

論文紹介  
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

中市新太

富山県立大学  
u020025@st.pu-toyama.ac.jp

June 23, 2023

## 背景

波浪予測は主に定期船の運行，漁場への出漁，港湾・海洋工事の作業，海水浴などの海域利用の可否判断，台風等による高波のリアルタイム把握に使われる．これらの予測は長くとも三日先までの短期予測を使用し，先行研究も盛んにおこなわれている．

しかし，ケーソン据え付けなどの陸から遠い沖合を対象とした大規模な工事では，一週間程度の中期予測が必要である．

## 目的

GMDH により一週間先までの波浪予測モデルを作成する．

## 中期予測の先行研究

全球波浪数値予報モデル GPV(JMA GWM)

波浪アンサンブルモデル GPV(JMA WEM)

波浪モデルに WAVEWATCH 3 を用いた multi1(NOAA WW3)

波浪モデルに WAM を用いた HIRES-WAM(ECMWF HIRES-WAM)

→空間解像度が低く、日本沿岸の波浪予測値としては十分な制度にならない  
数か所の海象・気象観測データを入力として予測

→予測のたびに観測値を得る必要がある

→毎回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対応できない

→スパイクノイズが現れる

## GMDH の利点

入力変数が多い場合

→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結びつけることができる

入力変数が少ない場合

→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

→関係式を得ることができれば、入力変数を代入して簡単に予測ができる  
また、係数を調べることでどの入力変数の影響が大きいのか調べることができる

## GMDH のアルゴリズム

入力変数  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  に対して出力変数  $\phi$  を作る.  
Kolmogorov-Gabor の多項式を用いて,

$$\begin{aligned} \phi = & a_0 + \sum_{i=1}^N a_j x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ijk} x_i x_j x_k + \end{aligned} \quad (1)$$

このとき  $a$  はそれぞれ定数項である

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

図 1: 2

それぞれ  $b$  は定数項である.

このとき中間変数  $y_k$  は  $N(N-1)/2$  こできる.

$y_k$  を入力変数として右辺に代入を繰り返すことで完全方程式に近づける.

## GMDH のアルゴリズム

トレーニングデータ  $N_t$  チェッキングデータ  $N_c$  検証データ  $N_p$  とする.  
式 2 に  $N_t$  を用いて係数  $b$  を自乗和  $e_{TRN}$  が最小になるように求める.

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

図 2: 自乗和

## GMDH のアルゴリズム

自乗和は 5-10 式の連立方程式によって求められる。

はじめに

GMDH

研究手法

研究手法

研究結果

まとめ

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

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

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

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

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

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

図 3: 自乗和

## GMDH のアルゴリズム

チェックングデータに対する二乗誤差  $e_{CHK}$  が小さいものから順に  $L$  種類  
の中間変数を選ぶ。

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

図 4: 二乗誤差

自乗誤差が改善されなくなったところで繰り返しを打ち切る。



## 出力変数

出力変数は、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。

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。

## 入力データ

本研究で使用する予測データは3種類とし、それぞれの格子間隔、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示す。

	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF HRES-WAM
Grid Interval	0.5° x 0.5°	0.5° x 0.5°	0.125° x 0.125°
Calculation Area	Global 75°N - 75°S	Global 77.5°N - 77.5°S	Global (computed 90°N - 78°S) output artificially 90°N - 90°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° x 0.5°) 1hr increments	HRES atmospheric component 0.1° x 0.1°
Supporting Document	<a href="http://www.jmbcs.or.jp/jp/online/file/f-online20100.html">http://www.jmbcs.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 5: 入力データ

## 精度

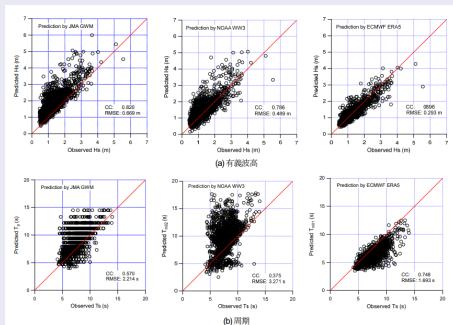


図 6: 全球波浪データと観測値の比較

JMA NOAA 観測値より非常に大きい  
ERA5  $H_s$  は一致するが,  $T_s$  は小さい

## データ

トレーニングデータ 2010年1月1日-2013年12月31日

チェックングデータ 2014年1月1日-12月31日

検証データ 2015年1月1日-2015年12月31日

観測位置は常陸那珂 (36.395° N, 140.653° E)

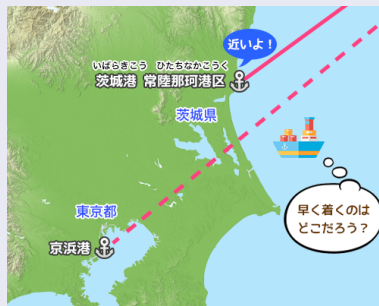


図 7: 常陸那珂港

## 組み合わせ

はじめに  
GMDH  
研究手法  
研究手法  
研究結果  
まとめ

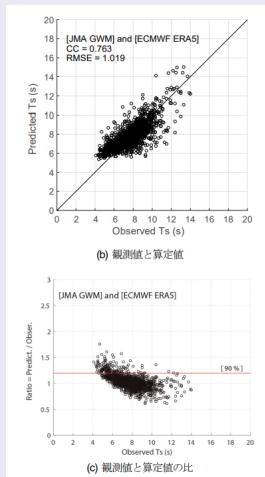
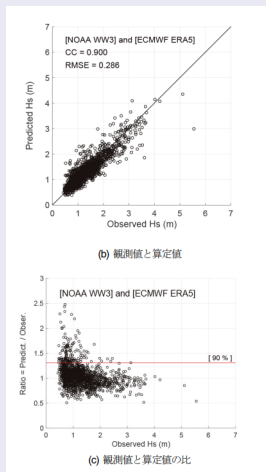


図 8: 算定値と観測値の比較

## 係数

$H_s, T_s$  とともに最も一致度が高かったものを組み合わせた

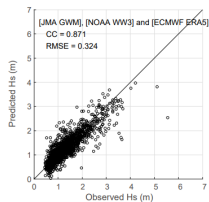
$$\begin{aligned} H_{S_{(WW3+WAM)}} = & -0.123 - 0.137 H_{S_{(WW3)}} + 1.285 H_{S_{(WAM)}} \\ & - 0.154 H_{S_{(WW3)}} H_{S_{(WAM)}} - 0.276 H_{S_{(WW3)}}^2 \\ & + 0.401 H_{S_{(WAM)}}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

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

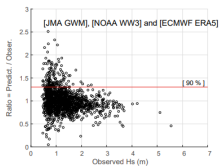
図 9: 係数

## 全て使用する

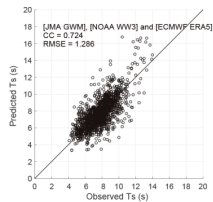
すべて組み合わせた結果精度が落ちた



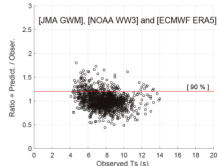
(b) 観測値と算定値



(c) 観測値と算定値の比



(b) 観測値と算定値



(c) 観測値と算定値の比

## 全組み合わせ

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

$$RSSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N R_i^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2}}$$

	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

図 11: 一致度



## まとめ

それぞれの予測モデルは単独での精度はよくなかった.

波高は NOAA と ERA5

周期は JMA と ERA5 の組み合わせが最も精度がよくなった.

## 今後の展開

リアルタイムで実際に週間予測を行う.