SDの歴史とSDモデルの信頼性

島田俊郎

1. SDの歴史

SDは1956年，MIT の Jay W. Forrester により創案された．最初は企業の動的な特性を研究するために考えられたものでインダストリアル・ダイナミックス[1]（ＩＤと略称する）と呼ばれた．

ＩＤは(イ)企業システム内のフィードバック・ループを解析するのに好適である，(ロ)非線形方程式を扱うことができる，(ハ)システムの状態を比較的自由な時間間隔に応じて計算することができるなど，数々の特徴をもっていたため，当時いちじるしい注目を集めた．

1967年 Forrester は地域問題に目を向け，ＩＤの手法によりこの問題を扱い，1969年 Urban Dynamics[3] が出版された．1970年ベルンのローマクラブ会議で，Forrester はＳＤに関する講演を行なったのに続いて世界モデルの構成に着手，その成果は，1971年 World Dynamics[4] として出版された．他方 1970年7月ローマクラブは，Forrester グループの Donella H. Meadows を主査とするチームに「人類の危機に関するプロジェクト」の研究を委託し，それに対する Meadows の報告が The Limits to Growth（邦訳 "成長の限界"）[6] として世界に紹介された．本特集ではワールド・ダイナミックスをＷＤと略称する．

このように Forrester の創案になるシステムの解析法はＩＤから出発して，ＵＤ，ＷＤと進み，さらに国家レベルの問題を扱うナショナル・ダイナミックス（ＮＤと略称），健康医療問題を扱うヘルス・ダイナミックス（ＨＤと略称）など広く社会システム全般を扱うに至っているが，現在 Forrester にしたがいこれらを総称してシステム・ダイナミックスと呼んでいる．

このようにＩＤ，ＵＤ，ＷＤ，ＮＤ，ＨＤなど各種の言葉が使われているが，対象の違いによる言葉の相違であり，基本となる方法論は同一であ

システム・ダイナミックス特集のねらい

現在わが国でシステム・ダイナミックス（System Dynamics, SD と略称）が最もよく利用されかつ報告としてまとめられているのは，地域問題を扱うアーバン・ダイナミックス（ＵＤと略称）の分野である．

そこで予定スペースの関係もあって，本特集のモデル例をＵＤの分野にまとめた．

「埼玉モデル」はモデル構成法を，「広島モデル」はシナリオ法，アンケート調査のＳＤモデル構成への利用を，「兵庫モデル」は，ＳＤモデルの将来計画への利用を，それぞれの報告の主題にし，第１の報告は，他の報告では扱われないＳＤモデル・シミュレーションの信頼性に関する討論をとりあげるというのが，本特集の計画であった．

不充分ながら，ＳＤモデルの構成法，評価とその利用法を読者に伝えることが本特集全体としてのねらいである．

特集の編集にご協力願った中央大学亀山三郎，味の素株式会社冨田潔の両氏に謝意を表するものである．

（島田）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

って，Forrester の Principles of Systems[2]にまとめられている．

わが国へのＳＤの紹介は1967年渡辺一司・坂倉省吾の「インダストリアル・ダイナミックス」[5]にはじまり，以後坂倉，渡辺の数冊の訳・著書，小玉陽一の訳書「アーバン・ダイナミックス」[3]，「ワールド・ダイナミックス」[4]，石田晴久・小林秀雄訳の「インダストリアル・ダイナミックス」[1] が相ついで出版された．

1973年には，日本ＯＲ学会の研究部会の１つとしてＳＤ部会が発足した．

ＳＤの適用はわが国でもこの10年位の間に各種試みられ，学会などでもかなりの数が報告されているが，まとまったモデルとして誌上に報告された例はそう多くなく，ＳＤ部会事務局にある適用例の報告としては，日本経済モデル[8]，たばこの世界モデル[9]，埼玉モデル（本特集２），広島モデル(本特集３)，兵庫モデル(本特集４)，京都モデル[10]，むつ・小川原モデル[11]，自家用車都心乗り入れモデル[12]，原子力発電所ＴＡモデル[8]，蒸溜塔モデル[13]，大学モデル[14][15]などがある．

上例で見て明らかなとおり，これまでのＳＤの適用例はＵＤ，ＷＤ，ＮＤに属するものが多く，ＩＤ例は少ない．実際にＩＤ適用例が少ないのではなく，機密保持の関係から発表がむずかしいので報告が少ないと考えられる．われわれはＳＤが企業モデルに役立たないとは考えていない．石油危機を契機とした今回の不況下の企業モデルにとっては，従来の経済学的方法の適用の困難さの故に，現実にはＳＤモデルがかなり試みられていると考えられるので，機密にふれない程度のモデル公表が切望される．

ＳＤがＩＤとして創案された頃，モデルをIBMのコンピュータにかけるために，MIT グループによりDYNAMO[7]と呼ばれるシミュレーション言語が開発された．時間の変化に応じて連続的に変数の値を出力できるいわゆる連続型コンパイラの代表的な例である．ＳＤの現在までの普及はDYNAMO の便利さによるところが大きい．DYNAMO は方程式作製のためには大変便利であるから，ＳＤそのものに全幅の信頼をよせない者でも DYNAMO を方程式処理の道具として使用しようという向きもある．このようにDYNAMOははなはだ便利ではあるが，大型の機械でなければ利用できないので，その点に制約がある．

これに対してやはり IBM で開発された連続型コンパイラ CSMP があり，DYNAMO 方程式をCSMP方程式に変換することが可能である．CSMPに対応するものとして，CSSL, DDS, CSPL, ADSL などとよばれるものがあり，中型機で処理できる点で，日本では DYNAMO より利用しやすいと考えられる．

2. ＳＤとはなにか

ＳＤは非常にすぐれた特徴をもつ，それでいてすこぶる議論の多い手法である．ＳＤをどのように考え，どのように定義するかは，人によりさまざまである．わが国でＳＤを使っている人々の間でもその定義は必ずしもまとまっているとはいえない．ＳＤをシミュレーション手法の１つであると考える人もいるし，ＳＤはシステムの動特性に関する理論であると考える人もいる．そこでまず創案者の Forrester の言葉を引用しよう．

“Industrial Dynamics”[1]の中で Forrester は次のようにいっている．「Industrial Dynamics は，経営のためのシステム分析の１つの方法である．それは，時間とともに変わる経営システム部分間の相互作用をとり扱う」(p.9) さらに同書の中で，「ＩＤは，企業システムのインフォメーション・フィードバック特性の研究および企業形態の改良と，政策設計のためのモデルの利用法である」といっている(p.13)．また，時間とともに変わる(time-varying)という言葉を Forrester は dynamic と呼んでいるのでIndustrial Dynamics のDynamics という言葉はこのような意味で使われている．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

このように Forrester は "Industrial Dynamics" の中では，ＩＤをモデルによって企業経営のためのシステム分析を行なう１つの方法と考えている．

次に "Principles of Systems"[2] においては，「本書は，システムの動きのかげにある基礎的な principles を説明する」といっている(同書表紙裏)．さらに「本書は，時間とともに変化するシステムをとり扱う処理方法の補助としてコンピュータ・モデルを構成するための基盤を展開する」といっている(p. 3-2)．

同書の中で多くの principles が述べられているが，その大部分は，上の引用文のとおり，ＳＤモデル構成のための原則である．したがってこの本の段階までは，ＳＤは方法として扱われていたと考えられる．しかしながら，Forrester は，同書中の多くの principles によって，システムの theory を扱っていると考えるようになったに違いない．次の "Urban Dynamics"[3] にそれがあらわれる．

すなわち，「本書において，都市域の特殊なシミュレーション・モデルが考察される．このようなモデルは，都市構造とその内部関係を扱う theory である」，といっている(p. 2)．モデルが theory であるというのは，誤解を招きやすい文章であるが，Forrester の真意は，ＳＤは，シミュレーション・モデルによってシステムの構造と成分相互関係を扱う理論である，ということであろう．このように明確に theory という言葉が用いられているのであるが，この点に関しては異論が多く，ＳＤ以外の分野の人にはほとんど受け入れられていないようである．

Forrester の考えは上述のとおりであるが，筆者はＳＤを次のように考える．

「変動するシステムのシミュレーション・モデルによって，そのシステムの動特性を明らかにしようとする方法がＳＤである．」

システムの動特性を研究し，それを理論化するのが目標ではあるが，現在のＳＤはまだ方法論の段階にあり，多くの研究がモデル設計を主体としているのが実情である．

ここでＳＤの方法論としての特徴にふれよう．

1. レベル変数(状態量)とレート変数(流れの量)の区別をはっきりさせる．
2. フィードバック・ループの解析が容易である．
3. おくれ(delay)の扱いが容易である．
4. 非線形方程式を扱うのが容易である．
5. 一過現象を扱うことができる．

3. 世界モデルとその討論

ＳＤに対する評価のわかれるところは，その長期的な計算結果の信頼性にある．そこで世界モデルに対する討論について述べよう．

Forrester の世界モデル[4](普通 World 2 モデルと呼ばれる)，それを改良した Meadows のモデル[6](World 3 モデルと呼ばれる)はいずれも成長の限界を警告した．

World 2 は，人口，天然資源，資本投資，農業資本投資率，公害の５レベル変数よりなるモデルである．一般にＳＤモデルで最も基本的なものはレベル変数であるが，World 2 の上記５レベル変数が World 2 の構造を決める重要な役割を果している．World 2 の標準のランは，1900年～2100年の間に，天然資源が絶えず減少することによって，人口は2020年をピークとし以後減少，公害は増大し，人類が危機を迎えることが避けられないことを示している．

この点は，Boyd 等が指摘するとおり，Forrester モデルがマルサス流であることを意味する．このような危機を避けるために Forrester は５つの政策を勧告している．すなわち，天然資源利用率，公害発生レート，資本投資レート，食糧生産，出生率をきわだって減少させることである．それによると，生活の質は低下を止め，高い水準に戻る．

Meadows の World 3 は，本質的には World 2 を継承しながら，資本投資のレベル変数が２に，

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

農業部門のレベル変数が4に増加されており，多くの資料収集と多人数のチーム力による多大の努力によって，モデルの改良がなされた．World 3は World 2 の約3倍の方程式群からなり，数値関係の多くは実績値から推定されている．World 3の種々のランの結果は，World 2と細部において異なるものの，成長が2100年以前に停止しそれ以後の崩壊につながることは同じである．

さて，有限な1遊星のうえで人口と工業化が指数的に成長することは不可能である，ということに論争の余地はない．しかしWorld 2 やWorld 3がいうような荒療治をしなければ近々100年位のうちに世界的な災厄が訪れるということには，多くの異論がある．ここでその2例をとりあげよう．その1は，Robert Boyd[16] であり，他はSussex大学グループ[17]である．

BoydはForresterの World 2に新しく Technology のレベルを導入し，同時にそのレベルに流入するレート，レベルから流出するレートを設定し，それらに関連していくぶんかの変更を加えた．Boyd のめざしたところは，研究開発の能力増加によって，より少ない天然資源とより少ない人口により，より少ない公害のもとで同量の品物を生産するということであった．ランの結果は，World 2とまったく異なり，上昇する生活水準により出生率が減少して食糧・人口過密の危機がさけられ，Boyd いうところのユートピア的均衡に達することを示した．

他方，Sussex グループは，多くの人間，しかも多方面の専門家を集めて，大々的にWorld 2およびWorld 3を検討した．資源，人口，農業，資本・工業生産，公害の各部門，およびエネルギー資源をグループのメンバーがそれぞれ分担して，各部門の構造，データについて精細な検討を加え，部門ごとに採用されている仮定の中に疑問のものがあるとの意見を述べ，それらの点をテストするために，各種の変更を行なったランを報告しているが，成長崩壊の様子がいちじるしく変化することを示している．さらに同グループは，World 2モデルを1900年以前に逆向きに計算させ（この方法はbackcastと呼ばれる），過去の実績値に適合するだろうとの予期に反して，公害と資本投資が負となるところが生じ，人口が1880年以前にいちじるしく大になるという奇妙な特性を示すことを発見した．

Sussex グループの論文ののった同じ雑誌上にMeadows たちの反論[17]が掲載されているが，この反論を書くために数日の余裕しか与えられなかったと彼らはいっているので，必ずしも的確な議論とはいえない面もあるが，非常に真摯な反論を行なっている．

それによると，「Sussex グループは，主として経済学と自然科学の専門家たちである．これらの領域は，精密な短期予測をめざしてモデル構成法を発展させてきた．他方，ＳＤモデルは一般的で全体的であって，短期予測のためでなく，複雑なシステムの長期的な変動特性の探究のために設計されている．Sussex グループの最も基本的な誤りは，World モデルを評価するのに用いられた基準として完全さを選んだことである．Sussex グループは，ＳＤは完全な方法ではないというがそれではよりよい方法を示唆しているかといえばそれをしてはいない．

なるほど彼らのいうとおり，複雑なシステムをモデル化するわれわれの試みは大変原始的な水準のものではあるが，われわれはその原始的な水準を，達することのできない完全さに比べるのではなく，現実の社会の政策模型である他のモデルと比べようというのである．」

第2のまちがいとして指摘しているのは前述のbackcastingについてである．backcastは負のフィードバック・ループを正に置きかえるので，モデルの計算が進むにつれて誤謬を増すのは必然であるといっている．

この他にも基本的なまちがいがあると反論しているが，Meadows たちも Sussex グループの批

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

判のすべてを拒否するのではなく，World モデルに対する充分で組織的な解析の試みに対する謝意をあらわしている．

最近 Erickson[18] は，World 2 の関数・パラメータの感度分析，2400年までのランなどの研究を報告しているが，その中で上記 backcast に関する逐次近似法を提案している．すなわち，1880年にある初期値を仮定し，それを用いて World 2 に対する計算を行ない，得られた1900年の値を，World 2 における Forrester の1900年初期値と比較する．その差による補正を1880年のもとの初期値にほどこし，これを第2の初期値としてランさせる．このような操作を繰り返す．これが逐次近似法であるが，これによって Erickson が得た結果は，前述の Sussex の結果と，グラフで見る程度では一致している．

Boyd, Sussex グループとも上記批判論文中で，世界モデル，さらにはＳＤそのものも信頼性に乏しいと述べている．

しかしながら，ある時点からパラメータの値を変えることにより将来値が大きく変わるのは別に驚くに当らない．将来の条件が変わるのであるから，将来の計算値は変わって当然であろう．したがって，Boyd, Sussex グループのように大きく将来値が変わるからＳＤは信頼性が薄いと結論づけるのはうなづけない．

Boyd の場合は，むしろ，レベル追加というモデル構造の重大な変革を意味するから，現在までの歴史的データのあてはまり方を比較検討したうえで，将来のシステム構造の変化を調べるべきであろう．

Forrester, Meadows の世界モデルは，世界中の大きな注意を呼び，経済成長に対する反省をうながすとともに，そのモデルに対する多くの研究を誘発し，ＳＤの validation のためのいく種類かの方法をつけ加えた．初めて世界モデルを構成した功績に加えて，上のような機運をもたらしたことも，Forrester, Meadows の功績といってよいであろう．

4. 政策シミュレーションの効用

World モデルもそうであったが，ＳＤモデルでは，政策の効果比較がよく行なわれる．筆者の試みたモデルを例として説明しよう．

4.1 年金シミュレーション

図1は，筆者の私立大学モデルの年金部門シミュレーション[19]より作られたものである．私立大学モデル[18]は，ある架空の大学のモデルで，学部部門11，建築部門，大学財政部門，年金部門の計15部門よりなるモデルである．外生変数の1として教育公務員給与ベースが用いられており，これを主要因として大学の教職員給与ベースが計算される構造になっているので，モデル全体の動特性が教育公務員給与ベースによって変化することになる．

本モデルのシミュレーションは最初昭和36年～45年のデータにもとづいて46年に行なわれた．シミュレーション結果のうち年金積立金残高が図1に示されている．教育公務員給与ベースは，45年までほぼ実績値で，以後の予測値は10%以内のベース・アップが仮定されていた．

ａは年金基礎ランで，教職員掛金率本俸の2%，法人負担率3%，計5%，年金基準は退職時給与におかれ，スライド制導入はない．

ｂは48年度より教職員掛金率2.4%，法人負担率3.6%，計6%に引上げられ，他は基礎ランと同じである．

ｃは，掛金率，負担率ともｂと同じで，スライド制を導入，現在の給与ベースと年金基準ベースとの差の50%を付加する場合である．

図1によると，ａは，昭和62年頃22億位でピークに達し，以後急激に減少する．ｂはピークが65年頃となり，最大値も27億位に増加している．ｃはａ，ｂの間に入り，ａより幾分か高い．このようなランを繰り返すことにより，どの程度の掛金率・負担率なら，どの位のスライド制がとり得る

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

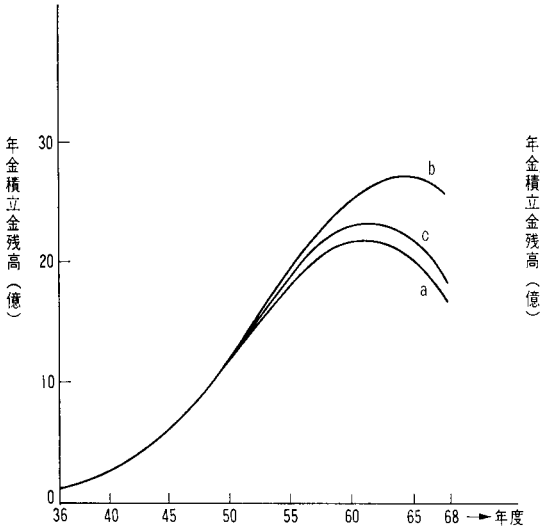

図 1

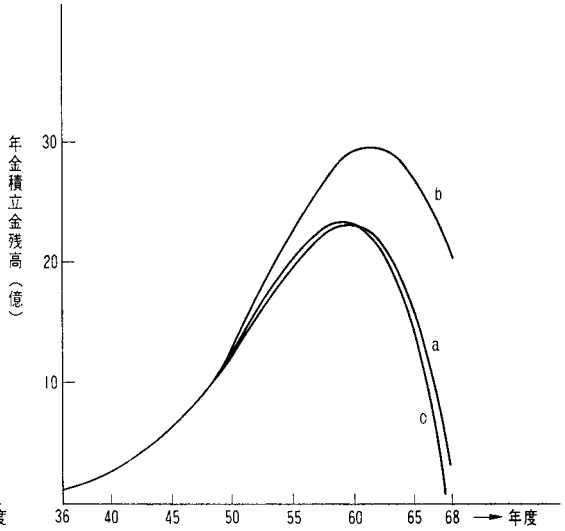

図 2

かを知ることができるであろう．

4.2 政策シミュレーションの効用

本年金例のように，また先の世界モデルのように，SDモデルの報告中に，しばしば何十年先の数値が計算されている．しかし一般的には，その数値そのものには大きな信頼性はない．その計算された数値は，そのモデルが，仮定した条件のもとで計算したものにすぎないからである．

その点に関しては，Boyd, Sussex グループの論文で，世界モデルの計算値が容易に変わるというのは正しい．本年金例もこれから述べるとおり将来の計算値がいちじるしく変わる例である．先に述べたとおり，昭和36年～45年の教育公務員給与ベースの実績値により将来のベース値を予測しこれを外生変数として計算されたものが図1であった．

46年以降は10%以内の給与ののびが予測されていたが，周知のとおり，47年，48年，49年の実際ののびは，45年当時予想もできなかったような，15%，21%，32%の変化を示した．そこで，50年までをほぼ実績値とし以後を12%より6%まで漸次減らした教育公務員給与ベースを仮定，他に大学関係の定数に若干の修正をほどこして最近行なったランが図2である．(大学のシステムは，企業の場合と異なり，今回の景気変動に際しても，システム構造の変更を見ていないので，モデルもシステム構造はもとのままである．) a，b，cは図1と同じく，aが基礎ラン，bは掛金率変更，cはスライド制導入のランである．図1と図2とで数値の違いがいちじるしい．このように遠い未来の数値そのものは条件によって大きく変わる．

それではこのような政策シミュレーションの効用はどこにあるのであろうか．

図1で見るとおり，aは62年頃，掛金率を引き上げたbは65年頃頭を打って急激に減少する．図2ではそれがさらにはげしい．aで59年，bで62年に頭を打ち，その後の減少は．はなはだ急である．この年金が近い将来なんらかの対策を必要とすることは明瞭であろう．そしてどのような対策が有効であるかを検討するための種々のランを本モデルが用意することは可能性があると考える．

もう1点考えさせる問題がある．

図1に比べ図2がなぜ状況が悪くなったかということである．教育公務員給与ベースは47年までゆるやかに上昇，48年～49年急激に上昇し，50年以後再びゆるやかに上昇する．よって48年～49年のところに1つの上昇階段があると考えることができよう．詳論を省くが，図1と図2の違いは，

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

この階段のあるなし，いいかえると急成長から安定成長への急激な変化があるかないかによると考えられる．

このように景気の急変の影響がその直後でなくかなりたってからいちじるしい結果としてあらわれる例もあることを本シミュレーションは示している．

このような，数値をはなれた特性が，原システム自身の動特性なのか，モデルの動特性なのかは，なお検討すべき点があるものの，このように，モデルの示す動特性を研究し得る点に現段階のＳＤシミュレーションの効用があると報告者は考える．

最後につけ加えるが，ＳＤの信頼性に対する疑念を晴らすために，ＳＤモデル構成者も，ＳＤ方法論研究者も充分の努力が必要である．ＳＤ以外の分野の人々の納得できる方法でないとＳＤの評価を上げることは困難である．

参考文献

外国の文献は，System Dynamics Group, Alfred P. Sloan School of Management, M. I. T., Cambridge, Mass. 02139 から毎年発行される System Dynamics Newsletter にくわしくのっている．

わが国の文献をＳＤ研究部会で整理しているが，以下には本報告で引用したもののみをあげる．

単行本

1) Forrester, Jay W., Industrial Dynamics, M. I. T. Press, 1961. (訳) 石田晴久，小林秀雄，インダストリアル・ダイナミックス，紀伊国屋書店，1971.
2) Forrester, Jay W., Principles of Systems, Wright-Allen Press, 1968.
3) Forrester, Jay W., Urban Dynamics, M. I. T. Press, 1969. (訳) 小玉陽一，アーバン・ダイナミックス，日本経営出版会，1970.
4) Forrester, Jay W., World Dynamics, Wright-Allen Press, 1971. (訳) 小玉陽一，ワールド・ダイナミックス，日本経営出版会，1971.
5) 渡辺一司，坂倉省吾，インダストリアル・ダイナミックス，東洋経済新報社，1963.
6) Meadows, Donella H. et al., The Limits to Growth, A Potomac Associate Book, 1972. (訳) 大来佐武郎監訳，成長の限界—ローマ・クラブ「人類の危機レポート」，ダイヤモンド社，1972.
7) Pugh, Alexander L., Ⅲ., DYNAMO Ⅱ User's Manual, M. I. T. Press, 1970.
8) bit 臨時増刊，システム・ダイナミックス，共立出版，1973.

論文

9) 大沢光，たばこの世界モデル，たばこ総合研究センター，1974.
10) 京都市，京都土地利用ダイナミックス，その開発と運用，京都市，1974.
11) 山内昭，樋口透，小島崇弘，システム・ダイナミックスによる地域開発モデルのコンピュータ・シミュレーション，地域学研究，1974.
12) 運輸省，自家用車の都心乗り入れに関するシステム分析(PPBSケース・スタディ)，運輸省，1973.
13) 栗原宏文，Optimal Control of Fluid Catalytic Cracking Processes, Automatica, Vol. 6, 1960.
14) 島田俊郎，私立大学のインダストリアル・ダイナミックス・モデル 第2報，明大科研紀要10，1971.
15) 島田俊郎，システム・ダイナミックスによる年金部門シミュレーション，明大商学論叢第56巻，1974.
16) Boyd, R., World Dynamics: A Note, Science. Vol. 177, 1972.
17) Science Policy Research Unit, Univ. of Sussex, Futures, Vol. 5, No. 1, No. 2, 1973,
18) Erickson, S. A., Pikul, R. A., Numerical Methods for Analyzing World Dynamics Models, Naval Underwater Systems Center Technical Report 4674, 1975. 第7回 IFORS paper forum で発表.

執筆者紹介

しまだ・としろう　明治大学商学部教授
1917年生
専攻：体系工学，経営数学
略歴：東京大学工学部航空学科卒業後，山梨大学を経て現在に至る．商学博士．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．