

# 燧灘海域における WAM 波浪推算の特性について

## SPECIAL FEATURE OF WAM IN HIUCHINADA OFFSHORE

水谷雅裕<sup>1</sup>・佐々木高雄<sup>2</sup>・橋本典明<sup>3</sup>・川口浩二<sup>4</sup>・柴木秀之<sup>5</sup>・鈴山勝之<sup>6</sup>

Miyahiro MIZUTANI, Takao SASAKI, Noriaki HASHIMOTO, Koji KAWAGUCHI,  
Hidenori SHIBAKI and Katsuyuki SUZUYAMA

<sup>1</sup>国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017 高松市番町 1-6-1)

<sup>2</sup>国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (〒760-0017 高松市番町 1-6-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋水理研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋水理研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>5</sup>正会員 工修 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 10-35)

<sup>6</sup>工修 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町 10-35)

Recently, the model of the third generation wave forecasting and hindcasting became highly accurate representing by WAM or SWAN. The forecast accuracy and the feature of them have already been studied at several locations in Japanese coast. However, these study points are located facing to open sea and only two or three typical anomalous weather conditions were studied. WAM has a lot of actual result of open sea wave forecasting and hindcasting though, there is not enough reports for such applications in inner bay water. This report explains the feature for forecast and hindcasting of WAM in inner bay water by adopting WAM calculation for 124 examples of anomalous weather during 49 years from 1952 through 2000 at MISHIMA-KAWANOE port located at HIUCHINADA offshore.

**Key Words :** WAM, wave forecasting and hindcasting, limiter, HIUCHINADA

### 1. はじめに

現在, 港湾施設の設計の資料を得ることを目的とした, 広域の波浪推算を行う場合, 代表的な波浪推算モデルとして, 第一世代波浪推算モデル MR が用いられることが一般的である。近年, WAM や SWAN に代表される, 第三世代波浪推算モデルの高精度化が進み, 日本沿岸の幾つかの地点において, その推算精度および特性の検討が行われている<sup>1),2)</sup>。しかしながら, これらの検討は, 外洋に面した地点で, 代表的な 2~3 の気象擾乱について行われているものが多い。また, WAM は, 外洋波浪推算においては多くの実績<sup>3)</sup>を持つが, 内湾域の使用例はあまり報告されていない。このような現状の中, 全国に先駆けて燧灘海域に位置する「三島川之江港の設計波算定調査」のために WAM を用いた波浪推算を行った。

本論文では, 内湾域である燧灘海域において, 1952年から2000年までの49年間, 124の気象擾乱を対象に, WAM による波浪推算を行った結果明らかと

なった, 内湾域における WAM の推算特性を示すことで, 今後数多く行われると考えられる WAM による波浪推算調査に資することを目的とする。

### 2. 燧灘海域における気象・海象観測データ

表-1 は, 燧灘海域において, 風および波浪の観測を行っている気象・海象観測地点の諸元を表す。風観測は, 馬島・今治港・下津井・備讃瀬戸の4地点, 波浪観測は, 今治港の1地点で行われている。

表-1 燧灘海域の気象・海象観測地点の諸元

観測諸元	地点名	観測期間	観測高度(m)	観測間隔
風向・風速	馬島	1989年5月~1997年1月	T.P.+96.23	3時間毎
	今治港	1991年1月~2002年2月	T.P.+25.30	1時間毎
	下津井	1990年11月~2002年3月	T.P.+62.50	1日毎
	備讃瀬戸	1990年11月~2002年3月	T.P.+102.0	1日毎
波浪	今治港	1985年11月~1991年3月	-26.0	1時間毎

図-1 は, 表-1 に示した燧灘海域の気象・海象観測地点の位置を●印で表すものである。

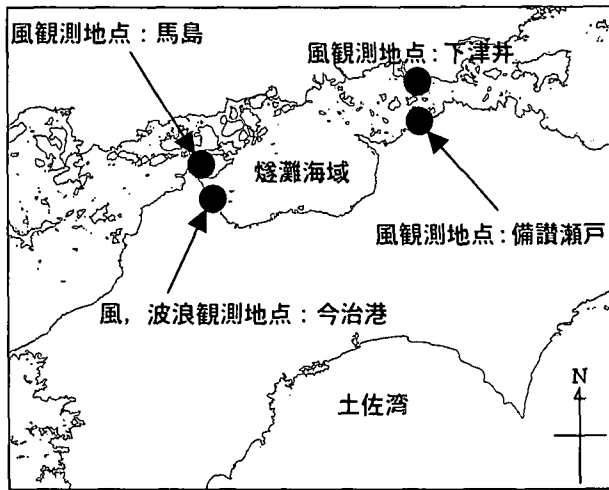


図-1 気象・波浪観測地点位置図

### 3. 気象擾乱の選定

選定した気象擾乱は、同海域を対象に、①昭和 57 年および平成 7 年に行われた既往調査時に選定された、1952 年～1981 年の 30 年間の気象擾乱と、②簡易的な波浪推算法である、パラメータ型波浪推算法の推算結果を用いて新たに選定した、1982 年～2000 年の 19 年間の気象擾乱をあわせた、49 年間 124 擾乱である。

波浪推算の外力条件となる海上風の推算は、1 日 4 時刻 (3 時, 9 時, 15 時, 21 時) のアジア太平洋天気図中の等圧線を、デジタイザーを用いて読み込み、スプライン補間により平面的な気圧データにした結果を用いて行う。なお、3 時, 9 時, 15 時, 21 時の各時刻間の気圧データは、4 時刻の気圧データを用いた時間内挿により補間を行う。

### 4. 外力条件の設定

#### (1) 気圧と海上風のモデル化

波浪推算に用いる海上風すなわち海面上 10m 高度の風推算には、台風影響圏内と圏外の気圧を滑らかに接続する台風・傾度風ハイブリッドモデルと、自由大気の流れを海上風へ変換する、風速と緯度に依存する補正が可能な、境界層モデルを適用する。

本論文における台風・傾度風ハイブリッドモデルと境界層モデルによる計算は、後藤・柴木 (1993) にならう。

#### (2) 推算海上風の検証

推算された海上風と観測風の比較を行い、推算海上風の検証を行う。燧灘海域では、表-1 および図-1 に示した、4 地点において風観測が行われている。観測風と推算海上風の比較を行う場合、推算海上風が 10m 高度の風であることから、観測風も 10m 高度の風に変換する必要がある。観測風を 10m 高度の

風 ( $U_{10}$ ) に変換するために、表-1 中に示した観測高度 ( $h$ ) を用いて  $1/7$  乗則 ( $U_{10} = (10.0/h)^{1/7}$ ) による高度補正を行う。図-2 は 10m 高度に変換した観測風と推算海上風を用いた、馬島・今治港・下津井・備讃瀬戸の 4 地点における観測風と推算海上風の相関解析結果を表す。図では、風向の系統別に、左図に N 系および S 系の相関解析結果を、右図に E 系および W 系の相関解析結果を示している。図中の●印は N 系, E 系の関係を、○印は E 系, W 系の関係を表し、それぞれの回帰直線を回帰式とともに示す。

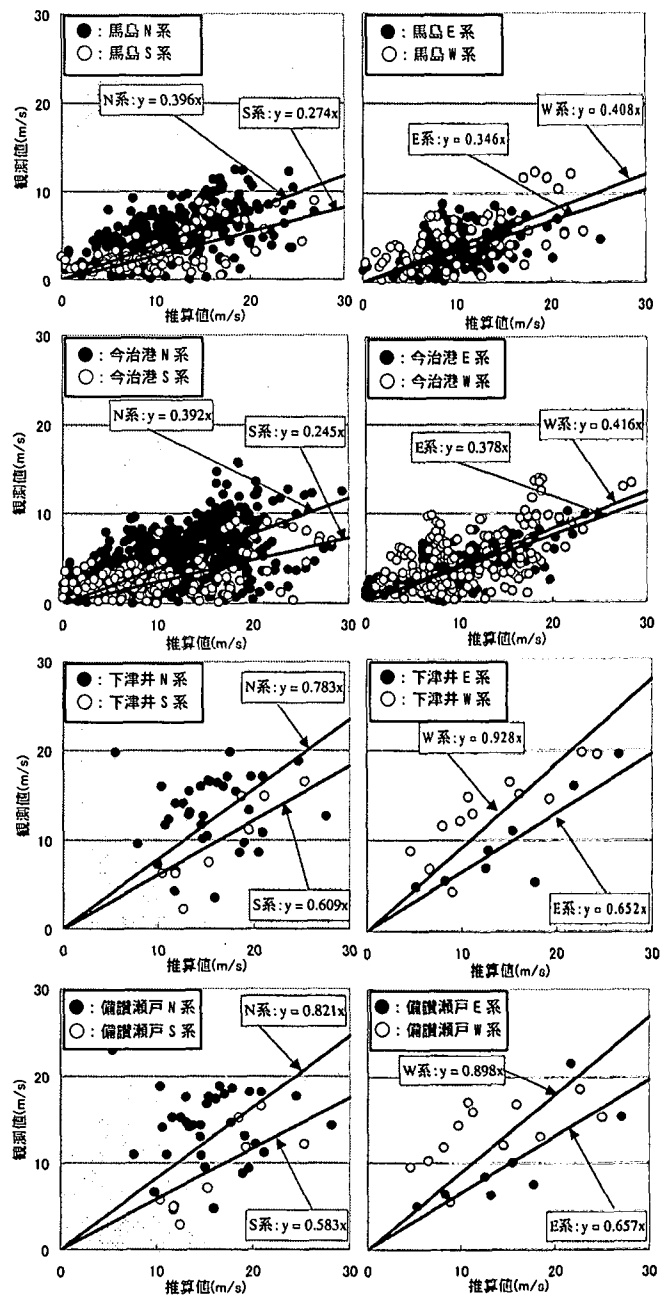


図-2 観測風と推算海上風の比較

図より燧灘海域における観測風と推算風の関係を要約する。馬島および今治港における観測風は、いずれの方位についても推算海上風の 2~4 割程度となり、風速が弱くなっている。このことから、馬島

および今治港の観測風は、地形的な影響を受けている陸上風の特徴が強く現れているデータであると考えられる。また、下津井および備讃瀬戸における観測風は、S系およびE系については、推算海上風の6割程度の風速となり、陸上および地形的な影響により風速が弱くなっている。しかし、W系の風については、回帰係数がいずれも0.9程度となっており、ほぼ推算海上風と同じ風速となる。このことから、下津井および備讃瀬戸のW系の観測風は、海上風に近い風速であると考えられる。

これらの結果から、本論文において使用した観測風は、いずれも地形的な影響を受けた陸上風であると考えられ、推算海上風と比較すると、風速が弱い傾向を示す。ただし、海上風に近い観測データであると考えられる、下津井および備讃瀬戸のW系の風との比較結果から、推算された海上風は、気象擾乱時の燧灘海域における海上風をほぼ精度よく推算していると考えられる。

したがって、本論文では、陸上風と考えられる観測風を用いた推算海上風の補正は行わず、推算海上風をそのまま波浪推算の外力条件として用いることとする。

## 5. WAMを用いた波浪推算

### (1) 波浪推算結果の検証

推算海上風を外力条件として、表-2に表す計算条件による波浪推算を行う。図-3は、波浪推算に用いる計算領域を表し、図中の●印は、表-1に表した、今治港の波浪観測地点位置である。推算結果の検証は、この地点の波浪観測データを用いる。波浪推算には、燧灘海域のような内湾域についても精度よい推算が可能な、WAM(橋本ら, 2003)を用いる。

表-2 波浪推算の計算条件

座標系	球面座標系
格子間隔	1.0' x 1.0' (約1.67km x 1.67km)
空間格子数	45 x 45 = 2,025点
時間ステップ	1分(60秒)
水深データ	深海域と仮定

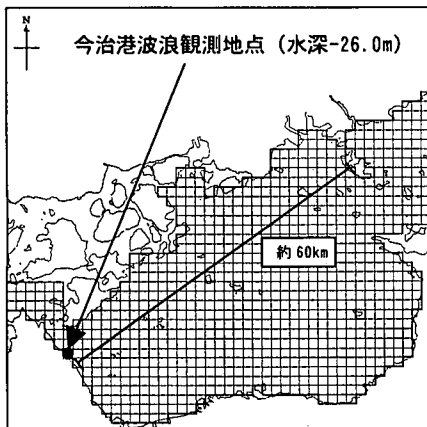


図-3 波浪推算に用いた計算格子と波浪検証地点

図-4は、124擾乱の波浪推算結果から一例を表す。図の上段は、推算海上風の風向、風速の時間変化を表す。図の下段は、推算波向、推算波高(太線)、推算周期(細線)と観測波高(○)、観測周期(△)の時間変化を表す。風向、波向は、基準線に対して上から描かれた線は、風向Nおよび波向Nを表し、時計回りの方向表示となっている。

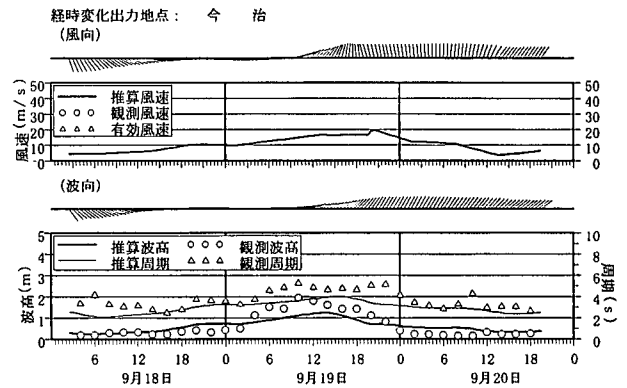


図-4 WAMによる波浪推算結果の一例

図より、観測波高と比較すると、推算波高のピーク値が、若干小さい傾向にあることがわかる。この傾向は、その他の擾乱についても同様に確認できた。本論文に用いた調査は、設計波算定を目的としていることから、波高のピーク値を表現できない波浪推算結果を用いることは、設計上問題となる。

波高のピーク値を表現できない原因として、WAMに組み込まれている、波浪の発達を制御する「リミター」の影響が考えられる。WAMのリミターには、外洋の波浪推算用にチューニングされた、単位時間当たりのエネルギー増分に上限を設ける、デフォルトのリミター(以降、深海リミターと呼ぶ。)とHersbach・Janssen(1999)により提案されたリミター(以降、浅海リミターと呼ぶ。)がある。

図-4に示した波浪推算結果は、深海リミターを用いた結果であるが、そもそも深海リミターは、外洋のような十分長いフェッチのとれる海域に適用するようチューニングされており、燧灘海域のような十分なフェッチがとれない内湾域では、波高を十分に発達させることができないと考えられる。このような深海リミターの影響により、図-4では、波高のピーク値が若干小さい傾向になると考えられる。

そこで、WAMのもう一つのリミターである、浅海リミターを用いた波浪推算を行い、リミターの相違による波浪推算結果の比較を行う。図-5は、上段に、図-4と同じ深海リミターを用いた波浪推算結果を、下段に、浅海リミターを用いた波浪推算結果を表す。図より、WAMを用いた波浪推算では、リミターの違いにより、波浪の発達傾向および波高のピーク値に違いがあることがわかる。

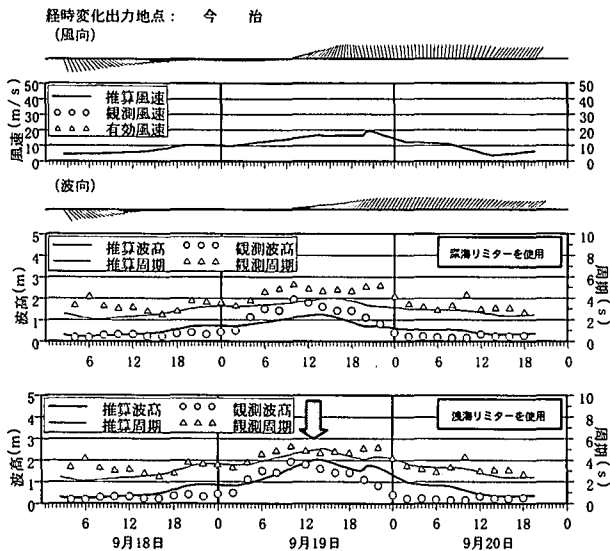


図-5 リミターの相違による波浪発達の違い

深海リミターの場合、波高のピーク値は、若干小さい傾向にあるが、浅海リミターの場合は、波高ピーク値を精度よく推算していることがわかる。また、周期についても、深海リミターで若干小さく推算される周期が、浅海リミターでは、観測値とよい一致を示している。これらの結果から、燧灘海域のように十分長いフェッチのとれない内湾域では、浅海リミターを用いた波浪推算が、深海リミターを用いた波浪推算より、良好な結果が得られることが確認できた。したがって、本論文で対象とする124気象擾乱について、浅海リミターを用いた波浪推算を行う。

## (2) 波浪推算時の問題点

現在までの研究および実務において、124擾乱もの大量の気象擾乱を対象として、WAM波浪推算を行った事例は少ない。したがって、一般的な対処方法が明らかになっていない問題が発生する場合がある。本論文では、ある擾乱において、浅海リミターの影響によると考えられる、波浪が急激に発達しすぎるといった問題が発生した。図-6は、その一例として、問題が発生した擾乱の波浪推算結果を表す。図の上段に、比較のための深海リミターによる波浪推算結果を、下段に、問題が発生した浅海リミターによる波浪推算結果を表す。図より、深海リミターの場合は、その影響により波高のピーク値が若干小さくなるものの、観測値と良い一致が得られる。それに対し、浅海リミターによる波浪推算結果は、ピーク時で推算波高が観測波高の1.8倍程度となり、周期についても観測値より若干長くなる傾向がある。この原因として以下のような考え方ができる。

燧灘海域の地形的な特徴として、図-3からもわかるように、内湾域であるが、今治港に対するN系およびE系などの開いた方位では、波浪を十分に発達させるだけの長いフェッチがあることが挙げられる。

これにより、フェッチの長い方向に、ある程度の風速が発生する場合、浅海リミターを使用することで、波浪が発達しすぎる傾向になると考えられる。

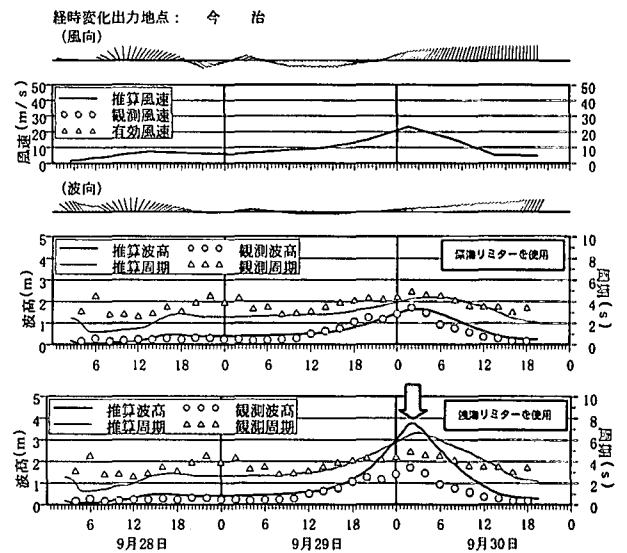


図-6 浅海リミターによる波浪の急激な発達

図-6に示した擾乱の波浪も、NE~ENE方向の波向であり、今治港においてフェッチが長くなる波浪であることから、浅海リミターの影響により、波浪が若干発達しすぎた結果であると考えられる。現在のところ、このような問題を解決するための一般的な対処法は提案されていない。本論文では、124擾乱の推算結果より、経験的に波浪が異常に発達しすぎる、風速27m/sを1つの基準として、これ以上の風速が発生する擾乱では、波浪の発達を抑えるために、深海リミターによる波浪推算結果を用いることとした。図-7は、WAMによる波浪推算結果の検証のために、代表的な20の気象擾乱について、波高のピーク値とその波高が発生した時の周期について、観測値と推算値の比較を行ったものである。観測値は今治港における波浪観測値を、推算値は今治港を対象とした波浪変形計算結果を用い、各波向の沿岸係数により換算を行った値を用いる。

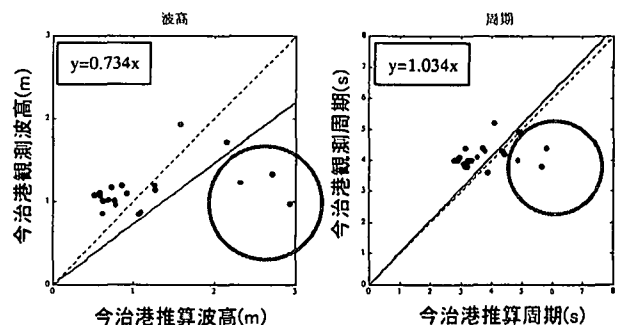


図-7 今治港における観測値と推算値の比較

図より、波高については推算値が観測値の約1.4

倍程度、周期については推算値と観測値はほぼ同程度の値となる。ここで、図中の○で囲んだ3擾乱の波高値については、浅海リミターの影響により、推算値が観測値を若干上回る傾向にあるが、これら3擾乱を除いた、観測波高と推算波高の最大値および周期はよい一致を示す。この比較結果より、WAMの内湾域における推算精度が良好であることが確認できる。本論文では、経験的に風速 27m/s を一つの基準として、深海、浅海の2種類のリミターを併用することで、便宜的に波浪の発達を抑える制御を行っているが、図-7に示したように、この基準を満足しない、風速 27m/s 未満の擾乱においても、浅海リミターの影響と考えられる波高の発達が見られる。

したがって、このような波高の発達を制御する一般的な手法の検討が、今後必要になると考えられる。

## 6. WAMを用いた常時波浪推算

鉄筋コンクリート構造物の部材の安全性の検討は、限界状態設計法によることが標準とされている。限界状態設計法による部材の安全性の検討は、終局限界状態、使用限界状態および疲労限界状態について行われるが、使用限界状態および疲労限界状態の検討には、頻度表作成のため、長期間の波高と周期のデータが必要になる。一般的にこのような検討を行う場合、長期間にわたる波浪観測データが必要不可欠であるが、燧灘海域には、そのような波浪観測地点は存在しない。このような場合、常時波浪推算を行うことで、長期間の波高と周期のデータが入手可能となる。本論文では、燧灘海域を対象にして、WAMを用いた1991年～2000年の10年間の常時波浪推算を行い、観測値との比較により推算値の妥当性の検討を行う。

### (1) 外力条件の設定

常時波浪推算の外力条件の設定は、気象擾乱毎に波浪推算を行う、異常時波浪推算の外力条件の設定方法と大きく異なる。常時波浪推算は10年間という長期間の連続した波浪推算を行うため、異常時波浪推算時のように、天気図から気圧データを作成することで、海上風を推算することは不可能である。そこで、燧灘海域において取得されている観測風を海上風相当の風に変換し、その風が燧灘海域全域で風向・風速ともに様に分布すると仮定した海上風の設定を行う。図-8は、海上風の設定方法を模式的に表す。図中の●印は、波浪観測地点である今治港の位置を表す。燧灘海域で取得されている観測風を用いて、常時波浪推算を行う場合の外力条件となる海上風(10m高度風)の設定を行う。表-1および図-1に表す燧灘海域の風観測地点において、10年以上風観測が行われている地点は、今治港・下津井・備讃瀬戸の3地点である。したがって、この3地点の観

測風を用いて常時波浪推算に用いる海上風の設定を行う。以下の①～⑤に設定手順を示す。

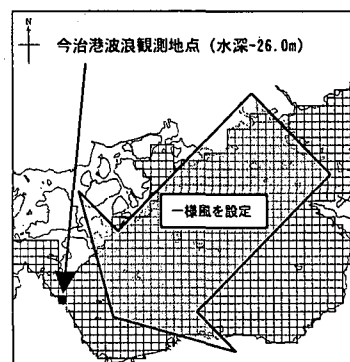


図-8 常時波浪推算時の海上風の設定方法模式図

- ①図-2に示したように、海上風相当の風速が観測されている地点は、下津井および備讃瀬戸の2地点であり、これらの観測風を用いて海上風の設定を行うことが適切である。
- ②表-1に表したように、下津井および備讃瀬戸の2地点では、1日1観測、日最大風速のみが取得されており、長期間の連続した波浪推算の外力条件として用いることは不適切である。
- ③表-1に表したように、今治港では毎時の風速が取得されており、この観測風を用いることで長期間の連続した波浪推算が可能となる。
- ④図-2に示したように、今治港の観測風は、地形の影響を受けた陸上風であると考えられるため、この観測風をそのまま用いることは適切でない。
- ⑤陸上風と考えられる今治港の観測風と、海上風相当と考えられる備讃瀬戸の観測風の系統別相関解析を行う。相関解析に用いる観測風は、1/7乗則により10m高度風に補正を行ったものを用いる。図-9に相関解析結果を示す。

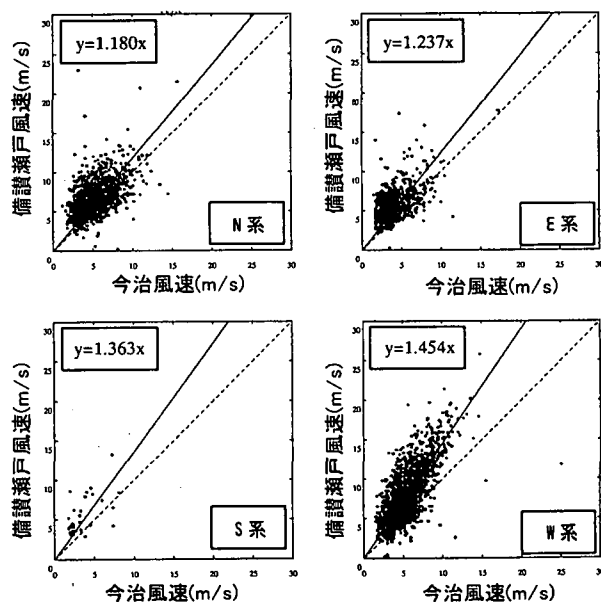


図-9 今治港の観測風と備讃瀬戸の観測風を用いた系統別相関解析結果

図-9の相関解析結果より、系統別に算定される回帰係数を今治港の観測風に乗じ、備讃瀬戸相当の風に変換する。さらに、図-2に示した、備讃瀬戸の観測風と推算海上風の相関解析による回帰係数を乗ずることで、今治港の観測風を海上風相当の風に変換する。

## (2) 外力条件の検証

外力条件の設定の違いが波浪推算結果に及ぼす影響を検討する。検討には、天気図を用いて海上風の設定を行った異常時波浪推算結果と、観測風を海上風相当の風に変換し対象海域に一樣に分布させる設定を行った常時波浪推算結果を用いる。図-10は、異常時と常時の波浪推算結果を用い、同一擾乱期間内の波高の極値とそれに対する周期の比較を表す。図より、外力条件の設定の異なる2つの波浪推算結果は、若干のばらつきはあるものの、ほぼ同一の傾向にあることが確認できる。この結果から、観測風を用いた外力条件の設定方法の妥当性が確認できた。

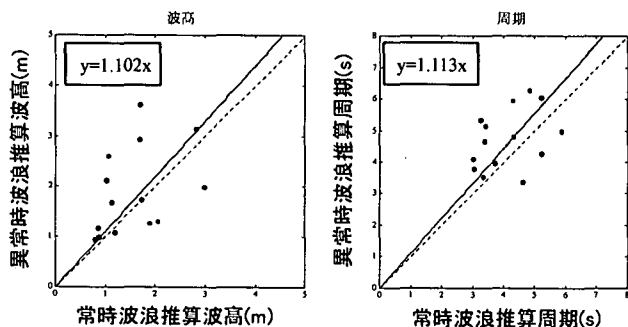


図-10 異常時波浪推算結果と常時波浪推算結果の極値の比較

## (3) 常時波浪推算結果の検証

設定した海上風を用いて燧灘海域を対象にした10年間の常時波浪推算を行い、観測値と比較することで、推算値の妥当性の検討を行う。常時波浪推算においても、風速27m/sを基準として、深海、浅海の2種類のリミターを併用する。表-1に示したように、今治港で波浪観測と風観測が同時に行われていた1991年1月～3月において、波浪観測結果と常時波浪推算結果の比較が可能となる。今治港の波浪観測では、波向の観測は行われていなかったため波向別の比較はできなかった。また、波高0.25m以下の静穏値と考えられるデータは比較対象外とする。

図-11は、2時間毎に観測された有義波高および有義波周期と、各時間に対応した推算波高および推算周期の比較結果を表す。図より波高に関しては、推算値が観測値の約2.0倍程度になっており、周期に関しては、ほぼ同じ値となっている。図中の○で囲った箇所は、浅海リミターによる波浪の発達の影響が現れていると考えられる推算値であり、これらを適切に処理することで、観測値と推算値はより良い

一致を示すと考えられる。

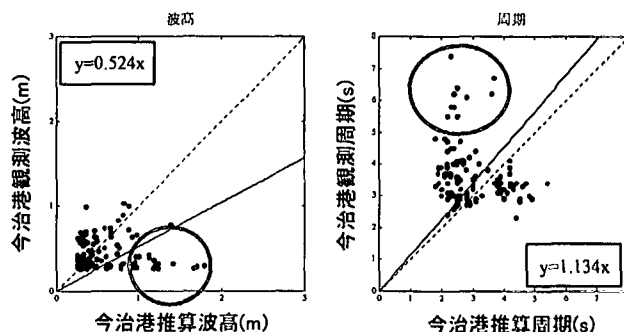


図-11 今治港における波浪観測結果と常時波浪推算結果の比較

## 7. まとめ

- ①観測値との比較により、燧灘海域におけるWAMの推算精度が確認された。また、リミターの違いにより波浪の発達に違いがあることが確認できた。
- ②浅海リミターにより、波浪が発達しすぎる問題点の対処方法として、風速27m/sを1つの基準とする方法を用いたが、現在のところ、一般的な対処法は提案されていない。
- ③海上風相当の風に補正した、今治港の観測風を用いて、1991年～2000年の10年間の常時波浪推算を行った。その結果、浅海リミターの影響と考えられる波浪の発達はあるものの、概ね観測値と良い一致を示した。
- ④燧灘海域を対象とした波浪推算結果より、外洋のみならず、内湾域においてもWAMを用いた波浪推算が有用であることが確認できた。

## 参考文献

- 1)橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦(1999):第3世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討,港湾技術研究所報告,第38巻,第4号,p.3-47.
- 2)川口浩二・橋本典明・永井紀彦・久高将信(2001):ECMWF風データとWAMに基づく日本沿岸波浪の推算精度に関する検討,海岸工学論文集,第48巻,p.121-146.
- 3)川口浩二・橋本典明・鈴山勝之(2002):波浪推算値に基づく日本沿岸波浪の出現特性について,海岸工学論文集,第49巻,p.216-220
- 4)後藤智明・柴木秀之(1993):陸上地形の影響を考慮した海上風推算,港湾技術研究所報告,第32巻,第3号,p.65-97.
- 5)Hersbach,H. and P.A.E.M.Janssen(1999):Improvement of the short fetch behavior in the WAM model,J.Atmospheric and Oceanic Technology,16,pp884-892.
- 6)橋本典明(2001):高精度波浪推算法による沿岸海象の特性解明に向けて,平成13年度港湾空港技術講演会講演集,p.1-27.