

## 工学ジャーナル 第 10 巻

### 目 次

#### 一般投稿論文

非線形ばねによるゴム覆帯走行車両の振動特性	仲田 利通・曾我部 雄次	1
分岐路を持つサーキットにおける最適速度モデル	松永 奈穂子・吉川 周二 玉城 龍洋	11
SDP 観測風資料およびメソ気象モデル MM5 に基づく瀬戸内海 の海上・沿岸風資料の精度評価	大福 学・山口 正隆 野中 浩一・畑田 佳男	16
瀬戸内海における 1918 ～ 2005 年の海上風・波浪推算資料 を用いた風速と波高の極値の推定	畑田 佳男・山口 正隆 野中 浩一・大福 学	26
気圧観測資料を用いた内湾・内海における長期の風・波浪 推算システムの構築と風速・波高の長期変動の解析	山口 正隆・畑田 佳男 大福 学・野中 浩一	56

#### 投稿規程等

愛媛大学工学部工学ジャーナル論文投稿規程	76
工学ジャーナル論文申込書	78
著作権委譲書	79
愛媛大学工学部工学ジャーナル論文投稿規程第 7 に定める投稿料等経費について	80
愛媛大学工学部工学ジャーナル論文執筆規程	81
工学ジャーナル投稿原稿の見本	83

March 2011  
Ehime University  
Faculty of Engineering

## Annual Journal of Engineering vol. 10

### CONTENTS

#### Papers

Vibration Properties of a Transporter with a Rubber Crawler System Using Nonlinear Springs	Toshimichi NAKATA and Yuji SOGABE	1
Optimal Velocity Model for Circuit with Branch	Naoko MATSUNAGA Shuji YOSHIKAWA and Tatsuhiko TAMAKI	11
Estimating Accuracy of Wind Data over the Seto Inland Sea Based on SDP Overland Wind Data and Mesoscale Meteorological Model MM5	Manabu OHFUKU Masataka YAMAGUCHI Hirokazu NONAKA and Yoshio HATADA	16
Estimating Extremes of Wind Speeds and Wave Heights on the Seto Inland Sea Using Hindcast Data for Intense Storms during the Period of 1918 - 2005	Yoshio HATADA Masataka YAMAGUCHI Hirokazu NONAKA and Manabu OHFUKU	26
Development of a Long-Term Wind and Wave Hindcast System in the Inner Bay Areas and the Inland Sea of Japan Using Measurement Data of Atmospheric Pressure and Trend and Jump Analyses of Winds and Waves	Yoshio HATADA Masataka YAMAGUCHI Hirokazu NONAKA and Manabu OHFUKU	56

## 非線形ばねによるゴム覆帯走行車両の振動特性

### Vibration Properties of a Transporter with a Rubber Crawler System Using Nonlinear Springs

仲田利通<sup>\*1</sup>・曾我部雄次<sup>\*2</sup>

Toshimichi NAKATA<sup>\*1</sup>・Yuji SOGABE<sup>\*2</sup>

This study is aimed at the construction of a dynamic model that can express the vibration properties of a vehicle with a rubber crawler system while running on irregular road surfaces in order to obtain guidelines for the reduction of running vibration. Experiments were conducted to measure the vibrational acceleration arising from running over the road surface which is made uneven by setting pipes into the surface. The model was validated by comparing the experimental results with those of simulations based on equations of motion using the nonlinear dynamic model having two degrees of freedom. The proposed mechanical model can be effective to obtain design guidelines for reducing the running vibration of transporters having rubber crawler system.

*Key words* : rubber crawler system, coreless rubber crawler, nonlinear spring, uneven road surfaces, dynamic model

#### 1. 緒言

建設機械や農業機械など産業界で広く使用されている覆帯走行構造の移動型機械においては、走行における安全性の向上、操作者、積載物への負荷低減や環境への負荷低減が重視されている。

移動型車両が受ける負荷では、特に路面走行による振動が、操作者や積載物あるいは搭載された作業機の性能、および機械の耐久強度に大きな影響を及ぼす。ロボット搭載車両では各種の土壌において正確に走行するだけでなく、障害物、および自己位置を認識しながら危険回避することも要求される<sup>[1]</sup> 場合がある。したがって、ゴム覆帯走行車両構造においては、路面凹凸から受ける振動を低減し、さらにはその運動を予測することが必要となってくる。

ゴム覆帯走行構造は、牽引力や剛性を向上させるために、従来、駆動スプロケットのピッチ間隔で芯金が埋め込まれている覆帯が使用されて来た。このような“芯金あり”ゴム覆帯は、転輪荷重による覆帯の圧縮変位量が芯金ピッチ間において異なるため転輪の上下変動が発生<sup>[2]</sup> し、しかも芯金が転動抵抗の変動の原因<sup>[3]</sup> となる。また、ゴム覆帯のばね定数、粘性減衰係数も芯金ピッチ間で変化<sup>[4]</sup> するため水平路面での走行においてさえも振動が発生する。これに対し近年普及してきているゴム覆帯の“芯金なし”構造（芯金なしゴム覆帯）は、振動の低減とこれに伴う騒音の低減、軽量化と転動抵抗の減少による燃費低減、また、ゴム覆帯の廃棄時のリサイクル分解性の容易化など、芯金なし構造は芯金あり構造に比べて数々のメリットがある。

ゴム覆帯走行車両構造は、主にトラックフレーム、駆動スプロケット、転輪の走行部とゴム覆帯で構成される。移動型車両の振動特性は、走行速度（車速）、路面状態、車両構造、およびゴム覆帯の力

\*1 (株)アテックス (〒791-8524 愛媛県松山市衣山 1-2-5 TEL089-924-7161)

Atex Co.,Ltd, 1-2-5Kinuyama, Matsuyama,791-8524,Japan

\*2 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番 TEL 089-927-9711)

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577Japan

原稿受理 平成 22 年 10 月 29 日

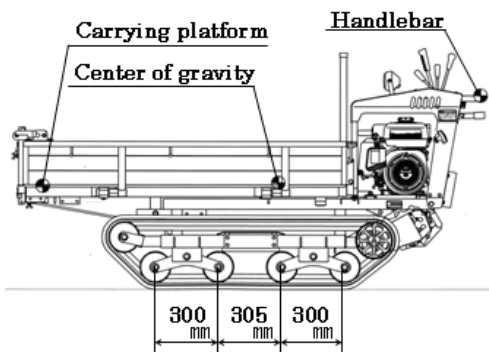


Fig.1. Test machine

学特性に影響される。従来から履帯走行部の力学特性に関して様々な研究がなされている。光岡ら<sup>[5]</sup>は、転輪荷重とゴム履帯の変位間の関係は硬化ばね特性を持つ非線形性を示すのに対して、ラグ(芯金)付近は線形であることを示している。井上ら<sup>[6]</sup>は正確なゴム履帯車両の走行シミュレーションの確立には、線形モデルから非線形モデルへの拡張が必要としている。また野口ら<sup>[7]</sup>は、走行部の上下方向およびピッチング方向の時間変位のみを観測データとして、実波形に最適にフィットするモデルパラメータを求めることが可能であることを明らかにしている。しかし、これらの研究は、芯金ありゴム履帯の水平路面上走行の基本振動特性を把握する研究である。芯金なしゴム履帯の場合は、非線形ばねとなることが予想され、この走行車両構造における実際の不整地走行時の振動の研究が望まれる。

著者ら<sup>[8]</sup>は、ゴム履帯車両の走行時における人体が感じる振動レベルを評価し、振動レベルでの周波数補正加速度実効値が車速の2乗、および路面の凹凸高さに比例することを明らかにするとともに、芯金なしの方が芯金ありよりも低いと報告している。本論文では、芯金なしゴム履帯走行車両の走行振動低減に関する振動モデルの構築により、凹凸路面モデルの突起乗り越え時に受ける振動特性を明らかにし、振動低減の合理的設計開発の指針を得るために、その力学上の振動特性を考察した。

## 2. ゴム履帯走行車両の構造

Fig.1 に供試機を、Fig.2 にゴム履帯走行装置の構造を示す。走行部は、駆動スプロケット a、ゴム履帯 b、転輪 c、回動支点 d、遊転輪 e、トラックフレーム f から構成されている。前側、後側において、2 個ずつの転輪が連結され、それぞれ前後 2 箇所の回動支点を中心に回転して路面凹凸に応じて揺動する構造である。回動支点にはストッパが設けられており、ストッパは転輪が揺動する範囲を、第 1 転輪と第 4 転輪は水平より下方へ揺動、第 2、3 転輪はそれに応じて上方に揺動するよう限定している。この揺動範囲により、路面の凹凸に追従し機体の振動を低減して、安定性が生じる。前方の遊動輪は履帯に適正な張力を与えるため、トラックフレームに設けられたアジャストボルトで支持されている。

Fig.3 に本研究で使用した芯金なしゴム履帯と転輪との接する状態を示す。ゴム履帯は、ラグ、芯体中心を通るスチールコード、および台部(ガイドレール)から構成される。駆動スプロケットと転輪は台部と突起の両側面に接し、横ずれ、および下方向への離れによる脱輪を防いでいる。さらに、駆動スプロケットへゴム履帯が巻き付きやすくして牽引力を高めるために、突起の隅部に凹溝を設けた。Table 1 に供試機の主要諸元を、Table 2 に供試したゴム履帯の主要諸元を示す。

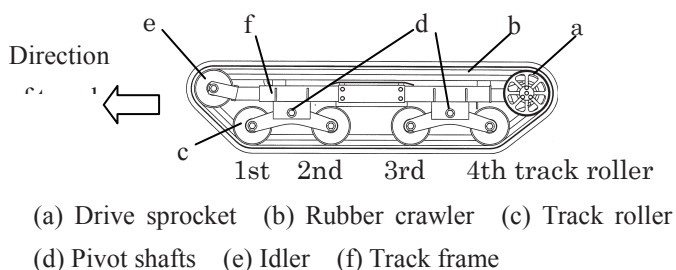


Fig.2. Driving mechanism of crawler type transporter

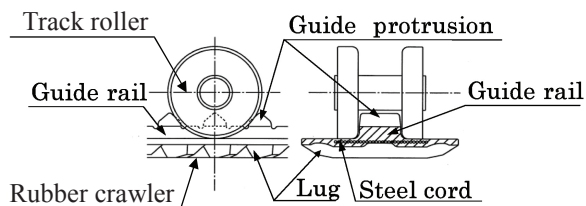


Fig.3. Rubber crawler and track roller

Table 1 Main specifications of the test machine

Drive system	2WD
Dimensions (mm)	Length×Width×Height 2,245×1,225×1,155
Mass (kg) (Including crawler)	295
Engine	
Type	Air-cooled, 4-stroke, canted, overhead valve, single-cylinder, gasoline engine
Displacement (L)	0.171
Maximum power output (kW/rpm)	4.1/2000
Undercarriage	
Crawler size (mm)	Width×Pitch×Links 250×72×42
Track roller pitch	#1-2: 300, #2-3: 305,

Table 2 Specification of the rubber crawler

Lug shape	S-shaped
Steel cords	
Number	64±4
Material	SWRH
Allowable tension (N/cord)	1500
Core material	None
Rubber hardness Hs (°)	Lug side 60±5 Track roller side 83±5

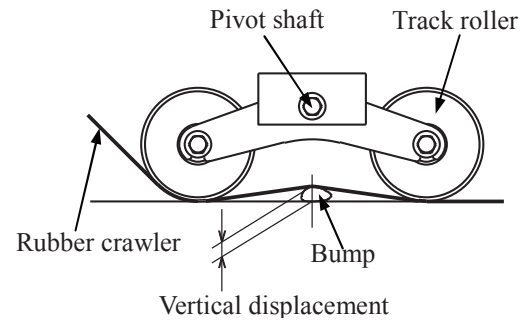


Fig.4. Deformation of rubber crawler

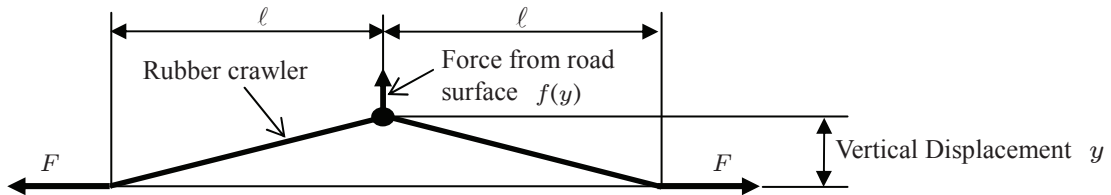


Fig.5. Deformation model of the Rubber crawler when running over a protuberance

### 3. ばね定数と減衰粘性係数

#### 3.1 非線形ばね定数

Fig.4 に供試機が路面の突起を乗り越えるときの、転輪とゴム覆帯のたわみの状態を示す。供試機が実際の路面を走行する場合には、ゴム覆帯は路面の突起から力を受け、ゴム覆帯の両端には張力が作用する。Fig.5 は転輪が路面凸部を乗り越えるときをモデル化したものである。ゴム覆帯のたわみ量  $y$  とゴム覆帯に加わる上下方向の力  $f(y)$  の関係<sup>[9]</sup>は、

$$f(y) = \frac{2F}{\ell}y + \frac{SE}{\ell^3}\left(1 - \frac{F}{3E}\right)y^3 \quad (1)$$

となる。  $S$  は覆帯断面積、  $E$  は縦断係数、  $F$  は張力である。したがって、ばね定数は、

$$k(y) = \frac{df(y)}{dy} = \frac{2F}{\ell} + \frac{3SE}{\ell^3}\left(1 - \frac{F}{3E}\right)y^2 \quad (2)$$

のように求められる。これより、変形量に依存した非線形硬化ばねとなることがわかる。

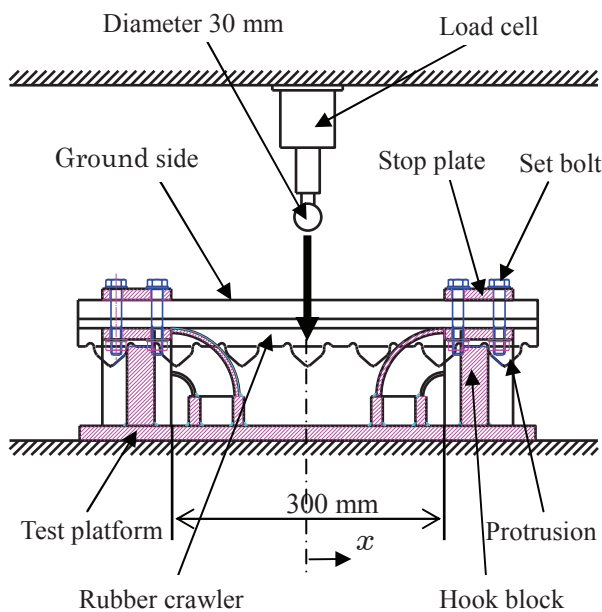


Fig. 6. Loading test of the test piece made of coreless rubber crawler

### 3.2 ゴム覆帯試験片を用いた加圧試験

Fig. 6 に加圧試験機による加圧試験を示す。加圧試験機は、島津製作所製万能材料試験機（最大49kN）を使用した。試験台には、転輪を1/4にカットしたものを溶接し、そのピッチは供試機と同じ300mmとした。試験台に切り取った7ピッチ分のゴム覆帯を接地側を上にして、ゴム覆帯の突起をフックブロックにセット（張力0）し、フックブロックの上側でゴム覆帯の両端を押さえプレートではさみ、張力が加わってもずれないように8本のボルトで締め付けた。走行実験に使用した凹凸路面モデルのパイプ（5章5.2実験条件参照）と同じ直径（30mm）で長さ300mmの丸棒をロードセル側に取り付け、走行試験と同様にゴム覆帯の長手方向と直角とした。ロードセル側を下降させ、ゴム覆帯の接地側から加えた荷重とゴム覆帯の上下変位（たわみ量）を記録した。

Fig. 7 に加圧試験機で加えた荷重とゴム覆帯の上下変位の関係を示す。加圧位置は、転輪間距離300mmの中央、および中央から25, 50, 75mmの4カ所とし、加圧速度は10mm/minとした。Fig. 8にFig. 7から求めたばね定数と上下変位の関係を示す。ただし、実機ではゴム覆帯が左右2本あるため、ゴム覆帯2本分のばね定数を示している。

上下変位の増加に伴うばね定数の増加の割合は、加圧の4カ所ともに除々に大きくなり非線形であることがわかる。また、加圧位置が転輪に近づくにつれ増加率が大きくなっている。実走行時には路面凹凸が転輪間を移動することにより加圧箇所が変化する。それに応じてばね定数も、おおむねFig. 8中  $x=0\sim75\text{ mm}$  のグラフの範囲内を変化していくことが推定される。

### 3.3 実機による加圧試験

実機荷台への加圧試験は、ウェイトを機体重心の真上に積載し700Nずつ増減させた。機体を前進させながら地面にセットした直径30mmのパイプがゴム覆帯走行装置の第1と第2転輪の中央（前側回転支点の真下）と第3と第4転輪の中央（後側回転支点の真下）になるところで停止させた。試験は

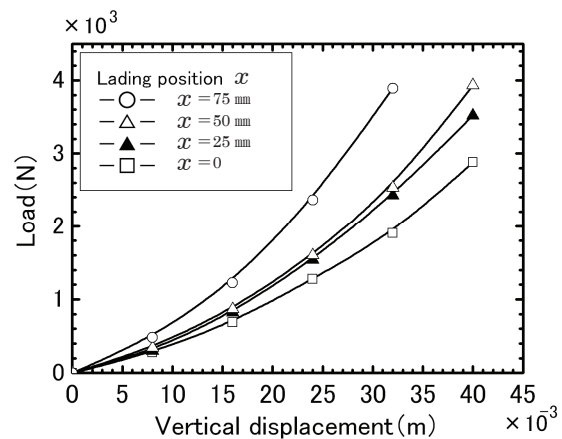


Fig. 7. Relation between vertical displacement and applied load to the test piece

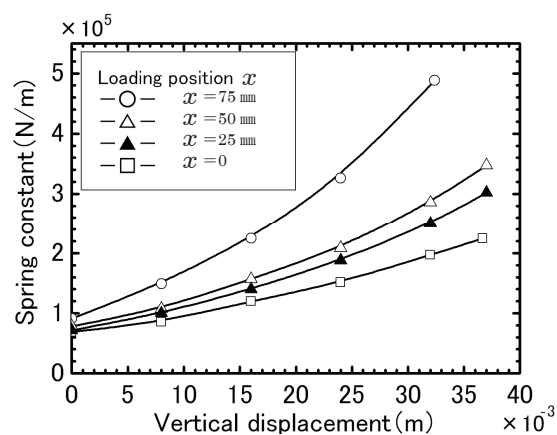


Fig. 8. Relation between Spring constant and vertical displacement of the test piece

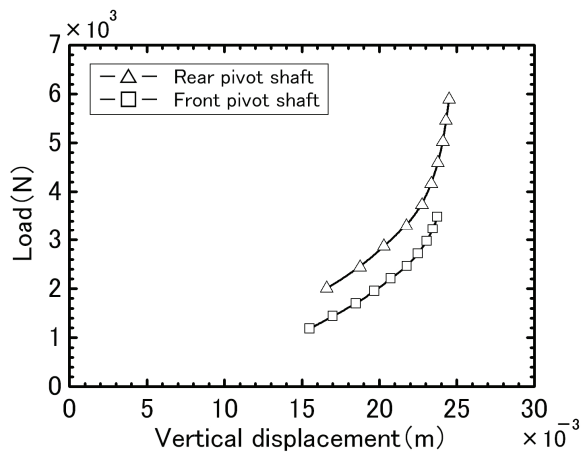


Fig.9. Relation between applied load and vertical displacement at pivot shaft

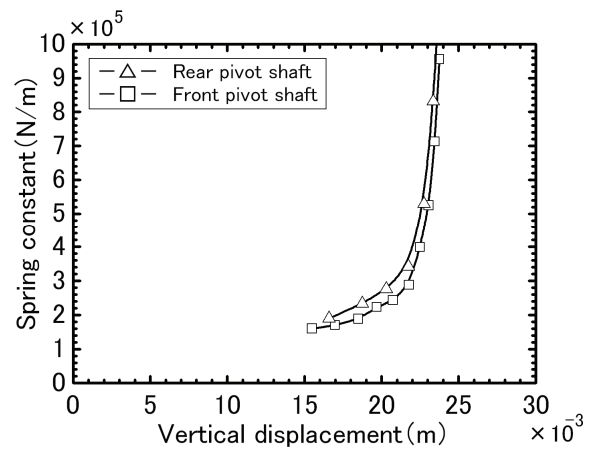


Fig.10. Relation between spring constant and vertical displacement at pivot shaft

それぞれ前側，後側を別に行った。機体およびウエイトの総重量を，それぞれ前側と後側へ配分し，配分荷重とゴム覆帯の上下変位（たわみ量）を記録した。総重量の配分は，機体重心位置と，前側回転支点の距離（380mm），および後側回転支点の距離（225mm）より算出した。

Fig.9 に転輪の前側，後側の回転支点の荷重とゴム覆帯の上下変位の関係を示す。上下変位は左右の値をそれぞれ平均した。

Fig.10 に Fig.9 から求めたばね定数と変位の関係を示す。変位の範囲が限定されているのは，荷重の範囲が機体質量からウエイト最大積載量までの範囲であるためである。

上下変位の増加に伴うばね定数の増加の割合は大きくなっており，ゴム覆帯試験片を用いた加圧試験結果と同様に非線形性を示している。ばね定数は前側，後側共に変位 21mm あたりから急上昇している。この理由は，積載荷重が低い間はゴム覆帯の変形量が少なく，転輪が地面から浮いていたが，積載荷重の増加によって変位量が大きくなり転輪が接地し，ゴム覆帯自体の圧縮によるばね定数に移り変わったためである。後側回転支点のばね定数が前側よりも大きいのは，後側のゴム覆帯の張力が前側よりも高いためである。

### 3.4 非線形ばね定数の推定

Fig.8 の加圧試験機による実験から得られたばね定数，および Fig.10 の供試機から得られた前側，および後側の回転支点におけるばね定数を比較検討し，Fig.11 のようにばね定数  $k(y)$  と変位  $y$  の関係を推定した。上下変位が小さい  $0 < y < 17.5$  mm 程度までは，Fig.8 中  $x = 0 \sim 75$  mm のグラフの範囲内で変化するものと考え，式(2)より  $k_i(y) = \alpha_i + \beta_i y^2$  ( $i = 1$ : 前側， $i = 2$ : 後側) とした。Table 3 に  $\alpha_i$ ， $\beta_i$  の値を示す。変位が大きい  $y > 17.5$  mm の範囲では，実機による加圧試験の結果に従うこととし，全体を

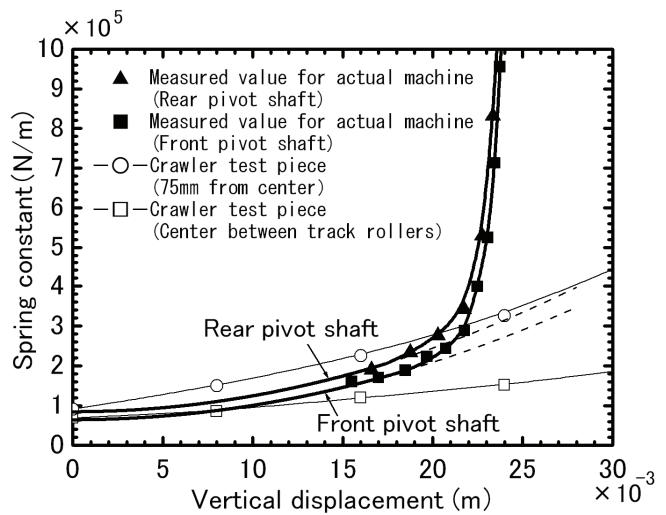


Fig.11. Estimated spring constant

Table 3 Nonlinear spring constant coefficient

Position	Range(mm)	$\alpha$ (N/m)	$\beta$ (N/m)
Front	$0 < y < 17.8$	$6.46 \times 10^4$	$3.60 \times 10^8$
Rear	$0 < y < 17.4$	$8.47 \times 10^4$	$3.99 \times 10^8$

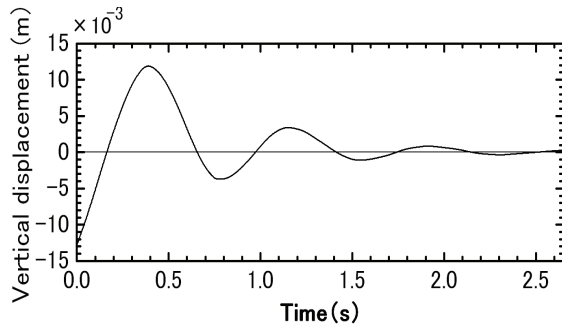


Fig.12. Free vibration of rear pivot shaft

数値関数として定義した。

### 3.5 粘性減衰係数

供試機の後側回動支点の真下の路面上にパイプを置き、ハンドルを鉛直下方向に 700N で押して自由振動させ、そのときの後側回動支点の上下変位をカメラで撮影し、動画より上下変位を測定した。

Fig.12 に後側回動支点の自由振動時の上下変位を示す。Fig.12 より対数減衰率  $\delta$  を算出し、 $\delta \doteq 2\pi\zeta$  の関係より減衰比  $\zeta$  を求めたところ、 $\zeta = 0.20$  となった。一般に、質量  $M$ 、ばね定数  $k$  の 1 自由度減衰振動系の場合、粘性係数  $c$  と減衰比  $\zeta$  の関係は、 $c = 2\zeta\sqrt{Mk}$  である。

本研究の場合、前側および後側の 2 箇所に回動支点があり、重心は機体の後方にあるため、全質量を、前側および後側回動支点と重心との距離に基づき配分するものとし、前側回動支点、後側回動支点の粘性減衰係数  $c_1(y)$ 、 $c_2(y)$  を、次式(3)のように決定する。

$$\left. \begin{aligned} c_1(y) &= 2\zeta \sqrt{\frac{225}{380+225} M \times k_1(y)} \\ c_2(y) &= 2\zeta \sqrt{\frac{380}{380+225} M \times k_2(y)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

## 4. 振動モデル

### 4.1 2 自由度振動モデル

本研究のゴム履帯走行車両での実際の使用における主な問題は、操作者が保持するハンドルと荷台の上下、およびピッチ方向の振動である。本供試機の運動は、剛性運動の力学モデルとして扱うことが妥当であることは検証<sup>[8]</sup>されており、供試機を、上下とピッチングを伴う Fig.13 のような 2 自由度振動モデルと考え振動特性を検討する。Fig.13 中のパラメータは以下の通りである。なお、添え字  $i$  は、前輪側 ( $i=1$ ) または後輪側 ( $i=2$ ) を示す。

$x$  : 機体重心の水平位置  
 $y$  : 機体重心の上下変位

$\theta$  : 機体のピッチ角変位  
 $k_i$  : 回動支点部の非線形ばね定数

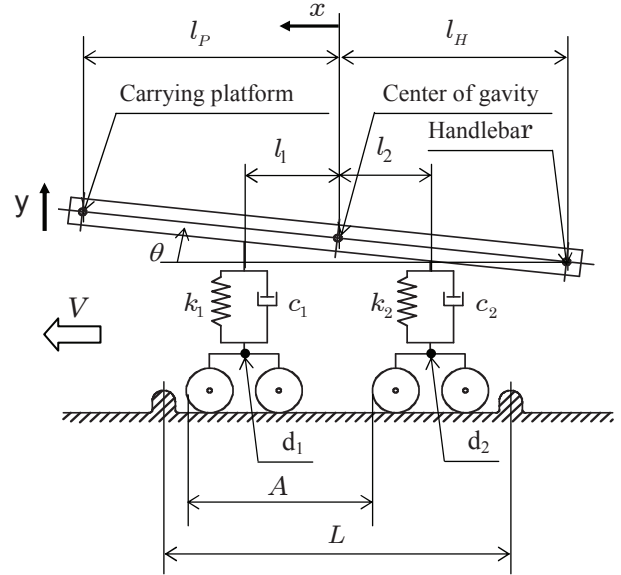


Fig. 13. Vibration model with two degrees of freedom

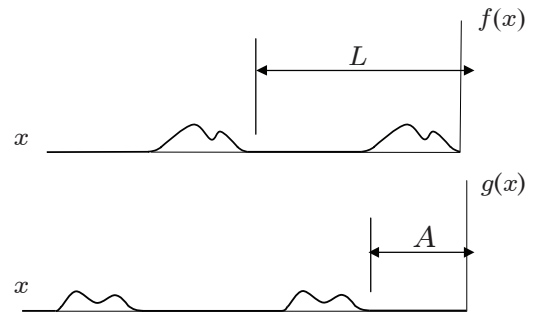


Fig.14. Relation between  $f(x)$  and  $g(x)$



$c_i$  : 回動支点部の粘性減衰係数  
 $l_i$  : 機体重心から回動支点までの水平距離

$l_p$  : 機体重心から荷台までの水平距離  
 $l_H$  : 機体重心からハンドルまでの水平距離

ただし、 $l_p$ ,  $l_H$  は、荷台およびハンドルパイプ上面に振動加速度ピックアップを設置した位置までの水平距離とする。 $A$  は第 1 転輪と第 3 転輪との距離であり、 $L$  は路面の突起間距離である。

Fig.14 において、 $f(x)$ ,  $g(x)$  は、それぞれ前側回動支点  $d_1$  および後側回動支点  $d_2$  の上下変位を、機体重心の移動距離  $x$  の関数で表したものである。Fig.13 における前側回動支点  $d_1$ 、および後側回動支点  $d_2$  の走行に伴う上下動として、Fig.14 のような  $f(x)$ ,  $g(x)$  を強制変位として与える。

## 4.2 運動方程式

Fig.13 のようにモデル化された車両が凹凸路面上を走行するときの、機体重心の上下方向、および重心回りの運動方程式は式(4)のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l}
 \cdot \text{重心の上下動} \\
 M\ddot{y} + \{c_1(y) + c_2(y)\}\dot{y} + \{k_1(y) + k_2(y)\}y + \{c_1(y)l_1 - c_2(y)l_2\}\dot{\theta} + \{k_1(y)l_1 - k_2(y)l_2\}\theta \\
 \quad = c_1(y)f(x) + k_1(y)f(x) + c_2(y)g(x) + k_2(y)g(x) \\
 \cdot \text{重心まわりの回転} \\
 I\ddot{\theta} + \{c_1(y)l_1 - c_2(y)l_2\}\dot{y} + \{k_1(y)l_1 - k_2(y)l_2\}y + \{c_1(y)l_1^2 + c_2(y)l_2^2\}\dot{\theta} + \{k_1(y)l_1^2 + k_2(y)l_2^2\}\theta \\
 \quad = \{c_1(y)f(x) + k_1(y)f(x)\}l_1 - \{c_2(y)g(x) + k_2(y)g(x)\}l_2
 \end{array} \right\} \quad (4)$$

ただし、 $M$  は機体と積載物の総質量、 $I$  は、機体の重心回りの慣性モーメントを示す。機体が速さ  $V$  で走行する場合、 $x = Vt$  ( $t$ : 時間) として、機体重心の上下動  $y(t)$ 、重心回りの角変位  $\theta(t)$  を、数値解析ソフトウェア Mathematica によって解析する。荷台の上下方向の変位  $y_p$ 、およびハンドルの上下方向の変位  $y_H$  は、

$$\left. \begin{array}{l}
 y_p = y + l_p\theta \\
 y_H = y - l_H\theta
 \end{array} \right\} \quad (5)$$

のように求められる。

## 5. 走行実験

### 5.1 振動測定装置

小型 3 軸加速度変換器 (KYOWA 製 AS-TG) を、Fig.1 に示す荷台、ハンドルの 2 点に設置し、振動加速度の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の 3 方向同時測定を行う。なお、 $z$  は進行方向に垂直な水平方向である。測定された振動加速度データを積分処理することにより、変位データを求めることができる。

### 5.2 実験条件

路面は Fig.15 に示すような凹凸路面とし、水平なアスファルト路面上に供試機の接地長よりも長い 1.5m の一定間隔でパイプを並べた上を走行させ、次のような条件で振動加速度を測定した。

速度  $V$  は Table 1 に示す前進 4 種類で測定した。振幅 (路面の突起の高さ) はパイプ直径を 30mm とした。この理由は、実際の路上で最高速度の走行をするとき、操作者がスピードダウンしないで乗り越えようとする突起高さは 30mm 程度であり、それ以上大きくなると、ギヤチェンジやアクセル操作でスピードを落として走行するものと考えられるからである。質量  $M$  は供試機と積載ウェイトの総質量を示し、積載量は 0, 345, 660 kg の 3 種類とした。

積載物を含む全体の慣性モーメント  $I$  は、まず機体のハンドルを吊し、ハンドルを支点とした振り子の周期を測定することでハンドル中心の機体慣性モーメントを算出して、それより機体の重心回り

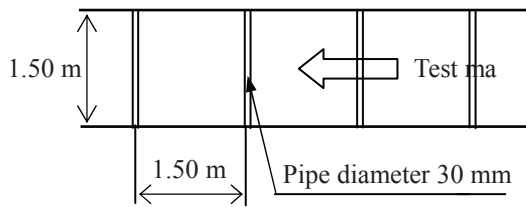


Fig.15. Uneven road surface model

Table 4 Moment of inertia

Laden weight(kg)	0	345	660
Moment of inertia (kg · m <sup>2</sup> )	113.1	143.4	201.5

の慣性モーメントを求め、次に、積載ウェイトによる慣性モーメントを加えた。なお、積載ウェイトの重心が機体重心の真上にくるように積載した。供試機の慣性モーメントの値を、Table 4 に示す。

Fig.16 に、Fig.15 の凹凸モデル路面上を走行するときの、前側および後側の回転支点の上下変位  $f(x)$ 、 $g(x)$  を示す。 $f(x)$ 、 $g(x)$  のデータを得るために、空荷の機体を、Fig.15 の凹凸モデル路面上で徐々に前進させ、前後左右の回転支点の上下変位を、機体が約  $\Delta x = 5 \text{ mm}$  進むごとに測定し、さらに左右の測定値の平均値をとった。Fig.15 の凹凸モデル路面の場合、 $f(x)$  の一山目のスタート後  $g(x)$  の一山目が始まるまでの移動距離は (Fig.14 の A) は 0.605 m である。それぞれの山が 1.5m ごとに現れ、 $f(x)$  のスタートから  $g(x)$  の一山目が終わる間は約 1.1 m となる。

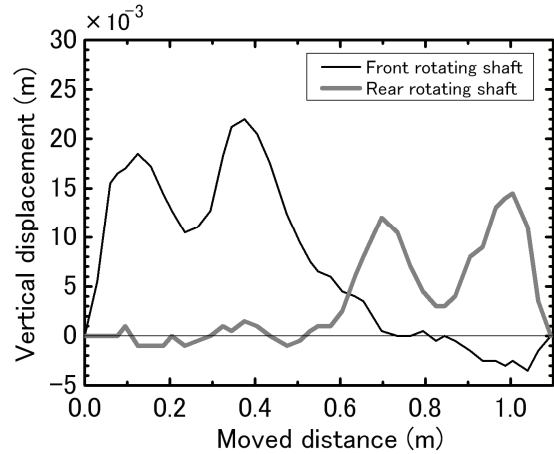


Fig.16. Vertical displacement of pivot shaft in unloaded state

## 6. 振動加速度の実測値とシミュレーション

運動方程式(4)を基に、数値解析ソフトウェア Mathematica で機体重心の振動加速度と機体のピッチ角加速度をシミュレーションした。データとして総質量、慣性モーメント、ばね定数、粘性減衰係数、および前側、後側回転支点の上下変位(5章 5.2 で示した路面凹凸データ)を入力して機体重心の振動加速度と機体のピッチ角加速度を算出し、式(5)より荷台、ハンドルの上下変位を求めた。

Fig.17, 18 に、345 kg のウェイトを積載して総質量を  $m = 640 \text{ kg}$ 、車速を  $V = 1.41 \text{ m/s}$  とした場合の、荷台とハンドルの上下変位の実測値とシミュレーション結果を比較して示す。Fig.15 のパイプ間距離が 1.50 m、車速が  $V = 1.41 \text{ m/s}$  であることより、車体全体がパイプ 1 個を乗り越える際の周期は 1.06 s となる。周期の前半部、すなわち第 1、第 2 転輪がパイプを乗り越えるときは、荷台の上下方向の変位は  $y_p > 0$ 、ハンドルの上下方向の変位は  $y_H < 0$  となり、逆に周期の後半部、第 3、第 4 転輪がパイプを乗り越えるときは、 $y_p < 0$ 、 $y_H > 0$  となっており、4 個の転輪がパイプを連続的に乗り越えて行く様子を読み取れる。重心が第 1 と第 2 転輪部よりも第 3 と第 4 転輪部に近く、パイプが第 3 と第 4 輪の転輪間に食い込み、波形に二つの山が見られる。第 3、4 転輪がパイプを乗り越えた後の振動は、パイプを乗り越えたときの機体慣性の影響と思われる。実測値と計算値の比較では、Fig.17 の荷台の上下変位において、 $y_p > 0$  の領域ではピーク値にわずかに実機の実測値が計算値よりも大きくなっているものの、波形はほぼ同一である。 $y_p < 0$  の領域で第 3 転輪乗り越え時に関して、実測値の方が遅くなっているのは、実機では第 3 転輪乗り越え時に転輪が上方に回転するため  $y_p$  の変位に反映されるのが遅れるためと考えられる。Fig.18 のハンドルの上下変位では、実測値が全体的に計算値より大きいものの、波形やピークの現れる時間はよく一致している。

Fig.19, 20 は、荷台とハンドルの振動加速度の実測値とシミュレーション結果の比較である。車速や総質量は Fig.17, 18 と同様である。4 本のパイプ乗り越えによる上下変位に伴った振動加速度の増減、

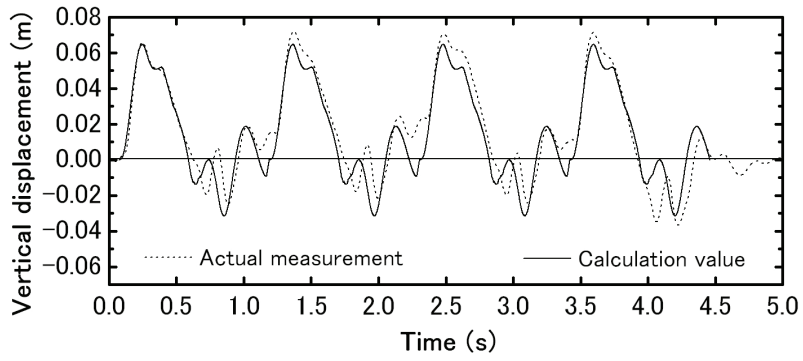


Fig.17. Vertical displacement at carrying platform

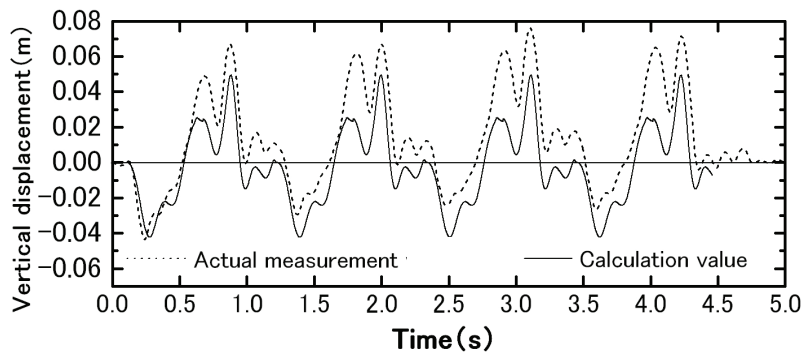


Fig.18. Vertical displacement at handlebar

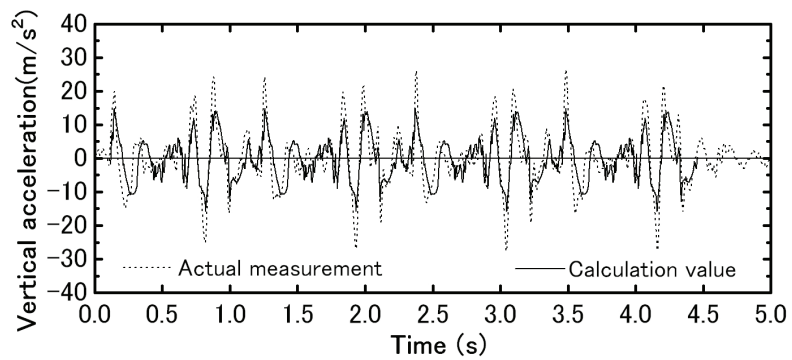


Fig.19. Vertical acceleration at carrying platform

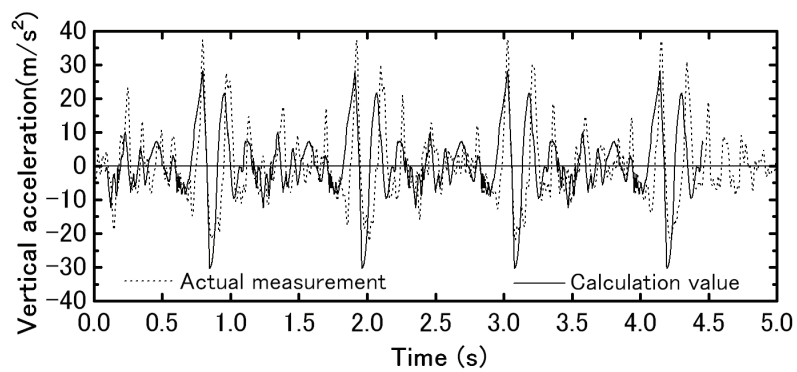


Fig.20. Vertical acceleration at handlebar

および周期性が読み取れる。実測値と計算値の比較では、荷台、ハンドルともに多少の誤差は見られるが、波形やピークの現れるタイミングはほぼ一致している。

これらは、空荷（総質量  $m = 295 \text{ kg}$ ）、および積載ウェイト  $660 \text{ kg}$ （総質量  $m = 955 \text{ kg}$ ）においても同様の結果であった。したがって、運動方程式(4)によるシミュレーションで機体の運動を説明できることが検証された。

## 7. 結言

本研究では、ゴム履帯走行構造の走行振動低減に関する設計指針を得るために、実路面走行時の振動特性を表現し得る力学モデルの構築を目的とした。凹凸路面モデル上を走行する車両振動の実測値と力学モデルによるシミュレーションとの比較から、運動方程式の妥当性を検証した。その結果、以下の振動低減に関する合理的設計開発のための知見を得た。

(1) 連結された 2 個の転輪を含む回動支点およびゴム履帯部の力学特性を、硬化ばね特性を持つ非線形形ばねでモデル化した。

(2) 突起乗り越え走行における機体の運動は、非線形ばね要素を導入した力学モデルの運動方程式で説明できる。

今後、導出された運動方程式、およびばね定数、粘性減衰係数を基に、振動低減の合理的設計開発を進めることが期待できる。

## 8. 引用文献

- [1] 近藤直ほか：農業ロボット（I）—基礎と理論—, pp.55, コロナ社, 2004.
- [2] 井上英二ほか：農用ゴム履帯走行部の振動特性に関する基礎的研究（第1報）—転輪によるゴム履帯の静的変形特性—, 農業機械学会誌, Vol.52, No.2, pp.27~34, 1990.
- [3] 稲葉繁樹ほか：ゴム履帯の走行抵抗に関する研究（第3報）—転輪荷重の実測による走行抵抗シミュレーションの検証—, 農業機械学会誌, Vol.65, No.1, pp.99~105, 2003.
- [4] 井上英二ほか：農用ゴム履帯走行部の振動特性に関する基礎的研究（第3報）—転輪・履帯間の動的相互作用特性—, 農業機械学会誌, Vol.52, No.5, pp.11~18, 1990.
- [5] 光岡宗司ほか：非線形ばねを有する農用ゴム履帯車両の力学モデル（第1報）—転輪と農用ゴム履帯間の非線形相互作用—, 農業機械学会誌—Vol.70, No.5, pp.54, 2008.
- [6] 井上英二ほか：転輪動荷重データを用いた農用ゴム履帯車両のパラメータ同定, 農業機械学会誌, Vol.66, No.6, pp.85, 2004.
- [7] 野口良造ほか：農用ゴム履帯走行部の動的パラメータの同定, 農業機械学会誌, Vol.60, No.1, pp.16, 1998.
- [8] T.NAKATA, Y.SOGABE : Vibration Property Crawler System when Traveling Over Bumps, Engineering in Agriculture, Environment and Food, Vol.3, No.2, pp.47-53, 2010.
- [9] 日高照晃ほか：機械力学—振動の基礎から制御まで—, pp.108-110, 朝倉書店, 2007.

# 分岐路を持つサーキットにおける最適速度モデル

## Optimal Velocity Model for Circuit with Branch

松永 奈穂子<sup>1</sup>, 吉川 周二<sup>2</sup>, 玉城 龍洋<sup>3</sup>

Naoko MATSUNAGA<sup>1</sup>, Shuji YOSHIKAWA<sup>2</sup>, Tatsuhiro TAMAKI<sup>3</sup>

**Abstract:** We study the optimal velocity (OV) model for the circuit with branch. The OV model proposed by Sugiyama [5] is described as the simple ordinary differential equation system. Nevertheless, the behavior of solution takes the queue dynamics arising in traffic jams into account very well. In this article we shall consider the OV model under the circuit with a branch and a concourse.

**Key words:** OV model, branch, traffic jam, ordinary differential equation system, ODEs

### 1. はじめに

日本の自動車保有台数は一貫して増加し続け、平成20年の時点では7千9百万台を超えるに至る。現代社会において道路交通システムは、産業・生活の重要な要素となっているが、日本の道路交通容量に大きな変化が無いため、その影響は交通渋滞として大きな社会問題のひとつとなっている。また、渋滞現象はエネルギー消費、排気ガスなどによる環境汚染だけでなく、輸送コストおよび輸送時間の増大による年間12兆円に及ぶ経済損失をもたらしている([1])。

これらの問題を解決するために近年様々な交通流解析モデルが提案され、その物理的側面の解析が進んでいる。交通問題の研究は1950年代から始まり、1990年代のコンピュータの進展に伴い、近年、車両一台一台を考慮するマイクロモデルが開発されている([2], [3], [4])。このマイクロモデルにも多数のモデルが提案されているが、その中で特に注目されるモデルのひとつに最適速度モデルがあり、交通流の遷移やメタ安定分岐の解析に大きな成果を挙げている([5], [6])。

本研究では、1車線系モデルである既存の最適速度モデルに、分岐処理を加えた拡張最適速度モデルを提案し、車両の動きから交通流について考察する。

### 2. OVモデル

杉山ら([5])は、交通流に関して、渋滞の構造を表す最適速度モデル(Optimal Velocity(OV) Model)を提案している。ここではさらに位相図を調査することで遅延を誘発する時間の境界を調査している。

---

<sup>1</sup> 福岡市博多区博多駅前2丁目6番6号 日本アイ・ビー・エム共同ソリューションサービス

<sup>2</sup> 松山市文京町3番 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻

<sup>3</sup> 名護市辺野古905 沖縄工業高等専門学校メディア情報工学科

<sup>1</sup> CSOL, 2-6-6 Hakata-ekimae, Hakata-ku, Fukuoka, 812-0011 JAPAN

<sup>2</sup> Department of Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3 Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime, 790-8577 JAPAN, yoshikawa@eng.ehime-u.ac.jp

<sup>3</sup> Department of Media Information Engineering, Okinawa National College of Technology, 905 Henoko, Nago, Okinawa, 905-2192 JAPAN, t-tamaki@okinawa-ct.ac.jp

原稿受理 平成22年10月29日

杉山らは個々の車の方程式を基本とし、1列になって車が走行する1次元車両追従モデル(1-dimensional car-following model)を提案している。このモデルでは車両の大きさは考えず、車・運転手の運動性能もすべて同じとする。車は、前方車間距離によって加速度を制御する、という性質を持つものとし、モデル中での車両の動きは次式に従うものとする。

$$\ddot{x}_n = a(V(\Delta x_n) - \dot{x}_n), \quad (1)$$

ここで、 $n$ は車両の番号、 $x_n$ は $n$ 台目の車両の位置、 $\Delta x_n = x_{n-1} - x_n$ は車間距離、 $\ddot{x}_n$ は $x_n$ における加速度、 $\dot{x}_n$ は $x_n$ における速度、 $a$ は感応度と呼ばれ、速度差に対してどれくらい鋭敏に応答できるかを表す正定数である。 $V(\Delta x_n)$ は0V関数と呼ばれ、車間距離に基づいて安全速度を決定する。杉山の用いる0V関数は次式で与えられる。

$$V(x) = \tanh(x - 2) + \tanh 2 \quad (2)$$

0V関数(2)式は車間距離 $\Delta x_n$ が小さい程 $V(\Delta x_n)$ は小さくなり、車間距離 $\Delta x_n$ が大きい程 $V(\Delta x_n)$ も大きくなる関数を選択するが、実際は速度制限や車の性能のため、いくらでも速くすれば良いわけではない。そこで、車間距離 $\Delta x_n$ で最高速度に漸近する形となるシグモイド型の関数を選択する。また、車間距離 $\Delta x_n$ が小さいときは衝突しないよう、徐々に加速・減速するようにする。

0Vモデルに従い、交通流のシミュレーションを行うと次の結果が得られる。図1は車間距離(headway)と速度(velocity)の位相空間における車の軌道を表している。ここでは、パラメータを次のように設定した： $a=1.0$ 、 $N=10$ (車の台数)、 $L=20$ (レーンの長さ)。図1において、上の頂点は車間距離および速度が大きく、スムーズな走行が可能である自由クラスタ、一方、下の頂点は車間距離および速度が小さく、道路の一部分に車両が詰まり、スムーズな走行ができなくなる渋滞クラスタである。車両が渋滞クラスタから自由クラスタへ、また自由クラスタから渋滞クラスタへの閉曲線に沿って動いていることがわかる。また、渋滞クラスタから自由クラスタへ移行する際、車両は緩やかに加速し、自由クラスタから渋滞クラスタへ移行する際には、車両は緩やかに減速していることがわかる。

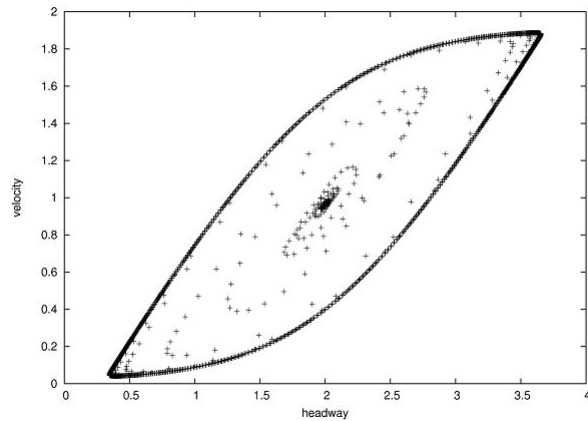


図1: 車間距離と速度の関係

### 3. 分岐路を持つサーキットにおける0Vモデル

杉山のモデルではループ状のサーキット上を追い越しなしで前方の車に追従する。そこで本研究では、図2のようにサーキット中に分岐路を設置し、車両の順番の入れ替わりを考慮したモデルを構築する。L1の車道は杉山のモデルと同様、追い越しなしで前方の車に追従する。A地点は分岐ポイントであり、A地点に来た車はL2の車道とL3の車道のいずれかを走行する。この分岐ポイントでは、L1の車道でナンバリングされた車両番号が偶数ならばL2に、車両番号が奇数ならばL3に車を分岐させる。このナンバリングは1タイムステップごとに車両の位置に基づいて更新する。もし、L1上の車 $c_i$ が次のタイムステップでL2もしくはL3に入る場合、 $c_i$ の車両が偶数ならば、車間距離 $\Delta x_n$ は“ $c_i$ の車両の位置からAポイントまでの距離”と“AポイントからL2上で一番手前の車両の位置までの距離”の和で表される。同様に、 $c_i$ の車両が奇数ならば、車間距離 $\Delta x_n$ は“ $c_i$ の車両の位置からAポイントまでの距離”と“AポイントからL3上で一番手前の車両の位置までの距離”の和で表される。ここで、

L2 および L3 の車道も追い越しなしで前方の車に追従するものとする。

また、B 地点は合流ポイントであり、A 地点で L2 および L3 に分岐したそれぞれの車は B 地点で合流する。この合流ポイントには、車両番号の小さい車が先に入る。合流時の車間距離  $\Delta x_n$  は“自分の車両の位置から B ポイントまでの距離”と“B ポイントから L1 上で一番手前の車両の位置までの距離”の和で表される。例外処理として、合流時、L2 上の車と L1 上の車の車間距離と、L3 上の車と L1 上の車の車間距離が同じだった場合、車両番号の大きい車両を  $\Delta x_n / 2$  前に進めることとする。

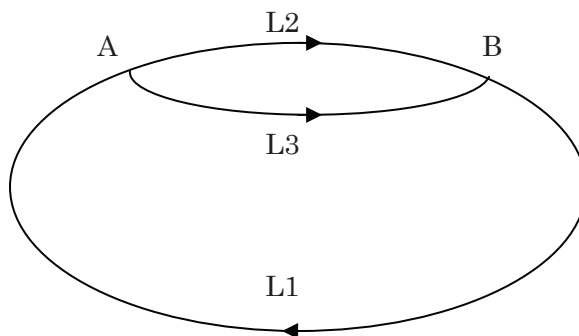


図 2 : 分岐路の形状

#### 4. シミュレーション結果

車両の台数を変化させながら、車間距離(headway)と速度(velocity)の変化を解析する。なお、車両台数  $N$  以外のパラメータは次の通りである。 $a = 1.0$ ,  $L1 = 10$ ,  $L2 = 10$ ,  $L3 = 10$  ( $L1, L2, L3$  はそれぞれレーンの長さ)。  $N = 10$  および  $N = 50$  の場合の結果を図 3, 図 4 に示す。

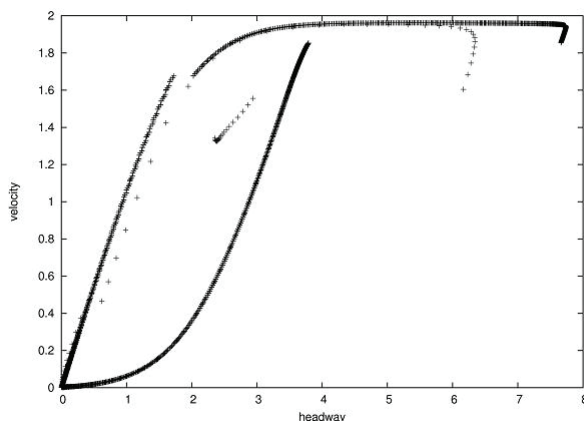


図 3: 拡張モデルの車間距離と速度の関係 ( $N = 10$ )

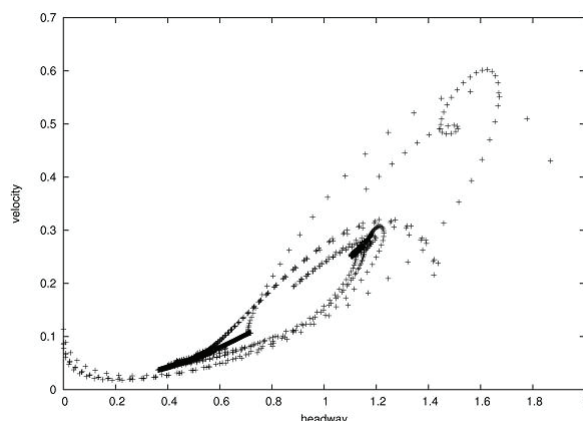


図 4: 拡張モデルの車間距離と速度の関係 ( $N = 50$ )

まず、図 3 より、headway=2, velocity=1.6 付近と、headway=4, velocity=1.8 付近でグラフが大きく飛んでいるのがわかる。これは、分岐ポイントで急激に車間が広がったこと、および合流ポイントで急激に車間が狭まったことが原因であると予測される。渋滞クラスタから自由クラスタへの移行に注目すると、一次元車両追従モデルと同程度の加速である。一方、自由クラスタから渋滞クラスタへの移行時には、車間距離が小さくなるにつれ、急激な減速が生じている。

また図 4 からは、図の中央部分と右上部分に 2 つの軌道の乱れが観察される。そこで、タイムステップ数を増加させて定常状態にした場合の車間距離と速度の関係を調べた。その結果を図 5 に示す。図 5 から、図 4 の中央部分が定常状態であることがわかる。さらにタイムステップを絞ってみると、headway=0.9, velocity=0.2 付近でグラフが大きく飛んでいるのがわかる (図 6)。これは図 3 で示したものと同様の動きが観察されたといえる。つまり、分岐ポイントで急激に車間が広がったことが原

因であると考えられる。最終的な定常状態（図 7）では，headway, velocity とともにほぼ変化は無く，

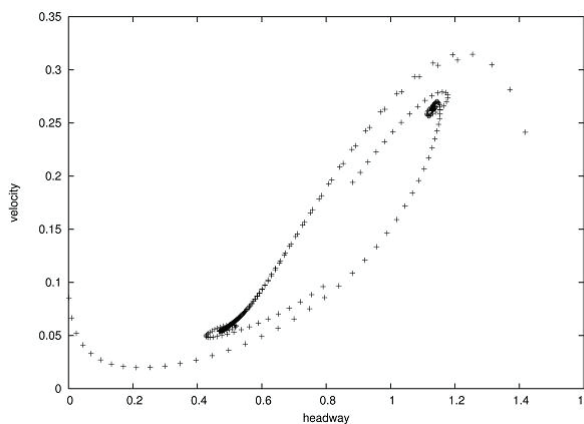


図 5: 拡張モデルの車間距離と速度の関係  
( $N = 50$ ,  $TIMESTEP=700$ )

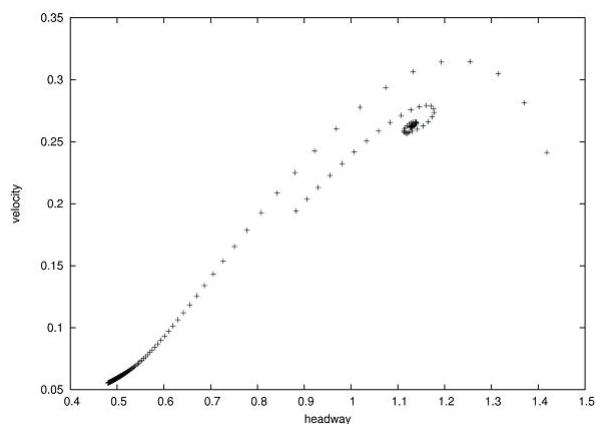


図 6: 拡張モデルの車間距離と速度の関係  
( $N = 50$ ,  $TIMESTEP=900$ )

渋滞から抜け出せていない状態であるということがわかる。

次に，提案する拡張モデルの密度と交通量の関係を図 8 に示す．密度が 0 から 0.2 の単調増加が自由流を表し，0.2 から 1.3 までは自由走行と渋滞が混合した交通流を表す．また，1.3 以降は安定的に渋滞が存在する渋滞流を表している ([5])．図 8 より，密度が 0.2 を越えた辺りで一度交通量が減少し，密度 1.3 まで一定の交通量になっていることがわかる．密度 0.2 近辺の急激な減少は，合流ポイントにおいて前方車両の存在が無視できなくなり，その結果，急激な車間距離減少が生じるためと考えられる．また，密度 0.2 から 1.3 までの一定の交通量は，現実の交通でも見られるボトルネックの影響で，合流部の交通容量が小さいことからその部分がボトルネックとなり，本来の交通容量が制限されるために発生する現象である ([7])．この密度区間では，自由流と合流部の渋滞流が共存した状態になっていると考えられる．密度 1.3 以降が滑らかな曲線になるのは，サーキット全体で渋滞が発生するため分岐・合流の影響よりも渋滞の影響が大きくなり，本来の密度による交通量の減少が強く表れるためである．

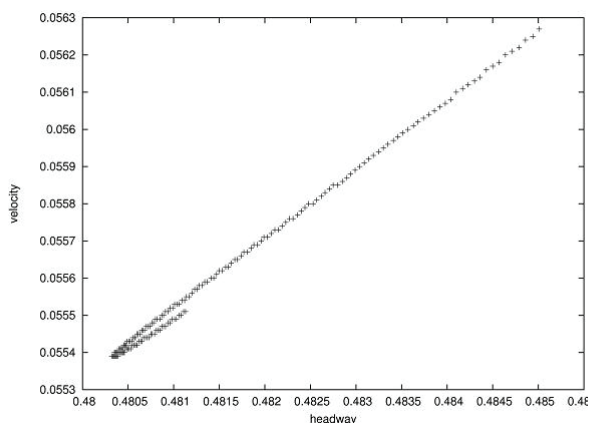


図 7: 拡張モデルの車間距離と速度の関係  
( $N = 50$ ,  $TIMESTEP=950$ )

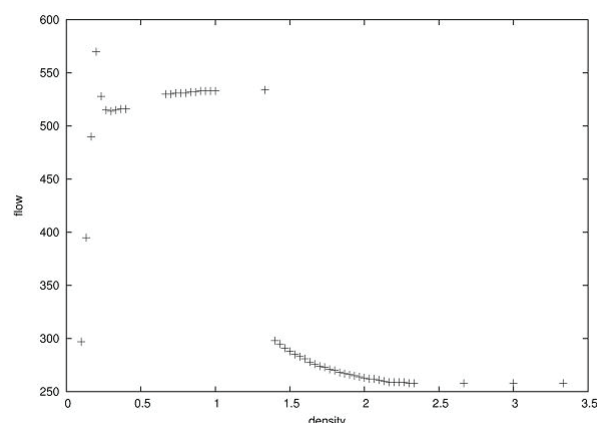


図 8: 拡張モデルの  $Q-k$  図



## 5. おわりに

本研究では、杉山の提案する最適速度モデルを追試するとともにその拡張モデルを提案した。提案する拡張モデルは、杉山らの提案する 1 車線系モデルである既存の最適速度モデルに、分岐処理を加えたモデルである。その結果、分岐ポイントと合流ポイントにおいて、車間距離の急激な変化が起こり、それが原因となって渋滞が発生していると考えられる。さらに、提案モデルの密度と交通量の関係図を示した結果、本来、自由走行が可能な密度でも合流による影響で交通流に不安定さがもたらされ渋滞が発生したことにより、交通量が一時的に減少するボトルネック現象が確認された。

## 6. 引用文献

- [1] (財)自動車検査登録情報協会: <http://www.airia.or.jp/number/index.html>
- [2] K. Nagel, S. Rasmussen: Traffic at the edge of chaos, *Artificial Life IV*, pp.222-235, 1994.
- [3] 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄輔: セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション, *情報処理学会・数理モデル化と問題解決*, Vol.46, No.SIG10, pp.30-40, 2005.
- [4] K. Nagel and M. Schreckenberg: Cellular automaton model for freeway traffic, *Journal of Physics I france*, Vol.2, pp.2221-2229, 1992.
- [5] Y. Sugiyama: Optimal velocity model for traffic flow, *Computer Physics Communications*, pp.399-401, 1999.
- [6] M. Bando, and K. Hasebe, et al: Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation, *Physical REVIEW E*, Vol. 51, No. 2, pp.1035-1042, 1995.
- [7] 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄輔: セル・オートマトン法による自動車専用道路での道路工事区間交通シミュレーション, *知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌)*, Vol.18, No.1, pp.91-101, 2006.

## SDP 観測風資料およびメソ気象モデル MM5 に基づく

### 瀬戸内海の海上・沿岸風資料の精度評価

# Estimating Accuracy of Wind Data over the Seto Inland Sea Based on SDP Overland Wind Data and Mesoscale Meteorological Model MM5

大福 学\*・山口正隆\*\*・野中浩一\*・畑田佳男\*\*\*

Manabu OHFUKU\*, Masataka YAMAGUCHI\*\*,  
Hirokazu NONAKA\* and Yoshio HATADA\*\*\*

Accuracy of two kinds of wind data during 19 typhoons calculated at 9 sea stations and 20 coastal stations of the Seto Inland Sea is estimated by comparing the respective wind data with wind data measured at those stations. One set of data is extracted from a 45-year wind data set for the concerned area which was made by Yamaguchi et al.(2009) using SDP overland wind data acquired by the Japan Meteorological Agency. The other is the wind data set made by Lee et al.(2009) applying a mesoscale meteorological model MM5. The degree of agreement between the time series of calculated and measured winds during a typhoon is evaluated by 7 error indices. Almost all mean values and standard deviations of the error indices suggest that the SDP data-based wind data shows a higher degree of accuracy than the MM5-based wind data. Also, comparison of SDP data-, MM5- and measurement data-based spatial distributions of maximum wind speed indicates the resemblance among them in a recent typhoon case and the slight discrepancy among them in the case of an older typhoon.

*Key Words* ; accuracy of estimated winds, SDP wind data, mesoscale model MM5, typhoon winds, sea and coastal measurement stations, Seto Inland Sea

## 1. 緒 言

瀬戸内海など陸地地形の影響を受ける内湾・内海の海上風分布を高い精度で推定するために、山口ら<sup>[1]</sup>は内湾・内海の海上や沿岸で取得された観測風記録を空間補間する方法を採用した。得られた海上風分布資料の時間間隔は1時間、期間は伊勢湾では1995～2003年の9年であるものの、瀬戸内海で1983～2005年の23年、関東沿岸海域で1979～2004年の26年に及ぶ。また、山口ら<sup>[2]</sup>は内湾・内海

---

\*愛媛大学工学部環境建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

\*\* 愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

\*\*\*愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

原稿受理 平成22年10月5日

の周辺に位置する気象庁気象官署で取得された 1961～2005 年の 45 年にわたる SDP 観測風（SDP 風）資料などから内湾・内海の海上・沿岸観測地点における風を求め、観測風との比較からその精度が高いことを示すとともに、上記 3 領域における 45 年間の海上風分布を 1 時間ごとに推定している。

一方、同様の目的のために MM5 や WRF などのメソ気象モデルを利用する研究（たとえば、佐々木ら<sup>[3]</sup>、李ら<sup>[4]</sup>）が最近活発に行われており、メソ気象モデルが風のみならず気圧、降水量など各種気象要素に対して良好な再現能力を有することが報告されている。しかし、入力条件の準備や数値計算に多大の時間と労力を要することから、その適用は最近の少数の台風などに限られていることが多い。この中で、李ら<sup>[4]</sup>は 1971～2006 年の 20 台風に MM5 を適用することによって瀬戸内海における台風時海上風分布を求め、そのデータセットの提供が可能であることを論文の中で周知している。

本研究では、瀬戸内海における海上風・沿岸風時系列について、SDP 風資料および MM5 を用いる方法に基づく計算結果と観測結果の比較を李ら<sup>[4]</sup>の論文で与えられた 1971～2005 年の 19 台風を対象として実施し、それぞれの精度を包括的に検討する。また、観測風資料より得た結果を含む 3 種類の最大風速の空間分布を 2 つの台風時に比較し、その特性を調べる。

## 2. 風資料と解析方法

### 2.1 SDP 風資料に基づく海上・沿岸風資料

山口ら<sup>[2]</sup>は Fig. 1 の瀬戸内海周辺に位置する気象庁気象官署（×印、佐田岬と土佐沖ノ島の 2 灯台を含む）で取得された SDP 風資料と外洋境界上 7 地点（□印）での楕円型気圧分布に基づく台風モデル風を組み込んだ表面風再解析（NCEP 風）資料に対する空間補間から得た、海上観測地点（●印）と沿岸観測地点（○印と △印）における SDP 補間風を、当該地点における SDP 補間風と観測風の回帰関係を利用して観測相当風に変換し、観測風との比較からその精度が高いことを明らかにしたのち、海上・沿岸観測地点の観測相当風資料と境界地点上の NCEP 風資料を用いて格子間隔 2 km の瀬戸内海における海上風分布を得ている。期間は 1961～2005 年の 45 年、時間間隔は 1 時間である。図中の△印は海上の風速を増強して、より適正な海上風分布を得るために設けた中間地点を表す。海上・沿岸観測地点における観測相当風はそれぞれ最も近い 2 km 間隔の格子点における値から抽出した。

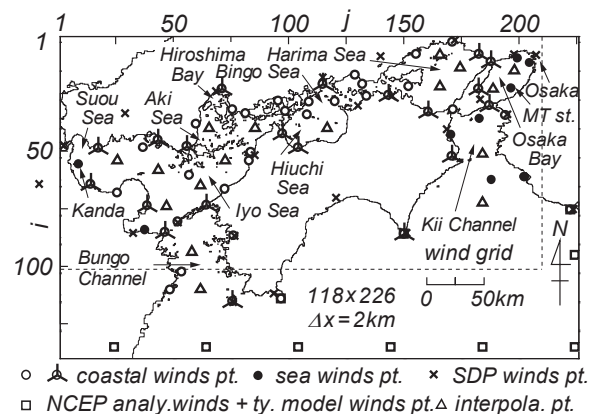


Fig. 1 Location of points where wind data are given on the Seto Inland Sea for estimating sea wind distribution.

### 2.2 MM5 の適用に基づく海上・沿岸風資料

李ら<sup>[4]</sup>は 1971～2006 年の台風のうち、瀬戸内海沿岸に高潮浸水被害をもたらした 20 台風について、格子間隔 27 km の北西太平洋領域、9 km の西日本領域、3 km の瀬戸内海領域の 3 段階にネスティングした計算領域において MM5 による気象場の再現計算を行っている。Fig. 2 は李ら<sup>[4]</sup>の論文から取り出した格子間隔 3 km の瀬戸内海領域を示す。MM5 による計算風資料は海上・沿岸観測地点に最も近い 3 km 間隔の格子点における値から抽出した。時間間隔は 1 時間である。Table 1 は 19 台風の名前と MM5 による風資料の期間を表す。李ら<sup>[4]</sup>の対象台風一覧に含まれる台風 0613 号（T0613）は SDP

風資料および観測風資料の準備ができていないので、今回検討対象としない。

### 2.3 海上・沿岸観測風資料

海上観測地点は紀伊水道内の白浜，御坊，小松島，由良瀬戸，大阪湾内の MT 局，大阪，神戸，周防灘西部の荻田，別府湾内の大分の計 9ヶ所 (Fig.1 の●印) である。また，沿岸観測地点は紀伊水道に面した室戸岬，阿南，紀淡海峡に位置する沖ノ島，淡路島中部にあり大阪湾に面する志筑，大阪湾と播磨灘の境にある明石大橋，播磨灘兵庫県側の江井ヶ島，播磨灘香川県側の引田，高松，備後灘に面する福山，濠洲灘に面する西条，今治，広島港の草津，周防灘に面する柳井，下松，宇部，水防中津，国東半島の大分 (武蔵)，豊予海峡に面する佐賀関，佐田岬半島の根元に位置する九町越，豊後水道入口の土佐沖ノ島の計 20ヶ所 (Fig.1 の▲印) である。時間

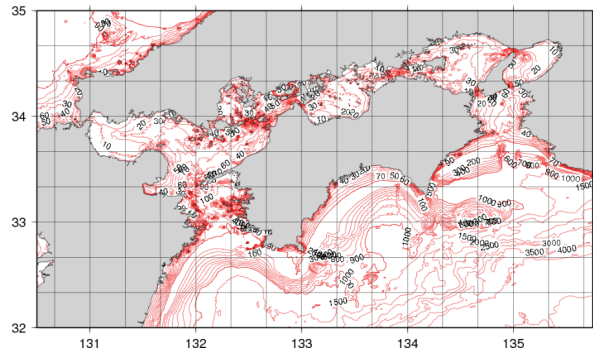


Fig. 2 Region of the Seto Inland Sea used in Lee et al. [4].

Table 1 Typhoon cases investigated and period of wind data.

typhoon	period (M/D/JST)	typhoon	period (M/D/JST)
T7119	07/29/09~08/08/09	T9719	09/10/09~09/19/09
T7209	07/18/09~07/26/03	T9918	09/21/09~09/30/03
T7416	08/26/09~09/04/03	T0111	08/15/09~08/23/03
T7506	08/17/09~08/25/03	T0310	08/01/09~08/10/09
T8013	09/03/09~09/14/09	T0410	07/26/09~08/05/03
T9014	08/14/09~08/24/09	T0416	08/23/09~09/01/03
T9119	09/20/09~10/01/03	T0418	08/29/09~09/09/09
T9210	08/01/09~08/11/09	T0421	09/23/09~10/01/03
T9313	08/29/09~09/07/09	T0514	09/01/09~09/09/09
T9612	08/05/09~08/17/09		

間隔は大部分の地点で 1 時間となっている。観測期間は地点ごとにかなりの長短を伴い，最長のものは海上観測地点では MT 局における 1980 (T8013) ~2005 年 (T0514)，沿岸観測地点では土佐沖ノ島における 1971 (T7119) ~2005 年 (T0514) (ただし，観測は 1986~2000 年で中断)，江井ヶ島における 1972 (T7209) ~2005 年 (T0514) であるが，1980 年以前の資料は少ない。観測風速は 1/7 乗則を用いて 10 m 高度風速に変換した。

このように，1990 年以前の対象台風時における海上観測地点の観測資料は 1 例を除いて入手していないので，比較対象台風は 1990 年以降の台風にはほぼ限られる。同様に，1990 年以前の対象台風時における沿岸観測地点の風観測資料もかなり少ないので，1990 年以降の台風時の資料が大部分を占める。

### 2.4 解析方法

各台風時の各観測地点における 10 m 高度 10 分間平均風速  $U_{10}$ ・平均風向  $\theta_w$  の計算資料と観測資料の時系列に対する比較を個別に行い，10 m 高度変換観測風速  $U_{10obs}$  が 4 m/s 以上の資料について両者の符合の度合を風速に関して相関係数  $\rho_U$ ，散布図において原点を通る相関直線の勾配値  $a_{0U}$ ，2 乗平均平方根風速誤差  $\sigma_U$ ，風向に関して相関係数  $\rho_\theta$ ，勾配値  $a_{0\theta}$ ，2 乗平均平方根風向誤差  $\sigma_\theta$  という 6 種類の誤差指標で表す。ただし， $\sigma_U$  は地点間および台風間の比較を可能にするために，各台風時における 4 m/s 以上の 10 m 高度変換観測風速の平均値  $\bar{U}_{10obs}$  ( $>4$  m/s) で除した無次元量  $\tilde{\sigma}_U = \sigma_U / \bar{U}_{10obs}$  ( $>4$  m/s) とする。また，各台風時最大風速 (計算風資料で  $U_{10cmax}$ ，観測風資料で  $U_{10o max}$ ) に対して最大風速比  $\tilde{U}_{max} = U_{10cmax} / U_{10o max}$  を求め，最大風速に対する再現度を表示する指標を求める。結局，風速について 4 種類の誤差指標 ( $\tilde{U}_{max}$ ， $\rho_U$ ， $a_{0U}$ ， $\tilde{\sigma}_U$ )，風向について 3 種類の誤差指標 ( $\rho_\theta$ ， $a_{0\theta}$ ， $\sigma_\theta$ ) を取り扱う。

相関係数 $\rho_U$ ,  $\rho_\theta$ は1以下で1により近い値, 勾配値 $a_{0U}$ ,  $a_{0\theta}$ と最大風速比 $\tilde{U}_{max}$ は1前後の値で1により近い値, 無次元2乗平均平方根風速誤差 $\tilde{\sigma}_U$ と2乗平均平方根風向誤差 $\sigma_\theta$ は0により近い正値を同時にとる場合に, 当該計算風資料の精度が高いと言える。

### 3. 台風時の計算風時系列資料と観測風時系列資料の比較

#### 3.1 風時系列と誤差指標の事例

Fig. 3はT9210時の大阪湾内MT局における風速 $U_{10}$ ・風向 $\theta_w$ の時系列をSDP風資料に基づく結果(SDP風資料), MM5に基づく結果(MM5風資料), 観測風資料について示す。SDP風資料は風速・風向の両者に対して観測風資料の変化によく追従するのに対して, MM5風資料は減衰期に観測風資料より大きい風速を与える傾向にある。しかし, 多数のケースを対象とする場合, 両資料の優劣を単一の事例で議論してもあまり有意と言えないし, また逆に, MM5風資料がSDP風資料より観測風資料に近い値を与えるケースもある。この図は両計算風資料の優劣を議論するためでなく, 以下で示す風速・風向に対する誤差指標を説明するために用いる。

Fig. 4はFig. 3の風速 $U_{10}$ ・風向 $\theta_w$ に関する比較事例を散布図として示したものであり, 図中には風速に対して $\rho_U$ ,  $a_{0U}$ ,  $\tilde{\sigma}_U$ , 風向に対して $\rho_\theta$ ,  $a_{0\theta}$ ,  $\sigma_\theta$ の各3種類の誤差指標を与える。このケースでは, SDP風資料の精度がMM5風資料の精度より高いことが合計6種類の誤差指標の値ともう1種類の誤差指標である $\tilde{U}_{max}$ の値(SDP風資料で1.10, MM5風資料で1.24)によって示唆される。

#### 3.2 誤差指標による全台風・全地点の計算風資料の精度検証

Fig. 5は海上観測地点の各計算風資料に対する7種類の誤差指標の頻度分布を示す。ケース数は9海上観測地点で1990~2005年の14台風についての90である。図中には, ケース数 $N$ , 各誤差指標についての平均値 $m$ と標準偏差 $\sigma$ および平均値 $m$ を表す点線を与える。また, Table 2は各誤差指標の平均値 $m$ と標準偏差 $\sigma$ を100倍したもの( $\sigma_\theta$ を除く)の一覧を後出の沿岸観測地点についての結果を含めて示す。ここでは, 個々のケースに対する7種類の誤差指標それぞれの平均値と標準偏差によって全ケースに対する誤差特性を記述する。各誤差指標の平均値 $m$ に対しても各誤差指標の値に対する2.4での判定基準が成立し, かつその標準偏差 $\sigma$ が0により近い正値をとる場合に, 全体としてより高い精度を示唆することは言うまでもない。こうした観点からみると, 海上観測地点についてSDP風資

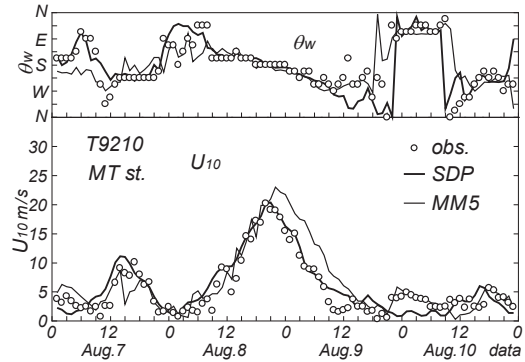


Fig. 3 Time series of winds during Typhoon 9210 at MT station in Osaka Bay.

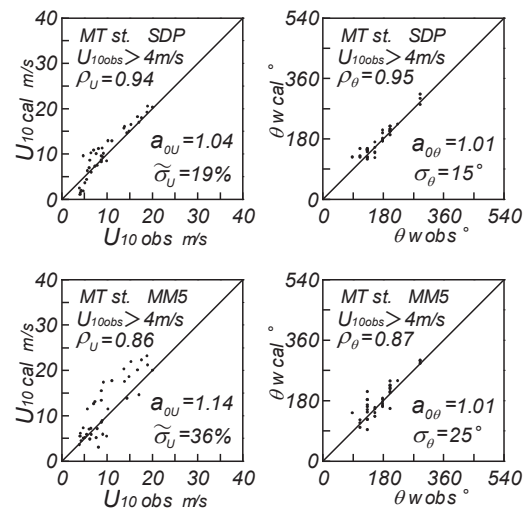


Fig. 4 Scatter diagrams of wind speed and wind direction during Typhoon 9210 at MT station in Osaka Bay and error indices.

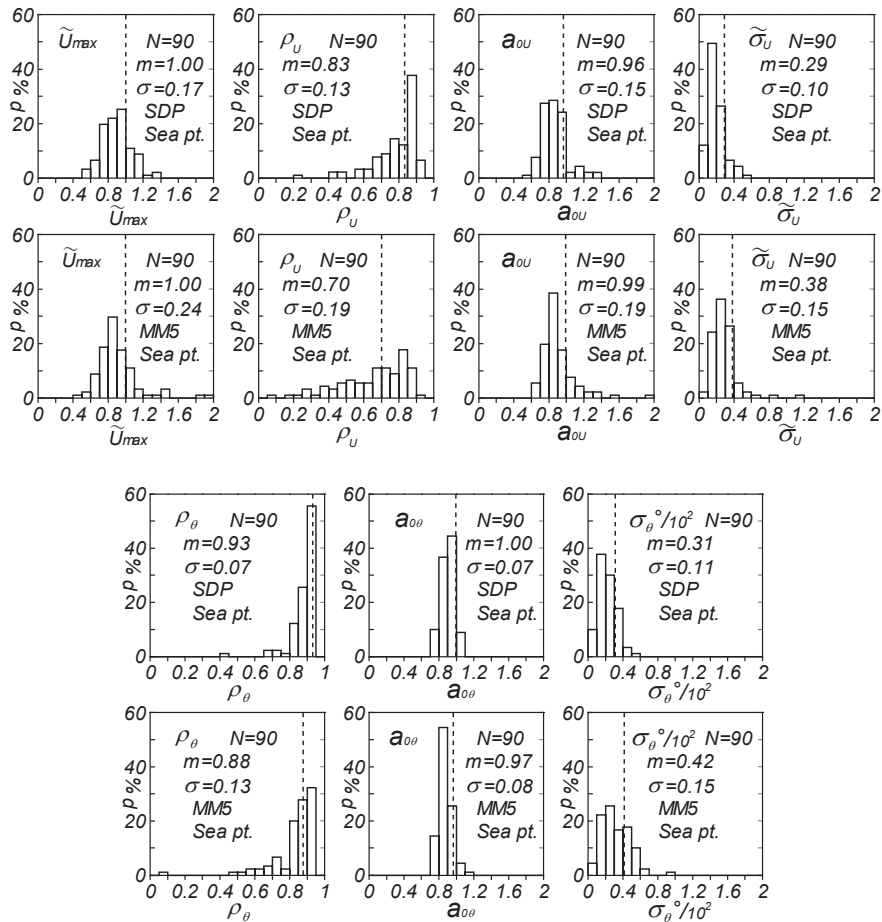


Fig. 5 Histograms of 7 error indices for all typhoon cases at sea stations.

Table 2 Mean values and standard deviations of wind-related error indices at sea stations and those at coastal stations.

obs. point	data	N	$\tilde{U}_{max} \times 10^2$		$\rho_U \times 10^2$		$a_{0U} \times 10^2$		$\tilde{\sigma}_U \times 10^2$		$\rho_\theta \times 10^2$		$a_{0\theta} \times 10^2$		$\sigma_\theta^\circ$	
			m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$	m	$\sigma$
9 sea points	SDP	90	100	17	83	13	96	15	29	10	93	7	100	7	31	11
	MM5		100	24	70	19	99	19	38	15	88	13	97	8	42	15
20 coastal points	SDP	178	107	26	77	16	109	21	40	16	92	9	98	7	32	14
	MM5		120	34	64	21	125	31	60	21	91	9	95	7	36	13

料は勾配値  $a_{0U}$  の平均値  $m(a_{0U})$  を除いて MM5 風資料より上記の条件を満たしているし、両資料における平均値  $m(a_{0U})$  の差も小さい。つまり、資料全体で見れば、海上風速・風向に関して SDP 風資料は MM5 風資料より高い精度を有すると言える。また、Fig. 5 の頻度分布や Fig. 5 と Table 2 に与えた各誤差指標の標準偏差  $\sigma$  をみれば、MM5 風資料より SDP 風資料において各誤差指標のばらつきが小さいことが明白である。

Fig. 6 は沿岸観測地点における 7 種類の誤差指標の頻度分布を示す。ケース数は 20 沿岸観測地点で 1971~2005 年の 19 台風についての 178 である。Fig. 6 と Table 2 に与えるように、沿岸観測地点でも各誤差指標の平均値  $m$  と標準偏差  $\sigma$  について海上観測地点の結果と同様の傾向がみられることから、SDP 風資料が MM5 風資料より高い精度をもつことが統計的に支持される。ただし、SDP 風資料では

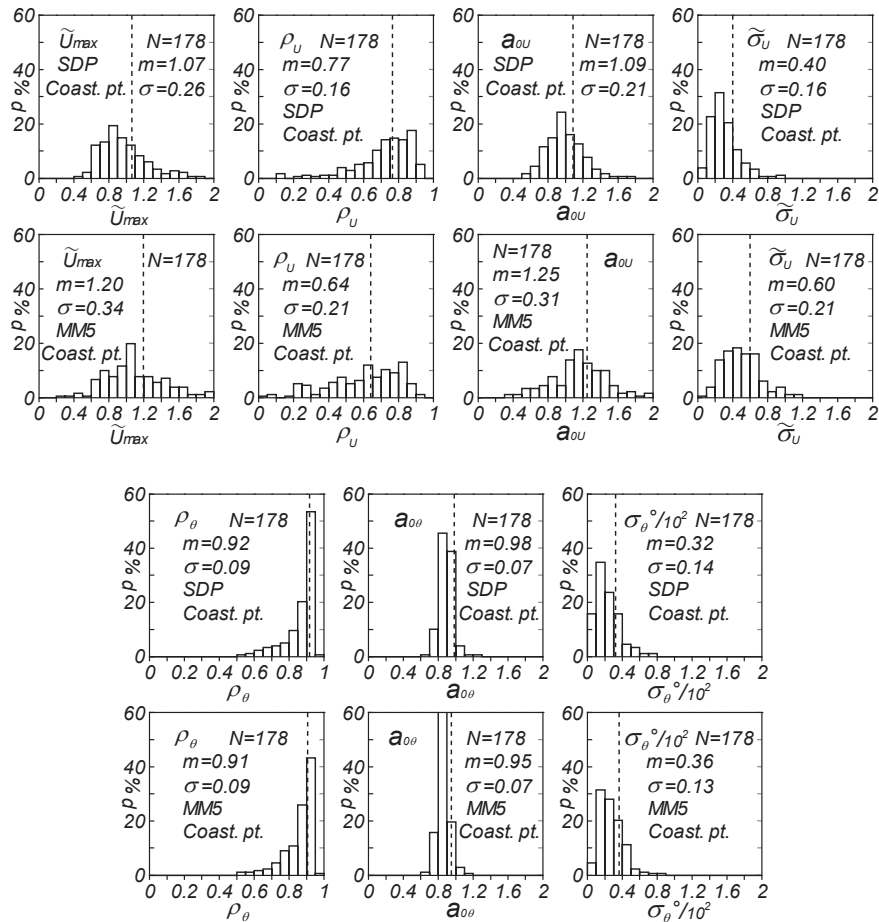


Fig. 6 Histograms of 7 error indices for all typhoon cases at coastal stations.

地形特性を考慮して経験的に決めた係数を沿岸観測地点の SDP 補間風速に乗じて海上風速に換算しているのに対して、沿岸観測地点の観測風資料では 10 m 高度補正のみを行っているので、平均的に SDP 風速が観測風速より 10 %弱大きい値を示す。MM5 風資料にも、大きさは異なるものの、同様の傾向がみられる。このように、沿岸観測地点については計算風と観測風の関係が海上風という観点から曖昧さを伴っているため、以下では検討を行わない。

つぎに、Table 3 は海上観測地点の SDP 風資料と MM5 風資料に対する各誤差指標に設けた制約条件(たとえば、厳しい条件の場合では  $0.7 < \tilde{U}_{max} < 1.3$ ,  $\rho_U > 0.8$ ,  $0.7 < a_{0U} < 1.3$ ,  $\rho_\theta > 0.8$ ,  $0.8 < a_{0\theta} < 1.2$  と  $\tilde{\sigma}_U < 0.4$ ,  $\sigma_\theta^\circ / 10^2 < 0.4$  あるいは  $\tilde{\sigma}_U < 0.5$ ,  $\sigma_\theta^\circ / 10^2 < 0.5$ ) を順次同時に全部を満たすケース数を 2 種類の制約条件の場合に 9 海上観測地点の 90 ケースについて表す。表の第 1 行から下の行に向うにつれて、ケース数は減少する。計算風資料の精度は 7 種類の誤差指標に対する制約条件を満たすケース数によって判断することから、最終的には太字で表した  $\sigma_\theta^\circ / 10^2$  の行に対応する数値をみればよい。これによると、厳し

Table 3 Number of typhoon cases which meet restrictive conditions imposed on error indices at sea stations.

conditions(1)	SDP	MM5	conditions(2)	SDP	MM5
$0.7 < U_{max} < 1.3$	84	79	$0.6 < U_{max} < 1.4$	88	83
$\rho_U > 0.8$	60	33	$\rho_U > 0.65$	79	56
$0.7 < a_{0U} < 1.3$	60	33	$0.6 < a_{0U} < 1.4$	79	55
$\rho_\theta > 0.8$	55	26	$\rho_\theta > 0.65$	78	51
$0.8 < a_{0\theta} < 1.2$	55	25	$0.7 < a_{0\theta} < 1.3$	78	51
$\tilde{\sigma}_U < 0.4$	53	23	$\tilde{\sigma}_U < 0.4$	70	34
$\sigma_\theta^\circ < 0.4$	<b>45</b>	<b>16</b>	$\sigma_\theta^\circ < 0.4$	<b>57</b>	<b>24</b>
$\tilde{\sigma}_U < 0.5$	55	25	$\tilde{\sigma}_U < 0.5$	76	50
$\sigma_\theta^\circ < 0.5$	<b>55</b>	<b>23</b>	$\sigma_\theta^\circ < 0.5$	<b>73</b>	<b>37</b>

い選択条件にあたる conditions(1)に対して、抽出ケース数は SDP 風資料で 45 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.4$ ) か 55 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.5$ ), MM5 風資料で 16 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.4$ ) か 23 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.5$ ), 緩やかな条件 conditions(2) に対して、SDP 風資料で 57 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.4$ ) か 73 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.5$ ), MM5 風資料で 24 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.4$ ) か 37 ( $\sigma_\theta^\circ/10^2 < 0.5$ ) であるから、全ケースでみれば海上観測地点の風資料に関して SDP 風資料が MM5 風資料より高い精度をもつことが Table 2 と同様に統計的に支持される。

### 3.3 誤差指標による台風別・地点別計算風資料の精度検証

各計算風資料の精度をより細かく検討するために、9 海上観測地点における 1990~2005 年の 14 台風時の計算風資料に対する誤差指標を台風別および地点別に分類して、各誤差指標の平均値と標準偏差の特徴をみる。ただし、地点別検討では大阪湾内の MT 局において T8013 の 1 ケースを含める。Fig. 7 は SDP 風資料と MM5 風資料に対する各誤差指標の平均値および標準偏差を台風別に与える。各台風時の地点数は T9014, T9119, T9210, T9612 の 4 台風時に 5, これ以外の 10 台風時に 7 である。Fig. 7 においても、全般的に SDP 風資料が MM5 風資料より高い精度をもつことを示唆されるが、こうした結果は必ずしも各台風の各誤差指標について成立しない。とくに、勾配値  $a_{0U}$  の平均値  $m(a_{0U})$  と標準偏差  $\sigma(a_{0U})$  ならびに勾配値  $a_{0\theta}$  および無次元最大風速  $\tilde{U}_{max}$  の標準偏差  $\sigma(a_{0\theta})$ ,  $\sigma(\tilde{U}_{max})$  は、半数近くの台風ケースについて MM5 風資料の SDP 風資料に優る精度を部分的に示唆する。しかし上述のように、台風ケース全体では SDP 風資料の精度がより高い傾向にある。

Fig. 8 は SDP 風資料と MM5 風資料による各誤差指標の平均値  $m$  と標準偏差  $\sigma$  を 8 海上観測地点に

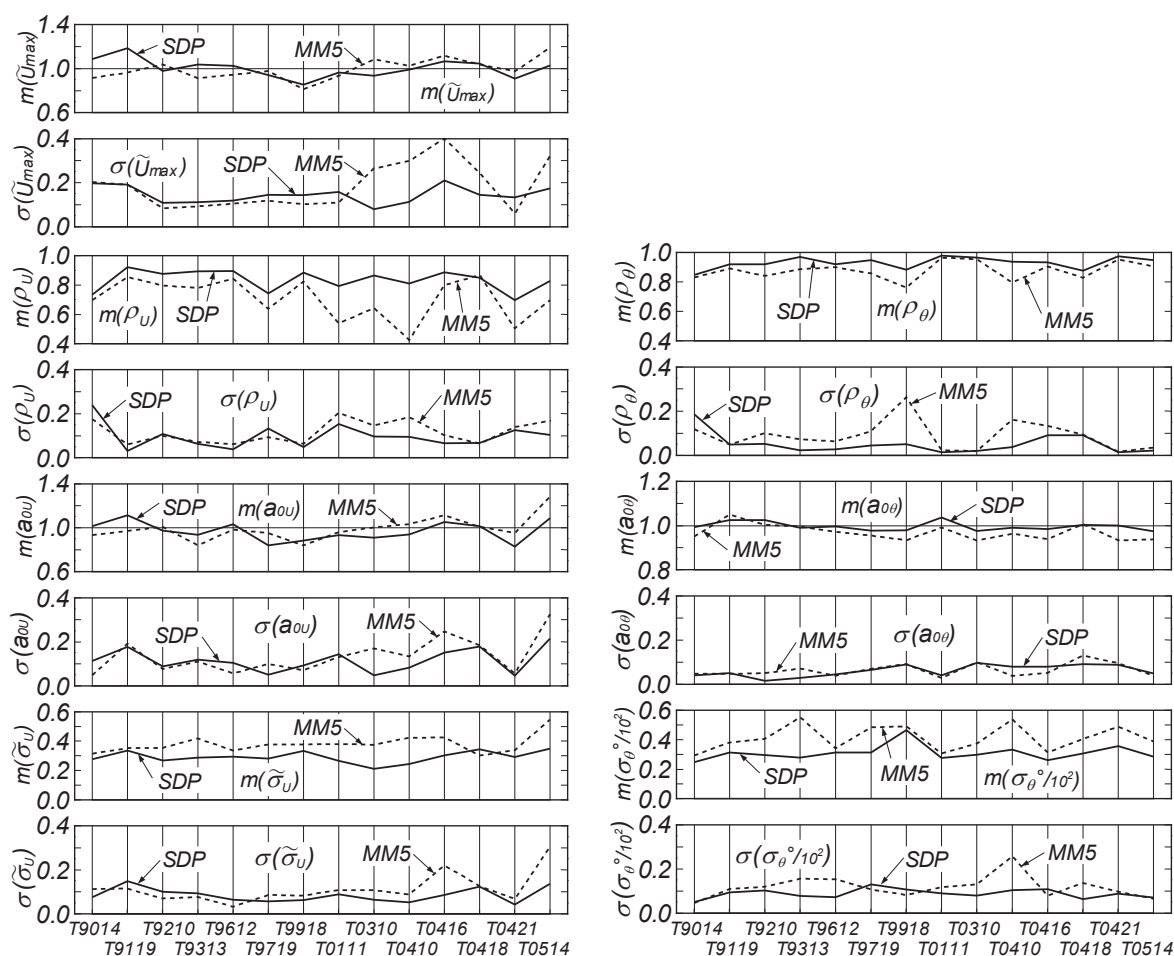


Fig. 7 Typhoon-grouped mean values and standard deviations of 7 error indices.



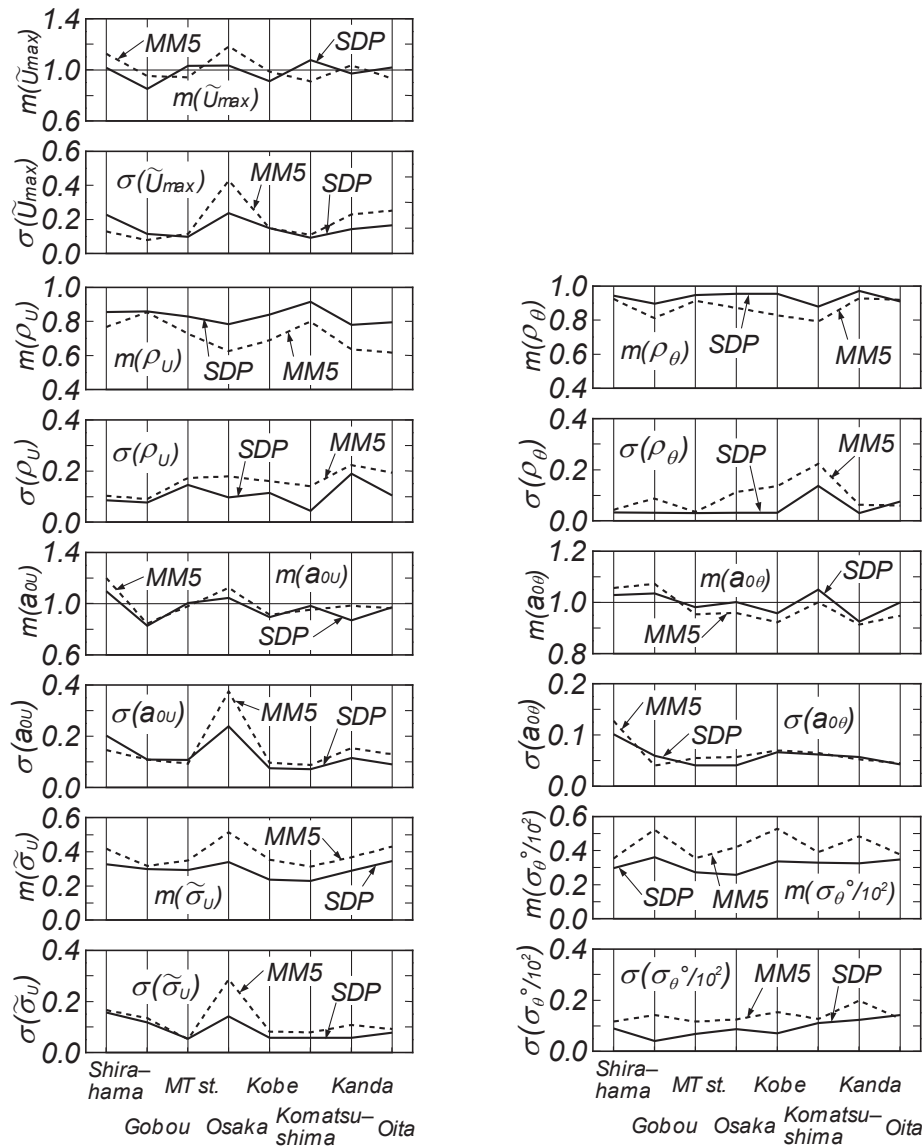


Fig. 8 Station-grouped mean values and standard deviations of 7 error indices.

ついて与える。各地点の台風ケース数は白浜で5，御坊で6と少ないのに対して，他の地点では11～15と相対的に多い。また，由良瀬戸地点の台風ケース数は3にすぎないので，省略している。この図によると，MM5 風資料の精度が SDP 風資料の精度より高いことを示唆する誤差指標の平均値や標準偏差を与える地点（たとえば， $\tilde{U}_{max}$  に関して御坊，神戸， $m(a_{0U})$  に関して御坊，神戸，荻田）も多少見出されるけれども，全地点を通して各誤差指標の平均値と標準偏差は SDP 風資料が MM5 風資料より高い精度をもつことを統計的に支持する。

#### 4. 最大風速の空間分布

Fig. 9 は T9119 と T0418 の経路，Fig. 10 は 1 時間間隔の SDP 風資料，MM5 風資料および観測風資料より得た瀬戸内海における最大風速  $U_{max}$  の空間分布をこれら 2 台風時について示す。観測風資料に基づく結果は畑田ら<sup>[5]</sup>による瀬戸内海 16 台風時の波浪推算で使用している。T9119 と T0418 は台風が

東シナ海の中中部海域に位置した時点以降でよく似た経路をとり、北九州の佐世保付近に上陸後、下関あたりを経て日本海をNE方向に進行し、北海道南西部の渡島半島に上陸した。両台風は瀬戸内海に甚大な高潮・波浪災害をもたらすとともに、とくに T9119 はその強風により東北地方や北海道で農作物に深刻な被害を与えた。

SDP 風資料では、最大風速は T9119 と T0418 の両台風時に西部海域（周防灘，伊予灘，広島湾，安芸灘，斎灘，豊後水道）のうち周防灘から佐田岬を含む伊予灘西部，広島湾，安芸灘で 30~35 m/s，中部海域（燧灘，備後灘）で 20~25 m/s，東部海域（播磨灘，大阪湾，紀伊水道）のうち播磨灘北部や鳴門海峡から紀淡海峡北西部で 25~30 m/s，播磨灘南部や大阪湾で 20~25 m/s をとる。より詳しくみると、最大風速はとくに周防灘西部で T0418 時より T9119 時に大きい。

MM5 風資料では、T9119 時に最大風速は周防灘と安芸灘，燧灘と備後灘，播磨灘で 25 m/s 程度であるが、T0418 時にはより広い範囲で 28~30 m/s をとり、広島湾で 30 m/s を優に越える。つまり、最

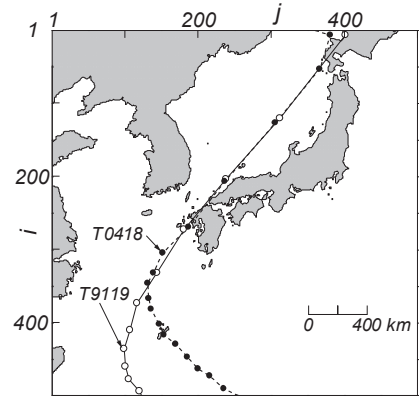


Fig. 9 Tracks of Typhoons 9119 and 0418.

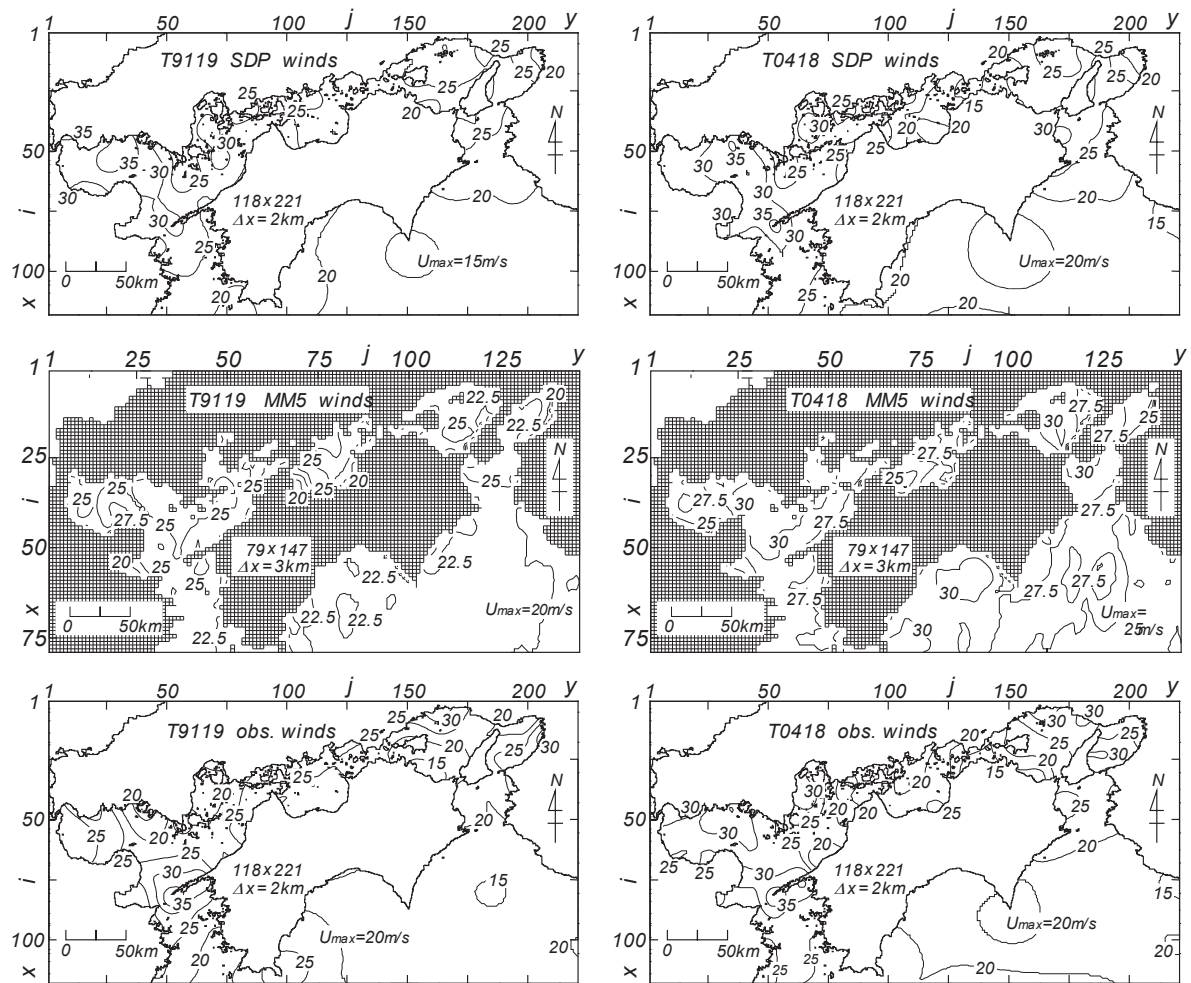


Fig. 10 Maximum wind speed distributions over the Seto Inland Sea during Typhoons 9119 and 0418 based on 3 kinds of wind data sets.

大風速は T9119 時より T0418 時に領域全体で 5 m/s 弱大きい。

観測風資料では、T0418 時の最大風速分布は SDP 風資料によるものと類似する。一方、T9119 時には周防灘や広島湾、安芸灘において SDP 風資料による結果より小さい風速を与えることから、両者の分布状況はやや異なる。

3 種類の資料による結果によれば、T0418 時には 3 者は比較的類似した最大風速とその空間分布を与えるのに対して、T9119 時には 3 者の空間分布の間にやや相違を生じる。しかし、海上風の空間分布に関する観測資料が得られていないので、いずれの結果がより適切かは明らかでない。

## 5. 結 語

本研究では、気象庁 SDP 観測風資料を利用する方法およびメソ気象モデル MM5 の適用によりそれぞれ得た瀬戸内海の海上・沿岸観測地点における 2 種類の計算風時系列資料の精度をそこでの観測風時系列資料との比較に基づいて検討するとともに、最大風速の空間分布の特性を調べた。得られた結果はつぎのようである。

- (1)1971～2005 年の 19 台風時に 9 海上観測地点と 20 沿岸観測地点で個別に得た最大風速と風速・風向時系列に関する 7 種類の誤差指標の頻度分布および平均値と標準偏差は、海上観測地点および沿岸観測地点のいずれにおいても SDP 風資料に基づく計算風資料が MM5 に基づく計算風資料より全体として高い精度を有することを明確に示唆する。
- (2)台風別および地点別にみても(1)と同様の知見が示唆されるが、台風や地点によって 2 種類の計算風資料に係わる各誤差指標の大小関係に多少のばらつきを生じることから、SDP 風資料に基づく計算風資料の MM5 に基づく計算風資料の精度に関する優位性は(1)の場合よりやや不明瞭になる。
- (3)SDP 風資料、MM5 風資料、観測風資料から得た最大風速の空間分布は最近の T0418 時には相互に類似するのに対して、20 年近く過去に遡った T9119 時にはやや異なる分布状況と風速を示す。

最後に、MM5 による海上風分布資料を快く提供戴いた山下隆男広島大学教授（大学院国際協力研究科）および李 漢洙広島大学助教（大学院国際協力研究科）、ならびに長期間にわたる多量の風観測資料を提供賜った関係各機関に深く感謝します。

## 参 考 文 献

- [1] 山口正隆・大福 学・日野幹雄・野中浩一・畑田佳男：内海・内湾における風候と確率風速の評価，水工学論文集，第 53 卷，pp.1477-1482，2009.
- [2] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：SDP 風資料を用いた内湾・内海における 45 年間の海上風分布データセットの作成，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp.186-190，2009.
- [3] 佐々木暢彦・鈴山勝之・仲井圭二・峯村浩治：MM5 の推算海上風に基づいた大阪湾における波浪推算精度向上の検討，海洋開発論文集，第 24 卷，pp.909-914，2008.
- [4] 李 漢洙・山下隆男・駒口友章・三島豊秋：瀬戸内海の台風気象場，高潮・波浪の再解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp.441-445，2009.
- [5] 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・山田耕大：瀬戸内海における過去 16 年間の台風時最大波高の推定，海岸工学論文集，第 54 卷，pp.116-120，2007.

# 瀬戸内海における1918～2005年の海上風・波浪推算資料を用いた 風速と波高の極値の推定

## Estimating Extremes of Wind Speeds and Wave Heights on the Seto Inland Sea Using Hindcast Data for Intense Storms during the Period of 1918 - 2005

畑田佳男\*・山口正隆\*\*・野中浩一\*\*\*・大福 学\*\*\*

Yoshio HATADA\*, Masataka YAMAGUCHI\*\*,  
Hirokazu NONAKA\*\*\* and Manabu OHFUKU\*\*\*

Applying a method developed by Yamaguchi et al.(2009) to the wind data acquired at land stations located around the Seto Inland Sea, sea wind distributions on the concerned sea area are estimated for each of the 15 strong typhoons during the period of 1918-1959, and the wave height distributions on 3 areas of the Sea are calculated on the basis of shallow water wave hindcastings for each typhoon driven by the above-mentioned wind conditions. Then, combining this with data samples of wind speed and wave height during the period of 1961-2005, the largest value during the period of 1918-2005 and the 100-year return value for any wind speed and wave height are evaluated on the Seto Inland Sea. Main conclusions are that the spatial distributions of winds and waves are well-documented by a typhoon's characteristics such as its course and power and that the powerful typhoons during the period of 1918-1959 may yield the most definite influences on the largest values of wind speed and wave height during the period of 1918-2005 and on their 100-year return values on extended areas of the Sea.

*Key Words* ; the Seto Inland Sea, wind speed, wave height, strong typhoons, periods of 1918-1959 and 1918-2005, largest values and return values

### 1. 緒 言

わが国の内湾・内海を代表する瀬戸内海は、東京湾や伊勢湾などと同様に、古来幾度となく巨大台風に伴う強風・高潮・波浪などによる災害を蒙ってきたことから、その時の気象・海象の状況をできる限

---

\*愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

\*\*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

\*\*\*愛媛大学工学部環境建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

原稿受理 平成22年10月5日

り適正に再現することは今後の災害対策を一層推進するうえで有用と考えられる。しかし、災害の状況の記憶や災害の記録および気象・海象要素の観測資料は古い時代のものほど失われる傾向にあり、また観測資料は観測地点数が限られるうえに、測定法や周辺環境などの変化によって質的にも十分でない。こうした状況のなか、現時点で把握しうる資料を総合して当時の気象・海象状況を再現する研究は意味ある試みと考えられよう。

本研究では、瀬戸内海周辺に位置する気象庁気象官署で取得された 1918（大正 7 年）～1959 年の 15 ケースの巨大台風時における SDP 観測風資料（SDP 風資料）などを用いて推定した瀬戸内海の各台風時海上風分布、ならびにこれらを入力条件とする波浪推算によって得た波浪の空間分布の状況をまず調べる。ついで、1961～2005 年のストーム（台風、低気圧）時の風資料および波浪推算資料<sup>[1]</sup>を併せてそれぞれ作成した風速および波高の極値資料を解析して、風速と波高に関する期間最大値の特性や再現確率値の空間分布と対象期間の延長に伴う再現確率値の変化を考察する。

瀬戸内海を西部海域（周防灘，伊予灘，広島湾，安芸灘，斎灘と豊後水道），中部海域（燧灘，備後灘，水島灘），東部海域（播磨灘，大阪湾と紀伊水道）に分けた場合，上記 15 ケースの台風時の瀬戸内海における風および波浪に関する既往の研究事例として，T4216 号（周防灘台風）時の西部海域における波浪推算の結果<sup>[2], [3]</sup>があげられる程度であって，論文や報告書などに公表された研究事例はほとんどないし，前述の研究においても地形の影響を含まない台風モデル法に基づく風を入力条件としていることから，風および波浪の推定精度はあまり期待できない。

## 2. 台風時の波浪推算と極値統計解析の方法

### 2.1 海上風分布資料

波浪推算にあたり外洋と内海でそれぞれ対象台風時の海上風分布資料を用意する。まず，外洋では 1948 年以降の台風に対して，北西太平洋に設けた格子間隔 80 km の格子網における表面風再解析値（NCEP 風資料）に楕円型気圧分布の仮定に基づく台風モデル風を組み込んだ海上風分布の 1 時間間隔値<sup>[4]</sup>を用いる。NCEP 風資料を入手しえない 1947 年以前の台風に対しては，円型気圧分布（Myers 式）の仮定に基づく台風モデル風を使用する。この場合，入力条件とする台風属性（中心位置，中心気圧，台風半径）の推定は，過去に遡るほど気象資料が乏しくなることから，困難になる。ここでは，既往の報告書，気象要覧の記載事項，日本周辺の天気図（1 日 2 回），台風経路近くにある気象観測地点で取得された気圧観測値や Myers 式などを利用して，台風属性を決定する。ついで，推定した台風属性を 1 時間ごとに直線補間することにより，海上風分布を 1 時間間隔で得る。台風モデル風において傾度風速から海上風速への変換に際しては，台風半径相当距離地点で 1 をとり，遠方場で 0.6 に漸減する係数を乗じて台風中心付近の風速の増強をはかる。

ついで内海では，内海・内湾の周辺に位置する気象庁気象官署における SDP 風資料を主体として，内海・内湾における海上風分布を比較的高い精度で推定しうる山口ら<sup>[5]</sup>の方法を用いる。すなわち，Fig. 1 に示す瀬戸内海の場合には，その周辺に位置する気象官署（図中の×印，佐田岬と土佐沖ノ島の 2 灯台を含む）で取得された SDP 風資料（10 分単位で表された日最大風速を含む）と外洋境界

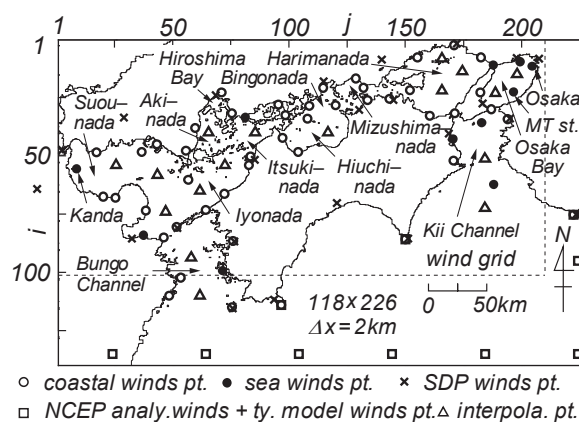


Fig. 1 Location of points where wind data are given on the Seto Inland Sea for estimating sea wind distribution.

上7地点（□印）における楕円型気圧分布に基づく台風モデル風を組み込んだ表面風再解析（NCEP風）資料<sup>[4]</sup>の10分間隔直線補間値に空間補間法を適用して、海上観測地点（●印）および沿岸観測地点（○印）におけるSDP補間風を推定したのち、当該地点におけるSDP風と観測風の回帰関係を利用して観測相当風に変換する。ついで、海上・沿岸観測地点の観測相当風と外洋境界地点上のNCEP風資料に空間補間法を2段階で適用して格子間隔2kmの瀬戸内海における海上風分布を10分間隔で推定する。図中の△印は海上の風速を増強して、より適正な海上風分布を得るために設けた中間地点である。NCEP風資料が存在しない1947年以前の台風については、外洋境界地点上の風として円型気圧分布に基づく台風モデル風を用いる。

山口ら<sup>[5]</sup>の方法の適用に際して最も留意すべき点はSDP風資料の等質性をいかに確保するかということである。ここでは、年別平均風速があまり変化しない直近年代の期間（海上・沿岸観測地点における風観測資料が得られる期間を少なくとも部分的に含む）の平均風速とそれ以前の古い年代の期間平均風速が一致するように、係数を乗じて後者の風速資料の調整を行う。海上・沿岸観測地点においてSDP補間風向と観測風向の相関が高いことから<sup>[5]</sup>、風向に対する調整は行わない。また、SDP風観測地点の数は古い時期ほど少なくなるけれども、対象台風ケースのうち最も古い1918年（大正7年）7月台風においても瀬戸内海を囲む主要な観測地点でSDP風資料が得られているので、海上風分布の推定にあたって不都合な点はあまりない。

## 2.2 波浪推算の方法

瀬戸内海における波浪推算は外洋を含めた大領域と瀬戸内海を西部海域、中部海域、東部海域に分けた各海域の2段階で行う。すなわち、外洋を含む海域における波浪推算では、Fig. 2に示す格子間隔5kmの北西太平洋領域に格子間隔0.5kmの瀬戸内海を組み込んだ高地形解像度2段階格子網において西部海域の豊後水道境界上3地点（Fig. 2の瀬戸内海領域図左下側の\*印）および東部海域の紀伊水道境界上4地点（Fig. 2の瀬戸内海領域図右下側の\*印）に1947年以前では台風モデル風資料（外洋）あるいは1948年以降では台風モデル風を組み込んだNCEP風資料（外洋）とSDP風資料（内海域）に基づく海上風分布を入力条件として1点浅海モデル<sup>[6]</sup>により1時間ごとに方向スペクトルを計算する。周波数データの個数は0.047~1 Hzを不等分割した20個、方向データの個数は0~360°を20°で等分割した19個である。

Fig. 3は瀬戸内海の3海域（格子間隔1km）と灘・湾・水道・海峡の名称や波浪観測地点名（●印）および沿岸の都市名や地区名（○印）を示す。瀬戸内海3海域の波浪推算はSDP風資料より推定した2.1の海上風分布を入力条件として、水深の制約に伴う砕波減衰を段波モデルで近似した格子点浅海モデル<sup>[7]</sup>により2~3日の台風期間について時間間隔1分で行う。格子間隔2kmの海上風分布の入力時間間隔は10分であり、空間に関して1kmごとに4点双1次補間したものを10分の間一定として計算を進める。周波数データおよび方向データの個数と値は外洋の場合と同じである。しかし、巨大台風時にS方向から異常波浪が内海・内湾に伝播するケースでは、方向スペクトルの不連続的伝播（Garden Sprinkler効果）を避けるために、方向データの個数を増加させ、0~360°を10~20°で不等分割した24個（西部海域）または27個（東部海域）とする。

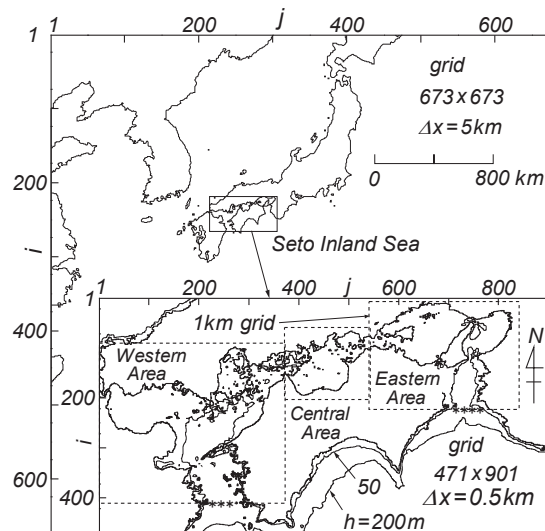


Fig. 2 A nested grid used in wave hindcasting based on backward ray tracing model.

西部海域と東部海域の波浪推算では、豊後水道境界上3地点と紀伊水道境界上4地点で1点浅海モデルによって1時間ごとに計算した方向スペクトルの値を時間に関して1分、空間に関して1 km 間隔で線形補間したものを、さらに方向データが24または27の場合には20° 間隔19個の方向スペクトルの値を方向に関して線形補間したものを与える。なお、中部海域は周囲を陸地で囲まれた閉鎖海域と仮定する。本手法により、1970年代以降のストームに対して行った波浪推算の精度はかなり高いことが畑田ら<sup>[1]</sup>により示されている。

### 2.3 対象台風の選択

検討対象とする15ケースの巨大台風は大阪をはじめとする各地の高潮の上位記録、中央気象台および気象庁による異常気象報告書<sup>[8]</sup>と気象要覧、日本気象協会による台風経路図30年集<sup>[9]</sup>と気象海象要覧<sup>[10]</sup>、台風・高潮災害に係わる書物<sup>[11]~[19]</sup>、災害記事等を参照して抽出・選択している。

15ケースの台風は年代順にならべると、①1918年(大正7年)7月台風(T18-Jul台風)、②1921年(大正10年)9月台風(T21-Sep台風)、③台風3412号(T3412号;室戸台風)、④T3706号、⑤T3805号、⑥T4216号(周防灘台風)、⑦T4326号、⑧T4516号(枕崎台風)、⑨T4902号(デラ台風)、⑩T5028号(ジェーン台風)、⑪T5029号(キジア台風)、⑫T5115号(ルース台風)、⑬T5415号(洞爺丸台風)、⑭T5612号(エマ台風)、⑮T5915号(伊勢湾台風)、である。

これらの台風は瀬戸内海の沿岸域に暴風、高潮、高波を、沿岸域と陸域に暴風、豪雨、土砂崩れ、土石流、洪水などを伴い、甚大な被害をもたらしている。それぞれの台風の特性と被災状況を次章で個別に述べる。

### 2.4 極値統計解析の方法

極値統計解析には、Gumbel分布、Weibull分布(形状母数 $k=0.5\sim 10$ の27種類)、FT-II型分布(形状母数 $k=2.5\sim 40$ の20種類)の計48種類を候補分布とし、尺度母数と位置母数の推定を最小2乗法、最適分布の選択を最大相関係数基準、再現確率値の分散の推定をjackknife法によるYamaguchi・Hatada<sup>[20]</sup>のモデルを用いる。本研究で計算対象とした1918~1959年15ケースの台風のうち1933年以

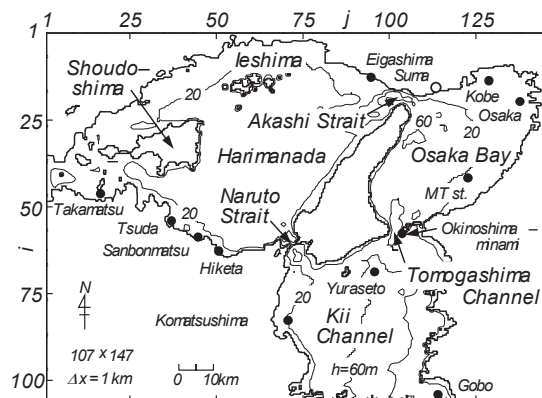
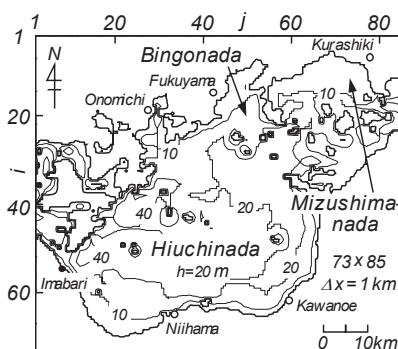
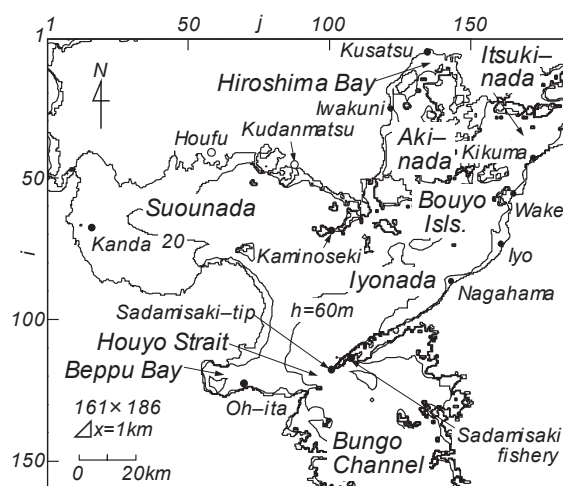


Fig. 3 Grids on three areas of the Seto Inland Sea used in wave hindcasting and names of small sea area, bay, strait, channel, measurement station and city.

前の台風は2ケースにすぎないことから、極値統計解析に用いる風速および波高資料としては、これらを除外する。すなわち、1934～1959年13ケースの台風時最大風速・波高資料と1961～2005年の年最大風速資料および瀬戸内海3海域におけるそれぞれ200ケース前後の台風時・低気圧時最大波高資料を用いて1934～2005年の年最大風速・波高資料を風速資料の場合には瀬戸内海全域で、波高資料の場合には海域ごとに作成する。13ケースは正確には3.1に述べるように、東部海域では11ケースである。1934～1959年の年最大風速・波高資料は毎年得られないが、最上位近くに位置づけられる異常風速・波高は13ケースのうちいくつかの台風時に生起していると仮定し、採択する格子点別年最大風速・波高資料の上限値を資料数が極端に少なくならない範囲内でできるだけ高め（具体的には、上位1/3の資料に限定）に設定して1934～2005年の年最大風速・波高資料に対する極値統計解析を行う。この場合、資料年数 $K=72$ 年、資料数 $N=24$ 、資料総数 $N_T=K=72$ になる。

年最大値資料はデータ数を多く採れる極大値資料と比べて大きな再現確率値の標準偏差を与える傾向にあるけれども、年最大値資料は年別に定義されるため、個々の年最大値資料が資料採択率を小さくした解析に含まれるか否かが容易に明らかになることから、本研究においては極大風速・波高資料よりむしろ年最大風速・波高資料を極値統計解析に用いる。

### 3. 台風特性と海上風・波高の空間分布

#### 3.1 結果の提示方法

Fig. 4は15ケースの台風の経路を3つの図に分割して与える。15ケースの台風は図に示すように、台風経路に応じて西から順に、西部海域の風・波浪に最も強く影響した①T5612号、②T4216号、③T4902号、④T5029号、⑤T4516号、⑥T5115号、⑦T5415号、⑧T18-Jul台風、中部海域の風・波浪に強い影響を及ぼした⑨T4326号、⑩T3706号、東部海域の風・波浪に最も強い影響を及ぼした⑪T3805号、⑫T3412号、⑬T5028号、⑭T21-Sep台風、⑮T5915、に並べられる。しかし、たとえばT5415号のように、より広い範囲に影響を及ぼした台風も多い。

以下では、15ケースの台風それぞれについて、台風経路、瀬戸内海全域の10m高度最大風速 $U_{10max}$ と風向および瀬戸内海3海域の最大有義波高 $H_{max}$ と波向の空間分布をFig. 5～Fig. 19に示す。台風経路図は、台風特性として日時、台風中心の緯度、中心気圧 $p_c$ および台風半径 $r_0$ の一覧表を含む。これらは同じパターンの図であるので、以下では個別に図の表題を述べない。ただし、T5029号とT5612号時には東部海域で波高が小さいことから、波浪推算を行っていない。

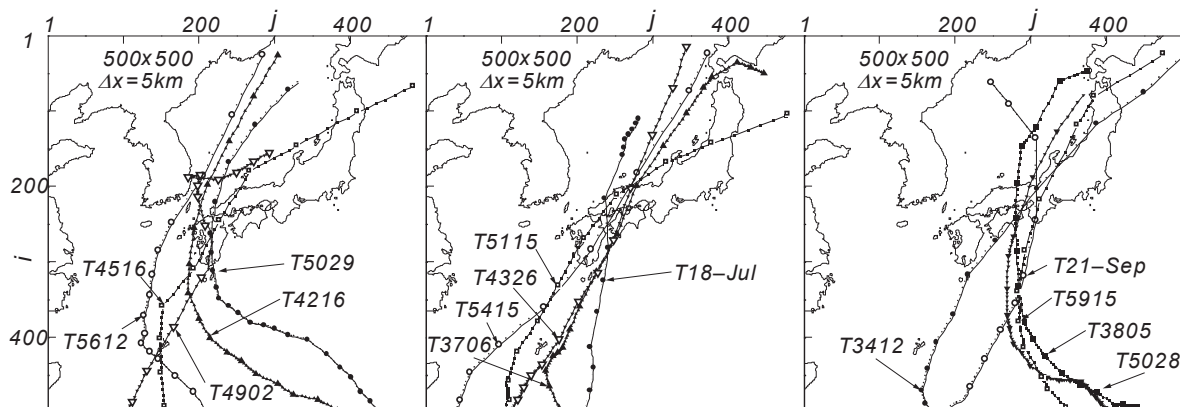


Fig. 4 Tracks of typhoons used in wave hindcasting.



### 3.2 個々の台風に対する結果

#### ①T5612号（エマ台風, Fig. 5）

##### 1) 台風特性と被災状況<sup>[17]</sup>

本台風は1956年（昭和31年）9月1日硫黄島南西海域で発生、向きを180°変えるなど特異な動きをしたのち、東シナ海を北上し、9日夜～10日朝にかけて九州西方海上から対馬海峡を通り日本海に入った。台風が最も対象海域に近づいたときの中心気圧は950 hPa、台風半径は130 kmである。台風通過の間、九州～中部地方は暴風雨に見舞われ、とくに沖縄、九州地方の被害が大きい。全国的被害は死者・行方不明者43名、負傷者313名であり、家屋被害は37,000棟、浸水被害は11,000棟に達する。

##### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は広い範囲で30 m/sを越え、周防灘東部で35 m/sに達する。中部海域と東部海域では、15～20 m/sをとり、局所的に20 m/sを越える。風向は瀬戸内海全域でおおむねSE方向を示す。

##### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、外洋から入射した波浪があまり減衰することなく内海部に伝播し、周防灘東部に波向SE、波高6 mの海域を出現させている。一方、周防灘西部における波高は4 m以下、波向はE、伊予灘における波高も中部から東部で4 m以下、波向はS～SWである。安芸灘では3 m前後の波高が生じている。波向はSSEをとる。中部海域では、今治沖合で2 mの波高が出現しているが、波高は全体的に小さい。波向はS方向である。東部海域では、波高が小さいことから、計算していない。

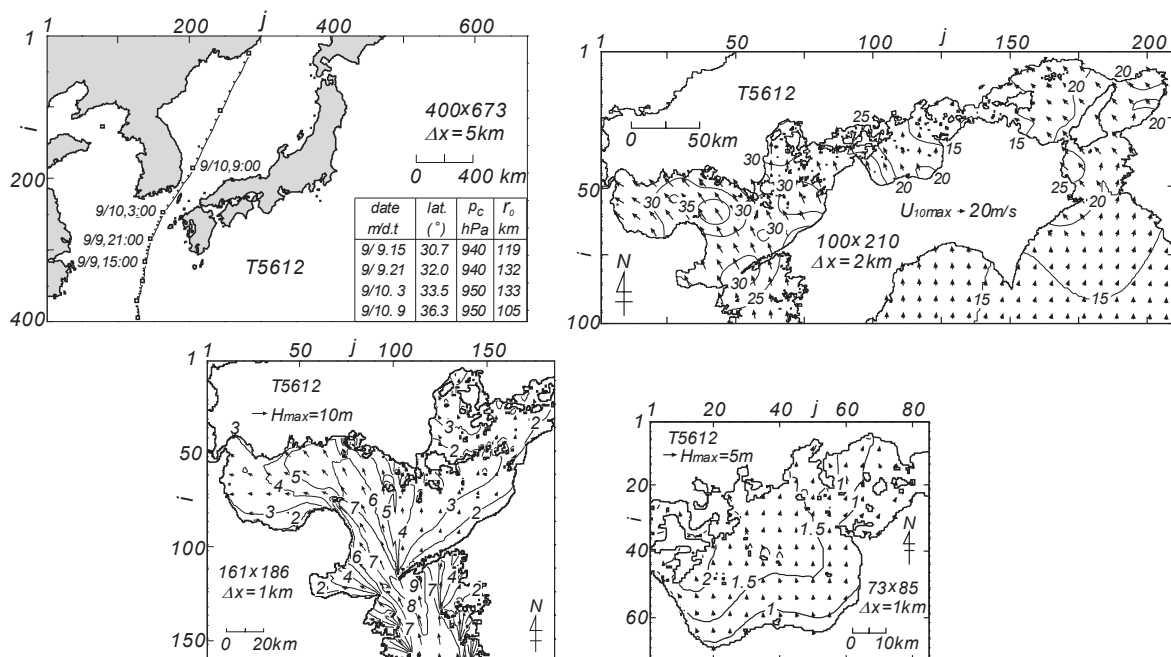


Fig. 5 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5612.

#### ②T4216号（周防灘台風, Fig.6）

##### 1) 台風特性と被災状況<sup>[12], [15], [16], [17], [18]</sup>

本台風は1942年（昭和17年）8月21日サイパン島の東約500 kmの海上で発生、26日正午頃南大東島の北東海域に達したのち、向きを変えて九州西岸をN方向に進んだ。27日15時頃鹿児島県の阿

久根で 946 hPa の最低海面気圧を記録した。続いて、台風は日本海に入り、NNE 方向を進行した。台風が瀬戸内海に最も近づいたときの中心気圧は 950 hPa、台風半径は 73 km である。本台風時に近畿地方以西の各地は暴風雨に見舞われた。また、瀬戸内海西部海域の沿岸、とくに山口県の周防灘沿岸で大規模な高潮が発生し、当時の防災施設の整備不足や戦時下の情報統制と相まって、未曾有の大災害となった。全国の人的被害は死者・行方不明者 1,158 名（山口県で 794 名、広島県で 179 名）、負傷者 1,438 名、家屋被害は 102,000 棟、浸水被害は 132,000 棟に及ぶ。このうち山口県における死者・行方不明者の多くは高潮によるものと考えられる。船舶被害も 3,936 隻にのぼり、非常に多い。

## 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は 30~35 m/s をとり、広島湾で 40 m/s に達する。風向は SE~ESE である。中部海域では、風速は 15~25 m/s を与え、燧灘西部で大きい。風向は SSE である。風速は他の海域に比べてやや小さい。東部海域のうち、播磨灘で風速は 20~25 m/s、大阪湾で 15~20 m/s、紀伊水道北部で 25~30 m/s であり、四国東岸側から香川県側で大きい。風向は SE~S をとる。

## 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、外洋からの波浪があまり減衰せずに内海域に伝播し、豊後水道境界近傍と同様に豊予海峡付近で波向 SSE、波高 8 m、周防灘東部海域で波向 SSE、波高 6 m の高波高域を形成している。周防灘西部では波高は 4~5 m、安芸灘でも 4 m を越えるが、伊予灘の中部と東部では 4 m 以下になっている。中部海域では、波高は南東部から今治と尾道を結ぶ北西部に向けて増加し、波向 SE、波高 2 m をとるものの、全体的に小さい。東部海域では、紀伊水道全体で 6 m の波高域が分布している。播磨灘では鳴門海峡から NW 方向に、大阪湾では友ヶ島水道から N 方向に、それぞれ放射状に 3 m あるいは 4 m の波高域となっている。大阪湾の中央部から東部では波高は 2 m 以下になる。

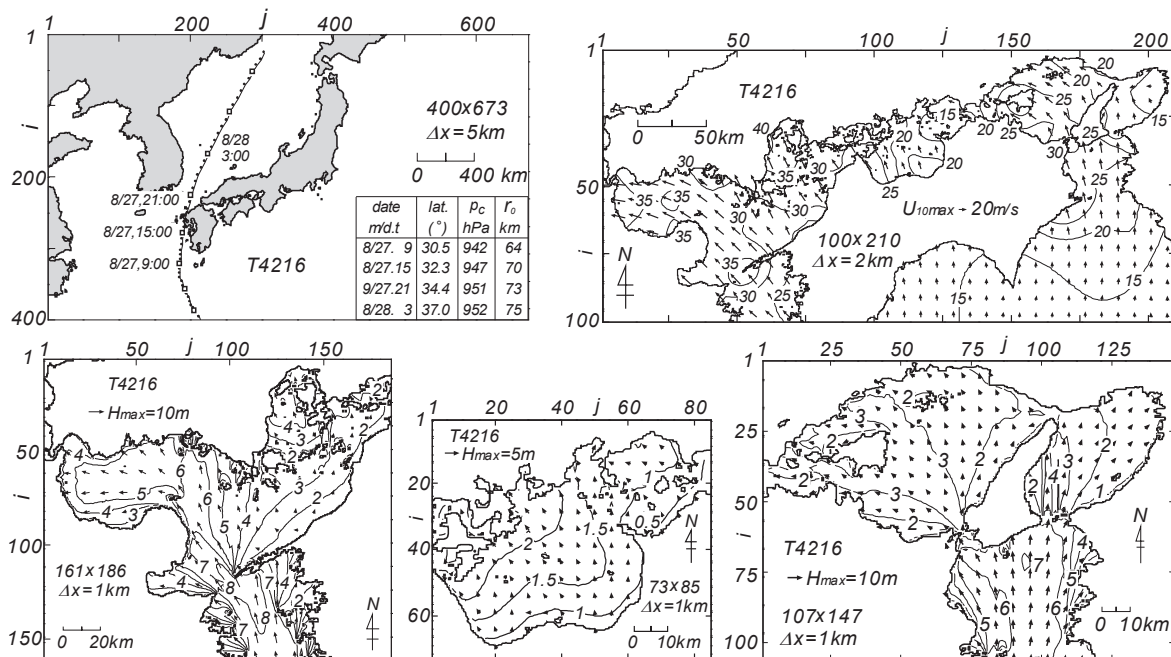


Fig. 6 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 4216.

## ③T4902 号（デラ台風, Fig.7)

### 1) 台風特性と被災状況<sup>[17]</sup>

本台風は 1949 年（昭和 24 年）6 月 17 日フィリピン東方海上にあり、N 方向ついで NNE 方向に進

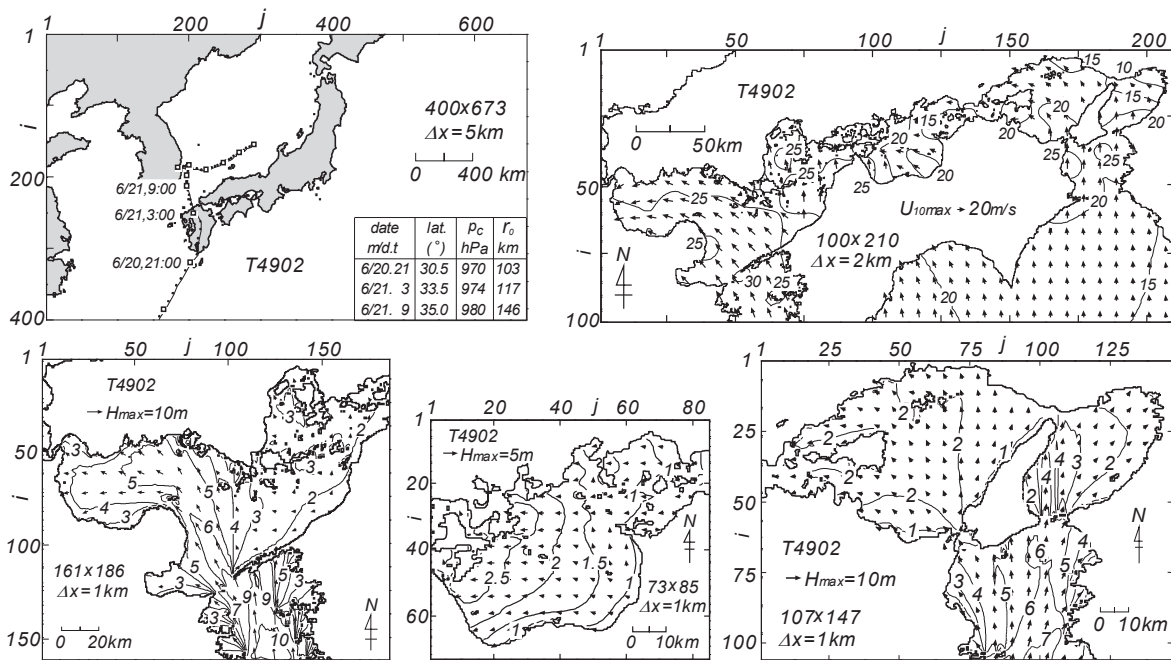


Fig. 7 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 4902.

行して 20 日 21 時屋久島を通過し、突然進路を N 方向に変えて 23 時すぎ鹿児島を通過した。続いて、台風は九州を縦断し対馬海峡に出て朝鮮半島の東で停滞したのち、能登半島付近で温帯低気圧に変わった。台風が最も対象海域に近づいたときの中心気圧は 976 hPa、台風半径は 120 km である。この台風時には西日本を中心に各地で大雨となり、重大な洪水災害が生じた。また台風進路の急変や台風情報伝達システムの未発達などのために、漁船・船舶の遭難による被害が多発した。愛媛県日振島では死者・行方不明者が 106 人に達し、大分県姫島沖では客船青葉丸の横転沈没により乗員乗客 134 人が死亡した。全国の人的被害は死者・行方不明者 468 名、負傷者 367 名、家屋被害は 5,400 棟、浸水被害は 58,000 棟に達する。船舶被害は 4,242 隻と非常に多い。

### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は 25~30 m/s を示し、とくに佐田岬付近で 30 m/s の強風域となっている。風向は SE を中心とし、周防灘西部の E、安芸灘や伊予灘東部で S をとる。中部海域では、風速は 15~25 m/s であり、今治付近に 25 m/s の強風域がみられる。風向は S~SE である。東部海域では、台風経路から離れているにもかかわらず、風速は比較的大きい。播磨灘と大阪湾で風速は 15~20 m/s、紀伊水道で 20~25 m/s を与える。風向は S~SE を示す。

### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、豊後水道に外洋から波高 10 m の波浪が入射し、その波浪が周防灘東部から山口県沿岸で波高 5m となって到達している。周防灘西部でも波高は 4 m と大きい。一方、伊予灘の波高は中部から東部で 3 m 以下と小さい。安芸灘と広島湾では波高 3 m が出現している。中部海域では、西部で波高 2.5 m、中央部で 2 m、東部で 1m の波浪場となっている。波向はいずれも E である。東部海域では、外洋から波高 6~7 m の波浪が入射し、紀伊水道の広い範囲で波高 4~5 m をとる。大阪湾では友ヶ島水道から北側の海域で波高 3~4 m であるが、東側海域の波高はあまり大きくない。一方、播磨灘における波高は小さく、波高 3 m を越える海域は存在しない。

④T5029号（キジア台風, Fig.8）

1) 台風特性と被災状況<sup>[17]</sup>

本台風は1950年（昭和25年）9月7日マリアナ沖で熱帯低気圧から台風へ発達したのち、N寄りの進路をとって13日早朝に種子島南東海上に迫り、13日昼頃鹿児島県志布志湾に上陸、その後九州を縦断して14日早朝に日本海に抜けた。上陸時の中心気圧は約960 hPa、台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯33°線を横切った時点の中心気圧は964 hPa、台風半径は70 kmである。この台風に伴い、大阪以西の17府県に暴風雨や高潮による被害があった。とくに愛媛県では、高潮偏差そのものはそれほど大きくないが満潮時と重なった結果、高い海水位となり、広域的な高潮災害が生じた。全国の人的被害は死者・行方不明者43名、負傷者75名、家屋被害は48,000棟、浸水被害は122,000棟であり、船舶被害も845隻と比較的多い。

2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は25~30 m/sであり、周防灘西部、豊予海峡、安芸灘の一部で30m/sを越える。風向はSE~Eをとる。中部海域では、風速は15~20 m/s、風向はSEで、西側と南東側で20 m/sを越える。東部海域では、播磨灘、大阪湾で15~20 m/s、紀伊水道で20~25 m/sをとり、北西部で25 m/sを越える海域もある。風向はおおむねSEを与える。

3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、豊後水道境界から豊予海峡付近で波高8 mの高波高域が形成されている。また内海部では、豊予海峡を通して伝播した波によって、山口県の防府付近で波高5 m、波向SSEの高波高域が出現する。周防灘西部では4 m波高域が広がるのに対して、伊予灘では中部と東部で波高3 m以下と小さい。安芸灘で3 m波高域がみられる。中部海域では、今治から尾道にかけて波高2 m、波向E~SEの波が出現しているが、全体的に波高は小さい。東部海域では、波高は一層小さいと推測されるので、計算を行っていない。

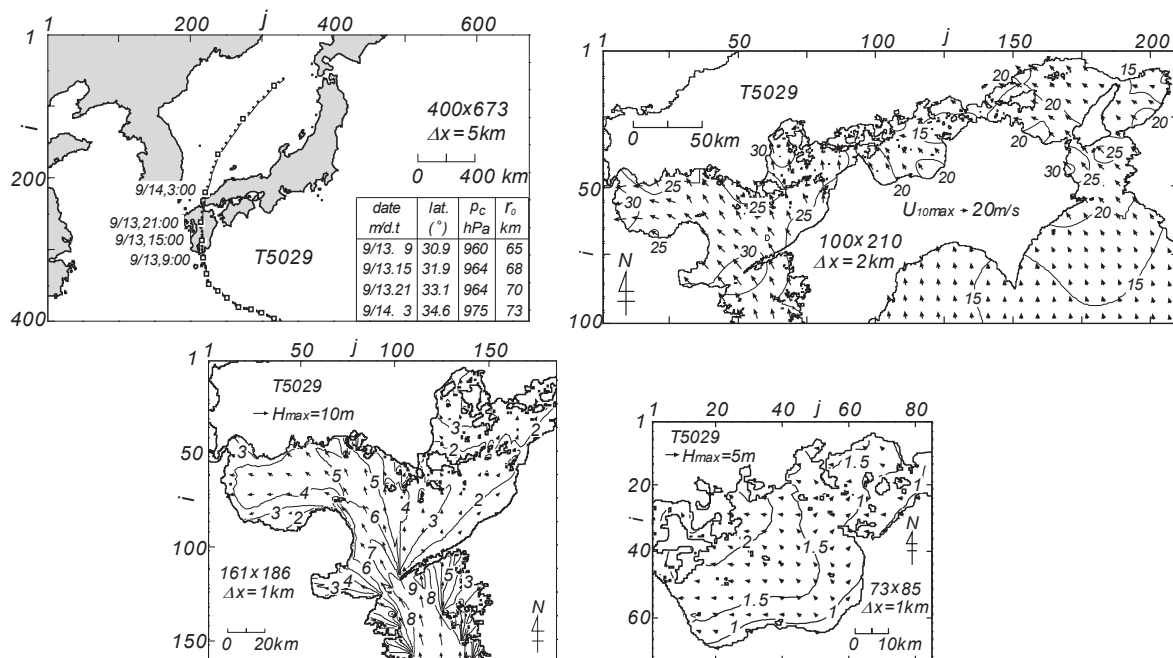


Fig. 8 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5029.

⑤T4516号（枕崎台風, Fig.9）

1) 台風特性と被災状況<sup>[16], [17]</sup>

本台風は1945年(昭和20年)9月11日グアム島の東海上で発生、W方向からN方向に進路を変えて沖縄付近を通過後、17日14時35分鹿児島県枕崎市付近に上陸した。枕崎で観測された最低海面気圧は916 hPaと非常に低い。その後、台風はNE方向に進み、九州、四国、近畿、北陸、東北地方を通過して三陸沖へ進んだ。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯33°線を横切った時点の中心気圧は950 hPa、台風半径は95 kmである。本台風はきわめて強い勢力のほか、終戦直後の混乱期に襲来したことが大きな要因となって、全国的に大被害をもたらした。とくに広島県では土石流や河川の氾濫が続出した。全国の人的被害は死者・行方不明者3,756名、負傷者2,452名、家屋被害は143,000棟、浸水被害は304,000棟にのぼった。

2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速30~40 m/sの強風域が広範囲に拡がり、佐田岬周辺海域や広島湾で40 m/sを超える。風向は西から東へN~W~Sと反時計方向に変化する。中部海域では、燧灘全域で風速は30~35 m/sをとり、今治付近で大きい、風向は西部でSE、東部でWである。東部海域でも、風速30 m/s域が広範囲に分布し、局所的に風速35 m/sに達する。台風から少し離れた紀伊水道では25~30 m/sとやや小さい。風向はS寄りである。このように、T4516号は瀬戸内海全域に非常に強い風をもたらしている。

3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、豊後水道に外洋から波向S、波高9~10 mの波浪が入射し、豊予海峡で6~7 m、そこから山口県沿岸に向けて波高を4 mに減らしている。周防灘では、波高は中部の4 mから西部の3 m、波向はEである。一方、伊予灘中央部で波高5 m、波向Wの高波高域が広範囲に拡がる。これは台風中心の通過後から2~3時間風速30~35 m/sをもつNW寄りの強風が吹送したことによる。安芸灘では波高は3 m程度と、強風のわりに大きくない。中部海域では、3 m波高域が広範囲に拡がり、燧灘の東側で波高4 m、波向W~WSWの高波高域が出現している。東部海域では、外洋から入射した

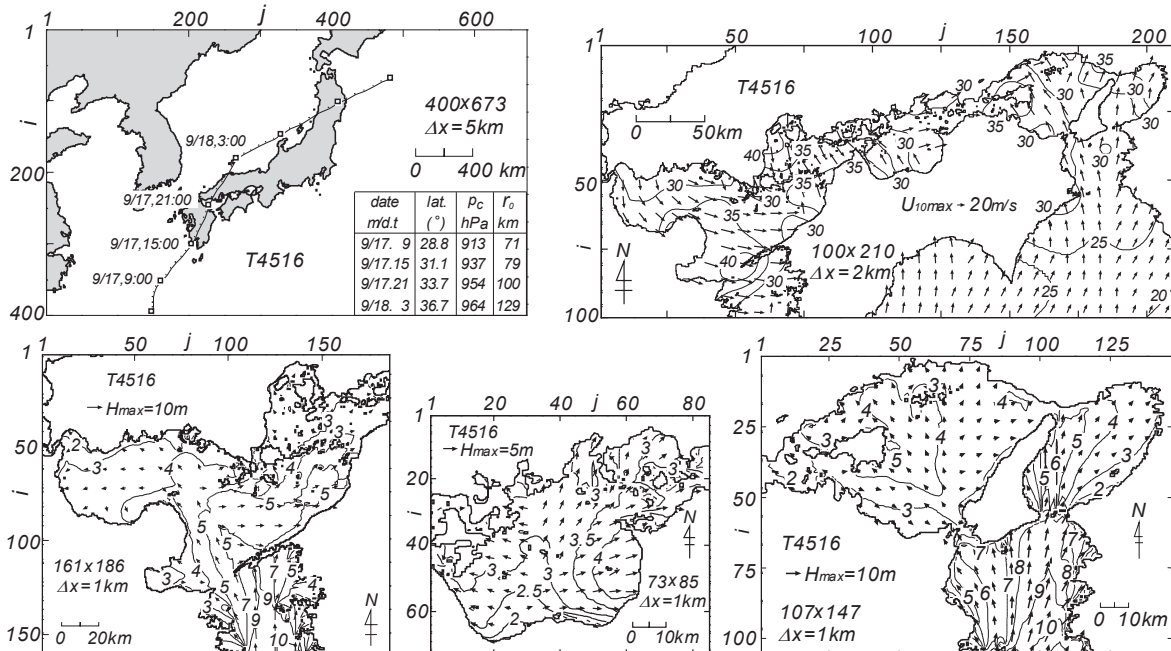


Fig. 9 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 4516.

波高 9~10 m の波浪に伴って、紀伊水道のほぼ全域で波向 S 寄りの 6~8 m 波高域が広がる。大阪湾では友ヶ島水道から対岸の北側海域で波高 5 m に達するが、東側海域では 3 m に減じる。波向は S から SW に変化する。播磨灘では鳴門海峡播磨灘側の波高 3 m から小豆島方向に向けて 5 m に増加する。明石海峡の西側でも 4 m 波高域がみられる。

### ⑥T5115 号 (ルース台風, Fig.10)

#### 1) 台風特性と被災状況<sup>[17], [18], [19]</sup>

本台風は 1951 年 (昭和 26 年) 10 月 9 日グアム島西方海上で発生、12 日沖縄の南海上で 924 hPa にまで発達し、最盛期を迎えた。14 日 19 時には鹿児島県西岸の串木野付近に上陸し、毎時 80 km という猛烈な速度で山口県を経て山陰沖に達したのち、北陸、東北を通して太平洋に抜けた。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯 33° 線を通過した時点の中心気圧は 965 hPa、台風半径は 165 km である。被害は北海道を除く各地方に及び、とくに鹿児島県における波浪と高潮による被害および山口県山間部の土石流による被害が顕著である。全国的人的被害は死者・行方不明者 943 名、負傷者 2,644 名、家屋被害は 221,000 棟、浸水被害は 138,000 棟にのぼり、船舶被害も 9,596 隻と非常に多い。

#### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、周防灘を除いて風速は 30 m/s を越え、伊予灘西部から豊後水道北部にかけて 40~45 m/s に達する。とくに豊後水道では風速 50 m/s を越える猛烈な風となっている。風向は西から東へ E~SE~S と変化する。中部海域では、燧灘東部を除いて風向 S~SW、風速 30 m/s を越える。東部海域では、播磨灘や大阪湾で風速 25 m/s、紀伊水道で風速 30 m/s をとる。風向は SE~S である。

#### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、豊後水道から入射した波高 10~11 m の波が豊後水道北部の強風によってその規模を維持し、佐田岬半島南側で波高 10 m、豊予海峡でも波高 9 m の高波高域となっている。内海部では豊後水道から豊予海峡を通して入射した波向 SSE の高波は周防灘の山口県沿岸で 4 m に減少する。伊予灘では波高は西部の 6~7 m から中部の 4 m 以下に小さくなるが、東部では SW 方向の風によって波

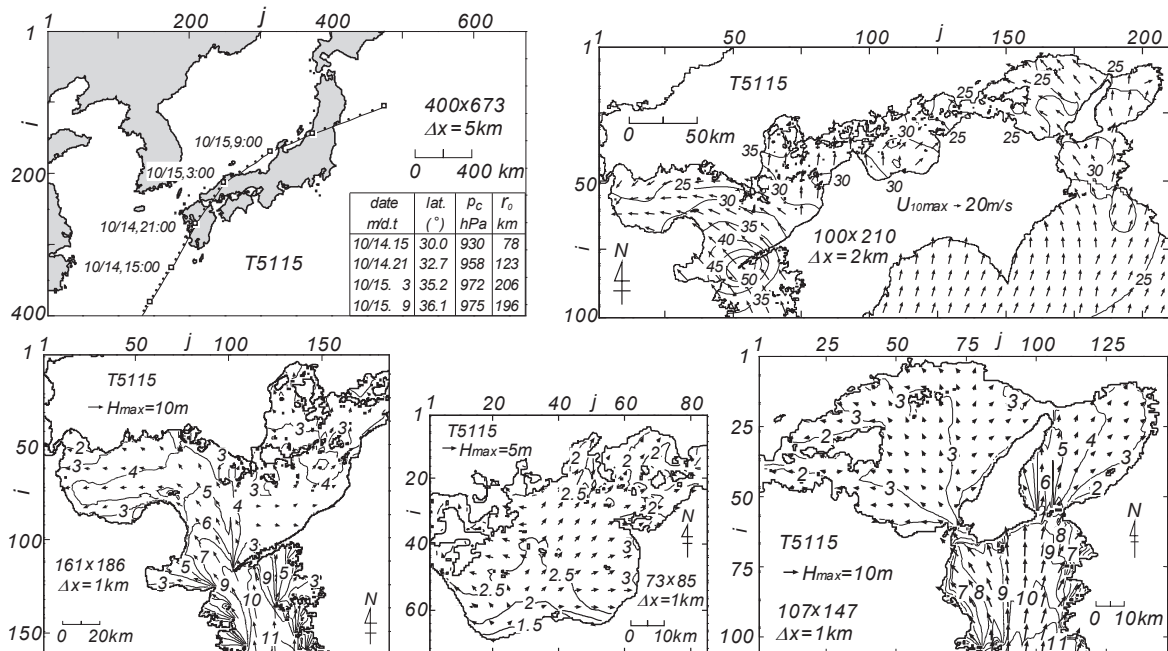


Fig. 10 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5115.

が発達し波高は4 mを越える。安芸灘では波高は3 mを越え、波向はSをとる。中部海域では、波高は2~3 mをとり、波向は燧灘西部でSE寄り、東部でSW寄りである。東部海域では、外洋から入射した波高11 mの巨大な波浪の影響により紀伊水道の広い範囲で波高は8~9 mを越える。大阪湾では紀伊水道から入射した波高7 mの波が放射状に減衰し、湾央で波高4 m、東岸で3 mをとる。波向は湾奥に向うほどSW方向に傾く。一方、播磨灘では波高は3 mを越える程度であり大きくない。波向はSE方向を中心に左右に傾く。

### ⑦T5415号（洞爺丸台風, Fig.11）

#### 1) 台風特性と被災状況<sup>[16], [17], [18]</sup>

本台風は1954年（昭和29年）9月18日3時トラック諸島の北方海上で発生、25日21時奄美大島の西方海上を時速80 kmという高速で通過、26日2時に鹿児島に上陸した。その後、九州東部、中国地方、山陰沖を経て日本海を北上し、九州上陸からわずか15時間で北海道付近にまで到達した。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯33°線を通じた時点の中心気圧は965 hPa、台風半径は160 kmである。この台風は速い速度のため非常に強い風を伴い、各地に主として風による被害をもたらしたが、瀬戸内海では1 mを越える高潮も発生した。全国の人的被害は死者・行方不明者1,761名（「洞爺丸」の沈没に伴う死者1,139名を含む）、負傷者1,601名、家屋被害は208,000棟、浸水被害は104,000棟であり、船舶の被害も5,581隻と非常に多い。

#### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は25~30 m/sであるが、伊予灘東部で風速30~35 m/sを示す。風向は西から東へNW~W~Sと反時計まわりに変化する。中部海域では、風速は25~35 m/s、風向はS~SWである。とくに、燧灘の愛媛県沿岸今治付近で風速は35 m/sを越える。風向はS~SWである。東部海域では、播磨灘と紀伊水道で風速30~35 m/s、大阪湾で25~30 m/sの強風場となっている。風向はS寄りをとる。

#### 3) 最大波高・波向の空間分布

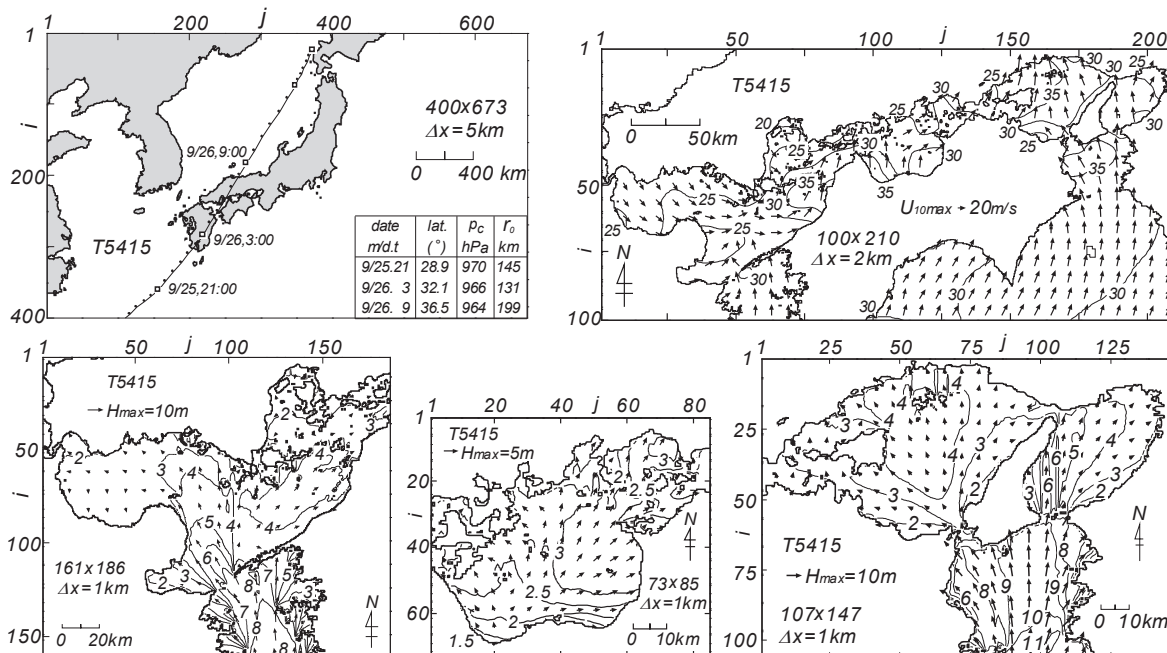


Fig. 11 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5415.

西部海域では、波高は豊後水道で 8 m、豊予海峡で 7 m をとる。内海部では豊予海峡から入射した波が減少し、対岸の山口県沿岸で波高 3 m になっている。周防灘では波高は 3 m より小さいのに対して、伊予灘の中部から東部では SW 方向の風によって波が発達し、波高は 4 m を越える。中部海域でも、燧灘の西部から東部にかけて SW 方向の波が発達し、波高 3 m を優に越える。東部海域では、紀伊水道入口で波向 S 寄りの 11 m 波高域、北部でも 8~9 m 高波高域が出現している。大阪湾では波高は友ヶ島水道付近の 7 m から対岸の須磨付近で 5 m になり、放射状に 3 m 程度に減少する。波向は湾奥に向うほど S から SW 方向に傾く。播磨灘では波高は鳴門海峡北西側海域で 2~3 m であるが、NW 方向に増加して小豆島~家島付近で 4 m を優に越える。波向は SE を中心に放射状に変化する。

### ⑧T18-Jul 台風 (Fig. 12)

#### 1) 台風特性と被災状況<sup>[9], [19]</sup>

本台風は 1918 年 (大正 7 年) 7 月 8 日カロリン諸島の北西海上で発生、11 日に南大東島付近を通過した。ついで、12 日 6 時に九州宮崎の北東海上に達し、豊後水道、伊予灘を通過して午後には日本海に抜けた。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯 33° 線を横切った時点の中心気圧は 953 hPa、台風半径は 130 km である。洪水や強風などによる被害は西日本全域に及び、高潮被害も発生した。全国の人的被害は死傷・行方不明者 211 名、家屋被害は 1,600 棟、浸水被害は 12,600 棟とされる。

#### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は 20~30 m/s であり、周防灘西部で相対的に小さいが、伊予灘東部や広島湾では 35 m/s 域が出現する。風向は海域によって大きく異なる。中部海域と東部海域では、備後灘・水島灘や大阪湾北部を除く広い範囲で 30~35 m/s の強風が吹送している。風向は両海域で SE 寄りを示す。

#### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、外洋から波向 SSE、波高 8 m の波が入射するが、豊予海峡で 5~6 m に減じる。また、内海部では山口県の防府付近で波高は 3 m と小さくなり、周防灘では西に向かうほど減少する。伊予灘では 4 m 波高域がみられるが、西部で波向は NE、東部で SW と 180° 異なる。つまり、伊予灘

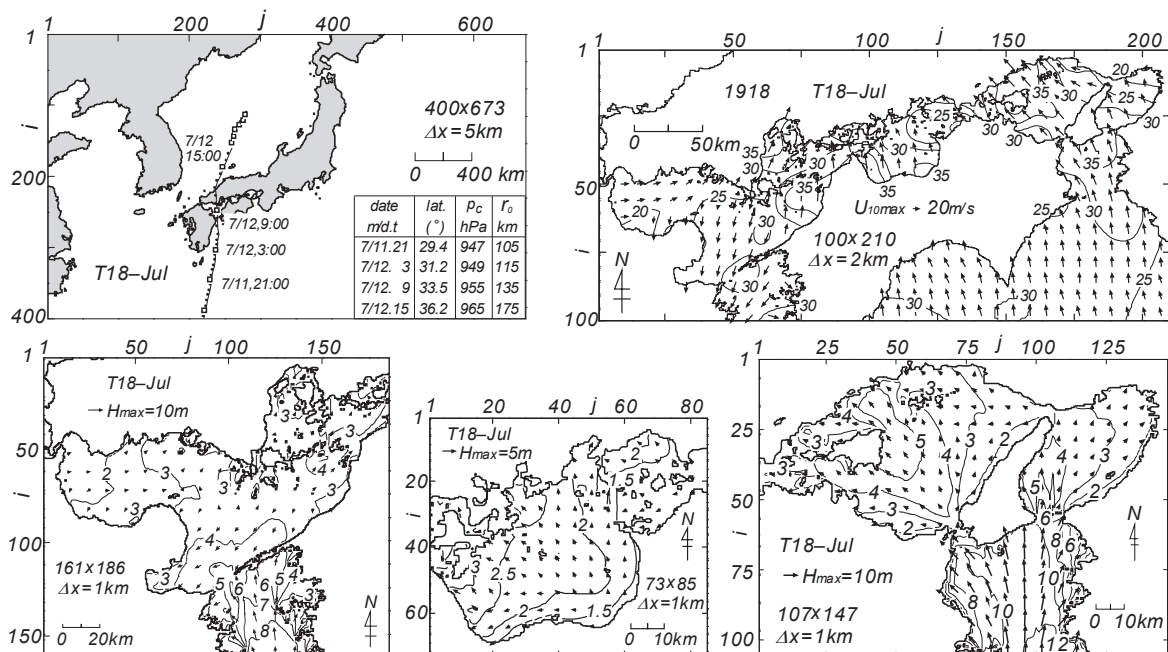


Fig. 12 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon T18-Jul.



西部と東部では台風の進行に合わせて最大波高の発生時刻に相違が現われる。安芸灘，広島湾，斎灘では波高は3 m程度である。中部海域では，波高は燧灘東部の1.5 mから西部の3 mに増加する。波向はSE寄りをとる。東部海域では，外洋境界から入射したS寄りの波高12 mの波が紀伊水道北部に到達し，紀伊水道のほぼ全域に波高8~12 mに及ぶ高波をもたらしている。大阪湾では友ヶ島水道から波高が急速に減少し，5 m波高域が北側に若干延びるにすぎない。湾中央から東側で波高は3 m以下になる。また，播磨灘でも紀伊水道で生じた高波が鳴門海峡から波高を大きく減じて入射したあと，波高は放射状に増加しており，対岸の小豆島沖で5 mを越える。波向はSEを中心に左右に傾く。

⑨T4326号 (Fig. 13)

1) 台風特性と被災状況<sup>[17]</sup>

本台風は1943年(昭和18年)9月14日マリアナ諸島付近で発生，20日には日向灘をNNE方向に進行して高知県宿毛付近に上陸したのち，四国・中国地方を横断して鳥取付近から日本海に抜けた。宿毛では最低海面気圧968 hPaが観測された。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯33°線を横切った時点の中心気圧は972 hPa，台風半径は80 kmである。この台風時には豪雨に伴って西日本各地で水害が発生し，とくに被害が大きい宮崎，大分，島根の各県のうちでも島根県の被害が際立つ。全国の人的被害は死者・行方不明者970名，負傷者491名，家屋被害は22,000棟，浸水被害は72,000棟に及ぶ。

2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では，広い範囲で風速25~30 m/sの風が出現するが，安芸灘から広島湾で35 m/sと大きい反面，周防灘西部では15~25 m/sと小さい。風向はおおむねNWであり，広島湾でNをとる。中部海域では，燧灘で風速は20~25 m/s，風向はNW~Wである。備後灘や水島灘では風速は15~20 m/sとやや小さい。東部海域では，風速は播磨灘や紀伊水道で25~30 m/sとやや大きく，大阪湾で20 m/s前後を与える。風向は紀伊水道のS寄りから大阪湾や播磨灘のSE寄りに反時計方向に変化する。

3) 最大波高・波向の空間分布

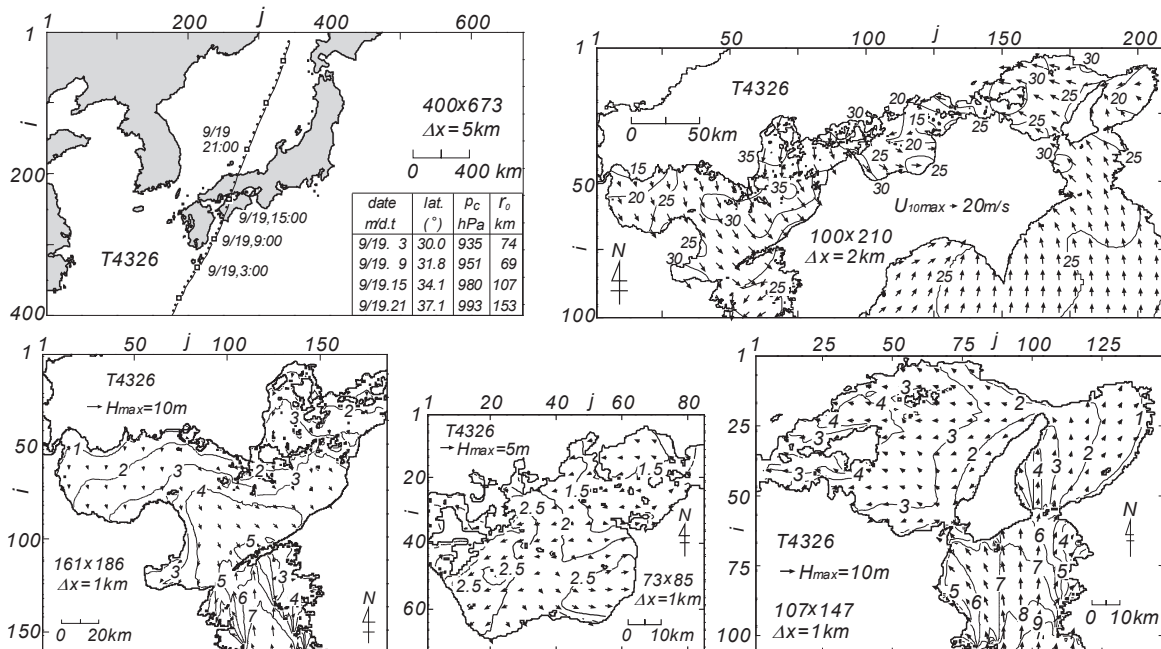


Fig. 13 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 4326.

西部海域では、豊後水道で波高 5~7 m の波が出現している。内海部では波高は豊予海峡の 5 m から海域中央部の波高 4 m, 周防灘東部の 2~3 m に小さくなるが、波向からみて、これらは NW 方向の風によって発達した内海発生波である。伊予灘や安芸灘でも波高は 3 m を越える。中部海域では、燧灘で波高 2.5 m を越える波が出現しているが、3 m には達しない。東部海域では、波高 6~7 m, 波向 S の波が紀伊水道の広い範囲で出現する。大阪湾では波高は友ヶ島水道から北側で 4 m, 東側に向うほど 3 m から 1 m に減少する。播磨灘では波高は中央部で 3 m, 小豆島付近で 4 m と、W 方向あるいは NW 方向に向けて大きくなる。

⑩T3706 号 (Fig. 14)

1) 台風特性と被災状況<sup>[9], [19]</sup>

本台風は 1937 年 (昭和 12 年) 9 月 2 日フィリピンの東方海上で発生した弱い熱帯低気圧を起源とし、8 日に次第に発達して 9 日午後沖縄の東方海上を通過、進路を NNE~NE に転じて、11 日朝四国の足摺岬付近に上陸したのち、四国地方、中国地方を横断して日本海に出た。清水測候所では 5 時 10 分最低海面気圧 951hPa を記録した。台風が豊後水道のほぼ中央部にあたる北緯 33° 線を横切った時点の中心気圧は 947 hPa, 台風半径は 60 km である。被害は四国・近畿地方を中心に全国に及び、全国の人的被害は死者・行方不明者 84 名, 負傷者 375 名, 家屋被害は 12,000 棟, 浸水被害は 28,000 棟である。

2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、周防灘西部の 15 m/s から東部の 20 m/s, 伊予灘の 25 m/s, 安芸灘・広島湾の 30 m/s と西から東に向けて大きくなる。風向は NW 寄りである。中部海域では、海域全体で風速は 35 m/s となっている。風向は西から東へ NW~SW と反時計方向に変化する。東部海域では、播磨灘と紀伊水道の広い範囲で風速は 30~35 m/s と非常に大きく、大阪湾でも 25~30 m/s をとる。風向は S~SE である。安芸灘・広島湾から大阪湾に至る内海域や紀伊水道北部で風が非常に強い。

3) 最大波高・波向の空間分布

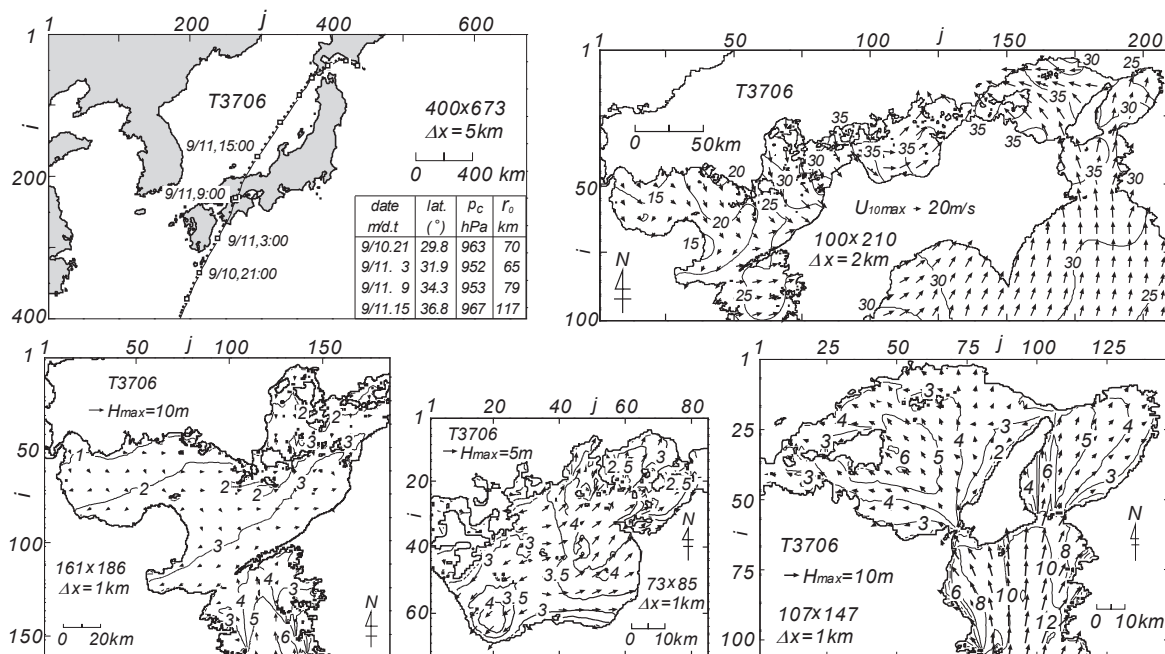


Fig. 14 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 3706.

西部海域では、外洋から入射した波の影響により豊後水道で波高 4~5 m をとる。内海部では別府湾から伊予灘東部にかけて波高 3 m の海域が存在するだけで、波高は全体的に小さい。中部海域では、燧灘西側で波向 NE 寄りの波高 3.5~4 m，東側や北東側で波向 W~SW，波高 4 m の波の場となっている。備後灘や水島灘では波高 2.5~3 m とやや小さい。東部海域では、外洋から入射した S 寄りの波高 11 m の波浪の影響により、8~10 m の高波高域が紀伊水道で広範囲に出現している。大阪湾では友ヶ島水道から北側の海域で 6~7 m の等波高線が延び、そこから大阪府沿岸の 3 m にまで波高が放射状に小さくなる。波向は S から SW 方向に傾く。播磨灘では鳴門海峡付近で 3 m の波高が NW 方向に 5~6 m にまで大きくなり、その線を中心に左右両方向に 3 m にまで小さくなる。波向もこれに伴い、SE 方向から E 方向や S 方向に傾く。

⑪T3805 号 (Fig. 15)

1) 台風特性と被災状況<sup>[9], [19]</sup>

本台風は 1938 年 (昭和 13 年) 8 月 31 日マリアナ諸島の東方海上で発生後、進行方向を W 方向から N 方向に変えながら発達し、9 月 5 日 11 時頃徳島県南部に上陸して、夕刻日本海に抜けた。台風が紀伊水道のほぼ中央部にあたる北緯 34° 線を横切った時点の中心気圧は 956 hPa，台風半径は 52 km と推測される。四国東部で雨量が多く河川の氾濫などのため多大の被害を生じた。全国の人的被害は死者・行方不明者 105 名，家屋被害は 1,100 棟，浸水被害は 31,000 棟である。浸水被害のうち 16,000 棟は大阪において高潮により生じている。

2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は大きくても安芸灘で 20 m/s 程度にとどまり、残りの海域で 15 m/s 以下と小さい。中部海域では、西側の 25 m/s から東側の 30 m/s に増加する。風向は NNW である。東部海域では、播磨灘の東部や紀伊水道の北西部で風速は 35 m/s を越え、大阪湾で 25~35 m/s といずれも非常に強い。風向は播磨灘と大阪湾で NE 方向，紀伊水道で SE~E である。

3) 最大波高・波向の空間分布

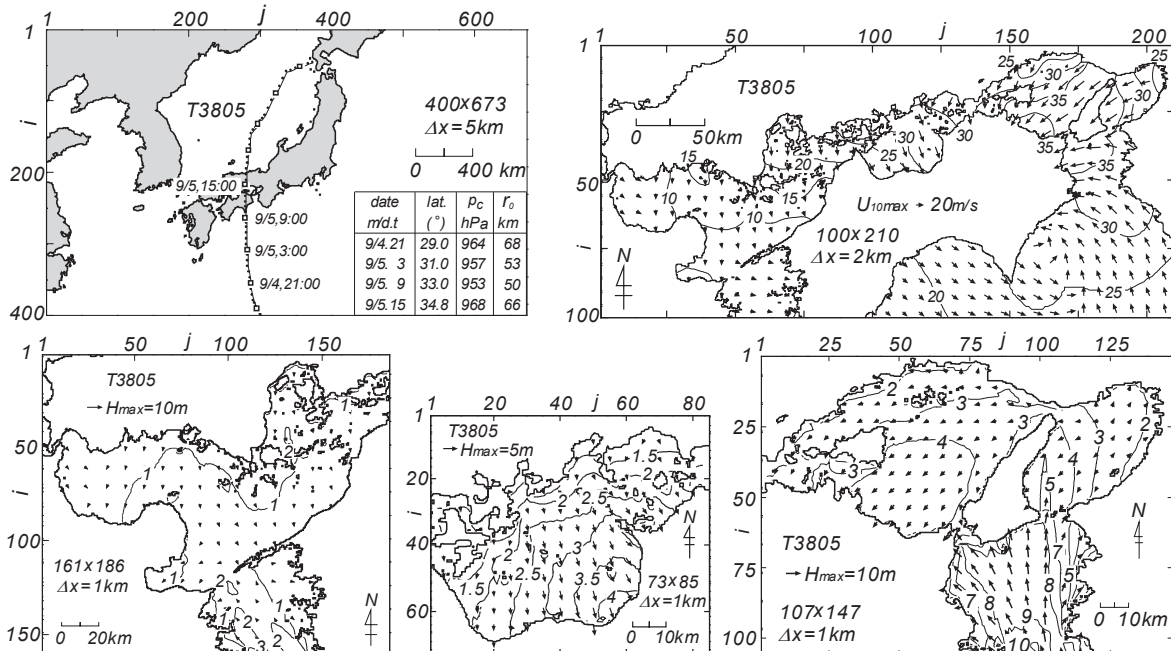


Fig. 15 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 3805.

西部海域では、境界付近で波高 3 m の波が出現しているが、それ以外の海域では 2 m 以下と、小さい。中部海域では、波高は北西部の 2 m から湾中央部の 3 m を経て南東部で 4 m に達する。波向は NNW である。東部海域では、外洋から入射した波高 9 m を越える波浪の影響により、紀伊水道の広い範囲で波向 SSE 寄りの波高 8 m の波が出現している。大阪湾では友が島水道付近での波高 6 m から湾奥の大阪方面に向けて 2 m にまで小さくなる。また、湾中央部より西側の海域では波高は 4 m を越える。その波向は NE 寄りをとることから、これは湾内発生波の強い影響を表す。播磨灘では波高は明石海峡付近の 3 m から香川県沿岸に向けて SW 方向に増加し、4 m を越える。香川県沿岸で高波高が生じているのが特徴的である。

## ⑫T3412 号 (室戸台風, Fig. 16)

### 1) 台風特性と被災状況<sup>[8], [16], [17], [18]</sup>

本台風は 1934 年 (昭和 9 年) 9 月 13 日頃カロリン諸島の南東海上で発生し、19 日夜半には沖縄の南東海上を通過、進路を NNE にとって 20 日夜半に九州宮崎の南東海上に達し、21 日 5 時少し前高知県奈半利町に上陸した。室戸測候所では 5 時 10 分 912 hPa の最低海面気圧を観測した。台風が紀伊水道のほぼ中央部にあたる北緯 34° 線を横切ったときの中心気圧は 940 hPa、台風半径は 100 km である。その後、台風は淡路島を経て 7 時 50 分頃に神戸の東方、深江あたりに再上陸し、NE 方向に進んで 9 時頃には敦賀付近に達し、北陸、東北地方を経て太平洋に進んだ。超大型の本台風は猛烈な風と豪雨によって全国的に甚大な風水害をもたらし、とりわけ大阪湾に発生した高潮によって阪神地区は未曾有の大被害を受けた。全国の人的被害は死者・行方不明者 3,036 名、負傷者 14,994 名、家屋被害は 93,000 棟、浸水被害は 401,000 棟である。船舶被害も 27,594 隻と膨大な数にのぼる。

### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、周防灘や伊予灘で風速は 15~25 m/s であるが、豊予海峡で 30~35 m/s と強い。伊予灘東部から斎灘、安芸灘・広島湾でも風速は 35 m/s を越える。風向は NNW である。中部海域では、濠洲灘全域で風速 35~40 m/s、備後灘や水島灘で 30~35 m/s の強風が吹いている。風向は西部海域、中

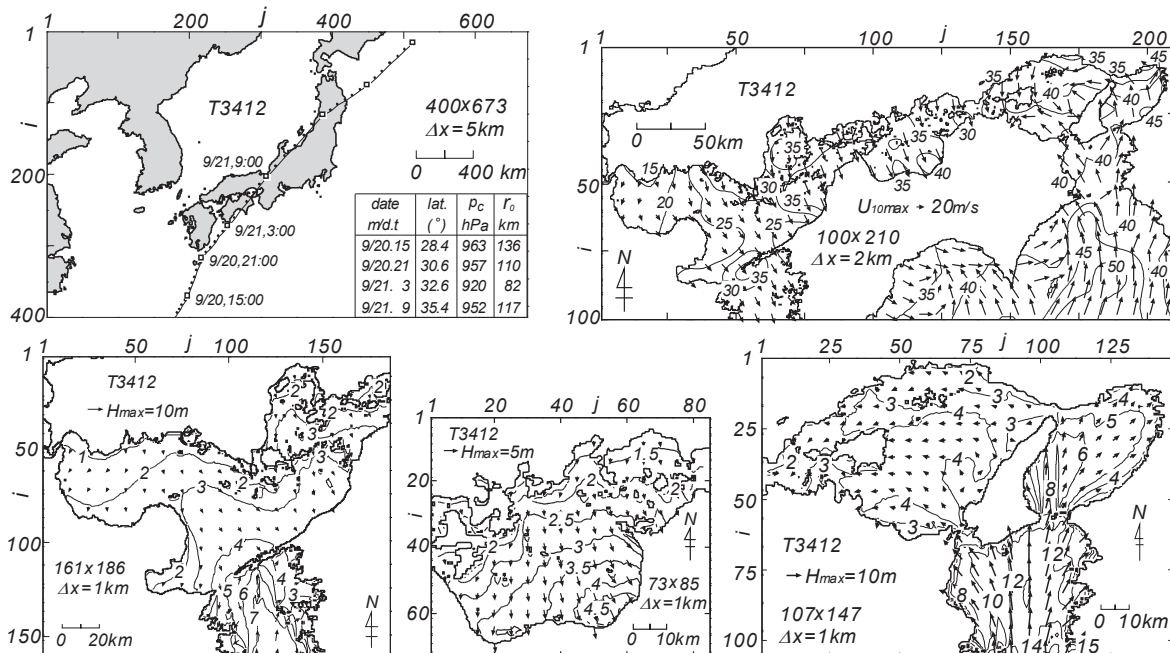


Fig. 16 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 3412.

部海域ともにNW~NNWである。東部海域では、播磨灘で35~40 m/s、大阪湾で35~45 m/s、紀伊水道で40~45 m/sの暴風となっている。風向は播磨灘北西部でN寄り、南東部でSE寄りと大きく異なるが、大阪湾と紀伊水道ではS寄りである。

### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、外洋から入射した波高7 mを越える波浪の影響により豊後水道で波高6~7 mの波が出現している。内海部では波高は周防灘の山口県沿岸から愛媛県沿岸に向けて増大し、中央部で3 m、佐田岬半島沖合で4 mをとる。波向は湾内発生波を表すNW方向を与える。安芸灘や斎灘では波高は3 m程度である。中部海域では、波高は北側の2 mから中央部の3 mを経て愛媛県東部の川之江付近で4.5 mに達する。波向はN~NNWである。東部海域では、外洋から入射したS寄りの波高14 mを越える波の影響により、紀伊水道で10~11 mあるいはそれ以上の高波高域が広範囲に広がる。大阪湾では友ヶ島水道から波高8 mの波が伝播し、対岸の須磨から大阪湾岸の沖合海域にかけて5 m波高域が広がり、大阪湾沿岸一帯でも波高は4 mに達する。波向は湾内に向うほどS方向からSW方向に変化する。播磨灘では、鳴門海峡付近からNW方向の小豆島沖に向けて4 m波高域が広範囲に広がるが、小豆島沖でも5 mには達しない。波向はSEを中心にE方向に傾く。

### ⑬T5028号 (ジェーン台風, Fig.17)

#### 1) 台風特性と被災状況<sup>[17], [18]</sup>

本台風は1950年(昭和25年)8月30日硫黄島の南西海上で発生、9月2日21時頃から進路をNNEにとって時速30~35 kmで進行し、3日高知県室戸岬のすぐ東を通り、10時頃徳島県日和佐町付近に上陸した。その後、台風は淡路島を通過し12時過ぎ神戸に再上陸、速度を上げてN方向に進行し13時30分頃若狭湾から日本海に進んだ。台風が紀伊水道のほぼ中央部にあたる北緯34°線を横切った時点の中心気圧は958 hPa、台風半径は95 kmである。本台風時には近畿地方の広い範囲で風速30~35 m/sの強風が吹き荒れ、これに伴い大阪湾で発生した大きな高潮によって大阪市や尼崎市などの湾岸地域が浸水し、大阪湾や紀伊水道では多数の船舶が沈没あるいは破損した。全国的被害は死者・

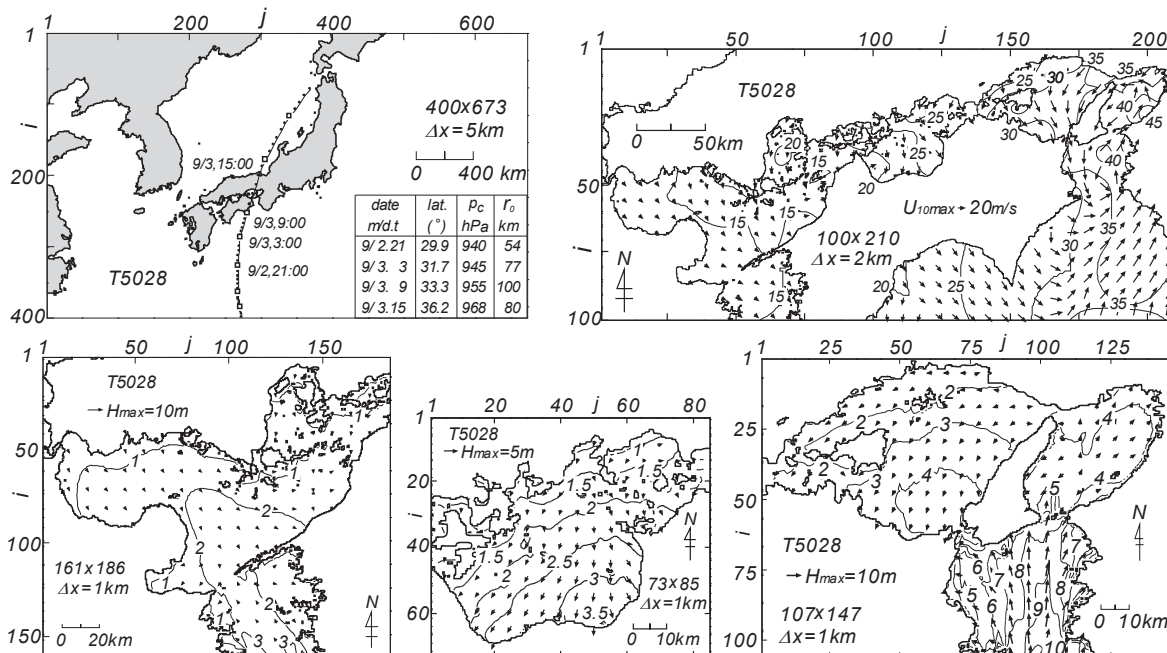


Fig. 17 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5028.

行方不明者 539 名，負傷者 26,062 名，家屋被害は 56,000 棟，浸水被害は 167,000 棟にのぼる。船舶の被害も 2,798 隻に達する。

### 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では，風速は 15 m/s 程度と小さい。中部海域では，風速は 20～25 m/s，風向は NW 寄りであり，燧灘東部や備後灘・水島灘で大きい。東部海域では，風速は紀伊水道で 30～40 m/s，大阪湾で 35～40 m/s をとり，そのうち大阪湾の南東部に 45 m/s の強風域がみられる。風向は台風の通過を反映して反時計回りの空間変化を示す。播磨灘では風速は 30～35 m/s，風向は NE～N となっている。本台風時には，紀伊水道北部から大阪湾で猛烈な風が吹送している。

### 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では，境界付近で波高 3 m の波が入射しているが，西部海域全域で波高は 2～3 m 以下と小さい。中部海域では，燧灘北部や備後灘から波が発達して，中央部で波向 N 寄り，波高 2～2.5 m，愛媛県東部の川之江付近で波高 3～3.5 m となっている。東部海域では，紀伊水道の境界付近で波高は 10 m，北部で 7～8 m であり，6 m 以上の波高域が大部分を占める。大阪湾では広範囲に 4 m の波高域が形成されている。波向は西部で NE，東部で SW というように，180° 異なる。播磨灘では波高は北部から南部に向けて大きくなり，鳴門海峡北西側海域で 4 m を越える。波向は ENE～N である。

## ⑭ T21-Sep 台風 (Fig. 18)

### 1) 台風特性と被災状況<sup>[15], [16], [19]</sup>

本台風は 1921 年（大正 10 年）9 月 16 日日本の南方海上北緯 20 度付近で発生し，W 方向に進んだのち，23 日以降速度を増しながら NE，NNE，N と向きを変え，25 日夜紀伊半島を縦断，26 日朝に能登半島の西海上に達した。台風が紀伊水道のほぼ中央部にあたる北緯 34° 線を横切った時点の中心気圧は 967 hPa，台風半径 83 km と推測される。近畿地方では暴風雨となり，大阪と名古屋では高潮も伴って被害は甚大であった。全国的被害は死者・行方不明者 852 名，負傷者 187 名，家屋被害は 12,500 棟，浸水被害は 25,900 棟に及ぶ。

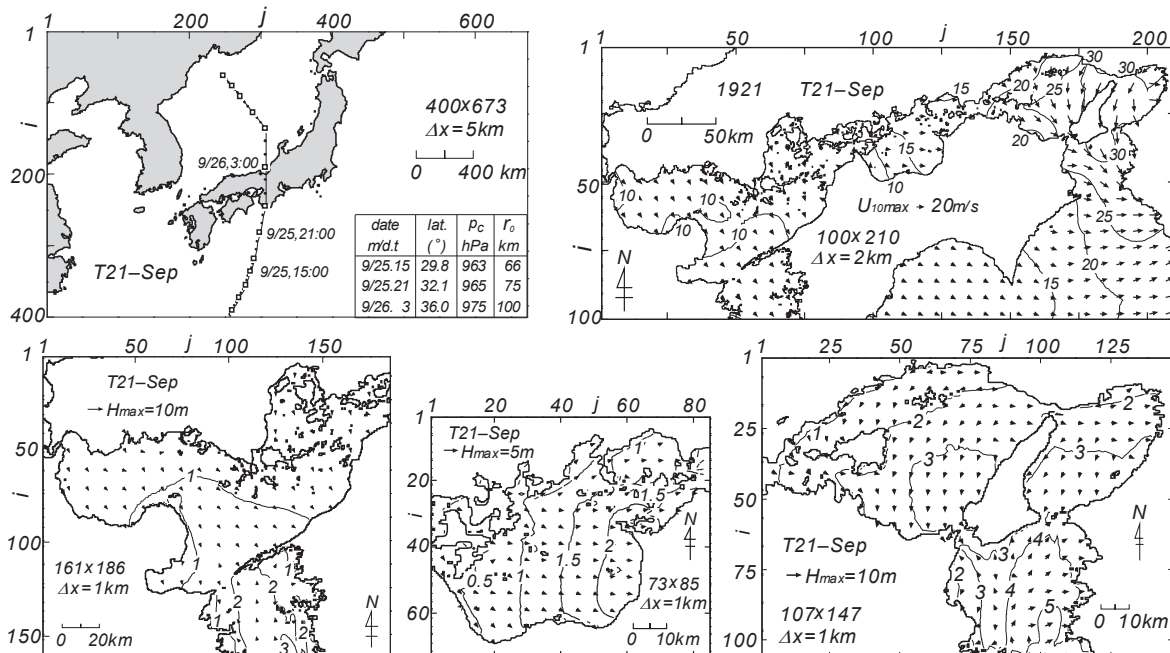


Fig. 18 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon T21-Sep.

## 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では風速は 10 m/s, 中部海域では 10~15 m/s と小さい。東部海域では紀伊水道で 20~30 m/s を与え, 北東部ほど強い。風向は W~NW である。大阪湾では風向は N~W で 30 m/s 以上の強風が出現している。播磨灘では風速は 20~30 m/s であり, 東部で強い。風向は NW 寄りである。

## 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では, 豊後水道境界付近に 3 m 波高域がみられる程度であり, 豊予海峡付近でも波高は 2 m に過ぎない。波向は S~SSE である。内海域では波高は海域中央部より北側の海域と別府湾で 1 m 以下, 伊予灘西部・中央部から豊予海峡周辺にかけて 1~2 m と小さい。波向は NW 方向をとる。中部海域では, 燧灘東側に波向 W の 2 m 波高域がみられるが, 全体として波高は小さい。東部海域では, 紀伊水道の南部で外洋から伝播した波向 S~SSW の 5 m 波高域がみられるものの, 中部から北部で波高 3~4 m, 波向 W, SW, SE をとり, 波向の空間変化が著しい。大阪湾では波高は湾奥の 2 m から中央の 3 m になり, 波向 NE をとりつつ友ヶ島水道付近に向けてさらに増加するが, 4 m に達しない。播磨灘では南東部に 3 m 波高域がみられ, そこから鳴門海峡方面に向けて増大するが, 4 m 以下にとどまる。波向は N 寄りである。移動速度の大きい本台風は風の場に著しい経時変化を生じることから, 風速のわりに波高は大きくない。

## ⑮ T5915 (伊勢湾台風, Fig.19)

### 1) 台風特性と被災状況<sup>[17]</sup>

本台風は 1959 年 (昭和 34 年) 9 月 21 日グアム島北東海域で発生, 22 日 9 時から 23 日 9 時までの間で中心気圧が 1 日に 91 hPa 下がるなど猛烈に発達し, 25 日昼頃まで 900 hPa 前後の猛烈な勢力を保ちつつ, 進路を NW から N に転じて 26 日 18 時頃和歌山県潮岬の西に上陸し, 時速 60~70 km で紀伊半島を縦断, 中部山岳地帯を経て 27 日 0 時過ぎに日本海に抜けた。上陸時に潮岬では 930 hPa の最低海面気圧を観測した。台風が紀伊水道のほぼ中央部にあたる北緯 34° 線を横切った時点の中心気圧は 936 hPa, 台風半径は 62 km である。本台風は超大型の強い台風で, 九州と北海道北部を除く全国各地

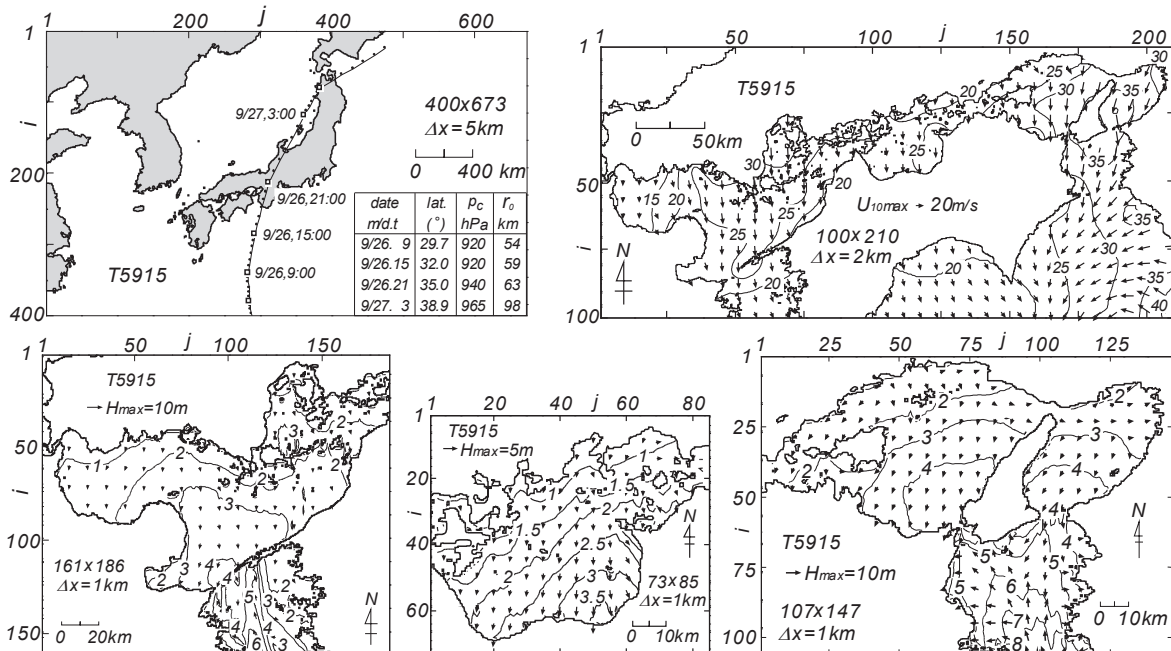


Fig. 19 Typhoon track diagram supplemented with a list of typhoon parameters and spatial distributions of maximum wind speed and maximum wave height induced by Typhoon 5915.

に被害を与えた。とりわけ、伊勢湾では台風の通過が満潮時と重なったために観測史上空前の高潮が発生し、猛烈な風、異常な高波と河川の洪水とが相まって、伊勢湾岸地域に未曾有の災害をもたらした。全国の人的被害は死者・行方不明者 5,098 名、負傷者 38,921 名、家屋被害は 834,000 棟、浸水被害は 364,000 棟である。船舶被害も 13,795 隻と膨大な数に達する。

## 2) 最大風速・風向の空間分布

西部海域では、風速は西から東へ向けて増大し、周防灘で 15~25 m/s、別府湾から伊予灘で 20~25 m/s、安芸灘・広島湾で 30 m/s をとる。風向はおおむね N である。中部海域でも、風速は 20~25 m/s で東側で大きい。風向は N である。東部海域では、紀伊水道で 30~35 m/s、風向は E~N であり、大阪湾でも同程度の風速・風向を与える。播磨灘では風速は 25~30 m/s、風向は N で南側ほど大きい。台風 5915 号は大阪から紀伊水道にかけて N 寄りの猛烈な風をもたらしている。

## 3) 最大波高・波向の空間分布

西部海域では、豊後水道境界から波高 3~5 m の波浪が入射する一方、豊後水道内部で内海発生波の影響が強くなる。すなわち、内海において波高が SE 方向に増加し、海域中央部で 3 m、豊予海峡で 4 m をとる。波向は NW~N である。豊予海峡では北部における内海からの波浪と南部における外洋からの波浪が拮抗している。伊予灘中部から東部では波高は 2~3 m、安芸灘でも波高は 3 m 程度である。中部海域では、波高は燧灘北部や備後灘から燧灘南部に向けて大きくなり、灘中央で 2 m、愛媛県東部の川之江付近で 3.5 m に達する。波向は N である。東部海域では、波高は紀伊水道の外洋境界付近で 8 m、紀伊水道内の広い範囲で 5~7 m を与える。波向は S 方向であるが、北東部ではむしろ N 方向をとる。大阪湾では波高は SW 方向に増加し、湾央で 3~4 m を示すものの、友ヶ島水道付近でも 5 m に達しない。波向は NE である。播磨灘でも波高は北部から南東部に向けて増加し、4 m を越えるが、波高の最大域にあたる鳴門海峡北西側海域でも 5 m 以下である。波向は NNE~N を与える。大阪湾や播磨灘における波高の空間分布は T5915 時の強風特性、すなわち台風の左半円における N 寄りの強風特性を反映する。

# 4. 風速・波高の極値の空間分布

## 4.1 風速の極値

Fig. 20 は 1918~1959 年 (42 年間) 15 ケースの台風時最大風速資料と 1961~2005 年 (45 年間) の年最大風速資料を併せて得た 1918~2005 年 (88 年間) の期間最大風速  $U_{max}^{18-05}$  とその風向の空間分布を表す。1918~1960 年において台風時最大風速資料がない年には異常風速が生じていないことが天気図や災害記録、気象要覧などから推察されるので、これらの空白期間の風資料が上記の期間最大風速を越えることはない。図によると、風速 50 m/s 域が紀伊水道沖合と佐田岬周辺でみられる。前者は T3412 号時に、後者は T5115 号時に生じた結果を反映する。ただし、紀伊水道中部以南の海域や土佐湾とその沖合海域では、海上風分布の推定に用いる SDP 風観測地点の数や海上・沿岸観測地点の数が少ないことから、海上風分布の推定精度はあまり高いとは言えない。ついで、45 m/s 域が上述の海域周辺の海域に加えて大阪湾内に

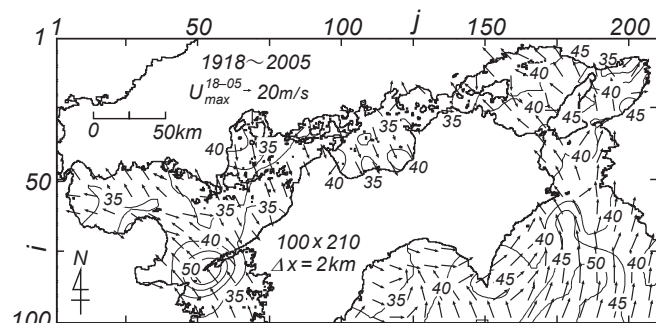


Fig. 20 Largest wind speed  $U_{max}^{18-05}$  and its wind direction on the Seto Inland Sea during the period of 1918 - 2005.



現われる。これは T3412 号のほか T5028 号による。40 m/s 域は瀬戸内海全域でみられるが、豊後水道中部、周防灘、伊予灘中部と東部、安芸灘、斎灘、燧灘、備後灘・水島灘はむしろ 35 m/s 域に入っている。期間最大風速を発生した主な台風は、土佐湾、紀伊水道、大阪湾、播磨灘の中部と東部、燧灘、斎灘で T3412 号、備後灘・水島灘と播磨灘西部で T3706 号、広島湾・安芸灘で T4516 号、T4216 号、周防灘南部と東部で T4516 号、伊予灘西部と豊後水道で T5115 号、周防灘で T4216 号という 1959 年以前の台風であり、1961 年以降の台風については中部海域の燧灘西部、伊予灘東部で T7010 号、周防灘北部で T9119 号があげられるにすぎない。小さな海域では T6118 号、T5028 号、T6420 号、T6523 号、T18-Jul 台風などの寄与もみられる。なお、風向は多くの海域で SE~S であるが、伊予灘では W 寄り、広島湾・安芸灘から燧灘では N 寄りをとる。これらは期間最大風速をもたらしたそれぞれの台風の特徴を反映するのは言うまでもない。

Fig. 21 は 1918~2005 年の期間最大（第 1 位）風速  $U_{max}^{18-05}$  と第 2 位風速  $U_{2nd\ max}^{18-05}$  の比から 1 を引いた第 1 位風速の第 2 位風速に対する突出率のパーセント値  $(U_{max}^{18-05}/U_{2nd\ max}^{18-05} - 1) \times 10^2$  の空間分布を示す。突出率は 30 % を越える紀伊水道南部や 20 % を上まわる佐田岬周辺を除く海域では、10 % 程度あるいはそれ以下であるから、第 1 位風速は第 2 位風速からかけ離れた値となっていない。

つぎに、極値統計解析は 1934~1959 年の台風時最大風速資料をそれぞれ該当する年の年最大風速資料とみなすことにより、1934~2005 年 (72 年間) および 1961~2005 年 (45 年間) の年最大風速資料に対してそれぞれ資料採択率を 1/3 と設定して行った。資料期間の短縮は、1918~1933 年においては対象台風が 2 ケースのみで資料数が少なすぎることを、および小さい資料採択率の採用は 1934~1960 年 (27 年間) においても 13 ケースの台風時最大風速資料 (1950 年のみ T5028 号と T5029 号の 2 ケースの資料) によって 12 年相当分の年最大風速資料を得ているにすぎず、したがって中規模以下の値をもつ年最大風速資料が除外されている可能性が高いこと、を考慮したためである。後者では、27 年間 13 ケースの台風時最大風速資料と 1961~2005 年の年最大風速資料によって、1934~2005 年の 72 年間

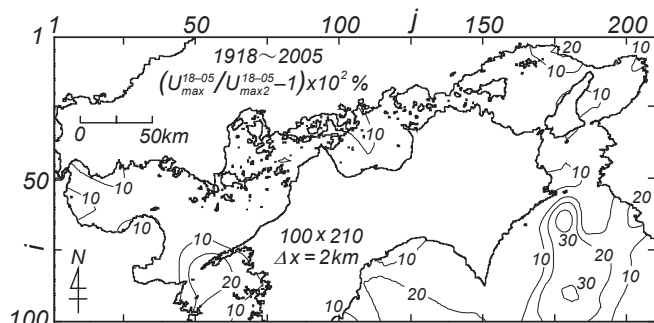


Fig. 21 Percentage expression of a one-subtracted ratio of largest wind speed to second largest wind speed  $(U_{max}^{18-05}/U_{2nd\ max}^{18-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea during the period of 1918 - 2005.

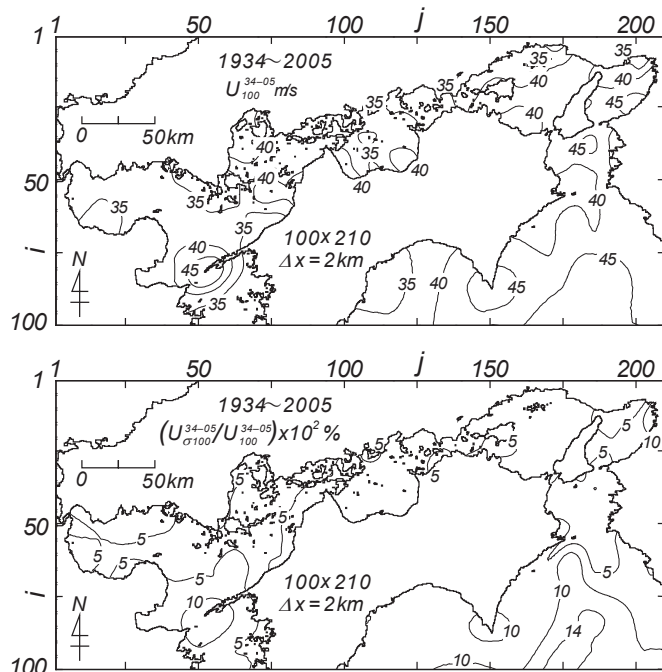


Fig. 22 100-year return wind speed  $U_{100}^{34-05}$  and percentage expression of its variation coefficient (standard deviation  $U_{\sigma 100}^{34-05}$  divided by 100-year return wind speed)  $(U_{\sigma 100}^{34-05}/U_{100}^{34-05}) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea estimated using the annual maximum data during the period of 1934 - 2005.

で最上位近くに分類される年最大風速資料が瀬戸内海全域においてできるだけ漏れなく採択されることを期待している。

Fig. 22 は 1934~2005 年の年最大風速資料を用いて推定した 100 年確率風速  $U_{100}^{34-05}$  とその変動係数 (100 年確率風速の標準偏差  $U_{\sigma 100}^{34-05}$  を  $U_{100}^{34-05}$  で割った値) のパーセント値の空間分布を表す。100 年確率風速は佐田岬周辺海域、広島湾・安芸灘、斎灘から燧灘の西部と南東部の一部、播磨灘から大阪湾、紀伊水道とその沖合海域で 40~45 m/s を与え、とくに佐田岬周辺海域、大阪湾の一部、室戸岬周辺海域や紀伊水道沖合海域で 45 m/s を越える。これ以外の海域では、35 m/s 以下を示す豊後水道、周防灘西部、伊予灘中部から東部、燧灘中央の一部、水島灘を除いて 35~40 m/s をとる。変動係数は内海部では佐田岬周辺海域や大阪湾の湾奥を除いて 10%より小さいが、これらの海域に加えて紀伊水道の沖合海域や室戸岬の周辺海域で 10%を越える。

Fig. 23 は資料期間の延長 (45 年間から 72 年間へ) に伴う 100 年確率風速の変化量の空間分布を示す。変化量は  $(U_{100}^{34-05}/U_{100}^{61-05} - 1) \times 10^2$  で定義されるパーセント値で表す。ここに、 $U_{100}^{61-05}$  は 1961~2005 年 45 年間の年最大風速資料のうち上位 1/3 の資料に対する解析より得た 100 年確率風速である。資料期間の延長に伴い、最上位クラスの高風速資料が含まれる機会が増えることから、確率風速の推定値は大きくなるが、その割合は瀬戸内海の大部分の海域で 10%あるいはそれ以下であり、山口県沿岸や伊予灘中部ではむしろ確率風速の推定値が若干減少する。一方、佐田岬周辺海域、広島湾、水島灘、播磨灘北西部では確率風速の推定値が 20%以上増加する。これは 1959 年以前の巨大台風 (T5115 号、T4516 号、T4326 号など) に伴う最上位クラスの風速資料の影響を表す。紀伊水道でも T3412 号に伴う異常風速の影響が現われて、10%以上の値をとる。

Fig. 24 は 1918~2005 年 (88 年間) の間の第 1 位風速と 1934~2005 年の年最大風資料に基づく 100 年確率風速  $U_{100}^{34-05}$  の大小関係を突出率のパーセント値  $(U_{max}^{18-05}/U_{100}^{34-05} - 1) \times 10^2$  の空間分布として示したものである。資料期間は 88 年、再現期間は 100 年とそれほど離れていないことから、第 1 位風速と 100 年確率風速は同程度の値をとると期待される。突出率は瀬戸内海の大部分の海域で 0 よりやや小さい負の値か、やや大きい正の値をとることから、大略として第 1 位風速が 100 年確率風速と同程度の値となっている。しかし、T5115 号により最強風速が生じた佐田岬周辺海域や外洋に接続する海域のうち T3412 号により最強風速が生じた紀伊水道の南部では、第 1 位風速が 100 年確率風速より 8%以上大きい。

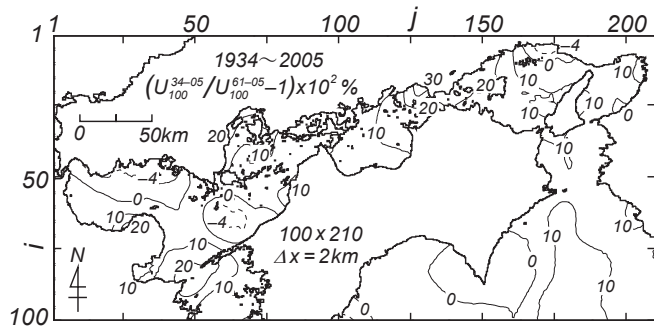


Fig. 23 Change of 100-year return wind speed  $(U_{100}^{34-05}/U_{100}^{61-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea associated with extension of the data period from 45 years to 72 years.

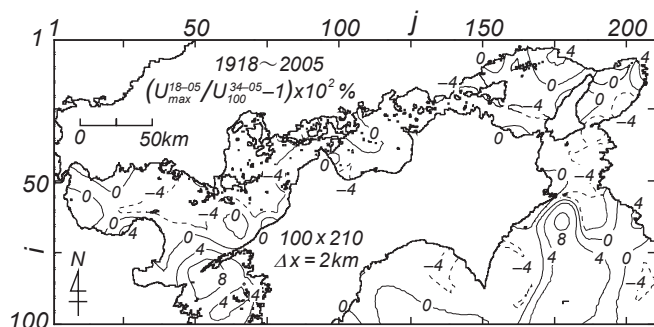


Fig. 24 Percentage expression of a one-subtracted ratio of largest wind speed during the period of 1918 - 2005 to 100-year return wind speed  $(U_{max}^{18-05}/U_{100}^{34-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea.

## 4.2 波高の極値

Fig. 25 は 1918～1959 年 (42 年間) 15 ケースの台風時最大波高の格子点別値資料から抽出した 1918～1959 年の期間最大波高  $H_{max}^{18-59}$  の空間分布を示す。まず西部海域についてみると、豊後水道では南部で 11 m、北部で 9 m の波高域が広がり、波向は南部で S、北部で SSE をとる。期間最大波高発生台風は南部、北部ともに T4516 号と T5115 号による。豊予海峡から対岸の山口県沿岸にかけて波高は 8～9 m から 6 m に減じ、波向は SSE をとる。主な発生台風は豊予海峡で T5115 号、そこから北西側で T5612 号と T4216 号である。周防灘では波高は東部の 6 m から西部の 4 m に減じ、波向は E を中心に SE～ENE、発生台風は T4216 号である。伊予灘では波高は西部の 7～8 m から中部の 5 m、波向は SE から W、東部で波高 5 m、波向 W～SW を与え、発生台風はいずれも T4516 号である。安芸灘では波高は北部で 4 m 以上、波向は SSE、発生台風は T4216 号、南部で 3～4 m、波向は NNW、発生台風は T4326 号、広島湾では波高は 3 m、波向は NNE、発生台風は T4216 号と T18-Jul 台風、斎灘では波高は 3～4 m、波向は S～SSW、発生台風は T5115 号と T4516 号である。ついで中部海域についてみると、波高分布の特徴は 3 つの小海域別に記述される。すなわち、燧灘西部では波向 NE の 4 m 波高域が、燧灘東部では波向 NNW の 4.5 m 波高域がみられる。前者は T3706 号時、後者は T3412 号時に生起している。燧灘中央から北東部では波向 W～SW の 4 m 波高域が広範囲に広がり、備後灘や水島灘でも 3～3.5 m 波高域が出現している。これらは T3706 号と T4516 号による。さらに東部海域についてみると、紀伊水道では境界付近で波高は 14～15 m、波向は S～SSW、内部で波向 S 寄りの 10～12 m 波高域が大部分を占める。大阪湾では友ヶ島水道付近の 8～9 m の波高は湾奥に向けて 4 m に減少する。波向は S 方向から SW 方向に傾く。播磨灘では波高は広い範囲で 4～5 m をとり、小豆島沖のごく一部で 6 m に達する。小豆島沖で波向は SE である。期間最大波高発生台風は、紀伊水道では T3412 号、大阪湾でも主として T3412 号であるが、播磨灘では小豆島沖での T3706 号や北東部海域での T4516 号など小海域別に異なる。

Fig. 26 は 1918～1959 年 15 ケースの台風時最大波高資料と 1961～2005 年 (45 年間) 256 (西部海域), 174 (中部海域), 181 (東部海域) ケースの台風時・低気圧時最大波高資料<sup>[1]</sup>から得た 1918～2005 年 (88 年間) の期間最大波高  $H_{max}^{18-05}$  と波向の空間分布を示す。災害記録, 気象要覧, 天気図などの資料から, 1918～1959 年の間で波高資料がない年および 1960 年には, 瀬戸内海において巨大台風による異常波高は発生していないと推測されるので, これらの年の最大波高が少なくとも上記の期間最大波高を上まわることはないとみなされる。西部海域においては, 豊後水道で 10～11 m 波高域が広がり, 豊予海峡で波高は 9 m, そこから対岸の山口県沿岸に 7 m 域が延び, 周防灘中部の 6 m 域も西側に寄る。これらの海域における期間最大波高発生台風は豊後水道の広い海域で T8013 号, T0514 号, T0418

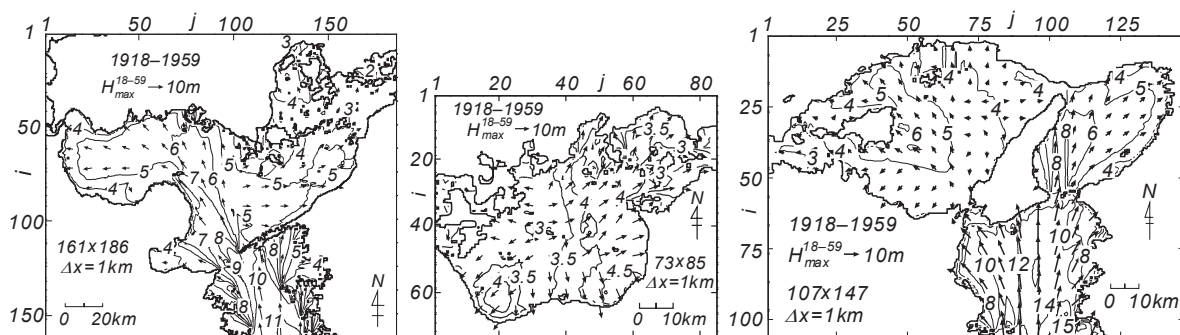


Fig. 25 Largest wave height  $H_{max}^{18-59}$  and its wave direction on the Seto Inland Sea during the period of 1918 - 1959.

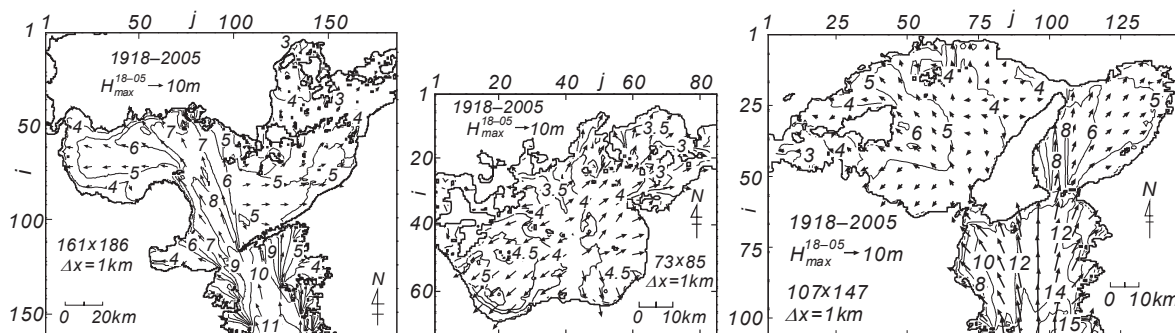


Fig. 26 Largest wave height  $H_{max}^{18-05}$  and its wave direction on the Seto Inland Sea during the period of 1918 - 2005.

号など、伊予灘西部から周防灘東部で T0418 号、山口県沿岸で T9119 号、T7119 号、斎灘の半分で T7010 号、T9119 号など 1961 年以降の台風置き換わる。一方、豊予海峡周辺海域、伊予灘中部から東部、安芸灘や広島湾における最大波高発生台風は 1959 年以前の台風である。斎灘では最大波高発生台風として 1959 年以前の台風と 1961 年以降の台風が混在するが、波高値にあまり差をもたない。中部海域においては、燧灘の南北方向中央線より西側の海域で波高がより大きくなっており、燧灘の南西部で 5 m 波高域が出現する。これは T7010 号による。要するに、燧灘の南北方向中央線より東側および西側の海域における期間最大波高はそれぞれ 1959 年以前の台風時と 1961 年以降の台風時に生じている。東部海域においては、紀伊水道と播磨灘で波高の等値線は Fig. 25 とよく似た形状を示す。ただし、紀伊水道境界近くの 14~15 m 波高域は T6118 号時に生じているが、これ以外の海域で T18-Jul 台風および T3412 号時と同程度の波高を与えることから、上記の挙動が得られる。大阪湾では T6118 号時に生じた北東~東側海域の最大波高や T6420 号時に生じた北側海域の最大波高によって 5 m 波高域が N~NE~E 側に拡大している。各海域の波向の特性は Fig. 25 とほとんど変わらない。

Fig. 27 は 1918~2005 年間の期間最大 (第 1 位) 波高  $H_{max}^{18-05}$  と第 2 位波高  $H_{max2}^{18-05}$  の比を用いた第 1 位波高の突出率  $(H_{max}^{18-05}/H_{max2}^{18-05} - 1) \times 10^2$  の % 値を表す。西部海域においては、突出率は大部分の海域で 10% 以下であるが、伊予灘の中部北側や東部および国東半島西側の周防灘南東部で局所的に 20% を上まわる。安芸灘北西部でも 20% をかなり越える。前者は T4516 号時に、後者は T4216 号時に生じた異常波高による。中部海域においては、突出率は燧灘の西側および備後灘東部と水島灘西部で高く、広い範囲で 30% を越え、局所的に 40% を上まわる。他の海域では 20% 以下である。さらに東部海域においては、突出率が 20% 以上をとる海域が大阪湾内の淡路島沿岸と南部の一部や播磨灘の淡路島西

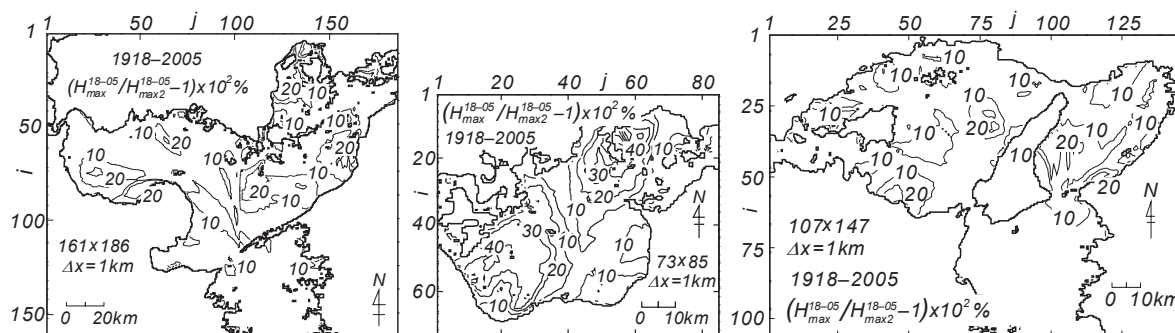


Fig. 27 Percentage expression of a one-subtracted ratio of largest wave height to second largest wave height  $(H_{max}^{18-05}/H_{max2}^{18-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea during the period of 1918 - 2005.

側，香川県沿岸の一部でそれぞれみられるが，10 %以下の海域が大部分であり，中部海域における突出率に比べてあまり大きくない。つまり，東部海域では第2位波高をはるかに上まわる第1位波高（期間最大波高）は生じていないことがわかる。

Fig. 28 は資料採択率を 1/3 とした 1934～2005 年（72 年間）の年最大（AM）波高資料に対する極値統計解析から求めた 100 年確率波高  $H_{100}^{34-05}$  とその変動係数（100 年確率波高の標準偏差  $H_{\sigma100}^{34-05}$  を  $H_{100}^{34-05}$  で割った値）のパーセント値の空間分布を 3 海域について示す。まず西部海域においては，100 年確率波高は豊後水道では 10～11 m，南部から北部にかけての中心線とその周辺で 11 m 以上をとり，東西の沿岸部に向けて減少する。内海部では波高は豊予海峡の 9 m から対岸の山口県沿岸の 7 m に向けて減少する。周防灘では東部の 7 m から西部の 4 m に向けて小さくなる。別府湾では湾奥に向けて 6 m から 4 m になる。伊予灘では西部で東に向けて 8 m から 6 m に急減し，中部で 6 m から 5 m，東部で 4～5 m の値をとる。安芸灘では 3～4 m，広島湾で 3 m，斎灘で 3 m を上まわる。中部海域においては，100 年確率波高は隠灘西部および東部で 4～4.5 m，中央部の広い海域で 3.5～4 m をとる。備後灘と水島灘では 3～3.5 m である。東部海域においては，紀伊水道の南部で 14～15 m，ほぼ全域で 10 m 以上となっている。大阪湾では友ヶ島水道で 9 m，湾岸で 4 m となる。ここでは，5 m 以上の海域が大部分を占める。播磨灘では波高は東部を除いて 4 m 以上の値をとり，小豆島沖合で 5 m を越えるが，6 m には達しない。

変動係数は 3 海域ともに Fig. 27 に与えた第 1 位波高  $H_{max}^{18-05}$  の突出率の空間分布と類似した空間分布を与える。すなわち西部海域においては，変動係数は伊予灘の中部北側と東部，安芸灘北西部，周防灘南東部などで 10 % を越える。中部海域においても，変動係数は南西部と北東部の広い海域で 10 % を越え，それぞれ局所的に 15 % を上まわる。東部海域においては，大阪湾の中央部で西岸から東岸ま

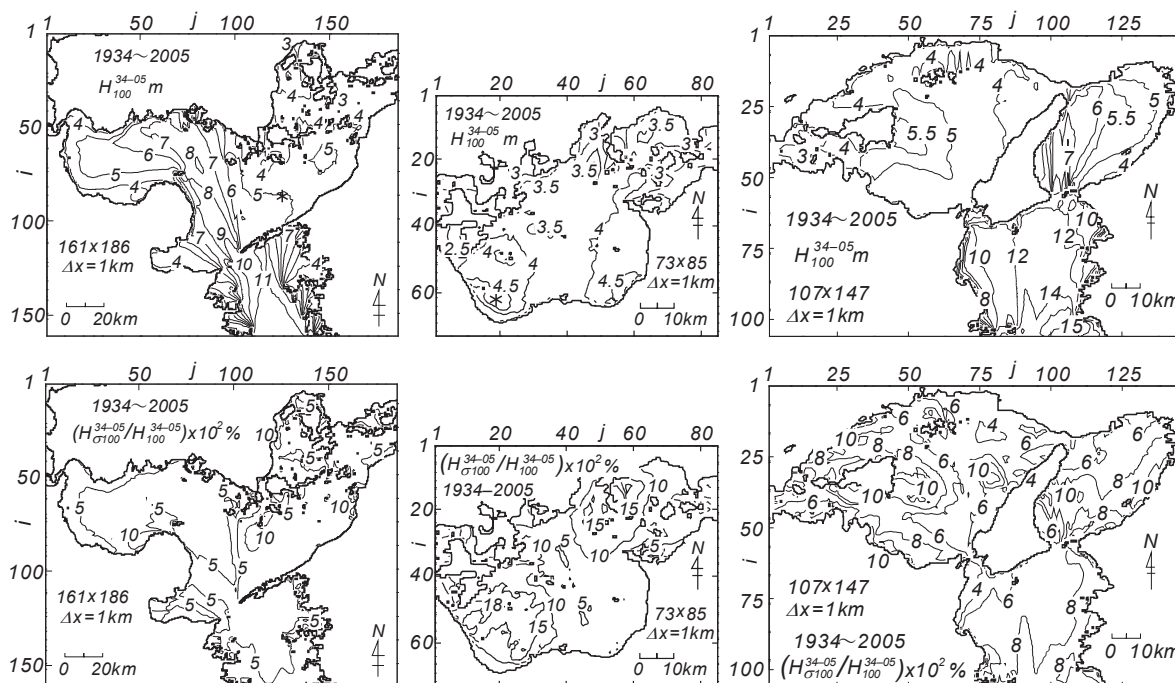


Fig. 28 100-year return wave height  $H_{100}^{34-05}$  and percentage expression of its variation coefficient (standard deviation  $H_{\sigma100}^{34-05}$  divided by 100-year return wave height)  $(H_{\sigma100}^{34-05}/H_{100}^{34-05}) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea estimated using the annual maximum data during the period of 1934 - 2005.

での広い範囲、播磨灘の淡路島西側、小豆島の周辺、香川県沿岸で変動係数が 10 %をとる海域が存在するが、中部海域に比べて突出した値を示さない。こうした海域を除けば、瀬戸内海の西部海域、中部海域、東部海域のいずれにおいても変動係数が 6 %、あるいは 8 %より小さい値をとる海域が多い。

Fig. 29 は Fig. 28 の西部海域および中部海域の図中に\*印でそれぞれ位置を示した格子点番号 (87, 125) 地点と (62, 19) 地点における 1934~2005 年 72 年間の年最大波高資料  $H_{AM}$  のうち、上位 1/3 の資料に対する最適分布のあてはめ結果および Q-Q プロット図を表す。ここに、 $F$  は非超過確率を表す。第 1 位波高が相対的に突出した値を与えるこれらの地点では、最適分布は形状母数  $k=15$  の FT-II 型分布および形状母数  $k=0.7$  の Weibull 分布であり、いずれも正側にやや長く裾を引く形状をとる。相関係数  $\rho$  はそれぞれ 0.995 および 0.994 であり、最適分布の資料に対する適合性は高い。

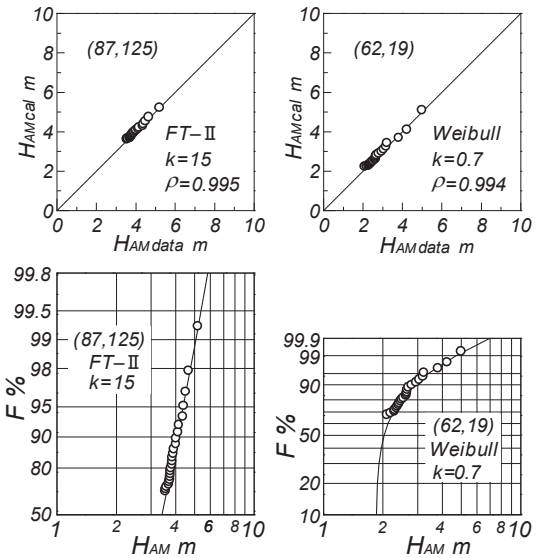


Fig. 29 Two examples for fitting of optimum distribution to annual maximum wave height data and its quantile-quantile plot at a selected point on the Seto Inland Sea.

Fig. 30 は 1961~2005 年 45 年間の年最大波高資料<sup>[1]</sup>において資料採択率を 1/3 とした解析に基づく 100 年確率波高  $H_{100}^{61-05}$  と上記の  $H_{100}^{34-05}$  の比を用いることにより、資料期間の延長に伴う 100 年確率波高の増加率のパーセント値  $(H_{100}^{34-05}/H_{100}^{61-05} - 1) \times 10^2$  を空間分布図として与える。西部海域においては、100 年確率波高の増加率は豊後水道から豊予海峡の西側半分の海域、伊予灘西部、別府湾、周防灘東部および山口県沿岸とその沖合海域で負の値をとり、資料期間 45 年から 72 年への延長に伴い確率波高は小さくなる。これは 1959 年以前の年最大波高の規模が 1961 年以降のものを上まわらない特徴を反映する。一方、豊後水道の東側半分の海域、豊予海峡の別府湾側、周防灘南部、伊予灘の中部北側と東部、安芸灘、広島湾、斎灘では増加率は正の値をとり、資料期間の増加に伴って確率波高の推定値が大きくなる。この傾向は伊予灘の中部北側と東部、周防灘南東部および安芸灘北西部で著しい。これは、T4516 号、T5115 号、T4216 号によって生じた異常波高の影響が現われた結果と考えられる。中部海域においては、燧灘中央部より西側の海域で増加率は負の値をとる。これは 1934~1959 年の間に

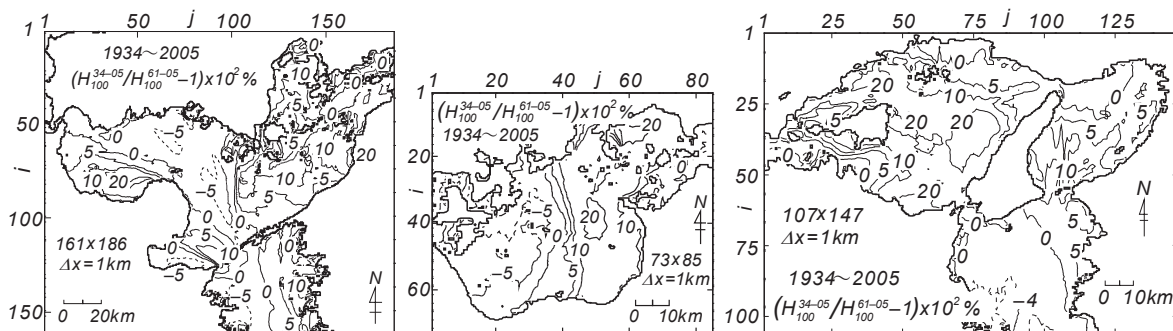


Fig. 30 Change of 100-year return wave height  $(H_{100}^{34-05}/H_{100}^{61-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea associated with extension of the data period from 45 years to 72 years.

1961 年以降の第 1 位波高や第 2 位波高などを上まわる年最大波高が得られていない特徴を反映する。逆に、瀬灘中央部より東側の海域で増加率は最大 20 %を越える。これは、この海域における 1934～1959 年の間の年最大波高が 1961～2005 年の第 1 位波高を上まわるためである。東部海域においては、増加率は紀伊水道や大阪湾の北西部にあたる須磨～神戸の沖合で負の値をとるが、その大きさはおよそ -5 %以内であり、あまり有意でない。北西部を除く大阪湾では、増加率は正の値を示し、とくに淡路島中部の沖合で 10 %を越える。播磨灘では全体として増加率は 5 %を上まわり、中央部の広い範囲で 15 %をとり、20 %を越える海域も現われる。これは 1934～1959 年の年最大波高が 1961 年以降の第 1 位波高を大きく上まわるためである。

Fig. 31 は 1918～2005 年の第 1 位波高（期間最大波高） $H_{max}^{18-05}$  と 1934～2005 年の年最大波高資料に基づく 100 年確率波高  $H_{100}^{34-05}$  の比を用いて定義した  $H_{max}^{18-05}$  の  $H_{100}^{34-05}$  に対する突出率  $(H_{max}^{18-05}/H_{100}^{34-05} - 1) \times 10^2$  の空間分布を示す。前者の資料期間 88 年と再現期間 100 年の差はあまり大きくないことから、 $H_{max}^{18-05}$  と  $H_{100}^{34-05}$  は同程度の値をとると期待されるので、この値によって第 1 位波高  $H_{max}^{18-05}$  の突出度が表されよう。まず西部海域においては、第 1 位波高は 100 年確率波高に比べて、豊後水道から伊予灘西部、周防灘、安芸灘南部、斎灘で 0～5 %小さく、豊後水道北東部など一部の海域で 5 %以上小さい。一方、国東半島北西部の周防灘南東岸、伊予灘の中部北側、安芸灘北部、広島湾のそれぞれ狭い範囲では 10 %大きい。中部海域においては、第 1 位波高は 100 年確率波高と比べて海域南西部（瀬灘西部）と北東部（備後灘）で 10 %以上大きい、それ以外の海域であまり相違しない。これは瀬灘西部では T7010 号、備後灘では T3706 号による第 1 位波高が突出した値をとるためである。東部海域においては、第 1 位波高は紀伊水道で 100 年確率波高と同程度の値をとり、大阪湾と播磨灘の大部分の海域でも両者の差が ±5 %以内にある。大阪湾では淡路島の東側、播磨灘では淡路島の西側、小豆島の東側で 5 %を越え、小豆島北側の狭い海域で 10 %を上まわる。また、播磨灘の北部で 5 %を下回る海域もわずかに見出される。しかし全体的に、東部海域では第 1 位波高が突出した値をとらないことから、資料期間と再現期間の差が小さい場合の第 1 位波高と 100 年確率波高はそれほど相違しない。

なお、T6118 号、T6420 号、T6523 号を含む 18 ケースの台風時の最大風速分布はすでに山口ら<sup>[21]</sup>によって公表されているが、その後の研究の進展に合わせた再検討のため、上記 3 台風や T4216 号、T4516 号、T5115 号に対する今回の推定結果は前回のものと多少異なっている。

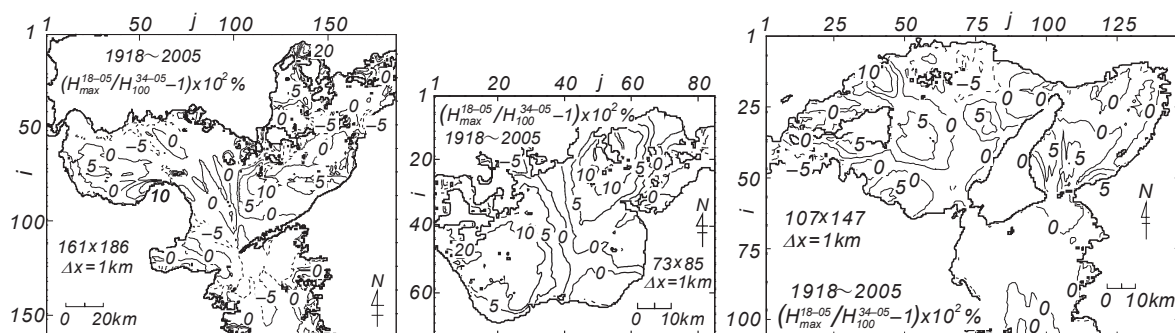


Fig. 31 Percentage expression of a one-subtracted ratio of largest wave height during the period of 1918 - 2005 to 100-year return wave height  $(H_{max}^{18-05}/H_{100}^{34-05} - 1) \times 10^2$  on the Seto Inland Sea.

## 5. 結 語

本研究では、SDP 風観測資料や気象資料を入手し得た 1918～1959 年の 15 ケースの巨大台風を対象として瀬戸内海における個々の台風時の海上風分布と波高分布を、その最大値に注目して考察するとともに、風速・波高の期間最大値や再現確率値を評価した。得られた知見はつぎのように要約される。

(1)瀬戸内海における海上風分布や波高分布が台風の経路や勢力に応じて変化する特性が再現される。

(2)1918～2005 年の 88 年間において 1959 年以前の台風が瀬戸内海の多くの小海域で第 1 位風速あるいは第 1 位波高をもたらしている。その主な台風は、西部海域では T4516 号, T5115 号, T4216 号, T4326 号, 中部海域では T4326 号, T3706 号, T3412 号, 東部海域では T3706 号, T3412 号, T18-July 台風である。一方、第 1 位風速あるいは第 1 位波高をもたらした 1961 年以降の主な台風は、西部海域のうち周防灘の北側海域で T9119 号, T7119 号, 豊後水道から豊予海峡を経て山口県東部沿岸に至る海域で T0418 号, 中部海域のうち燧灘西部で T7010 号, 東部海域のうち大阪湾で T6118 号, T6523 号, T6420 号である。

(3)検討対象とする期間を延長することによって、瀬戸内海で生じた最上位クラスの風速や波高およびそれらの再現確率値が有意な程度に更新される小海域も出現することから、風速・波高の極値を評価する場合には、入手しうる気象資料が許す限り対象期間を長くとる必要がある。

(4)100 年確率風速は紀伊水道で 40～45 m/s, 大阪湾で 35～45 m/s, 播磨灘で 35～40 m/s, 燧灘・備後灘で 30～40 m/s, 安芸灘・広島湾で 40 m/s 以上, 伊予灘と周防灘で 35～40 m/s, 豊後水道で 35 m/s 弱から 40 m/s を与え、とくに佐田岬周辺, 大阪湾の一部, 紀伊水道の一部では 45 m/s 以上をとる。

(5)100 年確率波高は外洋波浪が入射する豊後水道では境界付近で 11 m, その北部の豊予海峡で 9 m, 紀伊水道では境界付近で 14～15 m, その北部の友ヶ島水道で 9 m に達する。内湾・内海のうち外洋波浪の影響を受ける豊予海峡から対岸の山口県沿岸で 9 m から 7 m, 友ヶ島水道から対岸の須磨方面で 9 m から 6 m をとる。内湾・内海発生波浪が卓越する海域（大阪湾の中央部より東側, 播磨灘, 燧灘, 備後灘, 斎灘, 伊予灘, 安芸灘・広島湾, 周防灘中部から西部, 別府湾）では 6 m を上限とし、周辺地形の状況に応じて 3～6 m の間で変化する。期間最大風速や期間最大波高も 100 年確率風速・波高と同程度の値をとり、地域分布特性も類似する。

## 参 考 文 献

- [1] 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一：瀬戸内海における波浪推算に基づく確率波高の推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.126-130, 2010.
- [2] 本間 仁 編：海岸防災, 第 1 編海岸災害の諸要素, 第 2 章波と推算, 防災科学技術シリーズ 6, 共立出版株式会社, p.38, 1973.
- [3] (財) 日本気象協会：高潮に関する水位上昇推算の研究 (その 1) 報告書, 2005.
- [4] 畑田佳男・山口正隆・大福 学・高橋秀典：表面風再解析資料を用いた波浪の長期推算システムの適用性の向上, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.141-145, 2005.
- [5] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄：SDP 風資料を用いた内湾・内海における 45 年間の海上風分布データセットの作成, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.186-190, 2009.
- [6] 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博：一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第 381 号/II-7, pp.151-160, 1987.
- [7] 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄：エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知



- モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.123-127, 1984.
- [8] たとえば中央気象台:室戸台風調査報告, 中央気象台彙報, 第9冊, 616p., 1935.
- [9] (財)日本気象協会:1940~1970 台風経路図 30年集, 日本気象協会, 139p., 1973.
- [10] たとえば(財)日本気象協会:気象海象要覧 大阪湾, 港湾気象海象シリーズ⑭, 531p., 1995.
- [11] 黒田静夫, 石綿知治:防災工学—台風に対する海岸と港湾の防災, 山海堂, 453p., 1960.
- [12] 本間 仁(編):海岸防災, 防災科学技術シリーズ6, 共立出版, 402p., 1973.
- [13] 高橋 博・竹田 厚・谷本勝利・郡司嘉宣・磯崎一郎:沿岸災害の予知と防災—津波・高潮にどう備えるか—, 白亜書房, 408p., 1988.
- [14] 饒村 曜:台風物語, (財)日本気象協会, 250p., 1986.
- [15] 饒村 曜:続・台風物語, (財)日本気象協会, 295p., 1993.
- [16] 宮澤清治:近・現代日本気象災害史, イカロス出版, 325p., 1999.
- [17] 力武常次・竹田 厚(監):日本の自然災害, 国会資料編纂会, 637p., 1999.
- [18] 宮崎正衛:高潮の研究 その実例とメカニズム, 成山堂書店, 134p., 2003.
- [19] 和達清夫監修:新版気象の事典, 付録 気象災害年表, 東京堂出版, pp.584-616, 1989.
- [20] Yamaguchi, M. and Y. Hatada: An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol.2, pp.932-946, 1997.
- [21] 山口正隆・大福 学・野中浩一・日野幹雄・畑田佳男:1918~1965年の18巨大台風時の瀬戸内海における海上風分布の再現, 海洋開発論文集, Vol.26, pp.441-446, 2010.

# 気圧観測資料を用いた内湾・内海における長期の風・波浪推算システム の構築と風速・波高の長期変動の解析

## Development of a Long-Term Wind and Wave Hindcast System in the Inner Bay Areas and the Inland Sea of Japan Using Measurement Data of Atmospheric Pressure and Trend and Jump Analyses of Winds and Waves

畑田佳男\*・山口正隆\*\*・大福 学\*\*\*・野中浩一\*\*\*

Yoshio HATADA\*, Masataka YAMAGUCHI\*\*,  
Manabu OHFUKU\*\*\* and Hirokazu NONAKA\*\*\*

Hourly sea wind distributions on 3 regional sea areas consisting of the Kanto Sea Area (Tokyo Bay, Sagami Bay, Suruga Bay and their offshore areas), Ise Bay and the Seto Inland Sea are estimated using the measurement data of atmospheric pressure around the areas over a 45-year period from 1961 to 2005. The method used calculates winds at sea and coastal stations using the regression relationships between measured winds and pressure-based gradient winds, and the sea wind distribution is obtained by the application of a spatial interpolation technique to the wind data at irregularly-distributed locations. A 45-year wave hindcasting on a nested grid with high space resolution is conducted at each of the measurement stations in the 3 regional areas using a backward ray tracing model under the above-mentioned wind conditions. For monthly-highest 1/3-averaged wind speeds and wave heights, hindcasts are in reasonable agreement with measurements. Trend and jump analyses for yearly-highest 1/3-averaged atmospheric pressures, wind speeds and wave heights yield the following results. 1) Pressure does not exhibit any trend or jump. 2) Both wind speed and wave height show statistically significant increasing trend and positive jump putting a turning year on around 1986, and their intensities become weaker toward the western area.

*Key Words* ; the Kanto Sea Area, Ise Bay, the Seto Inland Sea, atmospheric pressure data, wind and wave hindcasts, wind speed, wave height, period of 1961-2005, trend and jump analyses

### 1. 緒 言

---

\*愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

\*\*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

\*\*\*愛媛大学工学部環境建設工学科

Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

原稿受理 平成 22 年 10 月 5 日

海上風の場合が周辺地形の影響を受けて複雑な空間変化を伴う内湾・内海を対象として、地形の影響を考慮した海上風分布の入力条件のもとで9~10年以上の長期間の波浪推算を行った事例は、わが国では観測風資料<sup>[1]~[5]</sup>やSDP風資料<sup>[6]~[12]</sup>を利用した山口らの一連の研究<sup>[1]~[12]</sup>に限られる。諸外国の研究事例としては、アメリカの5大湖を対象として沿岸部と湖上部の観測風より推定した湖上風分布を入力条件とする長期波浪推算に関する論文が2編<sup>[13], [14]</sup>手元にある。また、最近ヨーロッパの縁辺海海域（北海、バルト海、地中海、黒海など）において領域気象モデルによる長期の海上風分布（格子間隔50 km, 期間40年あるいは44年）を入力条件とした波浪推算が大プロジェクト研究として実施され、その一連の成果<sup>[15]~[20], [21]~[27]</sup>がElsevierのCoastal Engineering<sup>[21]~[27]</sup>などに発表されている。

上述のように、山口ら<sup>[6], [8]</sup>は内湾・内海における波浪の長期推算を実施することを目的として、入力条件に与える海上風分布を当該海域周辺に位置する気象庁気象官署における1961年以降の風観測資料（SDP風資料）を用いて推定し、沿岸部や海上部の風観測資料との比較から当該地点ではその精度がかなり高いことを確認した。しかし、気象官署におけるSDP風観測資料は、観測開始以降に計測時間、風向・風速計の機種、設置位置、設置高度、さらに周辺環境などの変化の影響を強く受けており、その結果として、時代とともに不連続的な変化や非定常的な変化を伴っていることから、長期資料としての利用にあたっては、かなり的人為的な調整を必要とする。現に山口ら<sup>[6], [8]</sup>の研究では、地点ごとに最近の5~30年間の累年平均風速に近い値を与えるように、一定の係数を乗じて各年代区間の風速資料を調整している。この操作に物理的な合理性はないけれども、結果的に沿岸部と海上部における観測相当風と観測風の間と比較的良好な一致がみられる。しかし、観測風資料の期間は最長のもので1978年以降であり、多くの地点において1990年代以降に限られるので、1980年以前のSDP風資料に対してはこうした調整（tuning）方法の適用性に不確実性が残る。一方、気象官署では風のみならず気圧（海面更正気圧）の観測資料（SDP気圧資料）が長期にわたり取得され、1961年以降の資料は電子情報化されている。気圧は測定機器、設置位置、周辺環境などの変化の影響をあまり受けないと考えられることから、SDP気圧資料より対象海域の沿岸部と海上部の観測風に相当する風（観測相当風）、したがって海上風分布を適正に評価できるならば、当該海域における海上風や波浪の長期変動をより明解に解析することが可能になると期待される。

そこで、本研究では関東沿岸海域（東京湾・相模湾・駿河湾とその沖合海域）、伊勢湾および瀬戸内海の周辺に位置する気象庁気象官署で取得された1961~2005年（45年間）のSDP気圧資料を用いて当該各海域における沿岸部と海上部の観測相当風（気圧風）を推定し、風速の気候学的特性（風候）に関してそこでの風観測資料との比較からその精度を確認するとともに、風速の長期変動（傾向変動、ジャンプ）の特性を調べる。また、山口ら<sup>[6], [8]</sup>の方法に従って、沿岸部と海上部の観測地点における観測相当気圧風資料と境界上で得た台風モデル風の埋込みを伴うNCEP風資料<sup>[28]</sup>に加重1次補間法<sup>[29]</sup>を2段階で適用して、海上風分布を1時間ごとに作成する。

ついで、外洋と内海・内湾における海上風分布を入力条件とした高地形解像度条件のもとでの1点浅海モデルに基づく波浪の長期推算システムを用いて1961~2005年の45年間の波浪推算を対象領域内の波浪観測地点などで行い、波高の気候学的特性（波候）に関して波浪観測資料やSDP風資料を入力条件として得られた波浪推算資料との比較から、その精度や特性を調べたのち、波高の長期変動（傾向変動、ジャンプ）の特性を検討する。

## 2. 気圧観測資料および海上風の推定方法

### 2.1 気圧観測資料

Fig. 1は本研究で使用する気象庁気象官署における気圧（海面更正気圧）観測地点の位置を関東沿岸領域（18地点）、伊勢湾領域（10地点、飯田、御前崎、浜松の3地点が関東沿岸領域のものと同重複）、

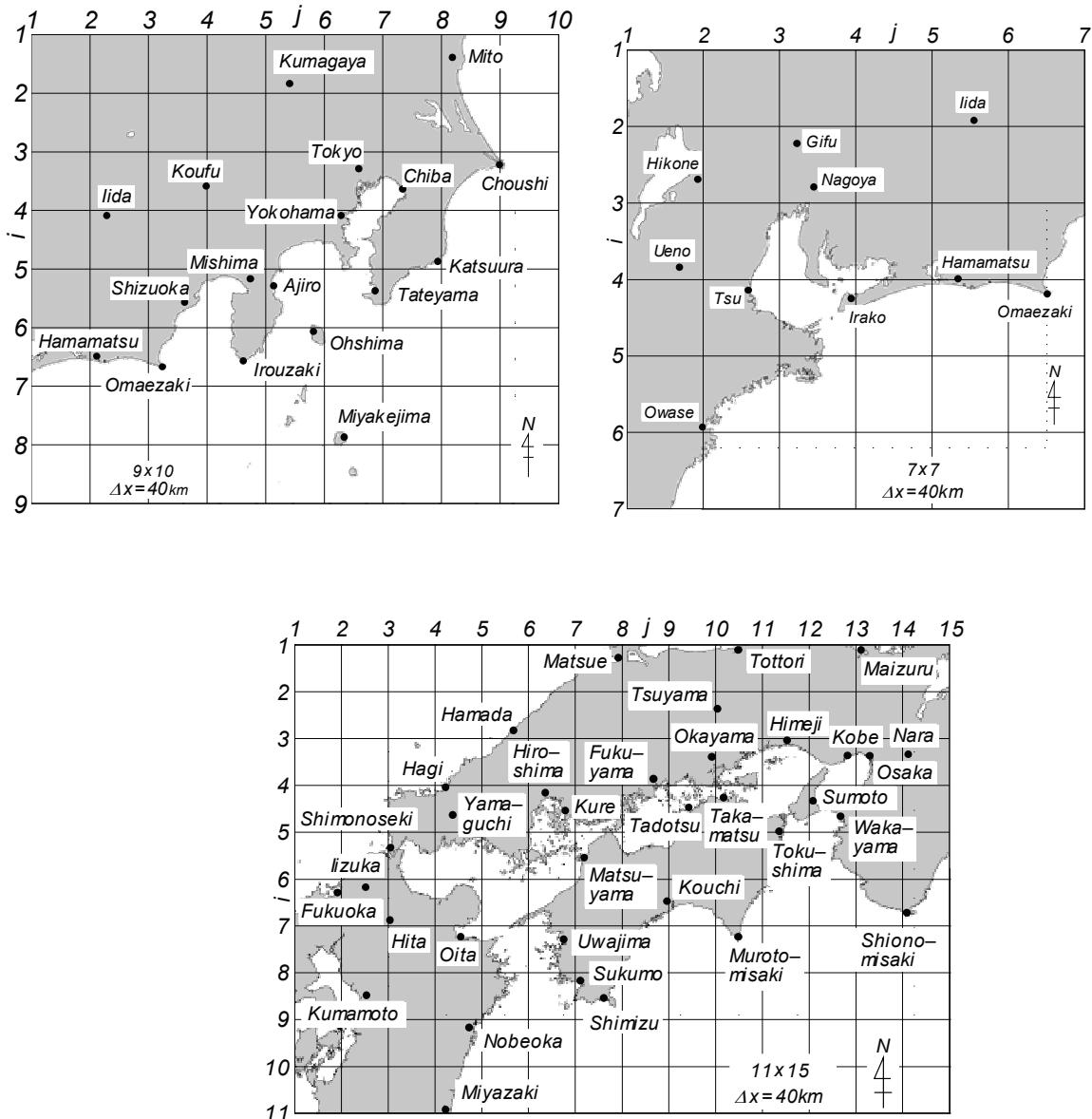


Fig. 1 Input points of measured atmospheric pressure on a 40 km-distance grid.

および瀬戸内海領域（使用 40 地点のうち格子網内の 35 地点）について示す。各領域の格子間隔はいずれも 40 km である。傾度風の計算では気圧の 2 階までの空間微分値を用いるので、対象海域よりかなり広い範囲に分布する気象官署の SDP 気圧資料を用いる。期間は 1961～2005 年の 45 年とする。SDP 気圧資料の時間間隔は 1961～1990 年で 3 時間（6 時間ごとの地点も少数ある）、1991 年以降 1 時間であり、前者については 1 時間ごとの資料に直線補間する。ここでは風速・波高の気候学的特性（風候、波候）を検討することから、日最低気圧資料の取込みは行わない。また、三宅島における気圧資料は噴火のために 13 ヶ月間（2001 年 9 月 4 日～2002 年 10 月 31 日）欠測となっているので、大島および八丈島における観測値との線形重回帰式によって欠測期間の観測値を補充した。気圧は狭い領域内ではストーム時を除いてそれほど著しい空間変化を伴わないので、補充した観測推定値の精度は高い。以上の作業によって、各観測地点ごとに 1961～2005 年の 1 時間間隔気圧資料が整備されたことになる。

## 2.2 観測相当気圧風の計算方法

山口ら<sup>[6],[8]</sup>は対象海域周辺の気象官署で取得されたSDP風資料から対象海域の沿岸部と海上部の観測地点における観測相当風を推定する方法を開発・利用しているため、本研究でもSDP風資料に代えてSDP気圧資料に対してこの手法を適用し、沿岸・海上観測地点における観測相当風を求める。その手順はつぎのようである。

①各領域の観測地点における1時間間隔のSDP気圧資料に加重1次補間法<sup>[29]</sup>を適用して、Fig. 1に与えた格子間隔40 kmの格子点気圧を補間する。

②中立大気の仮定のもとにCardone<sup>[30],[31]</sup>のモデルによって傾度風に基づく10 m高度気圧風を40 km格子網で計算する。

③40 km格子網上の気圧風に加加重1次補間法<sup>[29]</sup>を適用して、Fig. 2に示す各対象海域の沿岸・海上観測地点（図中の○印：沿岸地点，●印：海上地点）における気圧風を求める。40 km格子網上の気圧風は地形の影響をほとんど含まないことから、風向の精度は良好と言えないので、沿岸・海上観測地点で補間したSDP風の風向資料<sup>[6],[8]</sup>をそのまま用いる。SDP風向資料の精度はかなり高いことが

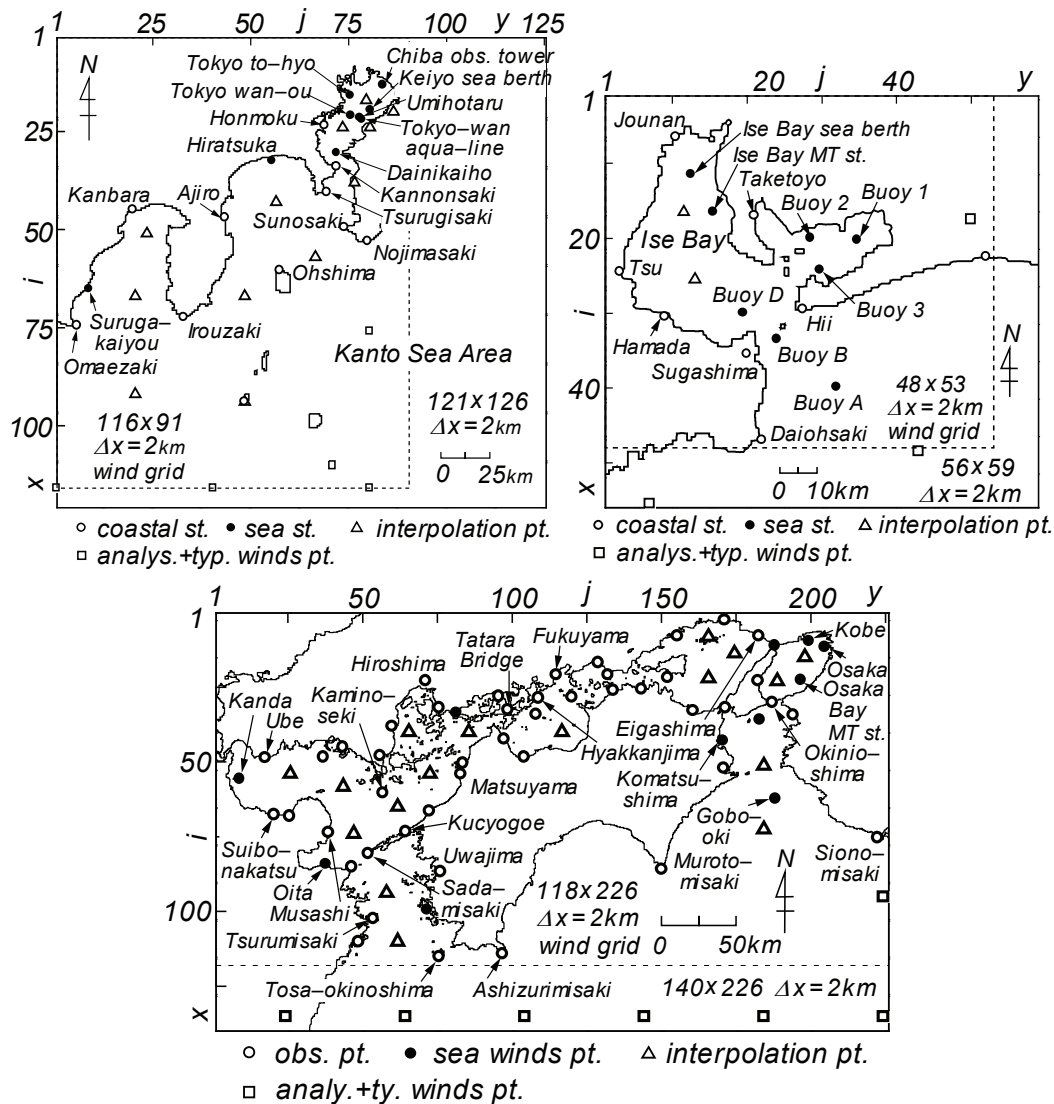


Fig. 2 Locations of points where wind data are given on the concerned sea area for estimating sea wind distribution.

確認されている<sup>[6], [8]</sup>。

④山口ら<sup>[6]</sup>と同様に、沿岸・海上観測地点における気圧風速と観測風速の関係を2段階の回帰式で考慮して、気圧風速を観測相当風速に変換する。

Fig. 3 は2段階の回帰式に係わる図を小松島について与える。その手順はつぎのようである。

i) 第1段階ではFig. 3の上の図に示すように、2 m/sごとに区間分けした10 m高度気圧風速資料の平均値 $\bar{U}_{10ATM}$ を横軸、この区間に入る同時刻のz m高度観測風速資料の平均値 $\bar{U}_{zobs}$ と気圧風速資料の平均値 $\bar{U}_{10ATM}$ の比yを縦軸としたべき乗型回帰式 $y = a(\bar{U}_{10ATM})^b + c$ を作成する。係数の決定は非線形最小2乗法による。この回帰式が特別風速資料にも成立すると仮定して、気圧風速資料からz m高度の観測相当気圧風速 $U_{zmATM}$ の特別値資料を得る。

ii) 第2段階では Fig. 3 の下の図に示すように、観測相当気圧風速 $U_{zmATM}$ と観測風速 $U_{zobs}$ の各資料について別々に上位1/20, 1/10, 1/3, 1/2, 全体および下位1/3の資料の平均値を求めたのち、観測相当気圧風速の各平均統計量 $\bar{U}_{zmATM}$ を横軸、観測風速の各平均統計量 $\bar{U}_{zobs}$ と観測相当気圧風速の各平均統計量 $\bar{U}_{zmATM}$ の比yを縦軸として再びべき乗型回帰式を作成する。そして、これが特別値に対しても成立すると仮定して、観測相当気圧風速の特別値に適用し、観測相当気圧風速の最終的な特別推定値 $U_{zATM}$ とする。

⑤以上の手順を繰り返すことにより、沿岸・海上観測地点における1時間ごとのz m観測相当気圧風速資料が1961~2005年の45年間にわたり得られる。

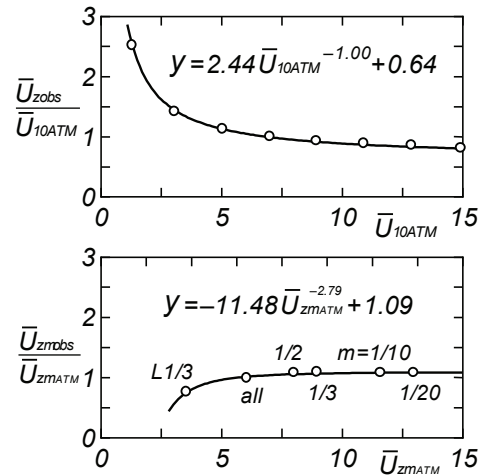


Fig. 3 Regression relationships between hindcasted and measured wind speeds at Komatsushima station.

## 2.3 海上風分布の推定方法

各海域における海上風分布を山口らの方法<sup>[32]</sup>に従って、つぎの手順で作成する。

①沿岸・海上観測地点における観測相当気圧風速資料を1/7乗則の適用により10 m高度風速資料に変換したのち、係数(1.0~1.3, 海上地点で1.0)を乗じて10 m高度海上風速相当風速資料とする。これらの資料と複数の外洋境界地点(Fig. 2の中の□印)における台風モデル風を埋め込んだ表面風解析資料(NCEP風資料)<sup>[28]</sup>に加重1次補間法<sup>[29]</sup>を適用して、海域内に任意に設けた中間地点(Fig. 2の中の△印)における風速を計算する。ついで、海上部で風速が大きい特性を考慮するために、中間地点の風速に係数(1.05~1.2)を乗じて風速を増強する。

②観測海上風相当風, 中間地点増幅風, 境界地点風の3種類の風速資料に加重1次補間法<sup>[29]</sup>を再度適用して、2 km格子網上で海上風の平面分布を作成する。期間長は1961~2005年の45年間, 時間間隔は1時間である。外洋境界におけるNCEP風資料<sup>[28]</sup>を入力条件に加えることによって, 外洋における風と内湾・内海における風が滑らかに接続することから, 求めた海上風分布は不連続的な空間変化を示さない。

## 3. 長期波浪推算システムの概要

### 3.1 海上風分布資料

波浪推算では、外洋と内湾・内海における海上風分布資料をそれぞれ用いる。外洋における海上風

分布資料は台風モデル風を埋め込んだ表面風再解析資料（NCEP 風資料）<sup>[28]</sup>であり、格子間隔 80 km の北西太平洋領域上で 1 時間ごとに与える。NCEP 風資料は内湾・内海における海上風分布資料の作成において境界地点の海上風資料として用いたものである。ついで、内湾・内海における海上風分布資料は 2. で述べたように、関東沿岸海域、伊勢湾、瀬戸内海を対象として格子間隔 2 km の格子網上で 1 時間ごとに作成している。

### 3.2 波浪推算の方法

波浪推算は、Fig. 4 に示す 5 km 間隔の北西太平洋大領域とこれに組み込んだ 1 km 間隔の関東沿岸海域、さらに関東沿岸海域に組み込んだ 0.1 km 間隔の東京湾や波浪観測地点周辺小領域からなる 3 段階高地形解像度格子網、あるいは北西太平洋大領域とこれに組み込んだ 0.1 km 間隔の伊勢湾または 0.5 km の瀬戸内海からなる 2 段階高地形解像度格子網において、上記の海上風分布を入力条件として 1 点浅海モデル<sup>[31]</sup>により地点別に行う。波浪観測地点にあたる推算地点は、関東沿岸海域では東京湾内の東京灯標、東京湾外のアシカ島、相模湾沿岸の平塚の 3 地点、伊勢湾では湾外のブイ A、湾内の浜田、四日市の 3 地点、瀬戸内海では紀伊水道北部の小松島と沖ノ島（南）、大阪湾内の MT 局、播磨灘南岸の三本松、燧灘に面する今治、周防灘の上関と苅田、別府湾の大分、豊予海峡周辺の佐田岬漁港の 9 地点、である。また、波浪推算地点に備後灘の福山および伊予灘に面する長浜の 2 地点（波浪観測資料は得られていない）を加え、合計 11 地点とする。

計算に用いる周波数成分の数は  $f=0.04\sim 1$  Hz を不等分割した 27 個を基本とし、推算地点の状況に応じて若干変える。方向成分の数は  $0\sim 360^\circ$  を  $10^\circ$  で等分割した 37 個である。波浪推算地点に到達する各成分波の波向線上の風は当該波向線上に設けた各波浪計算点の位置に応じて、外洋における NCEP 風資料または内湾・内海における観測相当気圧風による海上風分布資料に対する 4 点双 1 次補間式の適用によって計算する。波浪推算の時間間隔は外洋からの波浪の影響を受ける地点（アシカ島、平塚、ブイ A、沖ノ島（南）、小松島、佐田岬漁港）で 30 分、外洋からの波浪の影響が小さい上記以外の地点で 10 分とする。波浪推算の期間は 1961~2005 年の 45 年である。

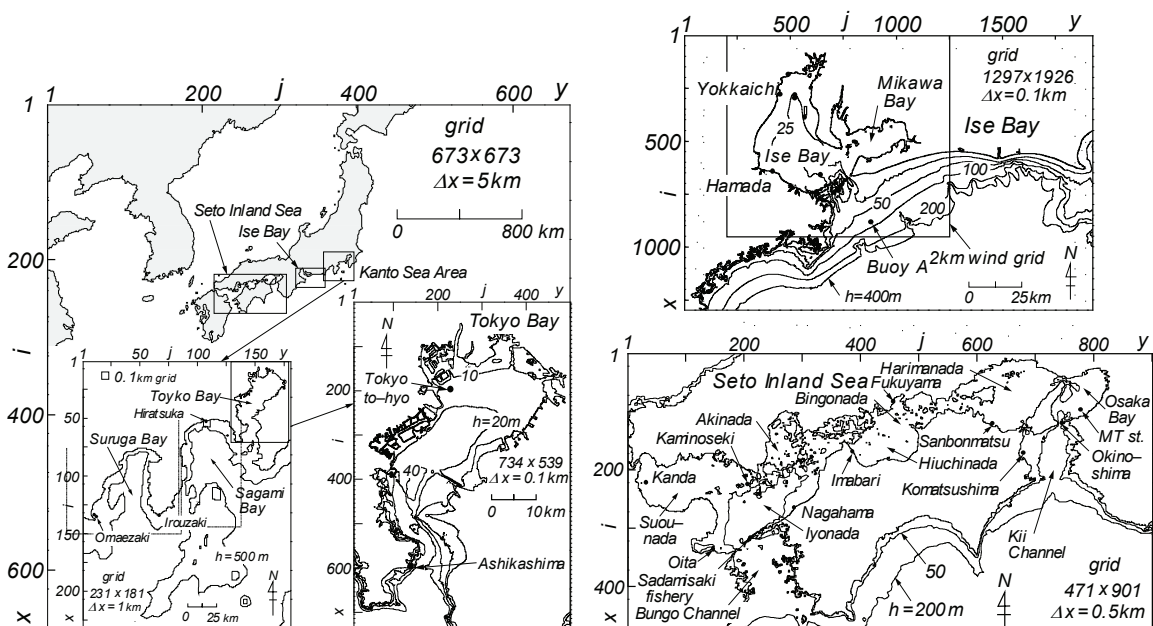


Fig. 4 A nested grid system used in wave hindcasting and location of wave measurement stations in any of the Kanto Sea Area, Ise Bay and the Seto Inland Sea areas.

## 4. 資料解析法

### 4.1 平均統計量

同時刻の推算資料と観測資料を用いて各種月別平均統計量（月別の最大・最小値，上位または下位 1/10, 1/3, 1/2 および全体の資料の平均値と標準偏差）を計算し，推算資料および観測資料に基づく各種月別平均統計量に対して相関係数と散布図において原点を通る相関直線の勾配値を誤差指標として求める。ここでは月別風速資料の上位 1/3 の資料の平均値（月別 1/3 最大平均（10 分間平均）風速  $U_{1/3}$ ）に対する誤差指標を  $\rho(U_{1/3})$ ,  $a_0(U_{1/3})$ ，同様に月別波高資料の上位 1/3 の資料の平均値（月別 1/3 最大平均（有義）波高  $H_{s1/3}$ ）に対する誤差指標を  $\rho(H_{s1/3})$ ,  $a_0(H_{s1/3})$  で表す。ついで，年別に各種平均統計量を計算し，とくに年別 1/3 最大平均風速・波高資料に対して時系列としての比較を行う。さらに，1961～2005 年の気圧・風速・波高資料から各種年別平均統計量および各種累年平均統計量を計算し，このうち 1/3 最小平均気圧差資料と 1/3 最大平均風速・波高資料を検討対象とする。

### 4.2 年別平均統計量の傾向変動およびジャンプ

ここでは年別 1/3 最小平均気圧差資料と年別最大 1/3 平均風速・波高資料に対して傾向変動およびジャンプの解析を行う。傾向変動の解析は，年別 1/3 最小平均値または年別 1/3 最大平均値の時系列にあてはめた直線の勾配値が 0 という仮説に対する  $t$  検定<sup>[34]</sup>およびトレンド示数検定<sup>[35]</sup>による。有意水準 5 % の片側検定で勾配値 0 の仮説が成立する場合  $L=0$ ，正および負の有意な傾向変動がある場合それぞれ  $L=1$  および  $L=-1$  とする。トレンド示数  $I_t$ <sup>[35]</sup>は有意水準 5 % の片側検定で  $|I_t| < 1.645$  の場合傾向変動なし， $I_t \geq 1.645$  の場合正の傾向変動あり， $I_t \leq -1.645$  の場合負の傾向変動あり，とする。

ジャンプの解析は年別 1/3 最小平均値または年別 1/3 最大平均値の時系列から求めた前半期間と後半期間の平均値に対する  $t$  検定<sup>[34], [35]</sup>と前半期間と後半期間の資料に対する Mann-Whitney の  $U$  検定<sup>[36], [37]</sup>による。有意水準 5 % の片側検定でジャンプなしの場合それぞれ  $J_f=0$ ,  $J_{MW}=0$ ，正・負のジャンプありの場合それぞれ  $J_f=\pm 1$ ,  $J_{MW}=\pm 1$  で表す。前半期間の終わりを 1986 年，後半期間の始まりを 1987 年とするが，資料の状況に応じてこの境目の年を多少変化させた計算も行う。

## 5. 推算資料の検討

### 5.1 風速および波高の観測資料との比較

Fig. 5 は同時刻の推算資料 (cal.) および観測資料 (obs.) から得た月別 1/3 最大平均風速  $U_{1/3}$  の経月変化を京葉シーバース (1984～2004 年) と紀伊水道北西部の小松島 (1982～2005 年) について示す。小松島では推算値は観測値に比較的よく追従して変化するのに対して，京葉

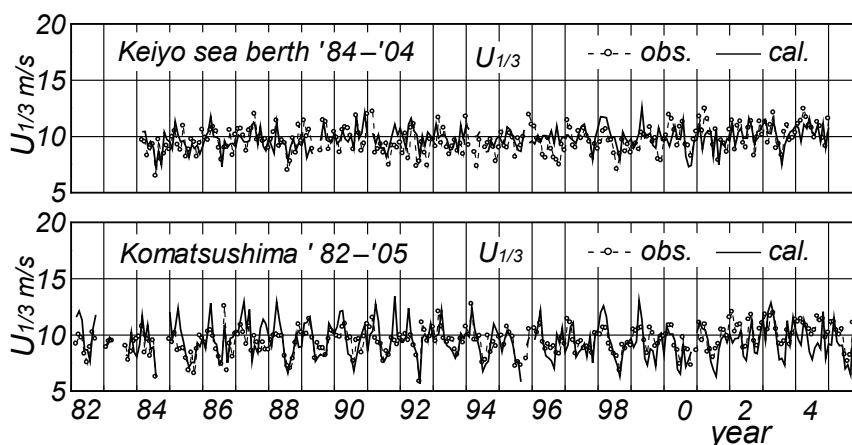


Fig. 5 Time series of monthly-grouped highest 1/3 mean wind speeds obtained from hindcasts and measurements ( $U_{1/3cal}$ ,  $U_{1/3obs}$ ) at Keiyo sea berth and Komatsushima stations.



シーバースでは推算値は観測値ほど大きい変化を伴わない。Fig. 6 は月別  $U_{1/3}$  資料に対する散布図を示す。各プロット点は  $45^\circ$  直線のまわりに集まるけれども、ややばらつきもみられる。誤差指標である相関係数  $\rho(U_{1/3})$  と勾配値  $a_0(U_{1/3})$  は京葉シーバースで 0.45 と 1.01、小松島で 0.61 と 0.99 である。勾配値はほぼ 1 をとることから、推算値と観測値の平均的対応はよい。一方、相関係数は 0.5 前後とあまり大きくなく、とくに相関係数が 0.45 と小さい京葉シーバースではプロット点の  $45^\circ$  直線まわりのより広いばらつきを示唆する。

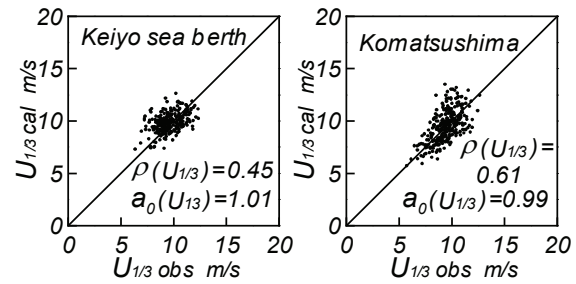


Fig. 6 Scatter diagram between hindcast-based  $U_{1/3 cal}$  and measurement-based  $U_{1/3 obs}$ .

Table 1 は関東沿岸海域の 3 海上観測地点（東京灯標、京葉シーバース、平塚）、伊勢湾の 2 海上観測地点（ブイ A、伊勢湾シーバース）、瀬戸内海の 4 海上観測地点（小松島、大阪湾 MT 局、荻田、大分）における月別  $U_{1/3}$  資料に対する誤差指標  $\rho(U_{1/3})$ 、 $a_0(U_{1/3})$  を観測期間（表において、たとえば 83-05 は 1983~2005 年を意味する）および推算資料と観測資料による累年 1/3 最大平均風速 ( $\bar{U}_{1/3 cal}$ ,  $\bar{U}_{1/3 obs}$ ) とともに与える。これによると、勾配値  $a_0(U_{1/3})$  は東京灯標の 1.07 とブイ A の 0.94 を除いて、0.97~0.99 をとり、推算値と観測値の平均的対応はよい。相関係数  $\rho(U_{1/3})$  は東京灯標、京葉シーバース、大阪湾 MT 局、荻田といった内湾・内海の地点で小さい傾向にあるが、月変化図における推算値と観測値の対応そのものは、Fig. 5 に与えたように、それほど悪くない。沿岸・海上観測地点における観測風との相関関係を利用しても、周囲を陸地に囲まれた内湾・内海における海上風を、日単位以下の変動をあまり含まない気圧観測資料によって SDP 風資料の場合と同程度に有意な精度で推定することは必ずしも容易でない。累年 1/3 最大風速  $\bar{U}_{1/3}$  については、東京灯標で推算値が観測値よりやや大きいものの、他の地点では両者は比較的近い値を与える。

Table 1 Error statistics such as correlation coefficient  $\rho(U_{1/3})$  and slope value of correlation line  $a_0(U_{1/3})$  for monthly-grouped highest 1/3 mean wind speed  $U_{1/3}$ , and highest 1/3 mean wind speeds over entire measurement period obtained from hindcasts and measurements ( $\bar{U}_{1/3 cal}$ ,  $\bar{U}_{1/3 obs}$ ).

Fig. 7 は同時刻の推算資料 (cal.) と観測資料 (obs.) から得た月別 1/3 最大平均波高  $H_{s1/3}$  の経月変化を東京灯標（1983~2005 年）と瀬戸内海西部海域内に位置する豊後水道北部の佐田岬漁港（1983~2002 年）について示す。佐田岬漁港における結果とほぼ同等の結果は小松島でも得られているが、観測資料の期間が 1997~2005 年の 9 年と相対的に短いことから、佐田岬漁港の結果を与える。これによると、いずれの地点

Sea Area location	year period	$\bar{U}_{1/3 cal}$ m/s	$\bar{U}_{1/3 obs}$ m/s	$\rho(U_{1/3})$	$a_0(U_{1/3})$
Kanto Sea Area					
Tokyo to-hyo	83-05	10.5	11.3	0.42	1.07
Keiyo sea berth	84-04	9.8	9.9	0.45	1.01
Hiratsuka	81-05	9.2	9.6	0.55	0.97
Ise Bay					
Buoy A	96-03	11.9	11.6	0.83	0.94
Ise Bay sea berth	76-03	10.0	10.0	0.82	0.98
Seto Inland Sea					
Komatsushima	82-05	9.7	9.7	0.61	0.99
Osaka Bay MT st.	78-05	9.0	8.9	0.41	0.97
Kanda	81-03	8.8	8.7	0.43	0.98
Oita	87-05	8.7	8.6	0.58	0.97

でも推算値  $H_{s1/3cal}$  は1年周期で変化を繰り返す観測値  $H_{s1/3obs}$  の挙動によく追従する。

Fig. 8 は月別  $H_{s1/3}$  資料に対する散布図を示す。両地点において各プロット点は  $45^\circ$  直線のまわりに集まることから、推算値と観測値はかなりよく対応する特徴がうかがえる。因みに、

相関係数  $\rho(H_{s1/3})$  と勾配値  $a_0(H_{s1/3})$  は東京灯標で 0.77, 1.01, 佐田岬漁港で 0.93, 1.03 (小松島では 0.92, 1.03) であるから、誤差指標も両地点における推算値と観測値の良好な対応を示唆する。

Table 2 は関東沿岸海域の3観測地点 (東京灯標, アシカ島, 平塚), 伊勢湾の3観測地点 (ブイA, 浜田, 四日市), 瀬戸内海の9観測地点 (小松島, 沖ノ島 (南), 大阪湾 MT 局, 三本松, 今治, 上関, 荻田, 大分, 佐田岬漁港) における月別  $H_{s1/3}$

資料に対する誤差指標  $\rho(H_{s1/3})$ ,  $a_0(H_{s1/3})$  を観測期間および推算資料と観測資料による累年 1/3 最大平均波高 ( $\bar{H}_{s1/3cal}$ ,  $\bar{H}_{s1/3obs}$ ) とともに示す。これによると、勾配値  $a_0(H_{s1/3})$  は 0.94~1.07 の範囲 (三本松で 1.07, 荻田で 1.07, ブイAで 0.94) にあるから、いずれの地点でも推算値と観測値は平均的に比較的良好に符合する。相関係数  $\rho(H_{s1/3})$  はアシカ島の 0.53, 大阪湾 MT 局の 0.42 を除くと、0.66~0.93 の範囲にあり、15 地点のうち9地点で 0.75 以上, アシカ島 (0.53) と大阪湾 MT 局 (0.42) を除く 13 地点で 0.66 以上をとることから、推算値と観測値の相関はかなり高い。誤差指標からみて大阪湾 MT 局では波高のみならず、風速に関しても推算値と観測値があまりよく符合しない理由は明らかでないが、気圧観測資料が日単位より短い変動をあまり含まない特性に起因するように推察される。また、累年 1/3 最大平均波高  $\bar{H}_{s1/3}$  については相対値でみれば両者の差は 5~8% の範囲にあるから、両者は比較的良好に符合すると言えよう。

以上、月別 1/3 最大平均風速  $U_{1/3}$  および月別 1/3 最大平均波高  $H_{s1/3}$  に関して推算値と観測値の対応はおおむね良好であるが、風に関しては内湾・内海の観測地点 (東京灯標, 京葉シーバース, 大阪湾 MT 局, 荻田) で、波に関しては大阪湾 MT 局で両者の対応がやや十分でない傾向にある。

## 5.2 気圧の長期変動の解析

Fig. 9 は 1961~2005 年の 45 年間にわたる年別 1/3 最小平均気圧差  $\tilde{p}_{L1/3}^{(y)}$  の経年変化を関東沿岸領域では東京, 伊勢湾領域では名古屋, 瀬戸内海領域では大阪, 洲本, 松山について示す。気圧差  $\tilde{p}_{L1/3}^{(y)}$  は作図の都合上、年別資料の下位 1/3 の平均値  $p_{L1/3}^{(y)}$  から 1000 を引いた値で定義している。各地点の気圧

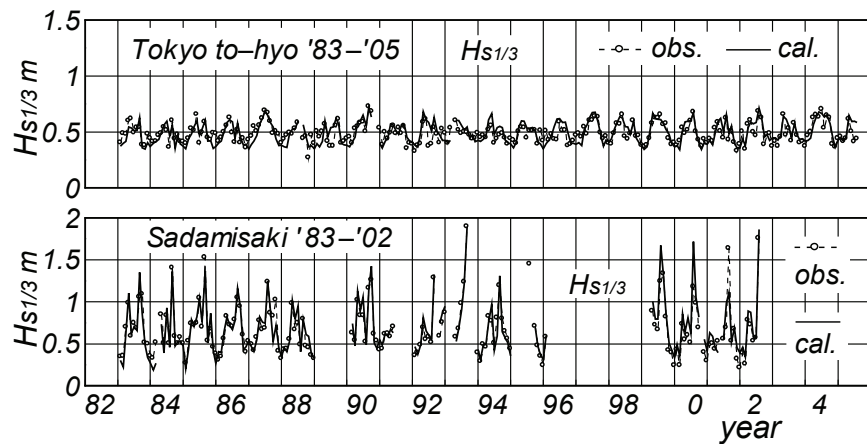


Fig. 7 Time series of monthly-grouped highest 1/3 mean significant wave heights obtained from hindcasts and measurements ( $H_{s1/3cal}$ ,  $H_{s1/3obs}$ ) at Tokyo to-hyo and Sadamisaki fishery stations.

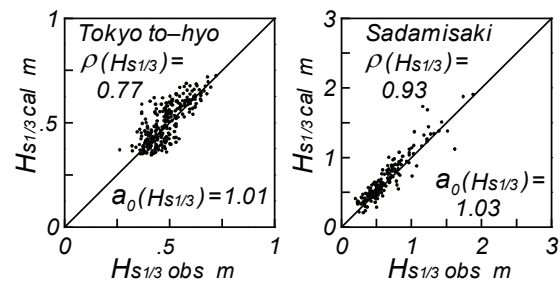


Fig. 8 Scatter diagram between hindcast-based  $H_{s1/3cal}$  and measurement-based  $H_{s1/3obs}$ .

差時系列は年ごとの多少の変動を伴うだけで目立った特徴をもたない。有意水準を5%とした $t$ 分布の理論に基づく片側検定によれば、関東沿岸領域の18地点のうち18地点、伊勢湾領域では7地点のうち7地点、瀬戸内海領域で40地点のうち40地点で統計的に有意な傾向変動は検出されない。

要するに、全65地点のうち65地点すべてで年別1/3最小平均気圧差資料は統計的に有意な傾向変動をもたない。また、トレンド示数に基づく片側検定によれば、トレンド示数 $I_t$ は関東沿岸領域の18地点で-0.76~1.31、伊勢湾領域の8地点で-0.67~0.39、瀬戸内海領域の40地点で-1.27~1.39をとって、有意水準5%の限界領域である $\pm 1.645$ 以内に納まることから、いずれの地点でも統計的に有意な傾向変動は検出されない。つまり、年別1/3最小平均気圧差資料あるいはこれに1000 hPaを加えた年別1/3最小平均気圧資料には、統計的に有意な傾向変動がほぼ含まれないことが2つの検定法によって支持される。さらに、年別1/3最小平均気圧差資料は統計的に有意なジャンプを全く伴わない。

Table 2 Error statistics such as correlation coefficient  $\rho(H_{s1/3})$  and slope value of correlation line  $a_0(H_{s1/3})$  for monthly-grouped highest 1/3 mean significant wave height  $H_{s1/3}$ , and highest 1/3 mean significant wave height over entire measurement period obtained from hindcasts and measurements ( $\bar{H}_{s1/3 cal}$ ,  $\bar{H}_{s1/3 obs}$ ).

location	year period	$\bar{H}_{s1/3 cal}$ m	$\bar{H}_{s1/3 obs}$ m	$\rho(H_{s1/3})$	$a_0(H_{s1/3})$
Kanto Sea Area					
Tokyo to-hyo	83-05	0.49	0.51	0.77	1.01
Ashikashima	92-05	0.87	0.82	0.53	1.00
Hiratsuka	79-05	1.01	1.03	0.69	0.97
Ise Bay					
Buoy A	96-03	1.99	2.09	0.83	0.94
Hamada	96-04	0.65	0.63	0.86	1.01
Yokkaichi	77-96	0.40	0.41	0.88	0.96
Seto Inland Sea					
Komatsushima	97-05	0.68	0.66	0.92	1.03
Okinoshima	96-05	0.77	0.81	0.88	0.94
Osaka Bay MT st.	78-05	0.69	0.65	0.42	1.00
Sanbonmatsu	97-03	0.43	0.40	0.66	1.07
Imabari	86-90	0.39	0.36	0.82	1.05
Kaminoseki	96-05	0.60	0.56	0.66	1.01
Kanda	92-05	0.57	0.53	0.70	1.07
Oita	87-05	0.61	0.61	0.83	0.98
Sadamisaki fishery	83-02	0.72	0.70	0.93	1.03

### 5.3 風速の長期変動の解析

Fig. 10 は1961~2005年の45年間の気圧風資料とSDP風資料に基づく海上風分布資料<sup>[6], [8]</sup>およびこれより短い期間の海上風観測資料より得た10m高度換算の年別1/3最大平均風速 $U_{1/3}^{(y)}$ の経年変化を、関東沿岸海域では京葉シーバースと平塚の2地点、伊勢湾ではブイAと伊勢湾シーバースの2地点、瀬戸内海では小松島、大阪湾MT局、荻田、大分の4地点について示す。観測風資料に基づく結果は年別測得率が75%以上(ブイA、小松島で72%以上)の年に限定して与える。これによると、気圧風資料に基づく結果はいずれの地点でも顕著な年変動を伴わず、ほぼ一定の値をとり、観測資料に基づく結果とも比較的良好に符合する。また、SDP風資料に基づく結果は全体的に気圧風資料に基づく結果とおおむね対応する。これは長年にわたる測風環境の変化に伴うSDP風資料の非等質性を人為的に調整する山口ら<sup>[6], [8]</sup>の方法、すなわち長期間のSDP風速資料において、古い時期の数年間以上の期間の平均風速が最近の5~30年間の平均風速に一致するように係数を乗じることにより、古い時期のSDP風速資料を地点ごとに調整する方法が一定程度の妥当性をもつことを表す。

Table 3 は左側の 4 列において, 1961~2005 年の 45 年間の年別 1/3 最大平均風速資料  $U_{1/3}^{(y)}$  にあてはめた直線の勾配値  $a$ , これと有意水準 5% の  $t$ -片側検定による勾配値の変動範囲  $a_{95}$  との比  $a/a_{95}$  および  $t$ -片側検定指標の値  $L$ , ならびにトレンド示数  $I_t$  の一覧を関東沿岸海域で対象とした 19 地点のうち 8 地点について与える。 $a/a_{95} \geq 1$  あるいは  $a/a_{95} \leq -1$  であれば, それぞれ統計的に有意な正あるいは負の傾向変動を意味し,  $L=1$  あるいは  $L=-1$  に対応する。 $a/a_{95}$  の絶対値は傾向変動 (増加・減少傾向) の強さを表す。また  $|I_t| \geq 1.645$  が増加・減少傾向を意味する。これによると, 表中の 8 地点全部で, 対象 19 地点では傾向変動をもたない御前崎を除く 18 地点で  $U_{1/3}^{(y)}$  は正の傾向変動をもつ。

Fig. 10 によれば,  $U_{1/3}^{(y)}$  の時系列は 1986~1990 年のいずれかの年を境に, それ以前の時期と以後の時期で不連続的な変化を伴っているように見える。この変化は 1989 年あるいは 1990 年で最も強く現れるが, 伊勢湾や瀬戸内海の事例と統一性を保つために,  $U_{1/3}^{(y)}$  資料を 1986 年以前の前半期間と 1987 年以降の後半期間に分けてそれぞれ傾向変動解析を行うとともに, 前半期間

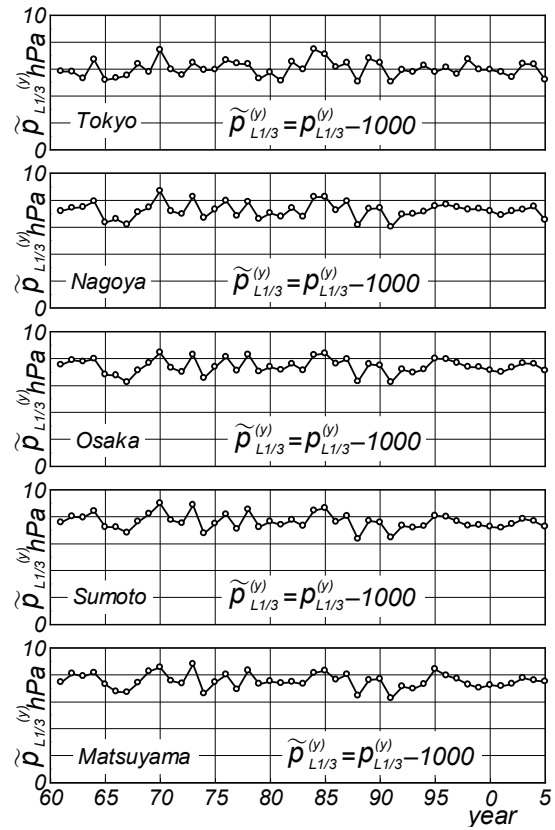


Fig. 9 Time series of yearly-grouped highest 1/3 mean atmospheric pressure difference  $\tilde{p}_{L/13}^{(y)}$  obtained from measurements at 5 representative stations.

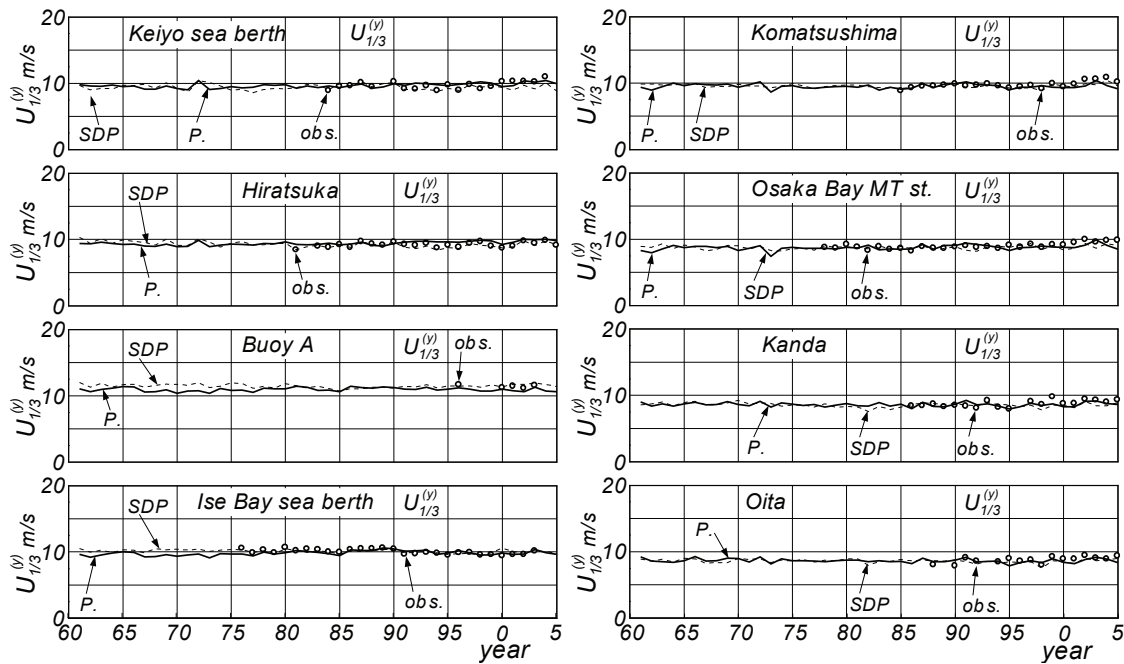


Fig. 10 Time series of yearly-grouped highest 1/3 mean wind speed  $U_{1/3}^{(y)}$  obtained from two kinds of hindcasts and measurements at 8 representative stations.

Table 3 Results of trend and jump analyses for time series of yearly-grouped highest 1/3 mean wind speed  $U_{1/3}^{(y)}$  in the Kanto Sea Area.

Kanto Sea Area location	1961~2005 年				1961~1986 年			1987~2005 年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Tokyo to-hyo	1.70	2.83	1	4.25	-0.16	0	10.86	1.76	1	11.31	2.91	1	2.51	1
Sea berth*	1.48	2.51	1	3.93	-0.05	0	9.51	1.44	1	9.91	2.56	1	2.36	1
Tokyo wan-ou	1.45	2.72	1	4.13	-0.04	0	9.02	1.65	1	9.40	2.72	1	2.46	1
Dainikaiho	1.51	2.86	1	3.95	0.13	0	9.90	1.70	1	10.28	2.71	1	2.39	1
Tsurugisaki	1.65	2.85	1	4.21	0.33	0	10.64	1.72	1	11.04	2.51	1	2.29	1
Hiratsuka	1.41	3.00	1	3.93	0.04	0	9.28	2.06	1	9.64	2.80	1	2.29	1
Ohshima	1.52	2.19	1	3.27	0.41	0	11.78	1.84	1	12.09	1.65	1	1.62	1
Irouzaki	0.62	1.17	1	1.88	0.27	0	10.74	1.96	1	10.82	0.60	0	0.70	0

\* : Keiyo sea berth Unit of  $\bar{U}_{1/3}^{(y)}$  : m/s Unit of  $a$  : cm/s/year

と後半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料に対して 2 種類の検定法によるジャンプ解析も実施する。この結果を Table 3 の 5 列目以降に与えており、中央の部分は 2 つの部分期間資料に対する期間平均値  $\bar{U}_{1/3}^{(y)}$  を含む傾向変動の解析結果を示す。また、右側の列における  $J_t$  は  $t$  分布の理論に基づく平均値の差に対する片側検定の結果、 $t/t_{95}$  は  $t$  分布における  $t$  値と有意水準 5% に対する  $t$  値の比であり、 $t/t_{95} \geq 1$  であれば統計的に有意な正のジャンプ、 $t/t_{95} \leq -1$  であれば負のジャンプ、 $|t/t_{95}| < 1$  でジャンプなし、を示し、しかもその絶対値がジャンプの強さを表す。 $J_{MW}$  は Mann-Whitney の片側検定の結果、 $z/z_{95}$  は正規分布における比であり、 $t/t_{95}$  の場合と同じ内容を表す。有意水準は 5% である。表に一部の結果を示すように、前半期間 (1961~1986 年の 26 年間) では、19 地点全部で傾向変動は検出されず、後半期間 (1987~2005 年の 19 年間) では 19 地点全部で正の傾向変動が検出される。統計的に有意な正のジャンプは 19 地点のうち駿河湾入口近くに位置する石廊崎、御前崎、駿河海洋の 3 地点を除く 16 地点で見出される。さらに境目の年を 1990 年とすると、残る 3 地点でも有意な結果になる。つまり、両期間の平均値でみても  $U_{1/3}^{(y)}$  は増加傾向をもつことを表す。

Table 4 は Table 3 と同様の結果を伊勢湾の 7 地点について示す。1961~2005 年の 45 年間の資料に対する結果をみると、正の傾向変動をもつ地点は 7 地点のうち 4 地点 (全 15 地点では 9 地点) であり、有意な正の傾向変動を与える地点数がそれ以外の地点数とほぼ相半ばする。地域別には湾外 (ブイ A) や湾口部に近い地点 (ブイ B, ブイ D) で傾向変動をもたず、湾内で傾向変動を示す。関東沿岸海域の結果と比べると、 $t$ -片側検定に基づく  $a/a_{95}$  の値やトレンド示数  $I_t$  の値は小さい傾向にある。1986 年を境目の年とする前半期間をみると、7 地点のうち 4 地点 (15 地点では 9 地点) で傾向変動をもたず、残りの地点で増加傾向をもつ。傾向変動をもたない地点は湾外と湾口近くに位置する。一方、1987 年以降の後半期間では 7 地点全部 (15 地点では 15 地点全部) で負の傾向変動をもつ。つまり、前半期間では  $U_{1/3}^{(y)}$  が増加傾向をもつ地点と傾向変動をもたない地点は 15 地点で 2 : 3 の比率であるのに対して、後半期間ではすべての地点で減少傾向を与える。ジャンプに対する検定結果では、2 つの判別基準によって正のジャンプをもつ地点が 7 地点のうち 5 地点 (15 地点では 10 地点)、ジャンプをもたない地点が 7 地点のうち 2 地点 (15 地点では 5 地点) であるから、正のジャンプをもつ地点が 70% 前後を占める。その地点は湾口部から湾内に位置し、おおむね全資料期間において正の傾向変動をもつ

Table 4 Results of trend and jump analyses for time series of yearly-grouped highest 1/3 mean wind speed  $U_{1/3}^{(y)}$  in Ise Bay.

Ise Bay location	1961~2005年				1961~1986年			1987~2005年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Buoy A	0.12	0.21	0	0.12	0.37	0	10.92	-2.09	-1	11.00	0.48	0	0.47	0
Buoy B	0.39	0.66	0	0.82	0.68	0	10.80	-2.14	-1	10.94	0.90	0	0.89	0
Buoy D	0.56	0.89	0	1.31	0.86	0	10.26	-2.13	-1	10.44	1.12	1	1.04	1
Buoy 1	0.57	1.23	1	1.82	0.83	0	9.17	-1.70	-1	9.34	1.42	1	1.34	1
Hamada	0.61	1.12	1	1.57	1.08	1	7.69	-2.13	-1	7.88	1.34	1	1.10	1
Sea berth*	1.04	1.66	1	2.41	1.40	1	9.69	-1.84	-1	9.99	1.83	1	1.52	1
Jounan	0.99	1.91	1	2.92	1.46	1	7.46	-1.65	-1	7.73	2.08	1	1.75	1

\* : Ise Bay sea berth Unit of  $\bar{U}_{1/3}^{(y)}$  : m/s Unit of  $a$  : cm/s/year

地点と対応する。逆に、ジャンプをもたない地点は湾外と湾口部に位置する。2つの基準による判別結果は一致する。

要するに、伊勢湾では $U_{1/3}^{(y)}$ は湾外および湾口部で傾向変動をもたず前半期間・後半期間のジャンプの傾向もほとんど存在しないのに対して、湾内では傾向変動およびジャンプが検出される。また、後半期間ではすべての地点で減少傾向が見出される。傾向変動およびジャンプの強さは関東沿岸海域の場合に比べて弱くなっている。

Table 5はTable 3およびTable 4と同様の結果を瀬戸内海の10地点について示す。1961~2005年の45年間における $U_{1/3}^{(y)}$ は10地点のうち3地点(全26地点では5地点)で正の傾向変動を、10地点のうち1地点(26地点では5地点)で負の傾向変動をもち、10地点のうち6地点(26地点では16地点)で傾向変動をもたないし、正あるいは負の傾向変動も $a/a_{95} \approx 2$ ,  $I_t \approx 3$ をとる大阪、神戸と江井ヶ島(表に与えていない)を除いて、それほど強くない。地域的には、大阪湾とその近傍の地点で正の傾向変動を、豊後水道で負の傾向変動をもち、それ以外の海域(紀伊水道、播磨灘、水島灘・備後灘、燧灘、広島湾・安芸灘、伊予灘、周防灘)で傾向変動をもたない。1986年を前半期間の境目の年とすると、前半期間では10地点のうち5地点(26地点では8地点)で傾向変動をもたず、残りの5地点(26地点では18地点)で負の傾向変動をもち、傾向変動をもたない地点は紀伊水道と大阪湾、負の傾向変動をもち地点はこれら以外の海域に位置し、傾向変動の有無が海域で明確に分かれる。1987年以降の後半期間ではすべての地点で傾向変動をもたない。ついで、統計的に有意な正のジャンプは10地点のうち3地点(26地点では5地点)である。これらの地点はすべて大阪湾とその近傍に位置し、45年間の資料において正の傾向変動をもち地点と完全に対応する。また、10地点のうち残り7地点(26地点では20地点)でジャンプはもたないが、残り1地点の土佐沖ノ島で弱い負のジャンプをもち。

Fig. 11は3海域60地点の年別1/3最大平均風速資料 $U_{1/3}^{(y)}$ に対する傾向変動の強度 $a/a_{95}$ とジャンプの強度 $z/z_{95}$ の沿岸方向プロットを与える。以上の議論およびFig. 11の結果をまとめると、つぎのようである。

①1961~2005年の45年間の $U_{1/3}^{(y)}$ は関東沿岸海域では対象19地点のうち18地点で、伊勢湾では15地点のうち8地点で、瀬戸内海では26地点のうち5地点で正の傾向変動を示す。その強さは関東沿岸海域から西に向かうにつれて弱くなる。該当地点は関東沿岸海域では御前崎を除くほぼすべての地点であるが、伊勢湾では湾内の地点に、瀬戸内海では大阪湾とその近傍の地点に限られる。逆に、瀬戸

Table 5 Results of trend and jump analyses for time series of yearly-grouped highest 1/3 mean wind speed  $U_{1/3}^{(y)}$  in the Seto Inland Sea.

Seto Inland Sea location	1961~2005 年				1961~1986 年			1987~2005 年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{U}_{1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Gobo-oki	-0.36	-0.52	0	-1.08	-0.99	0	12.56	-0.71	0	12.59	0.13	0	0.18	0
Komatsushima	-0.00	-0.05	0	-0.70	-0.98	0	9.49	-0.67	0	9.60	0.66	0	0.46	0
MT st.*	1.14	1.59	1	2.00	0.08	0	8.62	-0.01	0	8.96	1.88	1	1.77	1
Osaka	1.16	2.00	1	3.15	0.16	0	7.64	0.13	0	7.97	2.28	1	2.26	1
Kobe	1.29	2.09	1	3.11	0.17	0	7.71	0.15	0	8.09	2.39	1	2.31	1
Fukuyama	-0.00	0.00	0	-0.25	-1.40	-1	6.24	0.01	0	6.32	0.63	0	0.67	0
Kanda	-0.17	-0.28	0	-0.61	-1.07	-1	8.60	0.27	0	8.61	0.06	0	0.01	0
Oita	-0.49	-0.84	0	-1.57	-1.06	-1	8.67	-0.06	0	8.60	-0.45	0	-0.63	0
Sadamisaki	-0.92	-1.15	-1	-2.19	-1.48	-1	12.27	-0.08	0	12.13	-0.63	0	-0.74	0
Ashizurimisaki	-0.59	-0.90	0	-1.68	-1.64	-1	9.58	0.34	0	9.51	-0.39	0	-0.57	0

\* : Osaka Bay MT st. Unit of  $\bar{U}_{1/3}^{(y)}$  : m/s Unit of  $a$  : cm/s/year

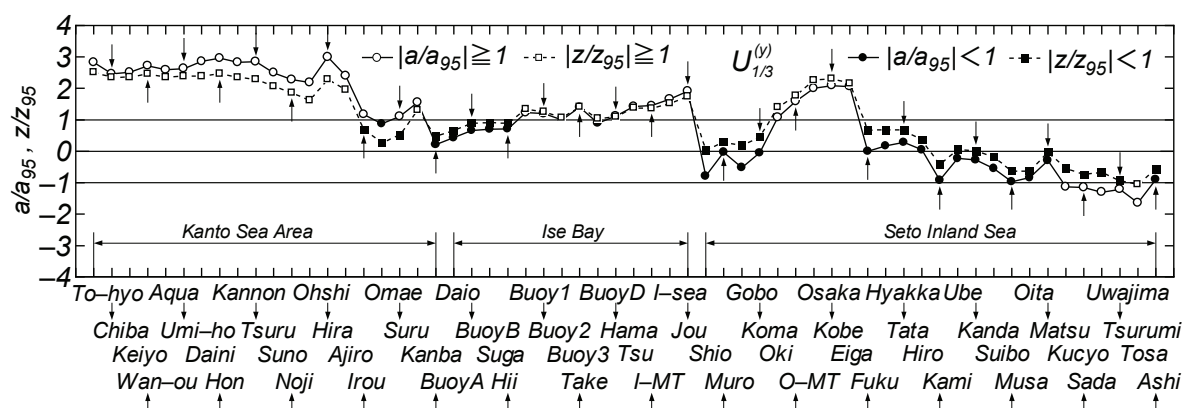


Fig. 11 Alongshore plot of intensity indices of trend and jump in time series of yearly-highest 1/3-averaged wind speed.

内海のうち豊後水道にある地点では負の傾向変動を与える。つまり、関東沿岸海域の御前崎、伊勢湾の湾口と湾外、大阪湾とその近傍および豊後水道を除く瀬戸内海域では、統計的に有意な傾向変動は検出されない。

②1986 年を境目の年とする前半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料は関東沿岸海域では 19 地点全部で傾向変動をもたず、1987 年以降の後半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料は 19 地点全部で正の傾向変動をもつ。また、 $U_{1/3}^{(y)}$  資料は駿河湾入口の 3 地点を除く 16 地点で 1986~1987 年を境とした統計的に有意な正のジャンプをもつ。伊勢湾では前半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料は対象 15 地点のうち湾内の 6 地点で正の傾向変動をもち、湾口と湾外の残り 9 地点で傾向変動をもたないのに対して、後半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料は 15 地点全部で負の傾向変動をもつ。また、湾内と湾口の 10 地点では正のジャンプを、湾口と湾外の 5 地点でジャンプをもたない。瀬戸内海では前半期間の  $U_{1/3}^{(y)}$  資料は対象 26 地点のうち紀伊水道と大阪湾およびそのごく近傍の 8 地点で傾

向変動をもたず、それ以外の 18 地点で負の傾向変動をもつ。後半期間では 26 地点全部で傾向変動をもたない。また、対象 26 地点のうち大阪湾とそのごく近傍の 5 地点で正のジャンプをもち、負のジャンプをとる土佐沖ノ島を除く残り 20 地点でジャンプをもたない。

結局、1986 年を前半期間の最後、1987 年を後半期間の最初とする  $U_{1/3}^{(y)}$  資料において正のジャンプは関東沿岸海域の対象 19 地点のうち駿河湾入口の 3 地点を除く 18 地点、伊勢湾では対象 15 地点のうち湾内の 10 地点、瀬戸内海では対象 26 地点のうち大阪湾とそのごく近傍の 5 地点で検出される。逆に、駿河湾入口の 3 地点、伊勢湾の湾口と湾外の 5 地点、大阪湾とその近傍の 5 地点と土佐沖ノ島の 1 地点を除く瀬戸内海の残り 20 地点でジャンプは検出されないことから、関東沿岸海域から瀬戸内海に向けて西に向かうほどジャンプが検出されない傾向にあるということになる。

#### 5.4 波高の長期変動の解析

Fig. 12 は 1961~2005 年の 45 年間の気圧風資料および SDP 風資料を入力条件として得た 2 種類の波浪推算資料<sup>[9]~[11]</sup>および観測資料に基づく年別 1/3 最大平均波高  $H_{s1/3}^{(y)}$  の経年変化を 10 波浪観測地点、すなわち関東沿岸海域では東京灯標と平塚、伊勢湾ではブイ A と浜田、瀬戸内海では小松島、大阪湾 MT 局、今治、荻田、大分、佐田岬漁港の 6 地点について示す。観測資料に基づく結果は年別測得率が 75 %以上（平塚で 72 %以上、ブイ A、浜田、佐田岬漁港で 68 %以上）の年に限定して図示している。これらによると、気圧風資料を入力条件とする結果はいずれの地点でも顕著な年変動を伴わず、ほぼ一定に近い値をとる。観測結果との対応もかなりよい。また、いずれの地点でも気圧風資料を入力条件とする結果は SDP 風資料を入力条件とする結果とほぼ連動して変化することから、それらの年

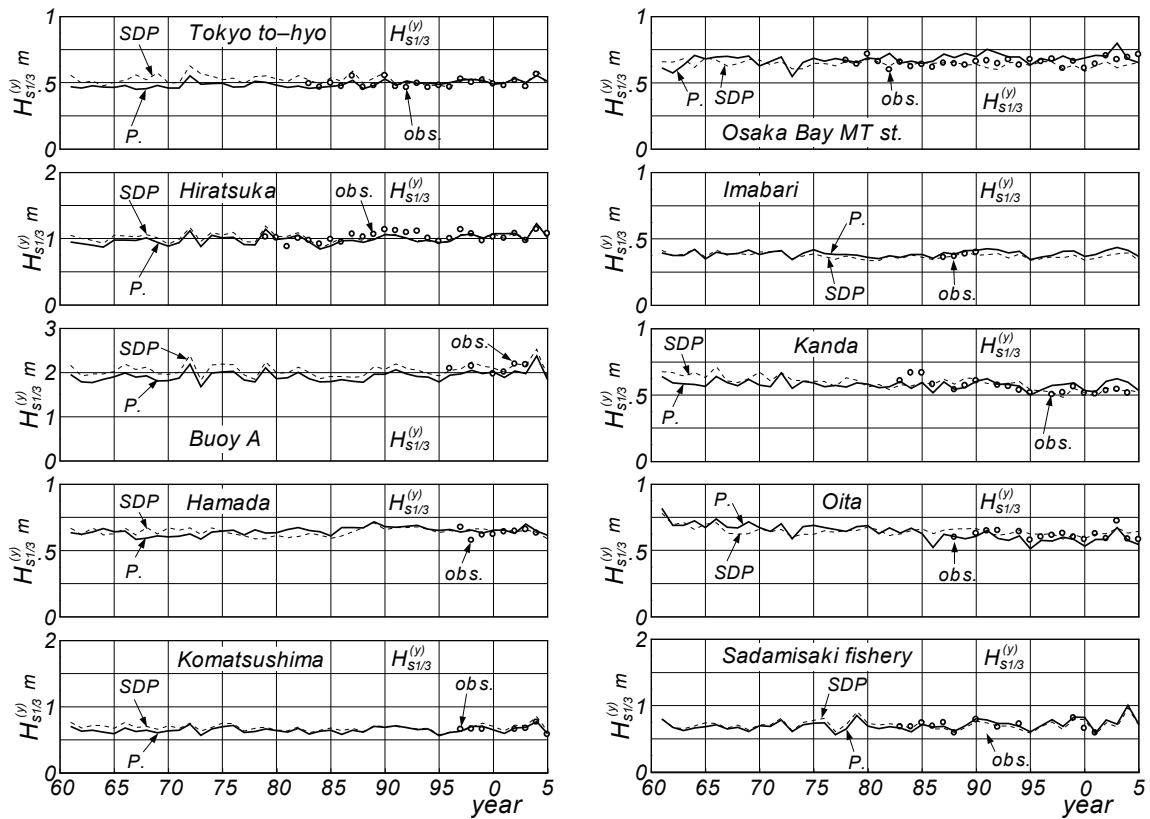


Fig. 12 Time series of yearly-grouped highest 1/3 mean significant wave height  $H_{s1/3}^{(y)}$  obtained from two kinds of hindcasts and measurements at 10 representative stations.



時系列が相互に類似するし、絶対値でも、両者は大部分の地点でおおむねよく符合する。しかし、東京灯標およびブイ A では SDP 風資料を入力条件とする結果が、大阪湾 MT 局では気圧風資料を入力条件とする結果が、それぞれ若干大きめの値を与える。また、荻田では SDP 風資料を入力条件とする結果は経年的に減少傾向を示し、観測資料に基づく結果とも符合する挙動を与えるのに対して、気圧風資料を入力条件とする結果では減少傾向があまりみられない。逆に、大分では気圧風資料を入力条件とする結果は経年的な減少傾向を示すが、観測資料期間である 1987~2005 年では減少傾向はあまり目立たず、むしろ 1986 年以前と 1987 年以降の期間で不連続的に小さくなり、各期間における傾向変動は緩やかである。これらの挙動は観測資料による結果とほぼ対応する。一方、SDP 風資料を入力条件とする結果は経年的にあまり変動せず、観測資料による結果とも符合する。

以上のように、気圧風資料を入力条件とした波浪推算資料から得た年別 1/3 最大平均波高資料  $H_{s1/3}^{(y)}$  は大部分の地点であまり顕著な年変動を示さず、SDP 風資料を入力条件とする結果と類似した経年変化を与え、観測資料の期間に対しては観測資料に基づく結果と比較的よく符合することがわかる。

Table 6 は 1961~2005 年の 45 年間の年別 1/3 最大平均波高資料  $H_{s1/3}^{(y)}$  にあてはめた直線の勾配値  $a$ 、これと有意水準 5 % の  $t$ -片側検定による勾配値の変動範囲  $a_{95}$  との比  $a/a_{95}$  および  $t$ -片側検定の結果  $L$ 、ならびにトレンド示数  $I_t$ 、45 年間資料を 1961~1986 年の 26 年間と 1987~2005 年の 19 年間に分けた

Table 6 Results of trend and jump analyses for time series of yearly-grouped highest 1/3 mean significant wave height  $H_{s1/3}^{(y)}$  in the Kanto Sea Area, Ise Bay and the Seto Inland Sea.

Kanto Sea Area location	1961~2005 年				1961~1986 年			1987~2005 年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Tokyo to-hyo	1.15	2.77	1	4.38	0.42	0	0.477	1.16	1	0.506	2.58	1	2.42	1
Ashikashima	2.08	1.83	1	2.92	-0.56	0	0.797	1.63	1	0.855	1.98	1	1.90	1
Hiratsuka	2.55	1.91	1	3.03	0.36	0	0.965	1.37	1	1.022	1.58	1	1.59	1

Ise Bay location	1961~2005 年				1961~1986 年			1987~2005 年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Buoy A	2.80	1.21	1	1.94	-0.02	0	1.893	1.10	1	1.957	1.04	1	1.05	1
Hamada	0.97	1.90	1	2.92	1.00	0	0.633	-1.84	-1	0.663	2.31	1	2.05	1
Yokkaichi	0.84	1.68	1	2.62	0.16	0	0.391	0.84	0	0.412	1.57	1	1.66	1

Seto Inland Sea location	1961~2005 年				1961~1986 年			1987~2005 年			jump (~1986, 1987~)			
	$a$	$a/a_{95}$	$L$	$I_t$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$a/a_{95}$	$L$	$\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$	$t/t_{95}$	$J_t$	$z/z_{95}$	$J_{MW}$
Komatsushima	0.52	0.58	0	0.92	-0.39	0	0.643	0.09	0	0.662	0.83	0	0.88	0
MT st.*	1.24	1.65	1	2.05	0.47	0	0.663	-0.32	0	0.698	1.81	1	1.76	1
Imabari	0.23	0.50	0	0.68	-1.12	-1	0.383	-0.20	0	0.397	1.20	1	1.13	1
Kanda	-0.80	-1.31	-1	-1.84	-1.41	-1	0.584	-0.20	0	0.572	-0.76	0	-0.52	0
Oita	-0.37	-4.85	-1	-6.14	-2.44	-1	0.671	-0.65	0	0.589	-3.47	-1	-2.89	-1
Sadamisaki**	2.00	1.33	1	2.17	-0.14	0	0.686	0.85	0	0.737	1.28	1	1.37	1

\* : Osaka Bay MT st.    \*\* : Sadamisaki fishery    Unit of  $\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$  : m    Unit of  $a$  : mm/year

資料に対する同様の傾向変動の解析結果と各期間の  $H_{s1/3}^{(y)}$  の平均値  $\bar{H}_{s1/3}^{(y)}$ , さらに 1961~1986 年を前半期間, 1987~2005 年を後半期間とするジャンプ検定の結果, すなわち  $t$ -片側検定に基づく  $t$  値と有意水準 5% の  $t_{95}$  値の比  $t/t_{95}$  および  $J_t$  と Mann-Whitney 検定に基づく正規分布の  $z$  値と有意水準 5% の  $z_{95}$  値の比  $z/z_{95}$  および  $J_{MW}$  の一覧を, 関東沿岸海域の 3 地点 (東京灯標, アシカ島, 平塚), 伊勢湾の 3 地点 (ブイ A, 浜田, 四日市), 瀬戸内海の対象 11 地点のうち 6 地点 (小松島, 大阪湾 MT 局, 今治, 荇田, 大分, 佐田岬漁港) について示す。最も強いジャンプがみられる前半期間の終わりの年は関東沿岸海域で 1989 年, 伊勢湾で 1988 年または 1985 年, 瀬戸内海で 1984 年, 1985 年, 1986 年, 1988 年, 1989 年というように, 海域別, さらに地点別に異なることから, ここでは気圧風資料の場合に合わせて 1986 年としている。また, Fig. 13 は年別 1/3 最大平均波高資料  $H_{s1/3}^{(y)}$  に対する傾向変動の強度  $a/a_{95}$  とジャンプの強度  $z/z_{95}$  の沿岸方向プロットを与える。Table 6 と Fig. 13 から順次, つぎのことが言える。

関東沿岸海域では, いずれの地点でも  $H_{s1/3}^{(y)}$  資料は正の傾向変動および正のジャンプをもつ。前半期間の最終年を 1989 年とする場合にジャンプの特性は一層強化される。期間別には前半期間について傾向変動はなく, 後半期間について正の傾向変動を示す。

伊勢湾でも全地点で正の傾向変動および正のジャンプを与える。傾向変動とジャンプの強さは関東沿岸海域よりやや弱い。期間別については前半期間で傾向変動は存在せず, 後半期間で正の傾向変動 (ブイ A), 負の傾向変動 (浜田), 傾向変動なし (四日市) と判別結果が混在する。

瀬戸内海では正の傾向変動を示す地点が表に与えた 6 地点のうち 2 地点, (全 11 地点では 4 地点, 4 地点のうち 2 地点は大阪湾とそのごく近傍の地点) であり, その強さ ( $a/a_{95}$  の比の大きさ, あるいは  $I_t$  の大きさ) も関東沿岸海域や伊勢湾の各地点におけるものより全体的に弱くなる。傾向変動を示さない地点が 6 地点のうち 2 地点 (11 地点では 5 地点), 負の傾向変動を示す地点が 6 地点のうち荇田と大分の 2 地点 (11 地点でも同じ 2 地点) になる。正のジャンプを示す地点は 6 地点のうち 3 地点 (11 地点では 7 地点), ジャンプを示さない地点は 6 地点のうち 2 地点 (11 地点では 3 地点), 負のジャンプを示す地点は 11 地点のうち 1 地点 (大分) である。境目の年をジャンプが最も強い年にとると, 正のジャンプを示す地点が 1 地点 (小松島), 負のジャンプを示す地点が 1 地点 (荇田) 増え, その結果ジャンプを与えない地点が 2 地点減る。なお, いずれの海域でも傾向変動とジャンプの有無に対する 2 つの判別結果はそれぞれ一致する。

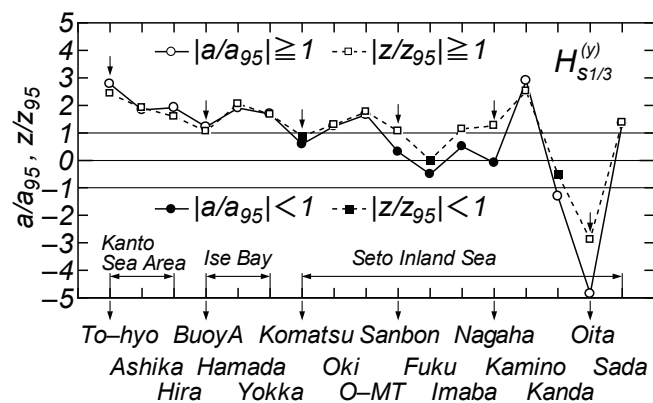


Fig. 13 Alongshore plot of intensity indices of trend and jump in time series of yearly-highest 1/3-averaged wave height.

$H_{s1/3}^{(y)}$  の経年変化図でみたように, 大分では減少傾向, あるいは前半期間の最終年を 1986 年よりむしろ 1985 年とする負のジャンプの傾向があることから, その特性が傾向変動とジャンプの判別結果に明確に現われている。荇田でも同様の傾向があるが, その強さは弱いことから, 検定指標には必ずしも反映されない。瀬戸内海の西側海域では, 上関, 荇田, 大分, 佐田岬漁港 (豊後水道) における傾向変動やジャンプの強さが地点別に著しい変化を伴う。

以上,  $H_{s1/3}^{(y)}$  に関して正の傾向変動が関東沿岸海域と伊勢湾, および瀬戸内海のうち大阪湾とそのごく近傍の地点などで認められるが, 関東沿岸海域から西に向かうにつれてその強さは弱くなり, 瀬戸

内海では傾向変動をもたない地点が対象地点の半数近くに達し、負の傾向変動を示す地点（荻田，大分）も出現する。傾向変動とジャンプの存在は連動する傾向にあることから、傾向変動の有無に関する地点およびその強さと、ジャンプの有無に関する地点およびその強さはそれぞれおおむね対応する。

## 6. 結 語

本研究では、関東沿岸領域、伊勢湾領域、瀬戸内海領域における気象庁気象官署で取得された1961～2005年の気圧資料を基礎資料として、同海域における海上風分布資料および同海域の波浪観測地点における波浪資料を作成したのち、これらの資料に対して行った各種平均気圧特性の解析や風候・波候解析の結果に基づいて、1/3 最小平均気圧差、1/3 最大平均風速と1/3 最大平均波高の長期変動（傾向変動、ジャンプ）の特性を調べた。得られた知見はつぎのように要約される。

①年別1/3 最小平均気圧差資料  $\bar{p}_{L1/3}^{(y)}$  は関東沿岸領域、伊勢湾領域、瀬戸内海領域にそれぞれ位置するいずれの観測地点においても統計的に有意な傾向変動およびジャンプをもたない。

②月別1/3 最大平均風速  $U_{1/3}$  および月別1/3 最大平均波高  $H_{s1/3}$  に関して、推算結果は観測結果の挙動によく追従し、両者の対応は有意なレベルで良好である。

③年別1/3 最大平均風速  $U_{1/3}^{(y)}$  に関して、気圧風資料に基づく推算結果は観測結果とおおむね符合する。また、SDP 風資料に基づく推算結果とも多少の隔たりを除いて、よく対応する。これは等質性に問題をもつSDP 風資料に対する山口ら<sup>[6], [8]</sup>の経験的補正法が有用であることを表す。同様のことが年別1/3 最大平均波高  $H_{s1/3}^{(y)}$  についても言える。

④45年間の年別1/3 最大平均風速資料  $U_{1/3}^{(y)}$  は関東沿岸海域、伊勢湾内、大阪湾とそのごく近傍の地点で正の傾向変動を、豊後水道で負の傾向変動をもつが、関東沿岸海域の御前崎、伊勢湾外や湾口、大阪湾と豊後水道を除く瀬戸内海では傾向変動をもたない。また、正の傾向変動の強さは関東沿岸海域から西に向かうほどおおむね弱くなる。同様に、45年間の年別1/3 最大平均波高資料  $H_{s1/3}^{(y)}$  も関東沿岸海域、伊勢湾、大阪湾とそのごく近傍の地点のほか2地点で正の傾向変動をもつ。その強さは西に向かうほど弱くなって負の値をとり、瀬戸内海西部海域の大分と荻田では統計的に有意な負の傾向変動を示す。ただし、周防灘東側の上関では正の傾向変動を、豊後水道の佐田岬漁港でも再び正の傾向変動を与える。瀬戸内海における半数近くの地点で傾向変動をもたない。

⑤年別1/3 最大平均風速資料  $U_{1/3}^{(y)}$  に関して、1986～1987年を境とした統計的に有意な正のジャンプをもつ地点は正の傾向変動をもつ地点とほぼ対応することから、正の傾向変動の出現も  $U_{1/3}^{(y)}$  資料における一方的な増加傾向というよりもむしろ前半期間と後半期間の資料値における正のジャンプの存在によるところが大きいと考えられる。ジャンプの強さも傾向変動の強さと連動して、関東沿岸海域から西に向かうほどおおむね弱くなる。年別1/3 最大平均波高資料  $H_{s1/3}^{(y)}$  もジャンプについて同様の地域特性を示すけれども、西側海域では著しい正負の傾向変動やジャンプの変化を伴う。

## 参 考 文 献

- [1] 山口正隆・大福 学・日野幹雄・畑田佳男・森 正憲・野中浩一：内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築－伊勢湾の場合－，海岸工学論文集，第53巻，pp.116-120，2006。
- [2] 山口正隆・日野幹雄・大福 学・畑田佳男・野中浩一：内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築－瀬戸内海の場合－，海岸工学論文集，第54巻，pp.106-110，2007。
- [3] 山口正隆・日野幹雄・大福 学・畑田佳男・野中浩一：東京湾における風候と波候の推定，工学ジ

- ジャーナル (愛媛大学), 第7巻, pp.122-132, 2008.
- [4] 山口正隆・日野幹雄・畑田佳男・大福 学・野中浩一: 駿河湾西岸における長期波浪の推算, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.903-908, 2008.
- [5] 山口正隆・日野幹雄・畑田佳男・大福 学・野中浩一: 瀬戸内海における波浪の長期推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.126-130, 2008.
- [6] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男・日野幹雄: SDP 風資料を用いた内湾・内海における45年間の海上風分布データセットの作成, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.186-190, 2009.
- [7] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一・日野幹雄: SDP 風資料を用いた内湾・内海における45年間の波浪推算システムー東京湾の場合ー, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.191-195, 2009.
- [8] 山口正隆・大福 学・野中浩一・畑田佳男: SDP 風資料に基づく内湾・内海の海上風分布の特性, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第9巻, pp.1-13, 2010.
- [9] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一: SDP 風資料に基づく内湾・内海の海上風分布を用いた45年間の波浪推算システムー関東沿岸海域の場合ー, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第9巻, pp.14-26, 2010.
- [10] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一: SDP 風資料に基づく内湾・内海の海上風分布を用いた45年間の波浪推算システムー伊勢湾の場合ー, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第9巻, pp.27-39, 2010.
- [11] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一: SDP 風資料に基づく内湾・内海の海上風分布を用いた45年間の波浪推算システムー瀬戸内海の場合ー, 工学ジャーナル (愛媛大学), 第9巻, pp.40-55, 2010.
- [12] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一・日野幹雄: SDP 風資料を用いた内湾・内海における波浪の長期推算システムの適用性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.151-155, 2010.
- [13] Lin, L. and D.T. Resio : Improving wind input information for Great Lakes wave hindcast study, Proc. 6th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, pp.29-43, 2000.
- [14] Lin, L. and D.T. Resio : Improving wave hindcast information for the Great Lakes, Proc. WAVES2001, Vol.1, pp.650-660, 2001.
- [15] Weisse, R., Feser, F. and H. Günther : A 40-year high resolution wind and wave hindcast for the Southern North Sea, Proc. 7th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, pp.97-104, 2002.
- [16] Soares, C. G., Weisse, R., Carretero, J. C. and E. Alvarez : A 40 years hindcast of wind, sea level and waves in European Waters, Proc. OMAE 2002, 21st Int. Conf. on Offshore Mech. and Arc. Eng., 2002.
- [17] Weisse, R. and F. Feser : Evaluation of a method to reduce uncertainty in wind hindcasts performed with regional atmosphere models, Coastal Eng., Vol.48, pp.211-225, 2003.
- [18] Gaslikova, L. and R. Weisse : Estimating near-shore wave statistics from regional hindcasts using downscaling techniques, Ocean Dynamics, No.56, pp.26-35, 2006.
- [19] Weisse, R. and H. Günther : Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002, Ocean Dynamics, No.57, pp.161-172, 2007.
- [20] Weisse, R., Callies, U., Günther, H., von Storch, H., Feser, F., Woth, K., Grabermann, I., Kreuz, M. and A. Pluess : Wind, wave and storm surge hindcasts and scenarios and related coastal and offshore applications : The COASTDAT data set at the GKSS Institute for coastal research, Proc. 10th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Symp., North Shore, Oahu, Hawaii, Nov. 11-16,

2007( CD-ROM).

- [21] Sotillo, M.G., Aznar, R. and F. Valero : The 44-year Mediterranean HIPOCAS wind database : A useful tool to analyse offshore extreme wind events from a long-term regional perspective, Coastal Eng., doi:10.1016/j.coastaleng.2008.02.008. , 2008
- [22] Cieřlikiewicz, W., and B. Paplińska-Swerpel : A 44-year hindcast of wind wave fields over the Baltic Sea, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.017, 2008.
- [23] Ponce de León, S. and C. G. Soares : Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean sea, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.023, 2008.
- [24] Musić, S. and S. Nickovic : 44-year wave hindcast for the Eastern Mediterranean, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.024, 2008.
- [25] Ratsimandresy, A.W., Sotillo, M.G., Carretero Albiach, J.C., Alvarez Fanjul, E. and H. Hajji : A 44-year high-resolution ocean and atmospheric hindcast for the Mediterranean Basin developed within the HIPOCAS Project, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.025, 2008.
- [26] Pilar, P., Guedes Soares, C. and J. C. Carretero : 44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.027, 2008.
- [27] Cherneva, Z., Andreeva, N., Pilar P., Valchev, N., Petrova P. and C. Guedes Soares : Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea, Coastal Eng., doi : 10.1016/j.coastaleng.2008.02.028, 2008.
- [28] 畑田佳男・山口正隆・大福 学・高橋秀典 : 表面風再解析資料を用いた波浪の長期推算システムの適用性の向上, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.141-145, 2005.
- [29] 塩野清治・弘海原 清・升本真二 : パソコンで不規則に分布するデータを格子点データに変換してコンターマップを作成する方法(1)ー加重一次補間法, 情報地質(10), pp.65-78, 1985.
- [30] Cardone, V. J. : Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting, New York Univ., School of Eng. and Sci., Rept. GSL-TR69-1, 131p, 1969.
- [31] 運輸省第四港湾建設局・下関調査設計事務所・(財) 日本気象協会福岡本部 : 内湾海上風推算調査委託報告書, 226p., 1988.
- [32] 山口正隆・大福 学・日野幹雄・野中浩一・畑田佳男 : 内海・内湾における風候と確率風速の評価, 水工学論文集, 第 53 卷, pp. 1477-1482, 2009.
- [33] 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博 : 一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第 381 号/II-7, pp.151-160, 1987.
- [34] 立花俊一・田川正賢・成田清正 : エクササイズ確率・統計, 共立出版, 214p., 1996.
- [35] 鈴木栄一 : 気象統計学 (第 5 版), 地人書館, 314p., 1975.
- [36] 徐 宗学・竹内邦良・石平 博 : 日本の平均気温・降水量時系列におけるジャンプ及びトレンドに関する研究, 水工学論文集, 第 46 卷, pp.122-126, 2002.
- [37] 田中 豊・垂水共之 : 統計解析ハンドブック ノンパラメトリック法, 共立出版, 164p., 1999.

## 愛媛大学工学部工学ジャーナル論文投稿規程

平成19年4月1日  
広報委員会決定

### 1. 愛媛大学工学部工学ジャーナルの刊行目的

愛媛大学工学部工学ジャーナルは、愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）教員・工学部職員（以下「工学系教員」という。）及び外部投稿者による、工学関係の独創的で、かつ、優れた学術研究の成果を広く公表することを目的として刊行するものとする。

### 2. 愛媛大学工学部工学ジャーナルの編集

愛媛大学工学部工学ジャーナルの編集は、愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）広報委員会（以下「広報委員会」という。）がこれに当たる。

編集に当たる広報委員会は、論文の受理、採否の決定、校閲等を行う。

### 3. 論文

論文は、指定投稿論文及び一般投稿論文とする。

指定投稿論文は、次のとおりとする。

- (1) 工学系教員が学協会による学会賞等を受賞した研究業績をまとめたもの
- (2) 工学系教員が学協会の機関誌に記述した、先端的研究に関する解説、総説等の内容を再編集したもの（ただし、著作権に関しては、執筆者が事前に学協会の承認を得ること。）
- (3) 学生が学協会の学会賞等を受賞した業績を指導教員がまとめたもの
- (4) 各コースが推薦する論文
- (5) 当該年度末の定年退職予定教員による学術研究に関する論文
- (6) その他、広報委員会で認めたもの

(1)～(3)にいう学協会は、日本学術会議の登録学術研究団体に限る。

(4)の各コース推薦論文は、各コース3編以内とし、学協会の機関誌に発表した内容のレビュー的論文で、各コースが誇るものとする。

一般投稿論文は、独創的でアイデアに富む未発表のもの、国際会議の招待講演、国内学会での基調講演、学術交流協定に基づく国際シンポジウムでの講演等をまとめたものとする。

### 4. 論文執筆及び論文ページ制限

論文は、「愛媛大学工学部工学ジャーナル執筆規程」に基づき作成する。

指定投稿論文中、(5) 当該年度末の定年退職予定教員による学術研究に関する論文では15ページを、その他の論文では10ページを超えないことを原則とする。ただし、広報委員会が必要と認めた場合はこの限りでない。

### 5. 著作権

- (1) 投稿された論文の著作権は、広報委員会に帰属する。ただし、著者自身が自著の記事を複製、翻訳、翻案等の形で利用することは差し支えない。
- (2) 代表著者は、投稿に際し、著作権委譲書（別紙1）を広報委員会へ提出する。

6. 愛媛大学工学部工学ジャーナルの作成

工学ジャーナルは、冊子体を作成しないで、全ての論文を1枚のCD-ROM等をもって作成する。

7. 投稿料等経費

(1) 投稿料は、投稿者に別途定める投稿料を負担させることができるものとする。

ただし、本規程第3の「指定投稿論文」に関しては、投稿料の負担を免除する。

(2) 投稿者はCD-ROM等の必要枚数を広報委員会に申請する。なお、CD-ROM等の必要枚数が10枚を超えるものについては、投稿者が別途定める経費を負担する。

8. 提出原稿

提出原稿は、オリジナルファイル（Word等）及びPDFファイルとする。

9. 原稿の締切

(1) 申込締切 毎年 8月31日（所定の申込書により申し込む。）

(2) 原稿提出締切 毎年10月31日

(3) 原稿の申込み及び提出先  
広報委員会

10. 受理年月日

受理年月日は、広報委員会が原稿を受理した日とする。

論文の掲載の可否については、広報委員長名で通知する。

11. その他の注意事項

原稿受理後、論文内容の変更はできないので、特に留意すること。

（最新改正： 平成18年12月20日 広報委員会決定）

# 工学ジャーナル論文申込書

コース等名  
申込者氏名

整理番号	コース名	著者氏名	題目	指定投稿 一般投稿 の別	指定投稿 の種類	既発表学協会誌 又は 講演会名(年月)	原稿の総 ページ数	CD-ROM 等の必要枚 数	(原稿申込日)	(原稿受理日)
1									月 日	月 日
2									月 日	月 日
									月 日	月 日
									月 日	月 日



(別紙1)

## 著作権委譲書

愛媛大学工学部工学ジャーナルに投稿する私の以下の論文の著作権は、愛媛大学理工学研究科（工学系）広報委員会に委譲いたします。

論文題目 \_\_\_\_\_

平成 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

代表著者氏名 \_\_\_\_\_

## 愛媛大学工学部工学ジャーナル論文投稿規程第7に定める投稿料等経費について

愛媛大学工学部工学ジャーナル論文投稿規程第7に定める投稿料等経費については、下記のとおりとする。

### 記

#### 1. 第7の(1)に定める投稿料

一般投稿論文に係る投稿料は、次のとおりとする。

1 ページ当たりの投稿料の額	900 円
----------------	-------

なお、愛媛大学大学院理工学研究科（工学系）教員・工学部職員が代表著者となる一般投稿論文に係る投稿料は、当分の間、負担させないものとする。

#### 2. 第7の(2)に定めるCD-ROM等の必要枚数が10枚を超えるものに係る経費

指定投稿論文及び一般投稿論文のCD-ROM等の配付枚数は10部とし、これを超える部数を必要とする場合は、投稿者負担とし、負担額は次のとおりとする。

超過1部数当たりの投稿者負担：200円

(最新改正：平成18年12月20日、広報委員会決定 平成19年4月1日施行)

## 愛媛大学工学部工学ジャーナル論文執筆規程

### 1. 一般的な留意事項

- (1) 指定投稿論文，一般投稿論文とも，原則として和文または英文論文とする。
- (2) 原稿はそのままCD-ROM等化されるので，原稿はオリジナルファイル（Word等）及びPDFファイルで提出すること。
- (3) 指定投稿論文中，当該年度末の定年退職予定教員による学術研究に関する論文では，図表を含め15ページを，その他の論文では，10ページを超えないことを原則とする。ただし，広報委員会が必要と認めた場合は，この限りでない。
- (4) 原稿はA-4を用い，マージンは和文，英文ともに上20mm，下30mm，左右25mmとする。
- (5) 和文ではMS明朝またはそれに相当する文字種を，英文ではTimes New Romanまたはそれに相当する文字種とする。
- (6) 文字サイズは，題目は14ポイント（ゴシック体），副題は12ポイント（ゴシック体），著者氏名は12ポイントとし，いずれも中央揃えとする。緒言，結果と考察等の見出し（中央揃え），内容展開に必要な見出し（左端揃え）は12ポイント（ゴシック体）とする。要約，キーワード，本論，謝辞，引用論文，付録はいずれも10ポイントとする。
- (7) 要約，キーワード，本論，謝辞，引用論文，付録はいずれも1段組で，行間隔は16ポイントとする。

### 2. 体裁とその書き方

- (1) 題目，著者氏名，要約，キーワード，本論，謝辞，引用論文，付録の順とする。
- (2) 原稿の第1ページに題目，著者氏名を中央揃えで記す。勤務先及び部課（科），連絡先は脚注に記すこと。英文も併記すること。
- (3) 題目は簡潔（20字程度以内）で，その内容をよく示すものとする。英文題目における大文字，小文字の使い方については，例を参照のこと。
- (4) 著者氏名の前に，「by,」また要約に，「ABSTRACT」の見出しを付けないこと。
- (5) 指定投稿論文では，その論文が指定投稿論文であることを明確に示すため，出典となった学術論文を1ページの脚注として明記すること。
- (6) 要約  
英文で研究の目的，結果，結論を150語程度にまとめること。
- (7) 本論
  - 1) 本論は，緒言，実験，結果と考察，まとめ，謝辞，参考文献，付録の順とする。これら見出しは，ゴシック体とし，文のセンターに位置づけること。必要に応じ小見出しをつけること。小見出しもゴシック体とし，文頭に位置づけること。
  - 2) 和文では専門用語以外は当用漢字を用い，ひらがなまじり口語文，かなは新かなづかいとすること。
  - 3) 不必要に長い表現は避け，重複した内容にならないようにすること。又，同性質の図または表を多く掲げることは避けること。数式は，主題の論旨の展開に必要な程度にとどめること。写真及び図表の説明は，論文の和文，英文を問わず，単に Fig.1, Table 1 などと記するだけでなく，英文で説明（文）をつけること。文中では，Fig.1, Table 1 などと記すること。
  - 4) 和文の場合，句読点は，「，」及び「。」とし，それぞれ1画を用いること。

- 5)本文中に使用する記号には、必ず説明を付けること。
- 6)単位は周知の記号を用いること。
- 7)後述例を参考にすること。
- (8)謝辞の記述  
研究費等の補助などを受けた場合には、本文の最後に記すること。
- (9)引用文献
  - 1)研究内容に直接関係のある重要な文献を記載すること。これらの文献は、本文中文字の右肩に番号〔1〕，〔1〕－〔3〕を付し，それらを本文の最後にまとめること。
  - 2)引用文献の書式として雑誌の場合は，著者名，標題，雑誌名，巻，号（または発行月，あるいは号及び発行月），開始ページ～終了ページ，年を，また単行本の場合は，著者名，書名，ページ，発行所，発行年を記すこと。
- (10)付録  
数式の誘導，実験装置などの詳細な説明が必要な場合には，付録とする。
- (11)その他

(最新改正：平成18年12月20日，広報委員会決定 平成19年4月1日施行)

## 工学ジャーナル投稿原稿の見本\*

<1行分あける。>

### A Sample of Manuscript of Submitted Paper to Journal of Engineering

<2行分あける。>

愛媛工学\*\*

<1行分あける。>

Kougaku EHIME\*\*

<1行分あける。>

Abstract: All manuscripts must be produced clearly on good quality plain white A4-size(297mm×210mm) sheets, and accurately within the dimensions as shown on these pages. Manuscripts should be submitted in camera-ready style for the screening and publication. The manuscript is accepted for publication after the format check of the editorial board. Thus, the authors are asked to read these instructions carefully for quicker acceptance of your manuscript. The printer should be a laser/jet, but dot -printers are unacceptable.

<1行分あける。>

*Key words*: Original paper, Guideline for manuscript

<2行分あける。>

## 1. 緒言

<1行分あける。>

工学ジャーナルは、工学部教職員及び外部投稿者による、工学関係の独創的で、かつ優れた学術研究の成果を広く公表することを目的として刊行される。具体的には、従来の工学部紀要を改革し、2に記す論文を中心に編集する。

<1行分あける。>

## 2. 投稿論文

論文は、指定投稿論文及び一般投稿論文とする。

### 2.1 指定投稿論文

指定投稿論文は、原則として次のいずれかでなければならない。

- (1) 工学部教官が学協会による学会賞等を受賞した研究業績をまとめたもの
- (2) 工学部教官が学協会の季刊誌に記述した、先端的研究に関する解説、総説等の内容を強化したもの(ただし、著作権に関しては、執筆者が事前に学協会の承認を得ていること)
- (3) 学生等が学生対象の学協会の学会賞等を受賞した業績を指導教員がまとめたもの
- (4) 各学科が推薦する論文
- (5) 前年度の退職教員による学術研究に関する論文
- (6) その他、編集委員会で認めたもの

### 2.2 一般投稿論文

一般投稿論文は、独創的でアイデアに富む未発表のもの、国際会議の招待講演、国内学会の基調

\* ○△学会会誌 第○○巻 第○○号 (2000)pp.△△-○○ 工学ジャーナル投稿原稿より引用

\*\* 松山市文京町3 愛媛大学工学部 ○○学科

\*\* Department of Mechanical Engineering, Ehime University, Matsuyama, Japan. E-mail

原稿受理 平成 年 月 日

講演, 学術交流協定に基づく国際シンポジウムでの講演等をまとめたものとする。

### 3. 原稿の執筆上の注意

原稿の書き方は, 投稿規程および原稿執筆上の規約に従う。第1ページおよび図などは本ページに示す見本を参照する。ページは左右に25mm, 上20mm, 下30mmの margins をとり, 1段組とする。論文および資料の場合, 次の事項を番号順に必ず記載する。

- (1) 和文題名 (14 ポイント)
- (2) 英文題名 (14 ポイント)
- (3) 和文著者名 (12 ポイント)
- (4) 英文著者名 (12 ポイント)
- (5) 英文要旨 (10 ポイント)
- (6) 英文キーワード (10 ポイント)

指定投稿論文で既に掲載された学協会名等を示す必要がある場合, 前ページ例を参照すること。

本文 (10 ポイント) は, 見本のように上記(1)~(6)を記述した後に, 1行空けて書き始める。

図, 表および写真は, 見本のように用紙にそのまま貼り込み, 本文中の説明と離れない位置に貼り付ける。図・表どうし, あるいは図, 表と本文は1行以上間隔をあけるようにする。カラー写真掲載の場合は, 編集委員会でその必要性が認められた場合に限り掲載することができるが, それに係わる経費は著者負担である。

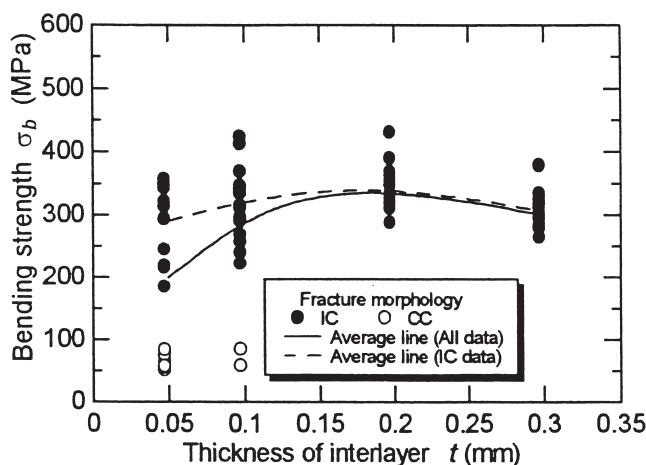


Fig.1. Relationship between interlayer thickness and bending strength.

### 4. 引用文献

#### [1] 「雑誌」

著者名, 標題, 雑誌名, 巻, 号, pp. 開始ページ~終了ページ, 年.

「単行本」

著者名, 書名, ページ, 発行所, 発行年.

#### [2] 参考例

[1] 浦島太郎: 広帯域増幅器, 通信学会誌, 40, 2, pp. 120-125, 1955.

[2] R. P. Feynman: Slow Electrons in a Polar Crystal, Phys. Rev., 97, 3, pp. 660-665, 1955.

または

[3] R. P. Feynman: Slow Electrons in a Polar Crystal, Phys. Rev., 97, pp. 660-665, Mar., 1955.

[4] 田中一郎: 磁性工学, pp.123-135, オーム社, 1966.

[5] J. A. Smith: in "Electricity and Magnetism" pp.300-305, Cambridge University Press, London, 1950.