

佐渡島近海における海上風および波浪の推算

光田 寧*・藤井 健**・山口 正隆***
平口 博丸****・高本 全徳*****

1. 緒 言

外海に接する内湾や内海あるいは島の背後域を対象とした波浪推算では、まず外海での波浪を推算し、ついで中・狭領域へと計算結果を接続することにより地形による波の遮蔽効果を考慮している。したがって、波浪の推算精度の向上を図るためには、その精度に大きな影響を及ぼす海上風の推算に対しても地形特性を考慮する必要がある。

海上風の推算法には (i) 天気図解析法に基づく方法、(ii) 台風や低気圧のモデル化による方法、(iii) 実測風を平面的に内挿する方法、などがある。地形的な影響の強い領域には一般に (iii) の方法が望ましいが、この方法は対象海域を覆う多数の観測データを必要とするため、任意の海域に適用できるとは限らない。これに対し、観測データの不足を物理モデルを用いて補うことにより、より現実に近い気流分布を求める方法として MASCON モデル¹⁾ (Mass Consistent Atmospheric Flux Model) がある。Dickerson はこのモデルを光化学汚染解析に応用しているが、狭領域内の海上風の推定に対してもこれが適用可能だと考えられる。

そこで、本研究では佐渡島を含む能登半島から男鹿半島に至る日本海沿岸の狭領域を対象として、まず沿岸各地での風観測データを用いて領域内の海上風を MASCON モデルにより推算し、そのモデルの適用に際しての問題点を明らかにする。ついで推算風を入力として波浪の推算を行い、波浪の観測値との比較から MASCON モデルおよび波浪の予知モデルの適用性について検討する。

2. 海上風の推算法

2.1 MASCON モデル

MASCON モデルとは、Sasaki^{2),3)} により提案された変分最小二乗法による気流計算モデルであり、物理モデル

(質量保存則) を満たしつつ、観測データに含まれる情報を最大限に取り込もうとするモデルである。MASCON モデルは次式で表現される。

$$I = \int_x \int_y \left\{ \alpha_1^2 (u - \bar{u})^2 + \alpha_2^2 (v - \bar{v})^2 + \alpha_3^2 (w_h - \bar{w}_h)^2 + \lambda \left[\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + w_h \right] \right\} dx dy \quad \cdots (1)$$

ここに、 $h = H_{\text{inv}} - H_s$ は地表面から逆転層までの高さ、 H_{inv} は逆転層の海拔高度、 H_s は地表面の海拔高度、 u , $\bar{u}$, v および $\bar{v}$ は水平方向の風速成分、 w_h と $\bar{w}_h$ は逆転層を上方に抜ける風速成分、 α_1 と α_2 は観測誤差や気象条件に関する重み係数、 λ はラグランジュ乗数である。なお風速で“ $\sim$ ”を付したものは観測値、付さないものは補正後の値である。また、水平風速は地表から逆転層までの平均風速と考える。

式 (1) の右辺は、観測値と補正值との二乗誤差および質量保存則とから成る。この汎関数 I を最小にすることにより、観測値と補正值との誤差および質量保存則の残差が最小となるような風速および λ が求められる。

u , v , w_h , λ に関する式 (1) の変分を取り 0 にすると次式が得られる。

$$u = \bar{u} + (h/2\alpha_1^2)(\partial\lambda/\partial x) \quad \cdots (2)$$

$$v = \bar{v} + (h/2\alpha_2^2)(\partial\lambda/\partial y) \quad \cdots (3)$$

$$w_h = \bar{w}_h - (\lambda/2\alpha_3^2) \quad \cdots (4)$$

$$\partial(hu)/\partial x + \partial(hv)/\partial y + w_h = 0 \quad \cdots (5)$$

$$x \text{ の境界において } \lambda = 0 \text{ または } \partial u = 0 \quad \cdots (6)$$

$$y \text{ の境界において } \lambda = 0 \text{ または } \partial v = 0 \quad \cdots (7)$$

したがって、境界条件 (6), (7) のもとに式 (2)~(5) を連立して解くことにより、風速 u , v , w_h および λ が求められる。

なお、MASCON モデルでは気流分布を格子点上で計算するため、気流分布の初期値を格子点で与える必要がある。これには式 (8) で表わされる Dickerson⁴⁾ の内挿式を用いて風速観測データを格子点上に内挿する。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N a_i \cdot \exp(-\beta r_i^2)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\beta r_i^2)} \quad \cdots (8)$$

ここに、 A は内挿された風速のベクトル成分、 a_i は観

* 理博 京都大学教授 防災研究所

** 理修 京都産業大学教授 教養部

*** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

**** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木研究所 環境部

***** 工修 (株)東電設計 土木本部

測点 i の風速成分, r_i は格子点から観測点 i までの距離, N は内挿に使用する近傍観測点数, β は内挿ファクターである。

2.2 計算条件

海上風の計算領域 (約 $440 \text{ km} \times 125 \text{ km}$) および計算格子網を 図-1 に示す。格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 4.85 \text{ km}$ であり, 各格子点での標高 H_s は 20 万分の 1 の地勢図より読み取る。図中の “●” および “○” はあらかじめ広領域計算において天気図から Bijvoet の方法により海上風が推算されている点であることを示し, 特に “●” 印はその推算風を MASCON モデルの風観測データとして入力する地点である。

つぎに, MASCON モデルの計算には必要なパラメータは以下のように設定した。すなわち, 逆転層高度 H_{inv} は通常の気象観測では得られないため, 今回の計算では気流計算を行う領域の上限高度と考え, 領域内の最高標高値より若干大きな値を設定した。また, 気流補正計算の重み係数 α_1, α_2 は大気安定度に関係しているが, その関係は定性的にしか明らかにされていないため, 今回の計算では一定値を与えた。結局, 各々のパラメータは以下のものである。

$$H_{inv} = 2100 \text{ m}$$

$$\alpha_1 = 1, \quad \alpha_2 = 100$$

一方, 初期値の内挿式 (8) に必要なパラメータ N および β は次のように設定する。

$$N = 5, \quad \beta = 10^{-10}$$

3. 波浪の推算法

3.1 数値予知モデル

本研究に使用した波浪の数値予知モデルは, 山口・土屋により提案されたエネルギー平衡方程式に基づく予知モデルに若干の改良を加えたもの⁹⁾である。主な改良点は風波の発達に関する Miles 機構の評価式として Barnett の提案式を採用した点にある。これにより, 風速が 20 m/sec を越える場合でも波は比較的緩やかに発達し, 従来見られたような急激な波高の増大は見られなくなる。

3.2 計算条件

波浪の推算領域および計算格子網を 図-2 に示す。図中の “●” は広領域の計算格子点を, 太い実線は陸地境界を表わす。同図のように境界を設定すると, 佐渡島背後領域では方向分散法と同程度の遮蔽効果が得られる。ただし, 方向分散法による結果の妥当性については今後検討する必要がある。

計算条件は以下のものである。格子間隔 Δx は海上風の計算に用いた格子間隔の 2 倍とする。また, 周波数は $0.05 \sim 1.0 \text{ Hz}$ の区間を対数軸上で 20 等分割, 方向分割は全方位を 24 等分割 ($\Delta\theta = 15^\circ$), 計算時間間隔は $\Delta t = 6.4 \text{ min}$ とする。

広領域と狭領域との接続境界は以下のように処理する。図-2 の B1~B2 の区間は, 広領域で計算された方向スペクトルを時間・空間に関して線形補間し, 接続境界での入力データとする。一方, B1 地点から能登半島および B2 地点から男鹿半島に至る区間は, 各々 B1, B2 での方向スペクトル値をそのまま用い, 空間に関する補間を行わない。なお, 領域内でのエネルギーの伝播計算には Fromm のゼロ平均位相誤差法を用いるが, 接続境界および陸地境界上では第 1 次風上差分法を用いて完全消波とする。

4. 推算結果および考察

4.1 海上風

推算の 1 例として, 1980 年 12 月 23 日~25 日の検討結果について以下に詳述する。

(1) 気象概況

22 日 9 時に黄海にあった低気圧は東進して日本海に入り, 29 日

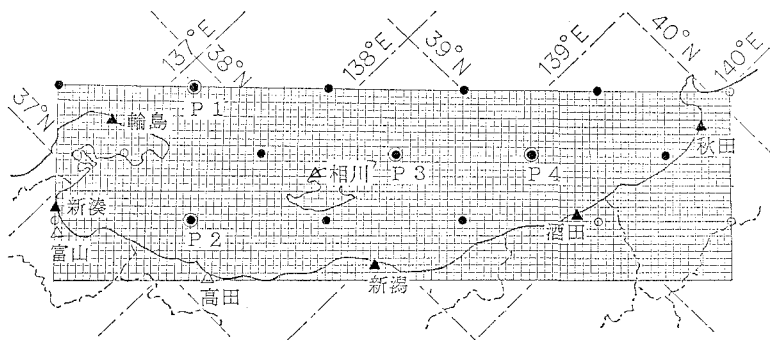


図-1 海上風の計算領域と計算格子

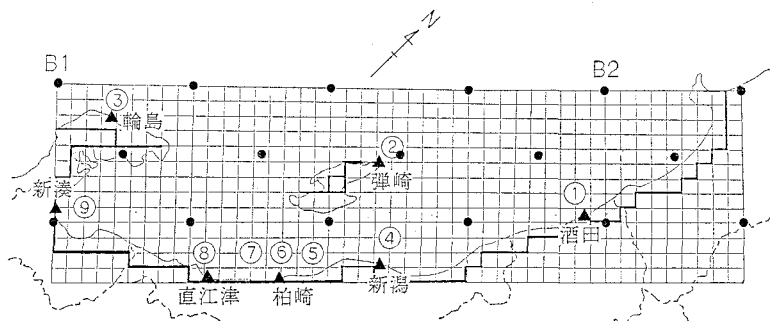


図-2 波浪の計算領域と計算格子

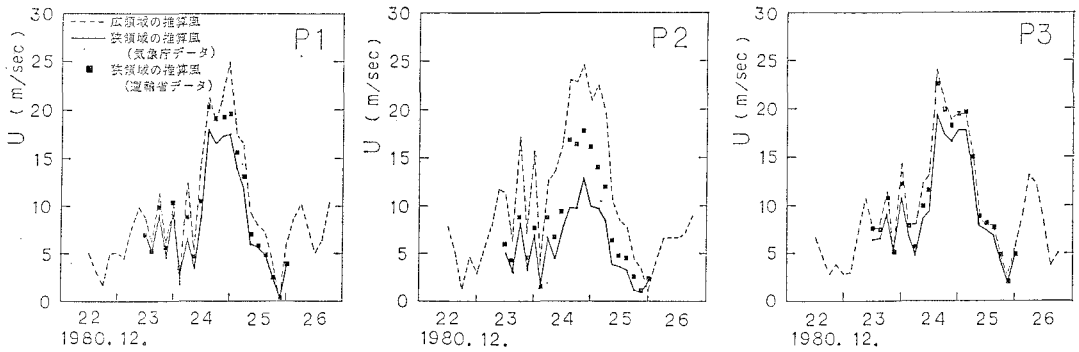


図-3 MASCON モデルによる海上風の推算結果

の昼前に佐渡島近海に達した。この低気圧はその後東進を続けて太平洋へ抜け、日本列島の南岸を進んで来た低気圧と金華山沖で一体となり 972 mb にまで発達した、このため佐渡島近海には 24 日 9 時頃から E 寄りの風が吹き始め、NE~N の風が 25 日朝まで続いた。

(2) 気象庁の風データを用いた場合

MASCON モデルへの入力風観測データとして、広領域で陸地の影響を全く考慮しないで得られた推算風(図-1 の“●”印の 12 地点)および沿岸における気象庁の地表風観測値(図-1 の“△”と“▲”印の 8 地点)を用い、狭領域内の海上風を推算する。図-1 の P1~P3 地点での推算結果を図-3 に示す。図中の太い実線は MASCON モデルによる推算値、破線は MASCON モデルの入力値として使用された広領域での推算値である。図-3 から明らかなように、MASCON モデルによる推算風は広領域での推算風に比べて 5 m/sec 程度風速が小さく、特に P2 地点では 10 m/sec 以上の差が見られる。この原因としては、市街地にある気象庁のデータを主要な入力データとして用いたため、入力値が海上風に比べて低すぎたことがあげられる。

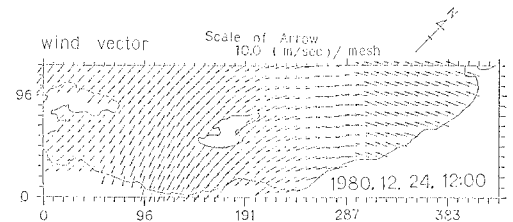
MASCON モデルに用いる風速は地表面から逆転層までの平均風速であることを考えれば、地表の摩擦の影響を受けた気象庁のデータをそのまま入力データに使用する事は適切ではないと言えよう。

(3) 港湾局の風データを用いた場合

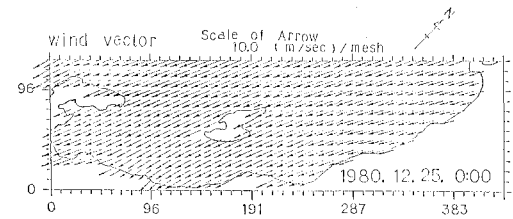
MASCON モデルの入力風観測データとして、気象庁のデータの代りに運輸省港湾局観測点のデータを使用した場合について検討する。データとしては図-1 の“▲”で示した 5 地点のものを使用する。

推算結果の一例として 24 日 12 時および 25 日 0 時の風ベクトル図を図-4 に示す。また、P1~P3 地点での経時変化を図-3 に“■”で示す。

海岸部にある港湾局観測点の風データは市街地にある気象庁のデータに比べて風速が大きく、海上風を比較的良く代表していると考えられる。しかし、MASCON モ



(a) 1980 年 12 月 24 日 12 時



(b) 1980 年 12 月 25 日 0 時

図-4 MASCON モデルによる海上風の推算結果(運輸省港湾局観測点の風データ使用)

デルに港湾局のデータを用いても、P1, P3 地点のように風速はわずかしかならない地域が多い。これは、入力データとして用いた広領域での推算風が狭領域全体に対して支配的となっているためである。しかし、入力データの選定によりかなりの風速の増加が見られる地域、例えば P2 地点、もあるため、気流分布の初期値設定に際しては十分注意する必要がある。

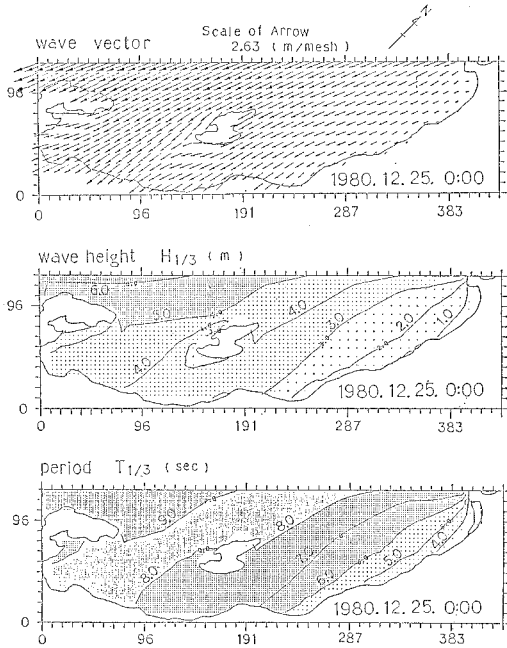
なお、風向に関しては入力データによる相違はあまり見られない。

4.2 波 浪

(1) 推算波浪の状況

港湾局観測点の風データにより推定された海上風を用いて波浪推算を行う。推算結果の 1 例とし、図-4 (b) の海上風に対応する時刻の波浪ベクトル図、波高および周期のコンター図を図-5 に示す。同図より、狭領域のほぼ全域にわたって NNE の波浪が卓越していることが分る。また、佐渡島による波の遮蔽が柏崎から直江津に

至る海域に見られ、波高および主波向が変化する様子がうかがえる。



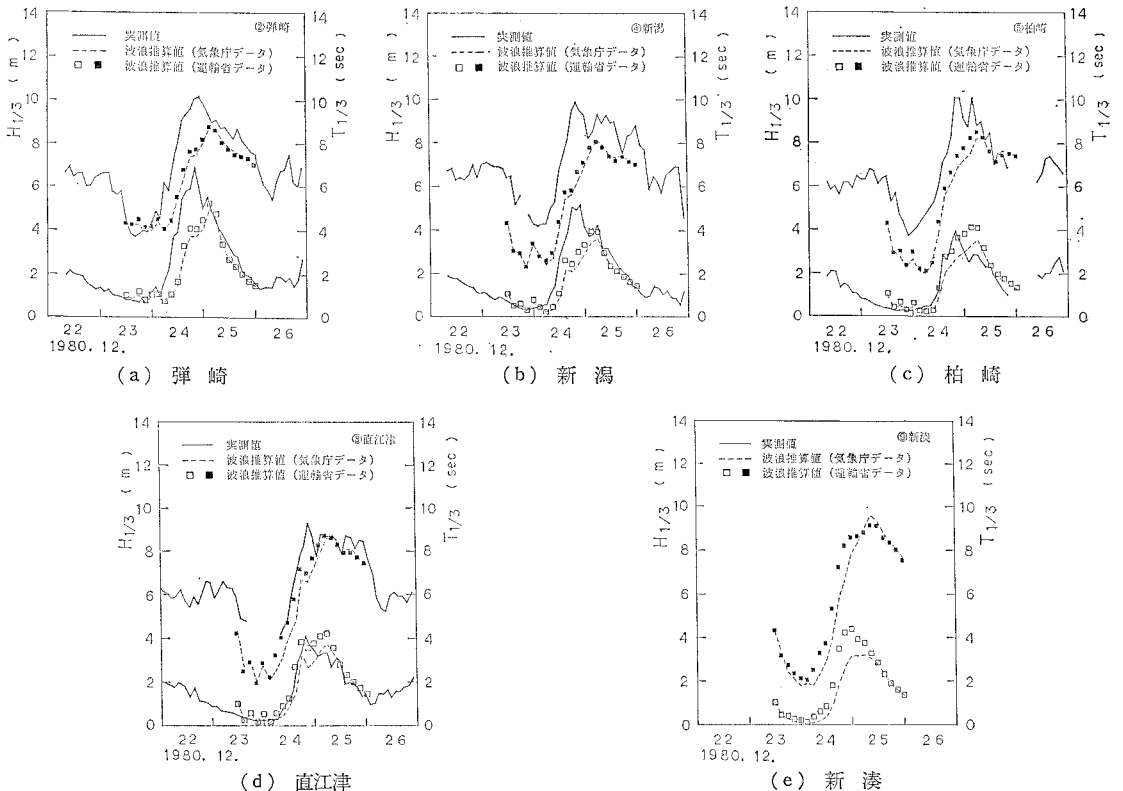
図—5 波浪の推算結果（運輸省港湾局観測点の風データ使用）

(2) 海上風の影響

MASCON モデルに用いる風観測データの相違により、推算風に若干の差が見られるが、ここではこれが波浪推算結果に及ぼす影響について検討する。弾崎、新潟、柏崎、直江津および新湊における波浪の推算結果を図—6 に示す。図中の実線は実測値、破線は気象庁の風データによる海上風推算値を用いた推算結果、また“□”および“■”は港湾局のデータを用いた時の波浪推算結果であることを示す。各地点ともに推算波高値は港湾局のデータを用いた方が大きく、気象庁のデータ使用時に比べて波高にして 30~60 cm の増加が見られる。海上風推算時に問題となった P2 地点に近い新湊では、推算波高の差が 1 m 以上にも達している。

(3) 実測値との比較

弾崎や新潟をはじめとする実測データには、24 日夜と 25 日早朝に波高のピークが見られる。波浪推算結果は前者のピークをほとんど再現しないが、後者のピークについては実測値と比較的良好な対応を示している。柏崎の後者のピーク値は推算値よりも 1 m 以上も小さいが、この時の波向は汀線にほぼ平行であるので、屈折変形を考慮すると波浪観測点での波高は沖での波高の 6 割程度に減少してしまう。このことを考慮すれば、港湾局のデータを用いて推算された結果はかなり実測値に近いと言



図—6 波浪の推算値と実測値の経時変化の比較

える。

5. 結 語

本研究では、佐渡島を含む日本海中部沿岸の狭領域を対象とし、海上風および波浪の推算を行い、実測波浪との比較から波浪推算法の適用性について検討した。その結果、狭領域内での波の発達におよぼす海上風の影響を無視できない場合があることを示すとともに、MASCONモデルにより得られた海上風を考慮することにより比較的精度の高い波浪の推算を行えることが分かった。ただし、MASCONモデルの適用に当っては実測データの選定に十分注意する必要がある。また、佐渡島による波の遮蔽が方向分散法で表されるか否かは明らかではないが、今回の検討では推算値と実測値とは比較的良好な対応を示した。

最後に、本研究は東京電力株式会社の協力による波浪予知研究会（代表者：京都大学土屋義人教授）の研究成果の一部であり、終始御指導をいただいた土屋義人教授に感謝する。数値計算に関しては、日本電子計算株式会

社小西章氏の協力を得、また、本研究で用いた風および波浪の観測資料は、関係諸庁の御協力により提供していただいたものであることを明記して、関係者の御協力に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Sasaki, Y.: An objective analysis based on the variational method, Jour. Meteor. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 77~88, 1958.
- 2) Sasaki, Y.: Some basic formalisms in numerical variational analysis, Mon. Wea. Rev., Vol. 98, pp. 875~883, 1970.
- 3) Sasaki, Y.: Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by long-wave equations and low-pass filter, Mon. Wea. Rev., Vol. 98, pp. 884~898, 1970.
- 4) Dickerson, M. H.: MASCON—A mass consistent atmospheric flux model for regions with complex terrain, Jour. Appl. Meteorol., Vol. 17, No. 3, pp. 241~253, 1978.
- 5) 平口博丸・山口正隆・土屋義人：波浪数値予知モデルの日本海への適用，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 139~143, 1985.