

IV 主要研究テーマ発展小史

まえがき

歴史をふりかえってみると統計数理研究所のひとつの特徴は、研究テーマの多様性においても、それを遂行した研究者達の個性の点でもまれに見る広がりを持っていることである。ここに掲げる10の研究領域は、本研究所の仕事として世間に認知されている代表的なものを取り上げたものであるが、本研究所で行われた非常に幅の広い研究のすべてを覆ったものではない。とくに近年行われた研究で重要なものが欠落している可能性が大きい。(この点を補うものとしてXI章資料7の(4)を参照されたい。) 各小史のまとめ方には、主要な成果を重点的にとりあげ要約したものと、過去の研究テーマを羅列したものの二様がある。したがって両者に取り上げられた項目・テーマの軽重には大きな差がある。本小史は、歴史研究の方法に則って客観的になされたものではなく、少数の人々によって短期間にまとめられたものでもあり、その意味で一般の読者に向けた一試論と解釈されるべきものである。

数理統計学および確率論

統計数理研究所創立の頃の研究成果は、1944年7月に創刊された講究録に収録されている。終戦の年の1月末に休刊するまでに、30編を掲載している。その後、1946年3月に再刊された。当時の主要な研究テーマは仮説検定論、正規標本分布論、正規確率過程論を含む確率論などであったが、ツベルクリンの力価に関する推論や赤血球の抵抗力の分布など、実際問題との関連で実験計画法の研究も行われた。河田龍夫、國澤清典、坂元平八らはフーリエ解析という強力な道具を用いて確率論、極限定理を展開した。とくに河田が導入した平均濃度関数を使った極限理論が成果を上げた。掛谷宗一は選別問題（順序統計量）、投票方法・輸送問題（OR）、経済の基礎、人生数学（ゲームの理論）などに関する考察を残している。山内二郎は、有限区間上の分布でその確率密度が多項式で表されるものの畳み込みを計算した。

1950年代の研究には、コレクティブ理論の基礎付け、位置母数をもつ対数正規における推定問題、欠測値がある場合の推定問題、適合度検定に関連して如何なる物差しを使うべきかの問題、Berry-Esseenの不等式、ポアソン分布と指数分布の関係などがある。高野金作は分布関数の逆関数を使う方法で分布関数列の収束、無限分解可能分布と極限定理との関係、情報理論に関してはKhintchineの結果を含む議論を展開している。Waldの推測決定理論を基礎にした推測理論は、二つの分布の近さを測るアフィニティの概念を導入した松下嘉米男を中心に1965年頃に至るまで盛んに行われた。

[最尤原理]

確率分布の族に最尤法を適用して、具体的な確率分布の推定をすること、最尤法のいくつかのバリエーションを適用して、相互の良さを比較すること、さらには最尤法そのものの持つ諸性質を論じることなど、最尤法に係わる研究は現在でも盛んに行われている。また、点過程における最尤推定、比例ハザードモデルにおける完全および、部分最尤法、多重 2×2 分割表における尤度方程式の近似、マージナル尤度の利用、条件付き最尤法と絶対最尤法の比較などがある。

[漸近理論]

推定方法の統計的な性質を調べることは、数理統計学に与えられた一つの任務である。標本数が大きくなった場合の性質に関する研究（漸近理論）では、尤度方程式と最尤推定量の漸近的な関係、推定量の漸近的な表現形、 M -推定量の漸近的性質、級内相関の推定量の漸近的性質、標本パーセント点の漸近正規性、クラメル・ミーズ型の統計量の漸近分布、2標本問題のための検定統計量の漸近的性質、一次統計量の漸近正規性に関する統一理論、漸近同等性が成り立つための必要十分条件などの研究がある。

[推定論]

推定論は数理統計学における主要なテーマの一つであり、データに基づいて確率分布の特性量の推定を議論する。最尤原理あるいは不偏性・不変性などに関心が持たれることが多いが、何らかの意味で誤差の小さい推定量を作ることが問題である。時代の流れに応じて、たくさんの研究が行われてきている。

・分布族の母数推定：

ガンマ分布の形状母数、負の2項分布の条件付き最大尤度推定、ベータ・2項分布、ワイブル分布のモーメント法による推定、オーダー k の離散分布における推定論、逆正規分布の尺度母数の最小リスク不変推定、2母数幾何分布の条件付き最尤推定と他の推定法との比較、ポアソン過程における頑健な推定、3母数逆正規分布の推定、3母数対数正規分布の推定、捕獲・再捕獲法による母集団の大きさの推定

・構造の推定・モデル選択：

回帰曲線、2値データに基づく折れ線、比例ハザードモデルにおける回帰係数、欠測値がある場合のトレンド、空間点配置の相互ポテンシャル等の推定

・推定論における事前情報の利用・ベイズ的方法：

回帰係数の推定、分散の推定等における事前情報の利用、事前検定に基づく推定方式確率分布推定、反応曲面推定、外れ値検出等のためのベイズ的方法、対称な分布の位置母数の頑健な推定法

・不偏推定：

制約条件のある母数の不偏推定、層別された標本に基づく母平均、母分散の不偏推定、Lehmann の意味の不偏推定

[モデルを記述する
ための確率分布] 不確実な現象を表現するモデルは確率分布（の族）で記述され、現象に応じて様々な確率分布が提案されている。なぜ特定の分布族がモデルとして採用されるのか（genesis）、それらはどのような性質をもつのか、どのような統計的推論が適用されるのか、等々の問題がある。

本研究所では正規分布を特別な場合として含む半安定分布に関する詳しい研究が、1960年代はじめから1980年代はじめにかけて行われた。ここ数年はオーダー k の離散分布に関する研究が精力的に行われている。その他、一般超幾何分布の分類、逆2項分布、指数分布とその近傍、パレト分布、逆正規分布、一様分布、変形2項分布の研究などがある。

[漸近展開と
確率分布等の近似] 統計推論に必要な統計量の分布は、仮に解析的に求めることはできてもしばしば複雑で手に負えない。たとえ、計算機による数値計算に頼るにしても、近似的な手段の開発は重要な意味を持つ。とくに、よく知られた確率分布と関連づけられた近似法は、問題にしている確率分布の性質を把握するためにも有用である。極限定理、漸近展開などは、その目的のために使うことができる。

たとえば、正規分布の尺度混合の正規分布の回りでの展開と、その誤差に関する詳しい研究がある。ガンマ分布の尺度混合についても同様のものがある。その他、標本パーセント点の同時分布の正規近似、中心極限定理の誤差評価、2項分布・多項分布の近似、一様分布からの順序統計量の一次結合の分布とその近似、指数型分布族における標本平均の正規近似、近似改良のための変数変換法、実ガンマ関数の近似などの研究がある。いずれも近似の誤差評価を伴っているのが特徴である。

[確率論・確率
過程論]

数理統計学は確率論の基礎に立っているとはいうものの、確率論・確率過程論はそれ自身独自の発展を遂げている。近年、確率論の先端の成果を数理統計学の分野に取り入れ、困難視されていた問題に解決を与えつつある。これらは、セミマルチンゲールの統計、離散的な観測値からの拡散過程に関する推論、拡散過程の最尤推定量の漸近展開（マリアヴェン—渡辺理論の応用）、確率過程を特徴付ける定性的性質と統計モデル、安定分布の牽引域に属する分布の分解

問題，ランダムな衝突問題の解析，力学系の統計モデル，などの研究がある。

これらの他，本研究所において比較的深く行われた研究では，モーメント問題とその抽象的な一般化，集中曲線，集中曲面，集中多様体と集中解析，ブートストラップの理論と応用，統計的モデルと統計的基本方程式，確率分布の同等性，いろいろな距離概念，確率的な意味での大小関係，従属性，独立な確率変数の和に関する極限理論，順序統計量，実験計画法，経験的ベイズ手法，統計的決定理論，待ち行列論，乱数などがある。

多変量解析

[二次形式統計量]

1940年代の後半において、正規母集団のもとでの二次形式統計量のカイ二乗性と独立性の間の関係についての研究が、小川潤次郎、松下嘉米男、坂元平八等によってなされた。当時、二次形式統計量のカイ二乗性についての必要条件が知られていたが、それが同時に十分条件であることが三氏により示された。

[標本分布理論]

・漸近展開：

1950年代半ば頃、塩谷実が多変量分散分析に関係して Lawley-Hotelling 統計量の上方パーセント点および分布関数の漸近展開を導いた。この漸近展開を求める方法およびその拡張により、Lawley-Hotelling 統計量に関連した種々の統計量の分布関数に対する漸近展開式を与えた。さらに、複数個の多変量正規母集団の平均ベクトルに対する多重比較を同時信頼区間の形で考え、そこに現れる Studentized range をはじめとする種々の極値統計量の上方パーセント点の大標本近似法を開発し、個々の場合に対する数表も与えた。

・Zonal多項式：

1961年には James が正値対称行列を変数とする Zonal 多項式を導入し、これにより非心 Wishart 分布、及び標本共分散行列の固有値の同時分布が導出され、多くの関連する非心分布の導出がなされた。本研究所においても、Zonal 多項式を用いて行列変数の二次形式統計量の分布理論が構築された。

・尤度比検定統計量の分布：

1970年代において一般の母集団分布に基づく尤度比検定統計量の各種仮説のもとでの分布の漸近展開が与えられた。これにより尤度比検定統計量は仮説のもとで常に分布の収束を早める Bartlett 補正ができることが示された。また、関連して Wald 統計量、Rao 統計量等についても調べられた。

・変換理論：

70年代終わりから80年代初めにかけて、多変量解析において用いられる種々の統計量に対して、その分布の近似精度を改善するのに有効な変換式を求める方法が理論的に研究された。これによって、従来の直感的な議論に代わる変換理論が構築された。その後、数式

処理システムの活用により高次漸近展開式の構造が明らかにされ、変換の有効性が展開式の収束性と関連して議論された。

**[関連性を捉える
多変量統計量]**

種々の多変量データを分析する際、関連性の程度をどのようにして捉えるかという問題は、多変量解析における基本的な問題の一つである。この問題に対して、とくに、遺伝学、医学、疫学、心理学等において、分析上必要とされる関連性の程度を定量的に測る種々の評価尺度の提唱と推測理論の研究が、国際共同研究を通して行われた。

[計算統計学]

80年代のコンピュータのハードウェア・ソフトウェアの両面にわたる急速な発展は、多変量解析の研究にも大きな影響をおよぼした。すなわち、コンピュータの利用を前提とした数理の展開と統計的数値計算法という枠組みの中で、新しい手法開発と理論・方法論の研究が行われた。前述の数式処理システムの活用もその一つであるが、とくに、統計的数値計算法の代表的な手法の一つであるブートストラップ法に関する研究が進展した。80年代前半から、判別分析における予測誤差推定への応用、ブートストラップ信頼区間の精度評価、構築した統計モデルの有効な評価規準の提唱等の研究が継続・発展しつつある。これと並行して、情報量統計学の視点に立った、多様な統計モデルの評価規準構成のための基礎理論研究も進められている。諸分野の不確実性を有する現象の解明のための新たな統計手法開発が、コンピュータの利用を前提とした新しい視点に立った理論・方法論に基づいて促進されつつある。

日本人の国民性調査

〔調査の契機〕

第二次世界大戦後、日本にも無作為抽出法が導入され、社会調査の分野でもその採用が推奨された。その嚆矢となった昭和23年の「日本人の読み書き能力調査」(林知己夫、西平重喜、石田正次、1951)では日本型標本抽出法の開発だけでなく、質問法などについても先駆的な方法が試みられ、わが国の社会調査の方法的な基礎がつけられた。

この調査から5年後の昭和28年に初めて行われた「日本人の国民性調査」は、敗戦による自信の喪失、日本人の行動や考え方に対する評価基準の敗戦による倒錯といった混乱の中で、いわば日本人のアイデンティティを求めて企画されたものであった。

この調査では、さまざまな文献から日本人の国民性に関する項目を集め、調査可能な項目を洗い出し、具体的・日常的な場面設定の下で人々がどう考えるかを聞くことによって国民性の実像に迫ろうとする手法が採られていて、これが大きな特徴の一つになっている。この調査の結果、日本人が懸念されるほど自信を失っているわけではないことや、日本人論者が指摘するようないわば典型的日本人など現実には少ないことなど、計量的日本人論でなければ見出し難い重要な知見が得られた。

〔継続調査への発展〕

その後の日本の高度経済成長に伴う急速な社会的変化を目のあたりにし、国民の意識(心情、価値観など)の変遷を統計調査的な方法で捉え、日本の社会の動向を知るために、昭和28年以降、5年ごとに「日本人の国民性」の全国調査が繰り返され、戦後昭和期の8回の調査に加えて、平成5年には第9次調査が実施された。

これまでの継続調査から明確になったことは、意識の動向に関しては、(1)政治・社会・生活などに関する意見は大きく変ったが、身近な人間関係に関する意識は変化が小さい、(2)戦後日本人の意識は近代化の方向をとっていたが、第1次オイル・ショックを機に一転して伝統回帰へと向かい、(3)現在は、さらに新たな次元の意識に向かっているようであることなどである。(『第1～5日本人の国民性』(林、西平、青山博次郎、鈴木達三、多賀保志、水野欽司、他)

この研究のように、同じ質問による継続調査で40年にも及ぶもの

は世界にも例がなく、調査結果そのものが「数字で語る日本人の意識の戦後史」として著名になり、学術文献は勿論のこと、中等教育用の教科書などにも紹介されている。国内外の研究者の間で日本社会研究の基礎資料としても用いられ、ヨーロッパを中心とした社会価値観の比較調査をも促進している。このような事情から、この調査が、いろいろな機関が各種の調査を行なう際の基準として用いられている意義も大きい。

統計理論の発展に関しては、この調査データを源泉として、質的データの構造を見いだすための数量化理論、意見の変化が時代・加齢・世代のうちのどの要因によるのかを識別するためのコウホート分析、因果関係の自動探索のための CATDAP など、数々の解析法が開発された。これらの方法は、さまざまな社会心理学的事実の発見にも役立てられた。また、これに平行して、パネル調査、面接法と自記式法の比較、回答誤差、回答変動誤差の研究等も進められた。

[最近の展開]

この調査研究を母胎として、各国の文化や国民性の相互理解に資するため、意識の国際比較研究が計画され、海外でも「日本人の国民性調査」と同様の調査が行われるようになっていく。昭和46年の「ハワイ日系人調査」(林, 他)を皮切りに、今日までに調査された国や地域には、米国、ドイツ、フランス、イギリス、イタリア、オランダ、台湾、ブラジル、フィリピン、その他の東南アジア諸国が含まれている。

これらの国々の幾つかは、言語や文化を共有しているために、直接比較するのに興味深い対象となる。そして、その比較の環をつなぎ、環の鎖を徐々に拡張していく中で、世界の国民の相互比較が進められるようになったのである。今日では、この研究は「連鎖的比較調査分析法」と呼ばれ、さらに多くの国々との相互比較調査のための国際的共同研究も繰り広げられ、発展を続けている。

標本調査とサンプリング

[ランダム・ サンプリング]

第二次大戦後、統計数理研究所はランダム・サンプリングと標本調査にもとづく実証的研究を行い、多くの成果をあげた。他機関と共同して行われた代表的なものを列挙すると、「読み書き能力調査」(1948)、「社会階層の構造と移動」(1954)、「ホワイカラーの調査」(1961)などがあり、「サンプリング調査はどう行うか」(林知己夫, 1951)、「日本社会の階層的構造」(日本社会学会調査委員会編, 1958)、「日本のホワイカラー」(林・鈴木達三他, 1964)などに詳しく述べられている。

[世論調査の 妥当性]

また統計数理研究所が独自に行った調査としては、港区長選挙(1949)、東京都知事選挙(1951, 1955)があり、世論調査の妥当性や予測の可能性が詳細に検討された。「数量化と予測」(水野坦・林・青山博次郎, 1953)にその方法と結果が述べられている。これについて、「国民性の調査」が1953年に開始され、5年ごとに継続的に調査されている。「マスコミュニケーションの効果の調査」もそれと平行的に行われ、その後「東京定期調査」として26年間継続して行われた。

[サンプリング 理論]

サンプリングの理論と方法に関する研究では、「サンプリング・システム」(Midzuno, AISM, 1950)、「比例確率サンプリング」(同, 1952)が先駆的業績であり、「最適層別」(Taga, 同, 1967; Wakimoto, 同, 1971)、「サンプル調査の理論」(多賀保志, 1976)、「ランダム回答法」(Takahasi et. al., AISM, 1977)がある。特に Ranked Set Sampling (Takahasi & Wakimoto, 同, 1968)は顕著な成果である。また、環境・生物などの分野に関しては、「調査とサンプリング」(林・多賀他, 1985)にいくつかの例が述べられている。最近では、南氷洋の鯨資源に関するライン・トランセクト法の研究や衛星データを利用する自然環境の調査、「標本調査の再検討」(田口時夫, 統計数理, 1986)などがある。

数量化法

〔データ解析の方法としての数量化法〕 質的なデータを数量化して、現象を計量的に把握・解明しようとする考えのもとに、林知己夫は1947年代に数量化理論を導入した。当時、「データ解析」(Tukey)という言葉はなかったが、数量化法は多変量的な質的データの解析法として広く利用された。この方法は、基本的には多変量データ解析の重回帰分析・判別分析・主成分分析に対応する諸分析法で構成されている。その理論と計算法は1947年から1955年の間に林らによって発展させられ、「予測のための数量化」、「パターン分類のための数量化」、「判別のための数量化」、「似たものの集めの数量化」は、社会心理学の利用者によって、それぞれ数量化第Ⅰ類、第Ⅱ類、第Ⅲ類、第Ⅳ類と呼ばれるようになり、今日ではこの名で知られている。

〔開発の経緯〕

数量化法は実際問題におけるデータ解析のために開発された方法である。実際、戦後の混乱期において犯罪が多く刑務所が常に過剰状態であった時に、その対策としての仮釈放制度の最適な運用に資する目的で開発された。仮釈放の制度は刑期の約三分の一を過ぎて再犯の恐れのない受刑者を仮釈放により社会復帰させ、実社会で正す制度である。再犯の恐れのない「仮釈放群」を、受刑者の経歴・パーソナリティ・受刑中の評価・その他などの質的データの数量化により判別・予測するのに用いた方法が数量化第Ⅱ類である。これによって「仮釈放群」、「非釈放群」を基準とする分類の判別・予測に成功した。

また、大戦後アメリカ占領軍(GHQ)の中には日本の公用語の英語化を目論む向きもあった。そこでGHQ教育部は「日本人の読み書き能力調査」を行いその可能性を探った。その結果、日本人の読み書き能力が非常に優れていることが示され、ローマ字化・英語化の考えは退ぞいた。しかし、この調査を機会にわが国の標本調査は理論的にも実用的に大きく発展した。また、読み書きのテストの正解点数を、同時に調査した対象の性別、学歴、職業などの質的データによって予測しようという発想から、数量化第Ⅰ類が生まれた。

数量化第Ⅲ類は、1955年頃ある缶詰会社のラベルのデザインを類型化するために開発された。商業戦略的には、同じ商品であれば他

社より好まれるラベルデザイン，高級品ならより高級志向型の人に好まれるラベルデザインが望ましい。購買意欲の向上につながるパターン分類のためのデータ解析法としてこの方法が開発された。

その他，ソシオメトリーによる個体（人または物）の類似性のデータに基づいてグループ分けをする問題を解くために数量化第IV類が開発された。

時系列解析

[間隔過程と 線系工程の管理]

時系列解析といえば、自己相関関数やスペクトルの研究が自然な出発点と考えられるが、統計数理研究所における時系列解析の研究は、より深く対象の構造を表現しようとするところから始まった。赤池弘次は自動車の時間間隔の解析から間隔過程 (Akaike, AISM, 1959) と呼ばれる自己相関関数を一定の構造から導く離散的時系列モデルを導出した。このモデルは直ちに生糸線系工程の統計的管理に応用されることとなった。線系工程では落緒により生糸の太さにむらが生じるが、落緒数の系列を、独立な間隔過程の和と考えることによりこの現象を説明できることが分かった。これにより、通常の品質管理法では困難であった線系工程の管理が実用化され、その後の新しい線系法研究の出発点となった。

[定常過程の スペクトル解析]

やがて1960年代に入ると自動車の不規則振動の解析を契機としてスペクトル解析の研究が始まった。当時は Tukey 等のスペクトル推定法が開発されたばかりであったが、リレー式自動計算機の実用化にともないピリオドグラム平滑化のウィンドウ設計の研究を経て、船舶の応答の解析を機に周波数応答関数の統計的推定法の実用化に成功した (Akaike, 1962)。この成果は当時世界の最先端を行くもので、確率過程の工学への応用に関する日米セミナー開催の端緒となるなど国内ばかりでなく国際的な研究交流が開始された。

[時系列モデルと 情報量規準の導入]

1960年代後半に入るとセメント焼成炉の解析、制御の問題から時系列モデルが積極的に利用されるようになった。セメントの炉のような多数の変数間に複雑なフィードバックが存在するシステムでは、スペクトル解析的な方法や常識的なデータ解析法では全く歯がたなかった。結局フィードバックシステムの解析の問題は、多変量自己回帰 (AR) モデルの導入により解決されることとなるが、そこでは自己回帰の次数の決定が重要な問題となった。赤池は FPE (AISM, 1969) を導入し、この問題を解決したが、これは後に一般化され、AICとして時系列解析に限らず統計的モデリング全般に広く使われるようになった (Akaike, Akademiai Kiado, 1973)。

時系列モデルの導入およびモデル推定法の実用化は、応用上重要

な時系列関係の問題を一気に解決した。まず、自己回帰モデルとスペクトル構造の関係式からパワースペクトルやクロススペクトルの自動推定が実用化された (Akaike, AISM, 1970)。また、パワー寄与率 (同, 1968) の概念によりフィードバックシステムの解析のための有効な手段が得られることとなった。さらに、自己回帰モデルの状態空間表現を利用することによりセメント焼成炉の制御に成功した (Otomo et.al., Automatica, 1970)。このようにして確立されたダイナミックシステムの統計的制御法は、その後船舶のオートパイロットの開発 (Otsu et.al., 同, 1979) や火力発電所ボイラの制御 (Nakamura et.al., 同, 1981) などにも応用され、最適制御理論の実用化の途を開いた。

[さまざまな モデルの開発]

情報量規準の導入とモデルの重要性の認識は、さまざまな新しい時系列モデルの開発を促進した。まず、非定常な時系列の解析法の第一歩として局所定常時系列モデル (1976) が開発され、その後地震波到着時刻の自動推定に応用された。また、船舶の動揺や河川流量の解析に関連した非線形モデルが導入され、局所線形化の手法や力学系モデルなどが考案された。さらに、Vere-Jones の来日を機に点過程への関心も高まり、様々な点過程モデルが開発され地震データの解析法の発展に大きく寄与した。

[ベイズモデルの 実用化]

1970年代の後半にベイズモデルの検討が始まった。当初は最尤法の欠点を補うことに主眼が置かれ、improper prior の利用が積極的に試みられた。やがて、季節調整法などの研究を機に、ABIC に基づく事前分布の構成法が開発されてベイズモデルの実用化に成功し (Akaike, 1980)、新しいベイズ型季節調整法 BAYSEA が開発された。ベイズモデルの実用化は従来のパラメトリックモデルの枠を越える大規模なモデルの開発を可能とし、時系列解析の分野に大きなインパクトを与えた。特に、地球物理データの解析 (BAYTAP-G など)、コホート分析、経時データの解析など、さまざまな分野で新しい時系列モデルの開発を促進した。

[状態空間モデルの 利用]

最適制御系の設計のために導入された状態空間表現はやがて、時系列のモデリングに積極的に利用されるようになった。まず、多変量

ARMA モデルの推定におけるモデルの一意的表現の実現のために状態空間モデルが利用され、世界に先駆けて実用プログラムが開発された (TIMSAC-74)。やがて、カルマンフィルタの積極的な利用によりARMAモデルの最尤法や欠測値の補間を効果的に実行することが可能となった (TIMSAC-78など)。さらに、ベイズモデルの実用化をきっかけに、状態空間モデルを利用する非定常時系列モデルの開発が積極的に行われるようになり、時系列の多成分への分解、時変係数モデルの推定法などが実用化された (TIMSAC-84)。

1980年代後半には非ガウス型状態空間モデルのフィルタリングおよび平滑化が実用化され、非ガウス型モデルや非線形モデルが積極的に利用されるようになった。

情報量規準

[前段階としての FPE 規準]

情報量規準 AIC は1971年に赤池弘次によって導入されたが、これは現場の工学技術者の要求に応える努力の中から生まれたものである。時系列データの解析における自己回帰モデルの次数の決定において、一時点先の予測誤差分散の推定値 FPE を用いる方法を開発し多くの成功例を得た赤池は、これを多次元自己回帰モデルの場合に形式的に拡張した MFPE を使って、セメント・ロータリーキルンのシステムを解析し、統計的自動制御を実現した。MFPE の有効性はこの自動制御の成功によって確認されたが、その理論的根拠は十分には明らかではなかった。

[情報量規準 AIC]

自己回帰モデルの次数決定の問題と、因子分析における因子数決定問題に共通な視点を探る過程で情報量規準が案出された。因子分析におけるパラメータ推定においては、時系列解析における平均2乗予測誤差最小化に代わり最尤法が使われることに注目し、MFPE を最尤法の文脈の中で見直すと、Kullbac-Leibler 情報量によるモデルの評価という一般的な視点に到達する。MFPE を拡張し、はるかに広い一般的なモデル選択問題に適用可能なものにしたものが AIC である。AIC は、複雑度の異なる統計的モデルの比較をデータに基づいて行う道を開き、広範な分野の研究者に歓迎されて多くの実用例が現われた。

[ABIC]

情報量規準 AIC は、統計学者には必ずしも歓迎されなかった。たとえば、有限次数の自己回帰モデルが真の構造である場合には、AIC 最小化法による次数の選択が一致性を持たないことを取り上げて AIC の欠点とみなす人々もいた。統計的データ解析の目的は分布の推定とその利用にあり、パラメータの推定や次数の推定にあるのではないとする立場からは、この批判の重要性は低い。しかし、想定されるモデル群が適切でない場合には、AIC 最小化法が常に良い結果を生むわけではないことから、赤池は多数のモデルの情報を経合的に利用する方策としてベイズ・モデルを研究し、情報量規準の観点に立つことによって、ベイズモデルの有用性が明らかにされることを示した。データに基づいて推定されるべき「超パラメー

タ」を持つ事前分布を導入し、超パラメータに関する最尤法に AIC の考えを適用する ABIC 最小化法がその方法である。

最小 ABIC 法は、直ちに季節調整法に適用され、これまで手続的に定義されていた経済データの処理を統計モデルあてはめの問題として解決する方法を与えた。ベイズ・モデルと情報量規準の組合せは、曲線が「なめらかであるはず」等というようなファジーな情報に客観的な表現を与えてデータ解析に利用することを可能にし、統計的データ解析の適用範囲を大幅に広げた。実際、社会調査データや地球物理学関連のデータ解析において、最小 ABIC 法は強力な方法であることが認められている。

〔最近の動向〕

計算機能力の発展にともなって情報量規準の適用範囲は広がり続けており、最小 2 乗法や最尤法のような古典的方法にならぶ地歩を得つつある。最近は多数のモデルの AIC の値の同時分布の研究や、ブートストラップ法の援用によって、さらに情報量規準によるモデル評価の適用範囲を広げる研究も進められてる。また、この方法の科学哲学における意義にも関心が寄せられている。

ちなみに、AIC 導入の論文は、米国を中心とする学者のグループにより、1989年以前の百年間における統計学のブレークスルーとされた論文39件の一つに数えられており、これを含む業績に対して赤池は1988年度朝日賞を受賞している。

オペレーションズ・リサーチ

[統計数理とOR] 第2次大戦中に米国において開発された兵站の数理的技術は、戦後ORの名の下に科学的経営管理と意志決定の方法として発展した。ちなみに本研究所が創設される端緒となったのは、この米国における兵站研究の成功であったといわれている。本研究所でも1960年代前半から、この分野の研究に取り組んだ。現象に即した問題の定式化、調査・測定・実験、数量化、予測、分析・総合を方法とする統計数理はORのそれと軌を一にするものであった。

OR研究は、当時研究所においては、企画管理・過程管理の研究と呼ばれ、実例としては石油貯蔵タンクの最適容量の決定、交差点における信号の最適時間間隔の決定、統計的交通管理・制御、高速道路による通勤輸送のための道路選択嗜好分析、在庫管理モデルの特徴分析と対策、研究開発のための投資効果の研究、住宅団地の総合的設計における最適費用配分計画と最適修繕計画などの研究が行われた。60年代後半からは、ダイナミック・プログラミングによる交通網の計画やメッシュデータの利用法などが研究された。

[待ち行列の理論] これらの実用的研究が進むに従い理論的研究も発展し、1960年代後半には待ち行列の数学的解析に成果があった。さらに、70年代にはコンピュータの発展に触発されて、解析的方法には馴染まない複雑な待ち行列システムの数値計算・シミュレーションによる待ち行列の解析法が開発された。また、応用として建物などへの人の流入・流出解析などに適用され、防災研究などに貢献した。

[最適化と統計学] OR問題の解決のための基本的数理技術である最適化は、最尤法、最小2乗法や統計的決定理論などに見られるように統計学と深く関わっており、1960年代には無限次元線型計画問題の最適性に関する重要な理論的成果が得られ（石井恵一、数学、1966）、標本調査における最適層別法などにも応用された。拘束条件なしの最適化法に関しては、最急降下法の挙動の解析に関わる先駆的な成果が得られた（Akaike, AISM, 1959）。この頃から線型計画法、動的計画法などの数値解法の研究も始まった。

[微分幾何学的方法 による最適化理論] 1960年代後半には拘束条件つき非線型計画の数値解法としてアナログ型解法が開発され、微分幾何学的方法による最適化理論の研究が開始された。この理論に導かれて最適化アルゴリズムの設計のための、ニュートン法に基づく統一的方法が得られた（1980, 1981）。線型計画問題に対する Karmarkar 法の成功に触発されて、国内・海外において内点法の研究が活発化しているが、本研究所においても近年、中心化ニュートン法や双対内点法の開発、Adler-Karmarkar 法や内点法の理論解析において世界に先駆ける成果を得ている。

[数値解析] 最適化アルゴリズムのコンピュータへの実装化に関連して、大規模線形方程式の反復解法の 1 種である射影法（1971）と適応的加速法が開発され、現在流行の前処理つき共役勾配法のさきがけとなった。X線トモグラフィーのひとつである ART（Algebraic Reconstruction Technique）はこの射影法に基づいている。また代数方程式の同時反復解法や階数 1 の公式に基づく線形方程式の直接解法も開発された。

[数値的最適化の応用] 上述の最適化技術を利用して、X線小角散乱問題、X線トモグラフィー、地震波による地球内部構造推定、肺換気能の解析、肺気道の導通度の解析などの逆（不適切）問題の解法に成果を得た。

物理・工学統計

[タンクモデル]

「菅原のタンクモデル」の名で世界的に知られる河川流量の予測手法が、1950年代に、菅原正巳らの研究により開発された (Japanese J. of Geophysics, 1961)。そのモデルの多様さとモデリング手法の柔軟さにより、河川流量に限らず地球的現象に見られる多くの入出力現象の予測モデルとしても用いられるようになった。後年、これは現代的時系列解析手法の中に取り込まれ、非線形力学系モデルの開発などに貢献している。

[粒子充填に関する統計的研究]

樋口伊佐夫は、理論的考察に加えて実験的検証を行うという実証性を重視する立場をとり、ランダム充填の問題に対する先駆的な貢献をした。従来、ランダム充填問題は粉体工学で中心的に扱われてきた実用的研究課題であったが、これを統計学の立場から真正面に取り組む研究が本研究所で始まったのが1960年頃であって、統計学の分野では先駆的な位置にある。とくに、計算機による実験的検証の重要性に早くから着目し、現在、統計学の分野でも頻繁に使われるようになったシミュレーション技法の開発に力が注がれた。

[無線通信工学]

無線工学における統計的推定の研究においては、日本電信電話公社(当時)との共同研究として、降雨による電波減衰量の推定という、当時、同公社で重要とされていた準ミリ波帯での研究課題の解決に多大な貢献をした。電波通信が中心であった1960年頃、空気中での電波の減衰、とくに降雨による減衰の統計的見積りが電波伝播の重要な課題であった。降雨状況の空間的・時間的変動に関して理論と計算機シミュレーションを駆使した研究によって新しい知見が数多く得られた。

[計算機シミュレーションに基づく統計的指標構成]

例えば火災伝播の研究や地震発生機構の統計モデルに基づく研究などがなされてきた。これらは、物理学における浸透モデルの手法を用いた研究で、現在注目されているフラクタル現象の解明にも通じる手法を駆使したものである。

[相互作用の推定]

上述の物理統計のいずれの研究課題も、対象要素間の相互位置の独

立性を仮定できないという共通の特質を備えていた。一般的にこれらと類似の構造を持つ現象、すなわち非独立な現象の統計的解析に有力な手段を与える問題であったといえる。これらの基礎の上に極めて自然に起こった研究に相互作用推定の問題がある。1980年頃から始められた相互作用推定の尤度法の開発は、これらの基礎の上に得られた成果である。

[地震統計と 点過程モデル]

1977年、点過程の世界的権威 D. Vere-Jones 教授の来所を機に地震発生に関する統計解析の研究が始まった。点過程の条件付強度関数をモデル化するという、新しく自然な方針に基づいて、最尤法の実用化、Thinning によるシミュレーション法、統計的漸近理論などの研究が1980年前後に世界に先駆けて行われた。その後、数々の新しい点過程モデルが地震統計の諸問題と関連して提案された。とくに ETAS モデルは地震活動の特徴を同定するのに有用であった。さらに、全体の活動を通して推定されたモデルに対してデータの性質が一部で変化したか否かが鋭く検出できる、点過程の「残差」解析も重要な貢献である。これらは地震の前兆現象の一つである静穏現象の統計的研究に有用な手法を提供した。これらの点過程モデルと統計的方法の計算プログラムは、国際地震学地球内部物理学会の Software Library のシリーズに収められた。

この他、地球科学の諸問題と関連してベイズモデルの実用化が進み、たとえば地球内部のトモグラフィー、不規則地点における観測データに対する空間および時空間モデルなどが展開され、その推定結果は画像として可視化され、より深い解析が可能となった。

[地球物理学・ 天文学]

情報量規準 A B I C の導入によって大規模モデルの扱いが可能になったことから、1980年代に入った時点で地球物理学や天文学の分野の研究者との交流が盛んになった。緯度観測所（現国立天文台地球回転研究系）では、それ以前から時系列のスペクトル推定に自己回帰モデルを利用していたが、ベイズモデルの利用による地球潮汐データ解析の共同研究は、潮汐解析プログラム B A Y T A P - G として実を結んだ。これが端緒となった地球物理関係の研究は、通産省地質調査所や、東京大学地球物理学教室などの共同研究として、ますますその範囲を広げつつある。

やはり1980年頃に始まった東京天文台（現国立天文台）野辺山宇宙電波観測所との共同研究のテーマになった電波干渉計データに基づく画像形成の問題は、ベイズモデルのあてはめによる情報抽出の手法をさらに拡張する研究を促すきっかけとなった。現在は電波天文学ばかりでなく、ハワイに建設が始まった「すばる望遠鏡」の建設グループとの接触が始まり、光学望遠鏡のデータの処理の研究が発展しつつある。

生物・医学統計

本研究所における生物統計に関わる研究の歴史を、「統計数理研究所彙報」(1954年－1984年)にあらわれた成果を中心にたどってみると次のようなものがある。

[エコロジー]

1954年の彙報第1巻には、「森林調査における統計数理的問題」(松下嘉米男, 林知己夫, 石田正次, 藤本熙, 赤池弘次, 宇沢弘文, 植松俊夫)と題した論文がある。その頃の林学統計に関連した研究としては,他に「林学における統計数理的省察…苗畝に対する農業用ビニールによる温床処理試験に就いて」(藤本, 1954)や「測定誤差の統計的取扱ひ…森林調査におけるトラバース測量の誤差の問題」(植松, 1954)などがある。その後,この分野では,石田による「森林調査におけるビッテルリッヒ法と統計数理」(石田, 1966),「森林の保全と自然環境の変化に関する統計的研究…天然林の成長モデルとそのコンピュータシミュレーション」(1974)のような研究が行われた。

[動く調査対象集団 に対する標本調査]

本研究所の生物統計の歴史の中で特筆すべきものとして,1960年代から始まり,80年代まで続いた「動く調査対象集団に対する標本調査について」と題した一連の論文がある。これは,林・石田を中心として所内外の多数の研究者が参加した共同研究であり,野兎をはじめとした野生動物の個体数調査法の確立を目指したものであった。大規模かつ長期的な野外調査の実践を通じて,実際の役に立つ統計的方法の開発を行った研究の典型である。さらに,青山博次郎らを中心として所外の鳥類学者と共同研究「野鳥総数推定のための統計数理的方法」(1972, 1975)がある。このような野外調査を通じた生物統計の研究の伝統は,「ウミネコの生態調査」(1981),「カモメ類の巣配置パターンのモデル化」(1981)に受け継がれている。

[DNAの解析]

DNA配列データから,統計モデルを用いて生物の系統進化を推定する研究「ミトコンドリアDNAの分子時計…人類の起原と進化」(1984)など生物統計学に関わるさまざまな研究が行われるようになってきた。

[医学・疫学統計] 1950年から1960年代には、「症状による病名の予測」(崎野滋樹・荻野悟郎, 1954), 「減衰振動する伝染病の伝播模型」(崎野, 1958), 「エビデミック・モデルの歴史的発展」(同, 1961-1967), 「Mutationの確率モデル」(同, 1968, 1970) や「人類における遺伝形質の不規則性についての解釈」(橋爪浅治, 1960) など, 流行病学, 医学, 遺伝学の研究が行われた。

1964年には国立予防衛生研究所との共同研究「細胞集団の変動の統計的解析法」(高橋宏一), 日本医科大学の共同研究者の「パターンの認識について…臨床心電図の自動的解読」(二宮理憲)がある。また1967年には, 林知己夫らによる「測定値誤差・測定値変動と相関分析…医学におけるデータ処理の一特性」がある。

その他「毒性データの解析」, 「検診データの解析」もあり, 近年には「生活習慣の調査法」, 「ガン臨床試験のデザインと解析」などの研究がある。最近では, 疫学や医学診断, 医用工学の分野で共同研究が進行している。

[統計モデルの研究]

生物学・医学における統計モデルの研究としては, 「生存競争のモデルとシミュレーション」(1975), 「心臓調律の統計モデル」(1977)がある。また, 医学診断への応用として, 「不整脈の計量診断…RP間隔の統計的解析」(1978)がある。その他, 薬の安全性などに関する一連の研究「SCPの安全性に関する統計学的考察」(1974), 「安全基準としてのしきい値とホッケー・スティック回帰法」(1978), 「用量・反応モデルの下での安全係数の性質」(1980), 「発癌性を評価するモデルと適用例」(1981)が挙げられる。また, 1980年代にはこのほかにも, 「圃場試験における地力の推定」(1982)のような農学的な研究や, 「確率的死亡モデルとその応用」(1983)のような医学的研究, 「なわばりのパターンを測る」(1983)などの研究が行われた。また, 最近では「リスク評価の信頼性の解析」の研究がある。