

非定常な性質をもつ交通輸送需要のための時系列予測システムと非定常確率過程型AROPモデルの開発

堤 昌文*・櫻木 武**

交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系は、定常確率過程の性質を示すものばかりでなく、非定常確率過程の性質をもつものも少なくない。そこで、本研究は、広範に使用されているARIMAモデルの問題点を踏まえて合理的、効率的に予測するために、定常、非定常確率過程領域の両方を含めた全体の予測システムを構築すると共にその中で非定常確率過程型の予測モデルとしてAROPモデルを提案する。また、事例研究をとおして提案モデルの有効性と適用性を考察した。

Keywords : AROP model of nonstationary-type process, prediction system, precision of prediction

1. まえがき

前報^{1),2)}に示すように、交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系の多くは定常確率過程である。しかし、交通輸送の種別によっては非定常確率過程を示すものがあり、その予測に定常過程理論モデルを適用することは、当然ながら理論構造の誤りに起因する誤差が発生する³⁾。したがって、精度ある予測のためには、新めて非定常過程理論モデルの構築が必要である。

従来から非定常過程の予測モデルとして、BoxとJenkinsによる自己回帰・積分・移動平均(ARIMA)モデル^{4)~6)}があり使用されている^{7),8)}。このモデルは、非定常性がlevelとslopeの変化で示され、したがって、元のゆらぎ状態の系の平均値が一定でないことと勾配を除けば定常的な性質は一致していると考えるものである。すなわち、元のゆらぎ状態の系の階差をとることにより、その系列が定常過程に従うとみて、これに自己回帰・移動平均(ARIMA)モデルを適用する方法である。

ARIMAモデルは、逐次階差を求め、それぞれの自己相関係数が急な勾配で減衰する点の判断から階差の数を決めるが、どの程度の減衰でよしとするか、同様の形態の場合どちらかに決定すべきかなど一意的に決まらない問題が内在しており^{4),9)}、また、このような曖昧な判断が予測精度に影響する点で問題がある。加えて、ARモデルにするか、MAモデルあるいはARMAなどのモデル選択問題、自己相関係数のコレログラムや偏自己相関係数の図から決められる次数決定問題、これにAIC基準を適用した場合に低次に偏る問題、季節変動を考慮する場合はデータ数が極端に減少すること、階差をとることによりもとのゆらぎ状態の系の基本的な周期

性が損なわれること、傾向変動への配慮不足、各モデルの結合であり、さらに季節変動を考慮した場合も含めモデル構築上の複雑さなどの難点が多く存在する^{4),5),7),9)~11)}。

そこで、ARIMAモデルを基本としながらも、均質な階差部分に非定常演算子を導入したARUMAモデル¹²⁾、モデルの要素の各々に関数を用意するEFFモデル¹³⁾、毎季をAggregateして次数を減じようとする試み¹⁴⁾、季節変動に応じてARIMAモデルを作成する工夫¹⁵⁾、非定常過程を乗数的定常過程として処理する方法¹⁶⁾などの提案があるが、これらは上述の複雑さを回避できたとはいはず、また、長期間のデータ蓄積が必要となる難点がある。

以上の観点から、本研究は、著者らの前報^{1),2)}を拡張応用して、与えられた交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系を合理的、効率的に予測するためのシステムを構築する。同時にBoxとJenkinsの言うlevelの変化、slopeの変化に対応する部分をゆらぎ状態の系の基準状態、つまり、平均値関数で考慮し、このことによって元のゆらぎ状態の系の基本的な周期性を損なわず、しかも、前報¹⁾で示したゆらぎの概念により基準状態とゆらぎという簡潔な2成分構造の非定常過程型AROPモデルを提案するものである。

なお、本モデルは、例えば年度における各月あるいは週における各日の交通施設の維持管理や要員計画で必要なように、データのup-to-dateなしに数点から10点数まで予測するのに十分使用できることを意図している。

2. 予測システムと非定常過程型AROPモデル

前述のようにARIMAモデルに関する一連のモデルはその適用に当たり必ずしも一意的でシステムテックでない。これは、モデル適用上の判断がコレログラムおよび偏自己相関係数図にもとづくことと、それらの形状が

* 正会員 西日本工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒800-03 福岡県京都郡苅田町新津1633)

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木工学科

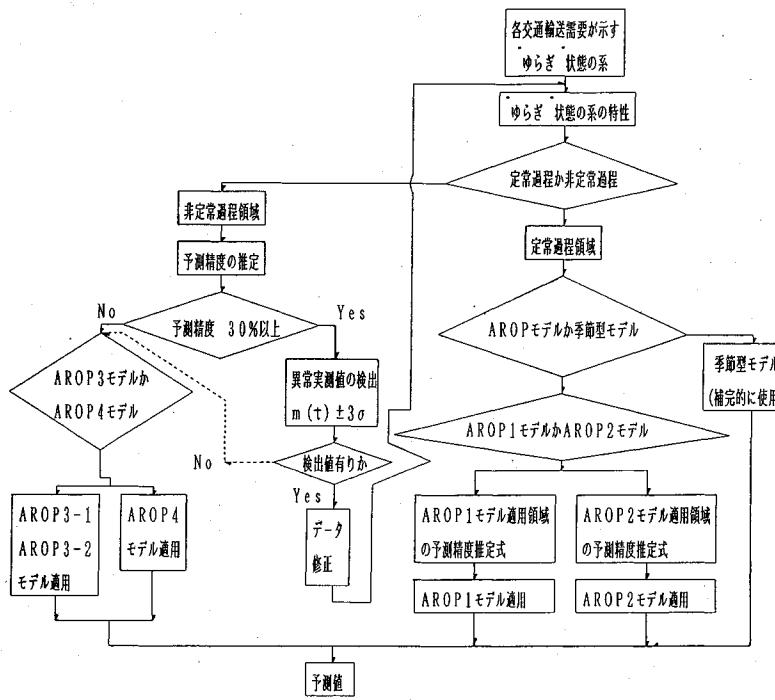


図-1 予測の全体システムのフロー

漸減的であることに起因している。そこで、本研究では、交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系に対し、定常過程と非定常過程を含めたモデル構築の体系化および適用範囲と予測精度の推測を導入しシステム化するものである。すなわち、まず、定常過程と非定常過程を分離し、それぞれ予測モデルの選定のための判別関数、予測精度の推定式および予測モデルといったサブシステムを構築する。加えて、非定常過程領域では、予測精度が大きいと推測されるゆらぎ状態の系について、乱れの原因と考えられる値の影響を除去するために、異常値検出機能を備えるものである。さらに、本システムにおける予測モデルは、ゆらぎの誘因となる未知、不可知な要因および季節的な動向を示すものに対して不確定性を積極的に利用する立場で、従来のように変動の要素に分離せずに、ゆらぎの概念により一体の確率現象とみなして、モデルにおいて同等の記述として簡単化を図り、適用の汎用性を有するように構築するものである。

(1) 予測システム

与件された交通輸送需要をゆらぎ状態の系の特性から捉え、定常過程および非定常過程を含め、その予測システムを提案すれば図-1のとおりである。確率過程型の予測モデルの構築では、確率的性質が定常過程か非定常過程かの判断が必要となり、この判断は前報¹⁾に示したゆらぎ状態の系の特性による判別関数を使用する。

理論上の分類^{5), 8)}は、一般化自己回帰演算子による複

素方程式 $\Psi(B)=0$ の根を用い、①すべて単位円の外側にある場合が線形定常過程で、②幾つかの根は1で他は単位円の外側にある場合が線形非定常過程、③すべての根が単位円の内側にある場合が非定常過程である。これらのうち、本研究の対象は①、②で、非定常過程とするのは線形非定常過程のことである。しかし、本理論の適用にあたっては自己回帰係数が既知でなければならないが、これはモデル構築後に判明する。そこで、本研究では、実用的観点から、ゆらぎ状態の系の特性に着目した判別関数 F_b (H_z, G_i, A_u, H_o, V_a) を用いるもので、理論との比較検討により、当該母集団について、その妥当性を確認し^{1), 2)}、モデル作成に先立つ判断とするものである。なお、判別関数に使用した説明変量は、前報^{1), 2)}のとおりであるが、 H_z は系の分布を求めた場合の歪度を、 G_i は系のゆらぎの大きさを表す平均変動率、 A_u は自己相関係数で周期性を示す。また、 H_o と V_a は水平の連、上下の連の数である。

この判別関数 F_b の5変量に関し、交通輸送需要の153例（航空運輸関連、海運運輸関連、カーフェリー航送および陸上運輸関連）による結果をレーダーチャートで示せば図-2のとおりである。明らかに、定常過程と非定常過程とで相違があり、特に、歪度と平均変動率の差異が大きい。

判別関数から定常過程領域の場合は前報¹⁾のとおりであるが、非定常過程領域に判断される場合は新ためて工

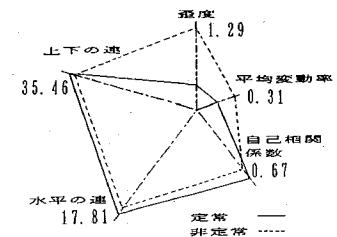


図-2 定常確率過程と非定常確率過程 (“ゆらぎ” 状態の系の特性：5 指標 153 例：判別関数）

夫が必要である。すなわち、非定常過程領域に含まれる76例のゆらぎ状態の系の同定と予測結果から、①同定期間の系の特性は定常に近いが予測期間で需要パターンが大幅に変化し、これがより進行し乱れの中の乱れ状態を呈して精度低下をまねく、②同定および予測期間とも強い非定常過程で精度的に劣る、③同定および予測期間ともランダムに異常値が発生し、同定および予測とともに追従しきれない、④局所的に異常値が発生し、他の部分と変動パターンが大きく異なることにより精度が低下するなどの4パターンに類型化できる。したがって、このことを念頭においてサブシステムを構築し、その組み合わせで全体システムとする内容である。

予測モデルを用いる前に、予測精度の予見が必要である。そこで、予測精度（平均相対誤差）の推定式 P_{ne} を76例の適用結果にもとづいて、ゆらぎ状態の系の特性を説明変数に重回帰分析すれば、以下のように得られる。

$$\begin{aligned} P_{ne} = & 51.176 H_c + 0.849 T_o - 13.847 F_1 \\ & + 0.527 A_n + 2.694 I_d - 0.457 \dots \dots \dots \quad (1) \\ & \text{(重相関係数 } 0.738) \end{aligned}$$

ここに、 H_c ：変動係数、 T_o ：尖度、 F_1 ：ゆらぎ度、 A_n ：ラグ数、 I_d ：同定精度。

P_{ne} で推定された予測精度が 30% 以下であるゆらぎ状態の系に対しては、予測モデルとして選定された非定常過程型の AROP モデルが適用される。

予測モデルは前報¹⁾の AROP1 を改良して非定常過程型モデルを作成し、これを AROP3-1, AROP3-2 とするが（後述（2））、両者の精度の差はさほどないから¹⁷⁾、合わせて AROP3 とし、これと AROP2 を改良した非定常過程型の AROP4 とにモデル選定に関する判別関数を導入する。なお、両モデルの相違は、ゆらぎ状態の系の基準状態の変化が小さい場合が AROP3、大きい場合が AROP4 である。両モデルに関する判別関数 A_{nb} は、予測精度の優劣を外的基準に、ゆらぎ状態の系の特性を説明変数として、76例の適用結果から次のように得られる。

$$A_{nb} = -29.321 H_c + 2.124 F_1 + 21.697 G_i + 1.132 \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 G_i ：平均変動率。

正側に AROP3、負側に AROP4 となり、群別重心 0.356, -0.207, 的中率 50%（低い値であるが、動特性が大きい場合が AROP3 であるので決定し易い）、75% である。両モデルのゆらぎ状態の系の特性は、ラグ数で AROP3 の 5.77, AROP4 の 6.64、水平の連で 16.31, 17.07、レンジで 4.84, 4.89 であり、いずれも AROP4 のほうが大きい。このことから乱れは、AROP3 の領域のほうが大きいといえる。

予測精度が悪い 30% 以上の系に対しては、その中で

際立って特異な値を示す異常値が、前述の③、④のパターンのように予測モデルの構築に悪影響をおよぼすことを避けるため、これを取り除くサブシステムを導入している。この場合、異常値の判断を様々試みたが、結果的には品質管理で用いられてる 3σ 法の採用が望ましく、これから元のゆらぎ状態の系の特性にもとづいた範囲基準を設定し、これとともに、異常値と判断された値はニュートンの一次補間法で補間するものである。

(2) 非定常過程型 AROP モデル

非定常過程の従来モデルの考え方とは、均質な非定常過程として ARIMA モデルを適用する方法であった。これに対し本研究は、定常過程型 AROP モデルを繰り返し適用し定常過程に近似させる方法を提案する。

前報¹⁾に示すように、定常過程型 AROP モデルとしては、level と slope の両者に対応するために、ゆらぎ状態の系の基準状態の変化が大きくなき場合に AROP1 モデル（平均値関数の次数を低次に抑え、ゆらぎ部分を記述する確率過程の自己回帰モデルを平均値関数と独立なアルゴリズムとする）を考え、変化が大きい場合に AROP2 モデル（平均値関数の次数を高次まで拡張し、ゆらぎを記述する確率過程の自己回帰モデルのアルゴリズムを平均値関数と同時に運動させる）を構築した。

AROP1 を拡張した非定常過程型を AROP3-1, AROP3-2 とし、式（3）、（4）のように表現する。また、AROP2 の非定常過程への拡張を AROP4 とし式（5）に示す。

$$\begin{aligned} X_{t+h} = & \sum_{j=0}^m a_j P_{j,t+h} + \sum_{i=1}^k \phi_i \tilde{x}_{t+h-i} + \dots \\ & + \sum_{l=1}^k \tilde{\phi}_l \tilde{x}_{t+h-l} + \dots + \tilde{\xi}_{t+h} \dots \dots \dots \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{t+h} = & \sum_{j=0}^{m'} a'_j P'_{j,t+h} + \sum_{i=1}^{k'} \phi'_i \tilde{x}'_{t+h-i} + \dots \\ & + \sum_{j=0}^{m''} \tilde{a}'_j \tilde{P}'_{j,t+h} + \sum_{l=1}^{k'} \tilde{\phi}'_l \tilde{x}'_{t+h-l} + \dots + \tilde{\xi}'_{t+h} \dots \dots \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{t+h} = & \sum_{j=0}^{m'''} a''_j P''_{j,t+h} + \sum_{i=1}^{k''} \phi''_i \tilde{x}''_{t+h-i} + \dots \\ & + \sum_{l=1}^{k'''} \tilde{\phi}'''_l \tilde{x}'''_{t+h-l} + \dots + \tilde{\xi}'''_{t+h} \dots \dots \dots \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 a_j , a'_j : 直交多項式の未知パラメータ、 P_j , P'_j : 元のゆらぎ状態の系の J 次直交関数、 ϕ_i , ϕ'_i : 元のゆらぎ状態の系の自己回帰係数、 \tilde{a}'_j : 繰り返し部分の直交多項式の未知パラメータ、 \tilde{P}'_j : 繰り返し部分の J 次直交関数、 $\tilde{\phi}'_l$, $\tilde{\phi}'''_l$: 繰り返し部分の自己回帰係数、 \tilde{x}_{t+h-i} , \tilde{x}''_{t+h-i} : 元のゆらぎ状態の系の残差、 \tilde{x}'''_{t+h-i} : 繰り返し部分の残差、 $\tilde{\xi}_{t+h}$: 繰り返し部分のホワイトノイズ。

AROP3-1 モデルは、ゆらぎ状態の系の基準状態の変化を第一項の平均値関数である直交多項式で記述し、ゆらぎを第二項の自己回帰モデルで表現するものである。

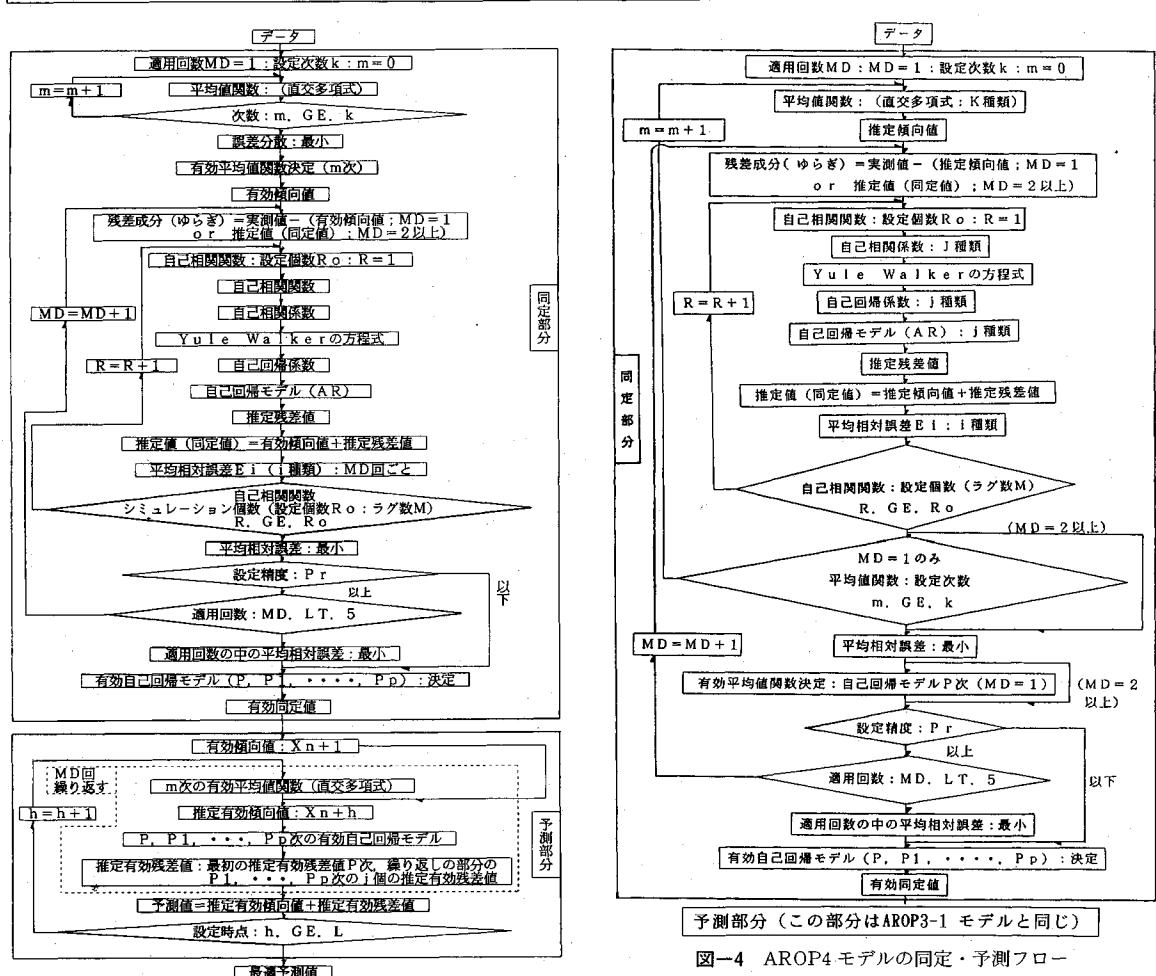


図-3 AROP3-1 モデルの同定・予測フロー

そして、第三項以降は、第一項と第二項の定常過程型 AROP モデルを実行し最初の推定値を得て、実測値との乖離に相当する残差に対し AR モデルを繰り返し実行するもので、このことにより定常過程への近似が図れるものと考えている。平均値関数の次数は、実測値との誤差分散の最小化で評価し有効平均値関数を先決し、つづいて、最初の残差部分に自己回帰モデルを適用する。その結果と有効平均値関数の値とで推定値を求め、時点 t にそって同定期間 n まで進み同定精度（平均相対誤差）を算出し、その精度が設定精度（5%）を満足できなければ演算を繰り返し、満足できればこの推定値を同定の確定値とする。

満足できない場合の繰り返し残差部分は、推定値と実測値との乖離に対し自己回帰モデルのみを実行し、上述と同様に同定期間 n まで進む。その上で元のゆらぎ状態の系での推定値とこの繰り返し残差部分での推定値とから新たに同定値を求め、同定精度を算出して判断し、満足できない場合は、再び繰り返す。満足いく場合は最

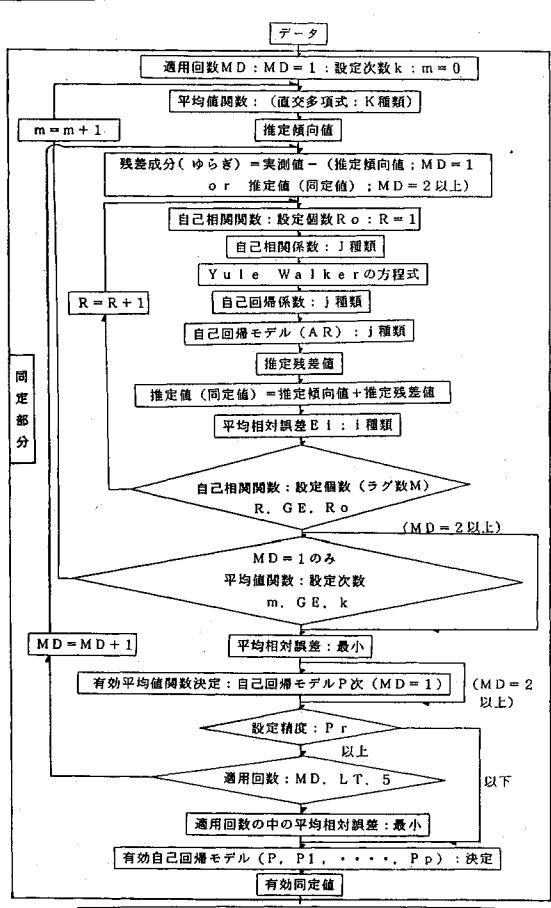


図-4 AROP4 モデルの同定・予測フロー

終的な同定値と同定精度が確定する。繰り返し回数は、ARIMA モデルのように均質な非定常過程になるまで階差をとるのでなく、精度の観点からテスト的にすべての事例で 5 回以上増加して行っても精度の向上は期待できなかった結果と実用性を考慮して最大 5 回とし、その範囲はモデル内で自動的に決定される。

予測部分では、決定された MD 回の繰り返し回数で得られた有効平均値関数と有効自己回帰モデルを使用して up-to-date なしに一時点ずつ逐次予測値を求めていく（図-3）。ただし、一時点ずつ予測値を求めるに伴い有効平均値関数の中の直交関数が単位時点 1 で変化する（なお、0 次の場合には影響がない）。

AROP3-2 モデルの第一項と第二項は前者と同じであるが相違点は、式（4）に示すように、第三項以降が最初の推定値との乖離に相当する残りの残差に対して、第一項の平均値関数と第二項の自己回帰モデルをもつ定常過程型の AROP を繰り返し適用することで定常過程への近似を図ることである。本モデルのアルゴリズムは、元のゆらぎ状態の系の有効平均値関数を決定し、これと

最初の残差部分に自己回帰モデルを実行し推定値を求め、時点 t にそって同定期間 n まで進み同定精度を求める。設定した同定精度との判断で満足できれば、この同定値と同定精度が確定値となる。満足できない場合は、繰り返しへ進み、この時の、同定値と実測値との乖離に対し、定常過程型の AROP を繰り返し実行する。予測部分は AROP3-1 モデルと同様である。

AROP4 モデルは、定常過程型の AROP2 モデルを拡張したもので、AROP3 との差異は、式(5)の第一項の平均値関数を高次にしていることと、アルゴリズムであり、また、第三項以降の繰り返し適用の部分におけるタイプとして、当初¹⁸⁾のものを改良し、AROP3-1 の方法で定常過程への近似を図っている(図-4)。アルゴリズム上では、AROP2 をベースとしているため AROP3 シリーズと相違して、元のゆらぎ状態の系に対して平均値関数と最初の残差部分への自己回帰モデルは連動して行い、同定精度最小で平均値関数と自己回帰モデルの次数が同時に決定される。すなわち、平均値関数の設定次数と自己回帰モデルでの設定ラグ数の積の組み合わせ数だけのシミュレーションを行って推定値を求め、同定期間 n まで進んで同定精度を求める。上述と同様に、設定した同定精度との判断から、満足いくものであれば、この推定値が同定値となる。満足できない場合は、繰り返し残差部分へ進み、上述と同様にシミュレーションを実行する。予測部分は、AROP3 と同様である。

ところで、従来型の非定常過程の予測モデルを代表する ARIMA モデルの問題点を前項で指摘したが、要約すれば①構築過程の効率性、構造決定への的確性、②傾向変動への配慮、③季節変動をも含めてのモデルの複雑さ、④季節変動を考慮した場合のデータ数、⑤基本的周期性の変形といった問題がある。

これらのうち①は前項で触れ、それに応じた予測システムを提案した。②は、浜中¹⁰⁾も指摘するように確率過程の性質からくるもので、level や slope にどう耐えるかが課題になる。Mélard⁶⁾は、モデルの要素に乗数的な関数で傾向変動を考慮しているが、対象データのみであるので汎用性に欠ける。これに対して本研究は、予測モデルの構成をゆらぎ状態の系の基準状態の部分とそのまわりで生じる未知、不可知な要因や季節的な動向を示す要因による確率過程としてのゆらぎで成り立っているとする概念である。それゆえ傾向変動についても系の基準状態の部分を平均値関数として直交多項式で記述するものであり、したがって level にも slope にも対応できることとなる。

③は、ARIMA モデル自体が幾つかのモデル要素の結合であることによる。Mélard⁶⁾、McKenzie¹³⁾、Chollette¹⁵⁾などが、それぞれの季節変動に応ずる ARIMA モデルの構築を行っているが、モデルの複雑さは回避できない。

また、Box-Jenkins ら自身も複雑なことを認めており、簡単な差分型を薦めている¹³⁾。他方、本研究は、上述した確率過程としてのゆらぎ部分で、それらの変動も含めて記述するため簡潔なモデルとなっている。

④は、たとえばラグが 12 カ月周期で相関をもつてならば季節変動の要因に由来していると判断し、季節階差 (12) を施した $(1-B^{12})^D$ ($\nabla x_t = x_t - x_{t-1} = (1-B)x_t$ で D 階差) なる項を ARIMA モデルの中に組み込む。この時、12 カ月の周期を時間単位とするため多数のデータ ($t=100$ 以上) が必要になる。これに対し本研究は、ゆらぎを状態の係の基準状態の部分をベースに、確率過程としてのゆらぎを直接求めるもので、季節変動を周期単位にする余分なデータは必要でない(ラグ数の 2 倍程度以上)。

⑤は、均質な非定常過程にするために階差をとることから、元のゆらぎの基本的周期が変形され、季節変動を有する系の周期性が壊され、予測精度に影響をおよぼす。これに対して本研究は、始めに(3)～(5)の第一項、二項を階差ではなく、元のゆらぎ状態の系に適用するために基本的周期は残存されている。次に、AROP モデルを繰り返し適用するのは残差に対してであり、元のゆらぎの基本的周期に影響はない。

3. 提案モデルの適用と限界

使用データは、前報^{1), 2)}の 153 例のうち、非定常過程と判断されるものの 40 例、判別関数による誤判別のもの 10 例と、定常過程型モデルの予測精度が劣るもの 26 例を加え、総計 76 例(表-1)であり、これらを用いて、提案モデルの有効性とその限界を ARIMA モデルとの比較も加味しながら検討するものである。

なお、前報²⁾の分析から、動特性で周期性を保有するゆらぎ状態の系に定常過程が多く含まれるのを受けて、153 例について各交通輸送需要別にゆらぎ状態の系の動特性 5 指標のレーダーチャートを描いてみると(図-5)、実際に非定常過程が多いカーフェリーがその特徴的なパターンを示すことが理解できる。

(1) 同定と予測結果

同定期間は基本的に設定ラグ数の 2 倍以上が必要であり、本研究では約 3 倍程度を目安としている。7 割が 60 時点、他は 48 時点である。また、予測期間は、数点ないし 10 数点の予測を研究目的としているので、ここでは 12 時点を逐次予測するものである。前述したように、AROP3-1 と AROP3-2 モデルは、適用の結果、前者は前報²⁾でのゆらぎ特性が非常に大きなグループに、後者は大きなグループに対して比較的良好。なお、この時、両グループごとの適合上の精度(平均相対誤差)の分布には大きな差がないので¹⁷⁾、以下、AROP3 モデルとして一括し、各性質について説明する。

表-1 使用交通輸送需要データの一覧表（非定常確率過程）

航空運輸関連 (7例)	福岡空港（積荷：kg/月），福岡空港（積卸荷：s44.1～49.12, s45.1～50.12 : kg/月），国際線航空（貨物輸送量：トン/月），国際旅行入国外客数（s52.1～56.12, s52.1～57.12 : 千人/月），国際旅行出国日本人数（千人/月）
海運運輸関連 (10例)	内航貨物船輸送量（千トン/月），内航油送船輸送量（千トン/月），外航輸出輸送量（千トン/月），北九州港（輸入量：トン/月），博多港（輸出量，輸入・輸出・輸移出・入量：トン/月），苅田港（輸入量，輸出量，輸出・輸入量：トン/月）
フェリー (42例)	北九州港旅客（旅客1n=60, 旅客2n=60, 上りn=60, 下りn=60, 上り+下りn=60 : 人/日，旅客1n=60, 旅客2n=60 : 人/7日， 旅客1n=38人/，旅客2n=48 : 人/月） 北九州港乗用車（平均n=48, 平均1n=60, 乗用車1n=26, 乗用車2n=60 : 台/日，乗用車1n=60, 乗用車2n=60 : 台/7日） 北九州港トラック（トラック1n=60 : 台/日，トラック2n=60 : 台/7日，トラック2n=48 : 台/月） 苅田港旅客（上り1n=48, 下り1n=48, 上り+下り2n=48 : 人/日，上りn=60, 下りn=60, 上り+下りn=60 : 人/7日） 苅田港乗用車（上り1n=60, 下り1n=60, 上り+下り1n=60, 上り2n=48, 下り2n=48, 上り+下り2n=48 : 台/日，上りn=60, 下りn=60, 上り+下りn=60 : 台/7日） 苅田港トラック（上り1n=60, 下り1n=60, 上り+下り1n=60, 下り2n=48, 上り+下り2n=48 : 台/日，上りn=60, 下りn=60, 上り+下りn=60 : 台/7日）
陸上運輸関連 (17例)	鉄道：旧国鉄旅客輸送量（s50.1～55.12 : 千人/月），新幹線輸送人員（s52.1～57.12 : 千人/月） 自動車：トラックターミナル取扱量（s52.1～54.12 : トン/月） 道路：海門フェリー，国道九四フェリー，富士宮道路，遠笠山道路，高野山道路，明石フェリー，海門橋，東伊豆道路，東山道路，天草道路，霧島道路，別府道路，大山道路，藏王道路

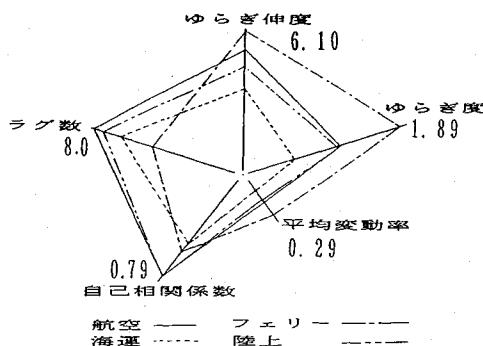


図-5 航空、海運、カーフェリー、陸上関連の各輸送量の“ゆらぎ”状態の系の動特性

AROP3では、平均値関数の直交多項式の次数は1次が75%を占め、繰り返し回数は、5回まで進み最良の精度であった2回目、3回目の選択が62%，設定の精度以下であるため5回まで進まず2回、3回目での直接選択は31%である。ラグ数は、元のゆらぎ状態の系で10次以上が約80%，最後の系でもシミュレーションの結果から約73%が10次以上であるが、自己相関係数はほとんどが0.2以下でホワイトノイズと解釈してよい。

AROP4では、平均値関数の直交多項式の次数は、その特性をいかして2次以上が約70%，繰り返し回数は5回まで進み最良の精度であった2回、3回目の選択が約65%，設定の精度以下であるため5回まで進まない直接選択は約30%である。ラグ数は、元のゆらぎ状態の系で約90%が10次以上、最後の系でもシミュレーションの結果から約70%が10次以上であるが、この場合の自己相関係数も0.2以下でホワイトノイズと解釈できる。

精度は平均相対誤差を使用しており、提案予測システ

表-2 提案予測システムによる同定・予測結果（76例）

推定の種類 精度範囲 (相対誤差)	同定結果		予測結果	
	個数 (百分率)	個数 (百分率)	個数 (百分率)	個数 (百分率)
4.99%以下	16 (21.05)			
5.00~9.99%	29 (38.16)	4 (5.26)		
10.00~14.99%	17 (22.37)	12 (15.79)		
15.00~19.99%	10 (13.16)	16 (21.05)		
20.00~29.99%	2 (2.63)	16 (21.05)		
30.00%以上	2 (2.63)	28 (36.84)		

ムによるAROP3, 4の両モデルの同定と予測結果を表-2に要約する。

同定結果では、精度範囲の最も良好な4.99%以下のものが76例中16例ある。これらは、ほぼ完全に近い形で有効同定値と実測値とのパターンが再現されている。精度範囲の良好な5.00~9.99%に29例あり、最も多く存在する。反対に、劣る精度範囲20.00~29.99%に2例、悪い精度範囲30%以上に2例みられる。

非定常過程領域ということを考慮し、最も良好な4.99%以下から一般的な精度範囲の19.99%までを許容すれば、前に報告¹²⁾した定常過程型AROP1, 2の両モデルの76例中28, 36.8%に比較して、非定常過程型のAROP3, 4の両モデルでは76例中72例と9割が該当し、極めて優れていることがわかる。また、10%未満の評価では、定常過程型AROP1, 2の両モデルは76例中28例、非定常過程型AROP3, 4の両モデルは76例中45例であり、後者の有効性がわかる。

次に予測結果では、精度範囲の良好な5.00~9.99%に76例中4例ある。その例として、北九州港港湾取扱い貨物量（輸入量）が挙げられ、定常過程AROP1の

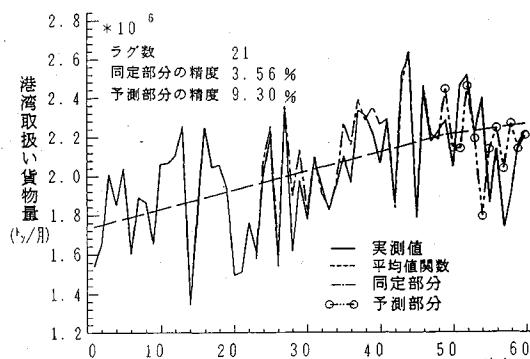


図-6 北九州港輸入量の同定と予測結果(AROP3)

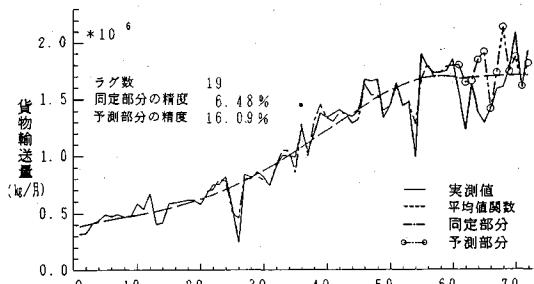


図-7 福岡空港（積荷）の同定と予測結果(AROP4)

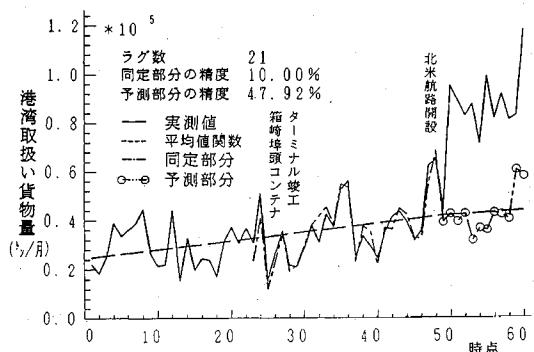


図-8 博多港輸出量の同定と予測結果

予測精度 13.60% が、非定常過程型の AROP3 で 9.30% に向上しており、これを示せば図-6 のとおりである。

精度範囲 10.00~19.99% は 28 例ある。これらの中で、福岡空港（積荷）を例示すれば図-7 のとおりである。定常過程型 AROP2 の予測精度 27.9% が、非定常過程型 AROP4 では 16.1% に向上している。

劣る精度範囲 20.00~29.99% は 16 例、悪い精度範囲 30% 以上に 28 例が存在する。ここで、同定と同様に、一般的な精度範囲 19.99% までを精度的に許容すれば、提案システムによる AROP3, 4 で 76 例中 32 例、42.1% が該当する。この値は定常過程型 AROP1, 2 と同等であるが、その内容に相違がある。すなわち、予測精度 10% 未満は、定常過程型モデルの適用では存在しないが、非

表-3 非定常過程型AROP モデルと ARIMA モデルの精度比較

AROP	ARIMA	同定精度 (%)		予測精度 (%)	
		AROP	ARIMA	AROP	ARIMA
4.93	20.56	9.63	29.04		
8.13	20.42	15.50	21.18		
21.10	86.47	64.38	262.85		
30.99	72.52	130.68	205.92		

定常過程型モデルでは 5.3% 存在し、精度向上を示している。また、精度上効果があるか否かを考えると、定常過程型モデルに比較して 76 例中 27 例が向上し、逆に、劣ったのは僅か 7 例でそのうち判別閾数による誤判別が 3 例であり、これらは同定部分で定常過程を示し、あえて非定常過程型モデルを必要としなかったと判断される。残る 4 例は、同定部分の需要をみると非常に急激な増加、減少が局所的に現れており、しかも、予測部分においてパターンの変化があり、それに追従できなかったと推察される。

予測システムにある異常値検出用サブシステムの効果を、予測精度推定式による推定結果とモデル適用の予測精度との関係から、分散分析により検討したが、有意性は得られなかった。しかし、異常値検出用サブシステムの適用の是非を 30% 閾値（数種類試みたが、その中でも改善効果が認められたケースである。）としても 76 例中 31 例が適用対象となり、うち 6 例が普通の精度範囲の 20% 未満で、また、16 例で改善効果があった。この数字は必ずしも十分ではないが、非定常過程であることを考慮し、改善できるものは改善するという姿勢をとれば、本システムの導入もそれなりに意義がある。

この異常値検出用サブシステムをとおしても、なお、予測精度推定式の値が 30% 以上であれば、これを AROP3, 4 モデル適用上の限界とみなして計算を終了するが、一応、予測モデルは実行させる（図-1 破線部）。なお、こうした例は、博多港港湾取扱い貨物量（輸出量）、北九州港カーフェリー・旅客 2（上り、日単位）、北九州港カーフェリー・旅客 1（下り、日単位）、蔵王道路（月平均日単位）、苅田港カーフェリー・旅客 2（上り+下り、日単位）などである。これらは例えば博多港でみると（図-8）、同定期間と相違して予測期間の昭和 57 年にコンテナ施設 3 万 m² が完成し、北米航路が開設され、港湾取扱い貨物量（輸出量）が前年に比べ約 120% 増加したことが原因している。また、蔵王道路と苅田港カーフェリー・乗用車 2（上り、日単位）では、季節変動が大きい場合および非定常過程の強い現象が予測期間で顕著になり over-fitting になっているといえる。

同定、予測の精度結果と各交通輸送需要との関係をみると、同定では、いずれの輸送需要についても、19.99% の精度範囲に 7 割以上が含まれておらず、差異はない。また、予測で特に精度が悪いケース（30% 以上）は、カ-

フェリー航送で 28 例中 19 例、68% が含まれている。

(2) ARIMA モデルとの比較

提案している非定常過程型 AROP モデルと従来の ARIMA モデルとの精度を比較すれば表-3 のとおりである。表中の上二つは非定常過程領域で比較的精度の良い一般的な精度範囲の 20% 未満、下二つは悪い精度範囲の 30% 以上を示したものから任意に選んだもので、博多港輸出・入量、福岡空港(積荷)、北九州港カーフェリー旅客 1(上り+下り:日別)と旅客 1(下り:日別)である。同定精度で 3.1 倍、予測精度で 2.4 倍の良さを AROP モデルのほうが示している。

4. あとがき

交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系に対し、その非定常過程を包含した全体的な予測システムの構築と非定常過程型の予測モデルを提案したものである。また、その適用をとおして提案システムの有効性と適用限界を考察し、ARIMA モデルと比較した。要約すれば、以下のとおりである。

(1) ゆらぎ状態の系の特性による 5 指標を使用して、定常と非定常過程を判断する判別関数は簡便であり、また、それぞれの確率構造が把握できる。また、本成果を用いて判断し、それを交通輸送形態別にみると、カーフェリー輸送、港湾の輸出入量、陸上部門で季節的な動向の強い道路交通量、旧国鉄貨物輸送量などが非定常過程の性質を示す。

(2) 構築した予測システムを実施することで効率的にかつ有効的に予測が行える。その際、提案した非定常過程型の AROP3, 4 モデルの構造は、ARIMA モデルのように幾つものモデルの組み合わせでなく、ゆらぎ状態の系の基準の変化とゆらぎ部分を確率過程として捉えたものになっており、複雑さが回避できている。また、level と slope の変化の小さい場合に AROP3 が、大きい場合に AROP4 モデルで対応する。

(3) 提案モデルの適用に関し、同定結果で精度範囲の 10% 未満および一般的な普通の精度範囲の 20% 未満まで許容すれば、定常過程型の AROP1, 2 と比較しても前者で 60.7%、後者で 24.1% の改善効果を示す。また、ARIMA モデルに比べ 3.1 倍の精度の向上があり、その有効性が確認できた。

(4) 予測結果では、定常過程型モデルでは精度範囲の 10% 未満には存在しないが、非定常過程型のモデルでは 76 例中 4 例が存在し、精度範囲の 20% 未満で精度のみに着目すると、約 36% の向上が認められた。また、ARIMA モデルとの比較では 2.4 倍の精度の向上である。

(5) 予測精度において交通輸送需要が示すゆらぎ状態の系で、悪い精度範囲 30% 以上に含まれる 28 例中で、

とくに悪い 40% 以上の 15 例をみると、同定期間と相違して予測期間では施設の増強や航路の開設などの新たな要因により、ゆらぎのパターンが著しく異なることによる場合などである。したがってこれらの状況を含む時系列に関して本モデルの適用には無理があるといえよう。

参考文献

- 1) 堤昌文・橋木武：交通輸送需要の時系列予測システムと AROP モデル、土木学会論文集、第 407 号／IV-11, pp.17~26, 1989.
- 2) 堤昌文・橋木武：“ゆらぎ”状態の系の特性と確率構造、土木計画学研究講演集、No.11, pp.479~486, 1988.
- 3) 太田勝敏：交通需要予測の誤差分析、第 28 回土木学会年次学術講演会概要集、第 4 部, pp.133~134, 1973.
- 4) Box, G. E. P. and Jenkins, G. M. : Time Series Analysis Forecasting and Control, Holden-Day, 1976.
- 5) 藤田睦博：確率統計水文学 2 線形系の解析、土木学会誌、1 月号, pp.73~82, 1978.
- 6) Mélard, G. : Illustration of the use of a General Time Series Model, TIME SERIES ANALYSIS, THEORY and PRACTICE 7, pp.53~75, 1985.
- 7) 刈屋武昭・日本銀行調査統計局編：計量経済分析の基礎と応用、東洋経済新報社。
- 8) 長谷部正彦：Box & Jenkins の理論による非定常降水時系列と予測について、土木学会論文報告集、第 261 号, pp.59~66, 1977.
- 9) 奥谷巖：Box-Jenkins 法による交通量予測、第 35 回土木学会年次学術講演会概要集、第 4 部, pp.322~323, 1980.
- 10) 浜中健一郎：ARIMA の適用範囲について、土木学会北海道支部論文報告集, pp.121~124, 1976.
- 11) 日野幹雄・長谷部正彦：流量時系列のみによる流出解析について、土木学会論文報告集、第 300 号, pp.43~56, 1980.
- 12) Anderson, O. D. : Practical Examples of ARIMA Modelling, TIME SERIES ANALYSIS, THEORY AND PRACTICE 7, pp.15~21, 1985.
- 13) Mckenzie, E. : A Traditional Interpretation of the Forecasts of Seasonally Differenced ARIMA Processes, TIME SERIES, ANALYSIS, THEORY AND PRACTICE 7, pp.23~36, 1985.
- 14) Stram, D. O. and Wei, W.S. : Temporal Aggregation in the ARIMA Process, JOURNAL OF TIME SERIES ANALYSIS, Vol.7, No.4, pp.279~292, 1986.
- 15) Cholette, P.A. : Seasonal moving averages for irregular series with moving seasonality, TIME SERIES, ANALYSIS, THEORY AND PRACTICE 7, pp.37~52, 1985.
- 16) Gray, H.L. and Zhang, N.F. : On a class of Nonstationary Processes, JOURNAL OF TIME SERIES, ANALYSIS, Vol.9, No.2, pp.133~154, 1988.
- 17) 堤昌文・橋木武：非定常確率過程型予測モデルの試みその 2、第 45 回土木学会年次学術講演会講演概要集、第 4 部, pp.42~43, 1990.
- 18) 堤昌文・橋木武：非定常確率過程型の予測モデルの試み、第 44 回土木学会年次学術講演会講演概要集、第 4 部, pp.50~51, 1989.

(1991.7.31 受付)

A STUDY ON TIME-SERIES PREDICTION SYSTEM AND AROP MODEL OF NONSTATIONARY-TYPE PROCESS FOR TRANSPORTATION DEMAND

Masafumi TSUTSUMI and Takeshi CHISHAKI

In our previous paper, we reported AROP1 and AROP2 models of stationary stochastic processes for the state of fluctuation in transportation demands. But, transportation demands with properties of a nonstationary stochastic process are not small and comprise 76 out of the total 153 example data sets.

The purpose of this paper is : 1) to construct a rational and efficient prediction system including both stationary and nonstationary stochastic processes for predicting transportation demand ; and 2) to propose AROP3 and AROP4 prediction models of nonstationary-type processes. The prediction system of nonstationary stochastic process consists of a subsystem which estimates the precision of prediction, AROP3, AROP4 models, and subsystem which corrects unusual values for improving the precision of prediction. This paper describes how to obtain better precision relative to the traditional ARIMA model and AROP1, AROP2 models of stationary-type processes. This is demonstrated by applying the AROP3, AROP4 models to the 76 example data sets. The efficiency and limits of application are discussed.