

# ソフトなシステムに対する カルマン・フィルターの適用

松崎 功保

## 1. 社会システムにおける予測にカルマン・フィルターは必要か

### a. 社会システムにおける予測とカルマン・フィルター

社会システムのビヘイビアの複雑性についてはいまさら論ずるまでもないところである。その予測の問題の時空間的な広がりには技術的な系におけるよりはるかに広大である(図1)。そしてそこにおける主要な考え方も目的によってまちまちである(表1)。

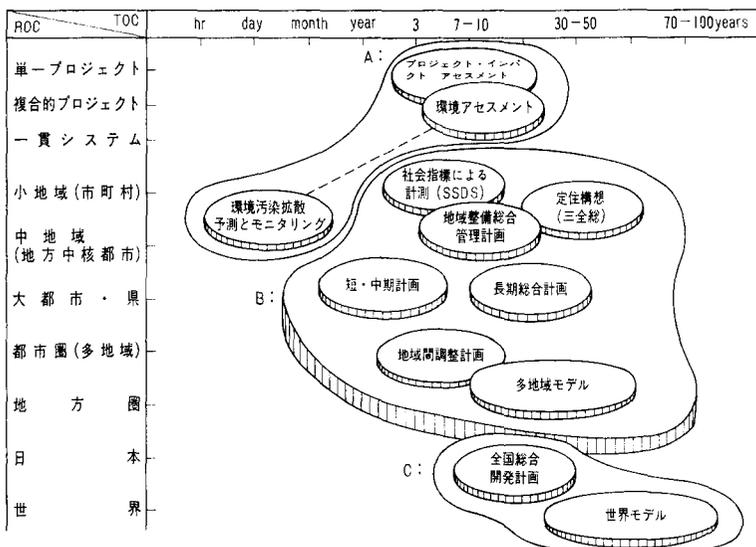
このような考察からしても、社会システムのようなソフトなシステムにおいては、カルマン・フィルターのような洗練された手法がはたして適用可能かどうかという根本的な疑問にまず答えてゆかねばなるまい。結論を先に述べればつぎのようになる。

「カルマン・フィルターのダイナミック・システムの状態変数の推定——内挿・予測——の方法はきわめてアドバンストな概念に支えられている。観測のメカニズムを予測にくり入れ得る点もすぐれている。社会システムの予測においては十分すぎるほどの概念体系を形成している。」

しかし、社会システムの構造の同定、データの利用可能性がボトルネックになって十分にその能力が発揮しにくいことも事実である。そして、複雑なシステムの構造同定を行なうために現在利用可能な方法を補完的に用いてゆかざるを得ない。

### b. システム分析に有効な主要概念

ソフトなシステムのアナリシスとインテグレーションを実施するときには、アプローチのしかたがエンジニアリング・シ



ROC: REGION OF COMMITMENT.  
TOC: TIME OF COMMITMENT.

図1 社会システムにおける予測の期間と地域的広がり

表1 社会システムにおける予測の例と方法論——構造の記述と状態の計測

	主要目的	解決すべき問題	方法論上の主要概念	構造の記述と状態の計測	特徴
環境汚染拡散予測とモニタリング	環境への影響の短期的予測と制御	環境アセスメントなどの上位計画との整合性	汚染拡散シミュレーションとモニタリング・システム、実データによるモデルの検証	物理・化学モデル、ブラック・ボックス・モデル、監視網の整備	地域計画全体のなかでの位置づけを要す
プロジェクト・インパクト・アセスメント	地域への経済効果、財政効果の予測		地域効果の総合的評価		
環境アセスメント	環境への影響の事前評価		環境影響の総合的評価、計画熟度に対応した情報の提供		人の心理的な面の取りあつかいが不可避となる、住民参加
地域整備総合管理計画	長期的目標を実現する計画づくり	複合的プロジェクトに関する大量情報の処理	対話的システム	地域モデル群の操作	地域データ・ベースの整備が前提条件となる
長期総合計画	超長期の展望をもった10年先の目標の設定	長期的ヴィジョンに関する合意形成	時空間的トレード・オフによる合意形成	ダイナミック・モデルによる	住民参加の計画策定 amenity, quality of life などの重要性を増す
地域間調整計画	より高い目標の実現を長期・広域的観点からめざす	地域間コンフリクトの調整	調整のための情報の交換、広義のゲーミング		データの利用可能性はかならずしも保障されず、今後のデータ整備計画をデザインする必要がある

テムとはだいたい趣きを異にするということはだれしも認めるところである。とくにフィロソフィーの重要性はいまさら説くまでもないところであるが、最終フェイズでの最大の難関“インプリメンテーション”の困難性と重要性についてはいくらか強調してもしすぎることはないであろう。

方法論の主要概念は適用分野によって異なる(表1)。

### カルマン・フィルターの主要概念

新しい方法論のもつ有効性のひとつはその方法論上の概念の新しさであることがしばしばある。カルマン・フィルターのすぐれているところは表2に示すとおりである。これでわかるように、予測のための機能的-方法論的概念はきわめてすぐれているのであるが、適用される側の社会システムのほうでそれだけの適用体制が十分に整っていないのが実情である。

## 2. ソフトなシステムへの適用において有効か

### a. システムの構造同定の重要性

システム開発の目的が構造同定の方針を左右することがしばしば実際の場面では発生する。計画

策定者の恣意的なものというよりはむしろ計画あるいはそのための論理を関連諸部門にコミュニケーションする際に重要なのはむしろ目的でありフィロソフィーであるからといったほうが適切である。構造同定に際して行なわれるコミュニケーション

表2 カルマン・フィルターの機能的特徴

——社会システム分析に有効な概念的的方法論

	カルマン・フィルター	他の予測手法
システムのダイナミックな性質を利用しているか	状態方程式を予測の機構に織り込んでいる	ブラック・ボックス的なアプローチが多く、データ相互間の関係に依存している
新たに得られた観測情報を有効に生かしているか	逐次的に予測値を更新することができる	新たなデータのもつ重みがかもともと古いデータのそれと同じ場合が多い
コンピュータの利用の容易さ、有効性はあるか	コンピュータをリアル・タイムで使うことに意義がある	一括して処理するバッチ計算方式に適する
社会システムのもつ特性を方法論上考慮しているか	システム構造が同定されていることを前提としている	主として、データ相互間の関係において考慮し構造的な把握はしない
データの観測機構を考慮しているか	計測メカニズムの性質を予測に反映している	データを生成し、伝達するプロセスにとくに考慮は払っていない



c. コンピュータによるシステム化とインプリメンテーションのための総合化

“不確定との戦い”が社会システムのようなきわめてソフトなシステム・モデルの開発の実態である。この終わりのなき戦いに対処するにはすぐれたフィロソフィーと科学的な手段そして人間の適切なる判断が不可欠である。幸いにしていくつかの経験をベースにしてシステム・モデルのノウハウが蓄積されつつある。その際コンピュータ・システムはインテグレイティブなアプローチを支える道具としてすぐれたものである。

カルマン・フィルターであつかうモデルとデータ

モデルは本質的に連立常微分方程式系であり、離散的な表現では差分方程式系となる。データは観測値についての時系列データである。ただし、地域モデルの例におけるように大規模なダイナミック・システムにおいては状態方程式の数が多くなり、システム方程式の係数が膨大となる(表3)。

状態遷移と状態の観測(計測)

社会システムを理解し、それにはたつきかけるときにカルマン・フィルターの主要概念のなかで有効なものは状態遷移の考え方である。状態変数によって多次的に社会・経済現象をとらえると同時にそれらの間の相互関係をダイナミックに記述できるからである。

補完的方法論の援用

たとえばシステム構造の同定のためにグラフ・マトリクス分析の方法(DEMATEL, ISMなど)\*を用いることがしばしばある。また現代制御論におけるアナロジーを適用すれば、政策生成をコントロール手段の生成とおきかえてカルマン・フィルターの外周を概念武装することも可能である(図3)。

インプリメンテーション

この辺でカルマン・フィルターのインプリメンテーションの姿を描き出すのも無駄ではないだろう。トータル・システムの構成モジュールたる部品のいくつかはすでに完成しているし中心的なシステムのダイナミックな方程式は多大の努力の結果ノウハウが蓄積しつつある。さらに重要なことはその周辺技術の開発にはめざましいものがあり方法論も整備されつつあってあとは総合的なインプリメンテーションを待つのみである(図3)。

3. ケーススタディ

インテグレイティブなインプリメンテーションのコンセプトにもとづいて実際に開発されたモデルによってそれぞれのモジュールの実例を見てみよう。もとより社会・経済システムにおいてオンライン・コンピューターションによるリアルタイム・システムはまだ稼動していないのでその部分システムを紹介する。

a. コンピュータ・グラフィックスの利用

物理化学的なダイナミクスが支配している系

\* DEMATEL : DEcision MAKing Trial and Evaluation Laboratory, ISM : Interpretive Structural Modeling

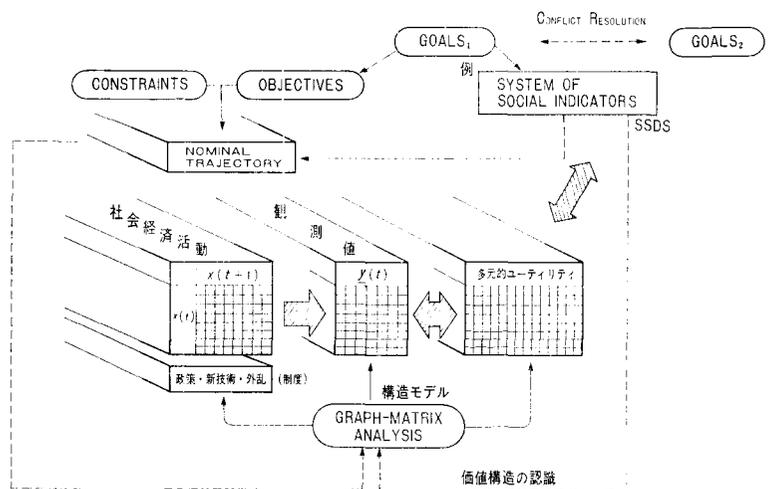


図3 社会・経済システムの予測におけるカルマン・フィルターとその周辺  
——インテグレーションのためのシナリオ

に比較して人の価値観・判断などの介入の度合いの多いのがこの分野の最大の特徴である。たとえば、社会生活意識に関しては国連統計局の推すSSDS(System of Social Demographic Statistics)などの考え方やOECD流の考え方が今後重大な関心をひくであろう。また、ビヘイビアル・サイエンスの教えるところの地域社会のなかでの個人々の行動様式にも注意せねばならない。このような例をあげるまでもなく、コンピュータ・システムとの対話はより重要性を増してくる。

カルマン・フィルタの場合にはシステム方程式のパラメータの同定に際して感度解析をくり返しながら決定してゆかざるを得ない点を考えると、とくにグラフィック・ディスプレイなどにより構造式を求める対話的な方法が推奨される。

また予測結果についても最適ゲインの決定に際しても有効である。観測ノイズの共分散行列に不確実性がある場合などシミュレーションによって初期推定値からの真の値への収束性を確かめながら最適に近い値を選定できる(写真1, 写真2)。

#### b. 大気汚染の予測

グラフィック・ディスプレイを用いた例として光化学スモッグの予測の例を取り上げてみよう。ロスアンゼルス形の光化学スモッグの予測に適用したものでフィルタへの入力観測ノイズを含んだ測定値である。フィルタのシステム方程式は24時間の時間帯を考えてつぎのような仮定のもとでつくられている。すなわち“数時間程度の間の濃度の時間変化率は一定である”ということである。システム方程式のパラメータに観測ノイズのレベルにかかわる情報が組み込めるようになっていて、ノイズが少ない信頼できるデータにはより大きな重みを与え、ノイズの多い信頼できないデータについては重みを少なくして最適な予測値が得られるようになっている。

ライト・ペンを用いてグラフィック・ディスプレイ上に表現されたパターンを見ながら対話的にフィルタの構造決定が可能である(写真3)。



写真1 対話的グラフィック・ディスプレイ・システム——IBM 2250

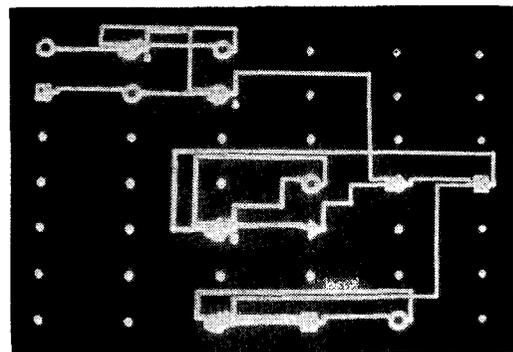


写真2 画面上でのカルマン・フィルタの構成

#### c. 大規模なダイナミック・システム・モデルの開発例——宮城県長期総合的予測

「新しい時代にふさわしい均衡ある地域社会の将来像を展望するための手法としては、地域社会をいままでのように単に経済システムとして把握するだけでは十分とはいえ、従来の経済分析の枠組を越えて、自然環境、資源問題をも含め個々の事象が相互に密接に関連し、からみあっているトータルな社会システムとして把握し、同時に社会経済の構造的変化も考慮に入れながら超長期的視点に立って分析し予測できる手法の確立が必要となっている」<sup>3)</sup>。

ダイナミックなシステム・モデルはカルマン・フィルタなどの適用の前提条件のひとつであり各方面から開発が要望されているものである。

地方自治体においては上述のような状況を反映して兵庫県、大阪府、滋賀県、宮城県その他でも

