

AIを用いた1週間波浪予測手法の開発

原 知聡¹
武田 将英¹

¹東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 水圏技術グループ

波浪は、港湾工事の安全性・施工性に大きな影響を与える。そのため、施工計画を立てる際にはできるだけ正確な波浪情報(波高, 周期)が求められる。港湾工事の工種によっては1週間先までの工程を考慮する必要があり、その際には、世界の気象機関(日本, 米国, 欧州)によって定期配信される全球波浪予報データが、直接的または間接的に用いられている。ただし、約1週間後の波浪情報の精度はそれほど高くないという問題があった。そこで、当社では、ナウファス等の波浪観測地点における1週間先までの波浪情報の精度向上を目指し、全球波浪予報データに対して、AIの一種である機械学習を適用する波浪予測手法(AI波浪予測モデル)を開発した。

キーワード：波浪予測, 全球波浪予報データ, GMDH, 施工計画, 働き方改革

1. はじめに

波浪予測は、港湾・海洋工事、漁業、船舶運航、海水浴、サーフィン等に挙げられる海域利用の可否判断に用いられている。中でも、港湾工事は、波浪によって、安全性・施工性・経済性が大きく影響を受けるため、より正確な波浪予測が求められる。一般的には、数時間から1日程度の短期予報が重要とされる。しかし、作業船の長距離回航、ケーソンの据付作業、洋上風力発電施設の建造といった大規模海上工事では、数日間の連続した静穏日が必要で、この場合には、およそ1週間先までの中期予報の正確さも重要となる。

1週間先までの波浪予測に関しては、日本、米国、欧州の3つの気象機関がそれぞれ全球モデルによって実施している。表-1に各気象機関の全球波浪予報

データの概要を示す。しかし、これら全球波浪予報データの空間解像度は粗く(JMA GWMとNOAA WW3は0.5度, ECMWF-WAMは0.125度)、中期予報の波浪情報を作業可否判断として利用するには精度が不十分である。

そこで、これらの全球波浪予報データに、近年注目されているAI技術を取り入れ、作業可否判断として利用可能な予測精度の高いAI波浪予測モデルの構築を目指した。予測精度が向上することによって、早期の作業可否判断が可能となり、工程管理が容易になることで施工の合理化が進み、働き方改革に結びつくと期待される。

本稿では、実用化に向けた開発段階にあるAI波浪予測モデルの概要と、全球波浪予報データとの予測精度の比較、有用性について報告する。

表-1 全球波浪予報データの概要

気象機関	日本 気象庁	アメリカ海洋大気庁	ヨーロッパ 中期予報センター ECMWF HRES-WAM
全球モデル名称	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF HRES-WAM
格子間隔 計算領域	0.5°×0.5° 全球75°N-75°S	0.5°×0.5° 全球77.5°N-77.5°S	0.125°×0.125° 全球(計算：90°N-78°S) (出力：90°N-90°S)
予報時間の長さ 予報のサイクル 予報時間の間隔	0時～264時 1日4回 3時間	0時～180時 1日4回 毎時(0時～120時) 毎3時(123時～180時)	0時～240時 1日2回 毎3時(0時～144時) 毎6時(150時～240時)
出力波高 出力周期	有義波高(H _s) ピーク周期(T _p)	有義波高(H _s) スペクトルの0次および2次モーメントから得られる平均周期(T _{m02})	有義波高(H _s) スペクトルの0次および1次モーメントから得られる平均周期(T _{m01})

2. AIを用いた波浪予測の動向

これまでに金ら¹⁾, Traceyら²⁾は、表-1で示した全球波浪予報値を用いるAI波浪予報モデルを考えている。これらは、空間解像度の粗い複数機関の全球波浪予報値(入力変数)と波浪観測値(出力変数)との関係性をAI(機械学習)により導き出し、単一機関の全球波浪予報値よりも精度の高い予測を行うものである。全球波浪予報値を使うメリットとして、データの欠測がなく安定して予測できることが挙げられる。

彼らの機械学習の手法には、金ら¹⁾はGroup Method of Data Handling(以下GMDH), Traceyら²⁾はニューラルネットワーク(以下NN)が用いられている。これらの特徴として、NNはデータ間の因果関係が不明確で入出力関係のプログラム化が不可能であっても繰り返し学習することにより入出力関係をコンピュータにしかわからないマトリックス(ブラックボックス)で結びつけることができる。一方、GMDHは、NNと同様に入力と出力の因果関係をマトリックスで結びつけることができる。そして、入力変数が少ない場合には、関数式として入出力関係を陽的に表現することができる(ホワイトボックス)。将来的に現場での利用を考えると、誰でも簡単に使える技術が前提にあり、その点でGMDHモデルは、得られた関数式に入力変数を直接代入するだけで波浪予測値を得ることができるといった利点がある。

以上を踏まえて、著者らはGMDHを用いた1週間先までの波浪予測モデルについて検討を進めている。

3. GMDHによる波浪予測手法

(1) GMDHとは

GMDHは、発見的自己組織化の原理に基づき入力変数と出力変数の関係を式(1a)で示す完全表現式としてモデル化する。

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1a)$$

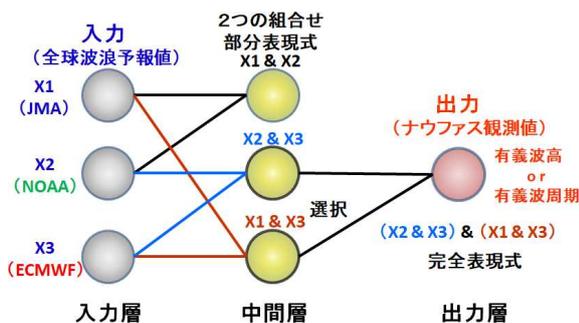


図-1 GMDHネットワーク構成

ここで、 x_1, x_2, x_3, \dots は入力変数、 $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ijk}, \dots$ は定数、 i, j, k は入力データの種類、 y は真値である。

当社が用いるGMDHのネットワーク構成を図-1に示す。波浪予測に用いるGMDHは、中間層(いわゆる学習・訓練過程)において入力変数として最大3種類の全球波浪予報値から選択した2種類、出力変数(真値)として1個の波浪観測値で構成され、式(1b)の部分表現式として表される。

$$y_n = a_0 + a_1 x_{i_n} + a_2 x_{j_n} + a_3 x_{i_n}^2 + a_4 x_{j_n}^2 + a_5 x_{i_n} x_{j_n} \quad (1b)$$

ここで、 y_n は推定値、 $a_0 \sim a_5$ は定数であり、推定値と真値との誤差が最も小さくなる定数の時を最適な部分表現式とする。次に、中間層で作られた各組合せの最適な部分表現式から得られる推定値を新たな入力変数として、同様に部分表現式を作る。最終的に、各組合せの中から真値との誤差が最も小さくなる部分表現式を完全表現式として、これをAI波浪予測モデルとする。詳しい計算過程については金ら¹⁾を参照されたい。

実際の運用では、3種類の全球波浪予報値が配信される6時間ないし12時間毎に、予測したい時点(例えば24, 72, 168時間後)における全球波浪予報値を入手し、構築したAI波浪予測モデルに代入すればその時刻における波浪の予測値を得ることができる。

(2) AI波浪予測モデル(GMDHモデル)の構築

前節で述べたことが可能であるか検証するために、過去の予報初期値と解析値(配信時刻における0時間後の予測値)を入力変数とし、ナウファス観測値を真値としてGMDHモデルを構築する。本技術の最終目標はリアルタイムで配信される予報値を用いて1週間先までの波浪予測を精度良く行うことであるが、これが実現可能であることを確かめるためにまずは過去の予報の初期時刻を利用した。

検討対象とした地点は、ナウファスの観測地点の1つである常陸那珂を選定した。また、3種類の全球波浪予報値はできるだけナウファスの観測地点に近い格子点を選択した。

GMDHの学習と訓練に用いるデータ期間は2010年1月1日から2014年12月31日とし、予測値と観測値との比較検証は、2015年1月1日から2015年12月31日のデータを用いた。GMDHモデルには3種類の全球波浪予報値から4つの組合せ(表-2)を作り、それぞれの組合せについて有義波高Hsと有義波周期Tsの予測モデルを構築した。最良となる全球波浪予報値の組合

表-2 GMDHモデルの入力変数の組合せ

Case	入力変数 (波高, 周期)	出力変数 (波高, 周期)
1	JMA+NOAA	ナウファス
2	JMA+ECMWF	ナウファス
3	NOAA+ECMWF	ナウファス
4	JMA+NOAA+ECMWF	ナウファス

せを探り、GMDHモデルの精度を検証する。

4. AI波浪予測モデルの精度検証

(1) 有義波高Hsの比較

対象地点における波高の予測精度を評価する指標として自乗平均平方根誤差RMSEと相関係数CCを用いた。GMDHモデルの4ケースと全球波浪モデルの3ケース(Case5:JMA, Case6:NOAA, Case7:ECMWF)の波高についてRMSE, CCを比較したものを図-2に示す。

3種類の全球波浪モデル(Case5, Case6, Case7)だけを比べると、Case7のECMWFが最も高い精度のRMSE = 0.290 m, CC = 0.897を示した。GMDHモデルの4ケースを比べると、最も高い精度を示したのはNOAAとECMWFを組み合わせたCase3であり、その精度はRMSE = 0.286 m, CC = 0.900であった。また、全球波高予報値(JMA)と最良のGMDHモデルによる波高予測値との時系列(図-3)と相関図(図-4)を比較すると、GMDHモデルの予測値は低波高でよく一致していることがわかる。すなわち、GMDHを用いることによって、港湾工事の作業可否判断に必要な波高の予測精度は、全球波浪モデル単体よりも改善されている。

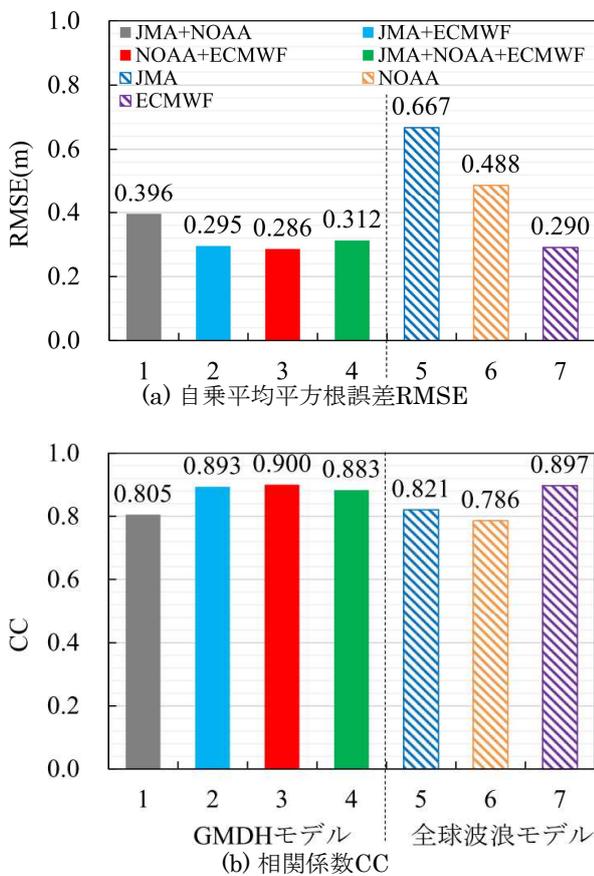


図-2 全球波浪モデルとGMDHモデルの有義波高予測精度比較

(2) 有義波周期Tsの比較

図-5に有義波周期についてRMSEとCCを比較したものを示す。

3種類の全球波浪モデルを比べると、Case7のECMWFが最も高い精度のRMSE = 1.681 sとCC = 0.748を示した。GMDHモデルの4ケースを比べると、最も高い精度を示したのはJMAとECMWFを組み合わせ

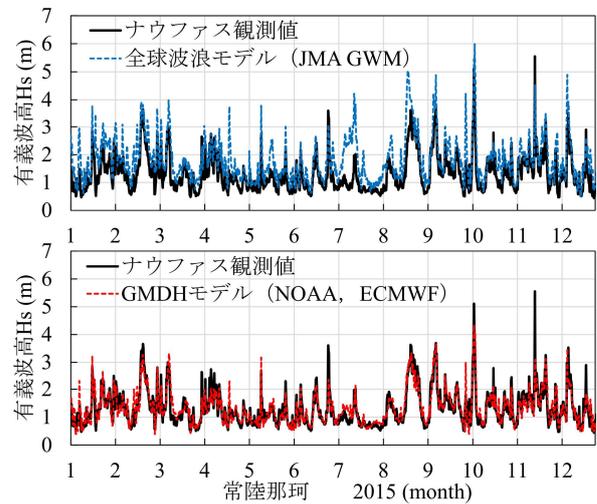


図-3 予測波高の時系列比較

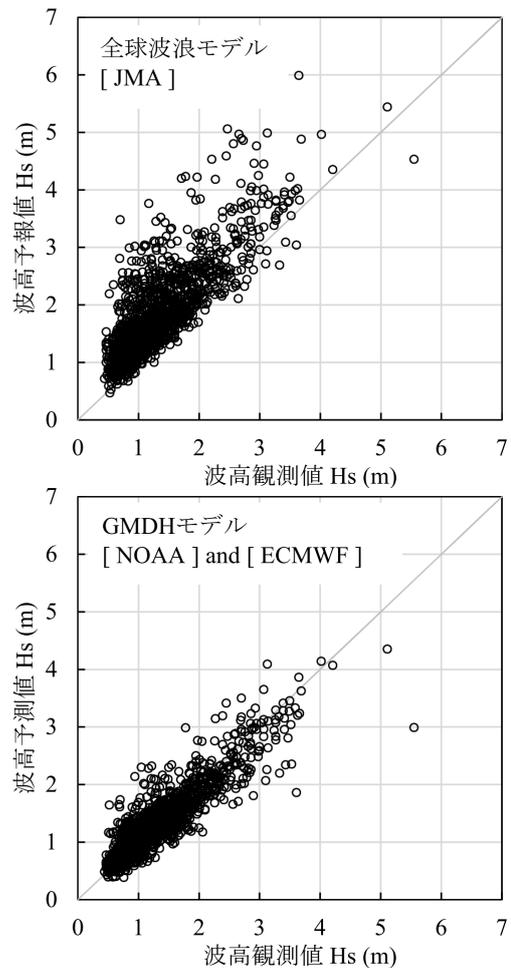


図-4 予測波高の相関比較

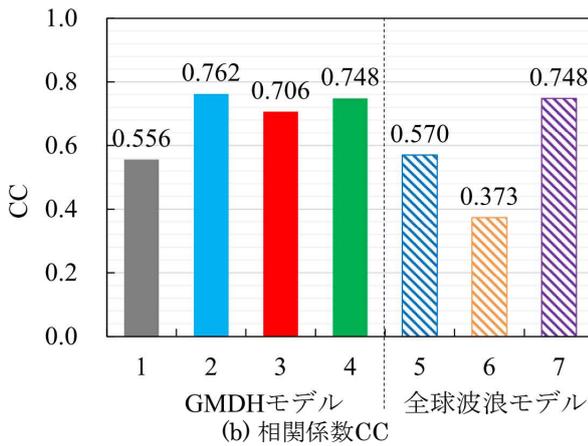
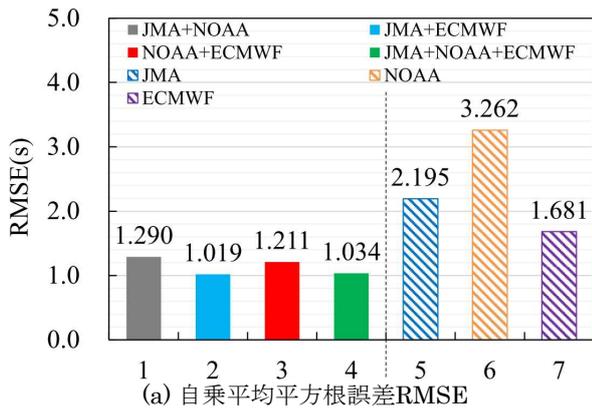


図-5 全球波浪モデルとGMDHモデルの有義波周期予測精度比較

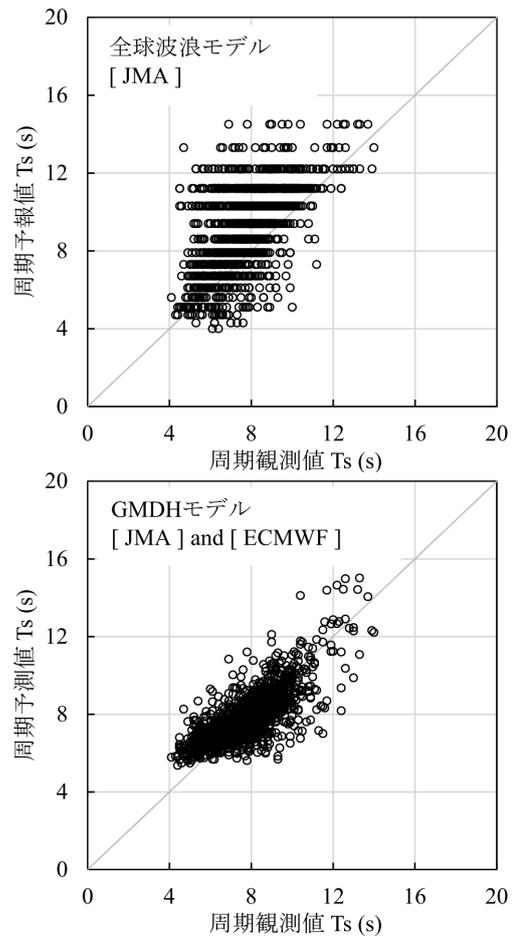


図-7 予測周期の相関比較

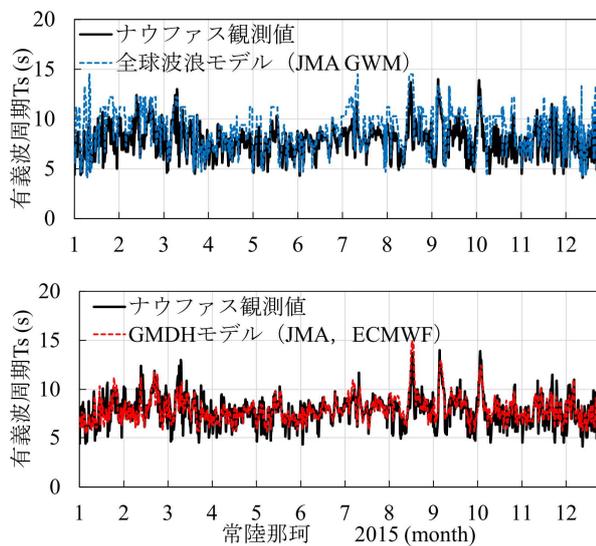


図-6 予測周期の時系列比較

たCase2であり、その精度はRMSE = 1.019 s, CC = 0.762であった。

また、全球波浪予測値(JMA)と最良GMDHモデルによる周期予測値との時系列(図-6)と相関図(図-7)を比較すると、GMDHモデルによる予測は全球波浪モ

デルと比べて観測値に対してよく一致する傾向がみられる。すなわち、GMDHを用いることによって、周期の予測精度も波高予測と同様に、全球波浪モデル単体よりも改善されることがわかる。

本検討で対象とした常陸那珂において、精度の良い波浪予測値を得るにあたっては、波高に対してはNOAAとECMWFを用い、周期に対してはJMAとECMWFを用いたGMDHモデルを適用するのが最良であることが分かった。

表-3に、3種類の全球モデルとGMDHモデルの各組合せによる予測値の精度を一覧にして示す。各項目の上段の値は波高に関して、下段の値は周期に関する指標を示している。それぞれの精度指標の内、最も良い値を示したものを赤字で示す。また、上述したRMSEとCCに加えて的中率HRも示してある³⁾。ここでの中率とは、表-4に示すように波高あるいは周期に対して、設定した閾値よりも観測値と予測値がともに低い場合Aと、ともに高い場合Dを的中と定義し、総的中回数の全予測数に対する割合のことである。本稿では、実際の海上施工において工事の判断基準となることが多い、波高1 m以下、周期8 s以下を閾値と設定した。

表-3から、常陸那珂を対象とする場合、波高に関

表-3 観測値と予測値の一致度の指標（上段：波高，下段：周期）

	【Case1】 JMA NOAA	【Case2】 JMA ECMWF	【Case3】 NOAA ECMWF	【Case4】 JMA NOAA ECMWF	【Case5】 JMA	【Case6】 NOAA	【Case7】 ECMWF
相関係数： CC	0.805 0.556	0.893 0.762	0.900 0.706	0.883 0.748	0.821 0.570	0.786 0.373	0.897 0.748
自乗平均平方根誤差： RMSE	0.396 m 1.290 s	0.295 m 1.019 s	0.286 m 1.211 s	0.312 m 1.034 s	0.667 m 2.195 s	0.488 m 3.262 s	0.290 m 1.681 s
的中率（Hs ≤ 1 m） （Ts ≤ 8 s）： HR	0.804 0.713	0.857 0.808	0.862 0.784	0.853 0.796	0.724 0.684	0.786 0.598	0.855 0.675

表-4 的中率の考え方

※波高1mを閾値とした場合		観測値（ナウファス）		
		Hs ≤ 1m	1m < Hs	計
予測値	1m < Hs	B	D(的中)	B + D
	Hs ≤ 1m	A(的中)	C	A + C
	計	A + B	C + D	N=(A+B+C+D)

してHRからもCase3(NOAAとECMWF)の組合せが良いことがわかる。周期に関しては、Case2(JMAとECMWF)の組合せが良いことが改めてわかる。

5. まとめ

本稿では、海洋工事の施工計画に役立つ波浪予測システムを確立することを目的として、機械学習の手法にGMDH、入力変数に3種類の全球波浪予報値、出力変数にナウファス波浪観測値を用いたAI波浪予測モデルを開発し、常陸那珂を対象にその適用性を検討した。その結果、ナウファスの波浪観測値に対して、波高と周期の両方で、そのままの全球波浪予報値よりもAI波浪予測モデルの予測精度がよくなることを示した。また、波高と周期では最良となるGMDHモデルの組合せは異なり、波高予測にはNOAAとECMWFの組合せ、周期予測にはJMAとECMWFの組合せが最も良い精度を示す結果となった。

今後、実際に配信される予報値を利用したリアルタイムAI波浪予測モデルの構築を目指し、さらなる精度向上に向けた検討を進めるとともに、実運用に向けて波浪データの蓄積と対象地点の拡充を図る所存である。

謝辞：本研究開発の一部は、（一財）港湾空港総合技術センターより研究開発助成を受けました。ここに記して謝意を表します。また、本研究開発成果に対して、令和2年度日本港湾協会論文賞を頂きました。関係者の皆様に改めて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金 洙列，武田将英，間瀬 肇，倉原義之介，原 知聡，西山大和，川崎浩司，水谷英朗：全球波浪予報値とGMDH部分表現式を用いた1週間波浪予測法とその精度検証，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.75，No.1，pp.18-26，2019.
- 2) Tracey H.A.Tom，金 洙列，武田将英，倉原義之介，原 知聡，西山大和，川崎浩司，間瀬 肇：全球波浪予報値のニューラルネットワーク変換による高精度1週間波浪予測の試み，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.75，No.2，pp.I_133-I_138，2019.
- 3) 原 知聡，金 洙列，倉原義之介，西山大和，武田将英，間瀬 肇：海上施工での利用を目的とした沿岸波浪数値予測モデルGPV(CWM)の精度検証，土木学会論文集B3(海洋開発)，Vol.75，No.2，pp.I_935-I_940，2019.