



特集 赤池統計学の世界

現在のデータにもとづいて「モデル」を構成し、そこから将来を「予測」する。この統計科学の方法論は今やさまざまな研究分野に浸透している。30余年前、その礎を築いたのが赤池弘次博士（総研大名誉教授）だ。「赤池統計学」といえる研究の足跡と根源的な思考、その流れをくむ研究の現状を、Part1「赤池統計学の源流」、Part2「赤池統計学の展開」、Part3「赤池弘次博士に聞く」の3部構成で紹介する。

Special Feature Akaike's Contribution to the Science of Modeling

A "model" is constructed based on current data and from this the future is "predicted" – even today, the methodology of statistics pervades a diversity of research fields. The foundation for this methodology was established 30-odd years ago by Dr. Hirotosugu Akaike (Professor Emeritus, SOKENDAI). Here we introduce the legacy and fundamental thinking of the field of research known as "Akaike Statistics", as well as the current status of research descended from this school, in three parts: Part 1, *Origin of Akaike Statistics*, Part 2, *Development of Akaike Statistics*, and Part 3, *Ask Dr. Hirotosugu Akaike*.



海外派遣で世界に飛び立つ総研大生たち

総研大生に短期留学の機会を提供する「海外学生派遣事業」。海外の第一線の研究室を訪れてみれば、自分の研究のポジショニングが見えてくるし、新しい仲間との交流も生まれる。辛いこともある。派遣先選びに始まり、アパートの手配など、すべて自分でやらなければならない。第1回目の平成18年度に派遣された学生たちに、それぞれの体験を聞いてみた。

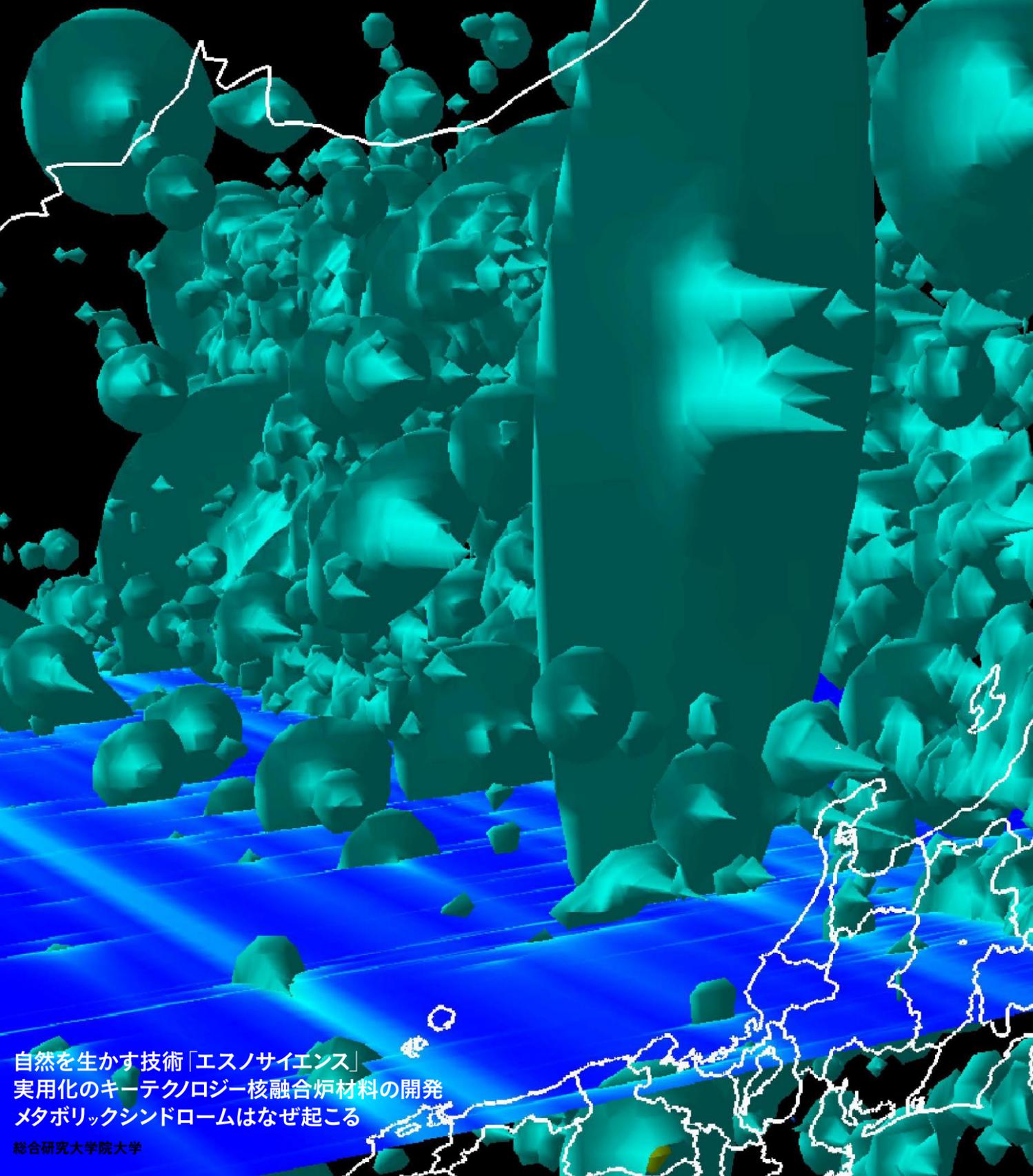
SOKENDAI Students Fly off around the World on Overseas Dispatches

SOKENDAI provides students with opportunities for short-term study overseas through its "Overseas Student Dispatch Activities". By visiting front-line research laboratories overseas, students are able to gauge the positioning of their own research and forge friendships and exchange with new colleagues. They also face difficulties, from selecting their dispatch destination and finding accommodation, all of which the students must do for themselves. We asked the students who participated in the program in 2006, the program's inaugural year, about their various experiences.



赤池統計学の世界

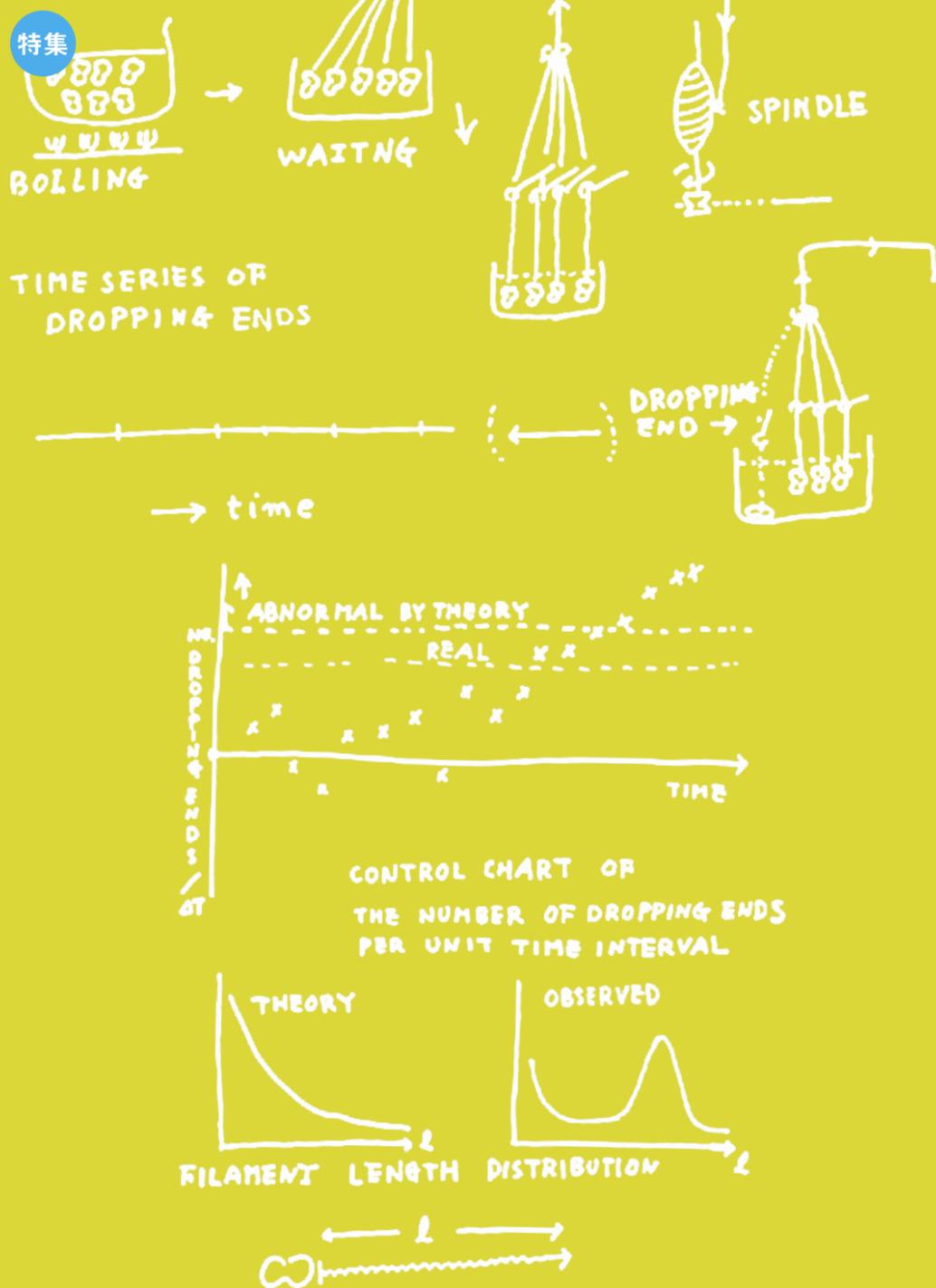
赤池統計学の源流 / 赤池統計学の展開 / 赤池弘次博士に聞く



自然を生かす技術「エスノサイエンス」
実用化のキーテクノロジー核融合炉材料の開発
メタリックシンドロームはなぜ起こる

統計科学は今日、データを扱うあらゆる研究分野に浸透し、科学的研究のための方法論を提供している。多様なデータと知識を結びつけてモデルを構成し、モデルにもとづいてデータを生み出したシステムを理解し、予測や新たな知識発見を行う。「モデリング」と「予測」。この重要な概念を統計学の中心に据えたのが赤池博士（総研大名誉教授）であった。以来30年余、大量データの生成に伴って科学研究のスタイルが変化しつつあるなかで、赤池統計学はさらに応用分野を広げている。2006年12月には、その功績に対して京都賞が贈られた。この特集では、Part1「赤池統計学の源流」で研究の足跡をたどり、Part2「赤池統計学の展開」では赤池博士の薫陶を受けた研究者たちの活動を紹介。Part3「赤池弘次博士に聞く」では、堀田凱樹・情報・システム研究機構長との対談を通して、赤池統計学の真髄に迫る。

赤池統計学の世界



生糸操糸工程の管理図法を記した赤池博士のメモ（21ページ参照）

Part 1 赤池統計学の源流

実世界との接点が生み出したパラダイム転換

北川源四郎

総合研究大学院大学教授 統計科学専攻 / 情報・システム研究機構 統計数理研究所長

赤池情報量規準AIC、ベイズ型情報量規準ABICに代表されるように、赤池統計学は統計学にパラダイム転換をもたらした。数多くの研究は現実の問題を解決するという必要性から生まれた。その思想と研究の流れを追う。

記述統計学から推測統計学へ

過去のデータや経験にもとづく将来予測や意思決定。われわれが日々何気なく行っているこのような行為は、人類がその進化の過程で獲得してきた知的な情報処理機能である。統計学はこのような人類のさわめて知的な営みを定式化したものといえる。しかしながら、確定的世界観にもとづく知的な営みがニュートン力学によって数理的方法として確立したのとは対照的に、複雑で偶然を伴う実世界をデータにもとづき科学的に把握するための方法論の歴史は比較的浅く、確率的思考は遅れて世に出てきた。

ゴルトンが遺伝の研究から類似性の指標となる相関係数の概念を見だし、K.ピアソンがあらゆる現象が科学の対象となりうることを主張して「科学の文法」を提唱したのは19世紀も末のことである。K.ピアソンたちは、観測データから

さまざまな現象を分布としてとらえる記述統計学を確立した。これに対して、20世紀に入るとフィッシャーたちは、現象を表現するモデルを仮定し、厳密に設計された少数の実験データからモデルを得る推測統計学を進めた。この実験にもとづく科学的方法論の確立によって、生物、医学、薬学、経済、心理、調査、品質管理などの複雑な現象の解析や管理において著しい成果が得られてきた。こうして近年に至るまで、理論科学と実験科学が科学的方法論の双壁を成していたといえる。

情報量規準AICへの軌跡

20世紀後半になると、現実の問題が複雑化・多様化する中で、「真のモデル」の存在を前提とする、従来の統計的推論の枠組みはしだいに現実とそぐわないものとなってきた。1973年、赤池氏は将来のデータを予測する状況を想定し、もっとも良い予測値を与えるモデルを求

めるための規準AIC（Akaike Information Criterion）を提案し、統計学の歴史に偉大な足跡を残すこととなった。

情報量規準へ至る道には3つのポイントがあった。まず、第一は「予測」の視点である。従来の統計推論が、自然科学の目的とする「真理の探究」に対応して、「真の」モデルの推定をめざしたのに対して、将来の予測のために「良い」モデルを求めることをめざしたのである。真のモデルをめざす立場と、予測のための良いモデルをめざす立場には大きな隔たりが存在する。真のモデルの推定をめざして得られたモデルが、予測のために良いモデルとはいえないのである。

第二は、予測の問題を「分布」としてとらえるという立場である。赤池氏は1968年には予測誤差分散の推定量としてFPE（最終予測誤差）規準を提案し、時系列モデルの次数選択の自動化に成功していた。しかし、予測誤差の大きさに拘るかぎり、時系列モデルの推定は実用化できても、一般の統計的モデルの評価規準は得られなかった。赤池氏は、予測の問題は「値」ではなく「分布」としてとらえるべきことに気づき、モデルの良さを予測分布の近さで評価することにした。

第三は、その分布の近さを測る尺度として、カルバック-ライブラー（K-L）情報量を用いたことである。K-L情報量はボルツマンのエントロピーとも密接に関連する。ただし、K-L情報量には真の分布とモデルの分布が必要であり、そのままでは統計的モデルの評価には利用できない。赤池氏は、K-L情報量（の本質的部分）をデータによって不偏推定したものが、

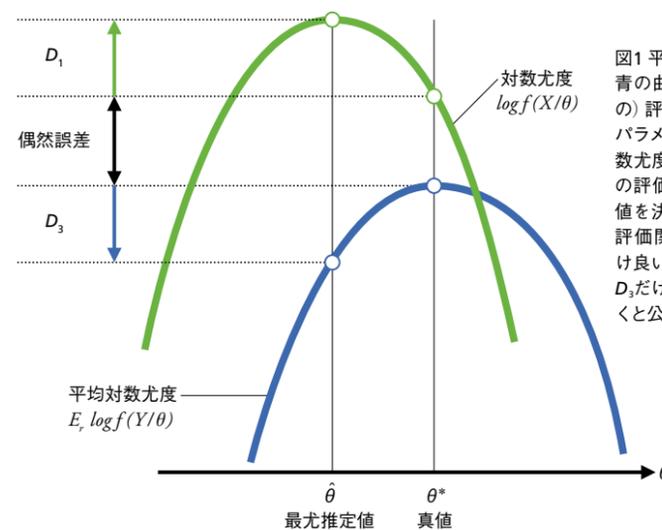
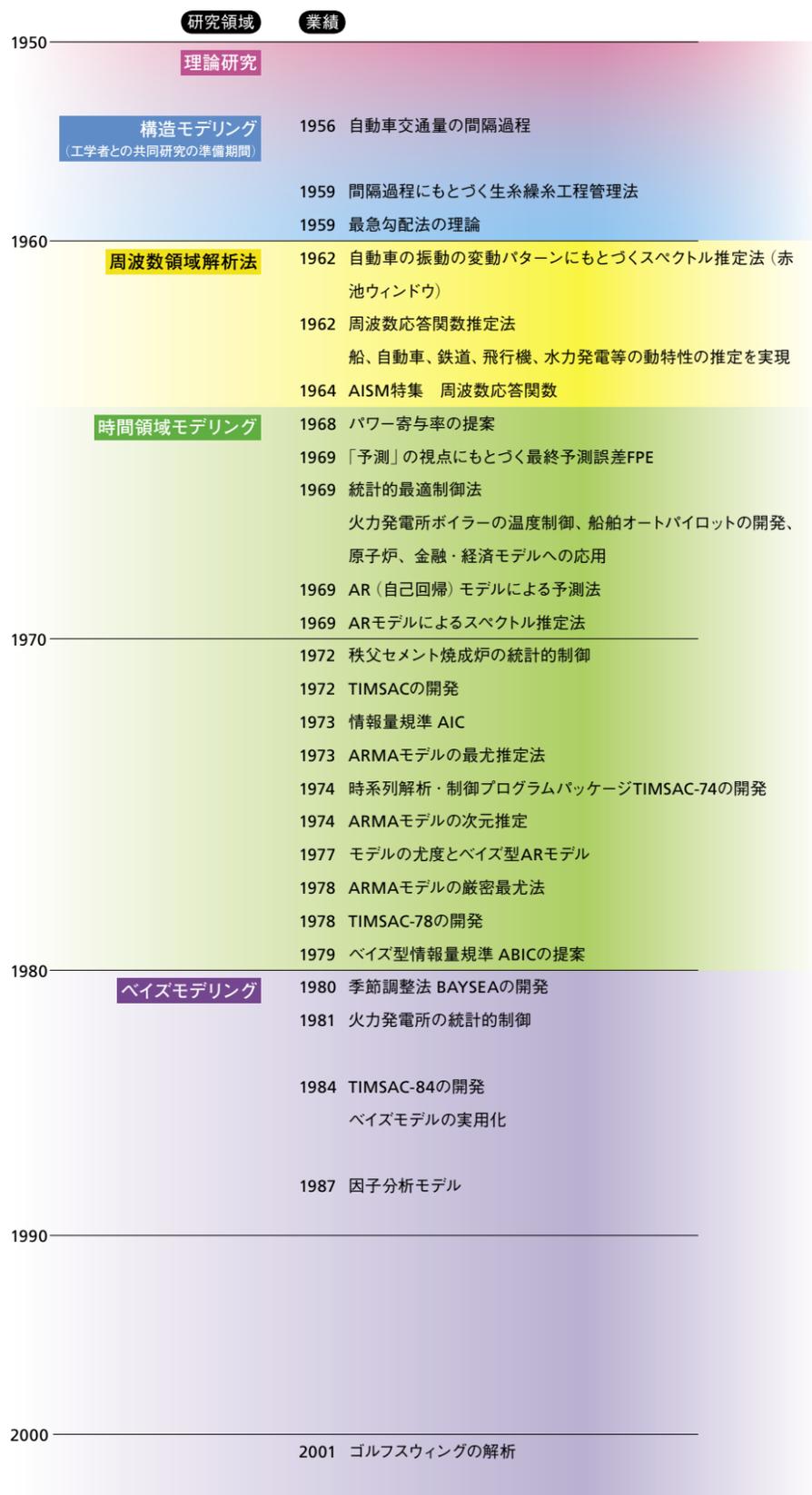


図1 平均対数尤度と対数尤度の関係
青の曲線（平均対数尤度）は（未知の）評価関数。その最大点が、最適なパラメータを決める。緑の曲線（対数尤度）はデータから推定した見かけの評価関数。その最大点が最尤推定値を決める。最尤推定値は見かけの評価関数によれば、最適値より D_1 だけ良いが、本当の評価基準によれば D_3 だけ悪い。 D_1+D_3 を対数尤度から引くと公平な評価ができるようになる。

図2 赤池弘次博士の研究史



対数尤度になることに気がついた(図1)。この解釈によって、対数尤度最大化によりパラメーターを推定する最尤法は、実はK-L情報量の最適化をめざしていることを明らかにしただけでなく、原理的にはさまざまなモデルの良さを対数尤度の大小で比較できることがわかった。数理統計学の重要な概念であった尤度に関して、不思議にも従来この視点が欠落していたのである。

対数尤度がモデルの良さを表すとすれば、候補となるモデルが多数ある場合には、対数尤度最大のモデルを探せば、最適なモデルが決まると期待できる。だが、現実にはそれほど簡単ではなかった。未知のパラメーターをデータから推定した場合には、対数尤度は正の偏りを持つ。その補正を行わないかぎり、公平なモデル比較はできない。赤池氏はこの偏りが、パラメーター数に比例することを見だし、それを補正することによって情報量規準

$$AIC = -2(\text{最大対数尤度}) + 2(\text{パラメーター数})$$

を導いた。

AICは統計的モデルの良さをデータにもとづき客観的に評価する。したがって、多項式の次数やフーリエ展開の項数のようにモデルが未知の「次数」を含む場合には、AICを最小にする次数を選ぶことによって、客観的に次数選択を実現できる。最高次数の係数が有意かどうかの検定を繰り返し適用する、従来の統計的方法に比べれば、格段に実用的になったことはいうまでもない。情報量規準AICの利用により、原理的にはすべての統計的モデルを同時に評価し、相互比較することが可能となる。

しかし、AICを便利なモデル選択基準と見なすのは適当ではない。AICの導入は、20世紀初頭以来の実験科学のための検証の統計学から知的情報処理のためのモデリングへと、統計的パラダイムの転換をもたらした。

AICの導出から明らかのように、情報量規準には「真のモデル」は不要であ

り、これがいくつかの重要な問題を提起した。第一に、われわれがなしうるモデル選択は相対的なものであり、常により良いモデルが存在する可能性が残されている。したがって、特定のモデル族の中で、最適なものを探すことにより、良いモデル族を提案することのほうがはるかに重要である。これはモデリングの重要性、科学研究における仮説提示の重要性を示している。

次に、いったん「真のモデル」の推定をめざす客観的な推論という立場を離れると、必然的に「良い」モデルを求めるという方向に進むことになる。従来統計的推論においては、データにもとづく客観的推論をめざすことが主流であったが、いまや、観測されたデータだけでなく、対象に関する理論や知識、これまでの経験などのすべての情報を用いて「良いモデル」を構成することが肝要となった。情報量規準はそのような主観的に提示されたモデルに関しても客観的な評価を可能にした。情報量規準の提案は、科学研究におけるモデリングの重要性を明らかにし、それを実現する具体的方法を与えたことになる。

ベイズモデル実用化の先達に

社会の情報化が急速に進展し知識社会へ向かおうとする現在、情報技術の飛躍的進展によって、多くの科学研究分野や一般社会で大量のデータが時々刻々蓄積し、データベースが構築されつつある。このような情報化の波が、科学研究のあり方に影響を与えないはずはない。大規模データに基づく予測や情報抽出・知識発見が科学研究に不可欠の方法となり、理論科学、実験科学に続いてデータ科学が新しい科学的方法論として確立しようとしている。

問題はこの新しい科学の方法において中核となる技術である。赤池氏はAIC提案直後の1976年にはすでに、知的情報処理におけるベイズモデルの重要性を見抜き、その実用化の研究に着手した。それまでの統計的モデルでは、パラメーター数を規定してきた。パラメーター数を

増やすと、モデルの記述能力は向上するが、将来の予測能力は減少する。この問題に対して、パラメーターについても統計的モデル(事前分布という)を想定するのがベイズモデルである。ベイズ推論の方法は、その理論的優越性は認められながらも、哲学的論争、事前分布設定の困難、事後分布の計算困難性の問題から、実用化に至っていなかったのである。

1979年、赤池氏は経済時系列の季節調整に関連して、パラメーター数がデータ数の2倍以上という驚くべきモデルを提案した。言うまでもなく、従来の最小二乗法や最尤法では意味のある結果は得られない。赤池氏はペナルティ付き最小二乗法がベイズモデルから得られることを示して、ベイズ型情報量規準ABICによって事前分布を決める方法を提案し、ベイズモデルの実用化に大きな貢献をすることとなった。さらに、その後の計算機の高速度化とモンテカルロ法に基づく統計計算法の急激な進展によって、計算困難性の問題も大きく緩和され、現在ではベイズモデリングは情報化時代に即した知的情報処理の主流としての地位を占めるようになってきている。ここにおいても赤池氏の貢献は大きかった。四半世紀前にこのような知的情報処理の時代が到来することを予見し、3世紀にまたがる懸案であったベイズモデルの実用化を先導した慧眼には驚くばかりである。

赤池統計学の原点は現場主義

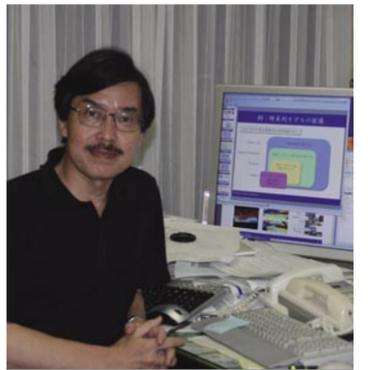
情報量規準AICは、統計科学に限らずデータを扱うあらゆる研究分野で利用されてきた。実際、AICを提案した2つの論文の年ごとの被引用数は減少するどころか増加の一途をたどり、30年以上が経過した現在では年間1000件近くに及んでいる。一般に被引用数が少ない統計科学の論文としては驚異的な記録である。

このような偉業を成しとげた背景には、常に現実の問題を直視し、その解決に資する方法を開発しようとしてきた赤池氏の一貫した姿勢がある。1952年に東大数学科を卒業して統計数理研究所(統数研)の研究員となった赤池氏は、それ

からの10年近くをさまざまな分野の工学研究者との共同研究のシステム作りに費やしたといわれる。その交流のなかで、1960年代には、統計解析には個別の構造に立ち入ったモデリングが不可欠という、当初の考え方を封印し、線形定常モデルに基づく時系列解析に移行した。さらに、セメントの焼成炉のフィードバック解析を機に、1960年代後半には、周波数領域解析から時間領域モデリングへと転進し、ARモデルの実用化の要請から次数選択基準FPEとモデル評価規準AICを提案した。さらに、1980年前後には、新しい季節調整モデルの提案を機にベイズモデルの実用化に成功した。

このように、赤池氏の研究には何回かの大きな方向転換と飛躍的発展が見られるが、これらは現実の問題の解決の必要の中から生まれたものであった。しかも、それを単なる問題解決に止めず、常に統計的方法の発展につなげ、最終的には統計的パラダイムの転換にまで至ったのである。

赤池氏は常に、データを用いる現場の研究者にとって有用な方法の開発をめざしてきた。このような現場主義を離れては、これだけの偉業達成はあり得なかったのではないかと考えられる。



北川源四郎(きたがわ・げんしろう)
大学院では数学を専攻し統計数理研究所に就職したが、赤池さんの勧めで船舶の統計的制御の問題に挑戦したのを機会に時系列解析に転進。以後30数年、地震データ自動処理、経済時系列解析などを中心に統計的モデリングの研究を行ってきた。とくに、非定常・非線形時系列の解析のためのフィルタリングの方法とその応用に力を入れている。

地震活動のモデルと解析

尾形良彦

総合研究大学院大学教授 統計科学専攻長 / 情報・システム研究機構 統計数理研究所教授

私の地震研究は、30年ほど前の赤池さんとの出会いから始まった。当時、最大の争点は、余震や群発地震のような地震の続発性の扱いにあった。これを解決に導いた条件付き強度関数に組み込んだ点過程モデルは、地震活動の標準モデルとして国際的に受け入れられている。

赤池さんとの出会い

1973年秋、いまと変わらない年寄り風の男が研究室に現れた。「君が本尾のところから来た新入りさんですか」。これが赤池さんとの出会いであった。「本尾」とは、私が学生時代に教えを受けた本尾実さんのことで、赤池さんとは若いとき統数研で同僚の間柄であった。

戦中戦後に青年期を過ごした世代の先生方は、たいてい学生から「先生」と呼ばれるのを嫌った。だから私はいまでも「先生」ではなく「さん」と呼んでいる。本尾さんは私に「少し変わった研究所だが、研究する時間はたっぷりありますよ」

と就職を勧めてくれたのだった。

1976年、赤池さんは、イギリスに滞在していた清水良一さんを通じ、ヴィクトリア大学ウェリントン校（ニュージーランド）のデビット・ベアジョーンズさんと引き合わせてくれた。ベアジョーンズさんは、「点過程」の理論とモデルで地震データに取り組んだ先駆者として知られていた。点過程とは、災害、システム故障、疾病、出生死亡の発生、神経スパイク列などのように、不規則かつ突発的な事象の発生時刻列を抽象化した確率過程のことである。

なかでも「条件付き強度関数」という新しい概念は、モデル化の観点から赤池

さんの目をひいた。これは、事象（点）の発生しやすさの瞬間的な強さを表し、時刻 t までの発生履歴や関連情報に依存して点の発生率が変化する。これをモデル化し、パラメーターを最尤法で推定することで、事象発生率（強度、危険度）を予測するのである。最尤法と結びついた点過程の新しい統計モデルの理論と応用の研究が始まった。

地震活動研究との関わり

このときからベアジョーンズさんとの長い付き合いが始まったわけであるが、彼は地震国同士のよしみで、なにかと私に地震活動の研究を勧めたものである。

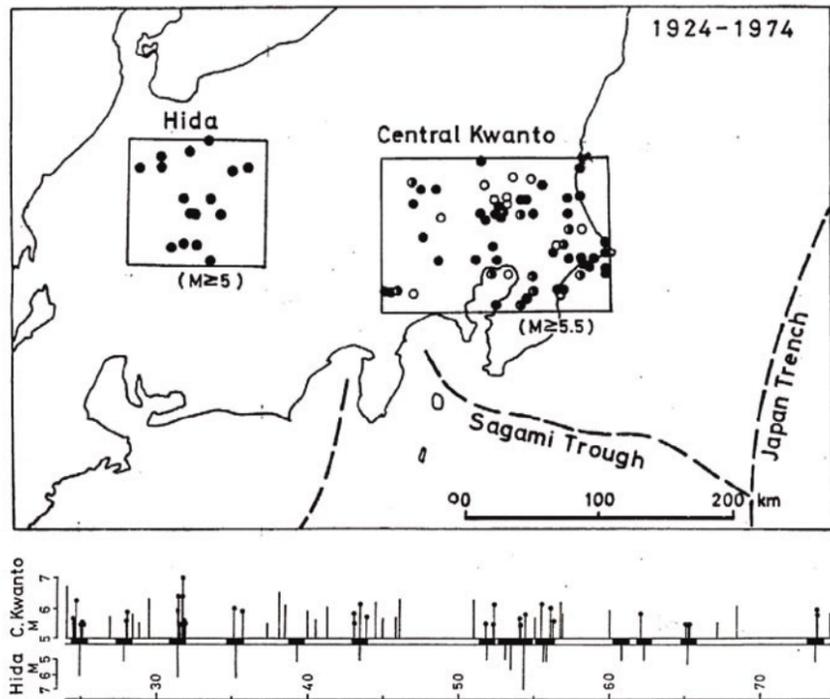
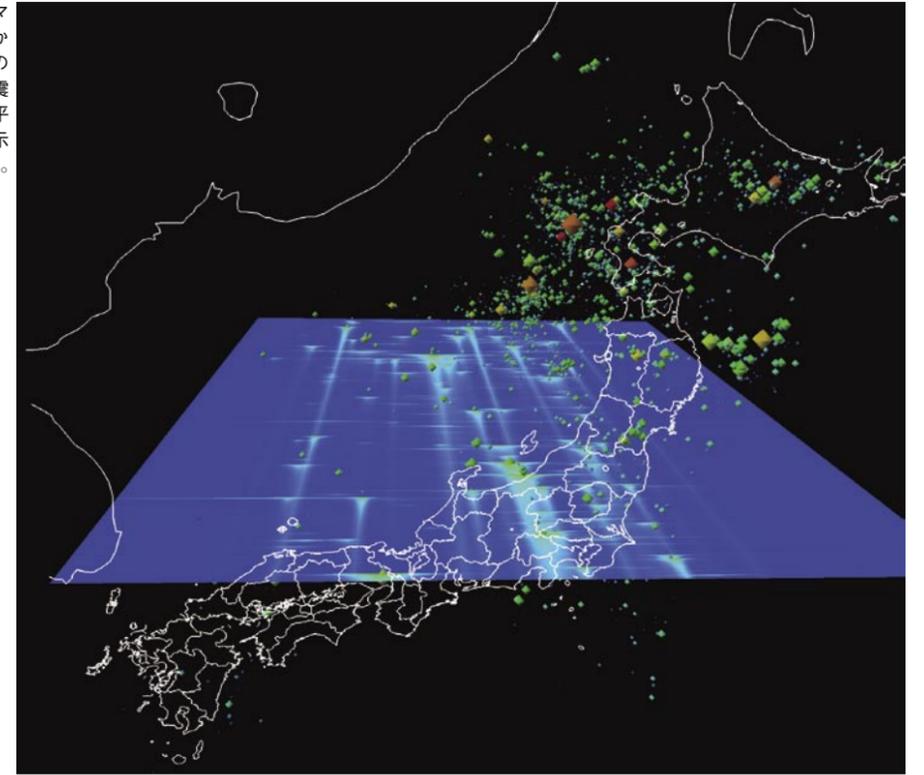


図1 上は、1924～1974年の、飛騨地方と関東地方中央部における地震の震央図。黒丸と半黒丸は、それぞれ飛騨の地震前後6カ月と1年以内に起きたもの。下はマグニチュード対発生時刻図。黒丸は、飛騨の地震前後6カ月以内に起きたもの。
出典：宇津徳治『地震』28巻（1975）

図2 1926～2005年の日本地域のマグニチュード5以上の地震データから推定した、時空間ETASモデルの条件付き強度関数。大小の粒は地震を示し、（緯度、時間）を示す水平面上の黄緑色は地震発生の強度を示す。時間は奥から手前に流れている。



しかし、地震発生には点過程では計り知れないメカニズムがあり、研究の評価が一生のうちに判明するのかどうかと考えると、取り組む研究対象としてあまりに冒険的であった。

だから私は、赤池さんが制御工学の分野で繰り返し挑戦したように、実験可能で直ちに研究結果の成否が出そうな神経系のシステム解析や、信頼性、待ち行列などで研究対象を探そうとした。しかし、企業秘密によるデータや情報の非公開もあって、駆け出しの統計研究者の望むような実際研究の手がかりは見つからなかった。

結局、気象庁などに膨大に蓄積され、しかも公表されている地震発生データを相手に点過程の統計モデルの研究することに意を決した。まず、地震研究者がどのようにデータを解析しているのかを学ぶために地震学会に出入りするようになったが、これにはもう1つの理由があった。駆け出しの研究員であったころの私に赤池さんが、「統計屋は本来、行商人のごときものである。統計的方法という品物売り歩き、品物を作るための材料を仕

入れるのに、現場に足を運ぶ労を惜しむな」「統計屋の功績には新しい方法の提案や理論的解明などさまざまあるが、最高のものは、科学技術の分野で統計学の応用の幅を広げることである」と語ってくれたのが私の心に強く残っていたからである。

事実、それまで赤池さんは、情報関連学会や制御関連学会に向いて時系列解析の応用の幅を広げる努力をし、その結果、統計科学にとって重要な問題を取り込んできたのである。この赤池さんの思いは、統数研の所長を退任するときに私に残した言葉「尾形君、頼むから若い人や学生には本物の問題に取り組むように指導してくれ」にも表れている。

地震活動の因果関係と季節性

データが豊富にあっても問題意識が空疎であれば、意味のある解析は望めない。私が地震研究者と積極的に関わったのは、問題意識と難しさがどこにあるかを知るためであった。地震活動の分野で昔から問題とされていたものには、地震発生の周期性や地域的関連性、震源の移動、

地震活動のパターン分類、地震の規模（マグニチュード）分布の変化などがある。現在ではこれらの物理学的根拠が明らかになりつつあるが、当時はデータ解析そのものが疑問や議論を呼んでいた。そして最大の争点は、余震や群発地震のような地震の続発性の扱いにあった。私は、このような問題に取り組むためには、地震の続発性を条件付き強度関数に組み込んだ点過程モデルが必須と考えた。

地震発生の地域的関連性については数多くの報告事例があったが、とくに宇津徳治博士の1975年の論文が興味をひいた（図1）。飛騨地域直下の深発地震発生の前後それぞれ半年間に起きた関東地域の地震の発生数が、それ以外の期間に起きたものより有意に多いのである。偶然とみなすにはその確率はあまりに小さく、互いの地域の地震発生に何らかの物理的な関係があることを示唆したものである。この報告は、日本列島の下に沈み込む太平洋プレートの存在によって現実味を帯びていた。

私の興味は、その関係を調べることにあった。どちらかの一方通行の因果関係

なのか、双方向の励起なのか、それとも直接ではなく何か第三の要因によって共に励起されているのか。これを従来の相互相関関数で調べても、原因を識別する結果は得られない。そこで、条件付き強度関数に続発性の性質を組み込んで上記の3つの仮説をモデル化し、データに対するモデルの適合性を赤池情報量規準（AIC：統計モデルの妥当性を評価する指標）によって比較した結果、深発地震が浅発地震を励起しているらしいことがわかった。それぞれの領域を広げて観測時間を延長し、地震数を増やすと、最良のモデルは少し複雑になるが、因果関係の結果は変わらなかった。また、この問題に使ったような点過程モデルによって、宏観異常現象^{*1}の発生の地震発生への統計的因果関係を議論し、前兆現象たりうるか否かを調べることもできる。

赤池さんやベアジョーンズさんのつながりで、私は尾池和夫さん（現京都大学総長）からも地震活動についてのさまざまな問題点の指摘を受けていた。尾池さんは当時、降雨が地震発生の引き金になりうる場合の研究をしていた。西南日本などの統計では、年間降雨量の変化率と地震発生数の年変化が良く似ている。メカニズムとして考えたのは、地殻中の断層内の水圧が増加して地震（断層運動）の

引き金になるというものであった。

この現象をデータで実証するには2つの難しさがあった。第一は、地震の続発性である。大きめの地震が起きると多くの余震が続くため、月別の発生度数がその影響を大きく受けてしまう。第二は、季節性をみるためには長期間の地震データが必要であるにもかかわらず、その間の観測網の充実などによって地震の検出数に変化が出てきて、データが不均質となることにある。

そこで、条件付き強度関数を周期性と続発性と検出率の変化（トレンド）の成分の和で表現し、各成分の次数をAICで決めることで有効な解析ができることを示した。全世界の地震帯を100近い海域と陸域に分割した尾池グループの解析によると、中緯度の陸域で地震発生率に季節性があることが示され、これが該当する地域の降雨量や地下水の変化に対応していることがわかった。また、海域や低緯度の陸域の地震活動には季節性がみられないことが確認されている。

余震と大森・宇津公式

余震減衰の定量的な関係を初めて論じたのは、大森房吉博士である。1894年、濃尾地震などの余震の頻度について減衰のしかたを調べ、「物理現象の減衰だけ

ら当然指数関数だろうと考えて当てはめてみたが、よく合わない。然るに、双曲線だとよく適合する」と述べている。さらに1957年、宇津博士は単位時間あたりの余震頻度の減衰が

$$v(t) = K(t+c)^{-p} \quad (1)$$

の形になることを示した。ここで t は本震の発生時刻からの経過時間である。宇津博士は、余震の頻度 $v(t)$ と経過時間 t を両対数方眼紙にプロットし、その減衰が直線上に乗ることを示し、直線の傾きを指数 p の推定として得た。いまでこそフラクタル次元の推定などで両対数プロットはよく使われているが、当時はまったく創意的な方法であった。これがなくては余震活動の詳細な研究は進まなかっただろう。

その後、私は(1)式を条件付き強度関数と考え、余震発生を非正常ポアソン過程とみなし、発生時刻の記録をそのまま使う最尤法を提案した。いまではこれが、余震活動のパラメーター K 、 c 、 p を求める標準的な方法になっている。現在では、大地震が起きると、直ちに(1)式とマグニチュードの分布法則を計算して、余震の確率予報が出されることになっている。

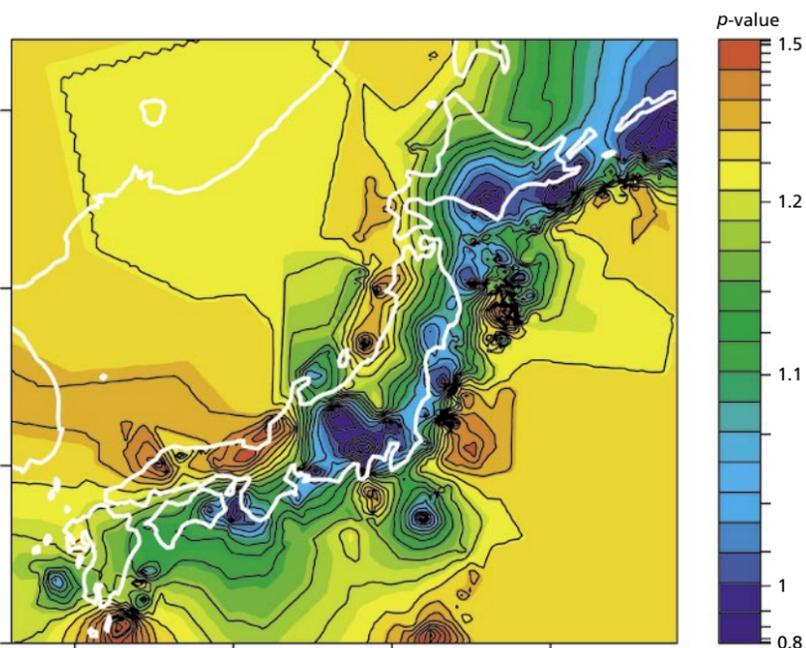


図3 階層的時空間ETASモデルの p 値（大森・宇津の余震活動減衰パラメーター）の空間変化。1926～1995年のマグニチュード5以上の地震から求めた。地震のあるところだけで意味があり、他は補間した。

地震活動の標準モデル

いったん地震が起きると、その断層周辺の破壊応力が極端に高まり、多数の余震が誘発される。大きい地震には多くの余震が発生し、小さい地震でもそれなりの余震を誘発する。1980年代中頃、私はこれらの地震活動を各地震に対する(1)式の大森・宇津公式の重ね合わせとして表現し、余震数の大小がその地震の大きさ（マグニチュード M_i ）に関係した、次の条件付き強度関数考えた。

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{t_i < t} v(t-t_i) e^{a M_i} \quad (2)$$

これは、疫学における確率分枝過程にまでさかのぼり、点過程のモデル化としてさまざまな形が考えられたが、宇津博士によって研究された諸経験則に沿うものが、AICで最も優れていることがわかった。ETAS（Epidemic-Type Aftershock Sequence）と名づけられたこのモデルは、地震活動の顔ともいべき地域性をとらえることができ、地震活動の標準モデルとして国際的に受け入れられている(図2)。

また、この標準モデルを「ものさし」として使い、地震活動パターンの変化を検出することも重要である。たとえば、標準モデルによって予測されたものより実際の地震発生が有意に少なくなる場合を「静穏化現象」というが、大地震や大余震の前にみられる例が多いので、この現象を有効に使った確率的予測をめざしている。

なぜ静穏化するのかも問題である。この解明のため、地殻弾性体中のストレス変化、断層系をめぐる摩擦と破壊の理論、地震メカニズムを手がかりとして、ETASモデルを解析ツールとして使い、ある仮説を支持する実例を蓄積している。これにGPSによる地殻の伸び縮みのデータ解析をあわせて、大地震予測に関する手がかりを探している。

地震予測の実用化に向けて

データが豊富であればあるほど、その

情報を十分くみ取るために、非正常または非一様なモデルを考慮する必要がある。そのため大規模な統計モデルが避けられないようになってきた。最後に、地震研究におけるベイズモデルの可能性について述べる。

1970年代末、赤池さんがベイズ統計家を標榜している人たちに議論を挑んでいた。そのため、われわれの間では、赤池さんがベイズに取り憑かれているらしいとの噂が立った。われわれにとってベイズ統計はゲテモノであり魑魅魍魎であった。先験分布という概念をめぐる頻度主義と主観主義の絶え間ない哲学論争があり、それらは非生産的かつ不毛な議論にしか思われなかったからである。

最小AIC法の思想は、なるべく少ないパラメーターの簡素な最大尤度モデルで予測するというものであった。ところが、これとまったく違った推定方式が赤池さんを虜にしたらしい。それはチホノフ（Tikhonov, A. N.）の正則化とよばれる、パラメーター数がデータ数を上回る逆問題であった。最小二乗法でこれを解くためには、パラメーターの変動を大きくしないという制約をつければ安定した推定が得られる。ただし、どの程度の制約をつけたらよいのかはまったく任意である。

赤池さんは、この制約とさじ加減を先験分布のモデル化の問題ととらえたのである。さじ加減は超パラメーターとして先験分布を特徴づけ、最適なさじ加減を求めるために、エントロピー最大化原理（平均エントロピーが高いほど確率予測が優れる）に基づいて理論を展開した。

こうしてできた赤池ベイズ情報量規準（ABIC）は、ベイズモデルの予測力を測るAICのベイズ版である。科学的経験や仮説に基づく先験的制約を自由自在にモデル化でき、そのよし悪しがABICで比較できるのである。赤池さんはすぐさま経済指標や測地データを、季節変動や地球潮汐に伴う変動とトレンド成分などに分解してみせた。プリンターから出力結果を取り出すとき赤池さんは「データよりパラメーターが多くても推定できるのですよ」とそばにいた技官に嬉しそうに

語ったという。

地震活動を計測するベイズの時空間モデルを開発し、地域的多様性や非定常性を定量的にとらえ、地震活動と地殻内の応力分布や強度分布などとの関係を探ることは、地震予測の実用化に向け有力な研究テーマである。これには大量のパラメーターがいり、ABICベイズ法の助けを必要とする。一方、活断層発掘データのように不確定な、たった数件のイベント情報に対して、先験モデルにもとづいた大地震の確率予測が実施されているが、ベイズ法はその不確定性を忠実に示すことができる。

私は地震統計の多様な経験法則や仮説を、統計的過過程モデルとして表現してきた。汲めども尽きぬ膨大な情報を含む地震データは、地震予知の難しさと表裏一体で、固体地球物理の複雑さや奥深さを示している。これらの研究によって、統計モデルにより計測し、予測し、発見する、「統計地震学（Statistical Seismology）」とも称すべき地震活動解析の研究領域が広がり、深まったと考えている。

*1 宏観異常現象
大きな地震の前触れとして発生するといわれる、さまざまな異常現象。ナマズや他の動物などが奇妙な行動をとる、微振動や地鳴りを感じる、井戸や河川の水位や水質の異常などがある。なお、科学的な裏づけがないものも含む。



尾形良彦（おがた・よしひこ）
統計モデルによってデータから本質を露出する。これは望遠鏡や顕微鏡のように、辛うじて見えるものや、見えないものをはっきり見えるようにする科学的方法としての役割を果たすものです。点過程を中心に各種統計モデルを考え、統計的方法の威力を示すように心がけ、地震活動研究、そして地震の予測に対する貢献をめざしています。

時系列モデルを用いた経済分析

佐藤整尚

総合研究大学院大学准教授 統計科学専攻 / 情報・システム研究機構 統計数理研究所准教授

経済は、多数の要因が絡んで時々刻々と変化するため、その予測は非常に困難であった。実用的な統計モデルの開発と経済に関する実務的な知識の融合により、経済現象の現状把握と予測が可能になってきた。

時々刻々と変化する経済

経済の先行きを予測するのは難しい。それは経済構造が物理的構造のように確固としたものではなく、時々刻々と変化する多数の要因が結合したフィードバックシステムであり、また、多数の主体が関与するゲーム的な要因も含むからである。現実には、予測どころか現状の把握も難しい。しかし、近年の情報化によって、経済の分野で大量のデータが時々刻々と得られるようになってきている。

本稿では、多変量時系列モデルを用いた大規模データからの情報抽出の方法を適用し、経済現象の現状把握をオンライン的に実現できる方法の開発について紹介する。そこには、実は赤池先生が提唱された時系列解析の手法がふんだんに生かされている。

マクロ経済学と統計科学

マクロ計量経済分析においては、従来からよく行われている構造モデルを用いた方法と、時系列モデルを用いた方法がある(図1)。与えられたデータについて十分な見識があって各変数間の関係が明快なときは、構造モデルを用いて議論するのが一般的である。他方、時系列モデルは、各変数間の関係がよくわからないか、あるいは安定的でないときに用いられる。ただし、これら2つのアプローチは相反するものではなく、補完的である。構造モデルであっても、適当な変換と近似を行うことによって時系列モデルに焼き直すことが可能なのだ。その違いは、変数間の関係が事前に規定されているか

どうかである。

現在の流動的な経済構造を対象にする場合、事前の仮定をなるべく置かず、本稿で提案するような多変量時系列モデルにより変数間の関係をとらえ、それにもとづいて構造モデルの構築にあたるのが望ましい。その意味で、ここで述べる時系列分析は、発見的に現状を正しくとらえるための道具であるといえる。

複数の経済変数が与えられたとき、変数間の関係を調べるのによく用いられるのが、(同時)相関をみて回帰分析を行う方法である。しかし、これだけでは、時間差を伴う関係についてはとらえられない。そこで、時間差をおいて相関をとった相互相関を考える。これをもとにモデル化したのが多変量自己回帰モデル(多変量ARモデル)である。

多変量ARモデルでは、考慮する変数を指定すれば、AIC(赤池情報量規準)を利用することにより、ほぼ自動的にモデルの当てはめを行うことができる。ある変数の今期の値は、自身および他の変数の過去の値の線形結合によって表される。これは、モデルの構造上、過去の値から将来の値を予測することが容易であることを示している。

また、それぞれにかかる係数(パラメータ)は、モデルにとっては各変数間の関係を表す重要なもので、与えられたデータセットから推定される。変数間の関係が安定的であれば、この係数はほぼ一定の値をとることが期待される。もし不安定であれば、時間とともに変化する可能性がある。そこで、每期、逐次パラメータを推定していくやり方を採用す

ることとする。これによって、経済構造の変化を抽出することが可能になる。

多変量ARモデルを当てはめると、その係数と過去数期の値から、将来の値の予測値が簡単に導き出される。つまり、予測値は推定された係数の構造を表す1つの尺度であるといえよう。そこで、逐次的にパラメータを推定して数期先までの予測値を描くと、その変化をもって足元の状態を示していると解釈できる。したがって、前期に行った予測と今期の予測の違いは、パラメータの変化と直近のデータの変化を反映し、現在の状態の変化を探る手がかりになる。

本稿で紹介するアプローチはこのことを利用して、ある特定の変数セットの枠組みで経済状態をみることを目的として作られたものである。このやり方をPEモデル¹⁾アプローチと呼ぶことにする。以下では、具体的にそのプロセスを紹介する。

偶然から始まった経済予測

実はこのような研究が始まったのは、やや偶発的なものであった。1998年6月、日本経済が金融恐慌的な様相を呈していたころ、赤池先生とかねてから交流のあった田中直毅氏(当時、21世紀政策研究所理事長)が統数研に來られた。日本経済の現状を統計学的に分析し、政策立案へのデータの裏づけにしたいというのが、訪問の目的であった。すでに赤池先生は研究所長を退いた後だったが、私も含め経済分野に関心のある研究所のメンバー数名が対応した。

基本的なアプローチとしては、赤池先

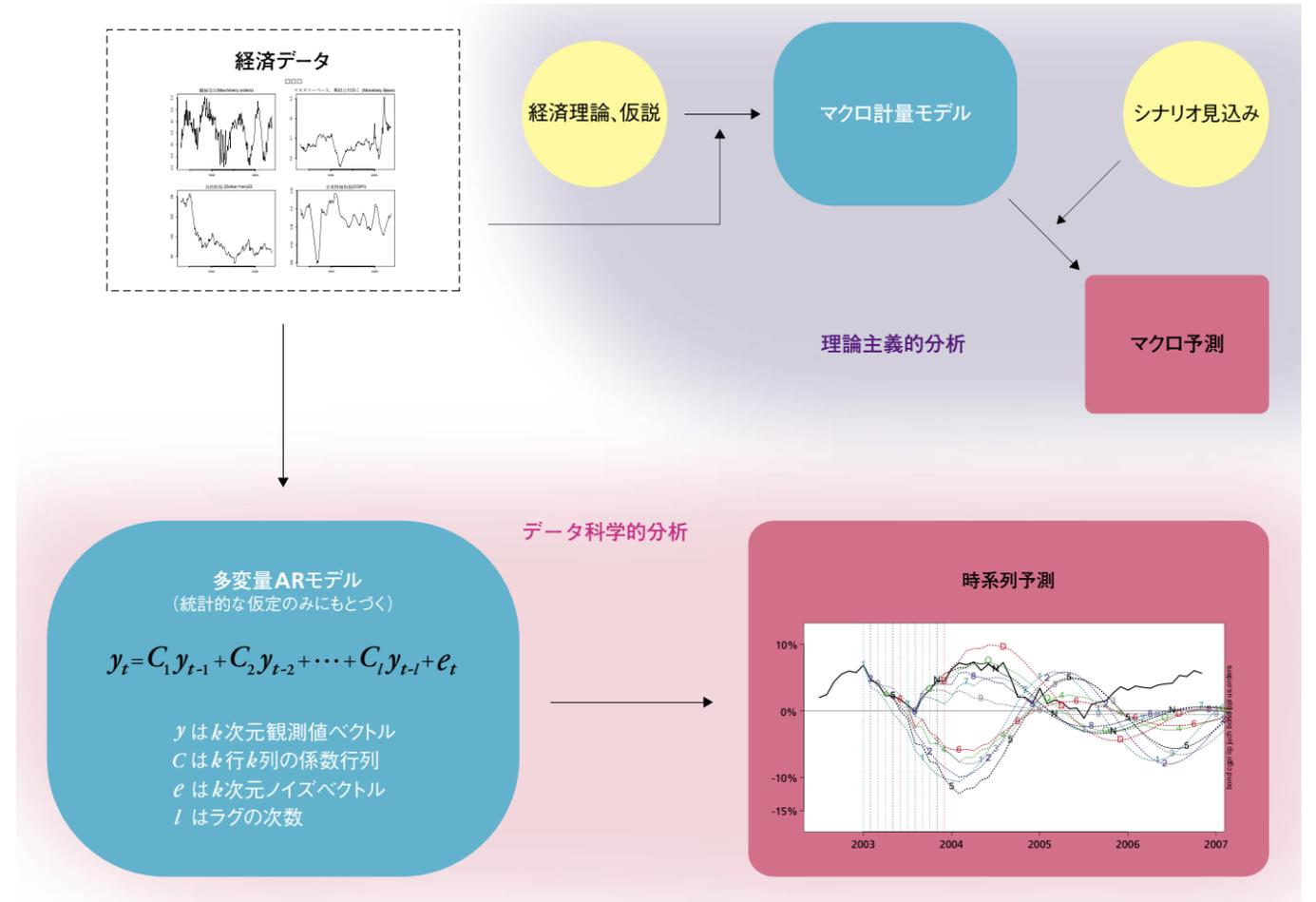


図1 マクロ計量経済分析に用いる2つのモデル。経済データ(左上)を扱うには、経済理論や仮説を用いた理論主義的な方法(上)と、統計的な仮定のもとづくデータ科学的方法(下)とがある。

生がセメントキルン(焼成炉)の制御で行われたフィードバックシステムの分析法を採用し、ほぼそのまま踏襲する形で分析作業が進められた。その結果、当時あまり注目されていなかったマネタリーベース(日本銀行が供給する資金量)と実体経済の関連性が見いだされた。それに基づいて、マネタリーベースを持続的に拡大すべきであるという提言を日本経済団体連合会主催のシンポジウムで発表した。この政策提言は新聞等でも取り上げられた。それから数カ月後、日銀は量的緩和政策(マネタリーベースを拡大する政策)をとると宣言するにいたったことからみても、われわれの分析結果は正しかったのだろうと思う。

その後、このモデルを毎月の新しい

データを追加して再推定していくうちに、その予測値が毎月変化することに気づいた。これは何らかの情報を表している可能性がある。田中氏からも同様の指摘があり、毎月のデータにもとづく予測値系列を比べることにより、その時々足元の経済状況を表せるのではないかとこの直感を得ることができた。以後、このモデルをもとに、田中氏と議論を重ねながら足元の経済状況の観察を行った。その成果の一部はウェブに公開し、また、田中氏を通じて、財界や政府の会議でも報告した。

PEモデルによる経済状態評価法

ここでとりあげるPEモデルは、特定の経済データから足元の経済状態を評価

するしくみである。

変数は分析者の考えにより自由に選択できる。これに関しては、統計的なアプローチよりも、田中氏など実務家たちが長年蓄えた知識に頼るほうが得策である。当初、選ばれた変数は、マネタリーベース、利付国債の利回り、卸売物価指数、鉱工業生産指数、機械受注、為替相場であった。そのあと、何回か変数の追加と削除を行っている。また、ほとんどの経済時系列は、非定常的な動きをしている(トレンドをもっている)ことから、モデルを当てはめる前に変換を行って定常化している。

次に、定常化された系列からモデルの当てはめを行う。ここで用いるモデルは、時系列解析で最も一般的な多変量ARモ

デルであり、その形は図1下に示してある通りである。多変量ARモデルを当てはめるとは、変数間の複雑な関係を一次近似することに相当する。現在のある変数の値は、それ自身の過去の値と他の変数の過去の値との線形和で表現されると解釈できる。

予測の観点から、ラグの次数 l に対応する過去のラグつき変数 y_{t-l} をどのくらいまで入れるかが重要であり、ここではAICを最小にするラグの取り方を採用した。ノイズを0と仮定して、推定したパラメーター C と直近の観測値を使って予測値が得られる。この方法で計算される予測値を各時点で逐次的に推定し

ていく。なお、各時点で、多変量ARモデルの係数行列 C なども推定しなおすことにする。また、 l もAICに基づいて毎月、最適なものに推定しなおす。こうして、各時点から p 期先までの予測値が逐次的に求まる。そのパスの変化をもって、PEモデルにおける尺度とする。

この予測値は、文字通りの予測という以外に、推定期間のなかで見た現在値(および直近の数時点の値)の評価を表すと考えられる。上で解説したように、予測値は推定期間(データ期間)から求められるパラメーターと、現在から l 時点前までのデータによって構成される。したがって、予測値のパスの“ぶれ”は、直近の

観測値に何らかの変化が起きた場合やパラメーターの推定が変わった場合、およびAICで選択されるラグの次数が変わった場合に起こると考えられる。前時点と比べたときの予測値の変化に、現時点の状態が表されているといえる。

通常、経済システムは、時系列解析や統計解析で想定されるような安定的なシステムではない。したがって、そこから得られる予測値は、構造変化などが起きると信頼できないものになってしまう。PEモデルでは、その性質を逆に利用して、予測値を足元の状態を計る尺度として活用する試みを行っている点が特徴である。

モデルによる経済予測と実測値

実際に経済を眺めてきた結果の一部を紹介したい。

図2は、1998年1月～10月、および1998年10月～1999年9月の逐次予測である。これは、景気の先行指標とされる機械受注の予測であるが、背後には他の5つの変数の動きがあるので、それらを反映した予測と考えられる。黒の太い実線は観測値系列であり、各月から出ている色つきの破線は、その月までのデータをもとに予測したものである。破線にのっている数字は予測のもとになった月を、またOは10月、Nは11月、Dは12月をそれぞれ表している。

2つのグラフを見ると、この時期、毎月の予測値がどんどん悪化しているのがわかる。いわば、予測したものに比べて実績値が外れてしまい、モデルが、想定している軌道を外れてしまっているのである。通常であれば、これはモデルが悪いのであるから別のモデルを考えなさいとなるのだろうが、ここではあえて、これが何かのシグナルではないかと考えることにした。なぜなら、多変量ARモデルは多変数の時系列モデルで最も基礎的なモデルであり、なおかつ、変数選択でもそれほど変な選び方はしていないという判断があったからだ。そして、むしろこのときに起きている動きがこれまでの15年間のデータ期間では考えられないほど

激しいものであるという結論に至った。

事実、後から振り返ると、1997年から1998年にかけては戦後の日本が経験したことのない金融恐慌的な期間であり、大きな転換点であったといえる。このときに無難な予測値しか表さなかったのであれば、そこまでのモデルということでは、あまり注目しなかったであろう。当たりにせよ、外れるにせよ、ある程度振れるような(表現力の豊かな)予測のほうが現実を見るうえでは実用であると感じた。

この図をよく見ると、10月を境に予測値が上昇するようになっているので、10月で下げ止まったと考えられる。当時問題となっていた円安も、10月に入って円高に向かうようになった。このようにして、予測値の東の向きを見ることによって、そのときの足元の経済状態をとらえることができなかつたという仮説を考えるようになった。

次の図3は、2001年の機械受注の予測である。1998年と同じく景気の後退期であるが、予測値からはそれほど外れておらず、予期された不況期であると考えられる。この後1、2年の予測値と実績値が近いところを推移していることから、モデルの当てはまりがよかったと考えられる。

最後に、図4は2003年の日本の鉱工業生産指数を見たものである。ちょうどITバブル後の不況期を脱するところであるが、6月と7月の予測で大きく変化しているのがわかる。これは背後の金利の急上昇を反映してのものであるが、実績値も8月から上昇に転じている。ここを境に日本経済が息の長い景気拡大期を迎えることからみて、転換点が検出できたと考えることができる。

Data-Drivenの経済学をめざして

このように、逐次的に行った予測値を重ねて見ることにより、さまざまな変化を見て取れるようになる。このようなことが可能になったのは、実用的な統計モデルの開発と経済に関する実務的な知識の結合の賜物である。ここで示した結果は理論的な経済学とはまったく違ったも

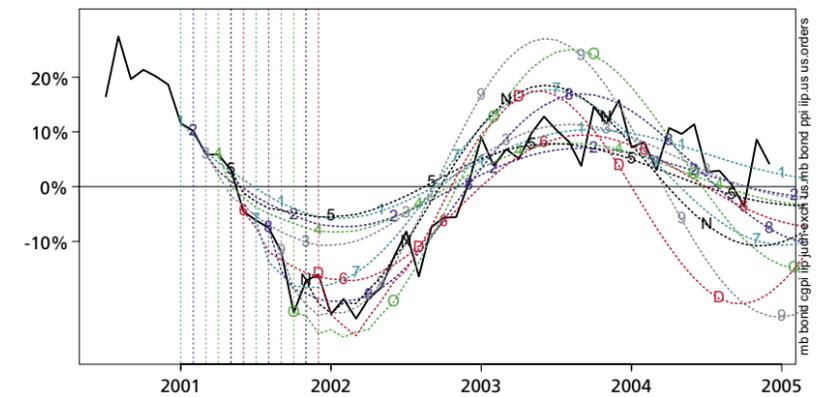


図3 2001年1～12月の機械受注予測

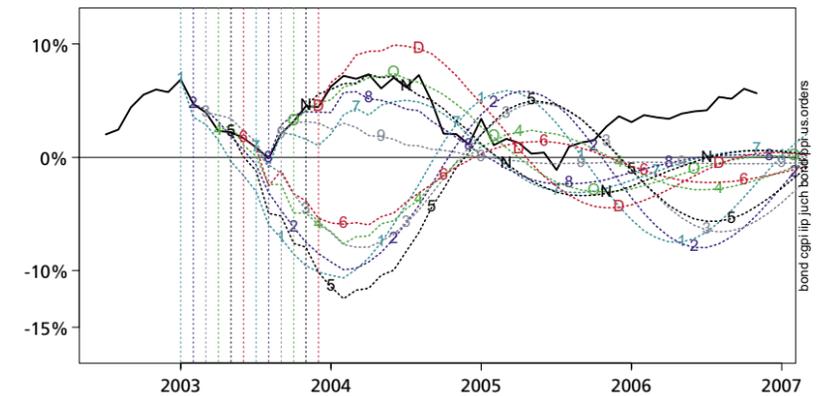


図4 2003年1～12月の鉱工業生産指数予測

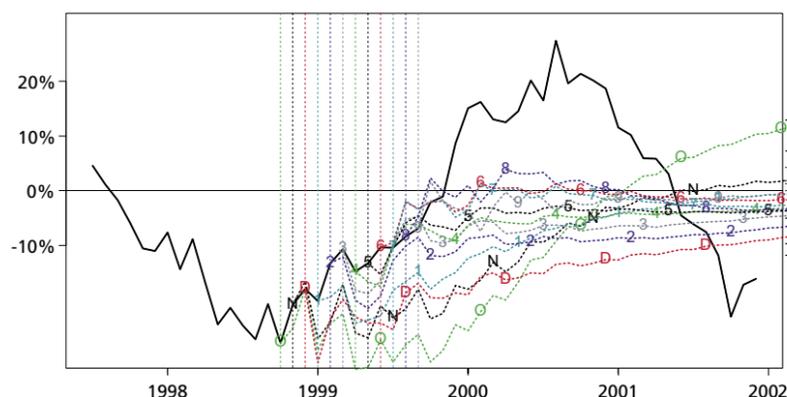
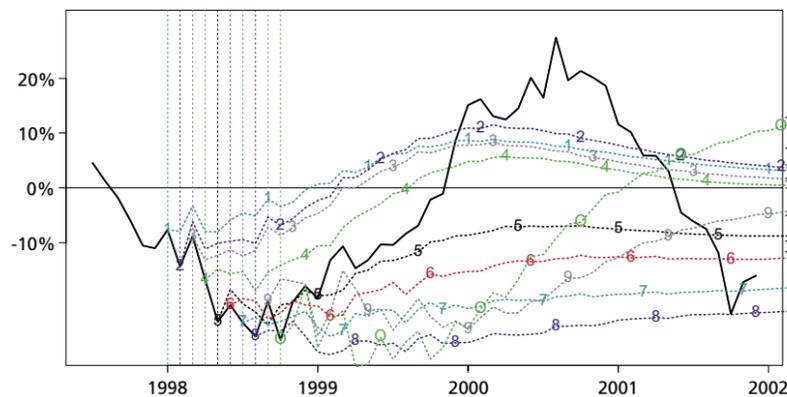
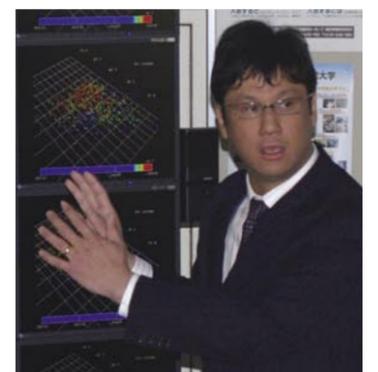


図2 1998年1月～10月(上)、1998年10月～1999年9月(下)の機械受注予測

のであり、“データにしゃべらせる”経済学であるといえる。

最先端の経済現象の背後を探る研究は、いわば目印のない海域を進む船のようなものである。使えるデータと知恵を駆使して、手探りで進むほかないと考える。今回のアプローチは赤池先生が30年以上前に開発したものとはほぼ同じものであるが、少し見方を変えることによって現実をとらえることに成功した例である。経済分野において重要なことは、常にデータをみて、そこからの情報抽出を考えるというスタンスにあるのだろう。

*1 PEモデル
PEはPolicy Evaluation(政策評価)の略だが、それだけではなく、経済予測等にも応用されている。



佐藤整尚(さとう・せいしょう) 経済学部のゼミで時系列解析を学んで以来、経済分野における応用をテーマに研究を進めてきました。最近では、数理ファイナンスにおける適用に関心があります。この研究でもそうですが、1人でこもるよりはいろいろな人との関わりのなかで研究を進めることを重視しています。年代的に赤池先生に直接、指導を受けた世代ではありませんが、ゴルフではいろいろと教わりました。

生物多様性の理解をめざして

長谷川政美
復旦大学生命科学学院教授

近年、大量のDNA塩基配列データの蓄積に伴って、分子系統学が盛んになってきた。分子系統解析におけるモデルの重要性と、そこで赤池情報量規準が果たす役割について紹介する。

DNA配列から系統樹をつくる

地球上には数千万種ともいわれる多様な生物が生息している。このような生物の多様性を理解するためには、進化的な視点が不可欠である。地球上のあらゆる生物は、1つの共通祖先から種分化を繰り返しながら進化してきたものであり、生物多様性の起源は、系統樹という形で始めてとらえられる。

生物進化の歴史は、現在生きている生物のゲノムのなかに刻まれており、ゲノムDNAの配列を解析することによって系統樹を推定することができる。これが分子系統学である。以前は形態の比較による系統学が主流であったが、形態レベ

ルでは似た環境で似たような形質が独立に進化するといった収斂進化^{しゅうれん}がたびたび起こり(図1)、形態の比較だけでは間違っただけでなく、系統樹が得られる危険性が高いことがしだいに明らかになってきた。

進化におけるDNA塩基やタンパク質アミノ酸の置換は、確率過程とみなすことができる。分子レベルでの変異の出発点は、まず個体の生殖細胞中のDNA上で突然変異が生じることであり、これはその名前が示すように確率的な現象である。

しかしながら、突然変異は個体レベルの現象であり、一方、進化とは生物種が集団として世代を超えて変化していくことである。個体レベルで起こった突然変異が進化に寄与するためには、その遺伝子

が子孫に受け継がれ、その遺伝子をもった子孫が増えることによって、突然変異遺伝子が集団全体に広がる必要がある。これを突然変異遺伝子の集団への固定^{こてい}というが、ここでも偶然的な要素が重要であることが明らかになってきた。

分子レベルでの進化的な変化の多くは、自然選択に必ずしも有利なものではなく、良くも悪くもない中立的な変異のなかで運のよいものがたまたま選ばれる^{もとお}というものである。これが木村資生の分子進化の中立説(1968年)である。したがって、そのような進化の結果として生成された現生生物の分子配列データから進化の歴史を再構築することは、統計的推測の問題になる。

複数の生物種から得られた塩基配列(あるいはアミノ酸配列)を縦に並べると、挿入や欠失があって対応する座位(塩基配列などの位置)がうまくそろわないことがある。そのような場合に挿入や欠失に手を加えて配列をそろえることを「アラインメント」という。アラインメント上で同じ座位の塩基が生物種によって異なる場合には、共通祖先から進化する間に蓄積した変異とみなすことができる。こうして得られたデータセットを、「データ行列」(図2)という。

最節約法から最尤法へ：分子系統樹推定

このデータ行列から系統樹を推定するわけであるが、統計的推測の最も自然な枠組みは、最尤法である。現在広く用いられるようになってきた最尤法による分子系統樹推定法は、フェルゼンシュタイン(Joseph Felsenstein)によってはじめて

定式化された(1981)ものである。最尤法では、まず進化過程で起こる塩基(あるいはアミノ酸)置換の法則性を確率モデルとしてとらえて、そのようなモデルにもとづいた進化の結果として当該のデータ行列が実現する確率を計算する。これが尤度である。それを可能な系統樹のトポロジー(枝分かれの順番)について計算し、尤度が最大になるトポロジーを真のトポロジーの最有力候補として選ぶのである。

以前から広く使われていた分子系統樹推定法に、「最節約法」がある。これはデータ行列を説明するために置換数なるべく少なくすむようなトポロジーを選ぶという方法である。この方法はわかりやすく、最尤法にくらべると計算も簡単なので、現在でも広く使われているが、いろいろな欠点もある。

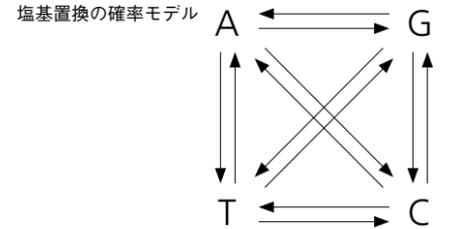
とくに、進化速度が系統によって異なる場合には、間違っただけでなく、危険性が高い。最尤法では通常、進化速度は系統によって違っていても構わないとして(分子時計を仮定しない)解析が行われる。最節約法でも分子時計は仮定されないが、必要最小限の置換しか考えないので、枝が長くなると短い枝に比べて相対的に多重置換(同じ座位に繰り返し置換が起こること)の効果が過小に評価されることになる。そのために最節約法では、長い枝同士が間違っで組んでしまう傾向が強いのである。

一方、最尤法でも置換モデルが単純だと多重置換が過小に評価されて、同じように長い枝同士が組んでしまう傾向があるが、モデルの改善によりそのような推定の偏りを回避できる。

1980年代初頭に最尤法による系統樹推定法が定式化されたが、長い間この方法は実際の分子系統樹解析にはあまり使われてこなかった。その理由としては、計算に膨大な時間がかかるため、一般の研究者が使うことのできたコンピューターでは、実際のデータをなかなか解析できなかったということがある。私は幸い、統数研で大型計算機をふんだんに使うことのできる環境にいたために、生物学の

確率過程

- ・突然変異
- ・変異遺伝子の集団への固定



- 1.human CTAGGCTATATACAACACTACGCAAAGGCCCAACGTTGTAGGCCCTAC
- 2.chimpanzee CTAGGCTACATACAACACTACGCAAAGGTCCCAACATTGTAGGTCCTTAC
- 3.gorilla TTAGGCTATATACAACACTACGTAAGAGGCCCAACGTCGTAGGCCCTAC
- 4.orangutan CTAGGCTATACACAACACTACGCAAGGGACCTAACATCGTAGGCCCTGCG

EF1αのアミノ酸配列：動物、菌類、植物、原生動物、細菌で共通の配列が見られる

CONSENSUS	STTTGHLIYK	CGIDKRTIE	KFEKEAAE.G	KGSEKYAWVL	DKLKAEREER	ITDIALWKF	ET.KY.VT.I	DAPGHRDFIK
Homo sapiensM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
Gallus gallusM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
Xenopus laevisM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
Danio rerioM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
Apis melliferaM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
Bombyx moriM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
OnchocercaM	.....	.....	.....S	.....S	.....Y
SaccharomycesL	.....	.....	.....P	.....Q	.....Y
Ashbya gossypiiL	.....	.....	.....P	.....H	.....Y
Candida albicaL	.....	.....	.....P	.....H	.....Y
Trichoderma reL	.....	.....	.....P	.....Y	.....V
Podospora anseL	.....	.....	.....P	.....Y	.....V
Puccinia gramiL	.....	.....	.....P	.....Y	.....V
Absidia glaucaL	.....	.....	.....P	.....H	.....Y
Arabidopsis thL	.....V	.....R	.....MN	.....R	.....T	.....YC
Glycine maxL	.....V	.....R	.....MN	.....R	.....T	.....YC
Hordeum vulgarL	.....V	.....S	.....MN	.....R	.....T	.....SC
Triticum aestiL	.....V	.....R	.....MN	.....R	.....T	.....YC
Trichomonas teL	.....KLA	.....AM	.....EDL	.....S	.....F	.....M
Giardia lambliaQ	.....LD	.....EY	.....R	.....T	.....M	.....Q
HexamitidaeQ	.....LD	.....EY	.....R	.....N	.....M	.....Q
Hexamita inflaQ	.....LD	.....EY	.....R	.....N	.....M	.....Q
Glucosa plecoslV	.....N	.....AFQ	.....L	.....A	.....KMD	.....LK
Sulfolobus aciLI	.....R	.....LMD	.....R	.....F	.....EK	.....VK
HalobacteriumLV	.....R	.....L	.....E	.....T	.....SV	.....PEHV
MethanococcusV	.....R	.....LLD	.....G	.....A	.....PGL	.....V

図2 アラインメントされたデータ行列の例

動物から細菌に至るまでの多様な生物の間でEF1αのアミノ酸配列に共通性が見られるということは、地球上のあらゆる生物が1つの共通祖先から進化してきたことを示している。したがって、あらゆる生物は1本の巨大な系統樹のどこかに位置づけられるはずである。

実際問題にはじめて最尤法を適用することができた。岸野洋久さんと共同で開発した最尤系統樹の検定法は、現在では広く使われている。

最節約法を使っていた研究者からは、次のような批判があった。「最尤法で使われている置換モデルはおよそ現実からかけ離れた単純なものだから、結果は信頼できない。それに対し、最節約法はいかなるモデルも仮定しない方法だから、その点で最尤法よりもすぐれている」。たしかにこの批判の前半は当たっている面があるが、後半は間違いである。いかなる推定法も何らかのモデルの上

に成り立っている。モデルを明示的に仮定しているか、暗示的かの違いだけである。最節約法は明示的にはモデルを仮定しないが、何らかの仮定の上で成り立っているはずであり、その仮定が最尤法のようにはっきりしていないだけである。仮定がはっきりしている場合、それが間違っていることが明らかになれば改めていく余地があるわけで、科学的なデータ解析法としてはそちらの方がすぐれているといえるだろう。

最尤法は当初、系統学の研究者からはあまり評価されなかったが、近年のコンピューター性能の飛躍的な進歩と実用的

ハリネズミ

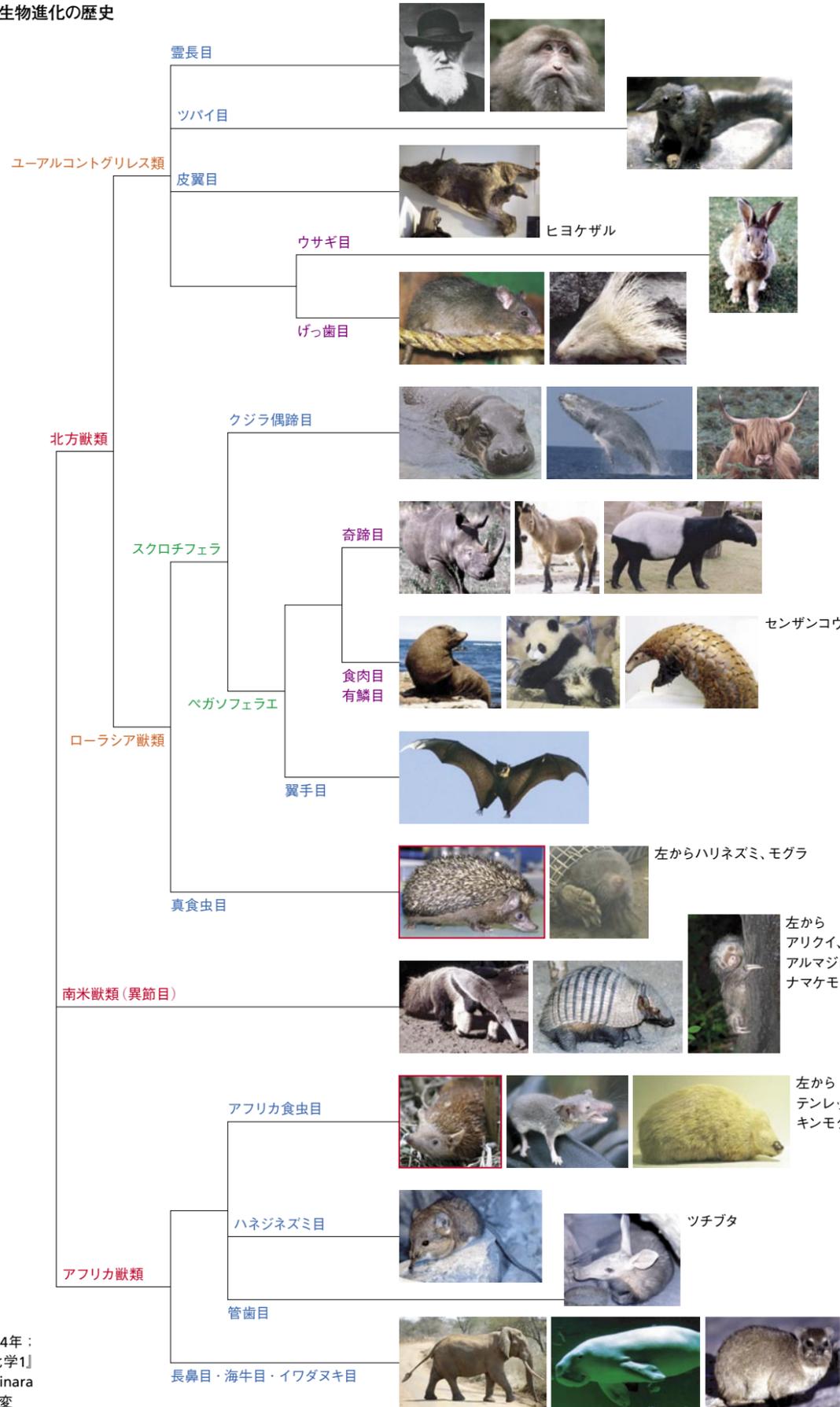


ハリテンレック



図1 収斂進化の例。ハリネズミとマダガスカル固有のハリテンレック。

図3 分子系統でたどる生物進化の歴史



出典：長谷川政美、2004年：岩波書店『シリーズ進化学1』pp-51-91、図14を、Nishinara et al. (2006) をもとに改変

なソフトウェアの開発もあって、分子系統学の分野でだいに認められるようになってきた。その結果、計算時間の制限から非現実的な極めて簡単なモデルしか使えなかったのが、現実に即したモデルに基づいた解析を可能にしつつある。そこで重要になってきたのが、解析に際してどのような置換モデルを採用するのがよいか、というモデル選択の問題である。

モデル選択と赤池情報量規準

分子系統解析にあたって仮定する置換モデルは、なるべく現実の進化過程に合うものが望ましい。しかし、限られたデータを解析するのに、むやみに複雑なモデルを使うのは問題である。情報の少ないデータに対して複雑なモデルに含まれる多くのパラメーターを適合させようとすると、過適合(over-fitting)が起こる。赤池さんは情報理論的な考察から、

$$AIC = -2(\text{最大対数尤度}) + 2(\text{モデルのパラメーター数})$$

で定義される赤池情報量規準(AIC: Akaike Information Criterion)が最小になるようなモデルが、当該のデータを表現するのに最もふさわしいモデルであることを示した。

モデルが複雑になればデータとの当てはまりが良くなるので、最大対数尤度が大きくなってマイナス符号のついた第1項は小さくなるが、逆に第2項は大きくなる。つまり、第2項はモデルを複雑にしたことに対するペナルティを表している。モデルを複雑にしてパラメーターを増やしたことに見合うだけのデータとの当てはまりの改善が見られなければ、なるべく簡単なモデルにとどめておくべきということである。こうして、モデルを改善していく際の客観的な規準が得られたことになる。

赤池さんがAICに関する論文を最初にしたのは1973年だったので、分子系統学でモデル選択が問題になりはじめた1990年ごろには、AICは統計学の世界ではすでに確立した方法になっていた。そ

のころ、赤池さんは統数研の所長をしており、その下で研究していた私は、AICを分子系統学の世界に導入すべき立場にあった。

分子系統学のモデル選択にAICを最初に導入したのはわれわれであったが、この分野で広く使われるようになったのは、1998年にポサダ(David Posada)と克蘭ダール(Keith A. Crandall)が「MODELTEST」というプログラムを公開してからのことである。これにはさまざまな塩基置換モデルが実装されていて、ユーザーはAICを使ってそのなかから自分の扱っているデータに最も適合したモデルを選択し、それを用いてさまざまなプログラムで分子系統解析ができるようになった。

いまMODELTESTは多くの研究者に使われるようになり、これを使っていないと論文の査読者から忠告を受けるほどである。それに伴って、モデル選択とAICの重要性が広く認識されるようになってきたことは喜ばしいことであるが、新たな問題も浮かびあがっている。それは、MODELTESTに実装されているモデルがいずれも塩基置換のモデルであり、タンパク質遺伝子の進化を近似するには現実から離れ過ぎているということである。

たとえば、タンパク質をコードしている遺伝子は3連塩基コドンを単位として構成されており、コドン内のそれぞれの塩基の置換は決して独立ではない。ところが、MODELTESTに実装されているモデルは、いずれも独立性を仮定している。アミノ酸に対応したコドンは61種あるので、本来は61×61の遷移行列を扱うコドン置換モデルを用いることが望ましい。非現実的なモデルのセットのなかから最良のものを選び出しても、あまり意味はない。今後、モデルに取り入れていかなければならないことは多い。

分子系統解析は現在、多くの生物群について行われている。とくに研究が進んでいる真獣類(有胎盤哺乳類)の系統進化で、最近明らかになってきたことを図3に示す。分子系統解析により、図1で示した非常に良く似た動物が、まったく異

なった由来をもった収斂進化の結果であることがわかる。

より現実に近づくために

上で述べたMODELTESTは、多くのモデルをAICで比較したうえで、データに最も適合したモデルを用いて系統樹推定ができる。だから、ユーザーの多くはこれでよいのだという自己満足に陥る傾向がある。しかしここで問題なのは、用意されているモデルはいずれも現実から離れた未熟なものということである。

モデルはあくまでも現実の過程を近似するものにすぎない。だから、限られたデータをうまく近似したモデルであっても、データ量が増えてくると現実とのずれがだいに目立つようになってくる。

したがって、常に最新の知見を取り入れてモデルをより現実に即したものに改善する努力を続けていくことが必要である。その際の道標として、AICの重要性は今後も変わることはないだろう。AICの長所は自由なモデル構築と、それらのモデルを客観的な規準で比較することを可能にしたことにあるのだから。



長谷川政美 (はせがわ・まさみ)
2007年3月に総合研究大学院大学先端科学研究科生命体科学専攻/統計数理研究所教授を定年退職し、現職。さまざまな生物の系統進化の研究を行っています。とくに哺乳類の進化やマダガスカルに自然史に興味をもっています(写真はチベット調査中の著者)。

線路のなかの時系列

神山雅子

鉄道総合技術研究所軌道技術研究部 主任研究員

東海道・山陽新幹線を走る電気軌道総合試験車（愛称：ドクターイエロー）などの、「軌道検測車」をご存知だろうか。検測車は、毎日の列車荷重で線路が少しずつ変形するのを監視するために、同じ線路を定期的に走って線路形状を測定し、大量のデータを図1のように蓄積する。しかし、せっかく営業列車の合間を縫って走らせているのに、測定データを「測った日に悪かった線路箇所」の発見だけに使うのはもったいない。そこで私は、検測車のデータから構造設計や保線作業計画に役立つ情報をいかに抽出するか、を研究テーマとしている。

私が総研大の統計科学専攻で学ぼうとしたきっかけは、『時系列解析の実際Ⅰ・Ⅱ』（朝倉書店）という本との出会いである。実は本の内容はよくわからなかったのだが、こちらに進むといふことがありそうな予感がした。私は就職以来、職場で普及していた離散フーリエ変換を使って時系列解析、すなわち波形からの情報抽出をしていたのだが、その頃にはこの方法に限界を感じていたのである。そして、無事に入学が許可されたのだが、離散フーリエ変換とまるで勝手が違うので、なかなか慣れなかった。そのうえ、入学早々問題が発生した。データの測定位置を揃えないと私の求める解析は難しい、と言われてしまったのだ。

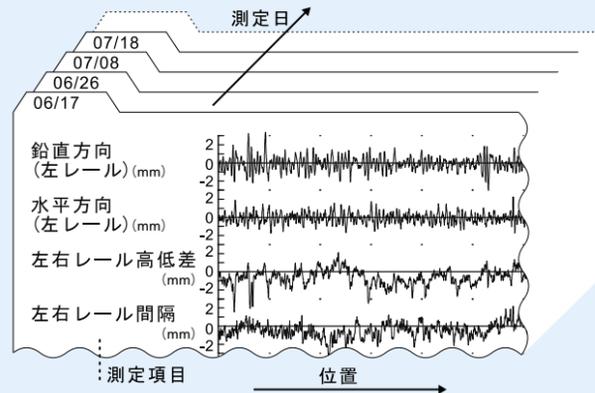


図1 軌道検測車による線路形状データの蓄積

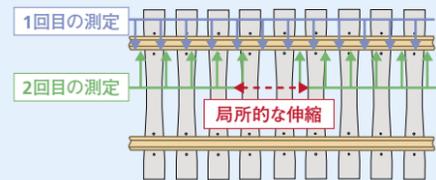


図2 検測車による線路形状データの測定位置の欠点。あいまいにしかわからない、間隔がまれに伸縮するが発生位置が不明、などがある。

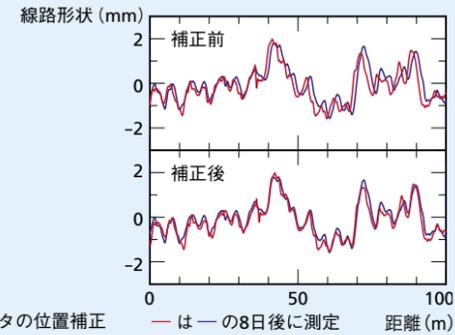


図3 線路形状データの位置補正

誰しも、検測車は同じ線路を定期的に走るのだから、同じ位置で違う日に測られた線路形状を並べるだけで、変形の様子が簡単に定点観測できそうだと考える。しかし実際には、測定そのものに欠点があるため（図2）、データ同士を直接比較できない。簡単にいえば、同じ線路を何度も測っているのに、他の日の測定データと引き算すらできないのである。相異なる日に得られた線路形状データの直接比較は、鉄道の長い歴史のなかでもできていなかったし、私もあきらめていた。入学時の構想でも、測定位置がずれたままで、相異なる日の測定データを比較するつもりだったのだ。

しかし、総研大で研究を続けるうち、俗にいう「経験則」も無視せずに取り込める便利さや、多数の統計モデルを客観的指標によってひとつに絞れる強さ力がわかってきた。測定位置の補正は、数多い選択肢から解をひとつに選ばなくてはならない。

それは私には無理に思えたが、総研大で学んだ枠組みではそれができた。まさに「赤池情報量規準（AIC）は工学より出でて工学より実用的」だと思った。また、これは鉄道技術の研究では見たことがないデータ観で、私は研究者としての延命を確信できた。

結果として、無理だと思っていた位置補正ができるようになり（図3）、無事に学位をいただいた。線路変形の定点観測データの性質は、私の予想通りだったり予想外だったりする。これらのさまざまな性質がそのままずっとデータに隠れていたかと思うと、とても感慨深い。

私の研究は総研大での3年間で見違えるほど変わった。ところが、私が入学前と変わらずPCに似たような波形を表示しているの、職場の人には私の変身がわからないらしい。私も感慨にふけてばかりいないで、「こちらに進むといいことがある」を納得させる新発見を職場で早く見せたい。



神山雅子（かみやま・まさこ）
1992年4月、(財)鉄道総合技術研究所に入所。2001年4月、統計科学専攻博士後期課程に入学し、二足のわらじ生活を開始。2002年4月、葉山の学生セミナーで赤池先生の手描きのスライドと数々の名言に感動。2004年3月、学位取得。職場で聞いた話では、赤池先生は私の入所前に鉄道総研で講演されたそう。聴講できなかったのがとても残念です。

マーケティング研究における統計モデルの役割

佐藤忠彦

筑波大学大学院ビジネス科学研究科専任講師

読者の多くが、スーパーや家電量販店などで、ポイントカードの会員になって買い物をしたことがあると思う。現在、数多くの小売業がそのようなポイントカードプログラムを実施している。小売業はそれを顧客囲い込みの目的で行っている。ポイントが貯まればまた自分の店で買ってくれるだろうというロジックである。

しかし、顧客囲い込みだけの目的でカードプログラムを実施していると、小売業はポイント付与のコストばかりが増え、実はプログラムの実施がマイナスにはたらいってしまう。カードプログラム実施の効果は、副次的成果として得られる膨大な顧客購買データを有効活用し、“個”に特化した情報をデータから抽出し、その結果に基づいてマーケティング活動を高度化する

こと（マイクロマーケティング）ではじめて高まる。そこで重要な役割を演じるのが、さまざまな現象を統計という道具を用いて記述する“統計モデル”である。

統計モデルを用いてデータから帰納的に情報抽出を行うData-Drivenなマーケティングの研究スタイルは、消費者行動理論をすべての拠り所とし、その研究を演繹的に進める理論的マーケティング研究者から批判の対象となることがある。“消費者行動理論に則っていない”というのである。しかし、前述したように、活用しうるデータという資源を有効に活用し、現場の活動を高度化するのがマイクロマーケティングにとって肝要だと考えれば、そういった批判はまったくナンセンスである。赤池先生の言葉をお借りすると、マーケティングでも「論より

証拠」が重要なのである。

そもそも消費者は、状況が変化すれば理論では説明できない特異な行動や反応を示すことが多い。理論的なマーケティング研究のスタイルのみでは、そのような消費者の変化に対応できないばかりではなく、研究自体まったく無意味なものになってしまう可能性が高い。また、消費者行動理論の発展を待っていたのでは、日々変化する状況を漸進的に取り入れた個に特化した情報抽出は実現できない。

とはいえ、消費者行動理論がある種の見識を与えてくれるのも事実である。さまざまなマーケティング現象を、先見知識を取り入れて統計的にモデル化し、情報抽出を行うというアプローチは、今後、さらに発展させなければならない分野である。マーケティング分野で統計モデルに課せられた役割は、従来から行われてきたデータからの平均的な構造の抽出にとどまらず、最近では、より個に特化した高次情報抽出まで広がってきているのである。

統計モデルを用いてデータから個に特化した情報抽出を行う

というアプローチは、私が研究者として教育を受けた統数研ではおおむね常識化されていると思う。しかし、マーケティング分野ではそういった研究のスタイルはまだ少数派である。それではマーケティング研究の発展は望めない。私自身、“統数研流”マーケティング研究の有用性を広く伝える研究を今後も行いたいと考えているが、それにとどまらず、そういったアプローチができる人材の育成にも力を注ぎたいと思う。

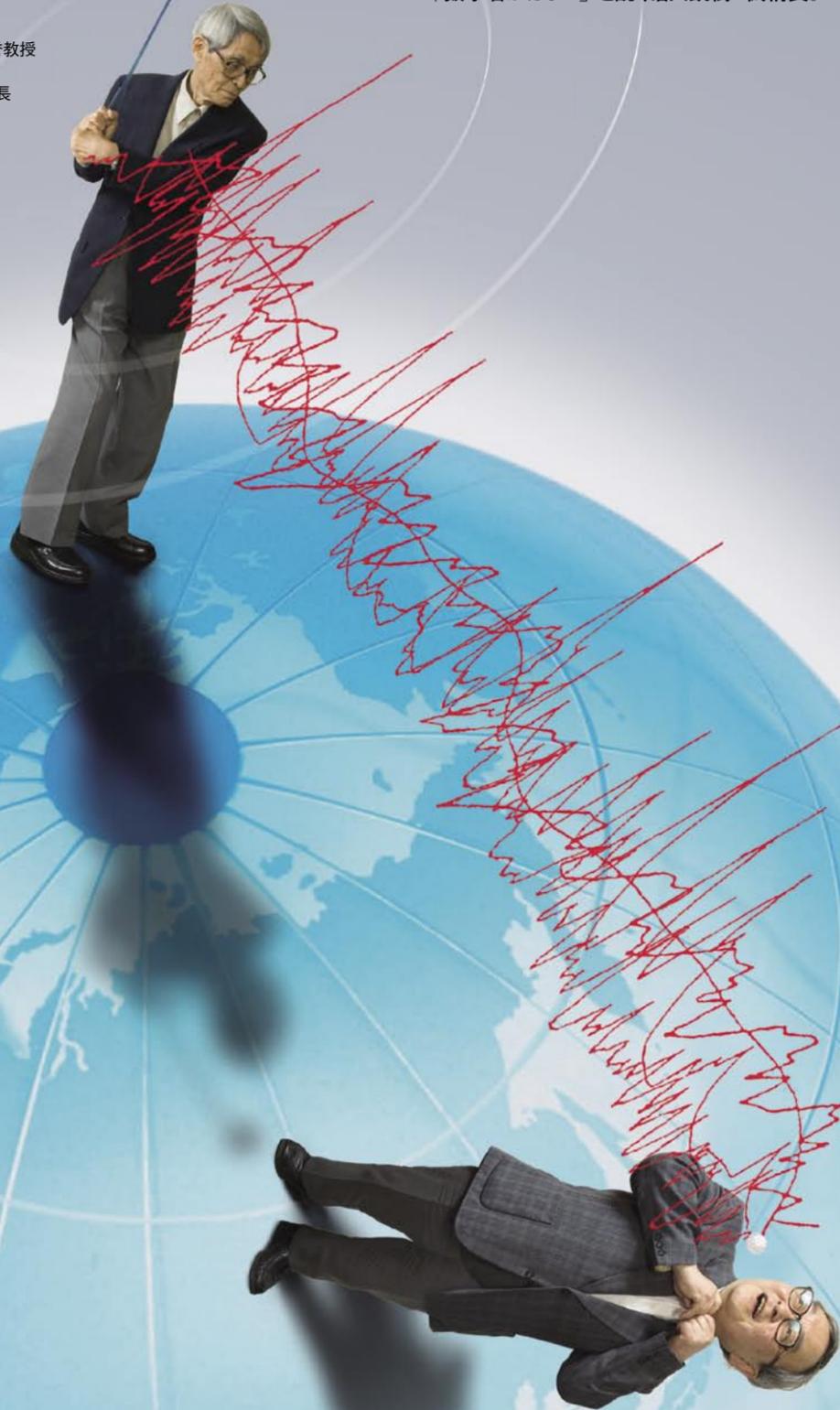


佐藤忠彦（さとう・ただひこ）
(財)流通経済研究所在職中に、総研大数物科学研究科統計科学専攻に入学。2004年10月、学位取得（学術博士）。2005年より現職。統計モデルによるマーケティング活動の高度化に関する研究に従事。モデル化のできるマーケティングを育成したいと考えています。

科学の目・ 統計学の目

話し手 赤池弘次 総合研究大学院大学名誉教授
聞き手 堀田凱樹 情報・システム研究機構長

赤池統計学を形づくる根源的な思考はどのようにして生まれたのだろう。現にあるものを数理で解くのが得意だった少年が、統計学におけるモデル評価の開拓者となるまでの興味深いストーリー。「数学者としては少し異端児」の話し手に対し、聞き手は、ゲノム解読以降データの洪水の中にある今の生物学には論理的思考が必須であり、「数学者がほしい」と説く堀田凱樹・機構長。



堀田 今日、先生がどうして統計学に興味を持たれるようになったかなどについてうかがい、若い人が将来を考えたときの参考になれば、と考えています。先生はお若いころから、数学や統計学に関心をお持ちだったのですか。

得意なのは昔から応用問題

赤池 私には海軍の戦闘機乗りの叔父がいて、子供のころ、彼が数学を勉強する姿を見て、おもしろそうだったのです。学校の算術は、割り算はこうするというように機械的に教えるので、なじみませんでしたね。応用問題が得意で、機械的に覚えることは不得手だったのです。

堀田 実世界に即して考えるのが得意だったわけですね。

赤池 昔からそうでした。

堀田 海軍兵学校に進まれたわけですが、海兵は理工系の教育が中心だったのですか。

赤池 将校になったときにどんな仕事にも対応できるような教育を、短期間にやるのです。数カ月で微積分を終え、すぐに航空力学に近いことや魚雷を撃つ話にも応用する。熱力学ならエンジンの話になる。戦後、あらためて入学した高等学校では、何年もかけて微積分を教えていましたが、海軍兵学校では、全部の教科を対応させながら非常に速く進む。たいへん合理的で、効果的でしたね。

堀田 戦争中ですから、すぐに戦地に赴くこともあり得たのですか。

赤池 いつまで生きていられるのかな、と思ったものです。最上級生のときには、広島に落とされた原爆の閃光と爆風を経験しました。叔父の微分方程式の本を読んでいると心が休まりましたね。

堀田 そこで敗戦。価値観が大きく変わり、精神的にも困難な時代だったのではないのでしょうか。

赤池 目の前で価値観が音を立てて変わるような経験でしたから、敗戦後の数カ月は、これからどう生きたらよいかと考えました。自分と他人の生命を基本にして、それを互いに尊重することを道徳の根本にすれば、どんな状況でも生きてい

けるだろう。そう思い至って、ようやく心の平安を取り戻したのです。

堀田 その後、第一高等学校理科から東大数学科に入られた。応用問題が得意だった先生ですから、工学に興味を持たれても不思議はないと思うのですが、数学科を選ばれたのはなぜですか。

赤池 高等学校の間に、考え方が抽象的になっていったのでしょうか。海兵時代に熱力学などを聞きましたから、まず物理に関心が行き、その基礎として数学が大事だと感じました。

数学科では、きれいに完成した解析学や代数学には、自分はあまり適さない気がしました。具体的な問題に遭遇して、手探りで考えることは好きでしたが、できあがったものを覚えるのは相変わらず苦手でした。3年のセミナーでとった確率論の先生から、文部省統計数理研究所を勧められたのです。

大ざっぱでも現実に役立つモデルを

堀田 私は学生時代に教養科目のなかでいちばんおもしろかったのが統計学でした。統計学というのは、複雑なものを単純なモデルで考えて結論を出す方法で、それは脳がやっていることと同じだと思ったのです。その後、私の基本的な興味は脳に向かったのですが、その根っ子はこのあたりにあるように思います。

赤池 それは実に正しい感覚ですね。今、統計学をやっている人たちは、そういうセンスに乏しいかもしれない。最初から既成の統計学をやってしまいますから。

堀田 そのころ習った統計学では、まずモデルを作り、それに当てはまるかどうかを考える。成り立たなければ、仮説を否定する。モデルといっても、たいていは正規分布など単純なものばかり。それを少しも不思議とは思わなかったのですが、先生のご研究は、モデルの良さを客観的に測ることをめざしていると考えてよろしいのでしょうか。

赤池 そうですね。数理的に美しい理論を作ることにはもちろん関心がありましたが、実際の問題では、大ざっぱなモデルで十分に役に立つ領域がたくさんあ

る。扱いやすく、しかも複雑な現象を処理できなくてはならないのです。既成の統計理論から正確な議論をしても、適用する対象の特性をうまくとらえない限り、役に立ちませんから。

具体的な問題で成果が上がる方法を追求しようとする、自然にいろいろな応用分野の人たちとつながりができてきます。10年ほどは、日本の社会に実際に存在する問題で、統計的な研究を必要とするものは何かを確定することにエネルギーを費やしました。

工業の現場からの求めに答えて

赤池 例えば、当時の重要な産業だった生糸の生産工程管理です。工程の異常を検出する管理図法を導入しようということになり、当時の農林省蚕糸試験所の方が非常に悩んでおられた。

生糸は、一定の個数の繭から引く糸を撚り合わせて1本の糸に紡ぎます。そのとき、糸が切れると繭が落ち、その切れ目を新しい繭でつないでいきます。その回数が異常に増えれば、これは工程の異常ということになるわけです。私は、その前に自動車の流れのモデリングをやっていたので、自動車の流れと生糸の切れ目の流れは同じように扱えると思いました。単位時間に来る糸の切れ目の分布を見ると、典型的なランダムな流れの特徴と考えられるポアソン分布が現れるのです。他方、試験線糸の段階で、1本の繊維の長さの統計的な分布のデータが得られます。ランダムな流れの場合とは違う長さの分布がちゃんと出てくるのです。この結果から、実際の線糸のプロセスでの切れ目の現れ方が確率論的に決まります。これを利用する線糸工程の統計的管理が導入されて、生糸の生産工程に大きい成果が出るようになりました。

堀田 私が習った統計学では、モデルの作り方はいたって拘り定規でしたね。

赤池 誰かが作ったモデルを使うのでしょうか？

堀田 無理に合わせる。そういうものかと思っていましたが、先生のお話をうかがうと、むしろ現実にあるものを上手に



堀田 凱樹 (ほった・よしき)

1938年東京生まれ。医学部に進むが、科学的であろうとするとよい臨床医にはなれないと観念し、江橋筋門下で平滑筋の電気生理学を研究。一方、脳に強い興味を持ち続け、カリフォルニア工科大学でショウジョウバエを対象に脳の遺伝学を手がける。新設の東大理学部物理学科生物物理学グループに加わり、物理学科で遺伝子実験を始めた。1997年国立遺伝学研究所長。2004年情報・システム研究機構長。複雑なものをそのまま理解する、生命科学の新たな方法論の必要を痛感している。

単純化してみると、わりに簡単で現実に対応したモデルが出てくるのですね。

赤池 生糸のあとは、自動車のサスペンションやエンジンの振動の解析、海の波の動きと船の動揺の関係などを対象にしました。周波数成分に分ける解析法を使って、長時間繰り返して実験しないで、さっと推定できるようになったのです。

ところが、セメントの炉を自動運転するときの最適制御というテーマで、この周波数解析の方法が使えないところが出てきました。なぜかという、セメント炉の場合には、温度が上がればそれを下げないように燃料を調節するとか、状況の変化に応じてフィードバックがかかります。そのために、今までの方法は役に立たない。では、どうするか。関連する要素を全部入れて予測し、その予測のモデルを作れば、それを利用して問題が処理できることに気づきました。

モデルを作ること・評価すること

堀田 先生のお仕事では予測がキーワードですね。昔の統計学で習ったのは予測ではなかった。先生のお考えでは、予測できるようなモデルを作ることが大事だということですね。

赤池 そうなのです。自動車の振動の特性を周波数スペクトルで測る問題でも、時系列の予測式を作れば、スペクトルも決まってくる。いろいろな測定に使えるわけです。使ったのは、過去の何時点かの値に係数を掛けて加えて現在の値を予

測する、という単純な線形モデルです。誤差自乗の和が最小になるように係数を決めることで処理できます。ところが予測式に何時点前までのデータを取り込めばよいかという、モデルの次数決定の問題が出てきます。次数が高すぎると推定精度が落ち、低すぎると予測力がない。検定論を使っても、次数をいくらにするかという検定はできないのです。

どうするか。同じ予測式を同じ構造の別のデータに使って検証するのが正しいわけで、私は「ファイナル・プレディクション・エラー」と名付けた評価式を作りました。使ってみると、8~9割はうまくいくのです。理論家は100%よくないと納得しませんが、現実にはこれで十分。

ところが、セメント炉に適用すると、観測値が多くて当時のコンピューターでは処理できないのです。そこで変数をぎりぎりに絞って処理する。しかし多変数の場合は、予測誤差は変数ごとに違うわけです。では、それを総合して何で評価すればよいか。予測誤差のベクトルの特性を評価するものがどうしても必要になる。それを一変数の場合の予測誤差の評価式を拡張したようなものを使って、うまくいったのです。

そのうちに、一般の多変量解析の誤差のことが気になり出しました。これは、心理学でよく使う因子分析法に出てきます。因子分析では、分布は正規分布を想定していますが、その評価をある量で処理している。それは対数尤度です。確率

は、過去から将来のデータの見方を与えますが、尤度は、現在のデータを用いて、過去にこれを生みだした仕組みを評価しようとするのです。

因子分析では何を予測しているか。心理学的な調査データに基づいて、そこからどういう特徴的な因子があるかを書き出していく。因子分析は構造を見ているのです。そのうちに気がついたのが、これもモデルを利用しているということでした。モデルを決めることは、そのモデルを使って将来の問題を処理しようとしている。すなわち予測していることです。その意味でモデルを評価すればよいのだということに、朝、井の頭線の車中で気がついたのです。尤度を使えばよい。モデルの与える分布で予測していると思えば、尤度で対応する処理ができるだろう、と。**堀田** そういう形で、モデルの良さが評価できるということですね。でも、自分で考えたモデルがどの程度良いかが評価できて、より良いモデルが自動的に出てくるわけではないですね。

赤池 そうなのです。本当のモデルがわからないのに、なぜ良さを評価できるのかという基本的な問題がある。哲学的な大問題です。モデルの評価には、真の分布の対数尤度とモデルの対数尤度の差(3ページの図参照)を使います。何種類かのモデルがある場合、真の分布がわからなくても、データから決まるモデルの尤度はありますから、その対数を比較すれば、モデルの比較はできるのです。

堀田 大論争からその結論が生まれたわけですか。

赤池 論争はありませんでした。まだ皆、よくわかっていなかったのです。AICでモデルを評価できて、モデルそのものを提案してくれる人がいなければ、なんの意味もありません。

堀田 モデルはAICから出てくるものではなく、現実にある状態から、人間が考えてモデルを作る。モデルをいくつか作ったときに、予測の立場からどれが良いかは、AICで評価できるのですね。

赤池 そうです。私が今、いちばん大事にしているのは、真のモデルに肉薄する

ようなモデルをいかにして提案するかです。仮説を真実に近づけるにはどうしたらよいか。それにはまだ方法論がないのですね。しかしAICは、あまり複雑なモデルを作ってもよくないことは示します。これは、モデリングの本質的なところですよ。

そこで、具体的に何がいちばん統計的かということ、言葉で表現するという事なので。言葉というのは厳密にこれを示すというのではなく、その言葉で話が通じるという、その程度のもので。非常に複雑なものから本質的な特徴をまとめて表現するという事ですよ。つまり、ものを書くにも話すにも、統計的な努力をすることになりますね。

堀田 なるほど、そうですね。脳というのは結局、複雑な事象をモデル化して単純な形に整理し、それを言葉にしている。

赤池 しかも、他人にもわかるように。だから、意味の伝達可能性、つまり言ったことが人に伝わるということが非常に重要なわけですよ。統計的な概念も多分にそうですね。いろいろな検証を通じて、しだいに客観的と称するものになっていく。科学的思考というのはそういう事なので。統計的な概念は、あらゆる科学研究の基礎的素養だと思います。既知の式を組み合わせれば科学的な成果が得られると考えるのは、甚だしい誤解です。

堀田 新しい理論が次々と出てくる人生というのは、楽しいですね。

ゴルフスイングとセレンディピティ

赤池 成功したり、しくじったり、ですよ。おもしろいのはゴルフスイングの解析です。ゴルフをするときの体の動きの複雑怪奇なこと、セメント炉の比ではありませんから。人間の体には200以上の骨とそれをつなぐ筋肉がある。それなら解剖学の知識があればいいショットができるかということ、できはしない。ゴルフの本も役に立たない。結局は自分で、機械的なモデルをイメージして体を動かしてみるほかないわけです。

今までの物理的なモデリングは一見理論的にやっていたんですが、たいてい結果

が実的に解釈できないのです。なぜそれをやるとよい動きになるのかにつながらない。計測するだけなのです。私はそういうモデルを「計測モデル」と言いますが、計測モデルには構造的な内容がない。計測だけでは理解にはつながらないのです。そういう意味で、それまでの理論的な解析はあまりよくないと思っています。ときに、肺炎で3週間近く入院し、そのあとヘルペスで体中が痛くなり、ベッドに縛り付けられてしまいました。

その間、ゴルフについて考えたのです。動けないから、寝たまま手を動かす。左手は右に行き、左に引っ張ってくる。左手のスイングの間、右手は上下に動くだけ。右手は上下で、左手は左右。左右対称ではないのです。これを「革命的イメージ」と名付けました。このイメージで打つとけっこう打てる。今自分は、昔よりしっかり打てますよ。ゴルファーは実は地球にぶら下がっている、と気がついたからです。足が地球をつかんで、手はクラブをつかみ、クラブという小さい地球と大きい地球をつないでいるわけですよ。

ゴルフの革命的イメージにどうして到達したかということ、ひたすら試みを繰り返したからです。しつこくやり抜くうちに、オーソドックスな視点の影響が消えて、今まで気づかなかったものが見えてくる。それがセレンディピティです。あらゆる可能性を繰り返し追いかけているから、あるとき、ハッと気がつくのです。研究者というのは、知識で頭の中がいっぱい

ですから、変わったものは見えない。それを打ち破るにはすごい努力が必要です。**堀田** 先生のお考えはロボットの設計にも使えそうですね。

生物学における良いモデルとは

堀田 モデリングというキーワードから思うのは、生物学の現状です。今は、1つ1つの遺伝子を操作できるようになり、ある遺伝子がどこで発現するかを細かく実験できる時代です。そこで、この遺伝子をここで働かせたら何が起るかを予測できる分子機構モデルを作ります。ある実験から可能なモデルはたくさんあって、どれが正しいかが問題です。生物学の場合には、科学的な真実が存在しますから、どのモデルがそれに近いか、どれがいちばん良く次の実験結果を予測するかなど、いろいろな意味でモデルの良さというものがあると思うのです。

また、どんな種類のモデルがいくつあるかを考えることが大事だと思うんです。たまたま思いついたモデルを報告すると、それが真実のように思われますが、全然違うモデルが実は別にあり、それも同じような予測性能を持っていることがある。そのときには、そういうモデルがいくつ残されているかを考える必要があります。そういうところに、先生が開発してこられた戦略を展開できないでしょう。

赤池 観測値との対応の問題があれば利用できるでしょう。多くのモデルがある



赤池 弘次 (あかいけ・ひろつぐ)

1927年静岡県生まれ。子どものころから物の動きやしくみに興味をひかれ、統計学の研究においても時間とともに変動する現象の解析と制御を追求しつづける。1970年代にモデリングと予測の概念を打ち立て、モデルの評価規準を提案。今日の統計学の礎を築いた。1986年統計数理研究所長。1988年の総研大の創立にも尽力する。新しい統計的思考法とは、「客観的知識、経験的知識、観測データの3要素を組織的に構成し、それにもとづくモデルの提案と検証の繰り返しによって情報獲得を実現するもの」と、総研大学生セミナーで講演。これまでの功績に対し多くの賞を受けており、2006年には京都賞を受賞した。

場合、AICのような評価値はそれぞれのモデルにいちおう付けられるわけです。その集団を見て判断する。

もしそういうモデルの集団が尤度で評価できる性質のものなら、それで比較すればよい。データをモデルに合わせるといふ操作が入っていれば、AICで比較すればよいということでしょう。しかし、最も重要なことは新しいモデルの提案です。

堀田 生物学では実験は無限にはできないので、次に何の実験をすべきかを考えます。普通は、自分の興味に応じて次の実験をするわけですが、どんな可能性が残っていて、それをどういう順序で実験

していくかを考えるときに、何か基準がいろいろある。それは、先生のおられることと似ていると思うのです。

赤池 私は、最近の情報空間のモデリングにはまったく疎いのですが、生物学のモデリングは、それに近いのではないのでしょうか。いろいろな情報があって、それをどうクラス分けして整理すると、全部を探し当てられるか。これは今いちばん新しい領域です。検索のプログラムなどもこれですね。昔はどうにもならなかったものが、今はある程度まとめて拾ってこられます。ですから、技術的な問題が大きいと思います。具体的に問題

の内容を提示して、情報研究者と協力すれば、成果が出るのではないのでしょうか。
堀田 生物学は今やゲノムの時代で、遺伝子を全部数え上げることができるようになり、原理的には1つ1つの遺伝子について実験ができる時代です。昔は、一部を見て全体を理解するのが科学だと思っていたのですが、ゲノムは逆で、何かわからないが全部を見てしまう。しかし、そのすべてについて実験することはできない。どういう学問をしたらよいのかが、生物学者の悩みの種なのです。

赤池 データが無数にある。そのときに、いちばん大事なのは、何が欲しいかですね。目的意識が明確ならば、それによって見方が決まってくるわけです。ですから、モデリングでは、それをどうとらえるかという知的な部分が肝腎です。

4研究所が合同して新しい成果を

赤池 サイエンスをやるときには、目的意識をはっきりさせないと、何も出てきません。あれに使おう、と思っていけば、いろいろな可能性が見えてきます。その体制があるかどうか問題ですね。

堀田 理論的思考に強い人が必要で、今の生物学にはそれが欠けていると思うのです。ゲノムの時代の生物学は、下手をすると「分子生物学」になってしまう。元来、博物学を脱したのが生物学の革命だったはずなのに、1つ上のレベルの博物学になりかねない。これをどうしたらよいか。生物学者だけでは解決できないと思いますね。

統数研、遺伝研、極地研、情報研が一緒になって情報・システム研究機構ができたきっかけは、法人化という外からの圧力ですが、仕方がないから一緒になりました、というのではなく、積極的に何かを生み出したい。その何かのイメージとして、例えば生物学のこんな事情があるのです。

赤池 いちばん心配なのは、今の世の中はすぐ目に見える業績をあげないと、生きにくいシステムになっています。それで果たして、新しい分野を切り開く余裕があるのかどうかということですね。と

新しい科学の「かたち」

樋口知之

総合研究大学院大学教授 統計科学専攻／
情報・システム研究機構 統計数理研究所副所長

ICT革命が進むなかで、科学の方法論が変容しつつある。自然科学においてはシミュレーションの役割が増大してきた。シミュレーションは通常、研究対象の基本方程式群を計算機に実装するために数理モデルに変換した、いわゆる「シミュレーションモデル」の開発から始まる。それが時間的に変化するものであれば、初期条件、境界条件などを与えて計算を進め、得られた結果から科学知を発見していく。これは、演繹的推論と呼ぶフォワード思考（順問題解決）であり、ほとんどの研究領域における王道とされてきた。一方、統計科学においては、研究対象の理解のために、現象を支配している関係式や経験則を、観測や計測データから推定していく。帰納的推論と呼ぶバックワード思考（逆問題解決）がそこでは王道である。帰納的推論を行うには、対象そのものを基礎方程式群などの積み上げによって実体的にモデル化するのではなく、対象の機能自体を模倣する「数理モデル」を構築する。従来、このようなアプローチの活用は限られていたが、複雑な対象から大

量かつ多面的なデータが得られるようになった今日では、その出番は比較にならないほど増えてきている。

その代表例が近年におけるロボティクスの著しい発展である。かりに、悲しい顔を見たら相手を元気づけるようなロボットを作りたいとする。演繹的な方法論では、目の生理機能から始めて、信号伝達、脳での信号処理の理解、そして運動方程式にもとづいたロボット制御まで、すべての素過程を積み上げていくことになり、目的の達成まではなかなか至らない。そこで、機能のモデル化を優先し、入力データと出力データの関係性を近似した数理モデルを構築するという手法をとっている。

このようなアプローチの重要性に最も早く気づいたのが赤池先生であった。「我々が追求する真理は、現在の知識に依存するという意味で相対的な、対象の一つの近似を与えるモデルによって表現されるようなものに過ぎない」(『時系列解析の実際II』朝倉書店、1995)と看破している。ベスト(真理)を求める一元的価値観が西洋的思想とするなら、ベストをイメージしつつもベターを志向し続ける、多元的価値観を重んじる東洋的思想といえよう。

一元的価値観、大量消費戦略が社会・環境問題において綻びを見せている現在、未来の地球を担う若者にはぜひ赤池思想を学び、真理の探究にとどまらない新しい科学を開拓してほしい。

んでもない人が出てこない。

堀田 それが難しい。合理化だ、人件費削減だ、という流れに対応しながら本質を見失わないようにしたいものです。

赤池 違う分野が接触するのは非常によいことですが、それだけでは

堀田 完全に同じ研究をしているところが一緒になっても、縮小するだけ。全然違うことをしているけれど接点があるものが協力し合うのがよいのではないかと、こういう組み合わせになったのです。なんとか先生方がつくられた伝統をさらに発展させて、法人化が新しいものを生み出すようにしたいと思います。

情報・システム研究機構では今、ライフサイエンスの統合データベース作りという活動をスタートさせました。ライフサイエンスのデータベースは、ゲノム、タンパク質、代謝、病気などについて独立に作られてきて、酵素や遺伝子の呼び方までそれぞれ違うのです。まずは辞書作りが必要です。そして、多様なデータベースをつなげるプラットフォームを作

り、そこに皆で知識をはり付けていけば、大きな百科事典ができるはずですが、これも機構だから可能な仕事で、幸い、4つの研究所があるので、あと4~5年経つと何か見えてくるかもしれません。

異端児がいられる空間が必要

堀田 私は、数学者にぜひ、生物学に入ってきてほしいと思っています。先生は数学者の中では少し異端児、と申し上げてもよいのではないのでしょうか。普通の数学者は、現場のデータを眺めて研究するというセンスはあまりありませんから。

赤池 そうでしょうね。

堀田 金融などには、数学の専門家がかなり入っていますが、生物学は尻込みされる。先日、東大数学科にセミナーに行つて、「ぜひ天才に来てほしい」と宣伝したのです。

赤池 普通の優等生では無理でしょうね。

堀田 数学ができるだけではなく、生物を見て、複雑なままにまず理解し、そのうえで生物学者が考えつかないことを考

えつく。そういう人が欲しいのですが、すぐには出てこないかもしれない。

赤池 わかっている問題の解き方ばかりを教える教育が多すぎますからね。どんなことでも考えれば解けるという経験をさせないといけません。さらに、とんでもないことをやっても大丈夫という空間を確保してやらないと。

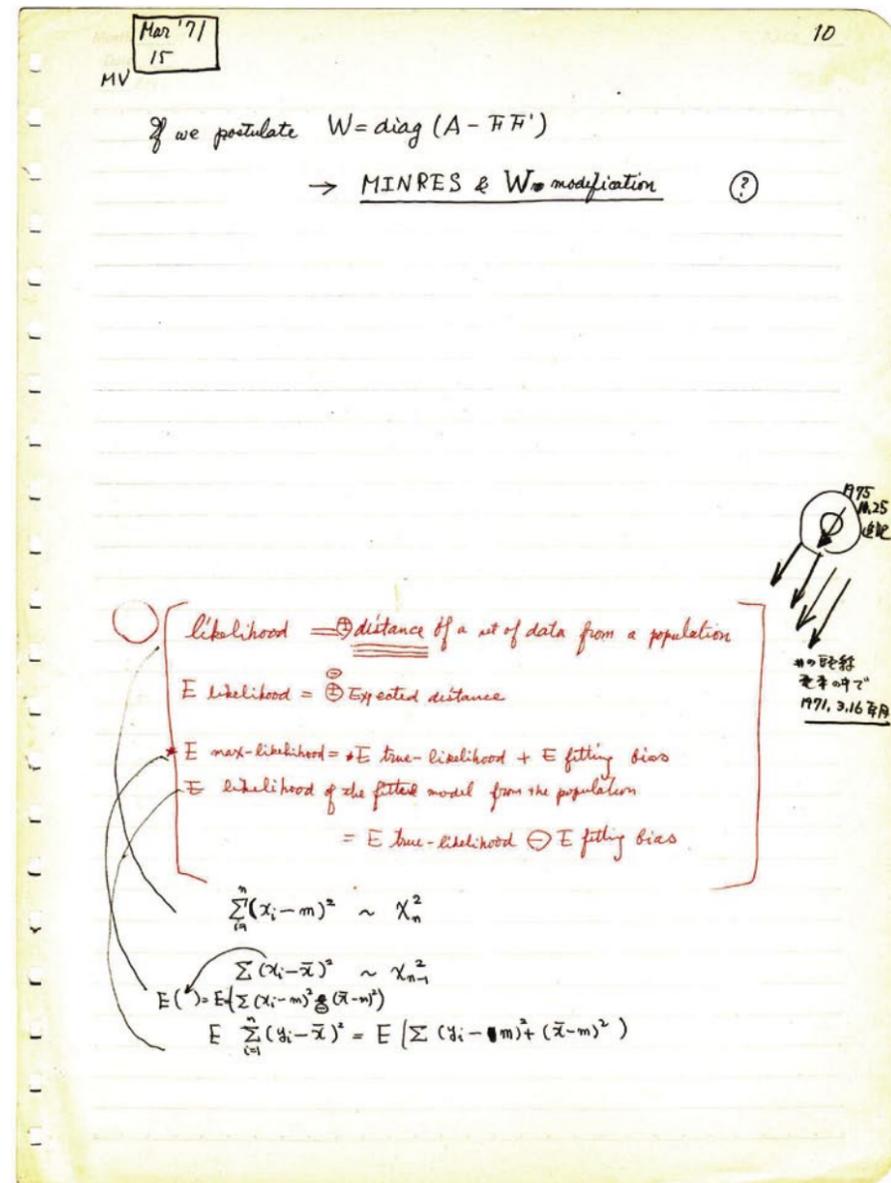
堀田 昔なら、ラボ全体としてはきちんとスタンダードな仕事をしていても、その中に異端児がいて、それが次の時代をつくっていくような余裕があったのですが、今はそういう余裕がだんだんなくなっていますね。

赤池 楽しくて仕方がないから研究するというでないとね。

堀田 そのとおりですね。そういう学問をなんとか続けていきたいものです。本日はおもしろく、示唆に富むお話をありがとうございました。

(2007年7月6日、つくば市にて収録)

(構成 古郡 悦子)



対数尤度からAICへの着想を書いた赤池博士のメモ