

カオス理論に基づく波浪予測について

運輸省第三港湾建設局 正員 ○白神 健司
鳥取大学工学部 正員 太田 隆夫
鳥取大学工学部 正員 木村 晃

1. 研究の背景と目的

防波堤などの港湾・海岸構造物の建設や、船舶の安全な航行のために的確な波浪予測が必要である。最近では海上に空港を建設するなど、海域の利用が盛んになってきていることから、波浪予測の重要性はますます高まっている。これまでも波浪予測は行われてきたが、その方法としては波浪推算法を用いるものと統計モデルを用いるものとに大別される。これらの方法では、計算に時間と費用がかかる、予測のための因子となるデータの作成に労力を要するなど、利用の簡便性という面で問題が残されていた。本研究では、簡便かつ必要十分な精度を有する波浪予測の開発を目的に、新しい時系列予測法として注目されているカオス理論に基づく予測法の適用性を検討する。

2. 波浪データのカオス性の判定

上記の予測法は、入力となる時系列データのカオス性に基づく予測法であるので、まず予測に用いるデータのカオス性の有無を判定しなければならない。解析に用いるデータは、気象庁波浪観測データのうち全国の7地点（尻羽岬、松前、温海、石廊崎、経ヶ岬、佐多岬、喜屋武岬）で観測された有義波高のデータである。上記のデータ中には欠測期間があるが、解析への影響を小さくするために連続6回以下の欠測に対しては線形補間を行い、それ以上の欠測は、観測波高をゼロとした。カオス性の有無の判定のためには、まず時間遅れ座標による軌道の再構成を行う。そして再構成された軌道について以下の3つの特性を調べることで時系列データの

- (I) 軌道の幾何学的特性
- (II) 軌道の力学的特性
- (III) 軌道における時間発展の方向特性

Iは、再構成軌道が自己相似構造を持つ、すなわちフラクタルであるかを、再構成軌道について相関積分を計算し、その結果から推定される相関指数が一定の値に収束するかどうかで判定する。もし相関指数が一定値に収束すればカオスの幾何学的特性である自己相似構造を有することになる。計算の結果、各観測地点とも軌道再構成のための時間遅れ $r=10$ の場合を中心に相関指数の収束傾向が見られた（図-1）。よってカオス性を有する可能性があるかと判定される。

IIはカオスのもう一つの特徴である軌道不安定性（初期値鋭敏性）を評価する量であるLyapunov指数を求めて、判定する。Lyapunov指数とは、力学系にある初期値を与え、それがどう写像されるのかを調べたときの指数的拡大（縮小）率 $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ のことである。このうちの最大のもの（最大

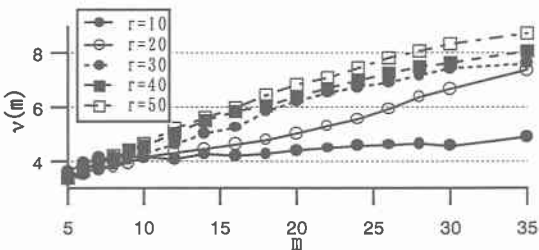


図-1 相関指数の変化（温海）

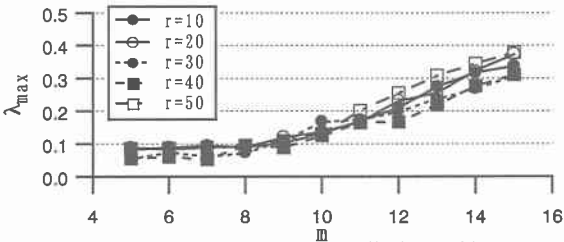


図-2 最大Lyapunov指数（温海）

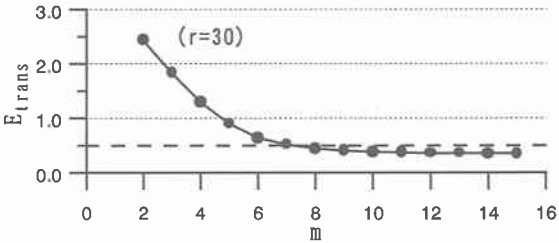


図-3 E_{trans} の値（温海）

Lyapunov指数）が正となれば、カオスの力学的特性である軌道不安定性を有することになる。計算の結果、埋め込み次元 m を5~15に変化させたときの最大Lyapunov指数が全観測地点でいずれも正となっているので、カオス性を有していると判定される（図-2）。

IIIは近接した軌道の方向が局所的に揃っているならばカオスであり、全く揃っていないければカオスではない（ランダムノイズである）という基準による。評価指数 $E_{trans} \leq 0.5$ ならば時系列は決定論的ダイナミクスによって生成しているとみなすことができる。日本海側3地点（松前、温海、経ヶ岬）は各地点とも次元 m が高くなると E_{trans} が0.5を下回っており、カオスである可能性が示されたが、他の地点は0.5を少し上回っており微妙なところである（図-3）。

3. サロゲートデータ法¹⁾

前節で求めた数値そのものあるいは推定結果がどの程度信頼できるかという情報は得られていない。ここではサロゲ

ートデータ法を用いて 2.の方法で得られる結果の解析を行う。この方法は統計的解析における仮説検定の一種である。カオスの挙動を示すための主要因は非線形性であり、時系列データの非線形性を示唆することは、時系列がカオスであるということを示すよりも容易である。そこで、時系列データの線形性を主体とした帰無仮説を採用し、これを棄却する（すなわち、非線形性を示唆する）という手法を用いる。帰無仮説としては以下の2つを採用する。

(a)もとの時系列データ（以下、オリジナルデータ）は時間的な相関を持ち、自己相関のみで特徴づけられる

(b)オリジナルデータは、非線形で静的な変換を施す関数に、入力として線形データを与えた時の出力値である

(a)に対応するデータは、オリジナルデータと同じエネルギースペクトルを持つようにフーリエ成分を決め、これらを重ね合わせることで、(b)に対応するデータは(a)で作ったデータの大きき順に従うようにオリジナルデータを並べ替えることで作られる。(a)、(b)はともに線形性を仮定しているので、前節の最大 Lyapunov 指数と E_{trans} の計算を行い、その結果と前節の結果が一致すれば(a)、(b)の仮説は棄却され、オリジナルデータの非線形性が示唆される。計算の結果、最大 Lyapunov 指数については全ケースで帰無仮説(a)、(b)を棄却する結果となった。 E_{trans} については主として再構成次元の低い場合に(a)、(b)の両方が棄却されない場合があるが、ほとんどのケースで両方の帰無仮説が棄却される結果となった(図-4)。よって、有義波高データの非線形性が示されたものと考えられる。

4. カオス理論に基づく波浪予測

2., 3.での結果をうけてカオス理論に基づく時系列予測法を波浪予測に用いることを試みる。時系列データがカオス性を有すると判定されれば、その時系列は決定論的な非線形力学系から生じたものであると考え、時系列データから力学系の状態変化を支配する法則（ダイナミクス）を逆に推定し、予測を行う。本研究では、ダイナミクスを推定する方法として非線形性を取り込む局所ファジィ再構成法⁹⁾を用いる。有義波高の予測は、前述の7地点の1,4,7,10月（ただし、年度は統一してない）を対象とし、6時間後と12時間後の値について行った。時間遅れ $\tau=20\sim50$ 時間（地点により異なる）、軌道再構成を行う空間次元 $m=12$ とし、予測値は6時間ごとに求めた(図-5)。また予測の精度を評価するために、以下のような基準を用いて的中率を求めた。

$$\begin{aligned} |H_p - H_0| &\leq 0.3 \text{ (m)} & (H_0 \leq 1.0 \text{ (m)}) \\ |H_p - H_0|/H_0 &\leq 0.3 & (H_0 > 1.0 \text{ (m)}) \end{aligned}$$

ここに、 H_0 は観測値、 H_p は予測値である。上式で表される範囲に入る予測値の数の、全予測数に対する割合を的中率とした(図-6)。これらの結果により、各地点ともこの方法の適用可能性がある程度示された。

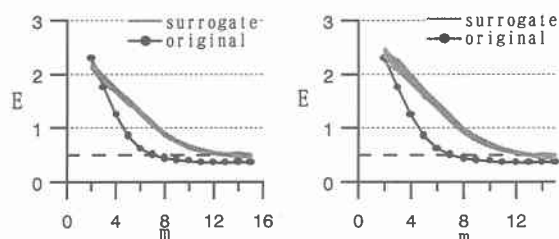


図-4 サロゲートの結果 (E_{trans} ; 温海)
左 (帰無仮説 a), 右 (帰無仮説 b)

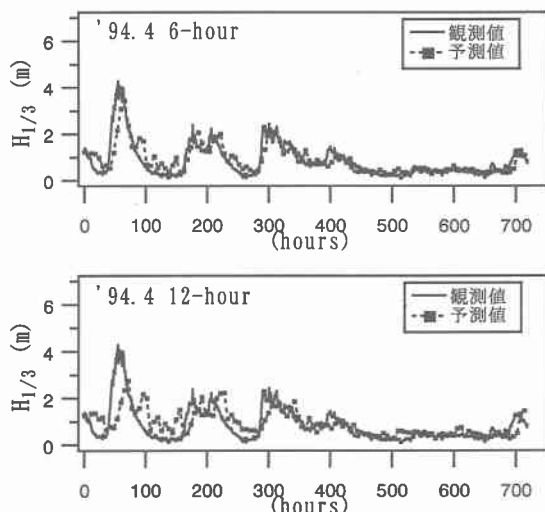


図-5 有義波高の予測結果 (温海)

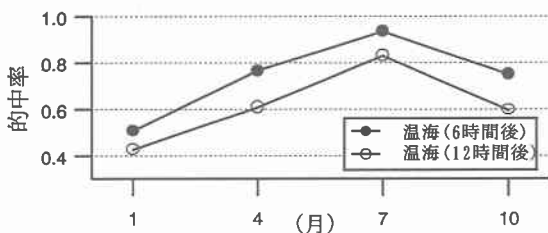


図-6 予測の的中率

5. 考察とまとめ

本研究では、従来の波浪予測法より簡便で、かつ必要十分な精度を有する新たな波浪予測法の開発を目的としたが、実用の可能性を示す結果が得られた。ただし、予測時間が長くなると的中率が下がる、高波来襲時の予測値の立ち上がりが遅れる、という問題を残した結果となった。

<参考文献>

- 1)Theiler,J,et al.:Testing for nonlinearity in time series:the method of surrogate data,Physica D 58, pp.77~94,1992
- 2)五百旗頭 正ら:カオス的時系列の短期予測のための局所ファジィ再構成法,日本ファジィ学会誌, pp.76~84, 日刊工業新聞社, 1988