

<講演記録>

ワールド・ダイナミクスについて†

小 玉 陽 一*

1968年4月、ローマに集まったヨーロッパの約30名の知識人たちは、最近の技術革新にささえられた経済発展にもなつてあらわれてきた、いろいろな社会的不安、人類文化の混乱、人間社会によるジオ・スフェアおよびバイオ・スフェアの汚染と破壊は、人類の将来に危機をもたらすであろうという認識に基づいてローマ・クラブと称する、これらの問題の共通の討論の場を設定した。1970年6月29日、30日の両日、スイスのベルンでローマ・クラブの会合が開かれたが、そこに出席したフォレスト教授は、MIT が過去40年間にわたって積み上げてきた「システム・ダイナミクス」によるアプローチこそ、複雑なソーシャル・システムのダイナミクスを取り扱おうとしているローマ・クラブの人のびとがさがし求めている方法論であることを示唆した。世界ダイナミクス・モデルは、ベルン会議からMITの会議までの2週間に開発されたものである。

いままでわれわれが慣らされてきたエンジニアリング・システムは、ソーシャル・システムとくらべると、より単純なシステムであり、そのシステムを支配している法則なり原理は、客観的に明確化できる。その意味で、エンジニアリング・システムの観察データや知見を整理すると、システムのビヘイビアや構造を再現性をもって押えることができる。ところが、ローマ・クラブ活動の目的からみても、今世紀の後半から次の世紀にかけて、人類が直面しなければならない大きな問題は、ソーシャル・システムに関連したものであることがしだいに認識されてきた。ソーシャル・システムは、人間を含んだシステムで、その最小単位は人間である。人間が二人以上集まれば集団となり、集団が目的をもてば組織となるが、組織には、企業、国立研究所、大学、宗教団体というようにいろいろな形態がある。これらがさ

らに集まれば都市、地方自治体といった、より大きなシステムとなり、さらに国家という大きなシステムとなる。国家の集合体は国際社会で、これに関する問題は当然、ますます複雑なものとなる。

このようなソーシャル・システムの特徴として、次の諸点があげられる。①システム境界をもつ ②因果関係ループに基づく ③フィードバック・ループは多重性をもつ ④複雑な相互依存関係がある ⑤非線型である ⑥直観的にわかりにくい性質をもつ ⑦原因と結果、原因と現象が時間的、空間的に離れている ⑧原因を除去しなければ効果は永続的でない ⑨ソーシャル・システムにおける諸現象は1回生起現象である ⑩ソーシャル・システムのシミュレーションはステップ・バイ・ステップのシミュレーションしかない ⑪人間の能力はシステム観察にすぐれているが、いくつかのファクターが相互作用をしながらダイナミックに変化していく様子を追跡するのに劣っている。

すなわち、ソーシャル・システムは因果律が成り立つ世界であることが前提となっているが、原因と結果が時間的、空間的に非常に離れていることとその非線型な性質のために、現象の真の原因を見いだす場合の人間能力に限界が出てきたわけである。したがって、ローマ・クラブで扱おうとする世界的な規模での好ましくない諸現象にしても、多くの人々の長年の努力にもかかわらず、好転のきざしを見せていない。したがって、システム・ダイナミクスによってこの行詰まりを突破しようという試みがなされた。すなわち、世界モデルの状態変数（レベル変数）は人口、資本投資、天然資源、汚染、農業にふり向けられた資本の五つである。また、これらのレベル変数によって構成される正のフィードバックおよび負のフィードバック・ループは複雑な相互作用を行なっている。図1に参考のために世界モデルIIの基礎となった世界モデルIのフローダイアグラムならびに変数およびパラメータの定義を示す。ここでわかるように、人口が増加すれば生活水準を支

† 1972年3月、月例講演会における講演要旨。

本稿は筆者がすでに発表した文章を再構成して執筆したものである。

* 動力炉・核燃料開発事業団計画管理部。

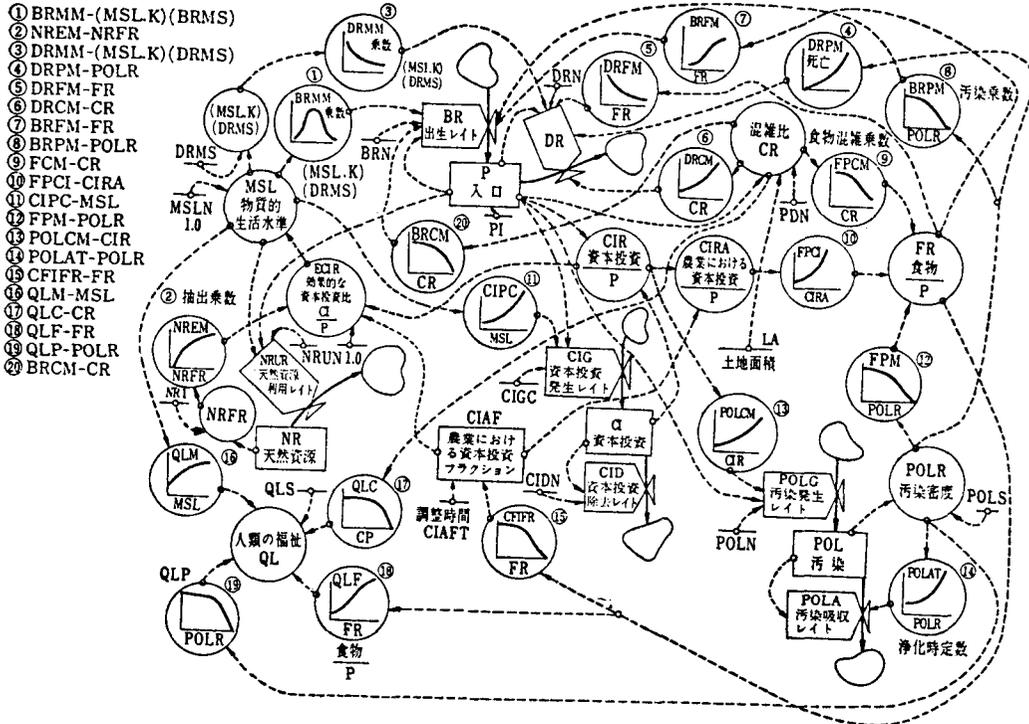


図1 世界モデル1のフローダイアグラムならびに変数およびパラメータの定義

QR	出生レイト (人/年)	FPM	食糧一汚染乗数 (ディメンジョンなし)
BRCM	出生レイト一混雑乗数 (ディメンジョンなし)	FR	食糧比 (ディメンジョンなし)
BRFM	出生レイト一食糧乗数 (ディメンジョンなし)	LA	土地面積 (平方キロメートル)
BRMM	出生レイト一物質乗数 (ディメンジョンなし)	MSL	物質的生活水準 (ディメンジョンなし)
BRMS	出生レイト一物質感度 (ディメンジョンなし)	MSLN	物質的生活水準一正常 (資本単位/人)
BRN	出生レイト一正常 (フラクシオン/年)	NR	天然資源 (天然資源単位)
BRPM	出生レイト一汚染乗数 (ディメンジョンなし)	NREM	天然資源抽出乗数 (ディメンジョンなし)
CFIFR	食糧比で表わされた資本フラクシオン (ディメンジョンなし)	NRFM	天然資源残存フラクシオン (ディメンジョンなし)
CI	資本投資 (資本単位)	NRI	天然資源一初期値 (天然資源単位)
CIAF	農業資本投資フラクシオン (ディメンジョンなし)	NRMM	天然資源一物質乗数 (ディメンジョンなし)
CIAPT	農業資本投資フラクシオン調整時間 (年)	NRUN	天然資源利用一正常 (天然資源単位/人/年)
CID	除去される資本投資 (資本単位/年)	NRUR	天然資源利用レイト (天然資源単位/年)
CIDN	除去される資本投資一正常 (フラクシオン/年)	P	人口 (人)
CIG	資本投資発生レイト (資本単位/年)	PDN	人口密度一正常 (人/平方キロメートル)
CIGC	資本投資発生係数 (ディメンジョンなし)	PI	人口一初期値 (人)
CIPC	一人あたりの資本投資 (資本単位/人/年)	POL	汚染 (汚染単位)
CIR	資本投資比 (資本単位/人)	POLA	汚染吸収 (汚染単位)
CIRA	農業資本投資 (資本単位/人)	POLAT	汚染吸収時間 (年)
CR	混雑比 (ディメンジョンなし)	POLCM	汚染一資本乗数 (ディメンジョンなし)
DR	死亡レイト (人/年)	POLG	汚染発生 (汚染単位/年)
DRCM	死亡レイト一混雑乗数 (ディメンジョンなし)	POLN	汚染一正常 (汚染単位/人/年)
DRFM	死亡レイト一食糧乗数 (ディメンジョンなし)	POLR	汚染比 (ディメンジョンなし)
DRMM	死亡レイト一物質乗数 (ディメンジョンなし)	POLS	汚染水準 (汚染単位)
DRMS	死亡レイト一物質感度 (ディメンジョンなし)	QLC	生活の質一混雑 (ディメンジョンなし)
DRN	死亡レイト一正常 (フラクシオン/年)	QLF	生活の質一食糧 (ディメンジョンなし)
DRPM	死亡レイト一汚染乗数 (ディメンジョンなし)	QL	生活の質 (満足単位)
ECIR	有効資本投資比 (資本単位/人)	QLM	生活の質一物質 (ディメンジョンなし)
FCM	食糧一混雑乗数 (ディメンジョンなし)	QLP	生活の質一汚染 (ディメンジョンなし)
FPCI	潜在食糧一資本投資 (ディメンジョンなし)	QLS	生活の質水準 (満足単位)

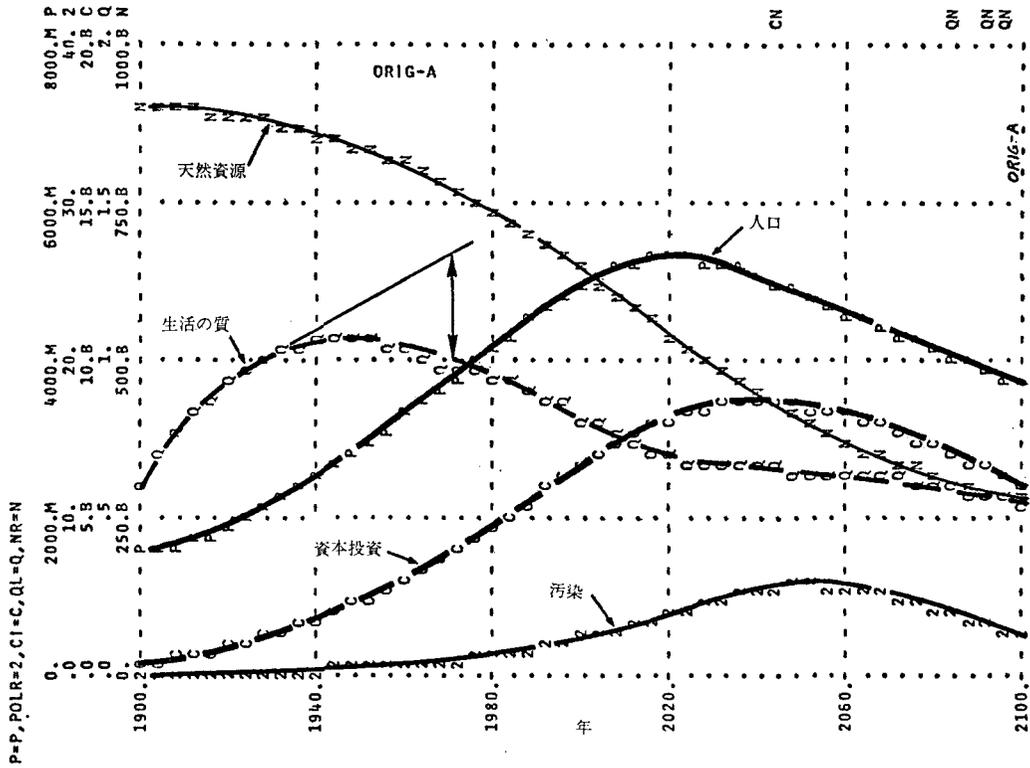


図2 世界モデルの基本挙動、産業活動および人口が天然資源の減少によって抑制されるモードが示されている

えるための産業活動は盛んになり、鉱物のような天然資源が投入されることになる。

したがって汚染は増大し、天然資源は減少する。また、人口の増加によって一人当たりの食糧はだんだん乏しくなる。このような汚染の増大、食糧の欠乏は人口の増加を抑制する。また、これらのレベル変数の中で人口および資本投資は、正のフィードバック・ループを形成している。われわれは、地球という有限な空間の中に閉じ込められているため、このような正のフィードバックに基づく人類の増加現象は、やがて自然の壁に突き当たることになる。

このことは世界モデルのシミュレーション・ランの結果、図2で示されるように明らかとなった重要な結論である。この図でたとえば人口の動きをみると、人口は1900年の16億5000万人からしだいに増大し、1970年で38億、2020年では55億でピークに達している。汚染は、2060年にピークに達し、1970年のレベルの約6倍となる。生活の質は1960年頃ピークに達する。生活の質についての見込みと現実のギャップは矢印で示されている。

ここで生活の質についてふれてみよう。生活の質は、ここでは、世界システムの性能の尺度として用いられている。それは、標準的な生活の質に、物質的生活水準、混雑、食糧および汚染から導き出される四つの乗数をかけて計算される。標準的な生活の質 QLS は、1970年の値をとり、1と定義されている。四つの構成要素のインプットは、それらが生活の質の異なる構成要素の緊急度を適切に反映するような方法で導き出され、組み合わせられている。

ここで一番大きな問題は、ある日突然に、自然のコントロールがききはじめたという状態は、人間の側からのコントロールがきいていない状態を意味するので、場合によっては人類の滅亡につながる可能性があるということである。しかも、この MIT モデルで強調されている点は、そのようなオーバーシュート現象は、人類が現在の状態に対して英知に基づく行動をとらなければシステムの構造上必ず起こってくるということである。したがって、自然の制約が加えられないうちに五つのレベル変数を平衡状態にもっていくためには、われわれはどうすればよ

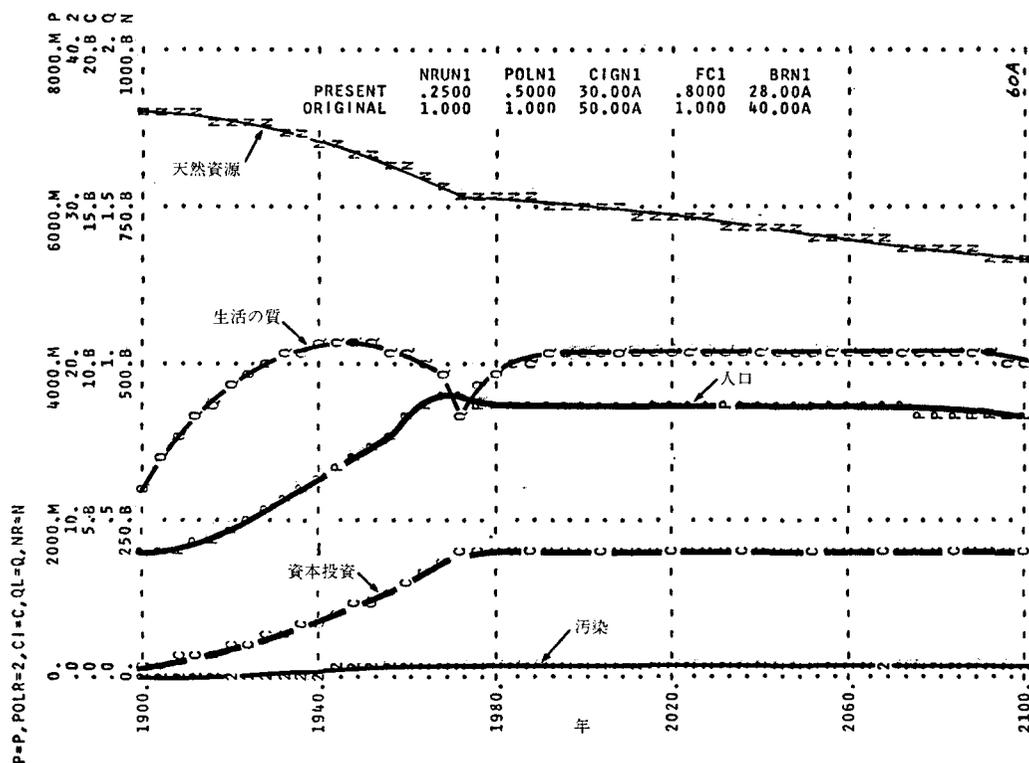


図3 平衡条件をとったときの世界モデルの挙動

いかという問題を解決しなければならない。このモデルでは、人類の前途はけっして灰色であるとはしていない。次に示すようなポリシーがうまくとられるならば、世界システムを図3で示されているような平衡状態に導き、安定させることができることを示唆している。すなわち、1970年以降、①天然資源利用レートを75%、②汚染の発生を50%、③資本投資活動を40%、④食糧生産活動を20%、⑤出生レートを30%、それぞれ減少させることの必要性を示している。

世界モデルを動かして得られた重要な結論は、「われわれは、地球という有限な空間の中に閉じ込められているのであるから、人類および資本の増加現象はやがて、自然の壁に突き当たることになる。しかも、技術革新によって資源の利用効率や土地の生産性を上げたとしても、この壁に突き当たる時期が、何十年か延期されるにすぎない。自然の制限に対するオーバーシュート現象は、モデルの構造上何もしないでいれば必ず起こる」というものである。

この結論に対しては、賛否がわかれるところであ

るが、ここで問題点を整理する意味で、ソシオ・スフェア、テクノ・スフェア、ジオ・スフェアおよびバイオ・スフェアの四つの領域と、ソシオ・スフェアとテクノ・スフェアで構成される社会技術空間、バイオ・スフェアとジオ・スフェアで構成されるエコロジー空間にわたって考察する。

さて、ここで四つのスフェアの関係およびSTBGによるマトリックスを作成すると、表1のようになる。ここで、世界モデルで取り扱われたレベル変数に関連あるグリッドをみると、経済機構—工業資本、サービス資本、食糧供給—農業資本、資源供給—資源、スペース圧迫—人口、土地、廃棄物、汚染物質—汚染となる。

したがって、世界モデルは、表1のソシオ・スフェア（社会領域）、テクノ・スフェア（技術領域）、バイオ・スフェア（生物領域）、ジオ・スフェア（地球領域）の四つでつくられる。STBGマトリックス中の部分を取り扱っているにすぎないことになる。しかも、ソシオ・スフェアには、世界、国家、企業および個人といった諸レベル、テクノ・スフェアに

表 1

から	S	T	B	G
S	政治機構 経済機構	研究開発 活動	スペース 圧迫	廃棄物 汚染物質
T	人間活動 の可能性 の増大	テクノロ ジー・ト ランスフ アー	スペース 緩和	廃棄物 汚染物質 コン ト ル
B	食糧供給	バイオ・ ニックス	食物連鎖	分解・呼 吸
G	資源供給	自然法則 原理	光合成呼 吸	陸海空 サイクル

は、機器と部品、材料と物質、分子と原子および素粒子といった諸レベル、バイオ・スフェアには、個体、器官、細胞および分子、原子といった諸レベル、ジオ・スフェアには、地表、地殻、マントル、核といった諸レベルがあることを考慮すると、表1のSTBGマトリックスは、垂直的な階層構造もつことになる。

したがって、厳密な意味での世界モデルは、このような立体マトリックスの中で現象的に意味のある各サブ空間のモデルを構築し、それらの相互作用を解析できる総合モデルでなければならないと思われる。

たとえば、S-S:政治機構、経済機構をとりあげてみると、国際政治機構、国際経済機構、国内政治機構、国内経済機構、地方自治機構、地方経済機構……といった形で、サブ・モデルを展開しなければならない。食糧問題、資源問題、人口問題、土地問題および廃棄物問題にしても同じようにレベルを考慮したサブ・モデルを構築しなければならない。しかも、世界モデルでは、サブ・モデル間の水平的な相互作用だけでなく、垂直的な相互作用を組み込まなければならないので、これらの関係は、いっそう複雑なものとなる。しかし、このような複雑な関係を方向づけるガイド・ラインがないわけではない。世界モデルは、前述のようにB、G-型のモデル、すなわち、エコロジー空間型モデルに近いモデルであるため、エントロピーの増大に伴う人類の危機の基本モードとそれを回避するための平衡条件を描くことには成功しているが、平衡条件の具体性については、モデルの集約度が高いために十分検討することができない。なぜならば、ポリシーを具体化する条件は、それぞれの国の政治、法制、文化、習慣、技術水準などに依存しているからである。

したがって、具体的なポリシーを探索する段階になると、世界モデルは、社会技術空間型モデルへと質的变化をとげる必要がある。この点を、再び、表1でみてみると、研究開発活動、人間活動の可能性の増大、テクノロジー・トランスファー、などのグリッドについて、レベル構造を考えたモデルを構築する必要がでてくる。その他のグリッドのあるものについては、MIT チームもすでに、有限な資源のライフ・サイクル発見モデル、環境における水銀の流れモデル、環境における DDT の流れモデル、栄養過多のダイナミックス、労働力の移動と吸収のダイナミックス、成長予想のダイナミックス、都市と地方への移住ダイナミックスといったサブ・モデルを開発している。ここで、社会・技術空間型モデルを開発する場合に考慮しなければならない要素を、いままでなされた世界モデルについての議論のなかからひろいだし、ST-STマトリックスのグリッドと対応させると表2のようになる。

表 2

政治機構・経済機構	税制、多数家族と社会保障、グロスナショナル・パピネス高度の計画経済、物質消費抑制、商品の耐久性、CR 証明制度、無公害企業、CR 基準、ガット規定の改訂、新しい富の概念、政治制度の転換、経済制度の転換、南北格差、低開発国平衡状態の社会、現実の成長と個人レベルでのギャップ、利潤追求の良否、成長の新しい意味、システム目標、システムの世界、非常に強力で能率的なコントロール、強い権力。
研究開発活動	汚染防止技術、無公害製品開発、資源節約型技術、循環完結型技術。
人間活動の可能性の増大	新耐乏生活、人間の意識の転換、自由な人間の精神活動。
テクノロジー・トランスファー	利潤、成長のためのテクノロジーから人類生存のためのテクノロジー、自然破壊を伴わないテクノロジー。

さて、最後に、S-Sグリッドで政治機構、経済機構の点を考察してみる。世界モデルがどのようなすくれた情報を生みだそうとも、それが実行される現実的基盤がなければ人類の危機が回避される可能性は少ない。

現在の世界では、強力なコントロールがなされる場合は、主権をもつ国家単位に設定されており、国際機関である国際連合は世界モデルの平衡条件を具体的に各国に強制しうる立場にない。したがって、社会技術空間型モデルの開発が進み、危機回避のための具体的な政策が明らかになるにつれて、国際的にも、実効性のある動きがなされなければならない。

たとえば、世界改造条約といったものを各国が締

結し、実行するのもその一つのアプローチであると考えられるが、その前に現実の世界に存在している資本主義とか社会主義とかいった従来のイデオロギーが、人類の危機問題のための新しいイデオロギーにとってかわらねばならない。

次に、フォレスト教授の世界モデルⅡについての見解を引用してみる。

「次の問題は、世界の力のモデルによって示され動的挙動にもとづいて提起されたものである。これらの予備的解釈は、世界システムの構造と詳細についての仮定をもっと徹底的に研究することによって、さらに深く検討され確かめられる必要がある。

世界相互作用のダイナミクスにおける主要な研究プログラムは、ローマ・クラブの後援によって進行中である。さらに仕事が進めば、現在の関連や強調点を当然変更するだろうし、また新しい洞察や明瞭化を進展させることは確実である。

1. 工業化は、人口よりも世界エコロジーにおけるもっと基本的な攪乱力であるかもしれない。事実人口爆発は、技術と工業化の結果とするのがおそらく最もすぐれた見方であろう（医学や公衆衛生は、ここでは工業化の一部に含まれる）。
2. 次の世紀の終わりまでに、人間は四肢の矛盾——天然資源不足による近代工業社会の抑制、汚染によってつくられた変化にもとづく世界人口の衰退、食糧不足による人口制限あるいは戦争、疾病ならびに物理的および心理的混雑によって引き起こされる社会的緊張にもとづく人口崩壊——の選択に直面するかもしれない。
3. われわれは、広く認められている不快感にもかかわらず現在、生活の質は平均して、歴史上かつてないほど高く、将来得られるものより高い“黄金時代”に生きているのかもしれない。
4. 人口コントロールに向けられている勧告やプログラムは、本来自滅的なものかもしれない。もし、人口コントロールによって希望されるように、一人あたりの食糧供給や、物質的生活水準を高める結果が出はじめれば、このような改善こそ圧力を緩和し、人口成長を復活させる引金となる力を発生させるかもしれない。
5. 近代工業社会の高度の生活水準は、増大する人口を追い越すことを可能にしてきた食糧および物的商品の生産の結果として達成されたもの

であるよう思われる。しかし、農業が空間的限界に近づき、工業化によって天然資源の限界が近づき、そして農業と工業化によって、汚染の限界が明らかになるにつれて人口増大が、経済成長に追いつく傾向がでてきた。したがって、人口は“生活の質”が非常に低下して、人口を安定させるようになるまで増大する。

6. 現在の開発途上国が、現在の工業化諸国によって実際に示されている生活水準に達する現実的な希望はないように思われる。先進国の各人が世界環境システムに与えている汚染および天然資源の負担は、現在、開発途上国の人間一人によって発生させられている負担よりも、おそらく20倍ないし50倍も大きなものであると思われる。開発途上国は、現在の先進国の4倍の人口を持っているので、工業国家によって標準と定められてきた経済水準にまで彼らを向上させることは、天然資源および世界環境に対する汚染負担が10倍に増加することを意味するだろう。すでに土地、大気とくに海洋で発生している破壊に注目すると、生活水準のそのような上昇を取り扱う能力はないように思われる。事実、先進国と開発途上国の間の現在の不釣り合いは、開発途上国の改善によるのと同じく、先進国の衰退によっても均一化されるかもしれない。
7. 高度の工業化水準にある社会の維持は不可能であるかもしれない。もし、社会が自己の依存している天然資源を消耗するとすれば、自己破滅になるかもしれない。あるいは、減少する天然資源に対する無限の置換が可能であるとしても、汚染や環境権についての新たな国際紛争が、平均的な世界規模の生活水準を1世紀前の水準にまでひきもどすかもしれない。
8. 100年ぐらいの長期的視点からすれば、工業化をみざす開発途上国の現在の努力は賢明でないかもしれない。開発途上国は、工業化国にくらべて今や、環境との究極的な平衡状態により近づいているのかもしれない。現在の開発途上国は、先進国にくらべて、きたるべき世界的規模の環境および経済的圧力に生き残るためのよりよい状況におかれているのかもしれない。世界人口の崩壊をもたらすのに十分なほど強力ないくつかの力のうちの一つが起ってきても、開発途上国の苦しみは、自国が負担することに

なる衰退の程度にくらべて、はるかに小さなものとなるだろう。なぜならば組織化、総合化および専門化の進んでいない経済は崩壊に対して、おそらくそう脆弱ではないと思われるからである」。

さて以上のように、MIT で開発された一連の世界モデル、I. I-A, I-B, II. III-E, III-Gのうち、世界モデルIIに基づいて、ワールド・ダイナミックスは書かれているが、その後MITのグループでさらに掘り下げられた世界モデルIII-Gによって導き出された平衡条件と基本的な差がないことは、最初にフォレスター教授が描いた世界モデルのシステム構造の妥当性がしだいに確かめられつつあることを意味している点、興味深いものである。

いずれにしても、ワールド・ダイナミックスで示された考え方が、よりすぐれたモデルを構築する活

動への契機となり、われわれのよりよきソーシャル・システムの理解と、よりよき社会の実現に貢献することを期待するものである。

参考文献

- [1] 小玉陽一, “ワールド・ダイナミックスについて”, 学鏡, 68, 11 (1971), 80-81, 丸善.
- [2] 小玉陽一, “ワールド・ダイナミックスの新展開”, *bit*, 4, 6 (1972), 34, 共立出版.
- [3] 小玉陽一, “ローマクラブ・レポート(1)人類生存のために国際的措置を”, 月刊ペン(1972年7月号), 90-91.
- [4] ジェイ W・フォレスター著, 小玉陽一訳, ワールド・ダイナミックス, 日本経営出版会, 1972, p. 13~14, p. 72, p. 118.
- [5] ジェイ W・フォレスター著, 小玉陽一訳, アーバン・ダイナミックス, 日本経営出版会, 1970, p. 111~116.