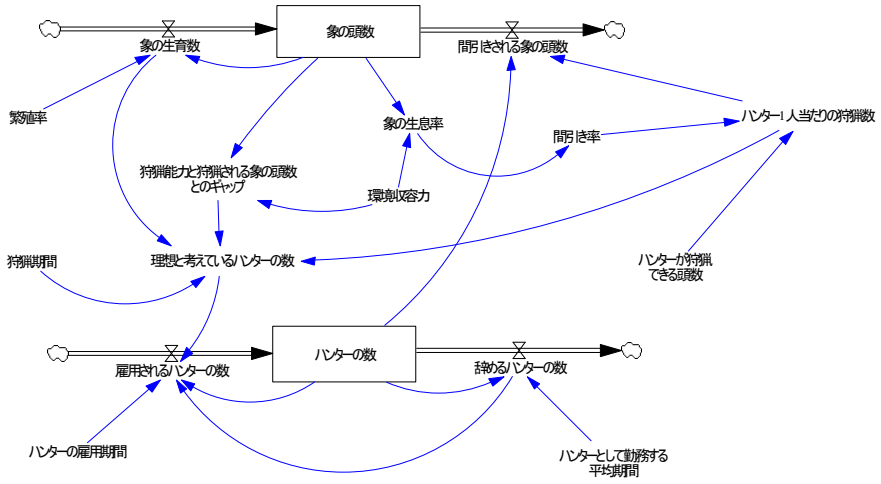


図 5-20：象のモデル

カオス状態は、意図してはなかなか作れないものですが、モデルを作っていくとそうな

ってしまうことは比較的よくあります。普通は、なかなか確実には再現できないので、乱数を使ってカオス状態を強制的に発生させます。

SD モデルでは、振動はよくあるもので、ストックとフローの組み合わせの複数干渉、遅延がフローにある場合、あるいは強制的に、乱数や三角関数で振動を与えた場合に振動が表現されます。

図 5-20 の象のモデルを説明しておきます。1980 年代から 1990 年代にかけて、アフリカの自然動物公園では、象の頭数の管理が自然公園の管理の鍵になると信じられていました。象は大食なので、あまり頭数が多いと、自然動物公園内の食物を食べつくし、そのため、他の草食動物の食料が無くなり、象も草食動物も減少し、それに伴い、肉食動物も減少し、自然動物公園内の動植物が消滅してしまうということが危惧されていました。また、象は長命であり、その巨体ゆえに、肉食獣も襲うことはあまりありません。つまり、肉食獣による生息数増加抑制が効かない種、従って、人間の手で殺すことで調整するしか方法がない獣と考えられていました。

そこで、自然動物公園の管理では、象の頭数を一定に抑えることが重要視されました。この自然動物公園の象の頭数管理のモデルが図 5-20 です。自然公園の管理者は、象の密度を、自然公園の範囲内で維持できるように管理する必要があり、象の数を一定にするために、生まれる象の数を勘案しながら、間引きする象の数を決め、ハンターを雇って、象を打ち殺し、一定の頭数に抑えようしました。

モデルでは、象は年間 8 頭から 12 頭生まれるとしています。しかし、データ収集等で何頭生まれたかを正確に知るために時間がかかるので、時間遅れが組み込まれています。また、自然公園の管理人は、何人ハンターが必要か考え、足りない場合、雇用を増やすのですが、しかし、雇用に時間がかかるので、ここにも時間遅れが組み込まれています。

ハンターが増えるので、殺される象の数が増え、象の数は減少しますが、この情報も遅れて管理人に届きます。このため、象は減少が多くなりすぎ、あわてて、ハンターを解雇し、象の狩猟を減らします。こうした変動が、両者が一致するまで続くことになります。

モデルでは、4 年目までは象の生誕は年間 8 頭ですが、5 年目から 12 頭生まれるとしています。象の生誕の増加が 1 年遅れで認知され、ハンター調達で 1 年遅れ、7 年目から、頭数に見合う数の間引きが行われますが、そこでストップできなく、今度は過剰に間引くことになってしまいます。過剰間引きが認知され、調整され、11 年目で均衡するのですが、その後、今度は過少間引きとなってしまいます。

この図 1-20 の象のモデルの等式は、演習で使うので、その項に記載しておきました。

9) S 型成長

これは、成長曲線、ロジスティク曲線などと呼ばれている変化のパターンで、S 字を斜めにしたような形から S 型変化と呼ばれています。また、この S 字型を 2 つ合わせた正規分布曲線のような変化は、その形から釣鐘型曲線などと呼ばれています。

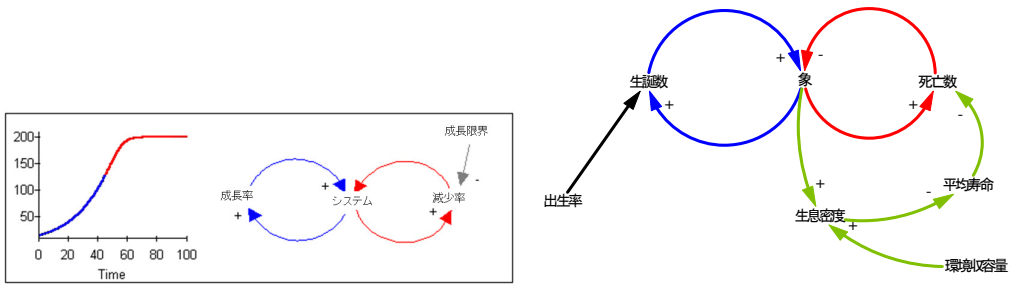


図 5-21：成長曲線とその発生メカニズム

この変化のパターンは、増強ループと均衡ループが主流のループを争って競うような場合に起き、この拮抗は、最終的に均衡に達して終わります。従って、増強ループに均衡ループを接して干渉させることで、この変化を引き起こせます。モデルの基本的な形は、図 5-22 に示したようなものとなります。

図 5-21 の左の図は、増強ループと均衡ループが隣接しています。ここで、最初は、青で示した増強ループが優勢で、指数的に増加します。しかし、成長限界があるので、やがて、赤で示した均衡ループが優勢になり、指数的に減少し、収束に向かいます。非線形システムでは、このように、優勢となるフィードバック・ループが時間経過で変わることはよくあることですし、実は、このような非線形システムは、物理学でも、社会学でも経済学でもよくあることです。この状態を表現した定性モデルが図 5-21 の右の示したものです。

これを定量モデルにしたものが、図 5-22 の左に示したもので、そのシミュレーション結果をその下に示しています。青で示した、増強ループである象の生誕数のフローと、赤で示した均衡ループである象の死亡数のフローが、象の頭数というストックを介して接しています。青の部分の増強ループでは、出生率を一定として、この出生率の割合で象の数は増えていきます。赤の部分は、均衡ループで、象が増えると死亡数も増え、象を減少させるように働き、象の数がゼロになり、もう死亡する象がいなくなるまで働き続けます。緑のループが、環境収容量で与えられる生態密度から平均寿命を決めるもので、平均寿命が短くなれば、象の死亡数が増えようになっています。このしくみが、均衡ループにリンクすることで、均衡ループを動かしますし、これ自体も均衡ループになっています。
グラフでは色が逆になってしまいましたが、赤の象の誕生数で増加し、20 年目当りで青の象の死亡数が増強ループでの象の増加に歯止めをかけ始め、25 年目で両者が均衡し、それ以上の象の増加が食い止まります。つまり、「象の数の増加」は、時間 25 でピークになり、この時点で、増強ループから均衡ループに主流が切り替わっています。

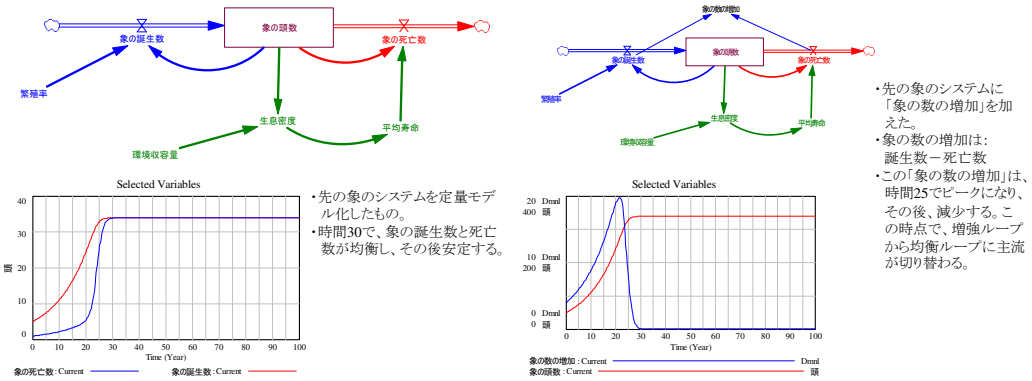


図 5-22：象のモデルによる成長曲線とその発生メカニズム

このことを、図 5-22 左のモデルに、「象の数の増加」を加え、その変化で見てみましょう。モデルは図 5-22 の右に示しています。象の数の増加は：
象の数の増加=誕生数－死亡数
で計算しています。
青で示した、象の数の増加が時間 25 でピークになり、その後減少していることが、図 1-22 右下のグラフから見て取れます。

図 5-22 左のモデルの等式は、以下の通りです。

(01)FINAL TIME = 100
Units: Year
The final time for the simulation.
(02)INITIAL TIME = 0
Units: Year
The initial time for the simulation.
(03)SAVEPER = TIME STEP
Units: Year [0,?]
The frequency with which output is stored.
(04)TIME STEP = 0.25
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.
(05)平均寿命 = WITH LOOKUP (生息密度,([(0,0)-(2,50)],(0,50),(0.2,50),(0.4,50),(0.6,50),
(0.8,50), (1,50),(1.2,46.5),(1.4,34),(1.6,15.4),(1.8,4.4),(2,0)))
Units: Year
(06)環境収容量=200
Units: 頭
(07)生息密度=象の頭数/環境収容量
Units: Dmnl
(08)繁殖率=0.1
Units: Dmnl
(09)象の死亡数=象の頭数/平均寿命
Units: 頭
(10)象の誕生数=象の頭数*繁殖率
Units: 頭
(11)象の頭数= INTEG (象の誕生数-象の死亡数,50)
Units: 頭

また、図 5-22 左のモデルにパラメーターをたった一つ追加しただけですが、図 5-22 右のモデルの等式も示しておきます。

(01)FINAL TIME = 100
Units: Year
The final time for the simulation.
(02)INITIAL TIME = 0
Units: Year
The initial time for the simulation.
(03)SAVEPER = TIME STEP
Units: Year [0,?]
The frequency with which output is stored.
(04)TIME STEP = 0.25
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.
(05)平均寿命 = WITH LOOKUP (生息密度,([(0,0)-(2,50)],(0,50),(0.2,50),(0.4,50),(0.6,50),
(0.8,50),(1,50), (1.2,46.5),(1.4,34),(1.6,15.4),(1.8,4.4),(2,0)))
Units: Year
(06)環境収容量= 200
Units: 頭
(07)生息密度=象の頭数/環境収容量
Units: Dmnl
(08)繁殖率=0.1

Units: Dmnl
(09)象の数の増加=象の誕生数-象の死亡数
Units: Dmnl
(10)象の死亡数=象の頭数/平均寿命
Units: 頭
(11)象の誕生数=象の頭数*繁殖率
Units: 頭
(12)象の頭数= INTEG (象の誕生数-象の死亡数,50)
Units: 頭

10) オーバーシュートとなし崩し

オーバーシュートとなし崩しは、すでに説明した、釣鐘型変化のことを指します。増強ループと均衡ループを隣接させ、増強ループから均衡ループに切り替えることで表現できます。

これまでの、象のモデルの議論は、環境許容量を一定としての議論でしたが、環境許容量が変わった場合どうなるかで考えます。この場合：

－環境許容量自体が振動する

－オーバーシュートし、その後なし崩しになる、そして、環境許容量が崩れるか、あるいはシステムが破壊する、

あるいは、

－反対に戻り、環境許容量が S 型に変化する。

という現象を発生させることができます。

ここでは、2 番目のケースについて、象のモデルで、ストックを新たに一つ追加したモデルで示してみます。

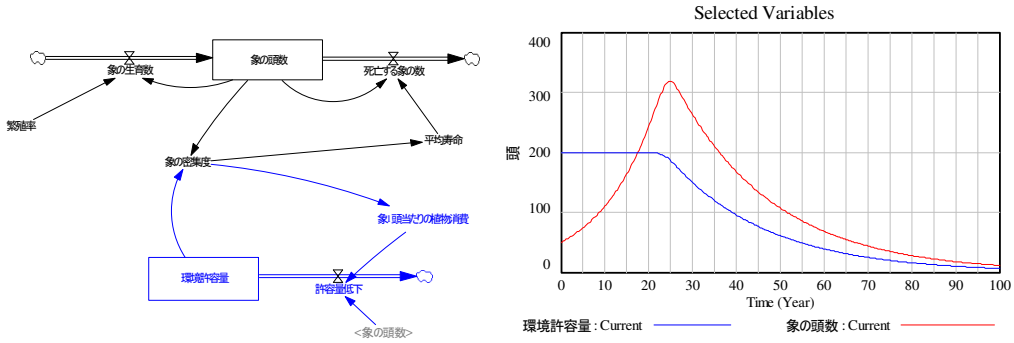


図 5-23：象のモデルによる釣鐘型曲線とその発生メカニズム

図 5-23 に示したように、先の図 1-22 左の象のモデルを変形し、環境許容量が、象の密度で変わるようにします。象が多くなると、食物を取りつくすので、食料が少なくなり、自然公園が養える象の数が減っていく、これを象の平均寿命が短くなるというメカニズムで、象の数を減少させます。

シミュレーション結果を図 5-23 右に示しています。環境許容量が減少するので、象の頭数が、300 頭をピークに減少し、土地に食物が無くなり、象はゼロ頭まで減少していきます。

もっとも、このモデルでは、土地の植物再生産のことを考えていませんので、象が、土地が植物を再生産できなくなるまで植物を食い尽くすという仮定のもとでの話と考えて下さい。

環境許容量自体が振動するという現象及び、環境許容量が S 型に変化するという現象は、環境許容量というストックに、再生というフローを入力することで再現できます。例えば、

環境許容量の減少を、時間遅れで取り戻し、減少と増加が均衡すれば、振動になります。これは、象が生存しているアフリカのサバンナ地域では、食物を食べても、雨季が来ると植物が再生し、再び、象や草食動物が食べられる食物が生まれます。また、象も移動しながら採食しますので、象が立ち去った後に、食物自体も再生します。

環境許容量が S 型に変化するという現象は、植物が再生しても、時間遅れでそれを上回る生殖率で象やその他の草食動物が増えればこの現象が発生します。いずれも、環境許容量というストックに、再生というフローを入力し、その増加係数の決め方次第で、どちらかになります。

このモデルから、環境許容量→許容量低下という均衡ループが、象の頭数→死亡する象の数という均衡ループを強制的に働かせ、象の頭数を釣鐘型に変化させていることが、図 5-23 右に示したグラフから見て取れます。

これまでで説明してきたように、S 型成長や釣鐘型変化は、増強ループと均衡ループを隣接させ、増強ループから均衡ループに切り替えることで表現できることが理解されれば幸いです。

なお、最近では、象は土地が植物を再生産できなくなるまで食い尽くすということは否定されていますし、象そのものの絶滅も危惧されてきています。動物で土地が植物を再生産できなくなるまで食い尽くすという話では、実は山羊や羊の方が問題で、サヘル地域などでは、山羊や羊が、植物の根まで食べ、植物が再生産できなくなり、そのことが原因で、砂漠の砂の移動を植物によって止められなく、砂漠周辺の村落が砂漠から来た砂でうずもれ、村を放棄せざるを得なくなるという砂漠化の問題の方が深刻化しています。

図 5-23 のモデルも、先に示した、図 5-22 左のモデルに数行追加しただけなのですが、一応等式を記載しておきます。

(01)FINAL TIME = 100
Units: Year
The final time for the simulation.
(02)INITIAL TIME = 0
Units: Year
The initial time for the simulation.
(03)SAVEPER = TIME STEP
Units: Year [0,?]
The frequency with which output is stored.
(04)TIME STEP = 0.25
Units: Year [0,?]
The time step for the simulation.
(05)平均寿命 = WITH LOOKUP (象の密集度,([(0,0)-(2,50)],(0,50),(0.2,50),(0.4,50),(0.6,50),(0.8,50),(1,50),(1.2,46.5),(1.4,34),(1.6,15.4),(1.8,4.4),(2,0)))
Units: 頭
(06)死亡する象の数=象の頭数/平均寿命
Units: 頭
(07)環境許容量= INTEG (-許容量低下,200)
Units: 頭
(08)繁殖率=0.1
Units: Dmnl
(09)許容量低下=象 1 頭当たりの植物消費*象の頭数
Units: 頭
(10)象 1 頭当たりの植物消費 = WITH LOOKUP (象の密集度,([(0,0)-(2,0.05)],(0,0),(0.2,0),(0.4,0), (0.6,0),(0.8,0),(1,0),(1.2,0),(1.4,0.0055),(1.6,0.0136),(1.8,0.0289),(2,0.05)))

Units: Dmnl
(11)象の密集度=象の頭数/環境許容量
Units: 頭
(12)象の生育数=象の頭数*繁殖率
Units: 頭
(13)象の頭数= INTEG (象の生育数-死亡する象の数,50)
Units: 頭

これまでのこの章の説明で、システムの基本的振る舞いである、直線変化、指数変化、振動、収斂、S 字型変化をどういったモデル構造で発生させられるかが理解されれば幸いです。

(3) 5 章のまとめ

この章では、システムの振る舞いの基本形である直線変化、指数変化、収斂型変化、振動、S 字型変化の 5 つの基本的な変化のパターンの基本的な表現方法を説明しました。直線変化は、ストックにフローが単誦に、入力、あるいは出力する形で表現できます。シス変化は、ストックに入力、あるいは出力するフローに対し、ストックからのフィードバックがある形で表現でき、正のフィードバック（増強ループ）であれば増加し、負のフィードバック（均衡ループで、ストックに対してフローがマイナス値を取る）であれば、収斂します。収斂は、目標に対し、ストックとのギャップを埋めるような均衡ループを設けることでも可能です。振動は、ストックとフローの組み合わせに、遅延を干渉させることで発生させることができます。S 型変化は、増強ループに均衡ループを干渉させ、増強ループの、システムを増加させようとする動きを、途中から均衡ループが取って代わり、収斂させるようにすれば、表現できます。

6. マネジメント・フライト・シミュレーター

SD を使えば、仮想実験で確かめながら最適な政策代替案を選べること、モデルを使って対象としているシステムのメカニズムを理解できること、その理解によって意思決定の能力を培うことができることを以て、SD の利点、あるいは SD 利用の意義と考えています。

こういった SD の利便性を生かす上で、SD モデル構築が鍵であり、SD モデルは通常、以下のステップで構築していきます：

・問題の定義
・仮説
・仮説検証
・政策代替案の検討

(1) 問題の定義

モデルを構築することも重要ですが、その前段階である、問題の定義や対象範囲の確定といった作業の方がより重要です。モデル構築において、どの問題に焦点を合わせるべきかを決めることにより、モデル構築の対象範囲が決まります。逆に、どの問題に焦点を合わせたものか（目的）がはっきりしないと、SD で何をするのか分からなくなります。モデルを構築中に、対象としている問題に関する理解が深まり、当初のものではなく、違う問題を対象にすべきだということを発見することもあるでしょうが、いずれにしろ、このモデル構築の前段階作業を軽視することはできません。

テキストでは簡単に書かれていますが、実は少し重要な事項で、何が対象にすべき問題なのかが、実はよく分かっていないことが多くあります。また、現象や事象を「問題」としていることも多くあります。例えば、「赤字になった。これは問題だ。」といった主張が聞かれます。確かに赤字になれば問題ではあるのですが、実は、赤字になったのは現象で、何かの経営問題、管理問題が原因で、まわりまわって、最終的に赤字になったと言えます。よく、人は、現れた現象を問題だと主張します。確かに問題的状況ではあるのですが、それを問題としていると、対処的な対応しかできなくなりますし、対処的な対応しかしないこともよく知られています。根本的な対処がされないので、再度、事象が顕在化したり、形を変えて、問題的な現象が顕在化します。これではいたちごっこになってしまいます。例えば、先の赤字になったという問題を、赤字になったのだからと、マーケティング費用や製品開発費などの経費を含め、経費削減によって赤字を解消しようとしたらどうなるでしょうか。多分、売上が落ち込み、回復不能になってしまうでしょう。本当の問題は、赤字にあるのではなく、潜在顧客をうまく発掘できなかったとか、顧客が求めている商品を開発できなかったといったことにあり、その問題の結果が潜在化したのが赤字という現象というように、問題は赤字ではなく、赤字を生み出した原因や構造と考えられます。もっとも、SD で分析してみるまでは、こういった、本当の問題は赤字ではなく、マーケティングや製品であるということが予めには分かっていなかったということもよくあることなので、あまり神経質になる必要はありません。

これは、私のうがった見方かも知れませんが、SD でモデルを構築するに際し、その目的や使い道、完成度の程度などを決めておく、あるいは覚悟しておいた方がいいと思います。このために、関係者分析が有効です。関係者分析を行い、関係者の関係や、言い出しそうなこと、本音と思われることなどを探っていく中で、SD モデルを構築するとか、コンサルを雇用した目的が何となく浮かび上がってきます。この辺のことが分からないと、ただ、ただ、詳細なモデルを作る、モデルを詳細化するという方向にプレッシャーを受け、相手の言うまま、モデルが詳細になり、大きくなります。取り上げている問題も、あれもこれもとなってしまいがちです。

この段階の作業として、よく、問題を簡単に定義したもの（まとめ）を作成することをお勧めします。この問題定義で、どういった問題が発生していて、どういった問題的状況を発生させているかを述べます。例えば、「水道施設が老朽化し、十分な量の水が配れなく、給水制限を行わざるを得ない。また水質についても基準を十分に満たしていない。」といった風に、対象とする予定の問題をまとめます。

この問題定義は後で変わっても構いませんし、分析してみた結果、本当の問題は別のところにあることが分かることは良くあることです。この例の、「水道施設が老朽化し、十分な量の水が配れなく、給水制限を行わざるを得ない。また水質についても基準を十分に満たしていない。」といった問題定義は、実は、「財務に問題があり、水道料金の水準が低く、さらに、中央政府からの財務支援も十分ではなく、施設の修理費や更新費が捻出できない」ことが問題というように変わることもあります。

・取り上げる問題は何かを明確にする
・問題に関係する関係者やその思惑を分析する（関係者分析）
・SD での分析結果を利用する相手を明確にする
・SD で行う分析の程度（詳細度、精密性等）を決める

といった作業をこの段階で行ってから、次の仮説設定の作業に入るのがいいでしょう。

(2) 仮説

対象とすべき問題を明確化できたら、システムはなぜ、そのような問題的現象を顕在化させるのかという仮説を打ち立てることが最初のステップになります。ここでは、因果関係図やストックとフローで記述された SD リファレンス・モデルが、その仮説になります。リファレンス・モデルと言っているのは、まだ十分詳細化されていない概念モデルや、等式が入って数式で定義されていない SD モデルのことです。

因果関係図や SD リファレンス・モデルは、人によって違ってきますし、違っても構いません。このことは、前にメンタル・モデルとして説明しました。対象を見る目、理解する理解の仕方、理解したものが人によって違ってくるので、因果関係図や SD リファレンス・モデルも人によって違ってきます。違いがあるので、コミュニケーションによってなぜ違うのか、どこが違うのかを理解し、相互理解が深まり、相互理解の深まりの上に問題に対するソリューションが生まれます。

この仮説は、以下のような手順で構築していきます。

ステップ 1：問題定義文に述べられている、あるいは関連するキーワードを抽出してみる。例えば、問題定義で問題とされているのが、製造業の赤字であるのであれば、単価、売上、従業員数、生産品質、在庫、受注残、競合相手の製品価格、といったキーワードが出てくる。

ステップ 2：抽出されたキーワードを使って、第 3 章で述べた因果関係の手法を使って、因果関係で相手に対し、「＋」なのか「－」なのかを定義付けてみる。この際に、必要と思われれば、キーワードを新たに追加し、不要と思われるものを削除し、問題定義がよりキーワードの関連性によって明確になるように心がける。

ステップ 3：因果関係図が完成したら、フィードバック・ループになっている部分がないかチェックし、増強ループなのか均衡ループなのかを定義する。

この作業は、ブレーン・ストーミングとか、グループでの議論、あるいは関連資料を集め読み込む、あるいは関係者の経験を取り込むといったことで完成させていくことが有効です。昨年実施した、SD 入門セミナーで説明したものですが、実例を示してみます。

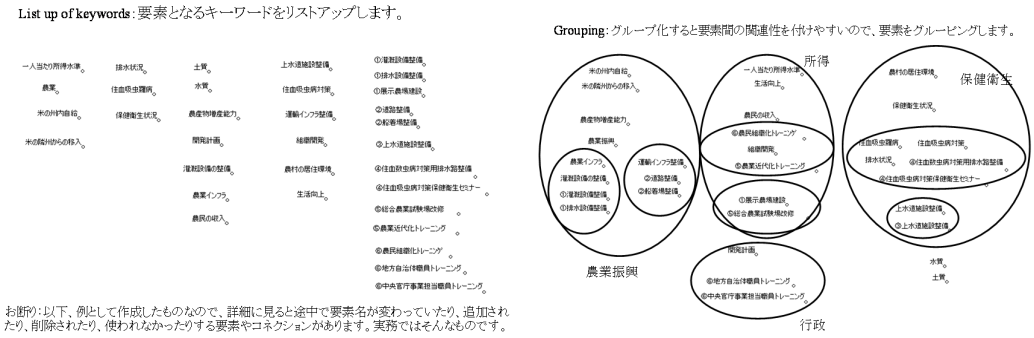


図 6-1：キーワードの抽出とグルーピング

これは、フィリピンでの農業基盤整備プロジェクトのために開発したモデルでの事例で、図 6-1 左に示したように、まずこのプロジェクトに関連するキーワードを挙げていきます。この時は、大判のポストイットにマーカーペンでキーワードを書きだし、壁に貼っていきましたが、最近は PC とプロジェクターを使って、PC に打鍵し、それをスクリーンに映し出し、参加者と議論しながら、この作業を進めています。

次に、図 6-1 右に示したように、抽出されたキーワードをグループ化します。ここでは、農業振興、保健衛生、所得、行政の 4 つのグループに分けています。

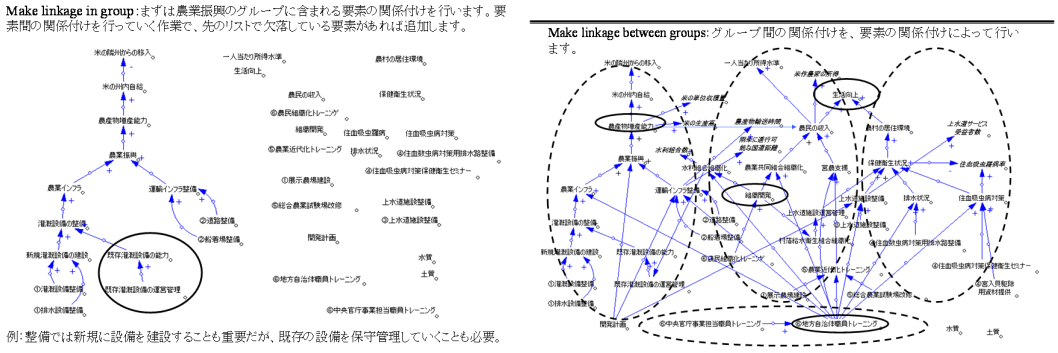


図 6-2：キーワードの関連付け

この作業が完成したら、図 6-2 左のように、グループの中で、キーワードを因果関係で結んでいきます。この際、正の関係であれば＋を、負の関係であれば－を、結んだ矢印の頭に付けておきます。

これが終わったら、図 6-2 右に示したように、グループの枠を超えて結びつくキーワードがないか探してみます。

こうして、全てのキーワードが結びついたら、図 6-3 左に示したように、フィードバック・ループになっている部分があるかどうかを探します。そして、そのフィードバック・ループは、増強ループなのか、均衡ループなのかを調べ、増強ループには R を、均衡ループには B を記載します。一番影響が大きそうなキーワードがあれば、そのキーワードはかなり高い確率で、フィードバック・ループを形成する要素になっていますし、そのフィードバック・ループは全体の中でかなり重要で強いフィードバック・ループになっているはずなので、そのようなキーワードを探し、そこを中心に、関係をトレースすると、フィードバック・ループが探しやすくなります。

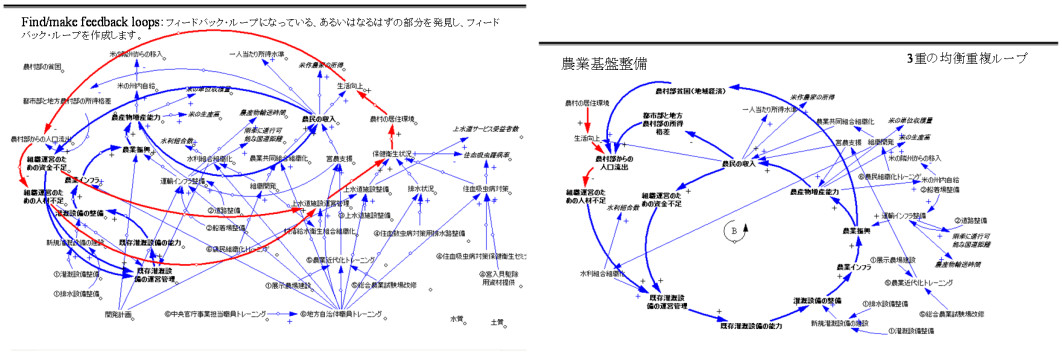


図 6-3：フィードバック・ループの発見と対象者に合わせた変形

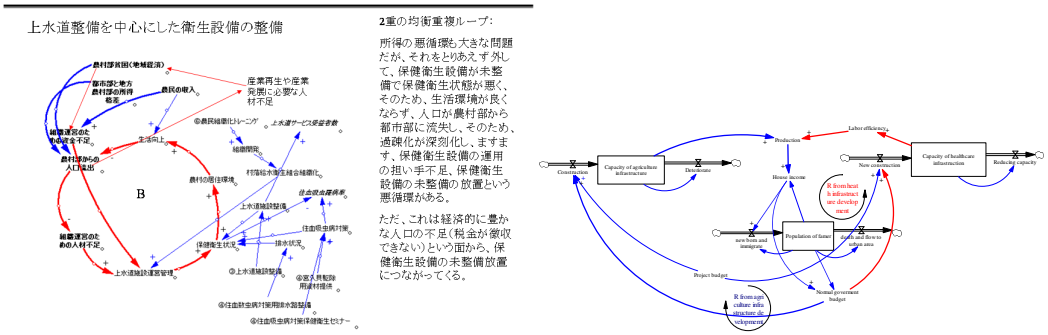


図 6-4：対象者に合わせた変形（左）とコンセプチュアル・モデル（右）

このプロジェクトでは、大きく 2 つの対象者グループがいました。農業基盤整備関係者と保健医療施設や住血吸虫病対策関係者です。この 2 つのグループは、関心対象が違っていたので、話題にする対象が違うことで議論が散漫することを防止するために、それぞれ用に図 6-3 左で完成させた定量モデルを変形し、図 6-3 右や図 6-4 左のようにしました。両者でモデルの性格が変わっているわけでも、内容が違っているわけでもなく、ただ、農業基盤整備関係者向けには、その関係のフィードバック・ループを全面に押し出し、保健衛生関係のフィードバック・ループを周囲や片隅に追いやったものを使っていますし、保健医療関係者向けには、保健医療に関するフィードバック・ループを全面に押し出し、農業インフラを周辺に押しやったものを使っています。

このモデルを使って、問題点の確認、問題が発生するメカニズム、そのソリューションについて議論を行いました。この結果完成したもの、つまり、ここに示した定性モデルがここで言う、対象のシステムに対する「仮説」と呼んでいるものです。

私自身は、仮説という言葉が誤解を招きかねないので、「定性モデル」というように呼んでいます。人によっては「ST モデル」、「因果関係図」などと呼んでいます。

さらに、定量モデルを構築するために、定量モデルの概念のような単純な定量モデルを作ることがあります。これをコンセプチュアル・モデル、概念モデルなどと呼んでいます。図 6-4 右に、そのコンセプチュアル・モデルを示しています。ここでは、農業基盤整備のストックを中心としたループと保健医療基盤整備のストックを中心にしたループの 2 つを、農民人口のストックを中心にしたループが結合したものが示されています。

テキストでは、先の定性モデルとこのコンセプチュアル・モデルまで含めたものを「仮説」と呼んでいます。

(3) 仮説検証

仮説ができたら、コンピューターを使って SD 定量モデルにしてみて、シミュレーションを行い、仮説が妥当かどうかを、コンピューターによって再現された振る舞いを見ることで検証します。このためには、要素間を数式で定義する必要があります。この数式で一貫性を持って定義するという行為で、メンタル・モデルが変わり、対象がどう動くのかという理解が深まります。

シミュレーションを実施する前に、モデルはどう動くのか、どのような振る舞いを見せるのかを考えます。もし、シミュレーションを実施し、モデルの振る舞いが、想定していたものと違っていれば、モデルに何か間違っている部分が存在するのか、あるいは、新しい発見があり、メンタル・モデル（理解）を変える必要があるのかのどちらかでしょう。

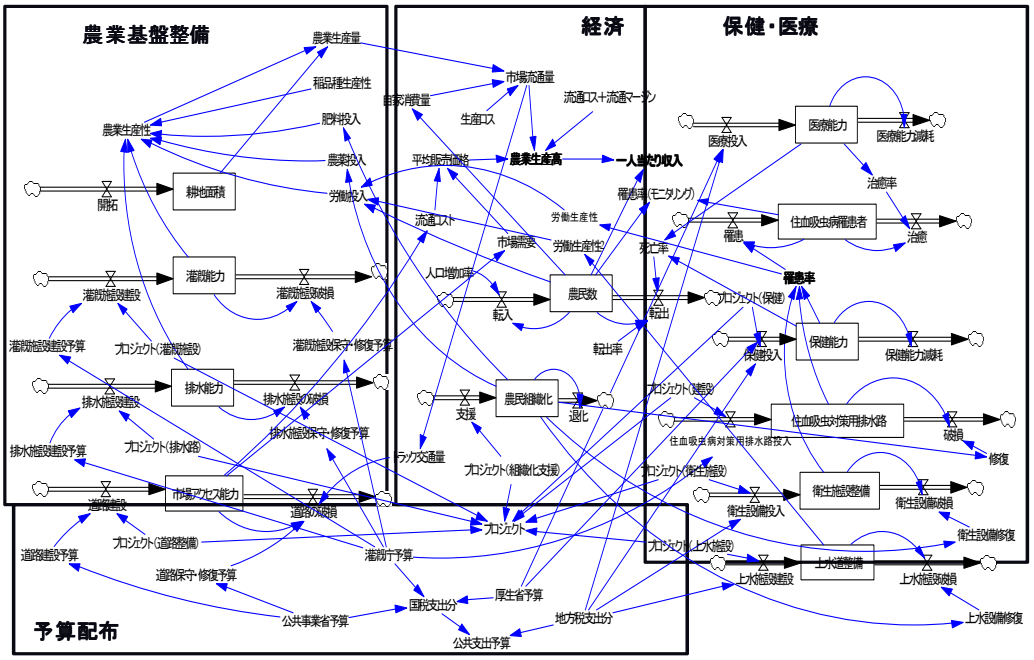


図 6-5：定量モデル

図 6-5 に、図 6-4 右のコンセプチュアル・モデルをベースに詳細化し、完成させた定量モデルを示しています。実は、図 6-5 のモデルは、図 6-4 右のコンセプチュアル・モデルの、農業基盤インフラのストック廻りを、耕地面積、灌漑能力、配水能力、市場アクセス能力の 4 つに分けることで詳細化し、保健医療インフラについても 6 つに、というようにコンセプチュアル・モデルをただ詳細化しただけです。

このような、シミュレーション可能な定量モデルを構築し、シミュレーションを行って、その結果から、対象を理解することが、ここで言っている「仮説検証」です。この例では、この定量モデルでシミュレーションし、プロジェクトで目標としている農民の一人当たりの所得向上、米の生産高の向上、住血吸虫病罹患率減少などを検証し、達成可能かどうかを見ています。

(4) 政策代替案の検討

モデルで、対象がどう動き、どういった振る舞いを示すのかが理解できたならば、次の段階として、政策などを変更することで、もっと長期的に理想的な状態にしていくにはどうすればいいかを検討することができます。そのためには、主要な意思決定（組織の重要

な意思決定、政策など)、指標（意思決定や政策などを変えた効果を評価するための指標)、不確定性（最も不確かな関連性や外部干渉など）を明確化し、いくつかの仮定に基づき、可能ないくつかの意思決定の組み合わせを考え、その組み合わせについて、シミュレーションを行い、結果を見ます。この、いくつかの意思決定の組み合わせをシナリオと呼んでいます。シミュレーションでは、短期的なシステムの振る舞いと長期的なシステムの振る舞いに注目します。

定量モデルを作成するに際し、政策パラメーターと呼ばれるものを組み込みます。先の例では、プロジェクト予算の配賦が、この政策パラメーターになります。このパラメーターは変更可能です。実は、このプロジェクトの評価では、プロジェクトの一環として整備を行った簡易水道の効果について議論になりました。そこで、プロジェクト予算の配賦で、灌漑整備などのインフラ整備予算を少し削って、水道整備の予算を増やした場合の効果をシミュレーションし、議論での当方の主張の裏付けに使っています。

通常、こういった政策パラメーターに対し、上、中、下、あるいは、取りうる最上、通常、最低の 3 種類程度の設定値を定め、政策パラメーターが複数ある場合は、その組み合わせをシナリオとして、シナリオについてシミュレーションを実施し、どのシナリオがいいのかを調べます。一番いいシナリオが、最上の意思決定の組み合わせとなります。

(5) 経営フライト・シミュレーター

モデル構築によって、モデル作成者は、対象の複雑なしくみや、条件設定による振る舞いの違いなどを理解できるが、そのモデルを作っていない人には必ずしも、モデル構築者が得られた知見は理解できないので、それを他人に理解させることが時として必要になります。つまり、モデルを使って行ったシミュレーション結果などをもとに、報告書を作成し、結果を報告するのですが、それだけではなく、経営者や他の人が、作られたモデルを使って、自分で、経験し、学習できるようにすることも必要となることがあります。例えば、報告書に記載された政策パラメーターの値の組み合わせとは違った組み合わせで、シミュレーションしてみたいとか、シミュレーション結果を自分で再確認してみたいといった希望はあるものです。このようなことができるようにしたものを経営フライト・シミュレーターと呼んでいます。

この、経営フライト・シミュレーターを使って、モデル化されたシステムを学習し、意思決定の短期や長期の効果の予測を改善することができます。また、経営フライト・シミュレーターでは、モデルでいろいろ条件設定を変えて動かすことができます。

経営フライト・シミュレーターには、通常、主に以下の 4 種類の情報が示されます：

・意思決定：概ね 4 から 6 個の意思決定ができるようにする。この意思決定は、スライダーやダイアル、入力ボックスなどを使い、モデルに値を与える。
・レポート：時間変化におけるシステムの状態の変化を示す。
・グラフ：シミュレーション中の時間変化による状態をグラフで示す。このグラフの形状も、重要な学習情報である。
・初期条件：通常、1 つや 2 つの不確定要素がシステムには含まれている。こういった不確定性を利用者に理解させることが重要であり、仮定した事項を、パラメーターとして、なるべく利用者に明確に示すことが重要。

テキストでは､MIT の組織学習センターの Daniel Kim と Don Seville によって開発された、製品開発フライト・シミュレーターを事例として紹介しています。この製品開発フライト・シミュレーターでは、ユーザーは次の 3 つの目的や要件を満たすように、いろいろ操作し、どうすれば成功するかを学習するようになっています：

－スケジュール通りに製品を開発する
－予め決められた予算内で製品を開発する
－品質の面で、市場で十分競争に打ち勝てる製品を開発する

この製品開発フライト・シュミレーは、2 つの業務に分かれています：
－PE（製品開発エンジニア）には 100 の工程があり、製品の設計、品質検査を行なう。
－PcE（プロセス・エンジニア）も 100 の工程があり、PE が設計した製品を製造する製造プロセスを設計し、製品の生産を行う。

製品開発エンジニアが、スケジュール通りに製品開発に成功すれば、プロセス・エンジニアに仕事が引き渡されます。プロセス・エンジニアがキーとなる仕事をスケジュール通りにこなし、製造開始まで持っていければ、市場競争に十分太刀打ちできる品質の製品投入を行えます。しかし、キーとなる仕事の完成度が低いと、製品の品質にひびきます。売上は、製品の品質とスケジュール通り製品を市場投入できるかにかかっています。

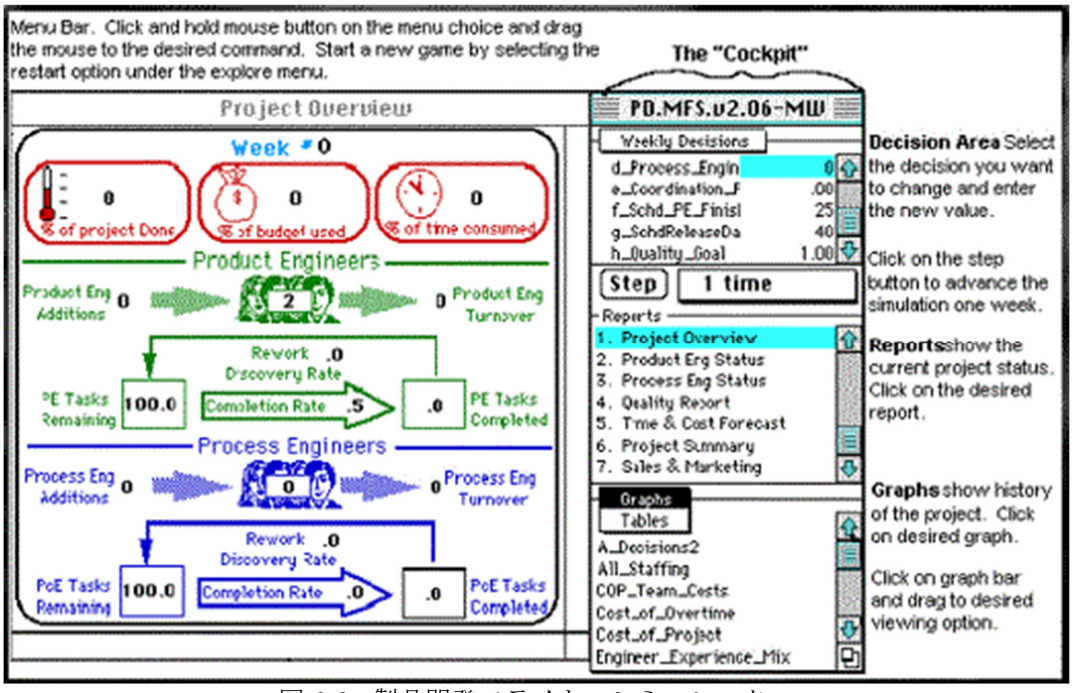


図 6-6：製品開発フライト・シミュレーター

この経営フライト・シミュレーターでは、ユーザーは、週でのエンジニアの雇用数と解雇数、その週の仕事毎の作業時間の割り当て、各チームの作業完成日、2 つのチームの調整時間の割り当て、製品の品質目標を決めます。この、時間や品質目標の割り当てによって、どのエンジニアがどこまで仕事を完成させ、その品質はどうか、そして、エンジニアの仕事からのストレスや疲労による消耗度はどれだけになるかが決まるようになっています。
この経営フライト・シミュレーターを使って、いろんな経営戦略を試してみることができます。経営戦略は、実際の経営の場でも、失敗するというリスクを冒しながら、試行錯誤的に学習されているのですが、経営フライト・シミュレーターを使うことで、実際のリスクを避けながら、経営戦略を試行錯誤的に学習することができます。

(6) Vensim PLE による経営フライト・シミュレーターの作成

Vensim PLE の上位機種では、もちろん、そういったことはないのですが、Vensim PLE では残念ながら、経営フライト・シミュレーターを作成する機能は限定的です。ただ、この章で使った象のモデルを使って、Vensim PLE で経営フライト・シミュレーターを作成して

みましょう。
　参考までに、象のモデルの等式は、以下のようになります。

(01)FINAL TIME　= 30
　　Units: Year
　　The final time for the simulation.
(02)INITIAL TIME　= 0
　　Units: Year
　　The initial time for the simulation.
(03)SAVEPER　= TIME STEP
　　Units: Year [0,?]
　　The frequency with which output is stored.
(04)TIME STEP　= 0.125
　　Units: Year [0,?]
　　The time step for the simulation.
(05)ハンター1 人当たりの狩猟数=間引き率*ハンターが狩猟できる頭数
　　Units: 頭
(06)ハンターが狩猟できる頭数=1
　　Units: 頭
(07)ハンターとして勤務する平均期間=1
　　Units: Year
(08)ハンターの数= INTEG (雇用されるハンターの数-辞めるハンターの数,8)
　　Units: 人
(09)ハンターの雇用期間=2
　　Units: Year
(10)狩猟期間=1
　　Units: Year
(11)狩猟能力と狩猟される象の頭数とのギャップ=象の頭数-環境収容力
　　Units: 頭
(12)理想と考えているハンターの数=MAX(0,(象の生育数+(狩猟能力と狩猟される象の頭数とのギャップ/狩猟期間))/ハンター1 人当たりの狩猟数)
　　Units: 人
(13)環境収容力=200-STEP(0,5)
　　Units: 頭
(14)繁殖率=0.04+STEP(0.02,5)
　　Units: Dmnl
(15)象の生息率=　象の頭数/環境収容力
　　Units: Dmnl
(16)象の生育数=　象の頭数*繁殖率
　　Units: 頭
(17)象の頭数= INTEG (象の生育数-間引きされる象の頭数,200)
　　Units: 頭
(18)辞めるハンターの数=ハンターの数/ハンターとして勤務する平均期間
　　Units: 人
(19)間引きされる象の頭数=ハンターの数*ハンター1 人当たりの狩猟数
　　Units: 頭
(20) 間引き率　= WITH LOOKUP (象の生息率,([(0,0)-(2,1)],(0,0),(0.1,0.04),(0.2,0.13),(0.3,0.32),(0.4,0.64),(0.5,0.82),(0.6,0.93),(0.7,0.99),(0.8,1),(0.9,1),(1,1),(2,1)))
　　Units: 頭
(21)雇用されるハンターの数=((理想と考えているハンターの数-ハンターの数)/ハンターの

雇用期間)+辞めるハンターの数 Units: 人

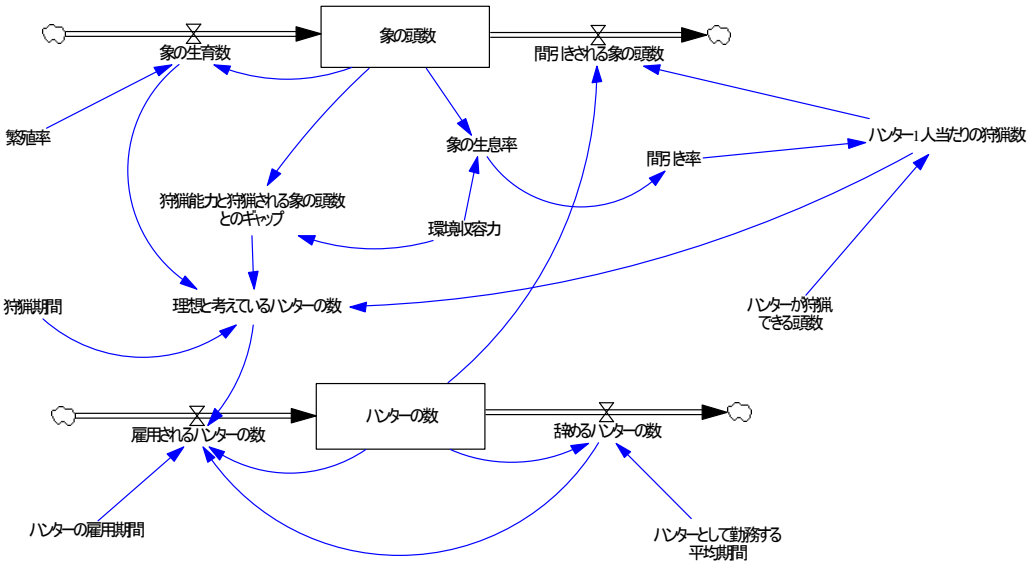


図 6-7：演習用象のモデル

Vensim PLE で経営フライト・シミュレーター的なものを実現させるのは、2 つの方法があります。

・Sim モードで行う

・入出力オブジェクトを使って作り込む

1) Sim モード

これが一番簡単なやり方で、特に経営フライト・シミュレーターとしてわざわざグラフ画面や操作画面を作り込まなくともいいという特徴がありますが、出力グラフが小さすぎて見づらいという欠点があります。

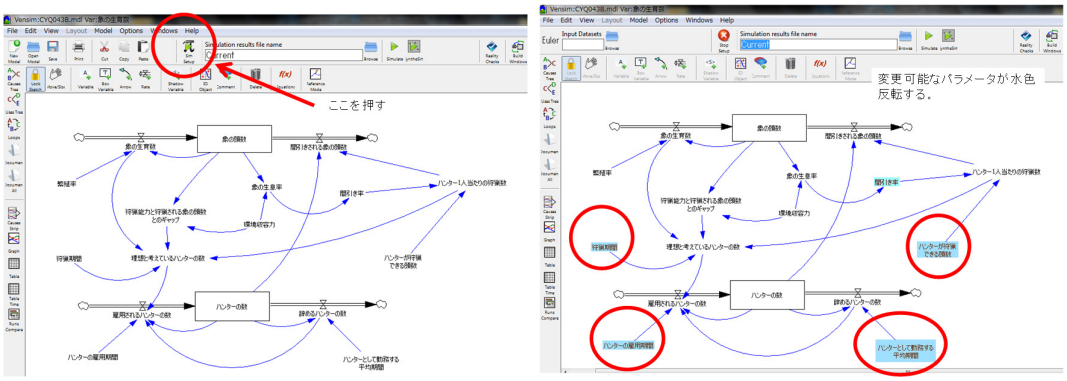


図 6-8：リアルタイム・シミュレーション

モデルを呼び出し、図 6-8 左のように、メイン・ツール・バーの Sum Setup ボタンを押します。すると、図 6-8 右に示したように、政策パラメーターが水色に反転します。

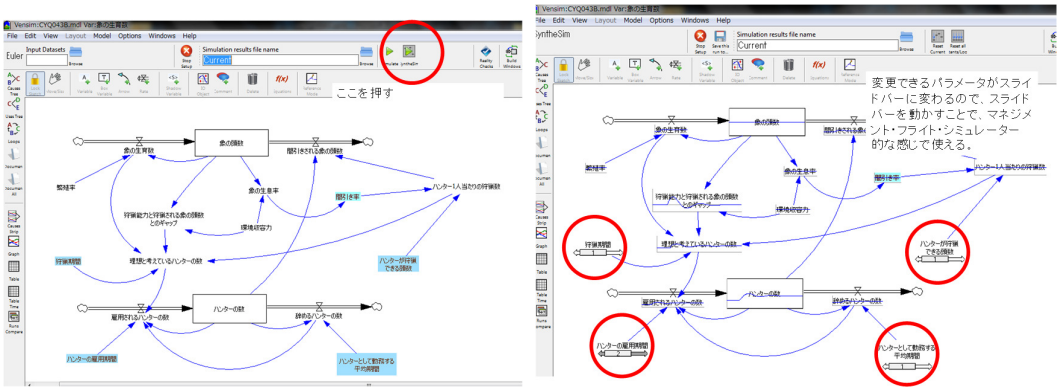


図 6-9：リアルタイム・シミュレーション

次に、図 6-9 左のように、やはりメイン・ツール・バーの SyntheSim を押します。すると、図 6-9 右にしめしたように、変更可能な政策パラメーターが入力スライダーに変わります。このスライダーを動かすことで、シミュレーション結果が、それぞれのストックやフロー、変数の上に表示されます。

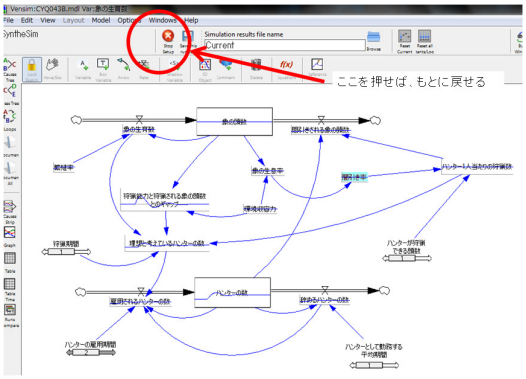


図 6-10：リアルタイム・シミュレーション

この Sim モードをストップし、画面を元にもどしたい場合は、図 6-10 に示したように、メイン・ツール・バー上の Stop ボタンを押すことで停止できます。

2) 入出力オブジェクトを使う

シミュレーターとして、グラフなどの表示部とスライダーの入力部を作り込む必要がありますが、先のものよりはもっと本格的な経営フライト・シミュレーターが作成できます。また、ツールバーのシミュレーション結果保存ファイルの名前を変えて、標準値を保存し、保存した結果と、リアルタイムでの変化を比較することもできます。

ここでは、

－シミュレーション結果のグラフ表示
－ある要素の因果関係、ループ、ドキュメントを示す
－入力コントロールバーを表示し、変更可能にする

ことができます。

モデル表示とは別の、経営フライト・シミュレーター専用の画面を作ることにします。そのためには、図 6-11 左に示したように、画面下のステイタスバーの View のボタンを押し、新しい画面を作成します。最初から経営フライト・シミュレーターを作成する意図がある

場合は、モデルは View2 などに作成し、View1 を経営フライト・シミュレーター用にすることをお勧めします。

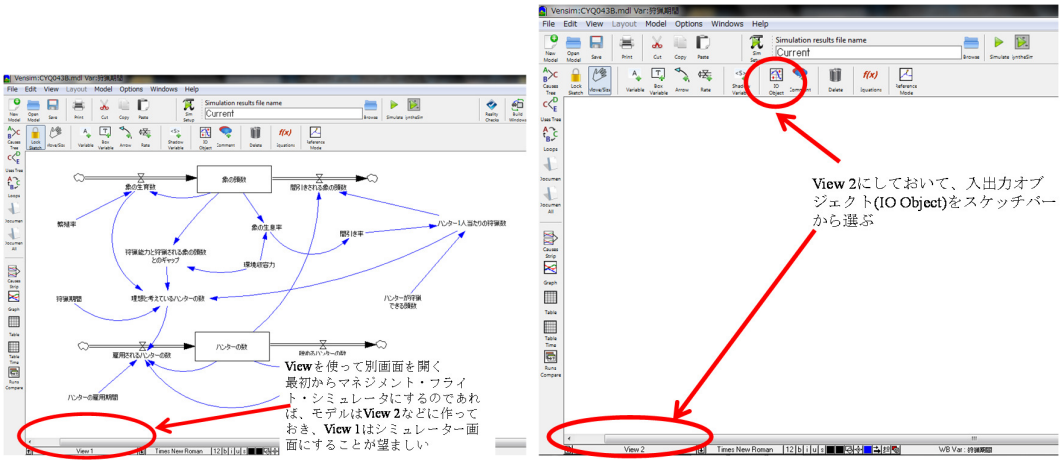


図 6-11：経営フライト・シミュレーター作成-1

次に、図 6-11 右に示したように、スケッチ・ツールバーにある、入出力オブジェを選びます。ポインターをワークベンチに移動すると、入出力オブジェのアイコンが表示されますので、クリックすることで、図 6-12 左に示したような入出力オブジェ定義画面を開くことができます。

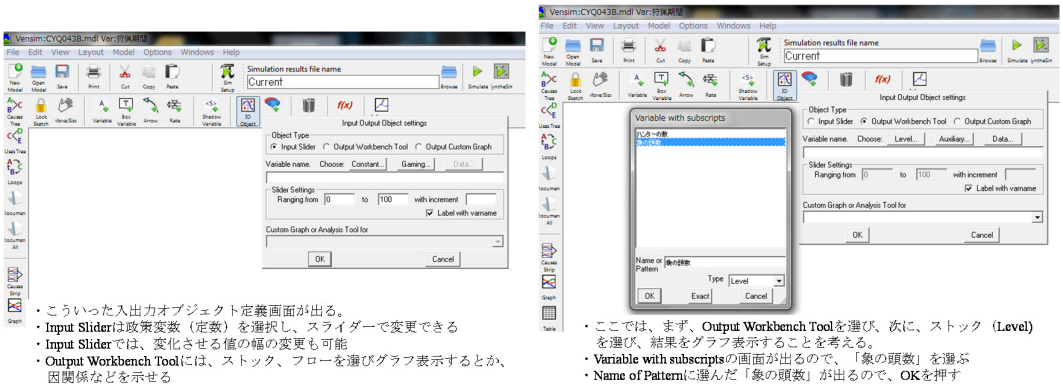


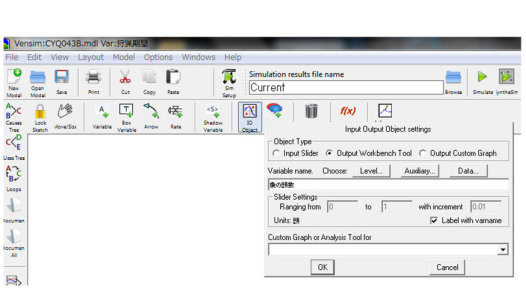
図 6-12：経営フライト・シミュレーター作成-2

まず、いくつかのパラメーターを出力させることを考えてみましょう。入出力オブジェ定義画面で Output Workbench Tool を選択します。すると、中央にある変数名選択に際し、選択するパラメーターの種類として、Level（ストック）なのか変数なのかを選ぶような画面に変わります。ここでは、ストック(Level)を選んでみます。すると、図 6-12 右に示したような、選べるストック変数の一覧が表示されます。ここでは、象の頭数を選択しています。

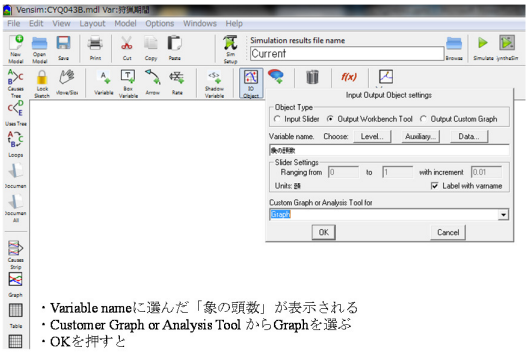
ストック変数である象の頭数を選ぶと、ストック変数の一覧画面が消え、図 6-13 左に示したように、入出力オブジェ定義画面の変数名の欄に、選ばれた、象の頭数が記載されます。

次に、この選んだ象の頭数というストックのシミュレーション結果をどう表示するかを決めます。図 6-13 右に示したように、入出力オブジェ定義画面の下にある、Custom Graph or Analysis Tool for の欄で、グラフを選びます。ちなみに、ここでは、分析ツールバーにある

入力側の因果関係図、出力側の因果関係図、フィードバック、グラフ、定義した等式などを選ぶこともできます。

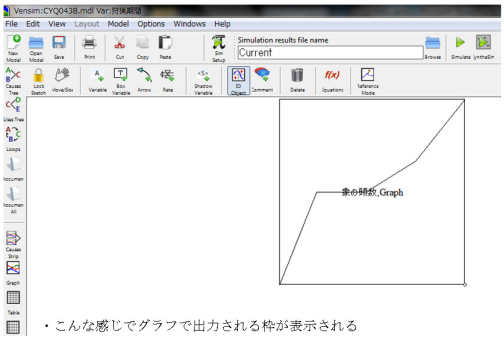


・Variable nameに選んだ「象の頭数」が表示される
・Customer Graph or Analysis Tool からGraphを選ぶ

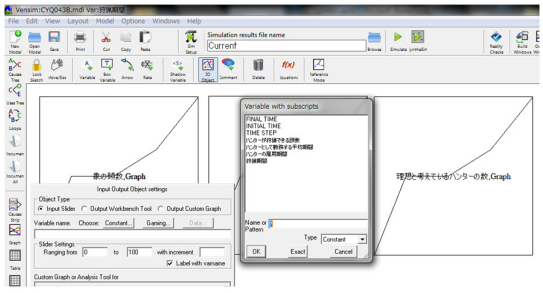


・Variable nameに選んだ「象の頭数」が表示される
・Customer Graph or Analysis Tool からGraphを選ぶ
・OKを押すと

図 6-13：経営フライト・シミュレーター作成-3



・こんな感じでグラフで出力される枠が表示される

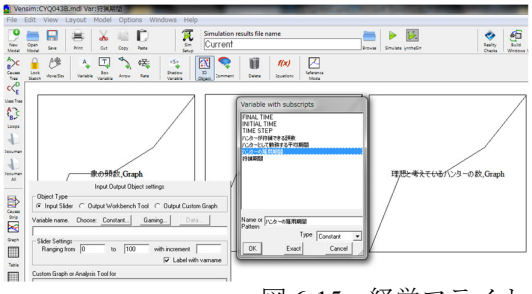


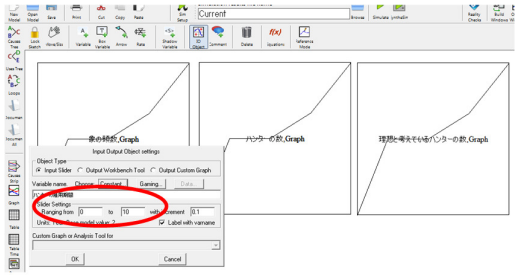
・Input Sliderから定数（Constant)を選び、「ハンターの雇用期間」を選ぶ

図 6-14：経営フライト・シミュレーター作成-4

グラフ表示を選択すると、図 6-14 左に示したように、象の頭数を表示させるための枠が、ワークベンチに形成されます。

フローや変数も同じように選び、グラフ表示させることができます。やはり、入出力オブジェ定義画面から Output Workbench Tool を選択し、今度は、中央にある変数名選択ボックスで、変数を選択することで、変数についてのグラフ表示ができます。





・ここで、範囲を変更することも可能

図 6-15：経営フライト・シミュレーター作成-5

ユーザーが自由に値を変えられるように、入力も指定してみましょう。図 3-14 右のように、入出力オブジェ定義画面から Input Slider を選択し、図 6-15 左のように、選択可能な政策パラメーターを表示させ、その中から表示させたいものを選びます。ここでは、ハンターの雇用期間を選択しています。政策パラメーターを選択すると、図 6-15 右に示したよう

に、入出力オブジェ定義画面に戻ります。この画面で、スライダーが取りうる値の範囲を変更することが可能です。定義が終わると、図 3-16 左に示したように、ワークベンチ上に入力用スライダーが表示されます。

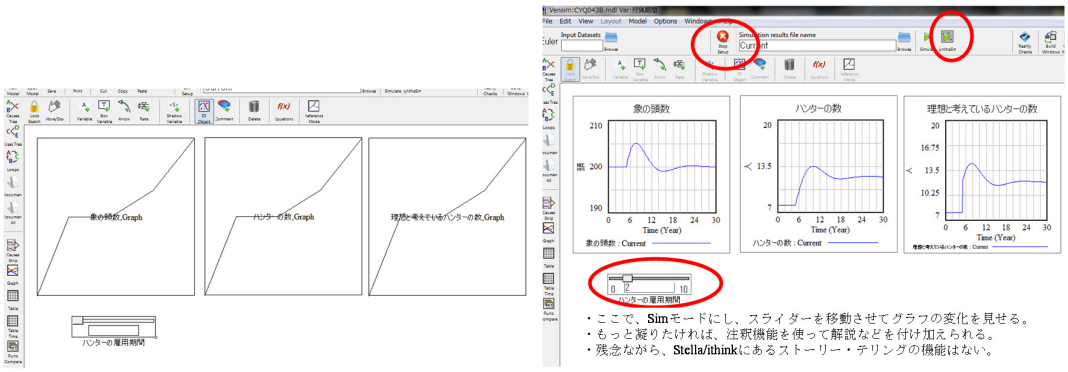


図 6-16：経営フライト・シミュレーター作成-6

すでにシミュレーションを実施していれば、スケッチ・ツールバーで、一番左端にあるロック・モードを押すことでグラフ表示がされると思います。このままでは、ロックがかかっていますので、変更できません。そこで、メイン・ツール・バーから Sim Setup を選び、次にメイン・ツール・バーの SyntheSim を押し、自由に変更可能にします。すでに、シミュレーションを前に実行していれば、シミュレーション結果保存ファイルを上書きするかどうかのワーニングが出ます。いずれにしろ、ワークベンチ上の入力用スライド・バーを動かすことで、リアルタイムでグラフを表示させることができます。

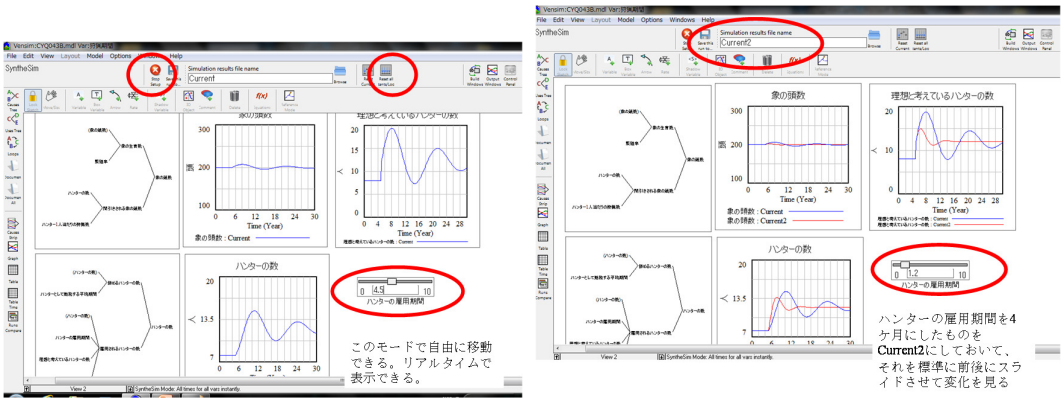


図 6-17：経営フライト・シミュレーター作成-7

メイン・ツール・バーにあるシミュレーション結果を保存するファイル名指定の画面で、違うファイル名で一旦、ワークベンチ上の入力用スライド・バーを動かす前、あるいは、標準にしたい値にしたものを保存します。すると、保存したものが赤線で表示され、現在入力用スライド・バーでシミュレーションしている青線の結果と併せてグラフ表示できます。こうして、例えば標準値での結果と比べてどうなのかといった比較を示すことができます。

(7) この章のまとめ

SD を使えば、仮想実験で確かめながら最適な政策代替案を選べること、モデルを使って対象としているシステムのメカニズムを理解できること、その理解によって意思決定の能

力を培うことができることを以て、SD の利点、あるいは SD 利用の意義と考えています。しかし、そのモデルを作っていない人には必ずしも、モデル構築者が得られた知見は理解できないので、それを他人に理解させることが時として必要になります。このようなことができるよう、最後には、経営フライト・シミュレーターにすることが望まれます。

7. モデルを改善していく方法

ここでは、コンセプチュアルな段階から、実務的なモデルにまでどんどん改善し、経営フライト・シミュレーターにまで完成させる方法を説明しています。

(1) エネルギー・モデル

すでに、テキストでは第 1 章、この入門セミナーでは第 1 回目に、米国における SD エネルギー・モデル開発の歴史を説明しました。その際に、米国の SD エネルギー・モデルは、メドーズの生徒であった Roger Naill が開発したものをベースにしているということを説明しました。この Roger Naill の米国の天然ガス・モデルを使って、どのようにモデルを深化させていくのかを説明します。

それまでは、図 7-1 に示したように、米国の石油及び天然ガスの埋蔵量は膨大で、無尽蔵と考えてよく、100 年や 200 年で取りつくすことはないという、今から見れば間違った考え方が石油関係者に蔓延していました。これに対し、M. King Hubbert は、探査と採掘の関係で、潜在的な埋蔵量は仮に膨大であっても、実際に採掘されることになると、制約を受けるので、採掘量という点からは、無尽蔵とは言えないという、石油及び天然ガスのライフサイクル説を唱えました。Roger Naill は、この考え方を取り入れ、石油及び天然ガスのシステムを調べ、埋蔵量は無尽蔵ではなく、有限であるという仮定を行いました。Hubbert の理論によれば、天然ガスの埋蔵が確認され、その埋蔵量が分かり、採掘される量が増えると、採掘ピークが必ず訪れ、それが過ぎると採掘量が減り、しかし、採掘が続く限り、推定埋蔵量も少しずつ減るというものでした。そこで、最初にリファレンス・モデルを作成し、分かっている実際の探査率、消費率（採掘率）、確定埋蔵量、採掘量対確定埋蔵量比を使うというやり方を採択しました。Herburt の理論では、天然ガスのライフサイクルは概ね 1900 年から 2050 年までで、これに対し、実データは、1975 年から 1995 年までしかありませんでした。とは言っても、実データは、 Hubbert の理論をリファレンス・モデルにし、補正するには有効でした。こうして、米国の石油及び天然ガスの埋蔵量と採掘に関する SD モデルを構築し、モデルを使って分析し、米国の石油及び天然ガスは、採掘できる量という観点からは限界があることを証明しました。

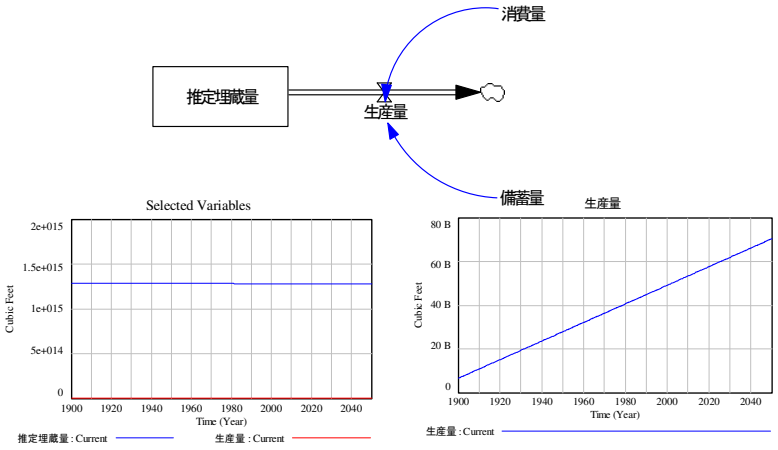


図 7-1：間違って考えられていたエネルギー・モデル

(2) 最初のモデル

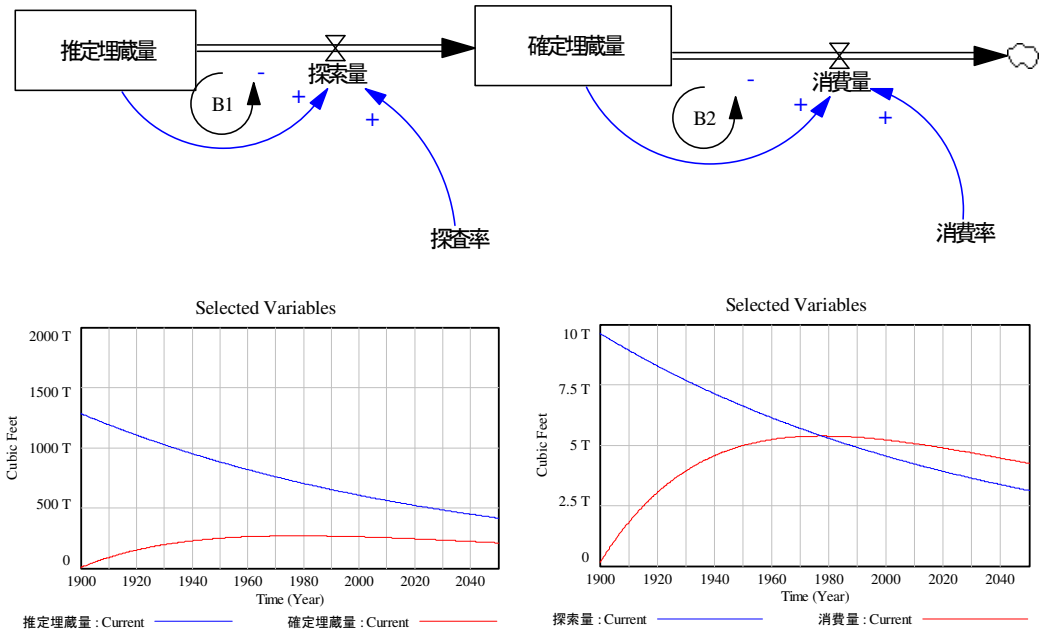


図 7-2：最初のモデル

用語のせいで、SD モデルがシステムの問題を解決するというように誤解されかねなのですが、SD がやっているのは、問題をモデル化しているのであって、システムをモデル化しているわけではありません。システムをモデル化しようとすると、全ての要素を何もかもモデルに取り込んでしまおうとしがちで、そうなると、SD モデルはあまりにも複雑になりすぎ、肝心のシステムが理解できなくなるからです。そこで、SD では、最初にリファレンス・モデルの構築から始めます。このリファレンス・モデルは、コンセプチュアル・モデル、概念モデルなどと呼ばれることもあります。リファレンス・モデルは、モデルの主要要素だけで構成します。SD リファレンス・モデルは、対象の振る舞いを再現するための説明に必要な要素のみをモデルに取り込みますので、モデルは、非常に簡略な構造のものとなります。逆に、対象の振る舞いを再現するための説明に必要かつ重要な要素は全て含んでいる必要があります。とは言っても、必要最低限の要素が取り込まれていれば、その要素の取り扱いはあまり厳密である必要はりませんし、この段階では、合成変数を無理に分解する必要もありません。概念やアイデア、あるいは全体の構造を示すことが主目的なので、場合によれば、概念だけで、シミュレーションできなくともいいし、シミュレーション結果が大ざっぱな傾向だけでもかまいません。あまりこの段階で正確性に拘る必要はありません。

この簡略化されたモデルを元に、問題にしているもの、あるいは、よく分かっていない部分が時間経過でどう振る舞うか、指数的に増加するのか減少するのか、振動するのか収斂するのか、S 型に変化するのかといったといったことを調べます。また、ここでは、シミュレーションするに際しての、時間単位（年、期、月、週、日など）、期間（モデルのシミュレーション開始時と終了時）なども決めます。

図 7-2 に、最初のモデルとそのシミュレーション結果を示しました。推定埋蔵量には入力フローがないことに気がつくと思います。天然ガスは常に創生されてはいますが、地質学的時間単位で創生されるので、100 年や 200 年では創生されないと考えます。従って、推定埋蔵量は増えないと考えています。このモデルでは、ストックの推定埋蔵量とフローの探

査量、同じく、ストックの確定埋蔵量とフローの消費量の間は均衡ループになっていて、2つの均衡ループでモデルが構成されています。均衡ループなので、確定埋蔵量も推定埋蔵量も負になることはなく、また逆に負になったらおかしいことになります。この初期段階の単純なモデルでも、推定埋蔵量は、探査によって確定埋蔵量に移行するので減少し、確定埋蔵量は、20 世紀前半は増えていくが、1970 年代中期にピークに達し、その後減少していくことがシミュレーション結果から分かります（図 1-2 左のグラフ)。また、探査率が減少し、消費率（これは生産率と同じ）は 1900 年から 1970 年代までは増加していきますが、その後減少することもシミュレーション結果に示されています（図 7-2 右のグラフ)。

このモデルの等式は以下のようになっています。

```
(05)探査率=0.0075
Units: Dmnl
(06)探索量=推定埋蔵量*探査率
Units: Cubic Feet
(07)推定埋蔵量= INTEG (-探索量,1.28434e+015)
Units: Cubic Feet
(08)消費率=0.02
Units: Dmnl
(09)消費量=確定埋蔵量*消費率
Units: Cubic Feet
(10)確定埋蔵量= INTEG (探索量-消費量,6.4e+012)
Units: Cubic Feet
```

この非常に簡単な概念モデルでも、例え推定埋蔵量が膨大で、採掘してもほとんど減ることはない状態であっても、実際に採掘していくしくみの中で、無尽蔵に低価格で採掘できなく、採掘量の観点からはサチュレートし、それ以上には採掘量が増えないことを明確に示しています。このことが、システムで考えることと、システムで考えないこととの大きな違いを際立たせています。

(3) 2 番目のモデル

図 7-2 には 2 つの均衡ループがあるのですが、このうち、左側の均衡ループをもっと詳細化したものが 2 番目のモデルです。まだこの段階では、右側の均衡ループには手をつけていません。

推定埋蔵量のうち一部は、前年に、探査され、確定埋蔵量に移動しているので、探査対象は、この分が減った量になります（推定埋蔵残量)。残った分に対して探査費用がかけられるのですが、残った全部が探査されるのではなく、必要な量が確保されればいいとします。そして、これを率で考えます。最初は、探査すれば天然ガスがどんどん出てくるのですが、次第に、探査しても天然ガスがなかなか出てこないようになります。(推定埋蔵量中の探査量)。あるいは、探査対象の全てが採掘可能とは限らなく、対象のうち、ある比率で、天然ガスが実際に採掘可能と分かる（探査率）というように考えていると思って下さい。そして、この段階で、探査量（採掘可能量）が判明し、この部分が、確定埋蔵量に移行し、推定埋蔵量が減少します。この論理構造を、図 7-3 に定性モデルとして示しています。均衡ループなので、推定埋蔵量はどんどん減少しますが、ゼロになったらこの均衡ループは停止します。

このモデルでは、探査率で採掘可能な量（探査量）が決まるのですが、採掘可能と分かっても、実際に採掘するかどうかの意思決定までに遅延があります。

また、モデルは、全ての変数を内製にはしていなく、残された推定埋蔵量と最初の推定

埋蔵量の比と 1900 年から 2050 年までの、天然ガス探査費用を、モデルに外からデータを与えるようなやり方で規定していますので、外製になっています。このような外製のやり方が SD では可能で、この一つのやり方として、ここではテーブル関数を使って、データをモデルに与えています。

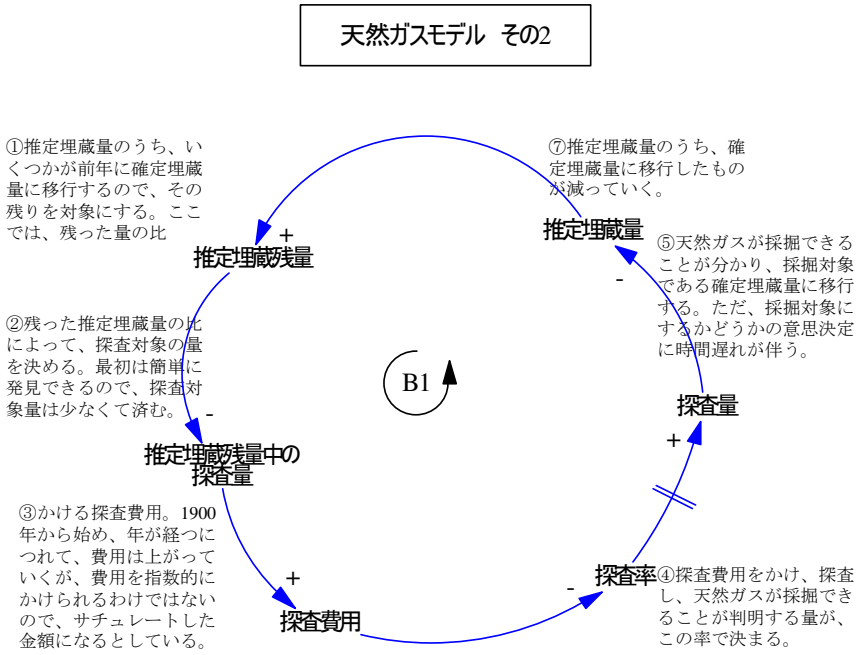


図 7-3：2 番目のモデル（定性モデル）

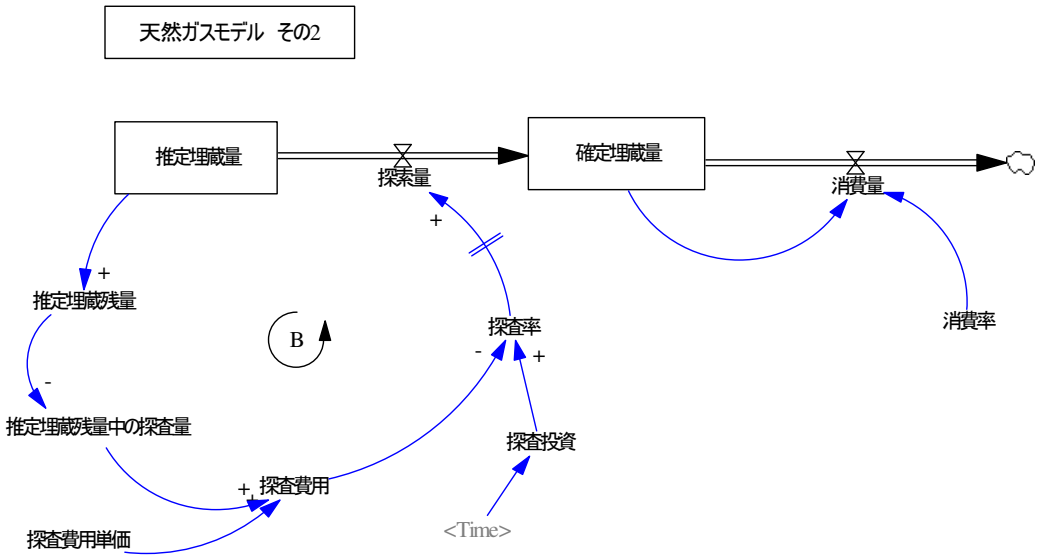


図 7-4：2 番目のモデル（定量モデル）

つまり、概念モデルでは、一定の比率で、推定埋蔵量のうちの一部が、確定埋蔵量に移行するとしていましたが、ここをもっと厳密にするために、テーブル関数を使って規定し

ています。残された推定埋蔵量と最初の推定埋蔵量の比で、比が小さいうち（あまり天然資源に手をつけていないよりどりみどりの状態）は、探査対象も少なくて済むが、比が大きくなる（開発が進んだ状態）につれ、探査対象を大きくしていく必要があります。ここをテーブル関数で規定しました。（図 7-5 左）X 軸は、推定埋蔵量中の探査量（探査対象）で、これは、残された推定埋蔵量と最初の推定埋蔵量の比ですが、ここは、対数表示です。Y 軸は、探査対象量で、テーブル関数は、この値を返します。

1900 年から 2050 年までの、天然ガス探査費用も、やはりテーブル関数で指定しています。掛けられる探査費もだんだん頭打ちになり、いつまでも指数的に探査費用を増やせないとしているので、費用がサチュレートするようにしています。（図 7-5 右）X 軸は年で Y 軸は、探査費用で、この値を返します。ここを成長曲線としています。

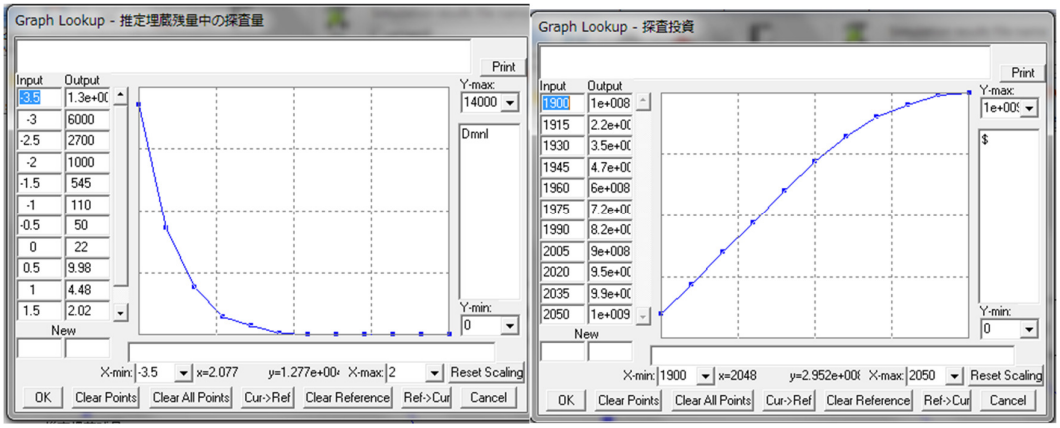


図 7-5 : 残された推定埋蔵量と最初の推定埋蔵量の比（左）と、1900 年から 2050 年までの、天然ガス探査費用（右）

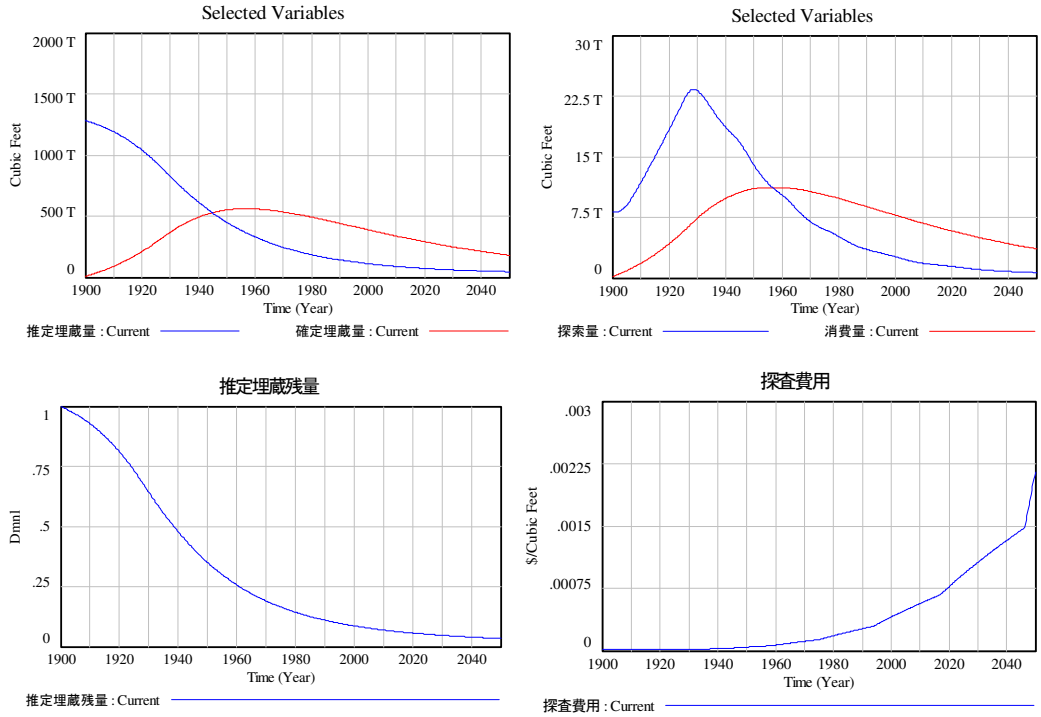
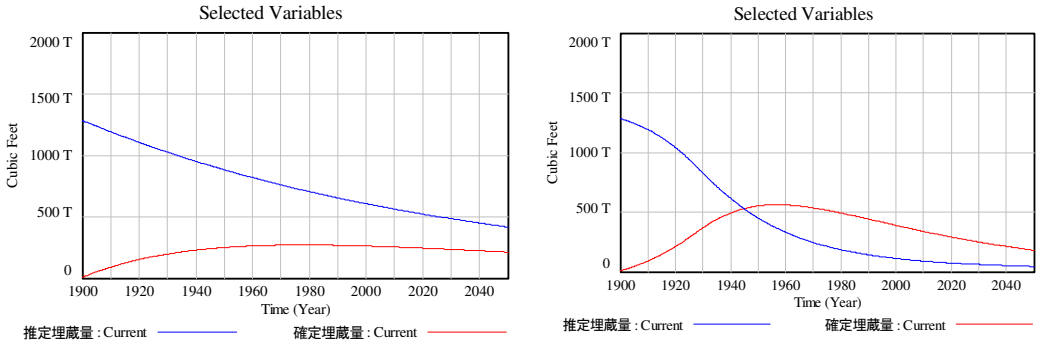


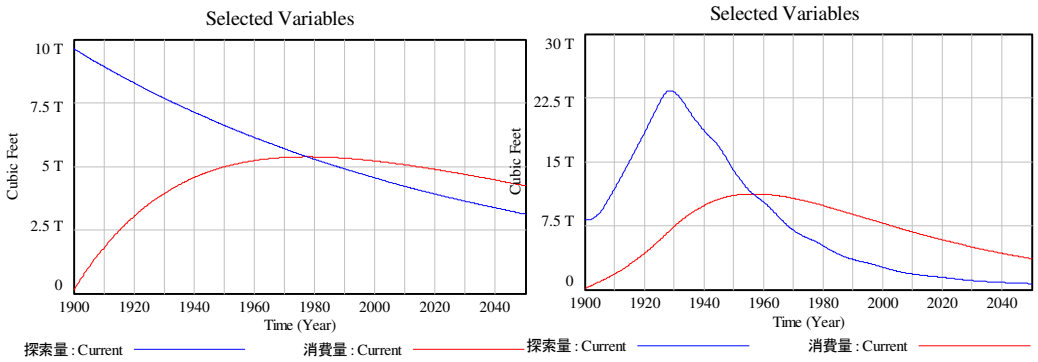
図 7-6 : 2 番目のモデルのシミュレーション結果



最初のモデルのシミュレーション結果　　2番目のモデルのシミュレーション結果

図 7-7：最初のモデルと 2 番目のモデルのシミュレーション結果の比較

図 7-7 に、推定埋蔵量、確定埋蔵量の最初のモデルと 2 番目のモデルのシミュレーション結果の比較を示しています。2 番目のモデルでのシミュレーション結果の方が、変化がより際立っていますが、変化のパターンとしては、大きな違いはないこと、推定埋蔵量は、最初のモデルのものでは、直線に近い形で減少しているが、これが 2 番目のものは、収斂型で減少していこと、確定埋蔵量も、最初のモデルのものでは、成長曲線型で収斂し、変化はフラットであるが、2 番目のものは、釣鐘型になっていることが分かると思います。



最初のモデルのシミュレーション結果　　2番目のモデルのシミュレーション結果

図 7-8：最初のモデルと 2 番目のモデルのシミュレーション結果の比較

図 7-8 に、探査量、消費量の最初のモデルと 2 番目のモデルのシミュレーション結果の比較を示しています。2 番目のモデルでのシミュレーション結果の方では、探査量に大きな変化のパターンの違いが見られます。探査量は、最初のモデルのものでは、直線に近い形で減少しているが、これが釣鐘状で減少するように変化しています。これはテーブル関数による影響を受けて、こう形が変わったものです。消費量は、最初のモデルのものでは、成長曲線型で収斂し、変化はフラットですが、2 番目のものは、釣鐘型になっています。

2 番目のモデルの等式は以下の通りです。

```
(05)探査投資  = WITH LOOKUP (Time,([(1900,0)-(2050,1e+009)],(1900,1e+008),
        (1915,2.2e+008),(1930,3.5e+008),(1945,4.7e+008),(1960,6e+008),(1975,7.2e+008),(1990
        ,8.2e+008),(2005,9e+008),(2020,9.5e+008),(2035,9.9e+008),(2050,1e+009)))
        Units: $
(06)探査率=探査投資/探査費用
```

Units: Cubic Feet
(07)探査費用=探査費用単価*推定埋蔵残量中の探査量
Units: $/Cubic Feet
(08)探査費用単価=1.34775e-005
Units: $/Cubic Feet
(09)探索量=DELAY3(探査率, 4.5)
Units: Cubic Feet
(10)推定埋蔵残量=推定埋蔵量/1.28434e+015
Units: Dmnl
(11)推定埋蔵残量中の探査量 = WITH LOOKUP (LN(10*推定埋蔵残量),([(-3.5,0)-(2,14000)],
(-3.5,13000),(-3,6000),(-2.5,2700),(-2,1000),(-1.5,545),(-1,110),(-0.5,50),(0,22),(0.5,9.98),
(1,4.48),(1.5,2.02),(2,0.91)))
Units: Dmnl
(12)推定埋蔵量= INTEG (-探索量,1.28434e+015)
Units: Cubic Feet
(13)消費率=0.02
Units: Dmnl
(14)消費量=確定埋蔵量*消費率
Units: Cubic Feet
(15)確定埋蔵量= INTEG (探索量-消費量,6.4e+012)
Units: Cubic Feet

式(05)と(11)が複雑な式になっていますが、これがテーブル関数で表したものです。式(11)には LN で示す対数関数が使われています。

(4) 3 番目のモデル

2 番目のモデルに 4 つの改良点を加えています。まず、さらに均衡ループ(B2)と増強ループ(R1)を加え、消費側に、テーブル関数を使って、天然ガスの需要を外部からデータを与えるようにしています。また、天然ガスの販売価格が上昇するようにし、これも、テーブル関数を使って、外部からデータを与えるようにしています。

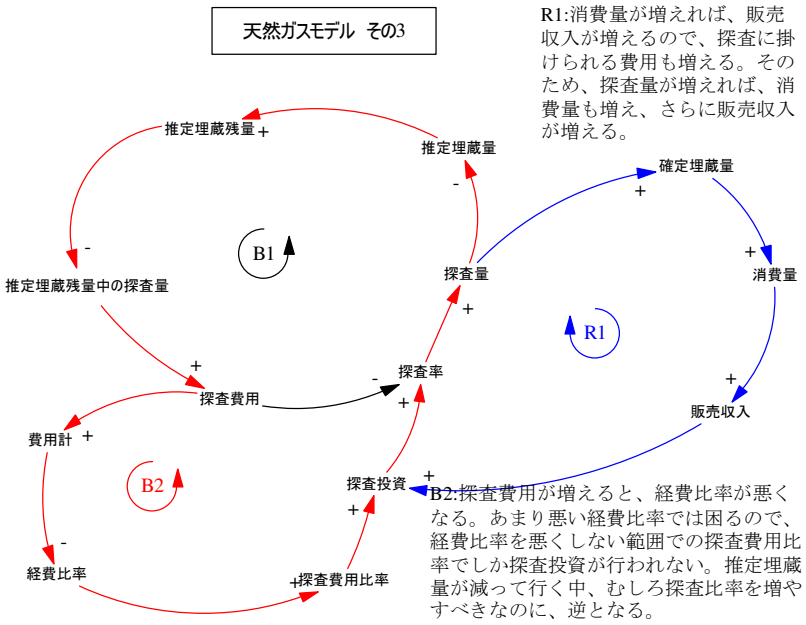


図 7-9：3 番目のモデル（定性モデル）

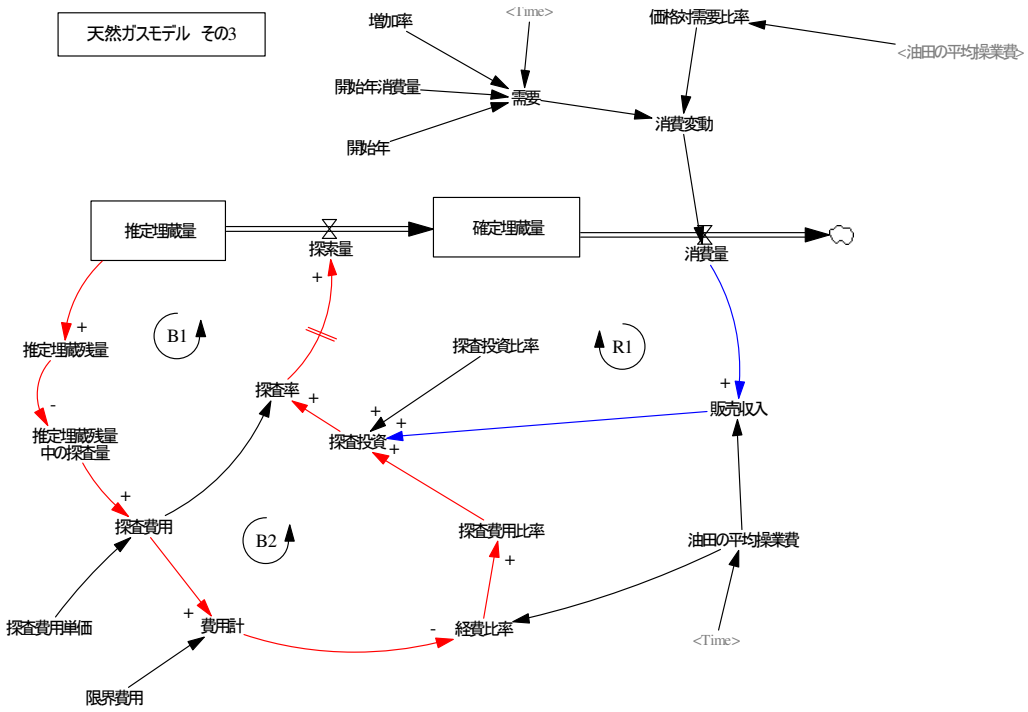


図 7-10：3 番目のモデル（定量モデル）

2 番目のモデルの均衡ループをもっと詳細化し、B1、B2 にし、手を付けていなかった右側のループを詳細化しています。ただ、最初のモデルで右側にあった均衡ループにはまだ手をつけていません。

R1 の増強ループは、:消費量が増えれば、販売収入が増えるので、探査に掛けられる費用も増え、そのため、探査量が増えれば、消費量も増え、さらに販売収入が増えるというループを示しています。

B2 の均衡ループは、探査費用が増えると、経費比率が悪くなり、あまり悪い経費比率では困るので、経費比率を悪くしない範囲での探査費用比率でしか探査投資が行われなく、このため、推定埋蔵量が減って行く中、むしろ探査比率を増やすべきなのに、逆となるというループを示しています。

3 番目のモデルの等式は以下の通りです。

(05)価格対需要比率 = WITH LOOKUP (LN(油田の平均操業費
*100000),([(1,0)-(10,2.1)],(1,2.1),(1.5,1.59),(2,1.21),(2.5,0.9),(3,0.69),(3.5,0.5),(4,0.24),(4.5,0.14),(5,0.067),(5.5,0.031),(6,0),(10,0)))
Units: Dmnl
(06)増加率=0.0463497
Units: Dmnl
(07)探査投資=販売収入*探査投資比率*探査費用比率
Units: $
(08)探査投資比率=0.2
Units: Dmnl
(09)探査率=探査投資/探査費用
Units: Cubic Feet
(10)探査費用=探査費用単価*推定埋蔵残量中の探査量

Units: $/Cubic Feet
(11)探査費用単価=1.34775e-005
Units: $/Cubic Feet
(12)探査費用比率 = WITH LOOKUP (経費比
率,([(0,0)-(50,2)],(0,0.08),(0.2,0.25),(0.4,0.44),(0.6,0.55),(0.8,0.67),(1,0.76),(1.2,0.82),(1.4
,0.88),(1.6,0.92),(1.8,0.96),(2,1),(3,1.1),(5,1.15),(10,1.2),(20,1.3),(50,1.4)))
Units: Dmnl
(13)探索量=DELAY3(探査率, 4.5)
Units: Cubic Feet
(14)推定埋蔵残量=推定埋蔵量/1.28434e+015
Units: Dmnl
(15)推定埋蔵残量中の探査量 = WITH LOOKUP (LN(10*推定埋蔵残
量),([(-3.5,0)-(5,14000)],(-3.5,13000),(-3,6000),(-2.5,2700),(-2,1000),(-1.5,545),(-1,110),(
-0.5,50),(0,22),(0.5,9.98),(1,4.48),(1.5,2.02),(2,0.91),(5,0.05)))
Units: Dmnl
(16)推定埋蔵量= INTEG (-探索量,1.28434e+015)
Units: Cubic Feet
(17)油田の平均操業費 = WITH LOOKUP
(Time,([(1900,0)-(2050,0.014)],(1900,8e-005),(1901,8.25e-005),(1902,0.000162),(1903,0.
000335),(1904,0.000431),(1905,0.000458),(1906,0.000461),(1907,0.000455),(1908,0.000
446),(1909,0.000436),(1910,0.000425),(1911,0.000412),(1912,0.000399),(1913,0.000383)
,(1914,0.000366),(1915,0.000346),(1916,0.000323),(1917,0.000297),(1918,0.00027),(191
9,0.000245),(1920,0.000226),(1921,0.000214),(1922,0.000208),(1923,0.000207),(1924,0.
000209),(1925,0.000211),(1926,0.000213),(1926,0.000213),(1927,0.000213),(1928,0.000
213),(1929,0.000212),(1930,0.000209),(1931,0.000205),(1932,0.000201),(1933,0.000196)
,(1934,0.000196),(1935,0.000186),(1936,0.000182),(1937,0.000179),(1938,0.000178),(19
39,0.000179),(1940,0.000181),(1941,0.000185),(1942,0.00019),(1943,0.000196),(1944,0.
000202),(1945,0.000207),(1946,0.000212),(1947,0.000216),(1948,0.000219),(1949,0.000
221),(1950,0.000223),(1951,0.000224),(1952,0.000225),(1953,0.000226),(1954,0.000226)
,(1955,0.000228),(1956,0.00023),(1957,0.000233),(1958,0.000237),(1959,0.000243),(196
0,0.00025),(1961,0.000259),(1962,0.00027),(1963,0.000281),(1964,0.000294),(1965,0.00
0307),(1966,0.000321),(1967,0.000334),(1968,0.000348),(1969,0.000362),(1970,0.00037
5),(1971,0.000387),(1972,0.000399),(1973,0.00041),(1974,0.000422),(1975,0.000434),(1
976,0.000447),(1977,0.000463),(1978,0.00048),(1979,0.000499),(1980,0.000521),(1981,0
.000545),(1982,0.000569),(1982,0.000569),(1983,0.000593),(1984,0.000619),(1985,0.000
646),(1986,0.000677),(1987,0.000714),(1988,0.00076),(1989,0.000815),(1990,0.000881),
(1991,0.000952),(1992,0.001027),(1993,0.001103),(1994,0.001177),(1995,0.001246),(199
6,0.00131),(1997,0.001369),(1998,0.001423),(1999,0.001476),(2000,0.001592),(2001,0.0
01585),(2002,0.001649),(2003,0.001723),(2004,0.001815),(2005,0.001931),(2006,0.0020
74),(2007,0.002241),(2008,0.00242),(2009,0.002594),(2010,0.002757),(2011,0.002909),(
2012,0.003051),(2013,0.003186),(2014,0.003319),(2015,0.003455),(2016,0.003597),(201
7,0.003751),(2018,0.003918),(2019,0.004101),(2020,0.0043),(2021,0.004519),(2022,0.00
4761),(2023,0.00503),(2024,0.005327),(2025,0.005646),(2026,0.005974),(2027,0.006295)
,(2028,0.006593),(2029,0.006867),(2030,0.007122),(2031,0.007365),(2032,0.007602),(20
33,0.007842),(2034,0.008093),(2035,0.008367),(2036,0.008673),(2037,0.009018),(2038,0
.009406),(2039,0.009828),(2040,0.010258),(2041,0.010669),(2042,0.011039),(2043,0.011
362),(2044,0.011652),(2045,0.011916),(2046,0.012156),(2047,0.012375),(2048,0.012582)
,(2049,0.01279),(2050,0.013028)))
Units: $/Cubic Feet
(18)消費変動=需要*価格対需要比率
Units: Cubic Feet
(19)消費量=消費変動

Units: Cubic Feet
(20)確定埋蔵量= INTEG (探索量-消費量,6.4e+012)
Units: Cubic Feet
(21)経費比率=油田の平均操業費/費用計
Units: Dmnl
(22)販売収入=消費量*油田の平均操業費
Units: $
(23)費用計=探査費用*限界費用
Units: $/Cubic Feet
(24)開始年=1900
Units: Year
(25)開始年消費量=1.06331e+012
Units: **undefined**
(26)限界費用=0.967118
Units: Dmnl
(27)需要=開始年消費量*EXP(増加率*(Time-開始年))

式(17)は油田操業費をテーブル関数で示しているのですが、費用が指数的に増加するのではなく、サチュレートするように指定しています。また、式(27)で、需要の伸びの計算に指数関数を使っています。

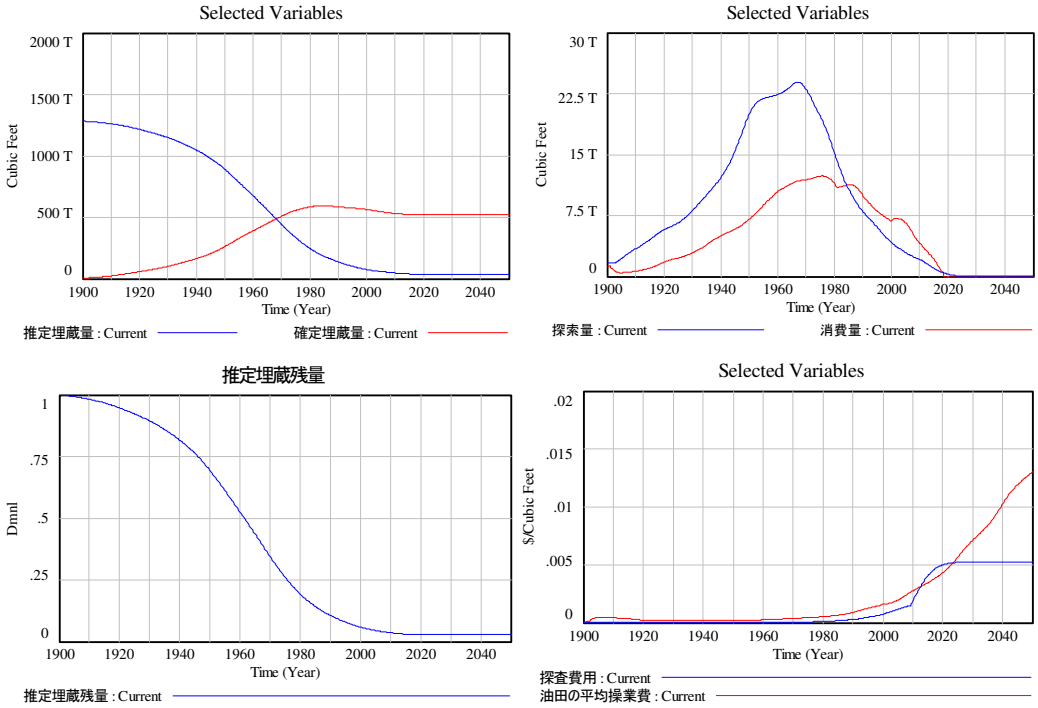
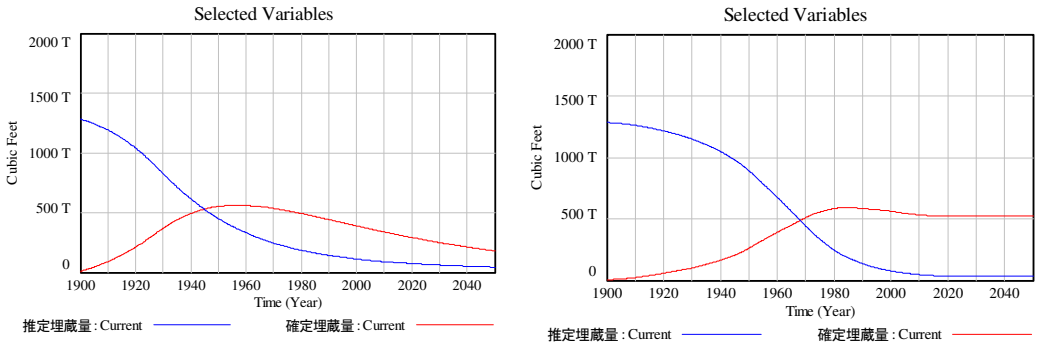


図 7-11：3 番目のモデルのシミュレーション結果

図 7-12 に 2 番目のモデルと 3 番目のモデルのシミュレーション結果の比較を示しています。基本的には、2 番目のものと、3 番目のものでは、振る舞いは変わりませんが、ピークが少し後にづれています。確定埋蔵量が、3 番目のものでは、2010 年以降、フラットになってしまっていますが、これは、2 番目のものの方が妥当で、ゼロに向かって下降していくと考えられるので、この部分のモデルのさらなる修正が必要となります。



2番目のモデルのシミュレーション結果　　3番目のモデルのシミュレーション結果

図 7-12：2 番目のモデルと 3 番目のモデルのシミュレーション結果の比較

(5) 4 番目のモデル

3 番目のモデルに、均衡ループと増加ループを加えています。増強ループ(R2)では、確定埋蔵量が増えると生産量を増やすことができ、生産量が増えると、消費量も増えるというループです。均衡ループ(B3)は、消費量が増えると、確定埋蔵量と消費量の比を一定にしようとして、確定埋蔵量を増やすために、探査費用をかけるというループです。ただ、B1 の均衡ループ、探査費用は伸びても、推定埋蔵量が減り、その探査効率が悪くなるので、探査される天然ガスの量が減少し、このことは、時間遅れで、確定埋蔵量があまり増加しないという結果を引き起こす均衡ループと接して、こちらに合体してしまいます。

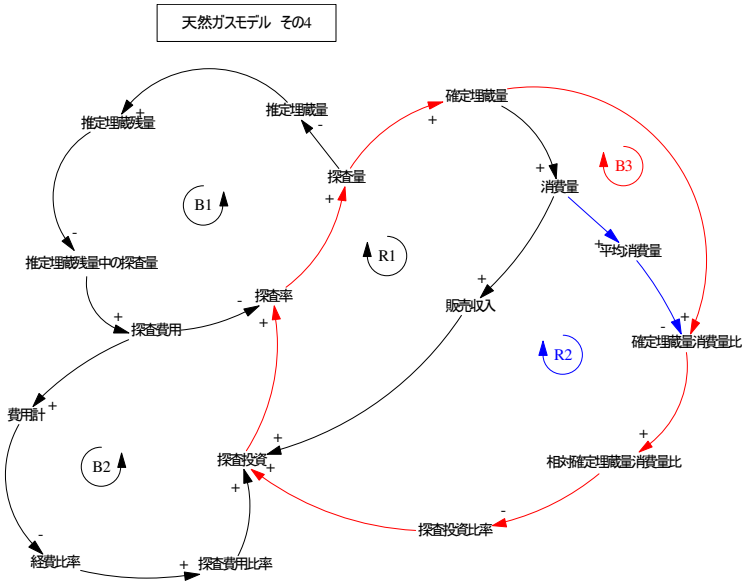


図 7-13：4 番目のモデル（定性モデル）

図 7-15 にシミュレーション結果が示されていますが、このモデルでは、確定埋蔵量対消費比率を見ていて、もし、確定埋蔵量が減少し、理想的な確定埋蔵量対消費比率を下回ったならば、探査投資比率を上げて、探査量を増やそうとします。しかし、もし、理想的な確定埋蔵量対消費比率を上回ったならば、探査費用を落とします。問題は、遅延が入っているので、この調整とその結果が遅れ、その結果波動的な振舞となります。この変動を修正しようとするシステムの性格から、波動的な変動が引き起こされる様子から、モデルの変動の振舞はうまく説明できていると考えられますが、変化は実際には、平滑しているは

ずです。

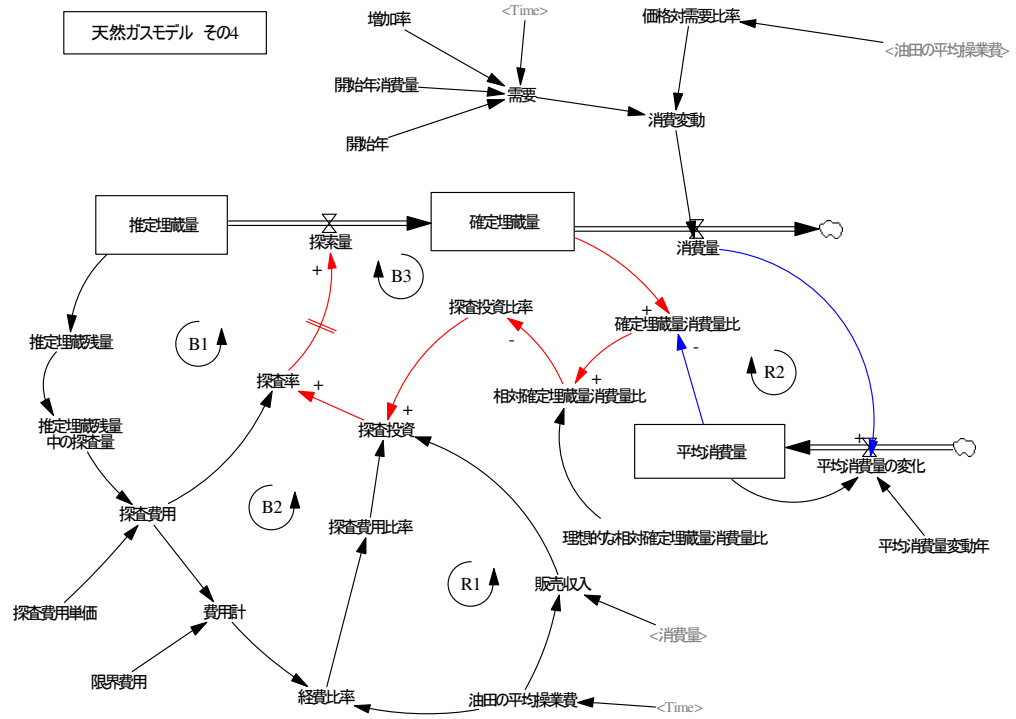


図 7-14：4 番目のモデル（定量モデル）

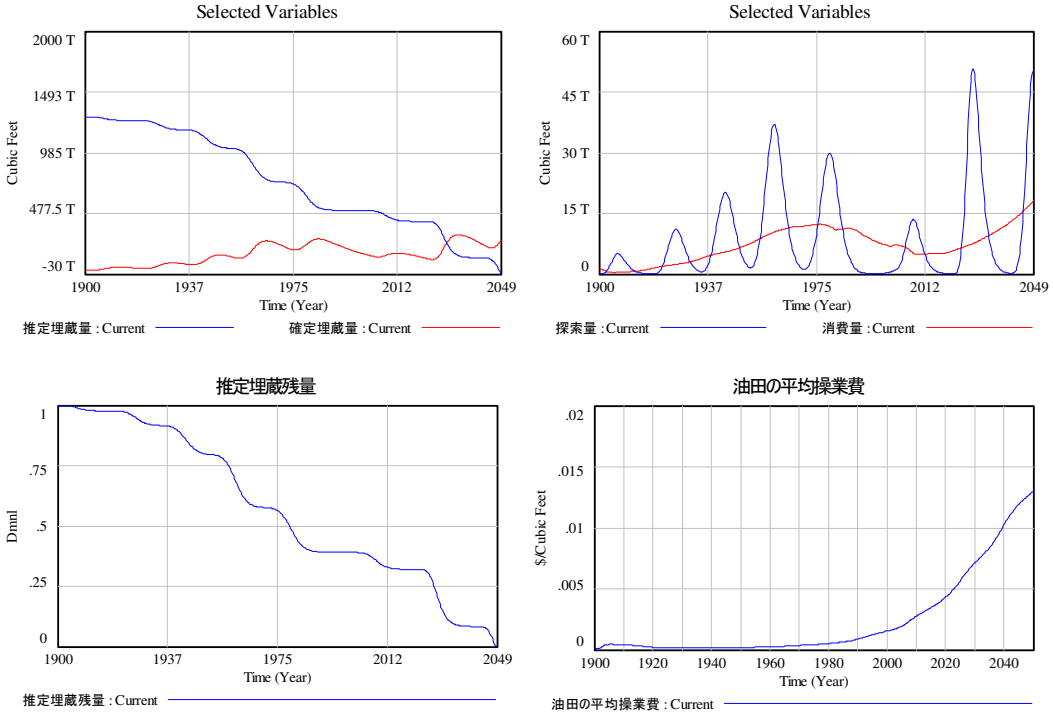


図 7-15：4 番目のモデルのシミュレーション結果

(6) 5 番目のモデル

5 番目のモデルでは、2 つの均衡ループと 2 つの増加ループを加えています。増強ループですが、R3 で示した増強ループでは、天然ガスの売価が上昇することで売上が増えるループになっています。しかし、R3 は、先の均衡ループ B1 に繋がっていて、R3 で、売上（消費に見合う）ように、探査量を増やそうとしても、探査効率が下がるので、新規に確定する埋蔵量は、増やそうと思う量に比例しては増えていきません。

同じく R4 の増強ループで、売上が上がるので、探査投資費用が増えるようになります。しかし、これも、先の均衡ループ B1 に繋がっていて、このことで、探査費用を増やしても、探査効率が悪くなっていくので、新規に確定する埋蔵量は増えません。この構造は、成長の限界の構造で、ネイルは、メドーズが見出した成長の限界の構造のことを意識していたのかも知れません。

均衡ループ B4 は、確定埋蔵量対消費量比率を理想的な状態に留めようとする均衡ループです。そのため、確定埋蔵量対消費量比率が変わると、変化が価格に反映するようになり、消費が多くなり、比が下がると価格が上がってしまいます。もう一つの均衡ループ B5 は、確定埋蔵量対消費量比率を理想的な状態に留めようとするもので、そのため、探査費用をかけて探査量を増やし、確定埋蔵量を増やそうとします。

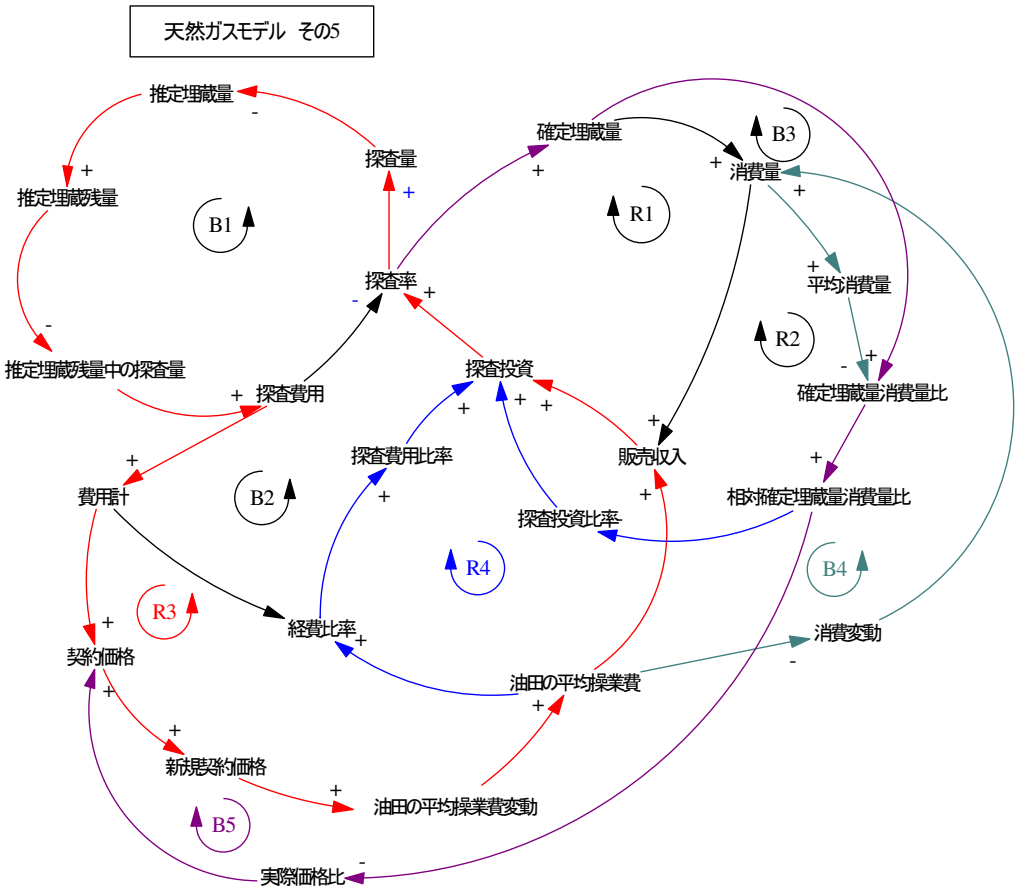


図 7-16：5 番目のモデル（定性モデル）

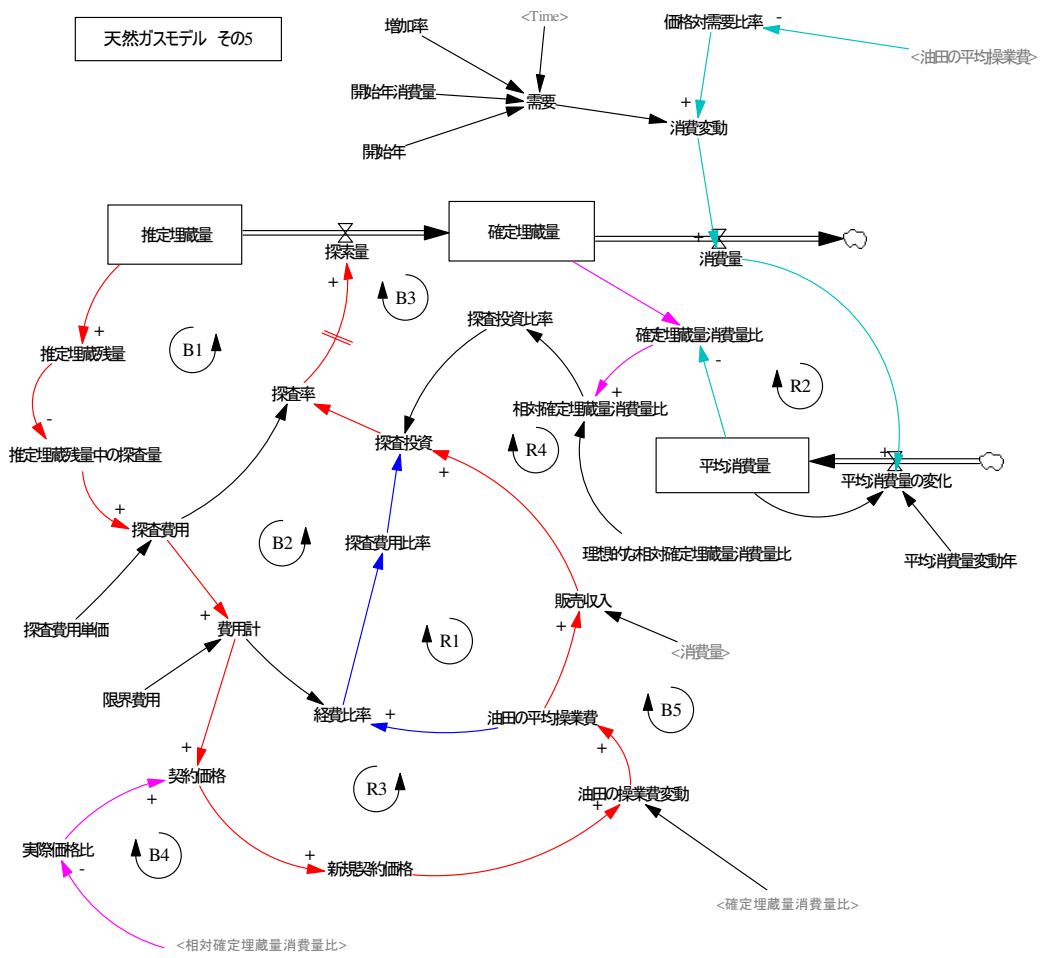


図 7-17：5 番目のモデル（定量モデル）

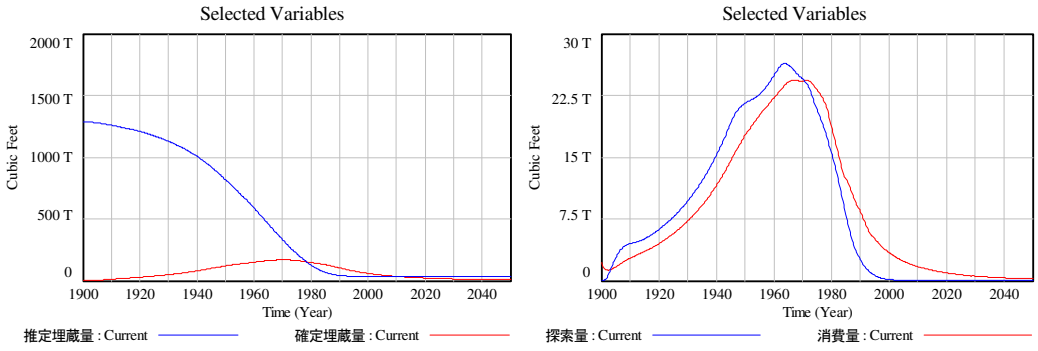


図 7-18：5 番目のモデルのシミュレーション結果

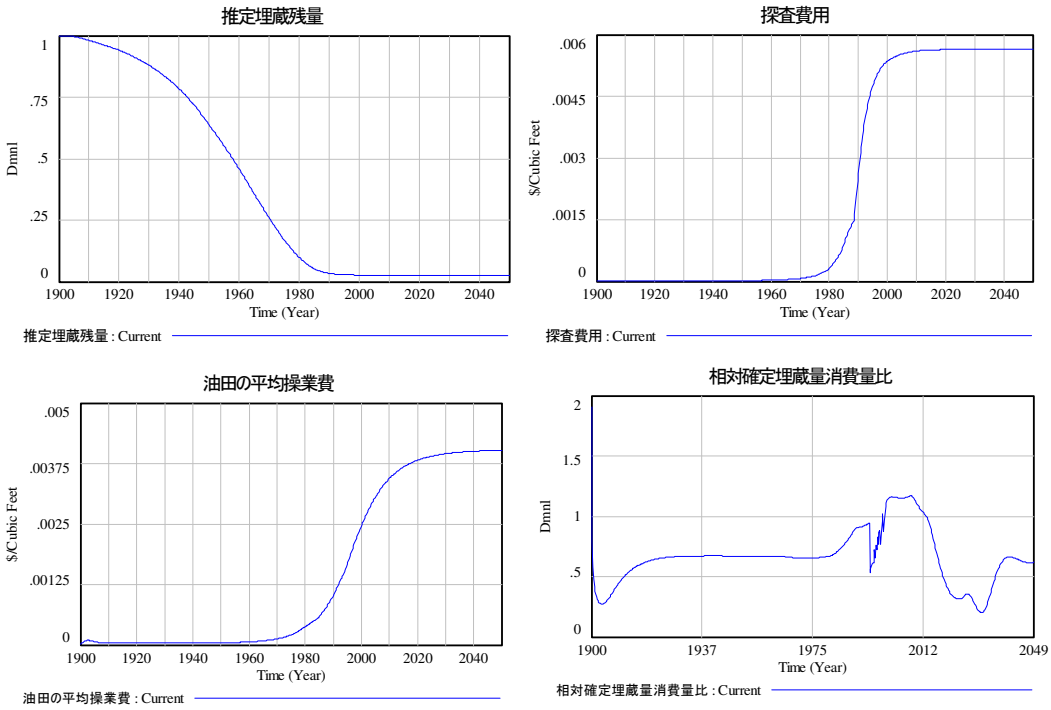


図 7-18：5 番目のモデルのシミュレーション結果（続き）

(7) 6 番目のモデル

最後の 6 番目のモデルは、大きくは 5 番目のものと変わりません。ただ、経営フライト・シミュレーターにし、価格に関する政策をいろいろできるように、政策変数を加えています。

「通常価格への切り替え」のパラメーターで、例えば、0 であれば価格政策が無いので、天然ガスの価格はシステムが決め、1 であれば、例えば政府の統制価格で決まるようにしました。

後は、このモデルを使って、経営フライト・シミュレーターに作り込むために、変数可動レバーなどの入力部を作り、見たい結果を示す表示部を作っていけば完成です。

このように、最初の概念モデルをベースに、増強ループや均衡ループを詳細化していくというやり方で、モデルを詳細化し、完成させていきます。モデル詳細化に際しては、テーブル関数などを使って、実データを与えるといったやり方も行います。

そして最後に、シナリオをいくつか考え、そのシナリオに対してシミュレーションを行い、結論を導き出します。テキストでは、関係者がいろいろな政策を確かめられるように、経営フライト・シミュレーターにするところまで完成させています。

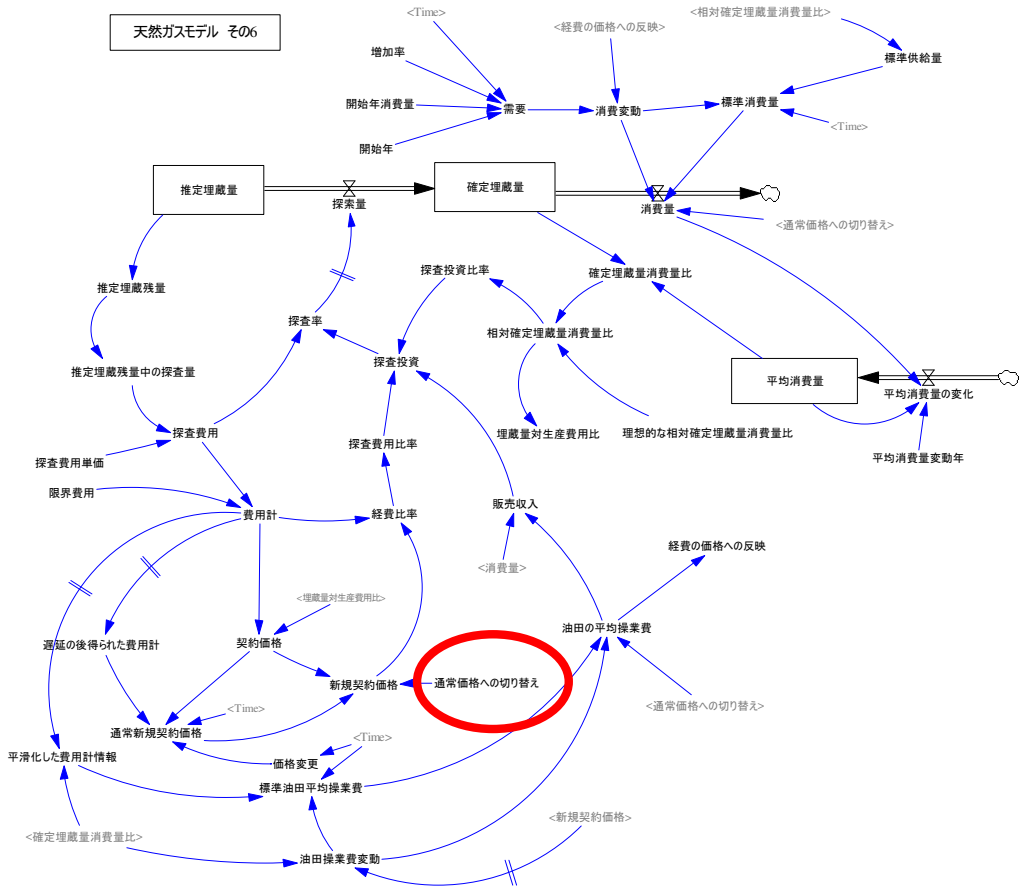


図 7-19：6 番目のモデル（定量モデル）

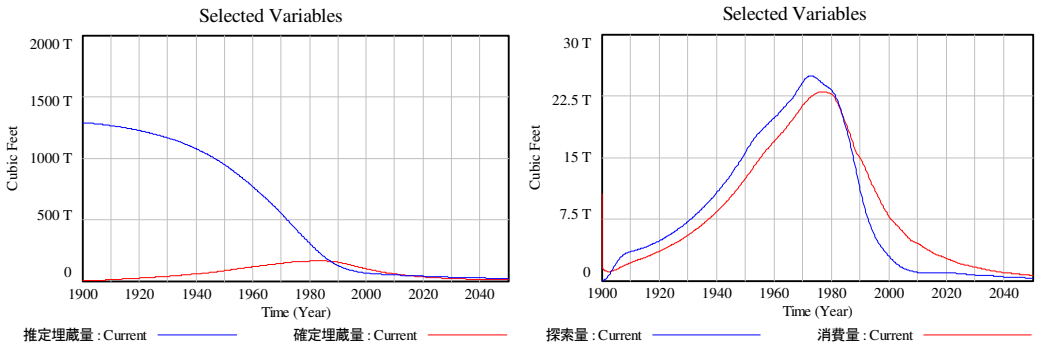


図 7-20：6 番目のモデルのシミュレーション結果（価格政策が無い場合）

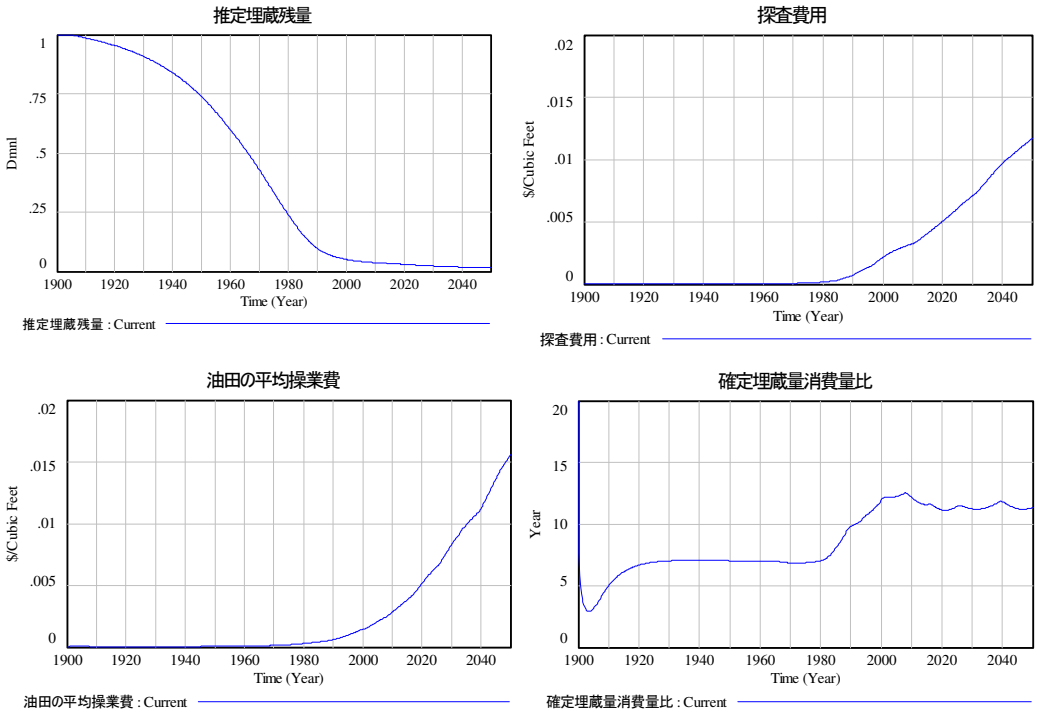


図 1-20：6 番目のモデルのシミュレーション結果（価格政策が無い場合）（続き）

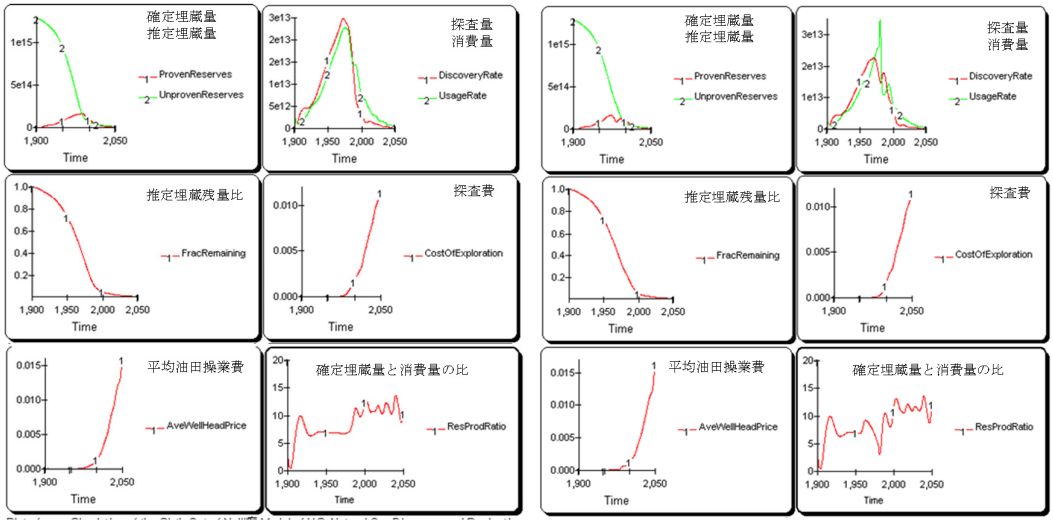


図 7-21 : 6 番目のモデルのシミュレーション結果（左 : 価格政策が無い場合、右 : ある場合）

図 7-21 に、テキストに載っていた、6 番目のモデルでの、価格政策がある場合と無い場合のシミュレーション結果を比較して示しています。右の、1955-1980 年間の価格政策有りのシミュレーション結果は、無い場合とあまり違うわけではないのですが、価格統制があり、石油価格があまり上がらないので、消費量が 1980 年代にどんと伸びています。しかし、この結果、消費量は、探査量よりも多くなり、確定埋蔵量をより早く減少させています。

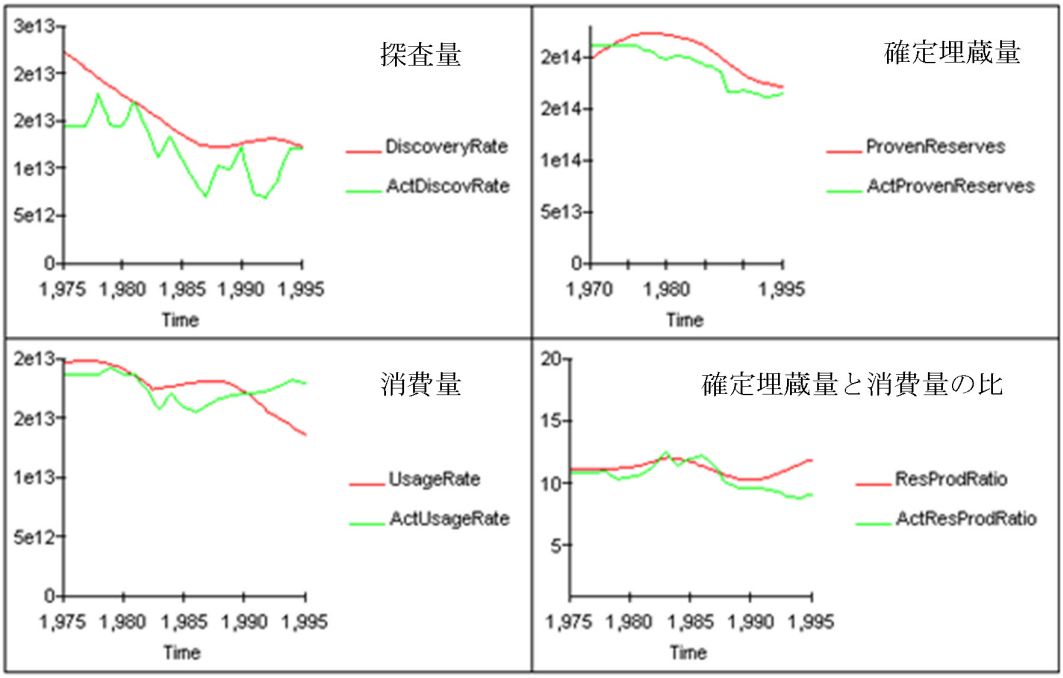


図 7-22：6 番目のモデルのシミュレーション結果と実データとの比較

図 7-22 に、シミュレーション結果と 1995 年から 1995 年までの実データを比較したものを示しています。赤がシミュレーション結果、緑が実データです。探査量は年次の変動が大きく、シミュレーション結果はその平滑化したものとなっています。後は 1990 年まではよく近似しています。消費量が 1990 年以降、シミュレーション結果と実データが乖離していった理由として、米国は 1980 年代に、国内の天然資源を保全し、輸入に頼る政策に切り替えた結果と考えられます。従って、差は輸入された分と考えられます。

(8) 経営フライト・シミュレーターにしたもの

シミュレーションでは主に政策に関するものと、不確実性に関する事項を、いろいろパラメーターを変動させてシミュレーションしてみて、政策の妥当性や不確実性のシステムに対する効き方、インパクトを調べられるようにします。

政策では、政策で変わってしまうように、政策パラメーターを変えます。例えば税金で油田操業費が変わってしまいます。従って、もし政府が、国内の天然資源を保全したいと思えば、油田操業費に対する税金を高くすることで、石油関係者の探査費用のかけ方などが変わってくることが予想されます。

不確実性では、推定埋蔵量などは、推定に基づくもので、探査技術などが進むと、推定埋蔵量が実は多めに見ていたとか少な目に見ていたといった違いが出てきます。こういったことを考慮して、例えば、50%少な目に推定埋蔵量を見積もってみたので、50%多めに変える、といったシナリオに基づくシミュレーションを行います。以下は、いくつかの想定シナリオの例です：

・不確実性：
－初期値で、推定埋蔵量が実は 50%多かったらどうなるか。（初期値変更）
－もし、推定埋蔵量は実は 10 倍多かったどうなるか。（同上）
－もし、天然ガス需要の伸びが予想よりも多かったどうなるか。（消費変動を増やす）
－もし、探査技術の発展が予想より早く、探査効率が良くなったらどうなるか。（技術係数

を探査費用に掛けることで対応できる）

・政策：

－エネルギー積極供給政策：もし、消費量が増えたら、政府は、需要に見合うように採掘を増やすことを支援する政策を行ったらどうなるか（これは一応、油田操業費に対する税率をゼロにする。）

－天然資源保全政策：もし、推定埋蔵残量が減少した場合、政府は、米国の天然資源保護政策を採択したらどうなるか。（油田操業費に対する税率を最大 30%にまで増やしていく。）

・業界の反応

－もし石油業界が積極的に探査を増やす政策を採択したら。（これは、探査比率を増やす）

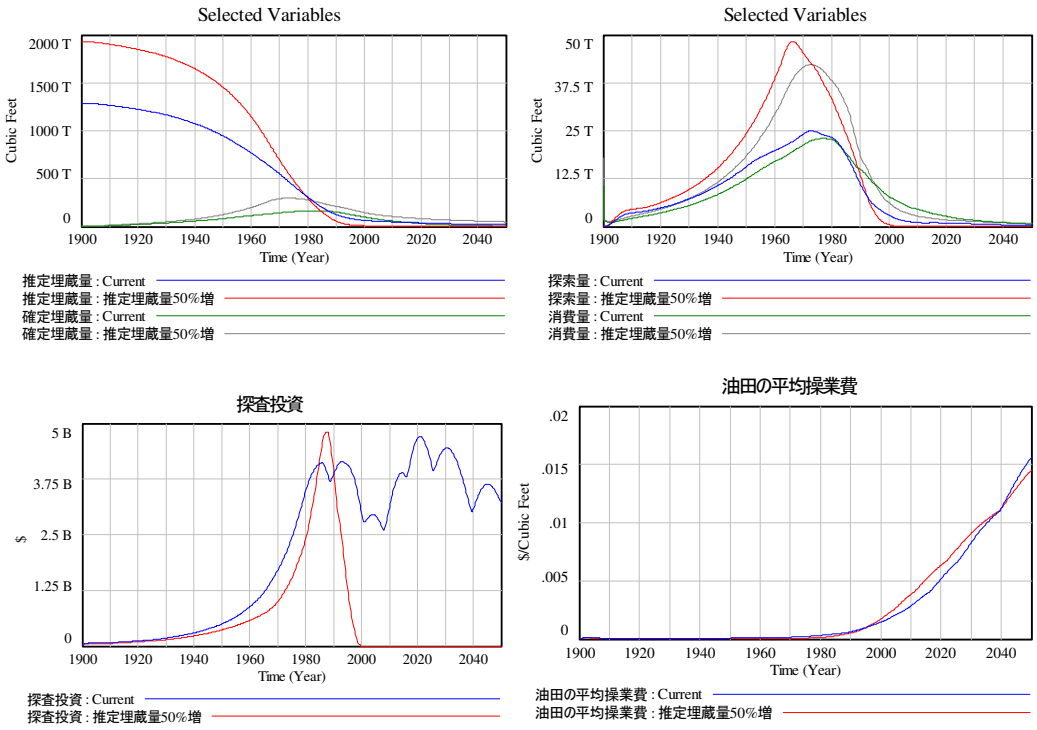


図-23：推定埋蔵量が 50%多かった場合のシミュレーション結果

いくつかの先のシナリオについて、シミュレーションしたものを載せています。図 1-23 は、推定埋蔵量が 50%多かった場合のシミュレーション結果ですが、当然ながら、探査量が増え、消費量も増えます。また、旺盛な消費量増加によって、サチュレーションが若干早まりますが、傾向やパターンは変わりません。50%程度では、生産ピークを迎えてしまいます。

図 1-24 は、価格統制で、価格が、20%程度安く抑えられているケースで、価格が安いので、消費が上がります。大幅に伸びた消費を補おうと、探査も多く行われます。

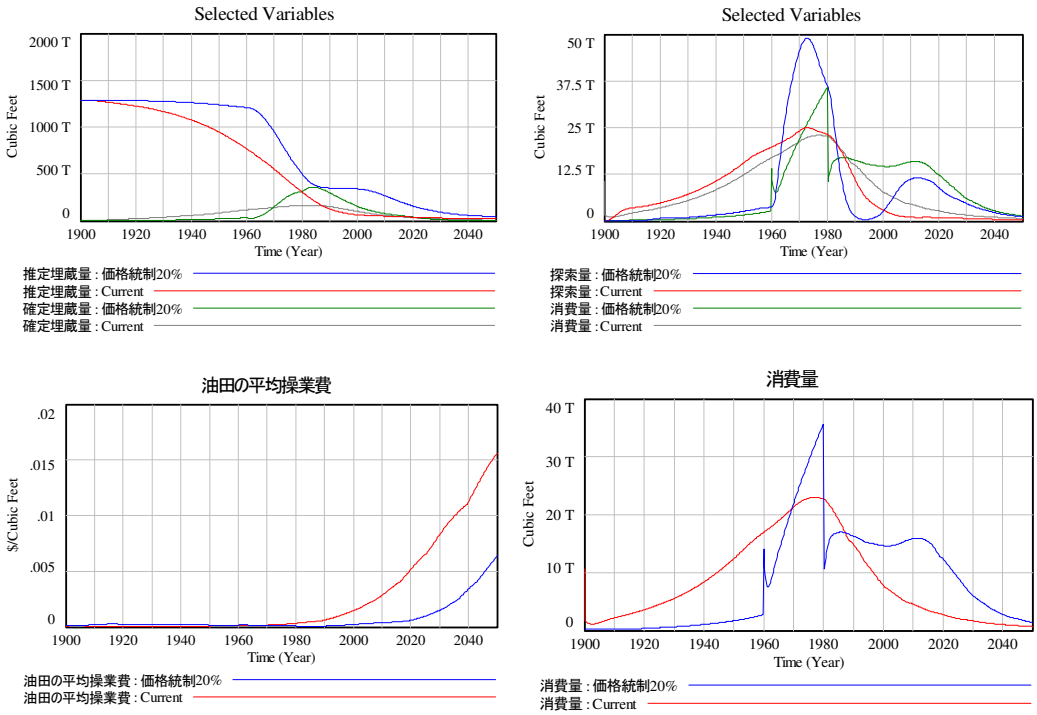


図 1-24：価格統制で、20%価格が抑えられた場合のシミュレーション結果

セミナー参加者から、モデルには目的があり、このモデルの目的は何なのかという質問がありました。このモデルの目的は、先に示した政策や不確定性を、モデルとシミュレーションによって確かめ、どの政策がいいのか、どの程度不確定性があるのかを知るためのものと思います。ただ、輸入による代替、再生エネルギーなどによる代替などのことはこのモデルには取り入れられていませんので、そういった制限内での、米国に存在するエネルギーだけに対する政策や不確定性を、関係者が調べ、学習するものです。

(9) この章のまとめ

この章では、コンセプチュアルなモデルから、いろいろ現状に合うように、新しいフィードバック・ループを追加し、実務的なモデルに進化させていく方法を、事例によって示しました。いきなり複雑なモデルを開発するのではなく、最初は簡単なモデルで、考え方の妥当性を確認し、次に、重要と思われる箇所を中心に、一つづつ詳細化していきます。

8. SD 学習のための情報

これまでで、SD についてざっと説明してきました。ithink/Stella, Powersim, Vemsim など、SD モデルを作り、シミュレーションするソフトがあり、これを使えば、モデルそのものは簡単に作成できます。しかし、いいモデルを作るためには、経験と学習が必要となります。いいモデルとは、問題や対象の振る舞いを適切に検証できるものであって、対象の全てをただシステムとしてモデルにしただけのものではありません。いいモデルとは、表現がうまく、分かりやすく、対象のシステムをうまく表しているものです。そして、最も重要な点は、いいモデルは、対象にしている世界を人々に理解させることができ、効果的な長期的な意思決定に貢献することができるものです。

このテキストの目的は、読者と SD の考え方や方法、手段を共有することで、成功するかどうか、活用できるかどうかは、読者の実践努力によります。

先の SD ソフトの操作マニュアルにはいろいろ参考になるモデルや解説が記されているので、それもすごく参考になるでしょう。

また、筆者は、だれか経験者と共に一緒に働く、あるいは一緒にモデルを作ることを推薦しています。これは、大学のコースでのアサイメント、ソフト会社、あるいはコンサルティング会社で働く、あるいは、貴方が働いている会社、あるいは外部コンサルタントが参加している SD を使うプロジェクトに貴方も参加する、といった方法で、実践を通じて SD をマスターできるとしています。残念ながら、日本では、SD を教えている大学のコースもあまりなく、日本のコンサルティング会社で SD を使っているところも少なく、なかなか実践で学ぶことは難しいのが現状です。

(1) 大学のコース

米国では、MIT スローン・ビジネススクールで、経営学の科目として SD が教えられています。短期に学ぶために、1 週間の夏季特別コースも開催されています。

Worcester Polytechnic Institute では、SD を中心にしたコースが設けられ、一番充実した内容になっています。他に、University at Albany で行政学で、Washington State University で環境学のコースの中で、Arizona State University のビジネス・スクールで、サプライ・チェーンの科目の中で教えられています。ただ、MIT と Worcester Polytechnic Institute、University at Albany 以外では、科目の一つという扱いなので、SD に特化したコースになっているわけではありません。ダートマス大学の経営大学院でも教えられていました、教官であったメドーズの退官に伴い、現在は教えていないようです。

欧州では、英国の London Business School が SD の英国におけるメッカのような存在になっています。また、ノルゥエーの University of Bergen、スイスの University of St. Gallen には、SD 研究センターが置かれ、SD 教育だけではなく、研究開発も行われています。その他、ニュージーランド、オーストラリア、インド、フィリピン、トルコなどにある大学でも教えられています。大学でのコースは、先生次第という面が強く、SD を教える先生が退官するとか、他の大学に移籍し、SD を教える先生がいなくなると、そのコースが無くなることがあり、現在一番安定しているのは、MIT, Worcester Polytechnic Institute、University at Albany といったところでしょうか。

日本の大学では、SD を教えている所は少ないと思います。参加者の一人のある大学教授によれば、総合政策部のような学部は別として、日本の高等教育のしくみから、商学部や経営学部には SD を専門に教えるコースを設置しにくいとのことでした。そのため、情報理論といったコースを設置し、その中で教えていくのだが、SD コースとして常設することは難しく、数年おきに違うテーマにしなければならないとのことでした。

(2) SD を使って経営コンサルティングを行っている経営コンサルティング会社

テキストの筆者は、SD を使って経営コンサルティングを行っている経営コンサルティング会社に勤務する、あるいは、会社が、そういった経営コンサルティング会社を使って、経営改善プロジェクトを実施するのであれば、そういったプロジェクトに参加し、実践で学ぶことを薦めています。外国では、PA コンサルティングが、SD を使ったコンサルティングを行っていることで知られています。この会社は、もともとは、フォレスターの弟子だったピューが始めたコンサルティング会社です。

実は、Vensim を開発、発売している Vantana 社や、ithink/Stella を開発・発売している isee 社も、ソフト販売だけを行っているわけではなく、経営コンサルティング業務も行っていて、こちらのコンサルティング業務からの収入の方が大きく、逆に、コンサルティング業務からの収入があるので、ソフト開発や販売が可能という一面を持っています。

経営コンサルティング会社では、ブーズ・アレン、マッキンゼー、ドロイト・トシュ・コンサルティング、アクセンチュアルなどが SD を使っての経営コンサルティングを行っていました。私の経験では、コンサルティング・ファームに SD を使った経営コンサルティング・メニューがあるというのは PA コンサルティングぐらいで、あとは、SD を使えるコンサルタントがいて受注できているかという関係で継続できているかどうかの問題になります。経営コンサルタントは、業界を渡り歩くので、その経営コンサルタントがその会社を去ってしまうとそのコンサルティング・ファームには SD ができる人がいなくなります。逆に渡った先で、新規に SD コンサルのメニューができることになります。これも私の経験ですが、IT 関係の受注、戦略関係の受注の方が、手間があまりかからないで、かつ使えるスタッフも多く、受注金額も多く、効率的なので、そこと比較されると評価が低くなります。それに比べ、SD コンサルは、モデル構築で手間はかかる、受注金額はそれほど多くなく、使えるスタッフも少なく、苦労の割に効率が悪いので、受注もさりながら、サービス・メニューにすることが難しく、苦労しました。

システム思考を使ったトレーニングや問題解決の指導関係の仕事が 2000 年以降多くなったように思います。それに比較して、SD を使った経営コンサルティングの仕事は、マッキンゼー、ドロイト・トシュ・コンサルティング、アクセンチュアルなどの経営コンサルティング会社では減ってきている、あるいは無くなっているように思います。

(4) インターネット等で入手できる SD 情報源

MIT System Dynamic Group は、Jey W. Forrester が 1960 年代に設立したグループで、米国のナショナル・モデルの構築と米国の経済のメカニズムを研究することを目的にしていました。しかし、残念ながら米国のナショナル・モデルは、T21 の方で、エネルギーを中心としたものとして先に完成させられてしまいました。このグループからは、SD 教育プロジェクトで、”Do It Yourself”というワークブックを出版しています。

また、米科学財団の資金援助を得て、Improvement Paradox: Designing Sustainable Quality Improvement Program（持続可能な品質改善プログラム）を行っています。これが、このグループの 3 本の主な活動です。ただ、フォレスターは高齢もあり、1990 年には中断し、現在は John Sterman がフォレスターの後任として、このグループを仕切っています。

SD 教育プログラムは、初等・中等教育関関係の先生の集まりができ、隔年で国際会議（といっても米国中心）を開催し、教材などを公開しています。フォレスターはかなりこの活動の支援を行っていました。この関係で開発された、初等中等教育用の SD 教材も公開されていますし、高校の数学の先生だった Diana Fisher などが書いた分かりやすい本も出版されています。

品質改善の活動は、残念ながら、現在では、他の経営学部で行われている品質改善や経営改善プロジェクトに代替されています。

(5) SD 学会

SD 学会は、国際的な非利益団体で、現在は 80 ケ国以上に会員がいます。学会誌の出版、国際会議の開催を行っていて、毎年、7 月に国際会議を開催しています。この会議は、北米と欧州で代わるがわるに実施し、5-10 年に一度、欧米以外の場所でも国際会議を開催しています。アジア環太平洋地域では、今までは、中国、日本、ニュージーランド、韓国で開催されています。欧州では、英国、スイス、ギリシャで、最近はオランダで頻繁に開催されています。北米では、メキシコ、アトランタ、ニューヨークなどで開催されましたが、ボストンで開催されることが一番多いようです。

学会の HP から、過去に開催された国際会議に提出された論文を閲覧できます。また、学会誌(System Dynamics Review)は英国の Wesley という出版社から出版され、SD 国際学会会員以外は有料ですが、HP から閲覧できます。季刊誌で、ときどき特集号が組まれます。今までに、保健医療特集号、グループ・モデリング特集号などが編集されています。

SD 学会には支部が置かれ、英国、日本、韓国、中国、イタリア、南米、アフリカなど約 20 ケ国あるいは地域の支部があります。英国は年 1 回、国際会議とは別に定期集会を開いていますが、多くの国は、国際学会の開催に合わせて、支部の会議を開いている模様です。国際会議があると、支部のための集会の場も設けられます。月次で活動している日本支部は活発な方だと思います。

これとは別に研究分科会も設置されていて、経済、ビジネス、環境、保健医療、心理学、教育、情報セキュリティ、安全保障などの SD 応用分野毎に研究分科会が設けられています。最後の情報セキュリティと安全保障は最近合体し、セキュリティ研究分科会になっています。

(6) SD 教育プロジェクト

SDEP: System Dynamics Education Program は、フォレスターが設立し、MIT スローン経営大学院で運営されているものです。Road Map という、SD 入門から上級までの教材を公表しています。この Road Map は、MIT の経営大学院での SD コースの教科書になっています。ただ、現在は、フォレスターの後任として、Sterman がやっていて、Road Map だけではなく、Business Dynamics といった教科書も使われています。

(7) 関連団体

国際コンピューター・シミュレーション学会（SCS: Society for Computer Simulation International）は、1952 年に設立された国際非利益団体で、SD を使った研究発表を比較的多く受け入れてくれています。

1984 年に設立され、複雑系の研究で有名になったサンタ・フェ研究所でも、かっては、SD を使った複雑系解明の研究が行われましたが、最近は、コラボレーションは少なくなっています。この研究所は、複雑系に限らず、新規分野の研究をテーマにしています。

(8) SD 関連の出版社

フォレスターの著書や初期の SD 関係の本は、もともとは MIT Press から出版されていましたが、絶版になるに伴い、Productivity Press 社から再版されるようになりました。

Pegasus Communications は、システム思考関係の本と雑誌を出版している会社で、Production Press の本も含め SD 関係の本も取り次いでくれます。

最近では、Prentice Hall, McGraw Hill, Wesley, Doubleday など、SD/ST 関係の本を出版する出版社も増えていますし、英語だけではなく、スペイン語による SD の本も出版されています。また、電子出版も行われていて、Eric Puryt などは最初から電子出版で教科書を出版しています。

ただ、訳本以外には日本では 10 年近く SD の本が出版されていないので、何かしないといけないと思っています。

(9) SD ソフト

・Powersim：ポージー社の松本さんが取り扱っていて、2 年前まで、彼の事務所で毎月、SD の研究と紹介のセミナーを開催していました。現在は、この月次の会合は終了してしまっていて、残念です。

Powersim は SAP という統合パッケージ・ソフトのモジュールになっていて、SAP の膨大な経営情報をシミュレーションに使えることを売物にしています。SAP の持つ経営情報データ・ベースを使って SD モデルのシミュレーションを行い、経営戦略や意思決定の支援をしようというコンセプトですが、日本ではそんな使い方をしている企業は少ないのではないでしょうか。このソフト開発では、英国の London Business School の先生方がかなり支援を行い、エネルギー関係のモデル開発ではよく使われています。

・Stella/ithink：最初にグラフィックな SD ソフトとして 1980 年代に出たこと、創設者のリッチモンドが初等・中等教育での SD 教育を強力にサポートしたこともあり、教育関係のモデルはこれで開発されたものが多くあります。大学生協の Versity Wave が代理店で大学や研究機関に売り込んだこともあり、日本の研究所を訪問するとよくパッケージの箱を見かけます。

・Vensim：MIT の学生用に開発されたようなソフトで、日本では、日本未来研究センターが販売代理を行っています。Vensim PLE 入門や、Vensim の日本語版操作マニュアルは、日本未来研究センターの HP から配布しています。

・AnyLog：マルチ・エージェントが使える SD ソフトで、コンピューター・セキュリティや保健・医療のモデルなどで使われることが多くなっています。

・SimTaKN：東洋大学の池田先生の肝いりで開発された日本製の SD ソフトでエージェントも使えます。シェアウエアなので、安価。

・Dynamop：中央大学の小林先生が開発した非グラフィック SD ソフトです。こちらの方が連立微分方程式形式なので、計量経済学などを学んだ人にはいいかもしれません。

昔、SD は DYNAMO という言語でモデルを構築していました。その流れを組み、PC で、DYNAMO で SD モデルを構築できるようにしたものです。

以下は、この章に関する私の個人的意見です。SD でモデルを作成すること自体は、プログラミングという意味で、そう難しくないと小林先生が言っていました。問題は、対象分野における独特の考え方や世界観をどう表現するか、何に注目するかで、それが多分、人によっては難しいのだと思います。今は中断していますが、SD 学会日本支部で、モデルを開発したい人を集め、いろいろ議論する会合を開いていて、その中の一つで、福田先生の学生さんが、昔、開発途上国のモータリゼーションをどうモデル化するかで悩んでいました。彼女は、似たようなモデルをたたき台にして何とかしようとしていました。モデルは、似たようなものをコピーしているので、私から見ると、コンセプトとしてはできているように見えるのですが、彼女はそれに気がつかず、どうすればいいのか分からないと主張しつづけていました。割り切れない、あるいはそういった考え方をするということに抵抗し続けているように見えました。システムとして対象を見る訓練、慣れが必要であり、対象分野で、そういった考え方をするというのであれば、それをそのまま受け入れる、あるいはそういったものだと割り切ってしまうことも必要なように思います。

業界や適応分野によっては、特有の考え方ややり方があります。原理は不変であっても、アプローチが異なることはよくあることです。業界や適応分野をよく知らないと、この考え方の違いが理解できなく、モデル化で苦しむことはよくあります。逆に、そういったも

のとしてしまうと、その後は進めやすく、多分これが、SD でよく言われるメンタル・モデルなのではないでしょうか。

別の例で、プロセスをシステムと勘違いして、モデルがうまくいかない例があります。プロセスとシステムとは同じとは限りません。これも私の SD 学会日本支部の学会誌に投稿したものですが、SD を使って業務プロセスをモデル化できますが、もしそのためだけであればあまり意味が無いと思います。ERP パッケージのようなものを使うか、通常のプログラミング言語でモデルを組み、仮想業務データを流すというやり方の方が優れています。SD を使って業務プロセスをモデル化し、そこに、政策や戦略によるコントロール機能を追加できますが、もしこの方法でモデルを作るのであれば、効率は悪く、やはり、先の方法が優れています。ただ、政策や戦略そのものをモデルにして、その有無や程度を変えてシミュレーションするのであれば、SD が一番適しています。

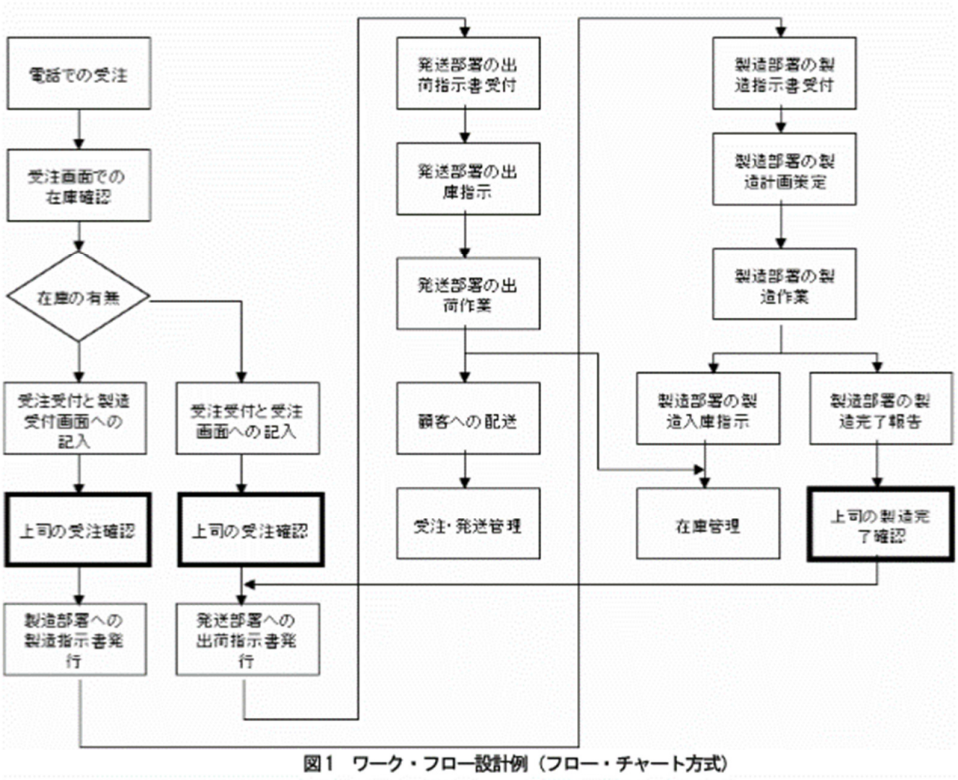


図1　ワーク・フロー設計例（フロー・チャート方式）

図 8-1：業務フロー

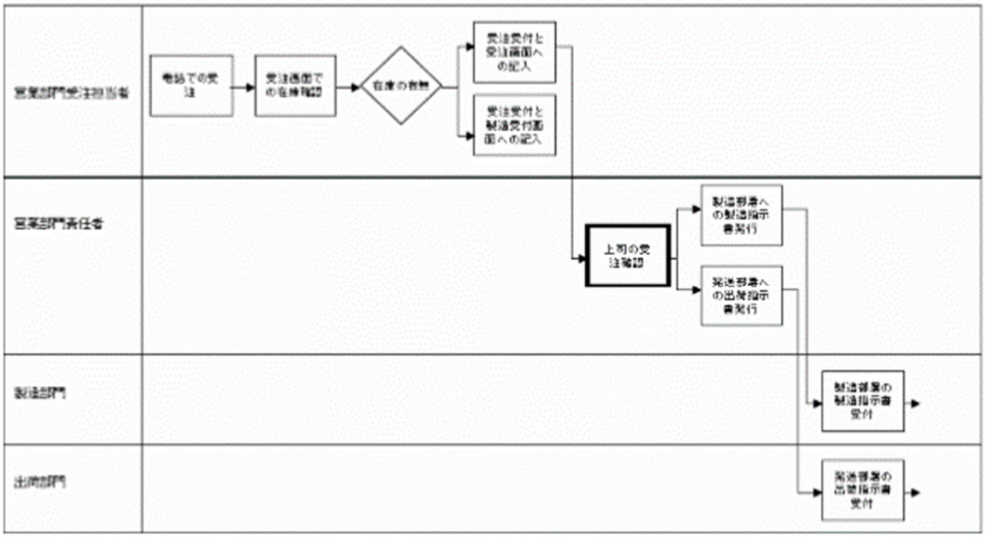


図２　ワーク・フロー設計例（部門別担当者別業務フロー）

図 8-2：業務フロー

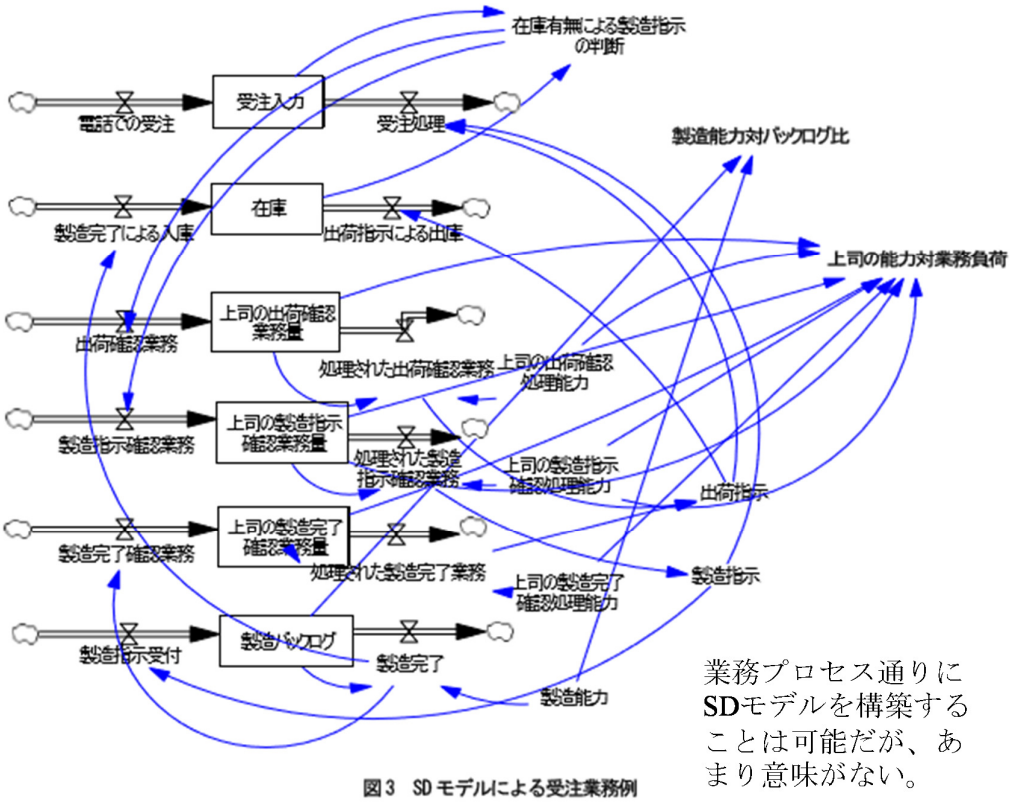
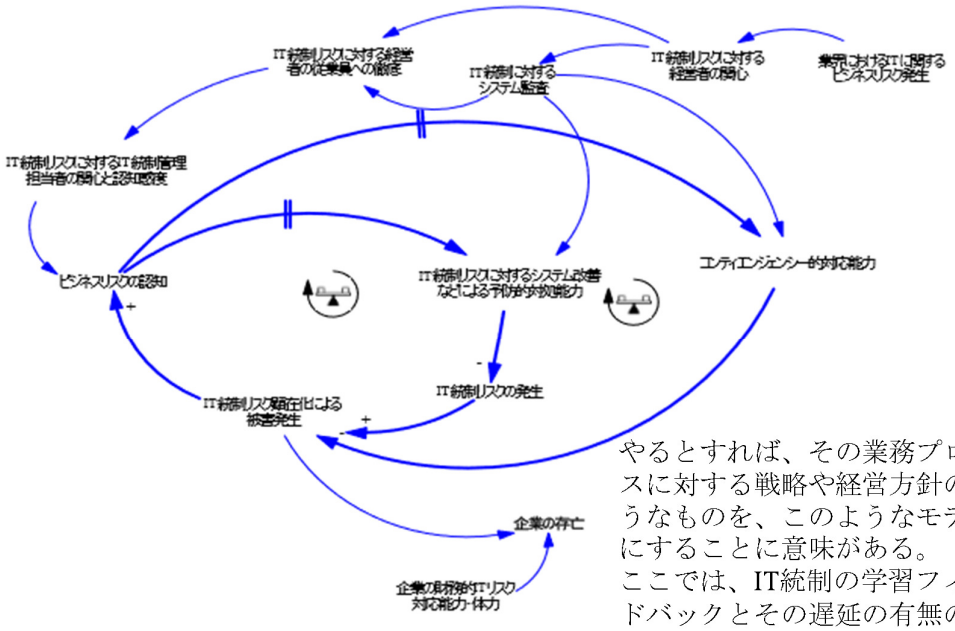


図３　SD モデルによる受注業務例

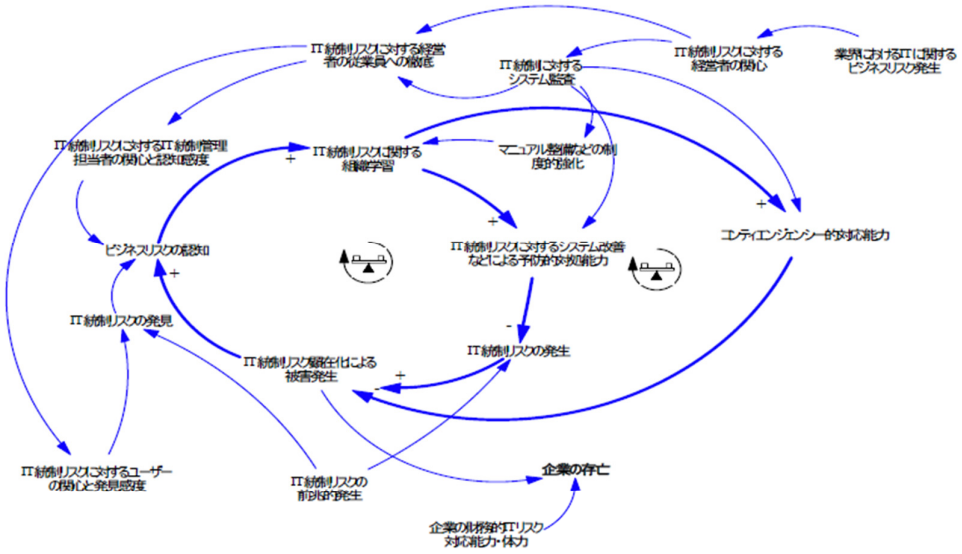
図 8-3：SD による業務フロー

業務プロセス通りに**SD**モデルを構築することは可能だが、あまり意味がない。



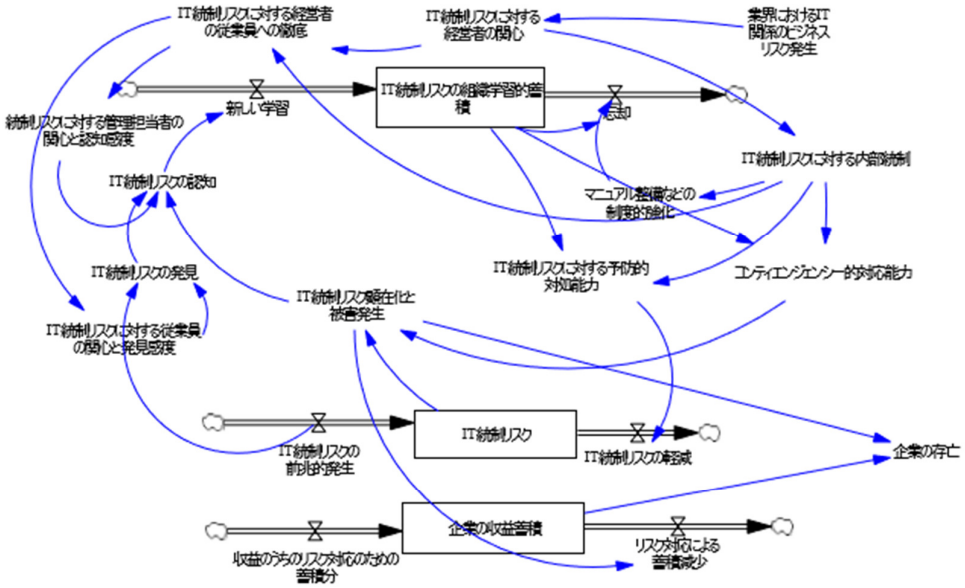
やるとすれば、その業務プロセスに対する戦略や経営方針のようなものを、このようなモデルにすることに意味がある。
ここでは、IT統制の学習フィードバックとその遅延の有無の効果をシミュレーションしている。

図 8-4：IT 統制リスクの効果を見るモデル（定性モデル）



先のようなIT統制システムであれば、IT統制を行った結果から得られた教訓を、遅れを伴うことなく改善に生かす方がいいので、こちらの方が優れている。
よく、IT統制のしくみを作って、それで終わりという企業が多い。むしろ、常に改善するというしくみを作り維持することの方が重要。

図 8-5：改善した IT 統制リスクの効果を見るモデル（定性モデル）



定量モデルでは、IT統制のしくみや効果を定期的にレビューし、評価し、学んだ経験を速やかにIT統制の改善に向ける、あるいは、リスクが発見されたら、すみやかにそのリスクへの対応や発生原因の撲滅に向けた改善措置を取るしくみや、学習効果の遅延があるかどうかで効果を見て、その効果を定量的に示す。

図 8-6：IT 統制リスクの効果を見るモデル（定量モデル）

IT統制の学習によるフィードバックがある　　IT統制の学習によるフィードバックがない

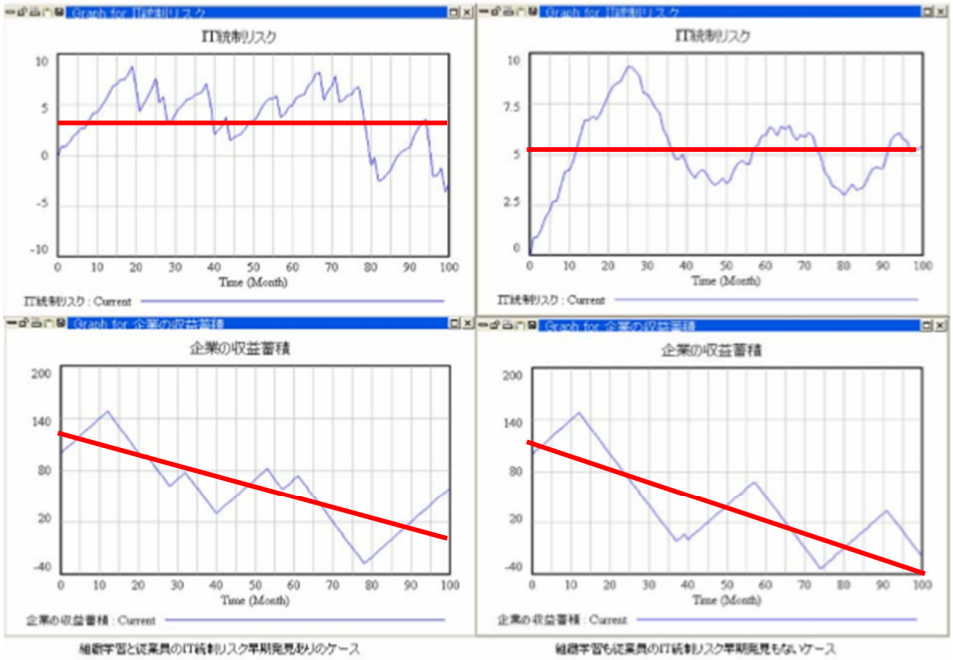


図8　2つのモデルによるシミュレーション結果

IT統制リスクはより低く、収益低下もより緩やか。

図 8-7：IT 統制リスクの効果を見るモデルでのシミュレーション結果

図 8-1、8-2 は典型的な、経営コンサルタントが行う業務プロセス設計の例です。こういった業務プロセスを、ウォーターフォールという形式で設計し、途中に統制のためのチェック機能やチェックのための活動を挿入していきます。これを SD でモデル化したものが図 8-3 です。このようにして、IT 統制活動の業務負荷などをシミュレーションすることは可能ですが、実務レベルで SD を使って、このような業務設計のようなことをやったとしても、あまり効率的ではないと思います。それよりも、むしろ、図 8-4、8-5 のようなモデルを作り、IT 統制を効果せしめるためには、IT リスクも含めビジネス・リスクの存在を早期にキャッチし、それを学習し、リスク管理のしくみ改善に短期間で結び付けていくしくみの構築の方が重要で、その経営効果を図 8-6 のような定量モデルにして、図 8-7 のようなシミュレーション結果で経営トップに訴える方が有効だと思います。図 8-4、8-5 は、モデルの構造が大きく変わっているわけではなく、通常の会社では、ビジネス・リスクの存在を早期にキャッチするしくみがないか、あっても、それを学習し、リスク管理のしくみ改善に短期間で結び付けていくしくみがなく、会議、会議で結論がなかなか出なく、早くても、しくみの改善に 2-3 ケ月もかかります。図 8-6 は、こういった遅延があるかないかだけの違いのシミュレーションです。こんな簡単なモデルでも、学習フィードバックの構造があれば、IT リスクは平均 5 から 4 にまで下がりますし、収益の減少もよりゆるやかになることを示すことができます。

SD 習得のためには､専門分野によって､モデルのパターンが違ってくる部分もあるので、専門分野を決め、その分野で SD モデルをいろいろ作ってみるのが一番だと思います。

参加者からコメントがあり、SD の適用が優位な分野と優位ではない分野があり、問題の構造が分かっている分野であれば、計量経済モデル、統計モデルとそれを使った統計解析なども含め、OR 手法の方が優れていて、この分野には、それはそれでいろんな優れた手法が存在すること、そうでなく、問題そのものすら分かっていなく、問題を明確化することから始めなければならないような性格のものであれば、ソフト・システムズ方法論や SD がうまく適用できる分野であるという指摘、つまり、適用分野と向き、不向きを考える必要があるという指摘がありました。

（以上）