

《論文》

問題解決環境：意思決定システムを意識した ゲーミング・ダイナミックス

市 川 新 ・ 棕 田 實

1. 緒言

情報社会は、社会の構造の複雑化を促進する一方で、その有様を陽にする情報技術の革新により人間の情報行動を複雑にしている。この情報ループには社会システムの停滞に導く負帰還と発散に導く正帰還があることが知られている。言い替えれば、動的システムを、前者が過去の特定の状態にて安定するように制御し、後者が弱い要素を順番に犠牲にしつつ暴発するように制御している。これらの情報ループを適切に制御すれば、未来の特定の状態に遷移することも完全情報であれば可能である。

社会システムにおいて、意思決定者たる人間がこれらの情報ループとその作用を的確に認識することは困難である。その要因として、これらの情報ループには時間遅れという現象が内在していること、制御指令が状態の時間単位の差分で行なわれること、さらに、システムが複雑化することにより要素数とそれらの相互作用関係数が人間の情報処理能力の限界を超えることがあげられる。

人間の情報処理機構にはいくつかの弱点が知られている。良く知られたものは、定常状態では極めて情報感覚が鈍いに対して、差分状態の出現には極めて鋭敏であり、過剰反応に陥ることであろう。しかし、最も問題になるのは、自らの情報行動がもたらす、情報の時間遅れを介在した環境の反応に対して、予見の能力を持たないことである。また、認知科学的にも、冗長性のないデータによる短期記憶実験によって、人間の短期記憶が受け付けられる属性ないし属

性値は一時点にたかだか7個である¹⁾といわれる。社会システムにおいては意味的・冗長の変数が認識対象になるが、それでも、経験的に情報処理可能な最大変数数はこの程度と思われる。

このような場合、問題の認識を客体化し、それを操作する方法を採用する。言い替えれば、モデルを記述し、そのモデルのふるまいを観察し、その結果を基にして、モデルを詳細化し、という一連の自己の認識写像との知的対話を繰り返す。一連の分析と合成の繰返しは、人間の短期記憶における情報処理の限界を超越する唯一の方法である。そして認識の客体化は問題の形式的操作を可能にし、そのふるまいをコンピュータに代替させることができる。

社会システムの問題解決の場面において、意思決定者は問題解決環境を必要とし、そこには問題解決支援用具が装備されていなければならない。勿論、問題解決環境の情報システムは人間の情報処理を束縛する危険性をもつ。実際、社会システムにおける多くの問題の変数数は、自然システムのそれよりも数桁多いといわれるので、現代のスーパーコンピュータでも形式操作能力が不足する。それでも、形式的操作に関しては、コンピュータより優れた情報の処理の用具は他にない。

そこで、本稿では、社会システムにおける問題解決環境を概観し、その用具の一つとして、筆者が研究開発し拡張するゲーミング・ダイナミックスについて報告する。この用具の機能は、以上の問題解決の認識の基に、問題の客体化を試みる人間の情報処理を補完・支援することにある。

なお、本稿のゲーミング・ダイナミックス・システムは、その拡張版を含めて筆者が著作権を留保するが、研究および教育を目的とし、筆者が進めるモデル・ベース構想に協力される限り、公開知的著作物（通称フリーウェア）とする。

2. 社会システムにおける問題解決と世界記述

2. 1 問題の処置と解決

簡単に問題解決の語用を確認しておく。本稿では、ある望ましい状態を仮定し、それとの対比において、現状の状態を分析し、いくつかの属性についての差を認めた上で、その差を解消する手続きの案出を問題解決という。しかし、社会システムには、解決にいたらない多くの問題があるから、問題解決というよりも問題処置²⁾と言うべきかも知れない。

問題処置の枠組みでは、まず、処置すべき問題という段階があり、これが何らかの方法で目標状態が予測できる解決法があれば解決できる問題、すなわち、問題解決になり、そうでなければ、解決できない問題になる。問題解決には、発見的方法による解法に始まり、解析的方法による解法に質的転換し、さらに効率的解法に至るのが原則である。ところが、社会システムにおける問題解決は、時間軸上の未来のある時点で、正負帰還により状態が遷移してしまい、その時点で望ましい状態は仮定された望ましい状態とは異なる特徴がある。したがって、問題解決の実相は、問題処置から発見的方法による解法までの範囲に限られることになる。勿論、解析的方法による解法が有効な多くの社会システムを設計・組織し、運用しているが、それらを制度化し管理することができる主体が求める問題解決環境は本稿の主題ではない。

すなわち、問題解決のために社会システムから可能な限り広い世界を切り出す。それを切り出した主体とは異なる第三者の主体が操作可能な情報媒体に、その世界が写像されていなければならない。この情報媒体に表現されたものをモデルといい、問題解決環境の実相をモデリン

グ支援と言い替えても差し支えない。

ところで、モデルのふるまいから写像対象を予測することをシミュレーションという。モデリングが相対的に容易であり、シミュレーション自体に価値があるときは、問題解決環境を必要としない。社会システムの問題解決環境では、処置すべき問題が人間（集団）のモデリングという情報行動をとおして展開され、その結果として彼ら自身の問題構造への認識が深化することが期待される。それはアリーナ³⁾と呼べるし、モデリング支援環境⁴⁾と呼べるであろう。

2. 2 モデルの表現と操作

社会システムの問題解決環境で、人間はコンピュータとの知的対話を通して、社会システムから所用の世界を切り取る。システム境界を設定する⁵⁾ことになるが、その形は情報技術の可能性と限界に拘束される。問題解決に有用なモデルであるためには、対象となる問題が何らかの人工言語で、解釈のあいまい性を排除した表現ができることが望ましい。逆に、その言語で表現できる限界が、情報技術で具象化された問題解決環境の限界といえる。

社会科学的問題の解決で、経済問題解決や経営問題解決に情報技術の応用が相対的に先行しているのは、人間の問題認識と人工言語の表現能力のギャップが小さいことを反映しているといえよう。数学の記号法を含む人工言語の中で、唯一、コンピュータ言語で表現された意味が演繹的推論により自動的かつ形式的操作の対象になる。

表1は、自然言語に対するコンピュータ言語の言語水準を表す。言うまでもなく、現在知られている全てのコンピュータ言語は、本稿の対象とする問題領域に原理的に適用できる。問題解決環境がパースン・コンピュータ・システムであるので、その知的対話は自然言語であることが望ましい。しかし、自然言語の特長として、創造的であるが他方冗長的で表現の解釈に曖昧さが残る。そこで、自然言語に概念的に近いものを高水準言語に分類し、より遠いものを低水

表1 主要モデリング言語の水準と形式

超高水準	制限自然言語指令系	NLPQ
	宣言的知識表現汎用系	PROLOG
高水準	分野別記述・記号表現系	DYNAMO GPSS
	オブジェクト指向汎用系	SMALLTALK SIMULA
低水準	拡張型汎用言語系	SIMSCRIPT
	汎用一般言語系	FORTRAN PASCAL

準言語に分類する。さらに最近は、超高水準言語と呼べる人工言語が研究されている。例えば、自然言語の特長を継承し、曖昧さを可能な限り排除した言語⁶⁾が、日本語のそれを制限日本語と呼ぶが、研究されている。

一般にはモデリング言語を概ね4層の水準に区分する⁷⁾が、表1にはそれに超高水準層を付け加えている。従って、低水準言語からより高水準言語へ、さらに超高水準言語まで、5層に階層化することにする。

①汎用言語によるモデリング

PASCAL や FORTRAN に代表される基本データ構造を備えたプログラミング言語である。現在のコンピュータの内部構造を忠実に反映しているので、全ての用途に応用できるが、自然言語との距離は大きい。モデリングには、問題対象とコンピュータの専門的知識と経験が要求される。

②拡張汎用言語によるモデリング

SIMSCRIPT や SIMULA に代表され、汎用プログラミング言語をシミュレーション向けに拡張したものがある。この種の言語の研究は、モデルの記述を効率化することにある。したがって、問題対象とコンピュータの専門的知識と経験が要求されることに変わりない。この層までが、社会システムのモデリングの視点からは低水準

言語の範疇になる。

③記述型モデル表現によるモデリング

この層から、自然言語ないし、問題対象の領域における専門的表現記法を積極的に援用するので、高水準言語の範疇になる。離散系向きの GPSS や連続系向きの DYNAMO に代表され、この種の言語の研究はコンピュータの内部構造を隠蔽することによって、モデリングに求められるコンピュータの専門的知識を必要最小限にすることにある。

問題対象を人間が連続系現象として認識するか、離散系現象として認識するかによって、基本表現が異なる。一般に、社会システムの現象は時間の経過とともに状態が変移するから連続系の表現が整合する。ところで、モデル記述者のモデリングに関する経験的知識を積極的に援用することによって、信頼性と効率性を両立し、大規模モデリングが可能になるオブジェクト指向言語による記述が有効であることが知られてきた。その研究環境として、SMALLTALK⁸⁾が有望であり、研究成果を筆者の問題解決環境の研究に反映させることになるだろう。

④モデル生成用具によるモデリング

領域が限定されその問題構造が明らかなものは、モデルのモジュール化、あるいは、その書庫の整備により、差分を入力することによって、演繹的に目的のモデルを生成させることができる。物理系のモジュールは比較的豊富であるが、社会システム系のモジュールは人口モデル等に限られる。社会システムでも、本来、モデル・ベースが整備され共用化することはモデルの精緻化に必須であるが、表現形式の標準化と流通のシステム化がなされていないために、蓄積効果が期待できない。

⑤制限自然言語によるモデリング

この水準の基本的命題は人工知能の研究課題そのものである。自然言語を理解できる機械の創造にある。従って、研究の対象は人間の言語

能力ないし情報処理そのものにあるが、実用的に期待できる成果は得られていない。この領域の研究の現状は当初の命題から後退しパースン・コンピュータ・システムの研究に重点が移っている。つまり、人間の情報処理を補完する人工知能システムが研究対象になっている。その結果、医学、工学、経営の分野において、人間の意思決定を支援し、その能力を増幅するエキスパート・システムが、人工知能システムとして重要な研究課題になっている。社会システムでは、特に、経営意思決定への応用⁹⁾が試みられている。

これらの問題解決環境では、人間はコンピュータ上に実現されたモデル系（形式的言語）をやはりコンピュータ上に実現された自然言語（厳密には制限自然言語）処理系を通して援用することになる。つまり、モデルの表現は記述型ないし記号型言語に依存し、その操作は自然言語（例えば制限日本語や制限英語）による指令を受領できるようにする。現在、PROLOG がパースン系とコンピュータ系間の言語処理の核言語として研究されている。

このように、モデルの表現には記述型言語ないし記号型言語を指向し、モデルの操作には超高水準言語を指向している。パースン・コンピュータ・システムは、前者が自然言語による解釈の曖昧さを避け、後者が自然言語による操作の容易さを求めている。

3. 問題解決環境とモデリング

3. 1 認知と計画

社会システムの自然システムとの本質的違いは、システムに人間系が含まれることにある。さらに、関係する変数数が極めて多いこと、時間とともに変容することがあげられる。また、システム工学の最適解という評価基準は意味をもたないことが指摘される。社会システムにおける問題解決は、認識された制約条件と与えられた実時間内の探索で、発見された最良解にすぎない。言い替えると、最適解が得られるのであれば、それはシステム工学ないしハード・システム思考の方法論が適用されたのであり、いわゆる良構造の問題と言える。本稿の対象とす

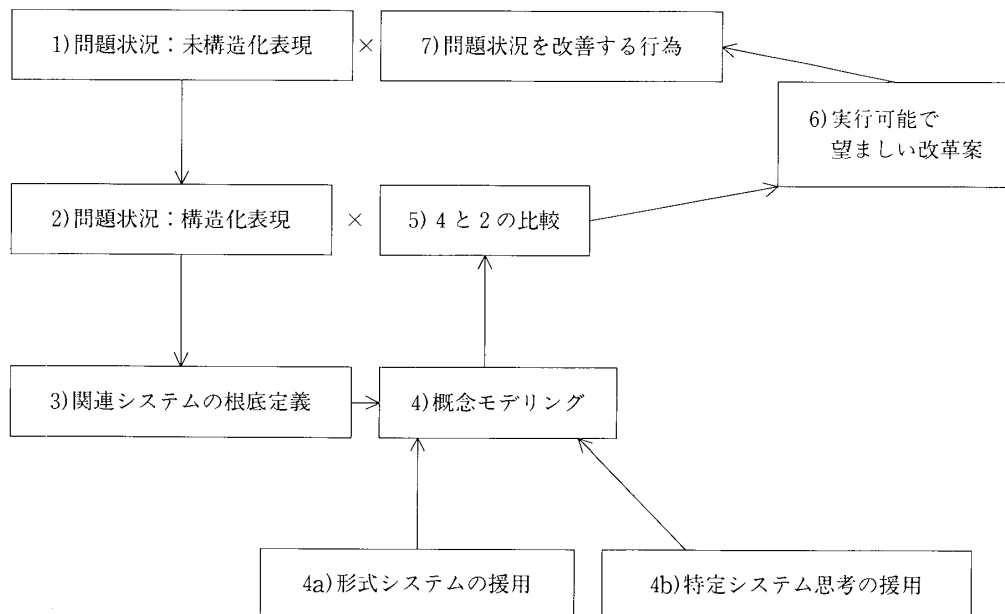


図1 システム思考の方法論 (Checkland¹¹⁾)

る問題は、上述のように、人間の発見的方法のみにより問題が認識されるものであり、人間のおかれた問題解決環境により最良解が探索される。そこで、情報科学・システム思考・意思決定論から、問題解決における認知と計画について確認しておく。

情報科学では、情報現象の解明と情報理論の樹立には情報方式の必要性が指摘¹⁰⁾されている。すなわち、人間はその時点で得られた情報方式により、情報の生成や獲得が束縛されている。情報現象の解明と情報理論の樹立はその時点の情報方式に基づく。一方、情報現象の解明と情報理論の樹立は、新しい情報方式を生み出す。従って、情報科学では、人間の情報処理の、情報現象の解明、情報理論の樹立、情報方式の開発は一体である。

社会システムの問題解決に P. Checkland はソフト・システム思考の方法論を提案している。ソフト・システム思考の概要¹¹⁾はつぎのとおりである。

この方法論は、図 1 に示すように、問題状況に、人間（社会）を含んだ現実世界内での活動と、システム思考内での活動を含んでいる。使用される言語は、現実世界内では問題状況における通常の言語（本稿では専門的表現を含んだ自然言語と解釈する）であり、システム思考内ではシステム論の言語（本稿では分野別記述・記号を含んだ人工言語と解釈する）である。現実世界の複雑さはシステム思考によりシステム論の言語に翻訳されて初めて認識できる。

問題の構造化では、状況の中で変化の遅い構造の要素と連続的に変化するプロセスの要素について、それらの相互の関係を表現することになる。関連システムの根底定義では、その問題に関連している観念的システムに命名することになる。概念モデリングでは、根底定義として定義された人間活動システムの概念モデルが作成される。このモデルの構成語は動詞であり、その動詞の集まりを構造化する。一般の形式システムのモデルを援用することによって、概念モデルに欠陥を持たないことを確認することも

ある。さらに、概念モデルは、必要があれば、曖昧さを避けるためにシステム・ダイナミックス・モデルや他のシステム思考モデルに変換される。ここで現実世界に戻り、概念モデルと認識された問題状況が比較される。この比較により、実行可能、かつ、望ましい状態の基準を同時に満たす改革案が定義される。そして、問題状況の改善のための行為が取られる。

ソフト・システム思考において、問題認識から問題解決への転換点である概念モデリングは、人間自身の情報方式と整合するものである。自然言語による問題の認識から曖昧さのない人工言語による問題の認識へ変換の過程は、経験や知識が存在しない問題での、問題解決法の評価対象になるものである。問題解決の評価基準は、それに至った過程の評価であり、人間の主観的情報処理と客体化されたモデルと、その操作のパーソン・コンピュータ・システムの情報方式に帰着する。

社会システムの問題解決に、E. Jaques は、問題解決の関与時間の概念を導入し、人間の認知方法とシステムの複雑さの関係を示す階層化システム理論を提案¹²⁾している。階層化システム理論は、意思決定の対象となった業務の完遂時間を階層にしたもので、業務の水準、責任の水準、業務の複雑性、処理される情報の複雑さの測度になる。

階層は、意思決定の関与時間に合わせて、三ヵ月までを第 1 層、1 年までを第 2 層、2 年までを第 3 層、5 年までを第 4 層、10 年までを第 5 層、20 年までを第 6 層、50 年までを第 7 層、100 年までを第 8 層としている。各層は上位 3 層の各層に所属する。上位第 1 層は第 1 層から第 3 層までを含み、上位第 2 層は第 4 層および第 5 層を含み、上位第 3 層は第 6 層から第 8 層までを含む。したがって、第 3 層と第 4 層の間と、第 5 層と第 6 層の間には不連続点ないし質的転換点が見られる。

第 3 層以下は意思決定の内容が具体的であり直接的であるが、第 4 層以上は抽象的であり間接的であるとされる。第 5 層は、人間の未来に

表2 認知形態

認知形態	関与期間	実体	言語	情況関係
複合社会の世界	50～5000年	社会群	社会哲学的表現	イデオロギー
組織の世界	10～50年	全システム	社会経済的表現	全世界
一般の世界	1日～10年	物事の総体	語句・数学的表現	全システム
他者依存の世界	1時間～3月	不変の物事	指さし・語句的表現	物的・依存

(Jaques¹²⁾)

対する予測能力の限界層になる。第6層以上では、未来を予測するというよりも、未来のあるべき姿を創造することへ質的転換がおこる。完遂まで、概ね10年におよぶ対象が人間が行なえる意思決定の限界になる。

このように、階層化システム理論は組織との関係から意思決定者の認知モデルを提示するものである。上位第3層が組織の環境と接点を持ち、上位第1層が具体的対象を直接的に扱い、上位第2層は上位第3層の抽象的对象を上位第1層の具体的対象に変換する。さらに、各層の意思決定の対象に時間境界を設定する。ソフト・システム思考との対比を行なうと、上位第3層および上位第2層がその対象になり、上位第1層はハード・システム思考の対象になるといえる。

階層化システム理論は類推的推論により表2に示す関与期間まで拡張されている。このように、社会システムの問題解決では、問題の所在と問題の解決は人間の認知の有様が直接反映されたものがある。概ね、大企業、公共事業体、自治体、政府が主体であるときは、問題解決の目標が望ましいあるべき姿に及ぶことになり、場合によっては、イデオロギーの表現形式が問題解決環境に求められることになる。ここでは、数値を属性値する変数は補助的役割しか期待できない。

3. 2 定性推論による問題解決

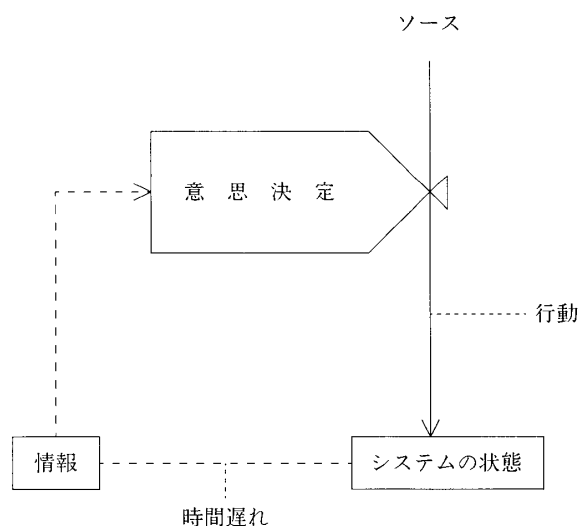


図2 行動と情報のシステム・ダイナミクス表現

結局、本稿が対象とする問題解決環境には、動的システムと定性推論の情報方式が求められることになる。さらに、問題解決には目的と手段の構造化が必須である。

意思決定者は一般に因果関係に基づいて問題¹³⁾を理解をしようとする。因果関係の理解は原因と結果の関係を構造化して試みることである。目的は結果に、手段は原因に対応している。物事の因果関係を知ることができれば、目的と手段に対応するので、因果関係と問題解決には対応関係があることになる。人間が一貫した因果関係により物事を理解しようとするのは、将来の新たな問題の解決にその蓄積した知識を利用

することを期待している。

このような因果関係に基づく問題解決環境の具象化は重要な研究課題である。しかし、パソコン・コンピュータ・システムとしては、定量的推論によるものと比較して、ほとんど未知の分野である。情報技術的には因果解析と定性シミュレーションが中核であるが、人工知能システムの形態¹⁴⁾になるので、多様な試みの蓄積を行なうことが求められている。

例えば、都市計画分野の定性モデリングの試み¹⁵⁾が行なわれている。しかし、研究の初期の段階あり、研究仮説の検証が行なわれているにすぎない。今後、自動モデリングないしモデリング支援技術、定量解析との統合、および、常識ベースが重要な研究課題になる。

4. システム・ダイナミックスによる問題解決環境

4. 1 システム・ダイナミックス指向

社会システムの問題解決のために動的システムの手法を定式化したのはマサチューセッツ工科大学スーロン経営大学院教授であったフォレスター (Jay W. Forrester) である。この定式に基づく研究方法、モデリング、シミュレーションを総称してシステム・ダイナミックス (System Dynamics : SD) という。

1950年代後半に遡ると、当初、フォレスターはこの手法をインダストリアル・ダイナミックスと呼んでいた。名前の由縁は、産業組織の働きを研究するために、産業の成長と安定に影響しあう要因の構造と企業活動や経営意思決定を含めたモデリングを行なっていたことにあろう。ところが、社会システムの階層性から当然のことであるが、対象のシステム境界が拡大し、地域とか国家の行政を含むようになり、それらの研究をアーバン・ダイナミックスと呼ぶようになった。さらに、当然のことながら、全世界を対象にした研究が行なわれるようになりそれらをワールド・ダイナミックスと呼んだ。現在では、社会システムの一般システム理論としてシステム・ダイナミックスと呼ぶ。この系譜は、階層化システム論の関与期間と対比関係があり、

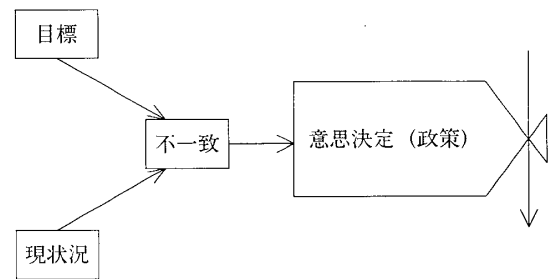


図3 意思決定のシステム・ダイナミックス構造

認知形態が一般の世界であるのがインダストリアル・ダイナミックス、組織の世界がアーバン・ダイナミックス、複合社会の世界がワールド・ダイナミックスといえよう。

フォレスターは、その手法の哲学的意味・手順・評価等を大著「Industrial Dynamics¹⁶⁾」で表した。さらに、システム・ダイナミックスとして一般システムに発展させ、それを「Principles of systems¹⁷⁾」に集大成している。従って、本稿ではシステム・ダイナミックスの関連する手法の特徴に簡単に触れることにし、詳細に立ち入らない。

システム・ダイナミックスでは、社会システムの動的システムを図2のようにとらまえて表現する。すなわち、対象のシステムの状態について情報を入手し、その情報に基づいて、人間が行動をするというメタ・モデルを導入する。ところが、システムは実世界から切りとられた世界であり、そのシステムには多種多数の蓄積効果のある状態（レベル変数で表される）が表現されている。システムから得られたシステムの状態に関する情報により、意思決定される。意思決定は行動に変換（レート変数で表される）されて、システムの状態を変化させる。変化した状態は再び意思決定および行動に反映される。つまり、システムの状態は動的にふるまうことになる。

意思決定は、図3に示すように、望ましいあるべき姿とシステムの状態を比較することにより、行動政策が立案・実施されることになる。ところが、複雑な動的システムでは、意思決定

に対する状態の変化に時間遅れがともなうことが知られている。さらに、その時間遅れは、関与期間が長くなるにつれて、人間の情報処理能力では予測が困難なシステムのふるまいをもたらす。

システム・ダイナミックスはこのような社会システムの状態・行動・意思決定・情報を統合的に扱う手法と言える。

4. 2 システム・ダイナミックス向け言語処理系

システム・ダイナミックスが人間の思考に効果的であるためにはその用具が求められる。すでに述べたように、思考の用具は人工言語とその形式的処理系である。システム・ダイナミックスでは、レベルとレイトという視点で、世界を表現する。これはいわば社会システム・モデリングのための制限自然言語といえる。それに形式的操作を加えるとシミュレーションになる。そのために、制限言語と一对一の対応をする高水準言語 DYNAMO が研究開発¹⁸⁾され、学術的に標準言語として確立している。

システム・ダイナミックスでは、基本的に累積効果のある状態をレベル変数で、時間の経過とともにその状態を変化量ないし変移をレイト変数で表す。そこで、この2種の変数を含めて、DYNAMO では次の7種類の変数(定数を含む)を区別し、それぞれの変数の意味を定義する方程式を記述する。

①レベル (定義識別子L)

ある時点のシステムの状態を値にしてもつ。この値は一刻過去のシステム全体のレベルとレイトから導かれる変量(変移)が反映される。

②レイト (定義識別子R)

システムの状態の変量(変移)を定義するもので、ある時点から一刻未来について決定する。一般に、意思決定とそのための行動はレイトとして陽に表現しなければならない。

③初期値・初期状態 (定義識別子N)

システムの初期状態を定義する。

④補助変数 (定義識別子A)

複雑なまたは抽象的変数を定義し、一般に人間の構造的意味理解のために変数の分解または統合に利用される。

⑤事象変数 (定義識別子B)

時間軸とは独立した変数で、指定した時点にて内部状態が変移する。

⑥定数 (定義識別子C)

変化しない変数は定数として定義できる。

⑦補完変数 (定義識別子S)

その他の便宜的に変数が必要なときに定義される。

このように、DYNAMO に変換された表現で、意思決定と行動の意味を表現できるのは、レイト変数とその意味を定義するその他の変数である。また、システムの状態の情報源は基本的にレベル変数である。

例えば、カール・マルクスの視座系から社会システムを表現した R.A.Hanneman のモデル¹⁹⁾を引用すると、労働者は技術革新により失業者に変移し、資本家のプロレタリアート化により労働者へ変移する定義は、DYNAMO で、

$$\begin{aligned} L \quad LABN.K &= LABN.J \\ &+ (DT) (FAILCP.JK - DISPLB.JK) \end{aligned}$$

と記述できる。労働者数のレベル変数 LABN の定義は、失業者への変移を示すレイト変数 DISPLB とプロレタリアートへの変移を示すレイト変数と FAILCP と時間経過量を示すDTで表されている。また、失業者への変移を示すレイト変数 DISPLB の定義は、

$$R \quad DISPLB.KL = LABN.K * (TECH.K - 1)$$

と記述できる。ここで補助変数 TECH は技術革新の省力化を示す。さらに、プロレタリアートへの変移を示すレイト変数を定義すればよい。

このように、基本的にはシステムのある一つの状態を示すレベル変数には状態を変移する2つのレイト変数を定義する。レイト変数で表さ

れた変移の程度を急激にした事例と穏やかにした事例の比較には、レイト変数の定義を外挿してシミュレーションを行なえばよい。しかし、標準ダイナモには対話的外挿の機能はない。問題解決環境には、現象を認知しようとする働きを阻害せず、むしろ、増幅する機能が要求され、その評価はモデルの記述とモデルの操作の対人間の親和性になる。

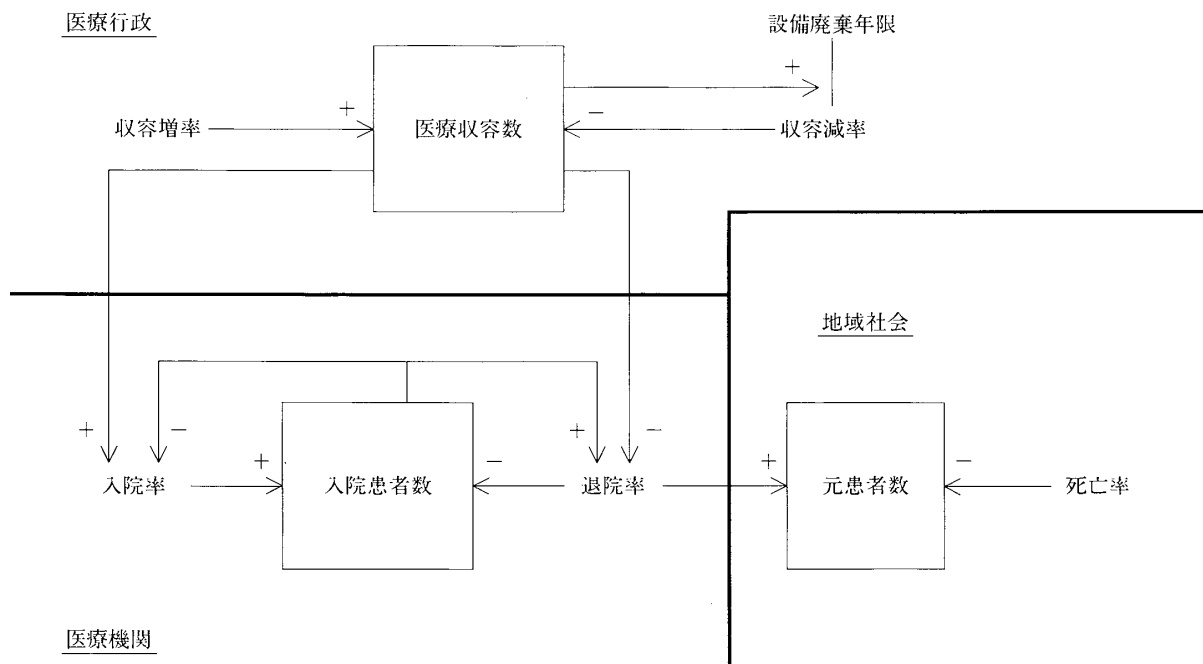
5. ゲーミング・ダイナミックスの構想

5. 1 ダイナミックス・モデリング

システム・ダイナミックスのパーソン・コンピュータ問題解決環境としての歴史は、コンピュータ科学のなかでも新しいものではない。実際に、筆者もシステム・ダイナミックスの応用²⁰⁾について、1970年代後半に行なっている。他の研究グループも積極的に研究活動²¹⁾を行なっていたし、かなりの邦文文献が発表されている。また、一般社会では、システム・ダイナミックスで研究されたローマクラブの「成長の限界」という書籍が広く読まれた。しかし、その後、世界的にはまたわが国においてもこの分野の研究

は限られるようになった。その原因として2つあげられよう。一つは、当時、大型コンピュータを使える研究者が限られた。もう一つはシステム・ダイナミックスによるシミュレーションの結果について批判があったことであろう。

特に後者はモデルの客観性についての論争²²⁾である。具体的にはシミュレーションが差分方程式を援用していたためにその意味内容が数学的論証に耐えられなかった。ところが、ソフト・システム思考の定式化の重要性、人間の問題解決能力に関する認知科学、情報科学やコンピュータ科学、人工知能の研究から社会システムにおける問題解決手法として再評価され始めている。特に、パーソナル・コンピュータの高性能化にともない社会システムの研究と教育環境が整備されてきたことも指摘されよう。パーソナル・コンピュータでは DYNAMO に代わって、STELLA の環境が整備されている。これらは国際システム・ダイナミックス学会の活動に成果²³⁾として表れている。また、わが国においても社会科学系のシミュレーション&ゲーミングの方法論を研究する学会が設立され、本稿でもその学



(wolstenholme²⁶⁾)

図4 因果関係の構造化

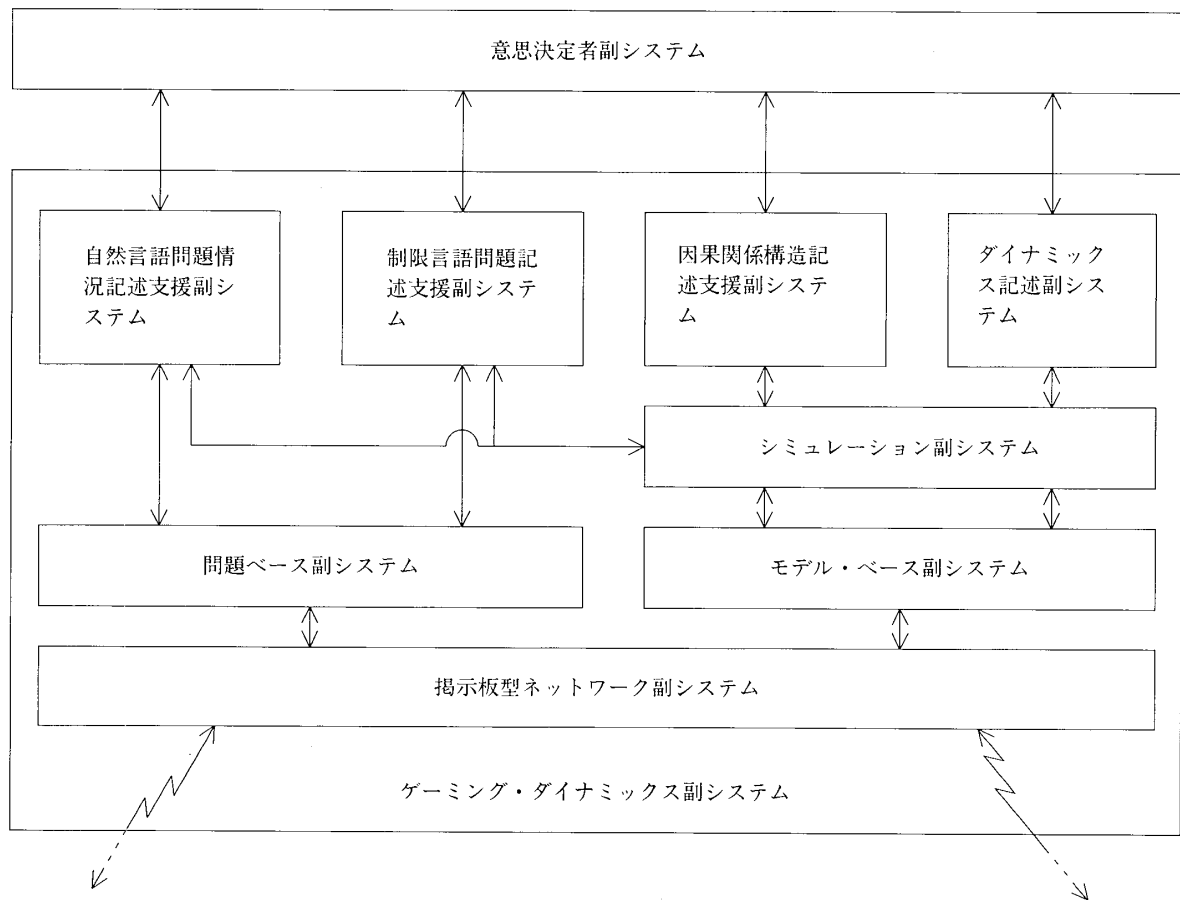


図5 ゲーミング・ダイナミックスの概念設計

会誌の論文を引用している。また、筆者も参加した国際会議²⁴⁾が日本学術会議との共催で開催(1991)され、この研究分野の制度化が完了したところである。

このような科学的方法論に関する認識も積極的に数学者の関心²⁵⁾を集めるところまで変化している。それにともない、上述したように、システム・ダイナミックス自体は定性的表現すなわち因果関係の構造化の研究および教育の重要性を再確認する動向にある。このときのモデリング言語の階層は次のようになる。

- ①自然言語による未構造的問題記述
- ②自然言語による構造的問題記述
- ③制限言語による因果関係記述
- ④定性システム・ダイナミックスによるレベ

ル・レイト記述

⑤最終目標モデリング言語によるモデル記述とシミュレーションによる確認

定性的表現ないし因果関係の構造化は③ないし④の階層に該当する。これらの階層では、人間の情報処理能力から、構造的かつ段階的詳細化の思考過程になる。図4の事例は問題認識の初期の状態を示す。実際のモデリングでは⑤の階層に達するとその確認の結果に基づいて上位層に戻ることになる。つまり、モデリングの信頼性はこの各層の通過過程で保証されとすれば、効率⑤の操作性に依存することになる。思考の媒体として、表現の構造化と階層化が可能であることが求められる。

5. 2 モデル・ベースの制度化

筆者が期待するシステム・ダイナミックスの問題解決環境は現在のところ国内にはほとんどない。最近では、一橋大学宮川公男教授グループのダイナモ・システム²⁷⁾に限られよう。勿論、システム・ダイナミックス処理系は筆者も研究開発²⁸⁾してきた。しかし、再評価されたシステム・ダイナミックスの環境が、パーソナル・コンピュータ上に実現され、国際的に社会システムのシミュレーションの研究と教育が活発化している。その格差は大きくなる一方である。

そこで、筆者はゲーミング・ダイナミックス・システムを研究開発運用し、研究者および教育者に公開する計画を進めている。このシステムは、システム・ダイナミックスのモデル・ベースの共有と相互接続の方法を研究する実験環境である。このシステムの詳細は別稿²⁹⁾に譲り、ここでは図5に示す概要にとどめる。

図5のゲーミング・ダイナミックス環境では、意思決定者は、問題解決の各階層に対応した言語水準の記述副システムの支援・補完・代替を援用しながら、問題認識の構造化を深化する。この副システム群で、ダイナミックス記述副システム、シミュレーション副システム、モデル・ベース副システム、および、掲示板ネットワーク副システムのプロトタイプがほぼ終了している。標準 DYNAMO システムは、ダイナミックス記述副システムとシミュレーション副システムの部分機能に相当することになる。最大の特徴は、統合環境と掲示板型情報ネットワーク副システムにある。

特に、情報ネットワーク副システムは、問題ベースおよびモデル・ベースの共有化には必須の機能である。また、この情報ネットワークにより、ゲーミング・ダイナモ等の基本システムが提供される。

6. ゲーミング・ダイナモの開発

6. 1 シミュレーションにおける親和性

問題解決環境におけるゲーミング・ダイナモの設計目標は、モデリングにおける親和性を実

現することにある。モデリングは漠とした問題認識から形式的表現に至る発見的活動である。このときの言語活動は自然言語水準から問題解決環境の最下層言語水準までの多段階層を探索するように上下する。モデリング中の人間の情報行動を束縛しないことがゲーミング・ダイナモの親和性である。

ゲーミング・ダイナモはこの問題解決環境の最下層言語である。モデリング中にこの最下層に至ると、最下層言語で表現されたモデルを形式的操作、すなわち、シミュレーションを行なう。その結果が上位階層言語によるモデルと矛盾するものであれば、その階層へ戻ってから再び最下層言語への変換を繰り返すことになる。場合によっては、最初の問題認識を見直さねばならないこともある。このように、ゲーミング・ダイナモの表現と操作の親和性はモデリングの効率化を意図するものがある。モデリングの効率化は、問題認識の客体化へ過程にあって、探索空間を拡大することになる。方法とその適用過程で評価される社会システムのモデルは、この探索空間の大きさがモデリングの信頼性を評価する代替尺度である。

一般にモデルには部分的に複数の表現形式と変数値を持つ部分が含まれている。それぞれについてシミュレーションを行ない、その結果を比較分析することが必要になる。これらの最下層の操作系は容易であることが求められる。ゲーミング・ダイナモはパーソナル・コンピュータでその操作環境を実現することにより、対話型に重点を置いた設計になっている。特に最も繁雑に行なわれる変数値の事例評価は、モデルの変数値を予め指定することにより、シミュレーションの都度、それらの結果を確認できる。それらの表示系は最近の潮流であるウィンドウ形式を採用している。また、シミュレーション後においても、比較研究する変数群を指定し、そのシミュレーションの結果の高速表示を可能にしている。従来の DYNAMO とは異なり、表示指令を変更する必要はなく、モデル記述上では着目する変数群を指定するのみである。従

来の DYNAMO の標準語系との共通性を維持しつつ拡張を行なっている。もちろん、モデルの記述を変更し、シミュレーションすることも統合環境に備えている。

さらに、一定時間ごとにシミュレーションを停止し、モデルの変数値や定数値を再指定できる。この機能はモデルが、複数の人間ないし集団によりシミュレーションされ、一定時間ごとに人間の介入を許すモデリングには有用である。また、その時点でのモデルの状態を凍結・保存することが可能になり、他の場所や他の時刻にシミュレーションを継続できる。この凍結状態はコンピュータ・ネットワークを通じて転送が可能なることから複数の場所で多数の人間が介入するモデルのシミュレーションができることになる。また、モデルの記述にモジュール化を採用することにより部分的なモデルを蓄積することが可能になり、一般にいわれる共有化が実現できる。

なお、ゲーミング・ダイナモはモデルの記述を C 言語に変換してコンパイルしているため、そのモデルの C 言語表現は複数のパソコン環境や EWS 環境で実行が可能である。しかし、現状としては対話的にシミュレーションを行なう部分が機種に依存しているため互換性に問題が残る。モデリングに機種依存性はないが、シミュレーションの統合環境が機種依存している。

6. 2 モデルの事例研究

市場のふるまいをシステム・ダイナミックスで構造化したモデルを利用して、ゲーミング・ダイナモ第 1 版によるシミュレーションを紹介する。本稿は特定問題解決のモデリングが目的ではないので、公開されているモデルを利用する。

筆者は定性的モデリングの手法に興味があるので、ここでは、大局的なふるまいを定性的に表現できる市場カタストロフィー・モデルに応用する。以下、小玉モデル³⁰⁾の引用であり、従って、原著作者の認識がモデルに反映されていることを確認しておく。

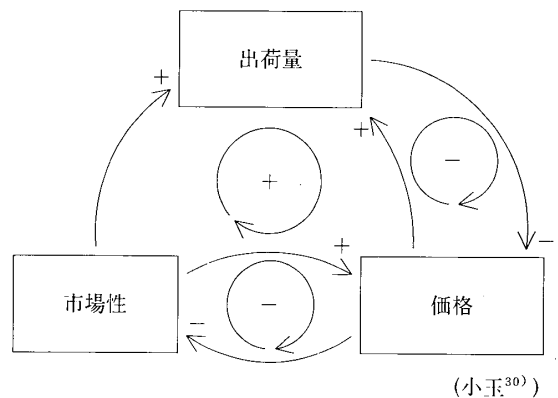


図 6 価格変動の因果関係

問題状況の元々の構造化表現は、次のようになる。神田卸市場におけるキャベツ価格の決定因子を出荷量と商品市場性とし、それらを 3 次元のカタストロフィー・モデルに写像する。市場性は、需給ギャップと商品品質等が反映した定性因子であるが、本稿ではその内容に立ち入らない。カタストロフィー・モデルでは、ある行動の連続的变化が反映されて連続的結果が表れているときに、突如、不連続の結果すなわち破局的結果が表れることを示す。これをゲーミング・ダイナモで確認しよう。

図 6 は問題状況の構造化表現をシステム・ダイナミックス表現に変換したものである。この階層では、因果関係が陽に表現されるとともに、定性的シミュレーションを行なうことができる。この図から、出荷量と価格には相互に影響する負のループ、価格と市場性には相互に影響する負のループ、出荷量と価格と市場性の全体では相互に影響する正のループがあることになる。さらに、段階的詳細化を展開すると、問題解決環境では最下層のダイナモ言語表現に至る。それを図 7 に示す。

このモデルをゲーミング・ダイナモで形式操作すなわちシミュレーションを行なうと、その結果は写真 1 のようにウィンドウ形式で表示される。意思決定者は必要に応じて対話操作系により、適時、複数の影響関係を比較することができる。また、写真 2～4 に示すように特定のウィンドウのみを拡大し、その詳細を確認する

図7 価格変動モデルの記述

```

; 市場モデル
;
MODEL
T      PRMKT = 0.09/0.05/0.02
R      MKTDR.KL = (MKTDRF) (MKT.K)           ;市場性減少率
C      MKTDRF = 0.05
;
L      SV.K = SV.J + (DT) (SVIR.JK)          ;累積出荷量
N      SV = SVI
C      SVI = 0
R      SVIR.KL = (SVIRF) (PRSYM.K) (MKSVM.K) ;出荷量
C      SVIRF = 1310
A      PRSYM.K = TABLE(PRSVT, PR.K, 0, 2, 1)
T      PRSVT = 0.8/1/1.2
A      MKSVM.K = TABLE(MKSVT, MKTR.K, 0, 2, 1)
T      MKSVT = 0.8/1/1.2
A      MKTR.K = MKT.K/MKTI                   ;市場性比
L      MKT.K = MKT.J + (DT) (MKTIR.JK - MKTDR.JK) ;市場性
N      MKT = MKTI
C      MKTI = 1
R      MKTIR.KL = (MKT.K) (PRMKM.K)           ;市場性増加率
A      PRMKM.K = TABLE(PRMKT, PR.K, 0, 2, 1)
T      PRMKT = 0.09/0.05/0.02
R      MKTDR.KL = (MKTDRF) (MKT.K)           ;市場性減少率
C      MKTDRF = 0.05
L      P.K = P.J + (DT) (PIR.JK - PDR.JK)     ;価格
N      P = PI
C      PI = 50
;
A      PIRS.K = 80 + STEP(10, 10)
A      PR.K = P.K/PIRS.K                     ;価格比
R      PIR.KL = (PIRS.K) (CL1.K) (CL2.K) (CL3.K) (CL4.K)
R      PDR.KL = PIRS.K
A      CL1.K = CLIP(1.2, 1, MKT.K, OV1)
A      CL2.K = CLIP(1, 0.8, MKT.K, OV2)
A      CL3.K = CLIP(1, 1.2, SVIR.JK, OV3)
A      CL4.K = CLIP(0.8, 1, SVIR.JK, OV4)
C      OV1 = 1.2
C      OV2 = 0.8
C      OV3 = 1500
C      OV4 = 1120
;
GRAPH1  SV, MKT, P
GRAPH2  SVIR, MKTIR, MKTDR
GRAPH3  MKTR, PR
SPEC    DT = 0.25, LENGTH = 50
END

```

(小玉³⁰⁾)

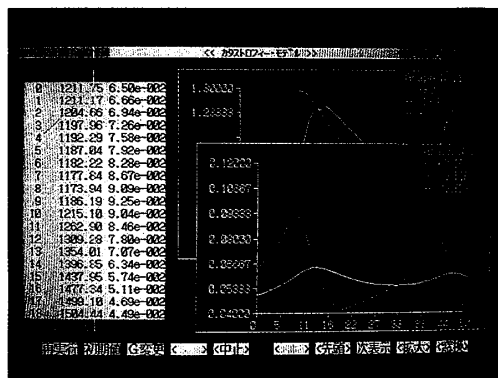


写真1 ゲーミング・ダイナモの画面

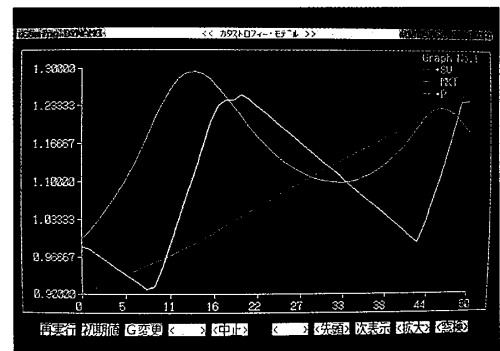


写真2 シミュレーションの結果1

P1-4

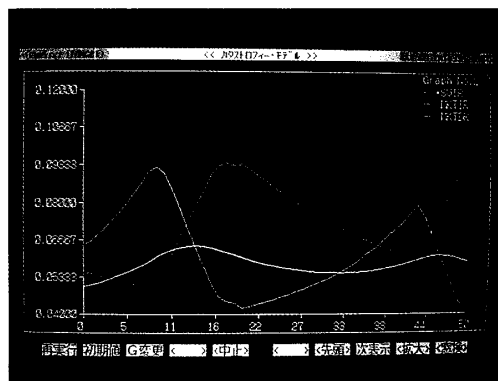


写真3 シミュレーションの結果2

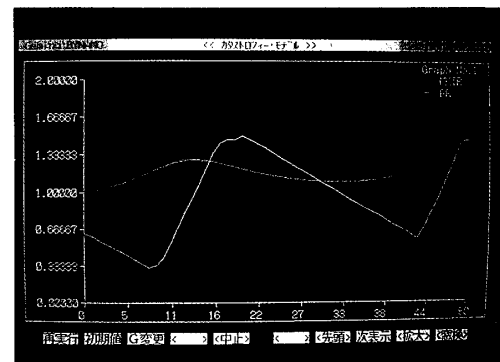


写真4 シミュレーションの結果3

ことができる。写真2では、累積出荷量（黄）、市場性（青）、価格（白）を比較している。写真3では、出荷量（黄）、市場性増加率（青）、市場性減少率（白）を比較している。写真4では、市場性比（黄）、価格比（青）を比較している。これらにより、市場性が高くなるにしたがって、価格が急上昇するが、ある時点で価格が急落することが分かる。

ゲーミング・ダイナモでは、このようにウィンドウに目的の情報を表示できるとともに、写真1に示す変数ウィンドウを利用して、変数の属性値を事例研究し、シミュレーションを継続できる。これらにより意思決定者との親和性を実現している。

7. 結語

人間の情報処理を研究対象とした認知科学や人工知能の研究が進むにつれて、人間の情報処理を補完する人工知能システムに成果がみられ

るようになっている。人工知能は情報科学にとっては永遠の研究課題である。人間を補完する情報システムを人工知能システムと呼ぶにはいささか抵抗のあるところである。人間が知的活動のために機械と対話し、少なくとも知的活動の障害にならないためには、その機械は限りなく人工知能にならざるをえない。

本稿は、社会システムの問題解決環境では、パースン・コンピュータ・システムが意思決定システムであるという立場にある。そうすると定量的情報よりも定性的情報が極めて重要である。ここで理想的設計を行なえたとすれば、理想的問題解決環境は次のようになろう。人間は専ら定性的情報の創造と操作を行ない、機械はその人間の知的活動を支援し、定性的情報の定量的情報への変換では機械はその知的活動を補完し、定量的情報の操作と定量的情報の定性的情報への変換は機械が代替することになろう。そうすると、機械も定性的情報の操作ができる

知識をもたねばならない。その機械はやはり人工知能にならざるをえない。

現段階のゲーミング・ダイナモは、量的情報操作を代替するのみで、理想的問題解決環境とはほど遠い。しかし、社会システムの量的情報処理系としては、もっとも高水準言語であり、一層上は最下層の定性的情報処理系である。問題解決環境の最下層処理系としてはほぼ必要な機能は実現されている。ところでこの定性定量両層を結び付けるには範疇超越を経験しなければならない。システム・ダイナミックスのモデリングは、因果関係に基づく定性モデルの記述である。因果関係の定性モデルを形式操作することは比較的容易であるが、人間が行なうモデリングの経験的知識が陽になっていないために、その形式操作を特化することができない。本稿により、筆者のゲーミング・ダイナモを公開知的著作物にする理由はここにある。モデリングの経験が知識化と共有化されることによって範疇超越支援が可能になるものと思われる。また、この方法論を学生に演習させている。このシステムの研究的利用のみならず、教育的利用も期待している。

筆者（市川）が分担した最後のシステム・ダイナミックスは、東京圏の墓地需要予測³¹⁾であった。現在、墓地の不足が社会問題化しているが、この調査研究は約10年前に行なわれた。それ以後は、知的モデリング・システムに興味を持っていたが、具体的進展はなかった。ところが、1990年7月に米国ニューハンプシャー大学に滞在する機会に恵まれ、この大学には「成長の限界」で知られるメドウズ教授 (D.L.Meadows) がいた。滞在の目的はメドウズ教授が会長を勤める国際会議に出席するためであったが、この会議でシステム・ダイナミックスの研究ネットワークが再構築され国際的研究が行なわれていることを知り、本稿執筆の動機になった。

参考文献

- 1) Miller, GA (1956) The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, (63) : 81-97
- 2) 市川新 (1985) 「マイク・ジェームス著 BASIC で学ぶ人工知能」の訳者ノート。啓学出版。16頁
- 3) 武者小路公秀 (1990) 地球的課題と国際多角交渉：新しいシミュレーションの課題。シミュレーション&ゲーミング, (1) : 2-6
- 4) 中森義輝 (1990) モデリングのためのゲーミング・シミュレーション。シミュレーション&ゲーミング, (1) : 84-88
- 5) 北川敏雄 (1969) 情報学の論理：制御から創造への新次元。講談社。76-80頁
- 6) 草薙裕 (1985) 自然言語とコンピュータ言語。講談社。173-211頁
- 7) Kreutzer, W (1986) System simulation : programming styles and languages. Addison-Wesley Publishers. p. 91
- 8) Goldberg, A and Robson, D (1983) Smalltalk-80. Addison-Wesley. pp. 11-13
- 9) Blanning, RW (1987) A survey of issues in expert systems for managemnet. In : Silverman, BG (ed) Expert systems for business. Addison-Wesley. pp. 24-39
- 10) 北川敏雄 (1977) 情報科学的世界像。ダイヤモンド社。8-9頁
- 11) Checkland, P (1981) Systems thinking, systems practice. John Wiley & Sons. (高原康彦他監訳 (1985) 新しいシステムアプローチ：システム思考とシステム実践。オーム社。180-203頁)
- 12) Jaques, E (1984) Discontinuitis in intellectual development. unpublished paper. (吉川武男訳 (1989) 「経営戦略システム」日経 BP 発行61頁, または、市川新 (1992) パースン・コンピュータ経営意思決定システムの構築：情報技術的視座, 流通経済大学論集26巻3号18-32頁を参照)
- 13) 安西祐一郎 (1985) 問題解決の心理学。中央公論社。108-125頁
- 14) 西田豊明 (1991) 定性推論の考え方とその知的問題解決への応用。情報処理32巻2号105-117頁
- 15) 五十嵐寧史 (1990) 定性的シミュレーションの都市計画分野への適用の有効性について。日本シミュレーション&ゲーミング学会第2回大会発表論文抄録集。32-33頁

- 16) Forrester, JW (1961) Industrial dynamics. M. I. T. Press. (石田・小林訳 (1971) インダストリアル・ダイナミックス。紀伊国屋書店)
- 17) Forrester, JW (1968) Principles of systems. M. I. T. Press.
- 18) Pugh, AL, III (1976) Dynamo user's manual. M. I. T. Press.
- 19) Hanneman, R (1987) Computer-assisted theory building. Sage. pp. 302-317
- 20) 市川新, 棕田實 他 (1976) SD 法によるビジネス・ゲーム・モデルの表現。日本経営工学会秋季研究発表会予稿集。No. 218
- 21) 森敬 (1975) 計量経済分析とシステムダイナミックスの実証分析における比較検討。第1回慶応義塾大学情報科学シンポジウム報文集。
- 22) 小玉陽一 (1973) システム・ダイナミックスをめぐる論争。システム・ダイナミックス。共立出版。pp. 323-328
- 23) Milling, PM and Zahn, EOK (eds.) Computer-based management of complex systems : Proceedings of the 1989 international conference of the system dynamics society. Springer-Verlag.
- 24) Programme of 22nd annual international conference of international simulation & gaming association : Global modeling for solving global problems. sponsosred by the science council of Japan and JASAG.
- 25) 山口昌哉 (1990) シミュレーションと数学。シミュレーション&ゲーミング。シミュレーション&ゲーミング, (1) : 14-19
- 26) Wolstenholme, EF (1990) System enquiry : a system dynamics approach. John Wiley & sons. pp. 25-46
- 27) 宮川公男, 小林秀徳 (1988) システム・ダイナミックス。白桃書房。
- 28) 棕田實, 市川新 他 (1977) FORTRAN によるビジネスゲーム・モデルの要素表現。情報処理学会第16回全国大会予稿集。
- 29) 棕田實, 市川新 (1992) ゲーミング・ダイナモと掲示板システムの制度化。日本シミュレーション&ゲーミング学会第4回大会発表論文抄録集。(投稿中)
- 30) 小玉陽一 (1976) カタストロフィー・モデル。PPP. 2(5) 40-42
- 31) 社団法人国土環境企画協会編 (1982) 大規模宅地開発における墓地需要等調査報告書。住宅都市整備公団。