

SD マクロ経済モデルの展開

Extensions of macroeconomic modeling & simulation

小林秀徳 Hidenori Kobayashi

中央大学

kobaken0@fps.chuo-u.ac.jp

Abstract : I present a system dynamics model of the national economy of Japan. The model outputs those predictions of capital to production ratio, additional demand and capital stock, which are useful to both historical research and policy studies. It uses official statistics and mathematical models provided by the traditional economics, which I call mental model of the fictitious, benevolent despot of the economy. My sincere recommendation is that in order to circumvent future economic crises the revision of his model is required. The model of calibration-simulation-process in this paper shall help people revise it.

キーワード：危機、方法論、mental model、calibration、simulation

要旨：国民経済計算統計と乗数加速度 model を出発点として、prototype 作成、calibration、simulation を経て、資本係数、追加需要、資本変動の予測を基本的 output とするひとつの SD model を提示する。これらの output の正しい利用法を含む方法論上の議論とともに、提示された model の意義について論じ、危機を乗り越えるための mental model の改訂を示唆する。*

1. 問題の設定

1. 1 危機の時代

1970年代後半に System Dynamics Group が national model の研究を始めたとき、世界経済は危機と言われていた。経済成長を政策の基調とした macroeconomic model が、formal も mental も込めて、危機の時代に相応しくないと考えられたことが、SD modeling & simulation への需要を弥が上にも高めたのである。当時、世界同時不況の只中であって、西独と共に二国のみ世界経済の牽引車と呼ばれた日本は、技術革新に裏付けられた強い競争力と成長性の故に、却って、この需要を摂り損ねたと言える。それ以後、世界経済は決して危機を克服しては居らず、日本経済も再三にわたって逆境に陥ったが、21世紀初頭の構造改革においてさえ、1945年以来何度も経済的困難を乗り越えて来たではないかという、ある種の伝統的共有感覚の故でもあろうか、national model の改訂は学会の主要な theme となるに到らなかった。今漸く、30年の遅れを経て、日本 chapter としての研究が緒についたばかりであるが¹、危機の認識が modeling 自体の見直しにおよぶほどの深刻な不況を抱えている今日の状況を反映したものとも言い得る。危機の時代を、多重 loop 構造として記述される system の動学的帰結として理解することを支援し、危機を乗り越える政策研究に裨益するよう、macroeconomic model を、formal も mental も込めて改訂することは、正しく system dynamics の今日的課題であると言えることができる。

本稿の目的は、この課題と取り組む議論のための出発点として、ひとつの system dynamics model を示すことである。ただし、それは概念的な理論上の操作に終始するのではなく、過去 30 数年間の危機の時代 (1970~2007年) における国民経済の統計 data と両立し得るものとして提示されなければならない。かつて Forrester の *World Dynamics* は「data なき計測」と揶揄された²。それに対する反論とともに、ここではこの議論には触れることなく、代わりに「data ある計測」の SD modeling を例示することによって代替案を示すことを試みる。

1. 2 方法論の問題

国民経済を SD modeling & simulation によって議論するためには、一国の経済を closed model として建てることが要求される。このことは一国の経済が closed economy であると主張することを意味しない。いかなる国の経済

* 謝辞：匿名査読者諸兄に謝意を表す。

¹ 『システムダイナミクス』No.4 (2005年) に日本経済モデル研究分科会「SDによる日本経済モデルの検証」が特集されている。

² 揶揄したのは Nordhaus [9]である。反論は Forrester [5]を参照のこと。

も、国境を越えた資源移動によって常に開かれているという意味で open system であるが、その故を以て、唯一の The World Model 以外はすべて closed model になり得ないなどということはない。この種の holism に対する批判は常に存在するのであるが、本稿で取り扱う closed 性は、feedback 構造がもたらす動学的変動性を system 内の各種遅れがいかにか増幅するかを観察する上で、必要とされる境界条件の設定、という以上の意味をもたない。この点に関し方法論上の議論に深入りすることを避けるために、具体例を述べてこの節を閉じておくことにする。

例えば：図1の因果 loop 図の左半分は閉じた loop になっているが、右半分は閉じていない。これが適正在庫

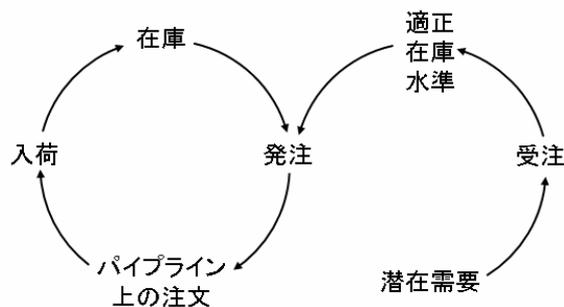


図1 因果 loop 図

水準が model 外部で決定された場合の調整と遅れの model として提示される場合には、それは closed model であると言える。ただし、適正在庫水準はこの system にとっての環境に属する受注の如何によって常に変化するものであるから、それは同時に open system であると言える。

したがって、これが受注による発注の決定 model として提示される場合には、この model では十分ではないと言わなければならない。そこで SD approach は更に因果 loop を検討せよと示唆するのである。この示唆を「model が closed になっていない」と表現する。省略部分を起こせば「受注

が発注を決定する model として closed model になっていないから SD model として提示するには資格十分でない」と示唆していることになる。その場合も、左半分の調整と遅れの model としての closed 性は依然として保持されているのである³。

一国の経済は open system であるが、これを国外需要がいかにか国内総生産を決定するかの model として建てるのではなく、消費・投資の決定が資本の自律的変動を導く stock・flow 構造に於いて、耐用年数・資本係数・調整期間等々といった指数遅れ parameter が、いかにかその変動性を増幅し、経済の成長・減衰によってもたらされる危機に干渉するかを議論するための modeling & simulation を実施する用具として建てるのであれば、ひとつの closed な model として示し得る。本稿はこのことを実例を以て示すための試みであると言うこともできる。

2. macro 経済 model の作成

本稿の macro 経済 model の提示は、SD 最大の merit である transparency を最大限に引き出すために、その作成手順にしたがって示すことにする。手順は以下のとおりである：

- Step 1 統計 data の収集
- Step 2 prototype 作成
- Step 3 calibration
- Step 4 model 提示
- Step 5 simulation

2. 1 統計 data の収集

一国経済の集計量の data は政府の公式統計が容易に手に入る。政府発表を鵜呑みにすることは必ずしも科学的な態度とは言えないが、不信をいだくべき特段の事情がある訳ではない。いずれ、日本以外の各国経済にも同じ model を適用して理論を

表1 日本の国内総生産

	総生産	民間消費	政府支出	投資	住宅投資	在庫純増	輸出	輸入
1970	73,068,593	35,153,721	7,781,194	20,802,025	5,679,385	2,531,361	7,909,350	6,985,280
1971	80,397,071	39,625,758	9,159,195	21,768,741	6,325,933	1,156,758	9,432,424	7,254,379
1972	92,046,204	45,731,357	10,750,152	24,253,441	7,791,533	1,232,056	9,758,633	7,644,978
1973	112,074,142	55,250,479	13,317,020	31,672,596	9,943,880	1,800,383	11,267,438	11,261,068
1974	133,737,891	66,746,216	17,459,012	36,746,573	10,727,856	3,310,086	18,219,016	19,256,845
1975	147,768,217	77,550,538	21,238,710	37,230,507	11,693,804	360,921	18,941,685	18,919,346
1976	165,945,455	87,655,188	23,416,754	39,227,641	13,571,463	972,724	22,534,277	21,246,839
1977	184,922,568	98,008,698	26,021,278	42,340,705	14,562,074	1,152,772	24,256,230	21,267,239
1978	203,633,786	107,951,561	28,174,075	46,998,786	16,168,023	882,124	22,680,467	19,173,845
1979	220,711,683	119,104,326	30,646,946	55,036,932	16,288,958	1,654,971	25,573,141	27,628,521
1980	239,270,877	129,403,873	33,615,904	61,493,980	15,573,301	2,438,868	32,817,000	35,036,100
1981	257,208,358	137,529,061	36,240,480	64,348,875	15,897,004	1,327,321	37,846,400	35,927,100
1982	269,971,566	147,504,206	38,569,558	64,849,932	16,098,108	1,119,252	39,190,600	37,341,300
1983	280,810,135	155,259,147	40,978,946	63,960,180	15,591,072	145,877	39,125,400	34,258,200
1984	298,819,804	163,491,111	42,980,505	67,619,880	15,717,983	990,092	44,901,600	36,865,500
1985	321,260,919	173,061,284	44,934,703	73,784,436	16,392,133	2,106,359	46,176,600	35,137,200
1986	336,287,065	180,201,683	47,092,557	76,221,794	18,007,174	1,552,405	38,058,200	24,777,300
1987	350,045,409	188,702,036	49,342,561	79,242,674	21,804,239	450,268	36,180,200	25,919,100
1988	376,577,487	199,400,492	51,623,351	90,384,337	24,375,514	2,667,776	37,430,600	29,191,400
1989	405,655,395	213,678,589	54,722,782	102,806,878	25,373,694	2,978,536	42,272,900	36,035,800
1990	437,022,851	229,650,548	58,573,931	114,986,744	27,262,730	2,538,517	45,863,100	41,689,900
1991	464,934,338	242,649,906	62,673,936	122,729,843	26,340,788	3,179,341	46,667,900	39,120,900
1992	477,105,647	252,898,925	66,151,646	121,290,209	25,494,122	1,006,212	47,288,100	36,890,500
1993	480,820,976	258,824,377	68,998,308	115,791,780	26,214,919	296,232	44,109,000	33,343,500
1994	486,551,700	267,137,000	71,567,800	110,604,523	28,065,477	-706,100	44,269,700	34,386,700
1995	493,588,100	271,655,700	74,663,400	111,643,323	26,446,277	2,221,700	45,230,100	38,272,400
1996	504,261,900	278,563,500	77,341,100	113,530,668	29,376,732	2,911,200	49,560,600	47,021,800
1997	515,249,100	284,386,900	78,963,100	116,248,521	26,653,979	3,239,200	56,073,600	50,316,100
1998	504,842,900	282,526,900	80,304,000	108,125,802	22,433,298	2,009,000	55,051,000	45,607,000
1999	497,628,600	283,880,100	82,207,200	104,966,614	21,825,886	-3,143,600	51,143,500	43,251,100
2000	502,989,900	282,772,200	84,941,700	105,225,200	21,408,900	1,326,400	55,255,900	47,940,400
2001	497,719,700	284,216,600	87,122,400	103,026,088	19,778,812	401,600	52,567,000	49,392,800
2002	491,312,200	283,253,900	88,305,600	95,861,409	18,472,091	-992,700	55,829,100	49,417,200
2003	490,294,000	281,791,000	88,502,600	93,931,072	17,851,528	242,300	58,882,400	50,906,900
2004	498,328,400	284,428,400	89,468,000	95,134,812	18,023,688	1,647,400	66,286,300	56,660,300
2005	501,734,400	285,935,600	90,601,800	99,274,480	17,610,420	1,356,100	71,912,700	64,956,700
2006	507,364,800	289,593,600	90,703,300	100,584,648	17,881,952	2,252,800	81,756,300	75,407,800
2007	515,804,800	290,445,000	92,417,200	104,229,129	16,441,271	3,639,900	90,830,400	82,198,000

³ 調整と遅れの model については小林[16]を参照のこと。

日本経済のみを取り扱う場合であっても、統計は世界標準である方が望ましい。この要求によりここでは OECD 統計を用いることとした。表 1 の総生産 data は 1970~2007 年の国民支出に基づくもので、各年価格で測られている。単位は百万円。出典は OECD 統計を <http://stats.oecd.org/WBOS/index.aspx> より Excel 表形式で download したものである。

表 1 の data を table の縦軸として与え、table 関数として読み込み、plot させると図 2(a)のような折れ線 graph が得られる。方程式は次のとおり：

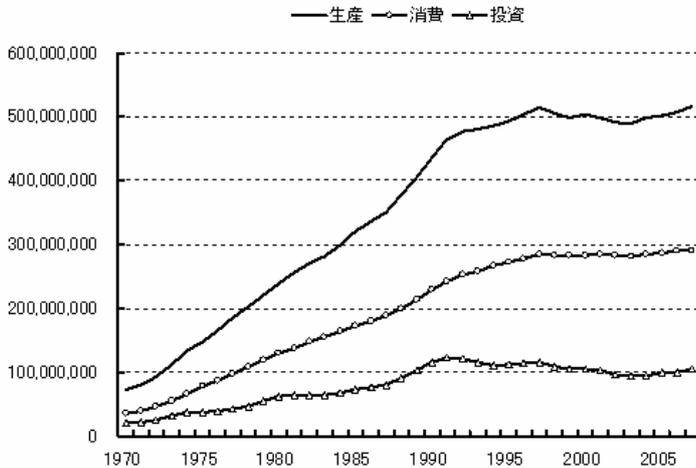


図 2(a) GDP 民間消費 設備投資 1970~2007 各年価格

と同じ統計を用いて、生産と利子率と物価とを内生化した SD model より 21 世紀日本経済を展望したが、ここでは政策変数である通貨供給量を成長率に合わせて増加させるという simulation 上の便宜的措置が採られている。さらに、IS 曲線と LM 曲線の交点へと向けての生産と利子率の調整が、指数遅れにしたがう適応的行動となって現れる、という仮説が恣意的に導入されている。いずれも、経済学的見地からは疑問が提出されており、詳細な議論の進展が望まれるところであるが、ここではこの問題に深入りすることを避け、実物経済のみに視野を限定したい。その理由は、1995 年以降の国際金融部門に於ける大きな変化が、macro 経済 system の stock・flow 構造がもたらす固有の変動性を見えにくくしている、当にその期間に、図 2(a)の生産の graph に見られる経済停滞を抱えているのであり、system 環境の変化に付随する短期的な不具合と、実物経済がもつ構造的・長期的な変動性とを分離して見極めるためには、先ず以て、変化を受け入れる側の system 構造が解明されていなければならないと考えるからである。

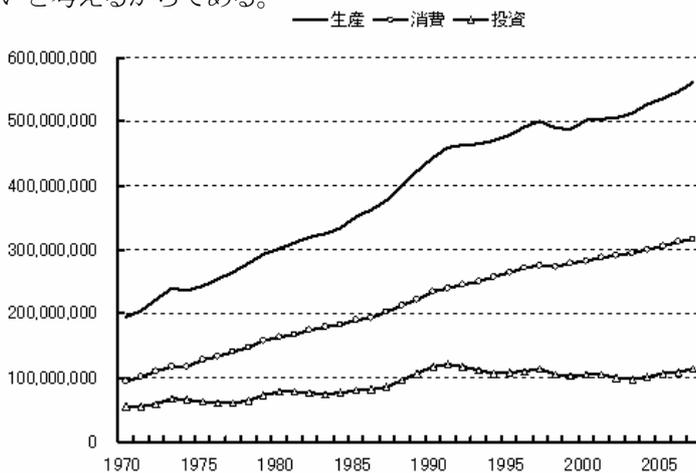


図 2(b) GDP 民間消費 設備投資 1970~2007 固定価格

準拠すべき OECD 統計には 2000 年を基準年とする固定価格で評価し直した data も提供されているが、各集計量の deflator が異なるために、実物の総供給量である総生産と、実物の総需要を構成する民間消費+政府支出+設備投資+住宅投資+輸出-輸入+在庫純増との間の有意的な一致は望むことができない(各年価格の場合は統計上の不突合部分を除いて一致していることが確かめられる)。

ここでの目的は、これから建てる実物経済のモデルを現実の統計 data によって検証することであるから、これでは具合が悪いので、deflator を調整してこの問題を迂回することにした。元の統計による固定価格の消費および投資と deflator 調整後の消費および投資を同じ座標軸の上に描くと図 3(a)のようになる。また総供給と総需要との

得られる。方程式は次のとおり：

A 生産=TABLE(総生産,TIME,1970,2007,1)

A 消費=TABLE(民間消費,TIME,1970,2007,1)

A 投資=TABLE(設備投資,TIME,1970,2007,1)

N TIME=1970

PLOT 生産,消費,投資

SPEC DT=.25/LENGTH=37/PRTPER=1/PLTPER=.25

DT=0.25 としたことにより、元々は年 data であったにも拘わらず、途中を線形補間して四半期毎に年間 flow を plot している。

これは SD で data を取り扱う場合のひとつの特色と言えるものであるが、単位時間は飽くまで年であることに注意しなければならない。

かつて、小林[17](2005)は 2001 年までのこれ

各年価格で評価されている経済変数を実物の変動に変換し直すために、1970~2007 年の各年の変数を、すべて 2000 年の固定価格で評価して、物価の変動による見かけ上の差を取り除くと、図 2(b)が得られる。以下ではこれを実物経済の指標として取り扱うが、もちろん、そこには集計上の問題が残る。

各年の物価水準を基準年を 1 とする物価指数で表すには、市場 basket の価格変化を推定すれば足りるが、消費と投資では basket の中身が異なっている。したがって消費、投資各々を固定価格で表示するための deflator も各々異なった系列となるはずである。

差を不突合としたときの、調整前後の graph は図 3(b)のようになる。

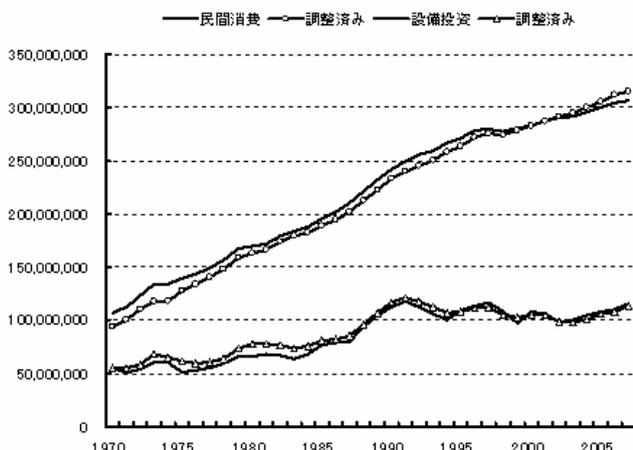


図 3(a) deflator 調整済み vs.元 data 消費および投資

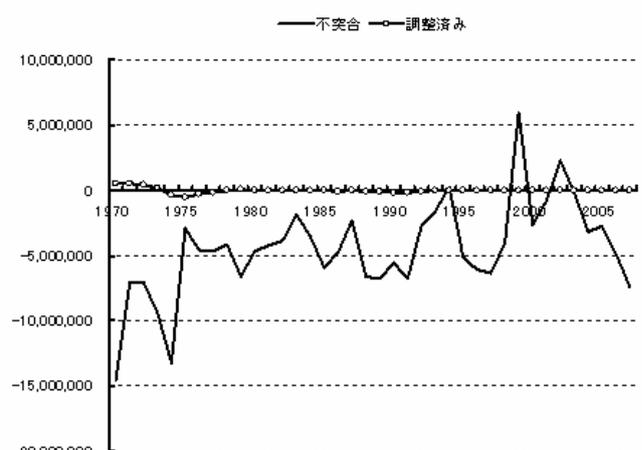


図 3(b) deflator 調整済み vs.元 data 不突合

基準 deflator=1 を 2000 年 (data 系列の後の方) にとっているの、早い時期の乖離が大きくなっているが、図 3(b)に見られるとおり、不突合はほとんど零に近く、調整済み系列を実物経済を現すものとして採用することで、ひとまず、満足しておくこととする。ここでの目的は、日本経済の統計 data1970~2007 年を用意した上で、日本経済の macro model を作成することである。指数論に拘ることは、ひとまず先延ばしにして、次の step へと進みたいと思うからである。

2. 2 prototype 作成

modeling の最初の step は先ず原型を「何らかの理由で意味あると考えられる」形に捨てることである。ここに言う「意味」は何であっても良いが、本来は意思決定者の mental model と両立し得るという意味を採用すべきことは言うまでもない。macro の意思決定者は集計的な国民ないし仮想的な君主であって、いずれも全知全能の神ではない。したがってその mental model は誤りを含むものである。model 定式者たる system dynamist はこの意味の意思決定者との架空の対話を通して model の形式を整える。ここでは prototype として以下のものを採用する。これは筆者が、過去 30 年間、学生、businessman、社会人大学院生を対象に SD の講義をする際、初回の冒頭にいきなり呈示してきたものであり、非専門家への伝達性が高いと体験的に判断される model である。

L	資本 .K=資本 .J+DT×(投資 .JK-除却 .JK)
R	投資=新規投資+更新投資
A	更新投資=資本/耐用年数
R	除却=更新投資
A	新規投資=未実現投資/遅れ
L	未実現投資 .K=未実現投資 .J+DT×(計画 .JK-実現 .JK)
R	計画=(必要資本-資本)/調整期間
R	実現=新規投資
A	必要資本=(需要+追加需要)×資本係数
A	需要=消費 .K+投資+その他
A	消費=消費性向×生産
R	生産=資本/資本係数
* level方程式以外の方程式の時間添え字を省略している。	

資本とは、投資の流入によって蓄積される stock であるが、資本を構成する生産設備は物であるから個々に寿命を持ち、全体としての平均的な耐用年数を経て、更新投資によって置き換えられてゆく。置き換えられた老朽設備は除却され、資本 stock から流出する。これら流入・流出を stock に対して flow という。投資は新規投資と更新投資から成る。前者は、資本の水準を変更すべく計画されたものが遅れを経て新規投資として実現した結果であり、後者は、老朽設備が直ちに更新投資として置き換えられた結果である。

新規投資は、必要資本と現有資本との gap を調整期間に於いて埋めるべく、資本の水準を変更することを企図して計画される。必要資本は生産に対する需要を過不足無く満たし得る水準に設定されるが、将来需要が現在の水準を上回ると予想される場合に、その分を追加需要として付け加える。需要 1 単位を満たす生産のために必要な資本 stock の水準を資本係数という。

需要は消費需要と投資需要およびその他の需要からなる。消費需要は生産が分配されて所得となりこれに基づいて発生するもので、生産に消費性向を乗じた大きさに設定される。投資需要は新規投資と更新投資の双方を生産によって賄うために発生する。資本と生産の比率は資本係数の値に固定されているものとしよう。その他の需要には、政府支出、住宅投資、在庫品増加、輸出 minus 輸入が含まれるが、これらは追加需要とともに、すべて体系外で決められるという意味で外生変数として、所与のものとする。

prototype を flow diagram で表すと図 4 のようになる :

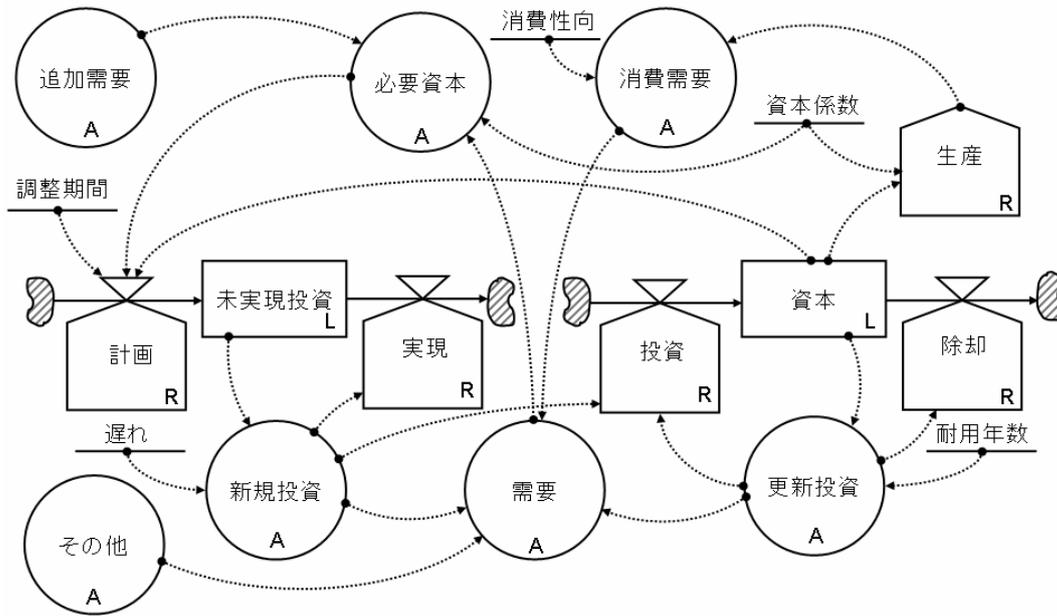


図 4 prototype の flow diagram

外生変数と parameter および stock の初期値を下のように与えて実行すると図 5(a)の結果が得られる。

```

A その他=100
A 追加需要=0
C 耐用年数=5
C 遅れ=1
C 調整期間=1
C 資本係数=1
C 消費性向=0.55
N 資本=200
N 未実現投資=0
PLOT 資本,投資,需要,生産
SPEC DT=.25/LENGTH=40/PRTPER=1/PLTPER=1
    
```

parameter のひとつ資本係数を 1.85 に置き替えると図 5(b)が得られる。

(a)では曲線が3本しかないのであるが、偶々資本係数=1 で資本と生産が重なっているだけであって、深い意味はない。

test run の結果は、これを prototype とする macro model が各種 parameter の値いかんによってしかるべき反応を示すことを確認させるものである。反応性は、これを現実の経済の変動と対応させたとき、違和感なく解釈できるかどうかを prototype としての資格にかかわるので、すべての parameter に対して感度分析を試みる必要がある。

資本を z 、投資を x 、除却を y 、DT を dt とおいて level 方程式を書き直すと次のようになる :

$$L \quad z.K = z.J + dt \times (x.JK - y.JK)$$

さらに $.K$ を (t) と書き、 $.J$ を $(t-dt)$ と書き、 $.JK$ を $([t-dt, t])$ と書くことにすると、次のように書き換えられる :

$$z(t) - z(t-dt) = dt \times \{x([t-dt, t]) - y([t-dt, t])\}$$

両辺を dt で割って $dt \rightarrow 0$ と極限をとってやると、微分方程式: $dz/dt = x - y$ が得られる。この書き換え法をすべて

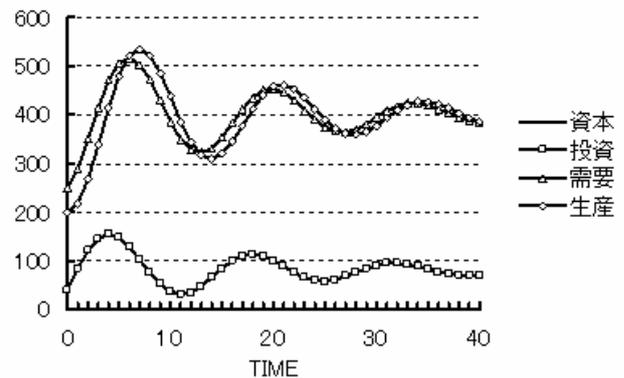


図 5(a) 資本係数=1.00

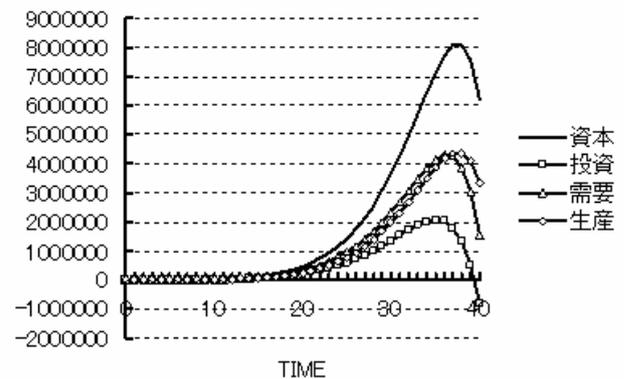


図 5(b) 資本係数=1.85

の式に適用して整理すると、prototype は次のような唯一本の微分方程式に帰着することが確かめられる：

$$\{T_1 T_2 D^2 + (T_2 - \nu) D + (1 - c - \nu / T_0)\} z = \nu g$$

ここで D は微分演算子 d/dt 、 c は消費性向、 ν は資本係数、 T_0 は耐用年数、 T_1 は遅れ、 T_2 は調整期間、 g は外生変数のその他である。ただしここでは追加需要を零としている。

上式の左辺の 2 次式の判別式をとってやれば、資本の変動 $z(t)$ を成長と振動に分岐させる parameter 空間の領域を確定することができる。また定常水準は次の式で与えられることが解る：

$$\text{資本} = \text{資本係数} \times \text{その他} / (1 - \text{消費性向} - \text{資本係数} / \text{耐用年数})$$

この値を資本の初期値として与えてやれば図 5 の graph はすべて flat な直線になることも test run によって確かめることができる。

2. 3 calibration

前項の prototype を用いて、統計 data から未知 parameter：耐用年数、遅れ、調整期間、資本係数、追加需要、消費性向および資本初期値を導き出すことを試みよう。それは次の手順で進められる：

1) 資本係数の推定

表2. calibration sheet

2. 1 で作成された固定価格の総生産 data から、設備投資と総生産の系列を各々 calibration 用 sheet の領域：D4:D152 と E4:E152 に貼り付ける→仮の値として資本係数の初期値 1.8 を F2 に書き入れる→資本の初期値を B2 に=F2*E4 と記入→B4 に=B2 と記入。これにより B4 の資本の初期値が 351.0738 と定まった。

	A	B	C	D	E	F
1	DT	資本初期値	耐用年数		資本係数平均値	1.8277472
2	0.25	351.0737748	10		資本係数初期値	1.8
3	TIME	資本	除却	設備投資実績	総生産実績	資本係数
4	1970.00	351.0738	35.1074	55.5266	195.0410	1.8000
5	1970.25	356.1786	35.6179	55.4679	197.3322	1.8050
6	1970.50	361.1411	36.1141	55.4092	199.6235	1.8091
7	1970.75	365.9649	36.5965	55.3506	201.9147	1.8125
8	1971.00	370.6534	37.0653	55.2919	204.2059	1.8151
9	1971.25	375.2100	37.5210	56.0523	208.5012	1.7996
10	1971.50	379.8429	37.9843	56.8128	212.7964	1.7850
11	1971.75	384.5500	38.4550	57.5732	217.0917	1.7714
12	1972.00	389.3295	38.9330	58.3337	221.3869	1.7586
13	1972.25	394.1797	39.4180	60.6479	225.8327	1.7455
14	1972.50	399.4872	39.9487	62.9620	230.2785	1.7348
15	1972.75	405.2405	40.5241	65.2762	234.7243	1.7265
16	1973.00	411.4286	41.1429	67.5904	239.1700	1.7202
17	1973.25	418.0405	41.8040	66.9204	238.4374	1.7533
18	1973.50	424.3195	42.4320	66.2505	237.7048	1.7851
19	1973.75	430.2742	43.0274	65.5805	236.9722	1.8157
20	1974.00	435.9124	43.5912	64.9105	236.2396	1.8452

次に、耐用年数の仮の値 10 を C2 に書き入れる→除却=B4/\$C\$2 を C4 に記入→資本=B4+\$A\$2*(D4-C4) を B5 に記入→C4 を C5 に copy 貼付→B5:C5 を copy し B6:C152 に貼付。これにより未知変数資本の仮の data が得られた。

次に資本係数=B4/E4 を F4 に記入→F4 を copy し F5:F152 に貼付→F1 に=average(F4:F152) と記入し、資本係数の平均値 1.8277472 を得る。この値は資本係数の初期値を変更すると別の値に変わるが、F1 の値を F2 に copy 貼付する作業を繰り返すと、数回の試行の後に F1 と F2 の値は同一値に収束する。

以上で得られた資本係数の値 F4:F152 を graph にして観察すると比較的狭い範囲に収まっていることが判る。

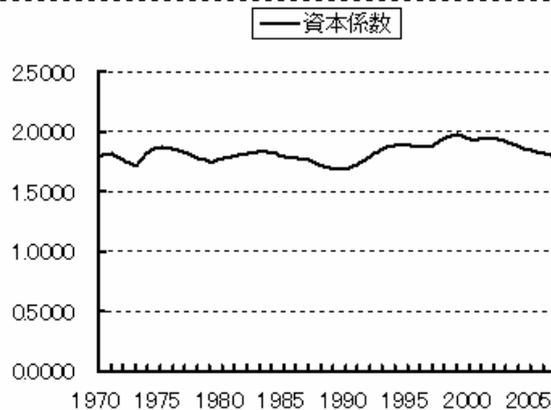


図 6(a) 資本係数の推計値 (単位:年)

もちろん、耐用年数を別の値に変更すれば、以上とは異なる資本係数の系列が推定される。一般に耐用年数を短くすると資本係数の収束水準は低下する。

他の観察結果から資本設備が除却されるに到るまでの平均遅れの長さが得られれば、それによって資本係数の系列は一通りに定まると諒解されることで、この段階では十分であるとしておこう。後の simulation の段階で、耐用年数に対する system 変動全体の感度を見ることになるので、表 2 の sheet を SHEET1 として保存する。

2) 追加需要の推定

以下 prototype に登場する変数の各々について cell に記入→copy→貼付を行う：

新規投資 $G4=D4-C4$ →遅れ $H2=0.5$ (仮の値) →未実現投資 $H4=G4*H$2$ →計画 $I4=(H5-H4)/A$2+G4$ →調整期間 $J2=1$ (仮の値) →必要資本 $J4=I4*J$2+B4$ →計画需要 $K4=J4/F4$ とする。次に $G4:K4$ を copy して $G5:K152$ に貼付する。ただし計画の値は $I152=(H153-H152)/A$2+G152$ だから、 $H153$ の値は存在せず $I152:K152$ は定義されない。また計画需要とは(需要+追加需要)を意味している。さらに、民間消費とその他需

要の data を L4:L152 と M4:M152 に貼付→需要 $N4=D4+L4+M4$ →追加需要 $O4=K4-N4$ とする。N4:O4 を copy し N5:O151 に貼付。かくして追加需要が推定された。

以上で問題はないのだが、prototype では需要=消費+投資+その他となっており、時間添え字を正しく書くと 需要.K=消費.K+投資.JK+その他.K となり、N5 の式は $=D5+L5+M5$ ではなく $=D4+L5+M5$ としなければならない。D3 は 1969 年第 4 四半期の投資で data がないので N5 を N6:N151 に copy 貼付して N4 はそのままにしておくこととする。この点は消費性向も同様であり、消費.K=消費性向×生産.JK であることにより、 $P4=L4/E4$ はそのままにして $P5=L5/E4$ を P6:P151 に copy 貼付して用いるものとする。

calibration で最初に行ったのは表 1 の統計 data からそこに欠けている資本 stock の data を作成することである。そのために通常の table 関数を用いて $DT=0.25$ で設備投資の data を内挿補間した系列を作った。作成された設備投資に DT をかけて積分をとることにより蓄積される資本 stock の推計値としたのである。これから耐用年数による除却分を差し引いたものが B 列の資本の変動である。これにより統計 data と整合的な資本 stock の時系列が得られている。

2. 4 model の提示

前節で推定した外生変数、parameter、初期値をすべて用い、prototype にしたがって、日本経済の macro model を書き下すと以下ようになる：

* 日本経済マクロモデル
L 資本.K=資本.J+DT×(投資.JK-除却.JK)
R 投資.KL=新規投資.K+更新投資.K
R 除却.KL=更新投資.K
A 更新投資.K=資本.K/耐用年数
A 新規投資.K=未実現投資.K/遅れ
L 未実現投資.K=未実現投資.J+DT×(計画.JK-実現.JK)
R 計画.KL=(必要資本.K-資本.K)/調整期間
R 実現.KL=新規投資.K
A 必要資本.K=(需要.K+追加需要.K)×資本係数.K
A 需要.K=消費.K+投資.JK+その他.K
A 消費.K=消費性向.K×生産.JK
R 生産.KL=資本.K/資本係数.K
A その他.K=TABXL(SHEET1!M4)
A 追加需要.K=TABXL(SHEET1!O4)
A 資本係数.K=TABXL(SHEET1!F4)
A 消費性向.K=TABXL(SHEET1!P4)
C 耐用年数=TABXL(SHEET1!C2)
C 遅れ=TABXL(SHEET1!H2)
C 調整期間=TABXL(SHEET1!J2)
N 資本=TABXL(SHEET1!B4)
N 未実現投資=TABXL(SHEET1!H4)
N TIME=1970
A 生産実績.K=TABXL(SHEET1!E4)
PLOT 生産,生産実績
SPEC DT=.25/LENGTH=36/PRTPER=1/PLTPER=.25

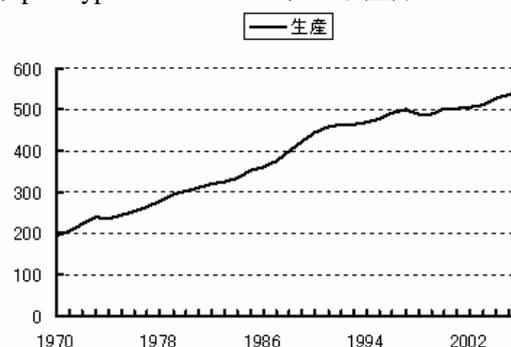


図 6(b) 生産の予測値 (単位:兆円/年)

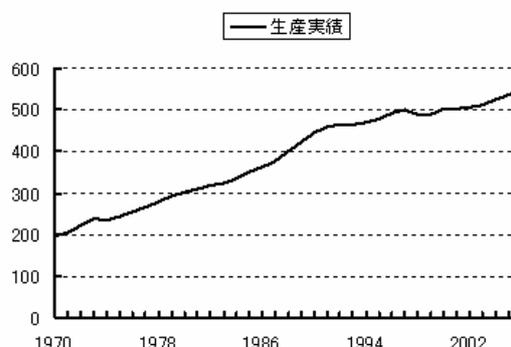


図 6(c) 生産の実績値 (単位:兆円/年)

ここで table 関数 TABXL というのは Excel の work sheet 上の cell を参照する DYNAMO 関数である⁴。補助変数に対しては、例えば 15 行目の「A 追加需要.K=TABXL(SHEET1!O4)」は、TIME の初期値から DT 毎に SHEET1!O4 から列方向に cell を 1 つずつ辿って追加需要に cell の値を与えて行く。定数および初期値に対しては、例えば「C 調整期間=TABXL(SHEET1!J2)」、「N 資本=TABXL(SHEET1!B4)」などは、1 回の実行に 1 度だけ、引用された cell の値を定数および初期値に与える。SHEET1 は前項の calibration に用いた work sheet であり、外生変数の系列および parameter と初期値の値を、統計 data と prototype model を利用して推定した表計算 data が保存されている。

plot 文の指定にしたがって、SD model の実行結果の生産と work sheet 上の生産実績とを graph にして観察すると、当たり前のことであるが、図 6(b),(c)に掲げたように両者は一致している。ここでの生産実績は $DT=0.25$ で描かれているが、これは DYNAMOIII の通常の table 関数を用いて表 1 の総生産 data を内挿補間した値を含んでいる。

以上の calibration で行ったのは図 7 に示される一連の作業である。calibration と表示されている process では data 構造に従い、data y と 4 つの parameter p を input として、simulation に引き渡す 4 つの外生変数 x を計算する。simulation

⁴ DYNAMOIII として公開されている VBA program に本稿の筆者が加筆することによって追加した新しい機能である。それは他の work sheet の cell を指定することによって任意の data を実行時に外生変数の値として参照する。

の process では、 x と p を input として予測 Y を計算する。この calibration & simulation に用いられる計算用の model が上に掲げた“日本経済マクロモデル”である。

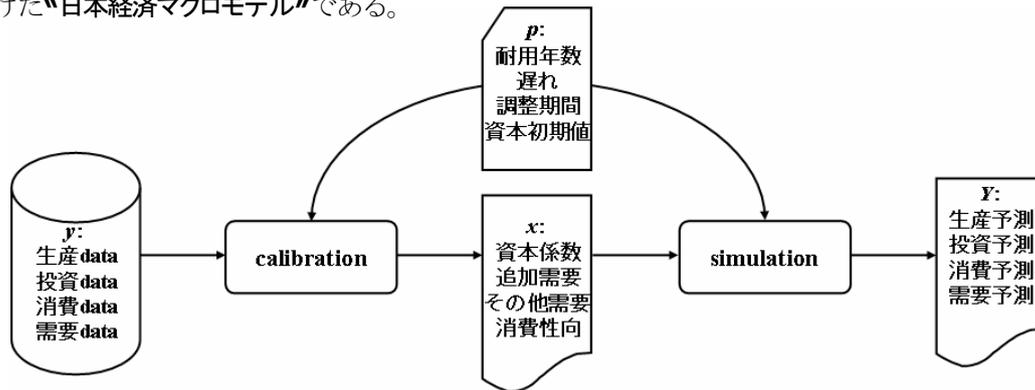


図7 modeling 作業図 calibration-simulation-process

SD modeling においては、以下の二点が重要である：

- (1) 同一の model を calibration にも simulation にも用いること
- (2) data と予測との残差： $\varepsilon = |Y - y|$ を最小にするように x を定めること

calibration の work sheet に展開されている推定手続きの表計算は $\varepsilon = 0$ とするための工夫である。これに依る限り、 y と Y は有意的に等しい。このとき、外生変数 x の変動の graph は各々図 8(a)~(b) のようになっている。この 2 つの変数の変動は、この SD model によって初めて計算される指標であり、(a)は長期に亘る資本係数の安定的な傾向を、(b)は 1970 年代、80 年代、90 年代、00 年代の日本経済の波乱含みの history を、顕著に表すものと言えよう。この 2 図のみで日本経済論を展開することもできる。

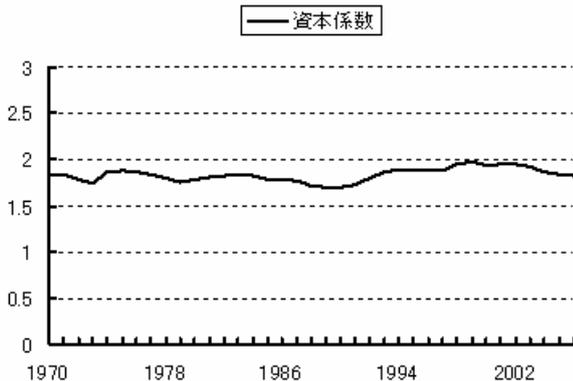


図 8(a) (単位:年)

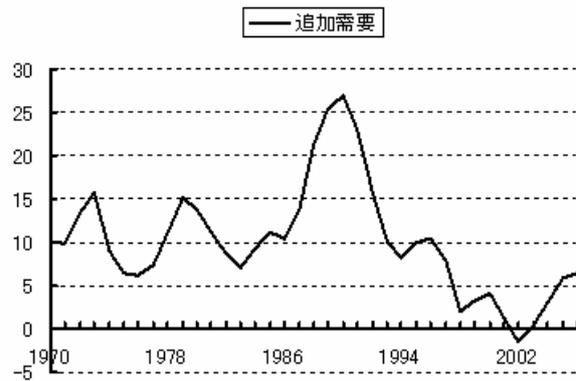


図 8(b) (単位:兆円/年)

外生変数 x には以上の資本係数と追加需要の他に消費性向とその他需要がある。これらは parameter p の想定に全く影響されないの、純粋に外生的・客観的な指標であり、単に simulation へと受け渡されるに過ぎない。SD モデルからは独立なこの 2 つの変数も、しかし、日本経済について何事かを語るものではあろう。図 8(c)~(d)を見ると、長期に亘って消費性向がほぼ一定から微増の傾向にあること、逆境をものともせず増大してきたその他の需要も 1997 年以降に到って一服感が出ていること、等々を読み取ることができる。

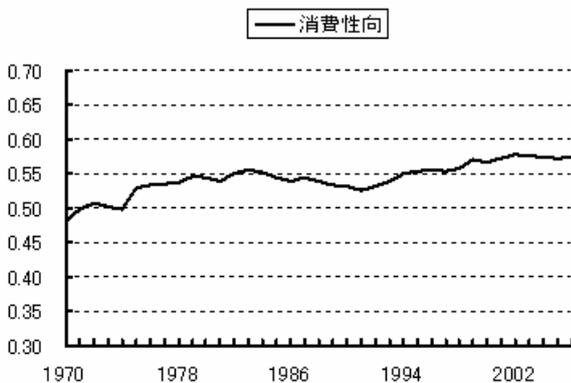


図 8(c) (単位:無し)

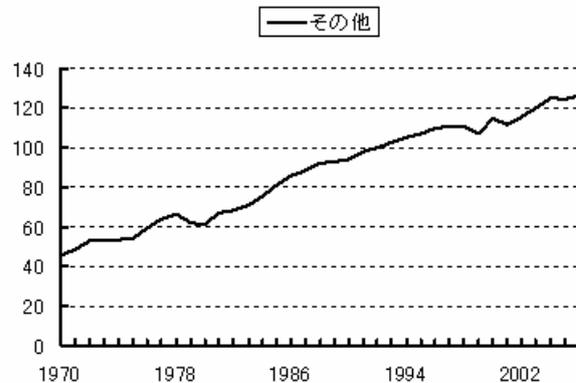


図 8(d) (単位:兆円/年)

parameter の推定 error に対する外生変数 x の感度を見ておこう。 p のいかなる値に対しても $\varepsilon = 0$ であるから、

simulation の予測値 Y は parameter の取り方に影響されない。逆に言えば、そうなるように外生変数 x が自動的に調節されるということである。したがって x の系列は parameter の値に 100% 依存する。但し消費性向とその他の需要は parameter の影響を受けないから、感受性を持つのは資本係数と追加需要のみである。

感度分析の結果からは、長期的な資本の変動は初期値の取り方には依存しないことが分かる。資本係数の変動も追加需要の変動も然りである。また、遅れと調整期間の取り方は資本係数に影響を与えないが、耐用年数と資本係数の間には線型関係があり、それに応じて資本係数の初期値も調節しなければならない。ここでは、資本係数の平均値が初期値と一致するように調整した。

追加需要の振幅は耐用年数が短くなるほど大きくなり、遅れが短くなるほど小さくなること、追加需要はまた調整期間の増加関数であること、等々が以上の観察から読み取られる。しかし、これらは全て $\varepsilon=0$ という条件の下での x の感度であることに注意しなければならない。すなわち Y の変動性に与える各 parameter の影響は以上の分析だけでは明らかにならない。そのためには、LENGTH を更に延長した内挿区間を超える simulation が必要となる。

資本係数の初期値に対する追加需要の感度

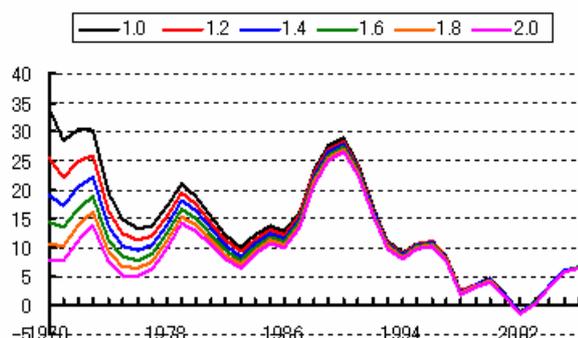


図9 (a) (単位:兆円/年)

資本係数の初期値に対する資本係数の感度

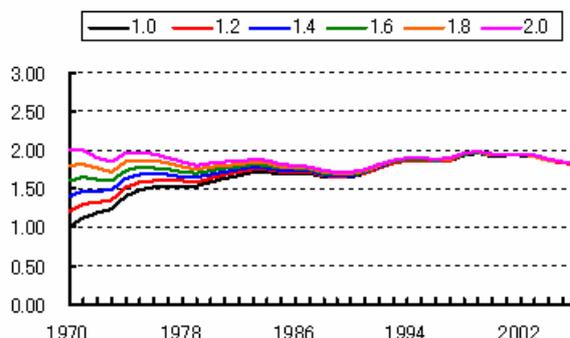


図9 (b) (単位:年)

耐用年数に対する追加需要の感度

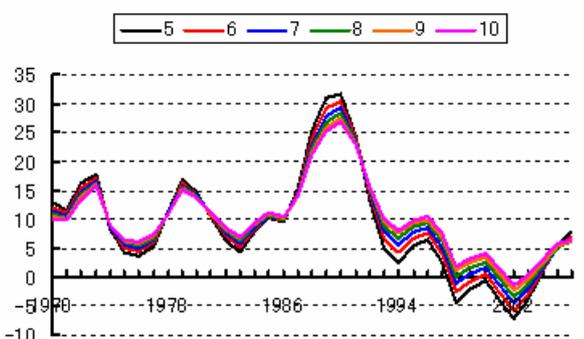


図9 (c) (単位:兆円/年)

耐用年数に対する資本係数の感度

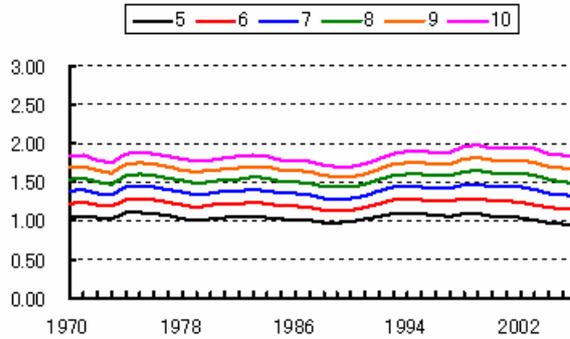


図9 (d) (単位:年)

遅れに対する追加需要の感度

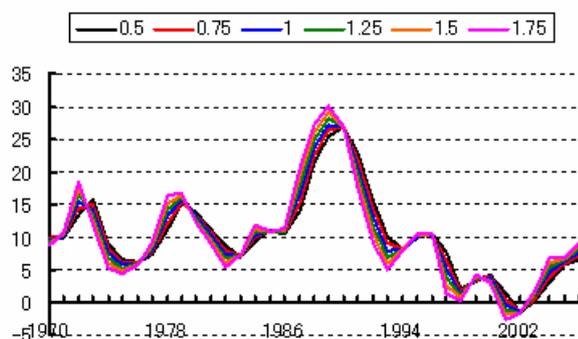


図9 (e) (単位:兆円/年)

調整期間に対する追加需要の感度

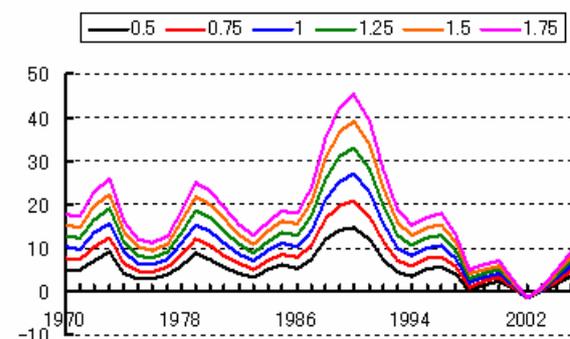


図9 (f) (単位:兆円/年)

2. 5 simulation

ここに提出した model の最大の利点は、DYNAMOIII⁵の sheet **Dyna1** と calibration 用の sheet **SHEET1** が、

⁵ DYNAMOIIIは小林[23]で公開されている VBA の program で、DYNAMO 方程式系を表計算 model に変換するものである。

いずれも Excel の sheet として link している点にある。parameter p のいかなる変更も、外生変数 x と simulation 結果 Y とを同時に更新するから、interactive に試行を繰り返す simulation 実験に適合的である。この merit を利用して、例えば次のような simulation 結果を得ることができる：

2008 年以降について、不確定要因は資本係数と追加需要および消費性向とその他の 4 変数である。これらの変化は指数遅れにしたがって任意の定常状態を達成するものと想定しよう。定常水準と平滑化定数の値を動かして、想定における error が将来の変動性に与える影響を評価することが目的である。parameter：耐用年数、遅れ、調整期間の値は重要な政策変数であるから、これらをどの水準に誘導すれば望ましい未来が実現するかを検討することがもう一つの目的となる。これらは次の手順で実行される。

- 1) SHEET1 の cell F153 に $=F152+\$A\$2*(E\$153-F152)/E\154 と記入する。F 列は資本係数に対応しているので、この式は level 方程式：資本係数 $\cdot K =$ 資本係数 $\cdot J + DT * (\text{目標値} - \text{資本係数} \cdot J) / \text{平滑化定数}$ を意味している。
- 2) F153 を M153 と O153 に copy して貼り付ける。
- 3) E153、L153、N153 に資本係数、その他、追加需要の目標値を、E154、L154、N154 に各々の平滑化定数を記入する。P152 には消費性向の目標値を記入し、P153 に $=P152$ と記入する。
- 4) F153、M153、O153、P153 を copy して各々 F154:F404、M154:M404、O154:O404、P154:P404 に貼り付ける。これで 2070 年までの外生変数の想定が得られる。
- 5) Dyna1 の SPEC を $DT=.25/LENGTH=60/PRTPER=1/PLTPER=1$ と書き直して実行する。

ここでは図示の都合上 $LENGTH=60$ としているが、2070 年までの想定を用意しているから $LENGTH=100$ まで延長することが可能である。

これは外生変数が図 10(b)(c) のような定常への指数平滑的収束を示した場合の資本、投資、消費、生産の変動が、2008 年以降 2030 年までどのようになるかの予測を与えている。それらは、外生変数の guide に導かれて、それらと同様に各々の定常水準へと収束するのではなく、system 内の feedback 構造による固有の変動性を示すことが観察されるのである。

図 10(a) からは 2015~2020 年に大きな危機を迎えそうであることが読み取られるが、これを parameter の値に対する政策的な働きかけによって回避することが、政策研究の課題となる。

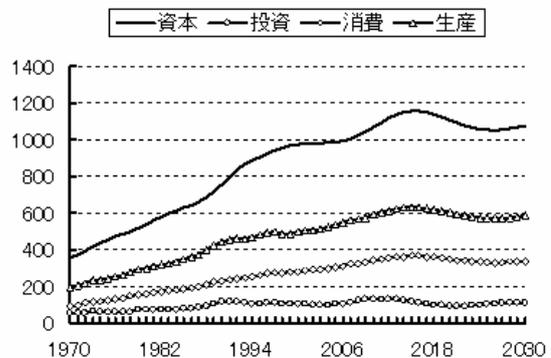


図 10(a) (単位: 資本: 兆円 資本以外: 兆円/年)

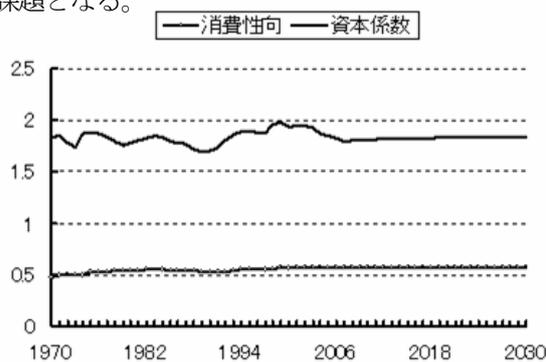


図 10(b) (単位: 資本係数; 年 消費性向; 無)



図 10(c) (単位: 兆円/年)

図 7 の modeling 作業図によれば、simulation 結果 $Y(t)$ は、実績値 $y(t)$ と parameter p によって作成された外生変数 $x(t)$ を所与として $\epsilon = |Y(t) - y(t)| = 0$ となるように日本経済 macro model にしたがって計算されたものであり、同じ parameter p と外生変数の想定 $X(t)$ を所与として、同じ model を用いて得られる $t > 2007$ における予測値 $Y(t)$ は対応する実績値 $y(t)$ を持たない。それ故に $y(t)$ の代わりに $Y(t)$ を用い、同じ calibration 手続きにしたがって作成される $x(t)$ を計算したとき、それが果たして $X(t)$ と一致するかどうか気になるころではあろう。しかしそれは基本 case の simulation によっても容易に確かめられることではあるが、この両者が常に一致するということが容易に示すことができる。このことは、単純に、calibration $f: y(t) \rightarrow x(t)$ に対して simulation $h: X(t) \rightarrow Y(t)$ が逆変換になっているので、合成変換 $f \circ h: X(t) \rightarrow x(t)$ は恒等変換になると言っているに過ぎない。ただし、その結果である生産実績と生産との内挿区間における一致と同時に生じている需要と生産の一致が、外挿区間においても維持されることを意味するものではない。

本稿の日本経済 macro model では、需要 = 供給という均衡条件は一切前提されていない。需要が予想され、それに応じた投資行動を引き起こした結果が、調整と遅れを経て資本の水準を変え、生産物の供給となって実現し、供給自らが作り出した所得の増加（減少）によって需要が変動する。斯様な feedback を前提としているのであって、system として需給の均衡が達成されるのは当に動学的帰結にほかならない。統計 data が存在する期間（内挿区間）では、現実の data が均衡を前提として作られているために、それと fit した simulation 結果を導き出す日本経済 macro model においても需要 = 生産が成立していたが、将来期間（外挿区間）に延長された simulation では、当然のことながら、需給の一般的不均衡が前提となっている

図 10(a)の simulation 結果によって 2015～2020 年に予想される system 変動は、追加需要=0 の下での需給の不均衡を表しているのであって、時間の経過とともに不均衡が拡大する場合の危機の予想は、system の致命的な欠陥を補修する上で重要である。不均衡の拡大する parameter 空間の領域を確定することは政策研究に課せられた使命であり、改善された macro model が有力な手懸かりを与える。

3. macro 経済 model の展開

3. 1 SD model の意義

本稿の目的は、日本経済の macro model を、formal も mental も込めて、SD 方法論の見地から改訂するという課題と取り組む議論のための出発点として、ひとつの system dynamics model を示すことであった。以上により、この目的はある程度達成されたものと思われる。ところで、ここで提示されたひとつの model とはいったい何を指すのであろうか。

前節では先ず国民経済統計を用いて生産、消費、投資に table 関数と縦軸の data を与え、図 2～3 を出力させた。DYNAMO 方程式で記述されているとは言え、これは SD model とは言えない。3 つの変数が遅れを含む循環的な因果連環によって関係付けられている訳ではないからである。すなわち、この最初の model は closed でない。次に図 4 の flow diagram で表される prototype を示した。これは少なくとも一環の feedback loop: 需要→必要資本→(遅れ)→計画→(遅れ)→投資→資本→生産→需要を持つので SD model であると言える。ただし、追加需要とその他という二つの補助変数に式が与えられていないから、この model は closed ではない。それを close しているのは「追加需要=0」、「その他=100」という simulation 上の想定である。

prototype を改訂して得られた日本経済 macro model も、前の二変数に加えて資本係数と消費性向について開いており、closed ではないと言わなくてはならない。この model を閉るものは calibration の手続きである。calibration は日本経済 macro model を用いた simulation の逆変換であるから、一体となってひとつの closed な system dynamics model を構成する。すなわち、本稿において提示された model とは図 7 の modeling 作業図によって表される一連の process であると言うことができる。

この model (図 7 の modeling 作業図によって表される一連の process) であるからこそ、その主要な output である「図 8(a) 資本係数の変動 (1970～2007)」と「図 8(b) 追加需要の変動 (1970～2007)」および「図 10(a) 資本の変動 (1970～2030)」が、予測としての意味をもつのである。この予測は、次のような、少なくとも二つの implication を持つ： ① 1970～2007 年の資本係数と追加需要の変動の graph によって、この時期の日本経済の歴史を記述し、その変動の理由を説明することができる。② 2009～2030 年の資本の変動予測に基づいて、将来の危機に対処する政策代替案を提示することができる。

述上の①は歴史研究に貢献し、②は政策研究に貢献する。

3. 2 方法論の問題 再び

system dynamics とは何かということは、実は、それほど明確には解っていない。世の中を system として捉えてその動態を研究することだと言えば、社会科学の全領域を覆うことになるので、何も言っていないのと等しい。因果 loop を明らかにし、DYNAMO 方程式系に表現し、simulation 実験を行い、結果を解釈し、得られた知見を披瀝する、と言うのでは、狭きに失するであろう。実践的 system dynamist にとっての定義は、おそらく、意思決定者の mental model を simulation 可能な formal model に変換し、意思決定者の面前で実験観察を実施することを通して、意思決定者自らが mental model を改訂するよう支援するための、consultation 技術の集合、ということになるであろう。

日本経済 macro model のように集計的変量間の関係によって system が成り立っている場合は、生身の人格としての意思決定者 (client といっても良い) は居ない。厚生経済学では仮定の君主 benevolent despot を措定して、彼の mental model である社会的効用関数を推量する。または構成 member (国民) 全員による集計的選好関係を導く集計的選択規則を社会的厚生関数と呼んで、手続きの合理性の問題に還元する。いずれの場合も、定式化すべき

mental model は憶測する以外に方法はない。本当のことを言えば、企業を client とする場合のように、生身の経営者の存在がそこに在る場合であっても、意思決定者の mental model が定式者に開示されることは、通常、望み得ない。その意味では、micro model でも啓蒙的専制君主を仮想する伝統的な経済学の方法で仮想の mental model を出発点に据えるのと大差はないことになる。

日本経済を macro で見て(集計的変量間の関係によって成り立つ system として)SD model を建てる場合の mental model は、したがって、憶測によって仮想されたもの以外にはないが、意思決定者が仮想君主であれ国民全体であれ、その mental model は 19・20 世紀を通じて洗練されてきた経済学の理論であると看做すべきであろう。だとするならば、日本経済の system dynamics の出発点は、正しく本稿で提示した macro model になる。経済学の理論は、政府を動かし国民経済計算のための統計を整備し、数理科学的 model を開発し国民を教育してきた。それ全体として、仮想の意思決定者の mental model を形成しているものと考えられる。本稿では、この二つを違和感なくつなげる工夫を施し、ひとつの system dynamics model を提示した。図 7 の calibration-simulation-process がそれである。その準拠すべき枠組みとしての日本経済 macro model が、SD 研究のための出発点になるものと考えている。

4. 結論にかえて

20 世紀末ないし 21 世紀初頭に世界が抱えた経済的な困難は危機の時代と呼ぶに相応しいものである。この危機の時代実践的な SD 研究者の立場からなし得る最大の貢献は、危機の時代を、多重 loop 構造として記述される system の動学的帰結として理解することを支援し、危機を乗り切る政策研究に裨益するよう、人々の mental な経済 model を改訂することである。19・20 世紀の経済理論が作り上げた国民共有の mental model を、経済統計(国民経済計算統計)と数理経済学 model(乗数加速度方程式)によって代表させ、この両者を連環させて work するひとつの SD model(calibration-simulation-process)を提示した。

この model から導き出される output としての資本係数と追加需要の予測は、1970~2007 年という危機の時代の日本経済の変動を物語るものであり、もうひとつの output としての資本変動の予測は、2008~2030 年の更なる危機の時代に対処すべき政策研究の基礎となるものである。これらの simulation 結果を歴史研究と政策研究に役立てることは直截的利用法として決して間違いではない。しかし、正しくは、それらの研究から mental model の改訂に向かう志向が生まれ、共有され、現実の経済を担う普通の人々の mental model の改訂が齎されて、危機を到来させずに済むような改善された system への移行を招来することが本筋である。

参考文献

- [1] Cavana, R. Y. and Mares, E. D. (2004) "Integrating critical thinking and systems thinking: from premises to causal loops" *SDR* 20,223-235
- [2] Doyle, J. K. and Ford, D.N.(1998) "Mental model concepts for system dynamics research" *SDR* 14 3-29
- [3] Ford, D. N. and Sterman, J. D. (1998) "Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models" *SDR* 14,309-340
- [4] Forrester, J. W. (1961) *Industrial Dynamics* MIT Press
- [5] ————. (1974) "The Debate on World Dynamics: A Response to Nordhaus" *Policy Sciences* 5.169-190.
- [6] Low, G W. (1980) "The multiplier-accelerator model of business cycles interpreted from a system dynamics perspective" in Randers [15] 76-94
- [7] Meadows, D.H., Meadows, D. L., Randers, J., Behren, W. (1972) *The Limits to Growth* Universe Press
- [8] Meadows, D.H., Meadows, D. L., Randers, J. (1992) *Beyond the Limits* Chelsea Green: Post Mills
- [9] Nordhaus, W.D. (1973) "World Dynamics: Measurement Without Data" *Economic Journal* 83.1156-1183
- [10] Randers, J. (1980) *Elements of System Dynamics* MIT Press
- [11] Repenning, N. P. (2003) "Selling system dynamics to (other) social scientists" *SDR* 19,303-327
- [12] Richardson, G. P. (1996) "Problems for the future of system dynamics" *SDR* 12,141-157
- [13] Stenberg, L. (1980) "A modeling procedure for public policy" in Randers [15] 292-312-
- [14] Sterman J. D. (2002) "All models are wrong: reflections on becoming a system scientist" *SDR* 18,501-531
- [15] Wolstenholme, E. F. (2003) "Towards the definition and use of a core set of archetypical structures in system dynamics" *SDR* 19,7-26
- [16] 小林秀徳 (2002) 『政策研究の動学的展開：エクセルシステムダイナミクス』白桃書房
- [17] ——— (2005) 「21 世紀日本経済の展望」『システムダイナミクス』No.4 日本経済モデル研究分科会「SD による日本経済モデルの検証」所載 38-51