

# 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

金 淳列<sup>1</sup>・武田 将英<sup>2</sup>・間瀬 肇<sup>3</sup>・倉原 義之介<sup>4</sup>・  
原 知聰<sup>5</sup>・西山 大和<sup>6</sup>・川崎 浩司<sup>7</sup>・水谷 英朗<sup>8</sup>

<sup>1</sup>正会員 鳥取大学助教 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地)  
E-mail: sooyoul.kim@tottori-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)  
E-mail: m\_takeda@toa-const.co.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学特任教授, 東亜建設工業(株) 技術顧問 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)  
E-mail: mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)  
E-mail: y\_kurahara@toa-const.co.jp

<sup>5</sup>正会員 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (同上)  
E-mail: c\_hara@toa-const.co.jp

<sup>6</sup>正会員 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (同上)  
E-mail: ya\_nishiyama@toa-const.co.jp

<sup>7</sup>正会員 (株)ハイドロ総合技術研究所 取締役兼研究開発センター長  
(〒530-6126 大阪市北区中之島3-3-23 中之島ダイビル26F)  
E-mail: kawasaki@hydrosoken.co.jp

<sup>8</sup>正会員 (株)ハイドロ総合技術研究所 執行役員 (同上)  
E-mail: mizutaniha@hydrosoken.co.jp

本研究は、作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画に役に立つ波浪予測法を確立することを目的として、全球波浪予報値と機械学習の一つである Group Method of Data Handling (GMDH) における部分表現式を用いた日本沿岸の1週間先までの波浪予測法を提案する。具体的には、常陸那珂港を対象として、3種類の全球波浪予報値とGMDHの部分表現式を利用した1週間先までの波浪予測が可能なモデルを構築し、予報初期値と解析値を用いて精度検証を行った。その結果、有義波高に対しては、アメリカ海洋大気庁波浪モデルとヨーロッパ中期予報センター海洋波浪モデルの2種類の全球波浪データを用いる部分表現式、周期に対しては、日本気象庁波浪モデルとヨーロッパ中期予報センター海洋波浪モデルの2種類を用いる部分表現式が予測精度が良いことがわかった。

**Key Words :** wave prediction, global wave model, GMDH (Group Method of Data Handling), one week lead time wave prediction

## 1. はじめに

波浪予測は、定期船の運航、沿岸・沖合漁場への出漁、港湾・海洋工事の作業実施および海水浴・サーフィン・ヨット等の海域利用などの可否判断、さらには台風等の荒天時における高波のリアルタイム把握などに用いられている。これらは、数時間から1日程度先の予測がよく用いられ、長くてもおおむね3日(72時間)先までの短

期予測があればよい。この短期予測に関する研究は、従来より多く実施されている(例えば、Tomら<sup>1)</sup>、鈴木ら<sup>2)</sup>、間瀬ら<sup>3)</sup>。

青野ら<sup>4)</sup>は、観測波浪データを用いて24時間先まで予測可能な重回帰波浪予測モデルを提案したが、ケーソン据え付けなどの大規模海上工事では1週間程度の波浪予測が必要であることを述べている。このように、作業船やケーソン等の回航、洋上風力発電施設、GPS波浪計、

沖合漁礁の設置や維持管理, 遠隔離島における工事など, 陸から遠い沖合を対象とした場合には, できるだけリードタイムの長い気象・海象予測情報が求められる. 例えば, 洋上風力発電装置(着底式)の設置にあたっては, 陸上で製作した部材の海上運搬, 基礎構造物の施工, タワーの据付け, 風車本体の施工(タワー, ナセル, ハブ, ブレード), 海底ケーブルの敷設といった工種がある. これらの工種の中には数日間連続して作業を実施しなければならないものがあり, おおむね1週間(168時間)先までの波浪の中期予測が必要となる.

現状, 1週間先までの波浪の中期予測は, 全球モデルによって行われている. この中期予測は, 日本, 米国, 欧州の3つの機関が実施しており, 我が国の気象庁では, 全球波浪数値予報モデル GPV (JMA GWM) と波浪アンサンブルモデル GPV (JMA WEM), アメリカ海洋大気庁では, 波浪モデルにWAVEWATCH IIIを用いた multi\_1 (NOAA WW3), ヨーロッパ中期予報センターでは, 波浪モデルに WAM を用いた HRES-WAM (ECMWF HRES-WAM) が挙げられる. ただし, これらの全球波浪予報値は空間解像度が低いため, 日本沿岸の波浪予測値としては十分な精度を期待することはできず, 作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画のための1週間先までの中期波浪予測としては不十分であるといった問題がある.

津田ら<sup>5</sup>は, ニューラルネットワーク法を用いて, 数ヶ所の海象・気象観測データ(有義波高や周期, 波向, 風速や風向, 気圧, 同一地点の1時間の気圧差, 2地点間の同時刻の気圧差)を入力として1週間先までの波浪予測を行っている. 予測対象とした常陸那珂港においては精度の高い予測が行われているものの, 観測値を入力としているため欠測時に予測値が得られない, 出力毎にニューラルネットワークモデルを作成する必要があり計算負荷が大きい, 予測対象地点が変わった場合にどの地点の海象・気象データを入力として使用すればよいかを出力ごとに試行錯誤する必要がある, 予測値にスパイクノイズが現れるといった問題がある.

以上のような問題を生じさせず, 対象とする日本沿岸の波浪を精度よく予測する方法として, 複数機関の全球波浪予報値を入力とする機械学習の波浪予測モデルが考えられる. これは, 日本沿岸のある地点に対して, 空間解像度が低い複数機関の全球波浪予報値と波浪観測値との間にあると考えられる非線形な関係を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日本沿岸の波浪予測を行うものである.

本研究では, 機械学習手法に, Ivakhnenko によって開発されたGroup Method of Data Handling<sup>6,7)</sup> (以下, GMDHと略す) を採用する. GMDHは, 複雑な構造をもった非線形システムに対して, 入出力データから発見

的自己組織化の原理に基づいてモデリングを行う. 入力変数が多い場合には, ニューラルネットワーク法と同じように, 入力と出力の因果関係をブラックボックスで結びつけることができる一方, 入力変数が少ない場合には, 陽な関係式によって入出力関係を表現することができる. したがって, 入力変数が2,3種類の場合におけるGMDHによる陽な関係式を得ることができれば, 入力変数を代入するだけで簡単に1週間先までの予測値を求めることができる. さらに, GMDHの利点として, その係数を調べれば, どの入力変数の影響が大きいかも評価することができる点が挙げられる.

そこで, 本研究では, ナウファス<sup>8)</sup>などの波浪観測地点における日本, 米国, 欧州の全球波浪予報値を入力変数とするGMDHによる1週間先までの波浪予測モデルを提案する. そして, その精度検証により, 作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画に有用な波浪予測手法を確立することを目指す.

## 2. GMDH部分表現式を用いる波浪予測手法

### (1) GMDHの概要

GMDHは複雑な構造をもった非線形システムに対して, 入出力データから発見的自己組織化の原理に基づいてモデリングを行うものであり, 1) 数少ない入出力データで非線形システムのモデリングを手軽に行うことができる, 2) システムの構造に関する先見的な情報を必要とすることなくモデル構造の自己選択が可能である, といった特徴を有する(田村, 近藤<sup>9)</sup>).

いまシステムの入力変数  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  と出力変数  $\phi$ との間に以下の関係(システムの完全表現式)があるとする.

$$\phi = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1)$$

システムの完全表現式として, 多項式, Bayes関数, 周期関数, 有理関数等があるが, 最も多く用いられているのは, 以下の Kolmogorov-Gabor の多項式である.

$$\phi = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (2)$$

ここで,  $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ijk}$  は定数項である.

式(2)の多項式は,  $N$ 種類の変数から2つの  $x_i, x_j$  を用いた2次多項式

$$y_k = b_{k0} + b_{k1} x_i + b_{k2} x_j + b_{k3} x_i x_j + b_{k4} x_i^2 + b_{k5} x_j^2 \\ k = 1, 2, \dots, N(N-1)/2 \quad (3)$$

で表される中間変数  $y_k$  を新たな入力変数として式(3)の右辺に用い, 新たな2次多項式とする. この過程を進め

て完全表現式に近づける（この後で示す、ステップ5）。 $b_{k0}, b_{k1}, \dots, b_{k5}$  は定数項である。この中間変数  $y_k$  は  $N(N-1)/2$  個できる。式(3)は、部分表現式と呼ばれ、式(2)に比べて非常に簡単なコーディングで済む利点を有する。

この部分表現式を用いる GMDH のアルゴリズムは、以下の通りである。

a)ステップ1

システムの入出力変数を決定する。

b)ステップ2

入出力データを訓練に使うデータ（個数  $N_t$ ）と中間変数の選択に用いる検定データ（個数  $N_c$ ）に分ける。適合性判定は検証データ（個数  $N_p$ ）に対して行う。

c)ステップ3

2変数の組み合わせを作り、訓練データを用いて式(3)の部分表現式の係数  $b_{k0}, b_{k1}, \dots, b_{k5}$  を、 $y_k$  を用いた  $N_t$  個の推定値と与えられた  $N_t$  個の出力値  $\phi_n$  との差の自乗和  $e_{TRN}$  が最小になるように求める。

$$e_{TRN} = \sum_{n=1}^{N_t} (\phi_n - y_{kn})^2 \rightarrow \partial e_{TRN} / \partial b_{ki} = 0 \quad (4)$$

これは以下の連立方程式を解いて求められる。

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0} + b_{k1}x_{in} + b_{k2}x_{jn} + b_{k3}x_{in}x_{jn} + b_{k4}x_{in}^2 + b_{k5}x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn} \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{in} + b_{k1}x_{in}^2 + b_{k2}x_{in}x_{jn} + b_{k3}x_{in}^2x_{jn} + b_{k4}x_{in}^3 + b_{k5}x_{in}x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{in} \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{jn} + b_{k1}x_{in}x_{jn} + b_{k2}x_{jn}^2 + b_{k3}x_{in}x_{jn}^2 + b_{k4}x_{in}^2x_{jn} + b_{k5}x_{jn}^3 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{jn} \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{in}x_{jn} + b_{k1}x_{in}^2x_{jn} + b_{k2}x_{in}x_{jn}^2 + b_{k3}x_{in}^2x_{jn}^2 + b_{k4}x_{in}^3x_{jn} + b_{k5}x_{in}x_{jn}^3 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{in}x_{jn} \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{in}^2 + b_{k1}x_{in}^3 + b_{k2}x_{in}^2x_{jn} + b_{k3}x_{in}^3x_{jn} + b_{k4}x_{in}^4 + b_{k5}x_{in}^2x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{in}^2 \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{jn}^2 + b_{k1}x_{in}x_{jn}^2 + b_{k2}x_{jn}^3 + b_{k3}x_{in}x_{jn}^3 + b_{k4}x_{in}^2x_{jn}^2 + b_{k5}x_{jn}^4 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{jn}^2 \quad (10)$$

d)ステップ4

得られた部分表現式により、検定データに対する2乗誤差  $e_{CHK}$  が小さいものから順に  $L$  種類の中間変数を選択する。

$$e_{CHK} = \sum_{n=1}^{N_c} (\phi_n - y_{kn})^2 \quad (11)$$

e)ステップ5

$x_i = y_i, x_j = y_j$  としてステップ3と4の操作を繰り返し、2変数の2次多項式を多層に積み重ねて、検定データに対する自乗誤差が改善されなくなったところでこの操作を打ち切る。なお、入力変数を2種類だけ用いる場合、

表-1 全球波浪予報値の概要

	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF HRES-WAM
Grid Interval	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$
Calculation Area	Global $75^\circ\text{N} - 75^\circ\text{S}$	Global $77.5^\circ\text{N} - 77.5^\circ\text{S}$	Global (computed $90^\circ\text{N} - 78^\circ\text{S}$ ) output artificially $90^\circ\text{N} - 90^\circ\text{S}$
Spectral Component	25 frequencies 36 directions	50 frequencies 36 directions	36 frequencies 36 directions
Forecast Cycle	4 times/day	4 times/day	2 times/day(00,12)
Forecast Length	264 hours (12UTC) 132 hours (others)	0 to 180 hours	0 to 240 hours
Forecast Interval	Every 3 hours	Every 1 hour 0 to 120 Every 3 hours 123 to 180	Every 3 hours 0 to 144 Every 6 hours 150 to 240
Surface Forcing	GSM (20 km grid)	GFS ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) 1hr increments	HRES atmospheric component $0.1^\circ \times 0.1^\circ$
Supporting Document	<a href="http://www.jmbsc.or.jp/jp/online/file/f-online20100.html">http://www.jmbsc.or.jp/jp/online/file/f-online20100.html</a>	<a href="http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php">http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php</a>	<a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-ii">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-ii</a> <a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/2d-wave-spectra">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/2d-wave-spectra</a>

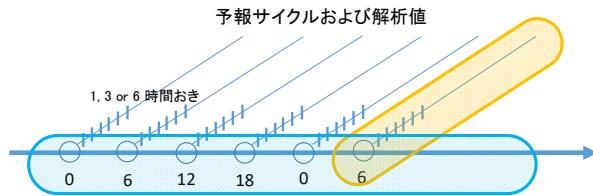


図-1 全球波浪モデルによる予報値と解析値の関係

表-2 作成したGMDHモデルの入出力の組合せ

No.	入力変数	出力変数
1	JMA GWM+NOAA WW3	ナウファス
2	JMA GWM+ECMWF ERA5	ナウファス
3	NOAA WW3+ECMWF ERA5	ナウファス
4	JMA GWM+NOAA WW3+ECMWF ERA5	ナウファス

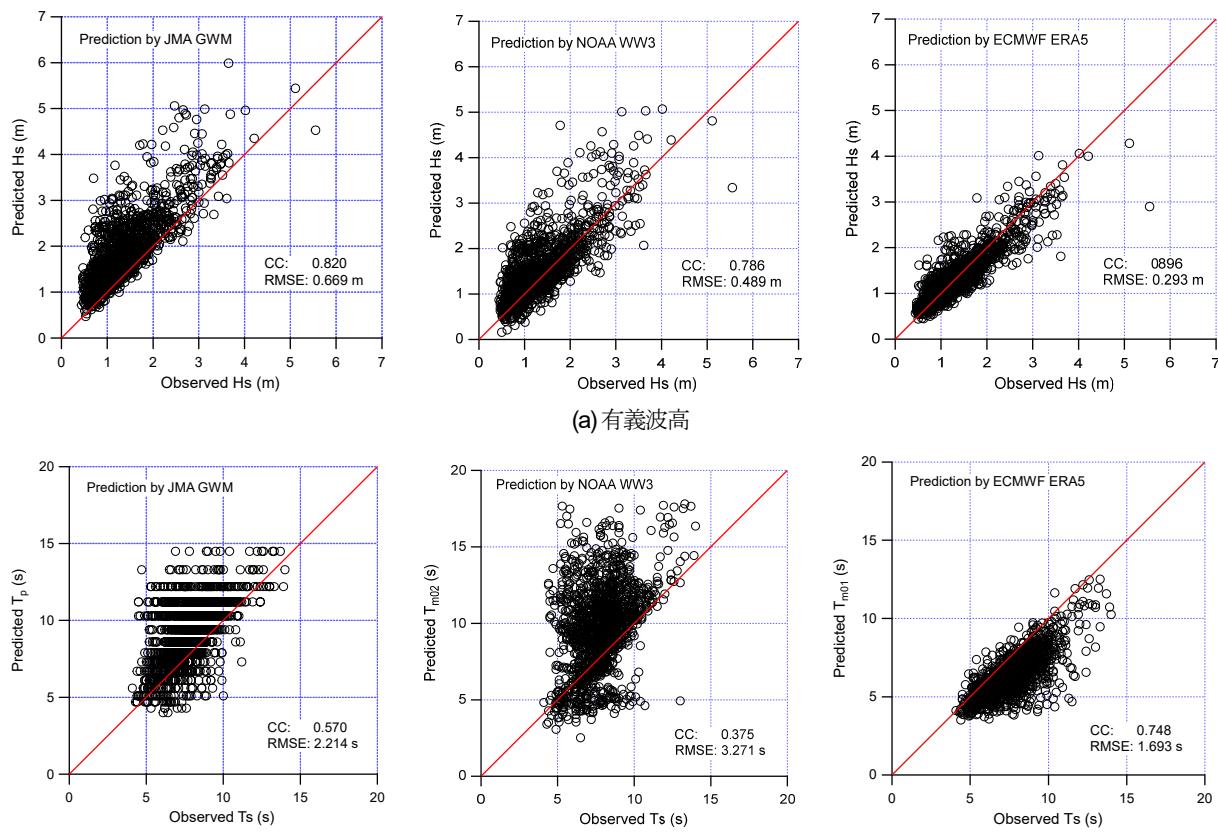


図-2 個々の全球波浪解析値と観測値との比較（常陸那珂）

式(11)のように誤差が小さくなるものを選ぶ必要なく、式(3)の2変数を用いた部分表現式がそのまま予測式となる。

## (2) GMDH部分表現式を用いる波浪予測手法

本研究で提案する式(3)のGMDH部分表現式を用いる波浪予測手法の出力変数 $\phi$ は、ナウファスの有義波高 $H_s$ と有義波周期 $T_s$ の2種類である。出力変数 $H_s$ に対する入力変数は、全球波浪予報値の同時刻における波高とする。同様に、出力変数 $T_s$ に対する入力変数は、全球波浪予報値の同時刻における周期とする。

実際の運用では、入力変数に用いる全球波浪予報値は、リアルタイムで入手可能なJMA GWM( $H_s, T_p$ )、NOAA WW3( $H_s, T_{m02}$ )、ECMWF HRES-WAM( $H_s, T_{m01}$ )の3種類を想定している。したがって、式(1)~(3)の $N$ は2あるいは3

である。ここに、 $T_p$ は卓越波向きのエネルギースペクトルが最も大きくなる周期、 $T_{m02}$ はスペクトルの0次および2次モーメントから得られる平均周期、 $T_{m01}$ はスペクトルの0次および1次モーメントから得られる平均周期である。それぞれの予報値で用いられている周期は有義波周期ではない点に注意されたい。これら全球波浪予報値の格子間隔、計算領域、周波数・方向スペクトルの分割数、予報サイクル、予報時間長さ、予報時間間隔、波浪計算に用いる気象データを表-1に示す。予報時間長さは最も短いもので180時間あり、いずれも1週間(168時間)以上の予報値を有する。なお、先に示したJMA WEMは提供開始が2017年12月からと現段階ではデータ数が少ないため、本研究では用いていない。

実際の運用では、3種類の全球波浪予測値が配信される6時間ないし12時間毎に、図-1中の黄色で囲んだ部分

の希望する時点（例えば、24, 72, 120, 168時間後）における全球波浪予報値を指定すれば、その時刻における日本沿岸波浪の予測を得ることができる。

### (3) 検証用 GMDH モデルの構築

前節で述べたことが可能であるかを検証するため、過去の予報の初期値と解析値（図-1中の水色で囲んだ部分の値（配信時刻における0時間後の予測値）を入力変数とし、ナウファスの波浪観測値を出力変数として、GMDH モデルを構築する。

ここで用いる波浪データは、JMA GWM と NOAA WW3 は予報の初期値、ECMWF は ERA5 (ECMWF ERA5) の解析値の3種類とした。ECMWF ERA5 を用いたのは、過去の解析値が ECMWF HRES-WAM より入手が容易であったことによる。なお、ECMWF ERA5 が ECMWF HRES-WAM と異なるのは、格子間隔が  $0.36^\circ \times 0.36^\circ$ 、周波数・方向スペクトルの分割数がそれぞれ 30 と 24、外力の格子間隔が  $0.281^\circ \times 0.281^\circ$  となる点である。

本研究の最終目的は、6 時間おきに配信される全球波浪予報値を使って、日本沿岸の対象地点における波浪予測値に変換することである。こうしたことができるかを確かめるためにまずは入手が容易な過去の予報初期値と解析値を利用した。

今回用いた全球波浪解析値と波浪観測値の期間は、UTC 時刻で 2010 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日の 6 年間で、時間間隔は 6 時間とした。また、検討対象とした日本沿岸の地点は、ナウファスの常陸那珂である。常陸那珂の波浪計設置位置は  $(36.395^\circ\text{N}, 140.653^\circ\text{E})$  であったため、波浪解析値の出力位置として、JMA GWM  $(36.5^\circ\text{N}, 141.0^\circ\text{E})$ 、NOAA WW3  $(36.5^\circ\text{N}, 141.0^\circ\text{E})$ 、ECMWF ERA5  $(36.36^\circ\text{N}, 140.76^\circ\text{E})$  を採用した。

GMDH モデルを構築するに当たり、訓練データとして 2010 年 1 月 1 日から 2013 年 12 月 31 日の 4 年間、検定データとして 2014 年 1 月 1 日から 12 月 31 日の 1 年間、検証データとして 2015 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日の 1 年間のデータに分割して用いた。さらに、「GMDH のステップ 4」では、 $e_{CHK} \geq 10^{20}$  を超えた中間変数は次のステップの対象から除いた。

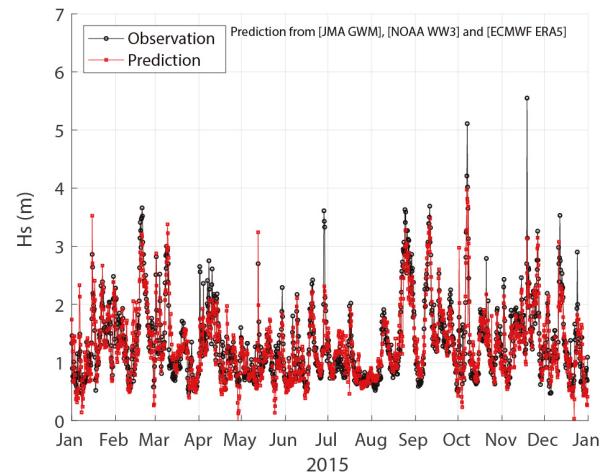
GMDH モデルを作成したのは、表-2 に示すように、3 種類の波浪解析値のうち 2 種類を組合せたものと、3 種類全部用いたものの合計 4 ケースである。それぞれのケースについて、 $H_s$  用と  $T_s$  用の 2 種類のモデルを作成した。

### 3. 算定結果と観測結果の比較

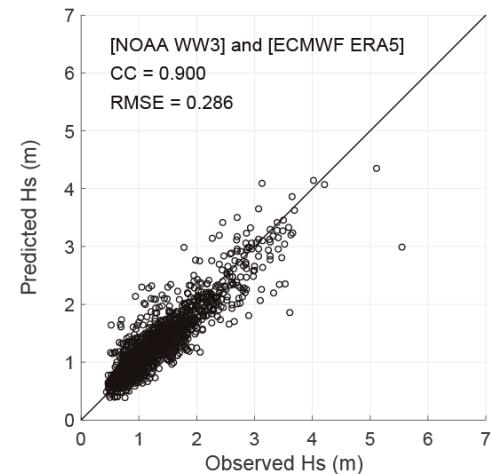
まず初めに、JMA GWM、NOAA WW3 および ECMWF ERA5 のそれぞれの解析値が、常陸那珂における観測値

をどの程度再現できているかを調べる。

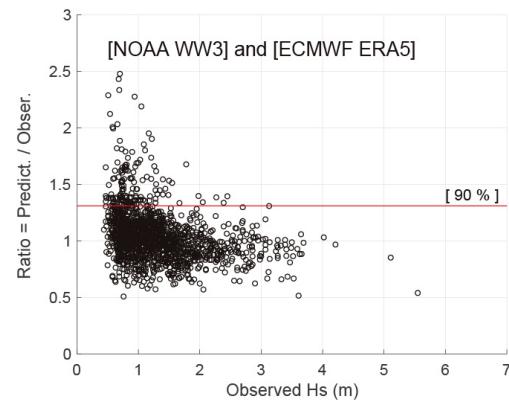
図-2 に全球波浪データと観測値の比較図を示す。 (a) 図は有義波高  $H_s$  について、(b) 図は周期（横軸: 有義波周期  $T_s$ ）について比較したものである。左から右に、JMA



(a) 観測値と算定値の時系列



(b) 観測値と算定値

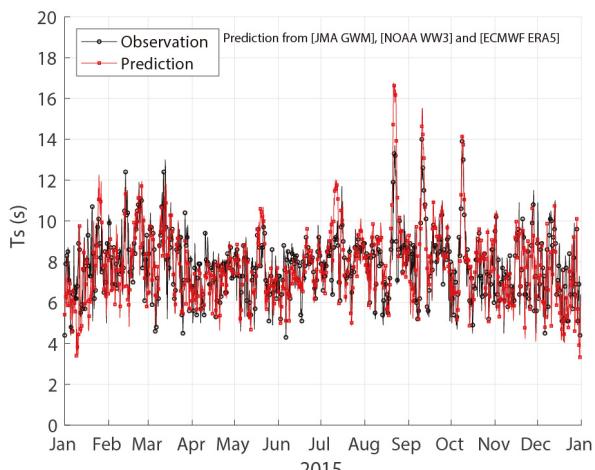


(c) 観測値と算定値の比

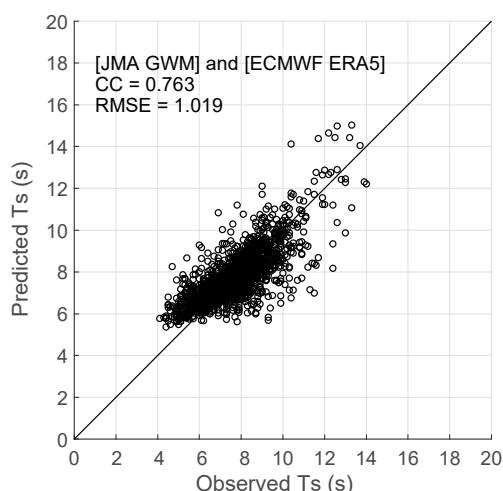
図-3 NOAA WW3 と ECMWF ERA5 の解析値を用いた有義波高の算定値と観測値の比較（常陸那珂）

GWM, NOAA WW3, ECMWF ERA5 の結果を示してある。また、それぞれの図には解析値と観測値の相関係数 CC と自乗平均平方根誤差 RMSE を示してある。

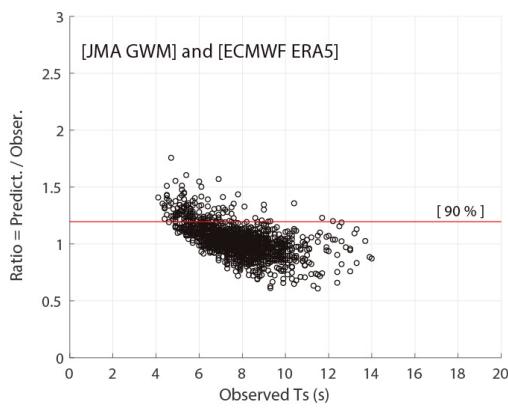
これらの図を見ると、JMA GWM および NOAA WW3



(a) 観測値と算定値の時系列



(b) 観測値と算定値



(c) 観測値と算定値の比

図4 JMA GWM と ECMWF ERA5 の解析値を用いた有義波周期の算定値と観測値の比較 (常陸那珂)

のデータは、 $H_s$  および  $T_s$  とともに観測値よりかなり大きくなっている。ECMWF ERA5 の解析値を観測値と比較した結果、 $H_s$  では相関係数  $CC = 0.896$ 、2乗平均平方根誤差  $RMSE = 0.293$  m と良い一致を示しているが、 $T_s$  については、 $CC = 0.748$ 、 $RMSE = 1.693$  s となって小さめである。しかし、一般的には全球スケールの波浪予報値はその空間解像度のために、局所スケールの波浪の予測値としては精度が落ちると考えられる。そこでここでは GMDH を用いて局所スケールの波浪予測精度の向上を目指す。

以下では、GMDH により求めた値を「算定値」と称する。「予測値」は、将来の値を前もって推測した値である。本研究の最終目的は、全球波浪予報値を用いてその時刻での日本沿岸対象地点における波浪を算定するものであり、その場合には「予測値」とするが、本研究では過去の予報初期値と解析値を用いており将来の値ではないので、「算定値」を用いることとする。

図3と図4は2種類の全球波浪解析値を用いた算定値との比較結果を示したものである。図3は、有義波高について、算定値と観測値が最も一致度の良かった組み合わせである NOAA WW3 と ECMWF ERA5 を用いた結果であり、図4の周期については、最も両者の一致度が良かった JMA GWM と ECMWF ERA5 を用いた結果である。有義波高の算定値が良くなる全球波浪解析値の組合せと、周期の算定値が良くなる組み合わせは同じではなかった。(a)図は観測値と算定値の時系列、(b)図は散布図、(c)図は観測値と算定値の比を示したものである。

有義波高に関しては相関係数は 0.90、周期に関しては 0.76 となっており、自乗平均平方根誤差は有義波高に対して 0.29 m、周期では 1.02 s となっており、図2に示した単独で用いる場合に比べて良くなっている。

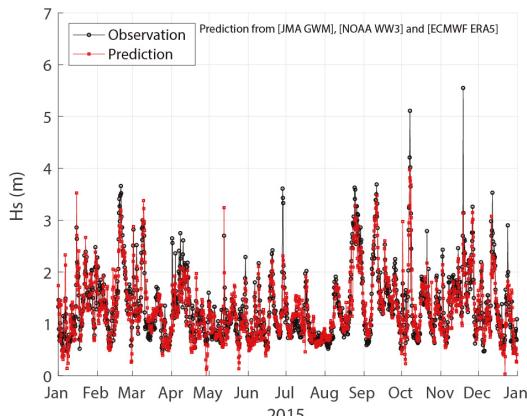
(c)図を見ると、算定値は観測値に比べて、波高および周期が小さい時に大きくなり、逆に観測値が大きい場合に小さくなる傾向があることがわかる。有義波高に対しては、算定値の約 1.3 倍の値が観測値の 90% パーセンタイルになっており、周期では算定値の 1.2 倍の値が 90% パーセンタイルである。また、後に示す有義波高が 1 m 以下とした場合の的中率は、0.87 とかなり良い値になる。

図3および図4の有義波高(m)と周期(s)の算定式は、以下の通りである。

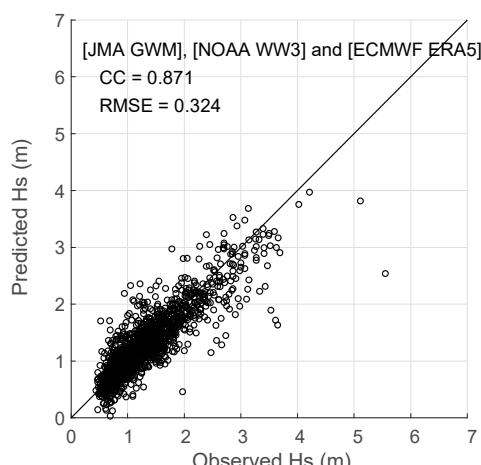
$$\begin{aligned} H_{S_{(WW3+WAM)}} = & -0.123 - 0.137 H_{S_{(WW3)}} + 1.285 H_{S_{(WAM)}} \\ & - 0.154 H_{S_{(WW3)}} H_{S_{(WAM)}} - 0.276 H_{S_{(WW3)}}^2 \\ & + 0.401 H_{S_{(WAM)}}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T_{S_{(GWM+WAM)}} = & 4.523 - 0.496 T_{p_{(GWM)}} + 0.660 T_{m01_{(WAM)}} \\ & - 0.037 T_{m02_{(GWM)}} T_{m01_{(WAM)}} - 0.021 T_{m02_{(GWM)}}^2 \\ & + 0.008 T_{m01_{(WAM)}}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

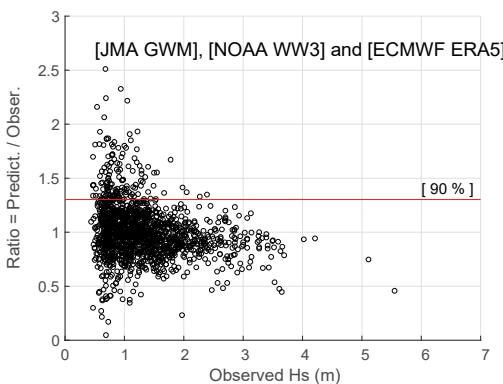
図-5 および図-6 は、3種類の全球波浪データを用いたときの算定値と観測値を比較したものである。これらの結果を図-3 および図-4 の結果と比べると、算定値と観測値との対応は少しだけ悪くなつた。したがつて、常陸那珂において1週間程度の波浪予測値を得るにあたつては、波高に対してはNOAA WW3 と ECMWF ERA5 を用い、周期についてはJMA GWM と ECMWF ERA5 を用いた式(12)



(a) 観測値と算定値の時系列



(b) 観測値と算定値



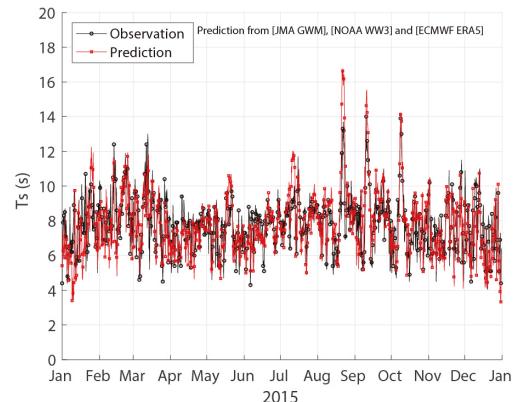
(c) 観測値と算定値の比

図-5 3種類の全球波浪解析値を用いた有義波高の算定値と観測値の比較（常陸那珂）

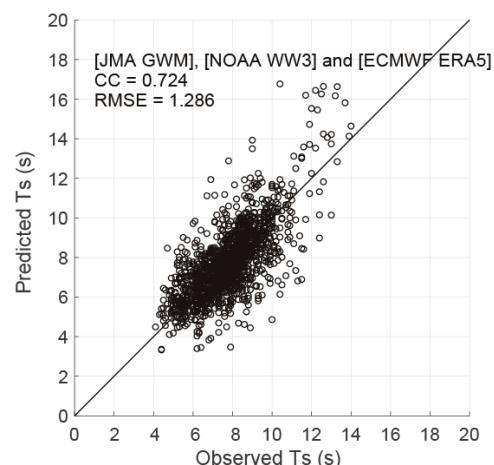
および式(13)を用いるのが良いことがわかつた。

表-3 は、算定値の精度をまとめたものである。CC は相関係数、RMSE は自乗平均平方根誤差、BM は平均値バイアス、RSSR は次式で表される自乗和比である。

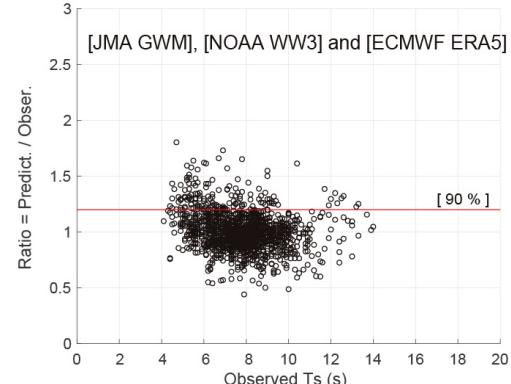
$$RSSR = \sqrt{\sum_{i=1}^N R_i^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^N O_i^2} \quad (14)$$



(a) 観測値と算定値の時系列



(b) 観測値と算定値



(c) 観測値と算定値の比

図-6 3種類の全球波浪解析値を用いた周期の算定値と観測値の比較（常陸那珂）

表3 観測値と算定値の一致度の指標 (上段: 波高, 下段: 周期)

	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF ERA5	GWM+WW3	GWM+ERA5	WW3+ERA5	GWM+WW3+ERA5
Correlation Coefficient, CC	0.821 0.573	0.786 0.377	0.897 0.748	0.824 0.557	0.893 0.763	0.900 0.706	0.871 0.724
Root Mean Square Error, RMSE	0.667 m 2.189 s	0.488 m 3.256 s	0.290 m 1.681 s	0.418 m 1.286 s	0.295 m 1.019 s	0.286 m 1.212 s	0.324 m 1.286 s
Root Sum Square Ratio, RSSR	1.799 1.385	1.275 1.614	0.969 0.695	0.713 0.969	0.982 1.013	0.980 1.075	0.941 1.008
Bias of Mean, BM	0.491 m 1.323 s	0.180 m 1.909 s	0.012 m -1.314 s	-0.193 m -0.026 s	0.013 m 0.092 s	0.009 m 0.304 s	-0.025 m -0.030 s
Hit Rate (Hs<1m), HR	0.982	0.861	0.880	0.665	0.870	0.869	0.832

ここで,  $R_i$  は算定値,  $O_i$  は観測値,  $N$  はデータ数である. 各項目の上段の値は波高に関して, 下段の値は周期に関しての指標を示している. また, 実際の海洋工事において工事の可否判断となることが多い, 波高が 1 m 以下と算定したときにそれがあつてはいるかどうかの的中率も示してある.

この表3から, 常陸那珂を対象とする場合, 波高に関して CC, RMSE, BM を参考にして NOAA WW3 と ECMWF ERA5 の組合せ, 周期に関しては JMA GWM と ERA5 の組合せが良いことが改めてわかる. なお, それらの誤差指標の値よりは若干悪くなるが, 3つの全球波浪データを使うことも可能である.

いずれにせよ, GMDH の部分表現式を用いることにより, 単独で全球波浪データを使う場合に比べて精度良く 1 週間先までの波浪予測ができる可能性がわかつた.

本研究では, 波浪データとして入手が容易な過去の予報初期値と解析値を利用したが, 今後, 6 時間おきに配信される実際の全球波浪予報値を用いて実際に週間予測値を算出し, 観測値との比較を行いたい.

#### 4. まとめ

本研究は, 作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画に役に立つ波浪予測システムを確立することを目的として, 全球波浪予報値と Group Method of Data Handling における部分表現式を用いた 1 週間先までの波浪予測が可能なモデルを構築し, 過去の予報初期値 (JMA GWM, NOAA WW3) と解析値 (ECMWF ERA5) を用いて精度検証を行った. 主要な結果は, 以下のようである.

1) 1 週間先までの波浪予報値には日本気象庁の全球波浪数値予報モデル JMA GWM, アメリカ海洋大気庁の全球波浪予報モデル NOAA WW3 および欧州の海洋波浪モデル ECMWF HRES-WAM があるが, 日本沿岸における有義波高および周期の予報値としていずれかの予報値を単独で用いると, 欧州の全球波浪モデルの有義波高値を除いて, その精度は良くなかった.

- 2) 2種類の全球波浪解析値を用いて算定値を求めた場合, 有義波高について最も一致度の良かった組み合わせはアメリカ海洋大気庁のモデルと欧州の海洋波浪モデルを用いたものであり, 周期については, 日本気象庁のモデルと欧州のモデルを用いたものであった.
- 3) 3種類の全球波浪データを用いることにより精度が良くなるのではないかと予想したが, 2種類の組合せによる算定値より精度は良くなかった.
- 4) 常陸那珂においては, 式(12)および式(13)で示される算定値を用いれば, 有義波高に関しては相関係数は 0.90, 周期に関しては 0.76, 自乗平均平方根誤差に関しては波高で 0.29 m, 周期で 1.02 s, 1.0 m 以下の作業可能波浪と算定した場合の的中率は 0.87 とかなり良いことがわかつた.

謝辞: 本研究は, (一財) 港湾空港総合技術センター研究開発助成による研究成果の一部であり, ここに謝意を表します. また, 本研究を行うに当たり, ナウフアスのデータを使用いたしました. 関係者の皆様には波浪観測結果の利用に関しましてお世話になりましたことを感謝いたします.

#### 参考文献

- 1) Tom, T. H. A., 池本藍, 間瀬肇, 安田誠宏, 森信人: 台風シーズンにおけるリアルタイム波浪予測と精度検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, pp. 161-165, 2010.
- 2) 鈴木善光, 高山知司, 吉永泰祐, 岡田弘三, 窪田和彦, 宇都宮好博, 松藤絵理子, 君塚政文: WAM と WAVEWATCH III による推算波浪の再現特性, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I\_265-I\_270, 2016.
- 3) 間瀬肇, Tom, T. H. A., 池本藍, 川崎浩司: WAVEWATCH III を外部領域に用いた波浪予測システムの精度検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I\_139-I\_144, 2017.
- 4) 青野利夫, 後藤智明, 佐藤一央: 沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測, 港湾技術研究所報告, Vol. 32, No. 3, pp. 39-64, 1993.
- 5) 津田宗男, 松見吉晴, 金珠列, 松田信彦, 江口三希

子：円滑な海上施工管理のための波浪と作業船の動揺のリアルタイム予測, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I\_151-I\_156, 2017.

6) Ivakhnenko, A. G.: Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, *Automatica*, Vol. 6, pp. 207-219, 1970.

7) Lee, S. B. and Suh, K.-D.: Development of wave overtopping formulas for inclined seawalls using GMDH Algorithm, *KSCE Journal of Civil Eng.*, pp.1-12, 2019. DOI: 10.1007/s12205-019-1298-1

8) 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)：<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 参照2018-03-15.

9) 田村坦之, 近藤正: 最近のGMDHの方法論と応用, 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌, Vol. 23, pp. 104-111, 1978.

(2018. 10. 1 受付)

## ONE WEEK WAVE PREDICTION METHOD APPLYING GMDH'S PARTIAL EXPRESSION TO GLOBAL WAVE FORECAST AND VALIDATING ACCURACY

Sooyoul KIM, Masahide TAKEDA, Hajime MASE, Yoshinosuke KURAHARA, Chisato HARA, Yamato NISHIYAMA, Koji KAWASAKI and Hideaki MIZUTANI

There are many kinds of global wave forecasts currently available, however, from the resolution point of view, we cannot expect accuracy of their predictions one week ahead, for the coast of Japan. This study aims to establish a wave prediction method to aid in the scheduling of ships for work in harbor and marine construction. We proposed a method of improving wave prediction up to one week ahead and verified its accuracy for a target area at the Port of Hitachinaka, using global wave forecast values and the partial expression of the Group Method of Data Handling. It was found that when global wave data by the NOAA and ECMWF wave models were used together in the partial expression, predictions of significant wave heights agreed well with the observed ones; for significant wave periods, data combination of both the Japan Meteorological Agency and ECMWF wave models gave the best performance. This method can be applied to any location by applying the same technique to the forecasted and observed wave data for that area.