

# 実数値 GA による計量経済モデルの制御実験

## Control Experimentation Using Real-Coded Genetic Algorithm

釜 国 男  
Kunio KAMA

### 1. はじめに

二次形式評価関数のもとでの線形システムの最適制御については、いまや確率的な場合も含めて標準的な解法が知られており、計量経済モデルによる政策シミュレーションでも広く用いられている。また非線形モデルについても線形近似法やフェア（1984）の方法などいくつかの簡便法が考案されている。状態方程式に基づく最適制御理論は工学分野のメカニカルシステムには容易に適用可能であるが、複雑な経済システムへ実際に適用するとなると技術的にいろいろな問題が生じる。このため理論的な研究ではともかく、応用研究ではもっぱら分析用の小規模なモデルで試験的に使用されているのが現状である。

応用上、煩雑な最適制御理論（ハードコンピューティング）に代わるものとして、最近、ソフトコンピューティングと呼ばれる新しい計算パラダイムが提案されている。その基礎にあるのは不精密性の許容範囲を利用して扱い易さ、頑健性、低コストを実現しようという考えであり、ファジィ理論、ニューラルネットワーク、確率推論、遺伝的アルゴリズム（GA）、学習理論、カオス理論などを含む。比較的簡単な機械的システムでもこうしたアプローチが必要であるとすれば、きわめて複雑で不確定要素の少ない経済システムの分析ではさらに一層必要となるであろう。経済学の分野でも最近ではカオス理論を応用した研究が増えているが、その背後にはやはり既存のアプローチに対する不満があるものと思われる。また現在までのところカオス理論ほどポピュラーではないが、人間の論理や概念の曖昧さを数量的に取り扱うファジィ理論も実体経済の分析ではきわめて有効な手段となるであろう。こうした考えに基づいて、筆者は現実の経済問題を取り上げこれにファジィ理論を適用する研究に着手した<sup>1)</sup>。実証結果はきわめて良好で、日銀の金融政策や消費者行動の分析においてファジィ推論と IF-THEN 規則を基本としたモデルが非常に有効であることが確かめられた。クラインの戦間期モデルに対するファジィ制御の適用もこうした線に沿った研究である。さらに生物進化のメカニズムを模した遺伝的アルゴリズムを用いて最適なコントローラを構成する方法を提案してその有効性を実証した。ニューラルネットワークによるクライン・ゴールドバーガーモデル（以下、KG モデルと略）における政策シミュレーションがそれである<sup>2)</sup>。技術的にはネットワークの構造を所与とすると、最終的には制御結

果は結合係数の連続関数となる点に留意して多変数関数の最適化を行った。その最適化に GA を適用した訳であるが、遺伝情報のコード化には 0-1 表現によるビットストリング表現を用いた。つまりひとつの結合係数に 10 個の 2 進数を割り当て、これを 10 進数に変換したあと適当に線形変換して係数値とする。制御結果から明らかなように、この方法はきわめて優れているが関数最適化の問題としてみると改善すべき点が少なくない。そのひとつは変数の連続性をまったく無視して有限個の空間に探索を限定していることである。たしかにビット数を増やせば探索間隔をつめることが可能であるが、同時に計算量が増えるのでそれにも自ずと限界がある。また、ひとつの係数を 10 個の 2 進数で表現する関係でネットワークの構造はどうしてもシンプルなものとならざるを得ない。とくに強い非線形性をもつモデルではこの制約が大きく効いてくるであろう。

この問題は以前から認識されていたが、最近になってその対策が考案されるようになり、コーディングの方法として実数ベクトルを直接用いた実数値 GA が提案されている<sup>3)</sup>。しかしながら、ごく簡単な例題が取り上げられているだけで計量経済モデルのような複雑なシステムについてはまだ検討されていない。実システムに対しても適用可能であるのか、これから詳しく調べる必要がある。そこで本稿では先に検討した KG モデルを再び取り上げ、これに実数値 GA を適用してビットストリング GA と同等の制御を実現できか否かを比較し検討することにした。以下、2 節では遺伝情報の二つの表現法と遺伝的操作について必要事項を述べる。3 節では制御目的について述べたあと、政府支出と法人税を単独または組み合わせて調整する場合について数値実験の結果を紹介する。全体的な傾向として実数値 GA は通常的確定的な制御問題ではビットストリング GA とほぼ同等の性能を有することを示す。しかしながら確率的な問題では誤差はかなり大きくなる。最後の 4 節は本稿のまとめであり、また今後取り組むべき課題についていくつか指摘する。

## 2. ビットストリング GA と実数値 GA

モデル内の政策変数を制御するために、つぎの式で表される階層型ニューラルネットワークを使用する。

$$\text{入力層: } o_{1i} = x_i \quad i=1, 2, \dots, n_1$$

$$\text{中間層: } u_{2j} = \sum w_{ji} o_{1i} - \theta_{2j}$$

$$o_{2j} = f(u_{2j}) \quad j=1, 2, \dots, n_2$$

$$\text{出力層: } u_{3k} = \sum w_{kj} o_{2j} - \theta_{3k}$$

$$o_{3k} = f(u_{3k}) \quad k=1, 2, \dots, n_3$$

ここで  $x_i$  と  $o_{3k}$  は入力および出力値であり、 $w_{ji}$  と  $w_{kj}$  は結合係数で簡単のためしきい値  $\theta_{2j}$ 、 $\theta_{3k}$  は省略する。また制御出力が任意の値を取れるように、出力層の入出力関数は

$$f(u) = u$$

とする。なお制御効率を高めるために、入力値はあらかじめつぎの式により区間  $[0, 1]$  内の値に変換しておく。

$$\tilde{x} = 1 / (1 + \exp(-x))$$

ネットワークの入力変数は制御偏差とその変化分であり，出力変数は 1 個ないし 2 個の政策変数である．中間層のユニット数は自由に決められるが，さしあたり  $n_2=6$  とする．したがって 2 入力，1 出力の場合には結合係数は全部で 18 となる．問題となるのは結合係数の表現法でバイナリ表現を用いた先の研究では，まず

$$2^9 x_9 + 2^8 x_8 + 2^7 x_7 + 2^6 x_6 + 2^5 x_5 + 2^4 x_4 + 2^3 x_3 + 2^2 x_2 + 2x_1 + x_0$$

により 2 進数の組  $x_0 \sim x_9$  を 10 進数へ変換した．その結果は 0 ~ 1023 の整数値となるが，さらに 511 を引いたあと 100，50 または 30 で割った．したがって区間  $[-5.11, 5.12]$ ， $[-10.22, 10.24]$  または  $[-17.03, 17.07]$  をそれぞれ 0.01，0.02，0.03 の間隔で探索したことになる．ひとつのネットワークは 180 ビットの長さの染色体で表される．また出力が 2 個であると，240 の遺伝子座が必要となり計算量はさらに増える．これに対して実数値 GA では，1 個の結合係数を任意の値をとり得る 1 個の実変数で表現する．つまり遺伝子型と表現型とが完全に一致することになる．このためひとつのネットワークに対して 18 ないし 24 の遺伝子座を用意すれば十分であり，計算量を大幅に減らすことが可能である．なお遺伝的操作を加える際には一点交叉を使用し，突然変異として区間  $[-1.5, 1.5]$  内の一様乱数を発生させてプラスする．集団のサイズは 50 でエリート保存戦略を採用し，200 世代目の最良個体を最終的な解として採用する．個体の適応度には平均平方誤差率 (RMSE 率) の逆数をあてる．

### 3. 制御結果

#### 3.1 制御目標

KG モデルのデータ期間は戦時を除く 1920-52 年であるが，ここでは戦中と戦後を除いた 1931-41 年に期間を限定する．そしてこの間の実質 GNP と一般物価水準 (GNP デフレータ) の安定化制御を行う．具体的には，それぞれの目標値を設定してモデルの解と目標値との差が最小となるような制御ルールを導出する．GNP の目標値は 1929-41 年の実績値にタイムトレンドを当てはめた回帰式から求めた．また物価については同じ期間の平均物価水準を目標値とする．この期間は大恐慌を含む米国経済の激動期で，景気対策のあり方が多くのひとびとの関心を集めた時期でもある．その意味で，政策ルールに関する研究にとって非常に興味ある時代といえよう．政策変数として特に政府支出と法人税のふたつを取りあげる．モデルは 4 種類の直接税を含んでいるが，そのうち法人税が最も税収が大きいからである．

#### 3.2 政府支出の制御

一般にある変数を制御する方法として政策変数のレベルそのものを制御する方式とその伸び率を制御する方式があるが，ニューラルネットワークの出力値に制限がないので，ここではレベルについて制御を行う．ネットワークの入力変数は実質 GNP または物価の偏差  $D$  (目標値 - 制御値) とその変化分  $\Delta D$  であり，情報の遅れを考慮して  $t$  期の政府支出  $G_t$  は一期前の  $D_{t-1}$  と

表 1 結合係数 (政府支出による GNP の制御)

		中間層					
		1	2	3	4	5	6
入力層	1	4.316	5.050	4.832	0.904	-1.690	6.877
	2	2.758	-0.786	1.528	0.630	0.150	-2.241
		中間層					
		1	2	3	4	5	6
出力層		2.613	6.988	4.209	-0.374	0.641	3.215

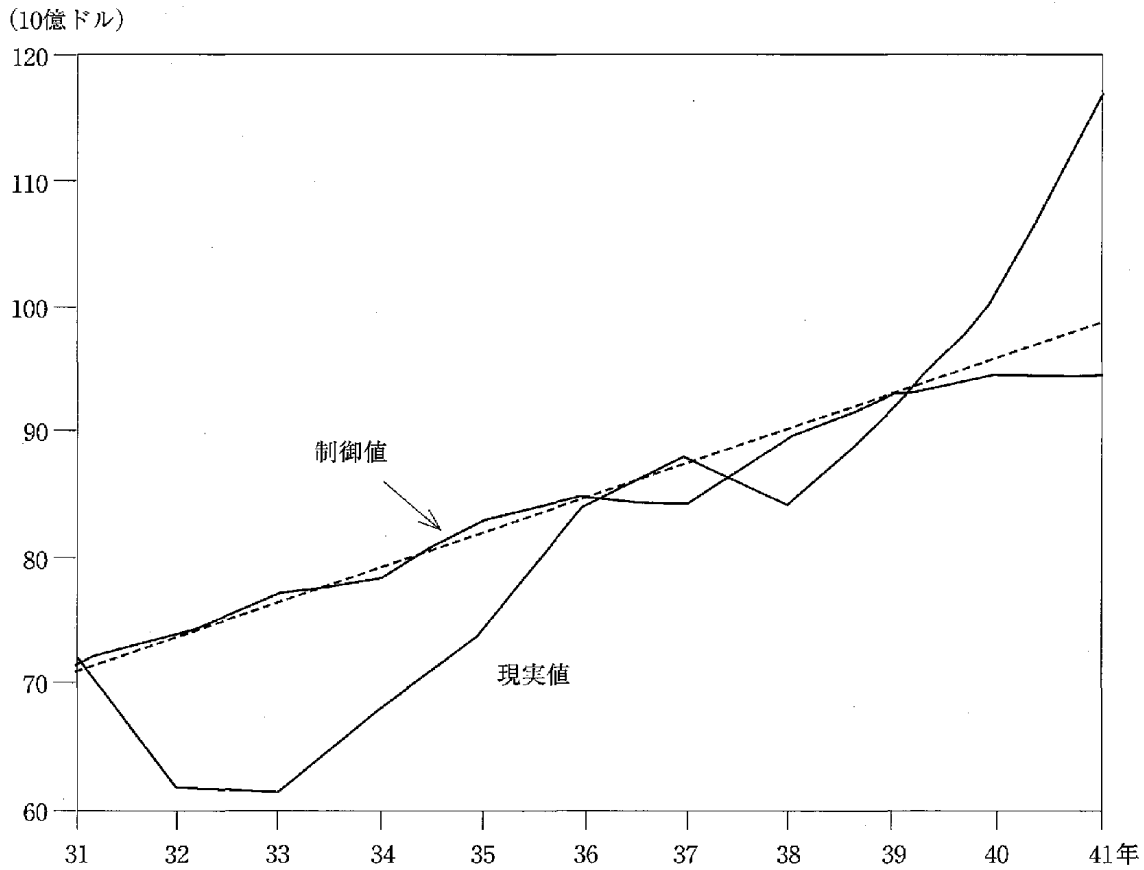
$\Delta D_{t-1}$  にもとづいて決定されるものと仮定する。政府支出と法人税以外の外生変数には実績値を代入し、政策変数のみを調整する。また方程式の誤差項はゼロとおき不確実性のない状況での制御について考える。

はじめに実数値 GA を用いて入力 2 変数、出力 1 変数のネットワークについて結合係数を求めると、表 1 に示した数値が得られる。この表で入力層の 1 番目の入力は GNP の制御偏差、2 番目はその変化分である。ビットストリング GA に比べて全般的に係数の絶対値は小さくなるが、制御性能はほとんど変わらない。すなわち GNP の RMSE 率は前者の 1.09% に対して 1.40% となり (実績値は 10.92%)、実数値 GA でもほぼ完璧な制御が可能であることがわかる。したがって実際的な立場からはあえてバイナリ表現とする必要はなさそうである。図 1 は政府支出を制御したときの GNP の水準を現実値および目標値 (破線) と比較したものである。期間中に現実の所得は目標水準から大きく乖離しているが、対照的に制御値は目標にそって直線的に増加し所得の変動はほぼ完全に除かれている。これはもちろん政府支出の安定化作用によるものであり、支出の制御値は 1931 年から 32 年にかけて急激に拡大して折からの民間需要の落ち込みをカバーしている。これによってモデルのうえでは実際に経験したような大不況は発生していない。また 1941 年になると戦争の影響で現実の支出は急激に拡大しているが、制御値の動きに戦争の影響は見られない。また政府支出を制御すれば GNP 以外の変数も同時に安定化する副次的な効果も伴う。すなわち消費についてタイムトレンドを当てはめ、これをもとに誤差を計算すると、実績値の 6.75% に対して政府支出を制御すると 1.16% に縮小する。同じく投資は 44.73% から 15.89%、実質賃金は 4.08% から 3.03% へそれぞれ減少する。しかしながら、これらの実質変数とは逆に名目変数は変動が大きくなり不安定化する。たとえば GNP デフレーターは実績値の 5.63% の誤差に対して 8.20%、名目賃金は 7.86% から 12.89% へ増大する。

以上の結果はすべて GA の集団数を 50 とした場合であるが、つぎに示すように個体数を変更しても結果はほとんど変わらない。

集団数	GNP の誤差率		
20	1.40 (%)	90	1.40
30	1.37	100	1.40
40	1.41	110	1.39

図 1 実質 GNP の制御結果



50	1.40	120	1.42
60	1.40	130	1.42
70	1.42	140	1.39
80	1.35	150	1.41

伊庭 (1994) は50~150の集団を推奨しているが、政府支出に関しては20~30の集団でも十分高い精度が得られることがわかる。つぎに個体数は50にしたまま中間層のユニットを増やすと、以下のようなになる。

ユニット数	GNP の誤差率		
4	1.40 (%)	18	1.16
6	1.40	20	1.31
8	1.40	22	1.27
10	1.34	24	1.40
12	1.31	26	1.26
14	1.31	28	1.31
16	1.41	30	1.30

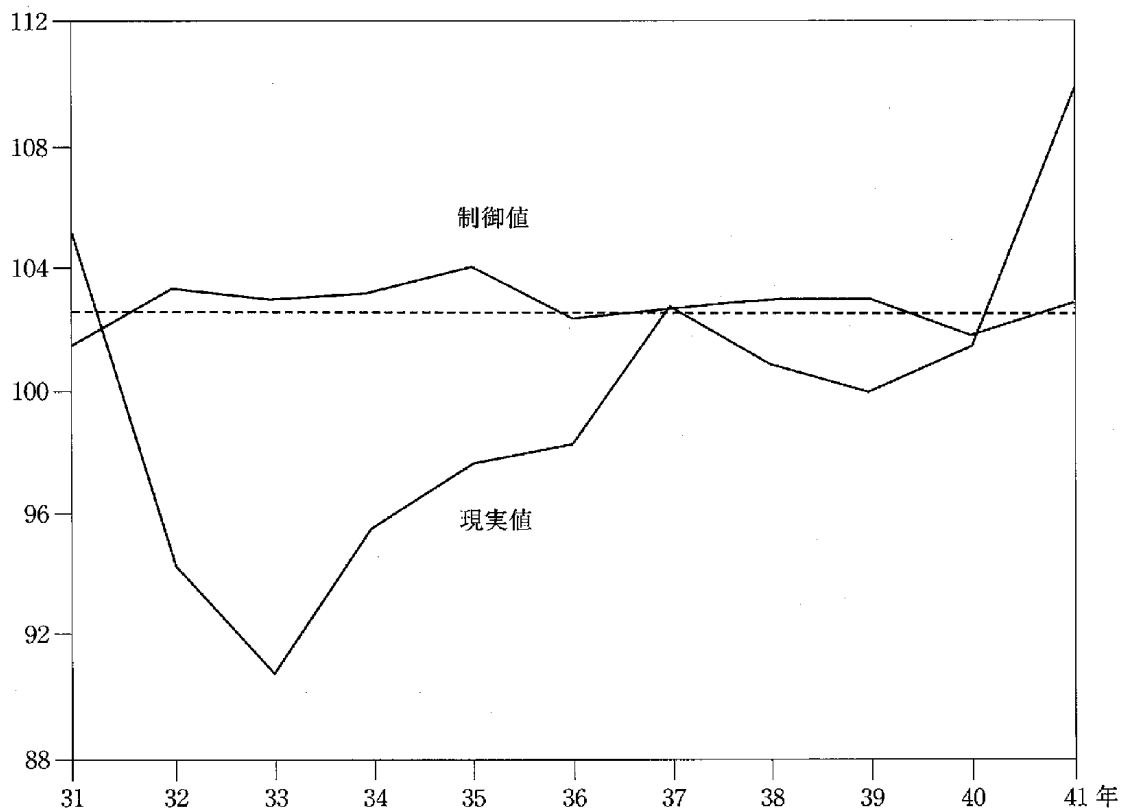
ユニット数を4から最大30まで増やしても誤差の減少はごく僅かであり、計算時間の増加も考慮

表 2 結合係数 (政府支出による物価の制御)

		中間層					
		1	2	3	4	5	6
入力層	1	9.151	8.166	-4.464	-0.671	5.132	4.715
	2	0.123	3.689	6.794	-1.348	-7.283	5.626
		中間層					
		1	2	3	4	5	6
出力層		11.379	2.304	-4.381	-0.072	0.650	3.171

図 2 GNP デフレーター の制御結果

(1939=100)



すると6個程度に止めるのが賢明であろう。

つづいて物価を調整する問題について検討しよう。物価安定には金融政策を割り当てるのが現実的であるが、残念ながらKGモデルにはめばしい金融政策の手段がない。そこで止を得ず引きつづき政府支出を政策手段として使用する。1929-41年の平均物価水準を目標にして実数値GAを適用すると、表2に示した結合係数が得られる。この表で入力層の1番目の入力物は物価の制御偏差、2番目はその変化分である。制御結果をみると(図2)、現実には物価は大きな変動を示しているのに対して制御値は目標値の水準で安定的に推移している。すなわちGNPデフレータのRMSE率は5.63%から0.67%へ大幅に縮小する。ビットストリングGAでは0.63%の誤

差となるので、コーディングの違いはまったく問題とならない。よってこの場合も係数を直接コーディングするだけで高性能の制御を実現することが可能である。

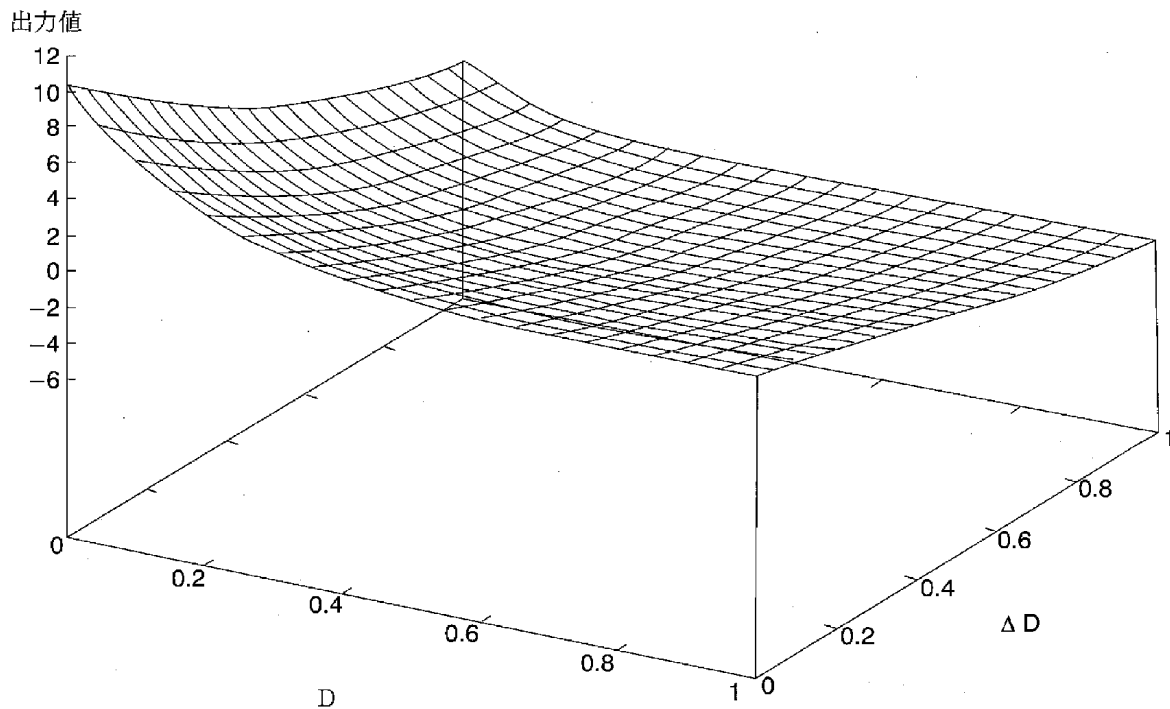
### 3.3 法人税の制御

つぎに政府支出とならんで財政政策のもう一方の柱である租税政策、とくに法人税を取り上げこれを調整して所得を安定化する問題について考える。表3は所得の偏差とその変化分を入力、課税額を出力とするネットワークの結合係数を示している。半数以上の係数は負であり、出力値の符号はマイナス、つまり法人税の減税が予想される。この点を確認するために入出力関係を図示すると、図3のようになる。この図で横軸は（基準化した） $D$  および  $\Delta D$  であり、縦軸は出力値を表す。 $D=0.5$  は目標値と制御値が等しい状態に対応し、前者が後者より大きいと  $D > 0.5$ 、小さいと  $D < 0.5$  となる。また  $t-2$  期から  $t-1$  期にかけて偏差が変わらないとき  $\Delta D = 0.5$ 、（代数的に）増加するとき  $\Delta D > 0.5$ 、減少するときは  $\Delta D < 0.5$  となる。図を見るとわかる

表 3 結合係数（法人税による GNP の制御）

		中間層					
		1	2	3	4	5	6
入力層	1	-2.912	1.299	6.123	-12.091	-3.784	-1.006
	2	-3.216	-2.863	1.307	-1.329	-2.085	3.029
		中間層					
		1	2	3	4	5	6
出力層		6.598	7.671	-4.001	8.399	3.366	-1.445

図 3 コントロールマップ（法人税による GNP の制御）



ように、所得が目標値を下回るときは法人税は負となり、しかも偏差が拡大するほど減税幅は大きくなる。つまり現実の所得を上回るような目標水準を達成するためには全期間を通じて税の払い戻しを行う必要がある。もちろん実際にはこうしたことは実行不可能であるが、モデルの枠内で法人税を唯一の政策手段とする限りマイナスの税収は避けられないのである。税収が負となるような遺伝子はあらかじめ排除すればよいが、それでは制御性能の低下が避けられないであろう。これを確認するために制約付きでGAを実行すると、誤差は実績値よりかえって大きくなる。しかし制約を付けないときは2.20%の誤差にとどまり、これはビットストリングの2.26%をも若干下回っている。かくして法人税を政策手段とする場合には実数値GAを用いた方がむしろ誤差は小さくなる。

### 3.4 政府支出と法人税の同時制御

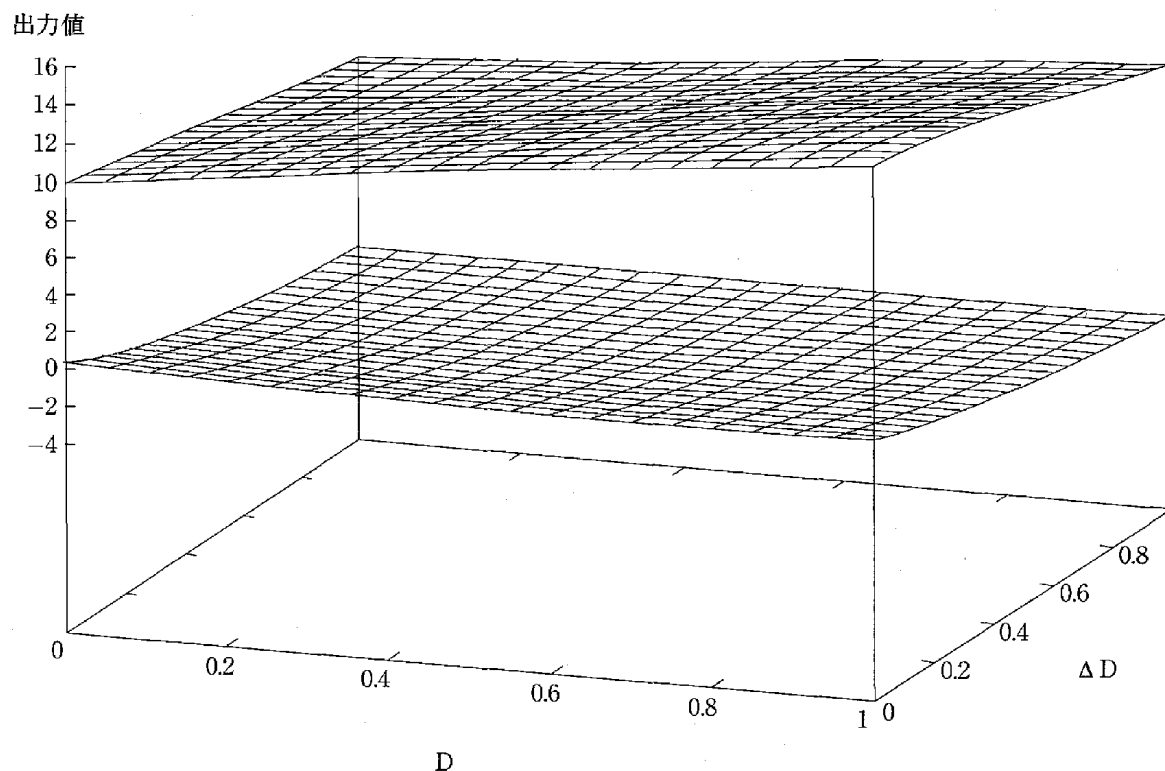
これまで二つの政策手段をそれぞれ単独で使用する比較的簡単な制御問題を取り上げたが、つぎにそれらを同時に制御する問題について考える。このために支出用と租税用の2個の出力ユニットをもつニューラルネットを使用する。中間層は引きつづき6ユニットとすると結合係数は24となり、これと同数の遺伝子座をもつ50個の個体で世代を形成する。表4は最終的に確定された結合係数で、1番目の出力は政府支出に対応し2番目は租税である。中間層から1番目の出力ユニットへの係数はすべてプラスであるが、2番目のユニットのなかには係数がマイナスとなるものがあり法人税単独の場合と同様に出力が負となる可能性がある。そこで表4の数値をもとにコントロールマップを描いたのが図4である。上段の図は政府支出の反応曲面であり、下段は法人税である。法人税はほぼ全域にわたってわずかながらマイナスとなるが、政府支出はむしろプラスで景気を下支えしている。このとき誤差は0.45%であり、二つの政策変数を別々に制御した場合よりも小さくなる。かくして複数の政策手段を組み合わせる適用するいわゆるポリシー・ミックスの考え方はきわめて有効で、所得の変動を完全に抑えることが可能である。ビットストリングGAを用いたときは0.87%となることから、誤差率からみても実数値GAの方が優れていると言える。ただし、これはKGモデルの場合であり他のモデルについては実際に検討してみないと分からない。

表4 結合係数（政府支出と法人税によるGNPの制御）

		中間層					
		1	2	3	4	5	6
入力層	1	1.269	2.646	0.664	0.920	0.513	5.512
	2	-1.958	-1.535	3.838	-2.609	-1.490	4.696
		中間層					
		1	2	3	4	5	6
出力層	1	1.260	3.180	4.580	7.310	3.519	0.075
	2	2.199	-1.506	-4.035	-0.346	4.933	-0.615



図 4 コントロールマップ (政府支出と法人税による GNP の制御)



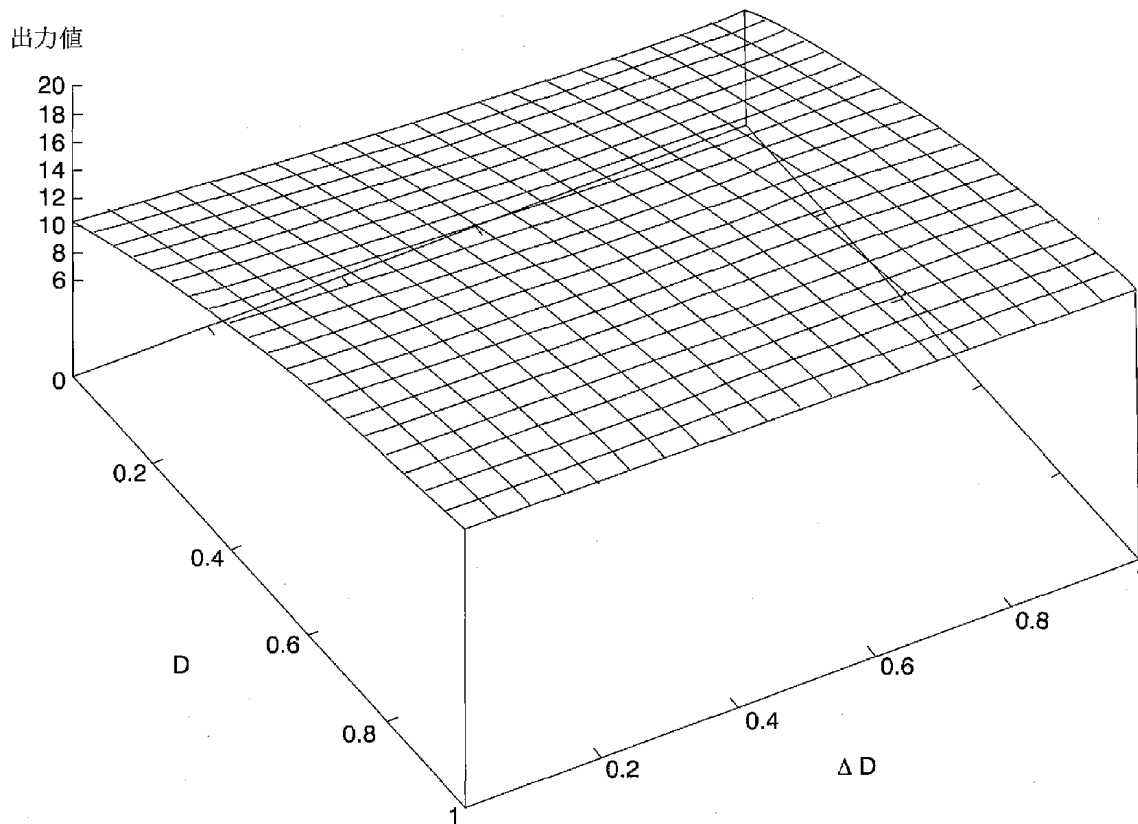
### 3.5 確率的制御

最後にモデルが確率的な要素を含む場合について検討しよう。KG モデルに関するアーデルマン (1959) の研究によると、システムの外部から確率的なショックを加えると実際に観察されるような景気変動のパターンが生み出される。したがって制御問題を議論するときも確率的なショックを導入した方が現実的であろう。しかしながら一般に非線形モデルの確率的制御は技術的に相当難しい問題であり、解析的方法で実用的な解を得ることは容易ではない。他方、ニューラルネットと GA を併用した本稿のアプローチは計算時間が長くなるのを別にすれば、確定的な場合とまったく同じやり方で適用可能である。ここでは実数値 GA について計算機実験によりこの点を確認する。そのために正規乱数 (平均ゼロで系列相関なし、分散は残差からの推定値) を発生させ、これを定義式を除く 15 の構造方程式の右辺に加えながら政府支出による GNP の安定化制御を行った。このような実験を 100 回繰り返し、誤差率の平均値を求めてその逆数を適応度として平均値が最小となるような係数値を求める。なお確率的なショックを加えるとモデルの解へ収束しない場合があるが、そのような個体は致死遺伝子として排除した。表 5 はこうして得られた結合係数の値を示している。そして図 5 は入出力の関係を表すコントロールマップである。制御曲面は比較的単純な形をしており、制御出力は主として制御偏差  $D$  によって決定され  $\Delta D$  が変化しても出力はあまり変わらないことがわかる。制御結果をみると、誤差率の平均は 6.91% でありバイナリ表現のときの 3.62% と比べるとかなり大きくなる。しかも実験回数を増やすと誤

表 5 結合係数 (政府支出による GNP の確率的制御)

		中間層					
		1	2	3	4	5	6
入力層	1	2.367	2.339	3.986	4.432	2.832	3.044
	2	-0.515	-0.603	0.320	3.407	-0.938	0.121
		中間層					
		1	2	3	4	5	6
出力層		3.877	4.244	3.252	-2.792	5.188	7.072

図 5 コントロールマップ (GNP の確率的制御)



差はさらに増大する傾向がある。したがって確率的な問題では探索空間を有限個の点に限定したバイナリ表現を用いた方がよい結果が得られるようである。ただし計算時間の差はさらに大きくなり、この点まで考慮するとビットストリング GA が優れているとは必ずしも言えない。これは計算コストと制御パフォーマンスを比較しながら決めるべき問題である。いずれにしてもモデルの外部から確率的なショック (アーデルマンのタイプ II のショック) が加わる場合でも、実数値 GA を使用すれば良好な制御性能をもつ政策ルールの作成が可能であることが確認できた。計算時間の関係で物価や法人税については検討しなかったが、政府支出の結果からみてやはり良好な結果が得られるであろう。

#### 4. むすび

連続な探索空間で関数を最適化する問題は経済学でもよく現れる問題であり、古くから様々な解法が利用されているのは周知の通りである。それらの多くは微分情報を利用した解析的な方法であり、問題によっては解を得るためにかなり面倒な数学的な演算を行う必要がある。しかし現実には微分情報が得られなかったり、伝統的な方法では取り扱えない不精密性や不確実性を含んだ問題も少なくない。これらの問題には別の新しいアプローチが必要であり、そのひとつの候補としてザデー教授の提唱したソフトコンピューティングが注目されている。本研究ではそのなかでもとくにニューラルネットワークを取り上げ、KG モデルの制御問題について結合係数のコーディングを中心に考察した。すなわち係数を実数値として直接コーディングする実数値 GA を適用して制御用ネットワークの係数を確定した。この方法は従来のバイナリ表現に比べて計算時間を短縮できるうえに制御性能も良好である。ただし確率的な制御問題では探索範囲を有限個の点に限定する従来の方法よりは若干精度が悪くなる。

実数値 GA は KG モデルでは有効に機能したが、非線形性の強い問題や確率的な制御問題ではまだ改善の余地がある。これらの問題では変数間に強い依存関係が存在しているために単純な交叉では良い解が得られないのかも知れない。その場合には小野 (1999) の単峰性正規分布交叉や樋口 (1999) のシンプレクス交叉などを試みたらよいであろう。いくつかの代表的なベンチマーク関数に対して良好な性能を示しているのが有望である。

結合係数のコーディングとは別に、ニューラルネットの構造決定も複雑な大型の計量経済モデルでは重要な問題となるであろう。試行錯誤で決めることも可能であるが、できればこの決定も自動化したい。そのひとつの方法として GA を構造決定にも使うことが考えられる。つまり染色体上にネットワークの構造を表現し、それをトレーニングの可能なネットワークへ変換したうえで結合係数と誤差を計算して適応度とする。構造と係数の二つのレベルで GA を適用する方法はすでに簡単な問題に対して応用が試みられている<sup>4)</sup>。計算能力の向上により制御用ネットワークの構造設計にも利用されるようになるであろう。

一般に GA は最適解の近傍に近づくのは速いが局所探索能力が低いという問題がある。この問題を解決する方法として GA をヒューリスティックアルゴリズムと組み合わせることが考えられる。たとえば初期段階を GA で探索し途中からヒューリスティックに切り替えたり、反対に局所解をヒューリスティックで求め局所解の集合に対して GA を適用する。ヒューリスティックとしては山登り法やランダムサーチが有効であろう。

上で述べた交叉の問題と関連するが、GA の実行中に初期収束が起きて進化が途中で停止することがある。個体群の多様性が失われる現象であるが、これを防止するには集団数を300程度まで増やす方法の他に突然変異率を時間とともに変化させる方法も有効であろう。たとえばボルツマン・マシンの焼き鈍し法に倣って、はじめは変異率を高く設定しておき世代交代が進むにつれて低くする方法や、一定期間進化が停止したら変異率を高くして異質な個体を生み出す方法など

が考えられる。

最後に計算時間について触れておこう。GAは同じ内容の計算を繰り返し行う関係で膨大な計算を必要とする。プログラミングの工夫により計算時間の短縮はある程度まで可能であるが、より根本的な対策はGAの演算回路をハードウェア上で実現することである。こうしたハード化の研究はすでに始まっており、簡単な実システムに対してその高速性能が確認されている。経済問題にも適用できる程度にまで速やかに実用化されることを期待したい。

#### 脚注

- 1) 拙稿「ファジィ理論による言語的政策ルール分析」(『創価経済論集』第24巻4号所収, 1995年), 23-35頁, 「中央銀行の政策ルールについて」(『創価経済論集』第26巻1・2号所収, 1996年), 121-36頁, 及び「ファジィ推論による食肉需要分析」(『創価経済論集』第29巻1・2号所収, 2000年), 23-36頁。
- 2) 拙稿「ニューラルネットワークによるクライン=ゴールドバーガー・モデルの制御」(『創価経済論集』第27巻3・4号所収, 1998年), 17-30頁。
- 3) Davis (1990), 樋口 (1999), 小野 (1999), 喜多他 (2000) など。
- 4) 北野編 (1993) の第9章を参照。

#### 参考文献

- [1] Adelman, I and F. Adelman, "The Dynamic Properties of the Klein-Goldberger Model", *Econometrica*, Vol, 27, pp596-625
- [2] 伊庭齊志『遺伝的アルゴリズムの基礎』オーム社, 1994年
- [3] 小野 功, 小林重信「単峰性正規分布交叉 UNDX を用いた実数値 GA による関数最適化」『人口知能学会誌』第14巻6号, 1146-55頁
- [4] 釜 国男「ファジィ理論による言語的政策ルール分析」『創価経済論集』第24巻4号, 23-35頁
- [5] ————「中央銀行の政策ルールについて」『創価経済論集』第26巻1・2号, 121-36頁
- [6] ————「ニューラルネットワークによるクライン=ゴールドバーガー・モデルの制御」『創価経済論集』第27巻3・4号, 17-30頁
- [7] ————「ファジィ推論による食肉需要分析」『創価経済論集』第29巻1・2号, 23-36頁
- [8] 喜多 一, 小野 功, 山村雅幸「実数値 GA とその応用」『人口知能学会誌』第15巻2B号, 259-66頁
- [9] 北野宏明「遺伝的アルゴリズムとニューラル・ネットとの融合」北野宏明編『遺伝的アルゴリズム』第9章, 235-62頁, 産業図書, 1993年
- [10] Davis, L. *The Handbook of Genetic Algorithms*, New York: Van Nostrand-Reinhold, 1990
- [11] 樋口哲也, 山村雅幸「実数値 GA におけるシンプレクス交叉の提案」第26回知能システムシンポジウム講演資料, 267-72頁