

# スプライン関数を用いた天気図解析に基づく 海上風の推定法について

山口正隆\*・畑田佳男\*\*・大福 学\*\*\*・庄司誠一\*\*\*\*

## 1. 緒 言

近年、波浪推算に関する種々の方法が開発され、沿岸域での開発や波浪災害の防止など多方面に利用されている。しかしながら、波浪は風によって生成されることから、海上風を精度よく推定することが波浪の推算精度を向上させるための必須の課題である。

現在、海上風の推定法として、(i) 天気図解析法、(ii) 台風モデル法、(iii) 大気境界層の数値解法、(iv) 実測風の平面内挿法<sup>1)</sup>、(v) マスコンモデル法 (Mass Consistent Model)、などがあげられるが、季節風を対象とした広域的な海上風を推定する場合に多用される方法は (i) の天気図解析法である。天気図解析法として最も簡単な方法は、気圧傾度および等圧線の曲率半径から傾度風を推定し、さらに海上風に変換するものであるが、実際上の手間は膨大であるし、曲率半径の推定に際ししばしば用いられる等圧線の円近似に無理があり、場合によっては 100 m/s を越える風速が推定されるなど気象学的な知識に加え経験と勘がなければ、その推定精度をあげることが難しいなどの問題点を有している。そこで、本研究では、高次の微係数までの連続性が保障されたスプライン関数を導入して等圧線の曲率半径や気圧傾度を推定することにより傾度風やさらに海上風の算出を自動化する方法を提案するとともに、この方法を季節風時における日本海での海上風の推定に適用して、日本海沿岸の風観測点での実測値との比較からその適用性を検討するものである。

## 2. スプライン関数を用いた天気図解析法

### (1) 海上風の推定式

傾度風は気圧傾度力、コリオリ力および遠心力がつりあった状態における風であり、次式で求められる<sup>2)</sup>。

$$V_{gr} = \pm |r| \left( \sqrt{\omega^2 \sin^2 \varphi \pm \frac{|\partial P / \partial r|}{|r| \rho_a}} - \omega \sin \varphi \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $V_{gr}$ : 傾度風速 (m/s)、 $r$ : 等圧線の曲率半径 (m)、 $\omega$ : 地球の回転角速度 ( $=7.29 \times 10^{-5}$  rad/s)、 $\varphi$ : 緯度 (rad)、 $P$ : 気圧 ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) および  $\rho_a$ : 空気の密度 ( $=1.21 \text{ kg/m}^3$ ) であり、式 (1) の '+' は低気圧に、'-' は高気圧に対応する。また、式 (1) は等圧線が曲線の場合であるが、等圧線が直線の場合には、気圧傾度力とコリオリ力がつり合った地衡風となり、次式で与えられる。

$$V_g = \frac{|\partial P / \partial r|}{2 \rho_a \omega \sin \varphi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

海上風は式 (1) あるいは式 (2) で求められた傾度風あるいは地衡風に海上風の変換係数をかけることにより第 1 次近似的に推定される。

$$U = \alpha V_{gr} \text{ or } U = \alpha V_g \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $U$ : 海上風速 (m/s) および  $\alpha$ : 変換係数、である。本研究では、変換係数を緯度別に与えた高橋の値<sup>2)</sup> (北緯  $40^\circ$  に対して 0.67) を採用した。

### (2) スプライン関数を用いた等圧線の曲率半径と気圧傾度の推定

式 (1) から明らかなように、固定された緯度に対して、傾度風を求めるためには、気圧傾度と曲率半径が必要である。従来の方法ではこれらを求めるために、等圧線の各部分を円近似していたが、本研究では等圧線をより適切に表示するために、スプライン関数によって曲線近似する。まず、図-1 に示すように、 $\beta$  を等圧線に対する反時計方向への吹き込み角 (北緯  $40^\circ$  に対して  $17^\circ$  を採用)、 $r$  を高気圧あるいは低気圧中心から外側に向う等圧線の曲率半径とすれば、等圧線パターンは下記の 4 ケースに分類され、等圧線が高気圧に属するのか、低気圧に属するのかを判定できる。

- (i)  $r > 0, \partial P / \partial r > 0$ : 低気圧性,  $\theta_w = \theta + \beta$
- (ii)  $r < 0, \partial P / \partial r < 0$ : 高気圧性,  $\theta_w = \theta + \beta$
- (iii)  $r > 0, \partial P / \partial r < 0$ : 高気圧性,  $\theta_w = \theta - \pi + \beta$
- (iv)  $r < 0, \partial P / \partial r > 0$ : 低気圧性,  $\theta_w = \theta - \pi + \beta$

ここに、 $\theta$ : 等圧線の接線角および  $\theta_w$ : 風向、である。

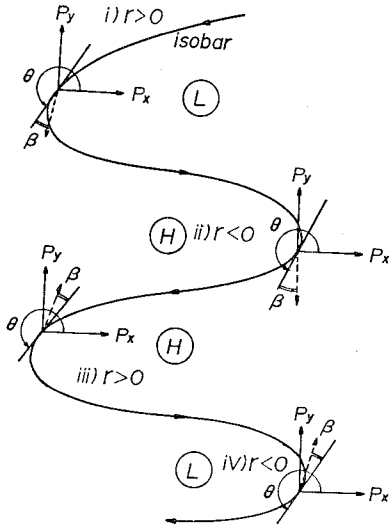
つぎに、等圧線の位置を、ある点を基準点とする等圧線の長さを表わす補助変数  $s$  を用いて次式のようにパラメータ表示する。

\* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

\*\* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科

\*\*\* 愛媛大学技官 工学部海洋工学科

\*\*\*\* 徳津市役所



図一 高気圧・低気圧の判定条件

$$\left. \begin{aligned} x &= f(s), \quad y = g(s) \\ s_1 &= 0 \quad s_i = s_{i-1} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}; \\ &\quad i = 2 \sim N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

等圧線が式(4)によりパラメータ表示されれば、その曲率および接線角はそれぞれ次式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} &= \frac{f'(s)g''(s) - f''(s)g'(s)}{\{f'(s)^2 + g'(s)^2\}^{3/2}} \\ \theta &= \tan^{-1} \left\{ \frac{g'(s)}{f'(s)} \right\}; \quad 0 \leq \theta < 2\pi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、' ' は  $s$  に関する微分を表わす。そして曲率半径は正負をとり、反時計方向の回転に対して正、時計方向の回転に対して負となる。

さて、式(4)のパラメータ表示式を得るために、 $m$  次の B-スプライン関数を用いる。 $m$  次のスプライン関数は  $m-1$  次までの微係数の連続性を保障しており、高次微係数の滑らかな変化を得ることができる。実際上は、曲率半径を求める式(5)がパラメータ  $s$  に関する 2 階の微係数を含んでいるので、この微係数の滑らかな変化を得るため、5 次の B-スプライン関数を用いる。また等圧線には閉じた場合と開いた場合の 2 種類があるので、スプライン関数もそれぞれ周期スプライン関数および非周期スプライン関数を用いてデータ点での 1 次および 2 次の微係数を求める。その場合、必要なデータ数は  $n=m+2$  であるから、具体的には 7 以上である。一方、気圧傾度は、計算領域をおおう正方形格子網上の各格子点に気圧データを線型内挿したのち、まず 3 次の B-スプライン関数を用いて格子点上で気圧傾度の  $x$  および  $y$  成分をもとめ、つぎにこれらを気圧データ点に線

型内挿することにより算出される。なお、曲率半径は各気圧値のデータ点で正負を含み大きく変動するので、曲率半径の正方形点への内挿が精度上難しいことから、風速・風向を求めるにあたり、まず各等圧線上の入力データ点における風速・風向を求めたのちに、対象領域全体をおおった正方形上にそれらを内挿することにした。

### (3) 計算手順

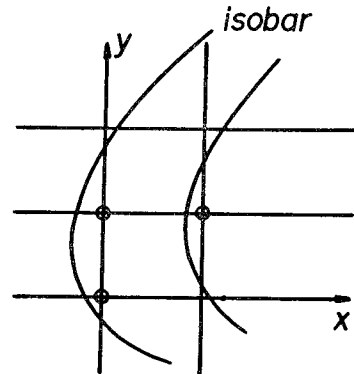
計算手順を箇条書にして示せば、つぎのようである。

i) 極東天気図上にあらかじめ作成しておいた正方形格子をあて、等圧線を写す。本研究では適用例として日本海を取り扱ったので、正方形格子は北緯  $40^\circ$ 、東経  $135^\circ$  の緯線  $1^\circ$  を基準にとり、格子間隔を 85,000 m として作成された。

ii) 各等圧線ごとに格子軸と等圧線との交点の座標をディジタルで反時計方向に読み取る。データ点としてこの交点座標を選ぶことによって、 $x$  あるいは  $y$  方向に関する諸変数の内挿が非常に容易になる。ただし、データ数(7 以上)が不足する場合、あるいは等圧線を適切に表現できない場合には、正方形格子軸上ない等圧線上での任意の位置を与えてもよい。

iii) 等圧線の本数、スプライン関数の次数、 $x$  および  $y$  方向の格子点数、格子間隔および陸上と海上を区別する水深データを入力する。

iv) 入力データ点での気圧値を正方形格子点上に内挿する方法として、 $x$  方向と  $y$  方向の 2 通りが考えられるが、より適切な内挿値が得られるように内挿方向を指定するパラメータ(0: 計算しない, 1:  $x$  方向内挿, 2:  $y$  方向内挿, 3: 気圧値を最初からデータとして与える)を入力する。たとえば、図-2 に示すように、等圧線が曲っている部分では、 $y$  方向に内挿すると、同一の気圧値をとるので、この場合には  $x$  方向に内挿するように 1 をデータとして与える必要がある。また、このパラメータは等圧線上の入力データ点で評価された風速成分を正方



図二 格子点における気圧値の内挿

格子点上に内挿する場合にも使用される。

v) ii) で求めた入力データ点の  $(x, y)$  座標, 1本の等圧線上のデータ数, 等圧線が開いているか(非周期スプライン), 閉じているか(周期スプライン)を判定するパラメータおよび気圧値を入力する。

vi) 周期あるいは非周期 B-スプライン関数の SSL<sup>3)</sup>を利用して入力データ点でのスプライン関数の係数, 1次および2次の微係数さらに等圧線の曲率と接線角を求める。

vii) それぞれの等圧線上で与えた気圧値のデータとその  $(x, y)$  座標全部をまとめて1つのデータとする。この時, 閉じた等圧線では重複する最後のデータを読みとばす。つぎに,  $x=\text{const}$  あるいは  $y=\text{const}$  上にあるデータを全データからそれぞれ取り出すとともに, iv) のパラメータに従って  $x$  方向あるいは  $y$  方向に線型内挿して格子点上での気圧値を求める。

viii) 3次の B-スプライン関数を適用して格子点  $(i, j)$  での  $x$  および  $y$  方向の気圧傾度,  $P_{i,j}^x$  および  $P_{i,j}^y$  を求めるとともに, 以後の計算の都合上, 計算値のない両端には同じ値を入れる。この場合, 各格子線上には5つ以上のデータが必要であり, 不足している場合には, iv) で与えたパラメータの判定によりあらかじめ気圧値を入力しておく。

ix) 次式に示す1次内挿補間式を用いてもとのデータ点での気圧傾度成分,  $\partial P/\partial x$  および  $\partial P/\partial y$  を推定する。

$$\left. \begin{aligned} \partial P/\partial x &= aP_{i,j}^x + bP_{i+1,j}^x + cP_{i,j+1}^x + dP_{i+1,j+1}^x \\ \partial P/\partial y &= aP_{i,j}^y + bP_{i+1,j}^y + cP_{i,j+1}^y + dP_{i+1,j+1}^y \\ r &= x/\Delta s - [x/\Delta s], \quad q = y/\Delta s - [y/\Delta s] \\ r' &= 1-r, \quad q' = 1-q \\ a &= r'q', \quad b=rq', \quad c=r'q, \quad d=rq \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに,  $[ ]$ : ガウス記号および  $\Delta s$ : 格子間隔, である。

x) 等圧線上のデータ入力点における曲率半径の正負により, 気圧傾度  $\partial P/\partial r$  はそれぞれ次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial r} &= \frac{\partial P}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial y} \cos \theta ; \quad r > 0 \\ \frac{\partial P}{\partial r} &= -\frac{\partial P}{\partial x} \sin \theta + \frac{\partial P}{\partial y} \cos \theta ; \quad r < 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

xi)  $r$  および  $x$ ) で求めた  $\partial P/\partial r$  の正負により高気圧あるいは低気圧に相当する風速・風向さらに風速成分を算出する。ただし, 高気圧性と判定され, しかも式(1)の  $\sqrt{\quad}$  の中が負のときには地衡風として式(2)から風速を評価する。

xii) 1次補間式を適用してデータ入力点での風速成分から正格子点での風速・風向を計算する。

以上のような手順で風速・風向を推定する本研究の方法は, 海上風の推定法の原理的進展をはかるものでないが, 等圧線をスプライン関数で曲線近似することにより, 従来の円近似による方法に比べて精度の向上が期待できる簡便で客観的な方法と考えられる。

#### (4) 計算上の留意点および問題点

本研究の方法では, 極東天気図の気圧場をそのまま用いることを原則とするが, 図-3(a)のA地点では, 曲率中心が高気圧のため, 低気圧性ではあるはずの等圧線が高気圧性と判定される結果, 風向が低気圧中心から吹き出す形となり, 風速も増大する。このことはB地点についてもいえることであり, 気圧値を読み取るデータ点を等圧線と格子軸との交点に選んだため, 格子点付近を等圧線が通るとき, 読み取り位置の少しのずれで風速・風向が大きく変化することになる。したがって, このよう

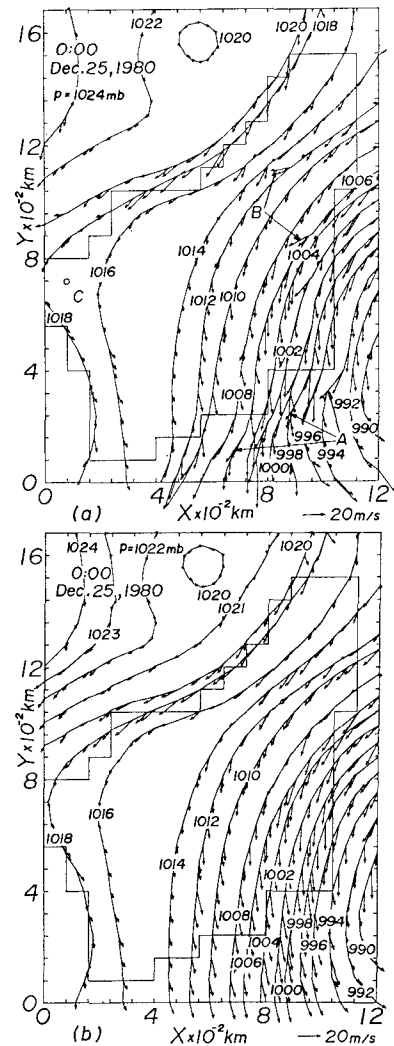


図-3 等圧線修正前および修正後の海上風ベクトル図

な計算結果が得られたときには、高気圧性と判定されないように等圧線を引き直し、平滑化する。また、B地点での異常値を防ぐために、この格子点付近では、 $x, y$  方向いずれかの交点座標の1つを読みとばす。さらに、C地点のように、 $x$  方向内挿ができないうに、 $y$  方向内挿によると同一の気圧値を取る場合には、等圧線を引き直したり、あるいは1mbごとの等圧線を追加することによりデータの不足を補った。図-3(b)は以上の補正を行なって得た等圧線および気圧値データ入力点での海上風ベクトルを示したものであり、図(a)との比較から前述の問題点がある程度解消されて滑らかな風速・風向の変化が得られていることがわかる。

### 3. 日本海における海上風の計算例

#### (1) 計算条件

海上風の計算は、ステレオ図法を基準として描かれた3時間ごとの極東天気図(気象庁発行)を使用して行なわれるが、計算対象は1980年12月23日0時から12月26日0時までの3日間である。この例は、朝鮮半島平壤付近および対馬海峡付近で発生・発達した2つ玉低気圧が日本を間にはさみこむ形で北東に進むにつれて、1つの低気圧となり、最盛時には中心気圧が970mbにも成長した低気圧である。

#### (2) 計算結果

図-4はそれぞれ低気圧の発達期、最盛期および減衰期における日本海での海上風ベクトルの平面分布を示したものである。この場合図-4は、図-3に示す格子間隔85kmの格子網上で推定された海上風ベクトルを、図-3の座標軸を反時計方向に $45^\circ$ 回転した格子間隔40kmをもつ波浪推算用の新しい格子網上に線型内挿することにより描かれている。さて、一方の低気圧が日本海中央部に、また他方が房総半島南方に位置する時点の図(a)には、前者の低気圧に吹き込む反時計まわりの渦が形成されており、その結果、北日本ではN~E方向の風、西日本ではNW方向の風というように、地域によって風向が全く異なる風が吹送している。そしてこの時点では能登半島付近に風向転向点がある。つぎに、2つ玉低気圧が1つの低気圧になり、日本海沿岸で強風が吹送した時点の海上風を示した図(b)によると、日本海全体で風速20m/sを越えるN寄りの風が吹送しており、しかも日本海北部から南西部にかけてNEからNに風向がしだいに変化していることがわかる。さらに、図(c)は前述の低気圧が減衰期に入ったのち、清津付近に弱い低気圧が発生

した時点における海上風分布である。これによると、日本海北部でN方向をもつ風が日本海中部以西で急激にNW方向の風に変化している。また、能登半島以西では風速はかなり小さいし、新たに発生した低気圧中心まわりに弱い渦が形成されている。

#### (3) 観測結果との比較

運輸省などの官公庁を中心として日本海沿岸の多くの地点で風観測が実施されているが、これらは、たとえ海岸のごく近くであっても陸上部に設置されており、利用しうる海上風の観測結果は皆無である。したがって、多かれ少なかれ風向ごとに異なる地形の影響を受けた観測結果とこうした影響を含まない計算結果を比較し、計算

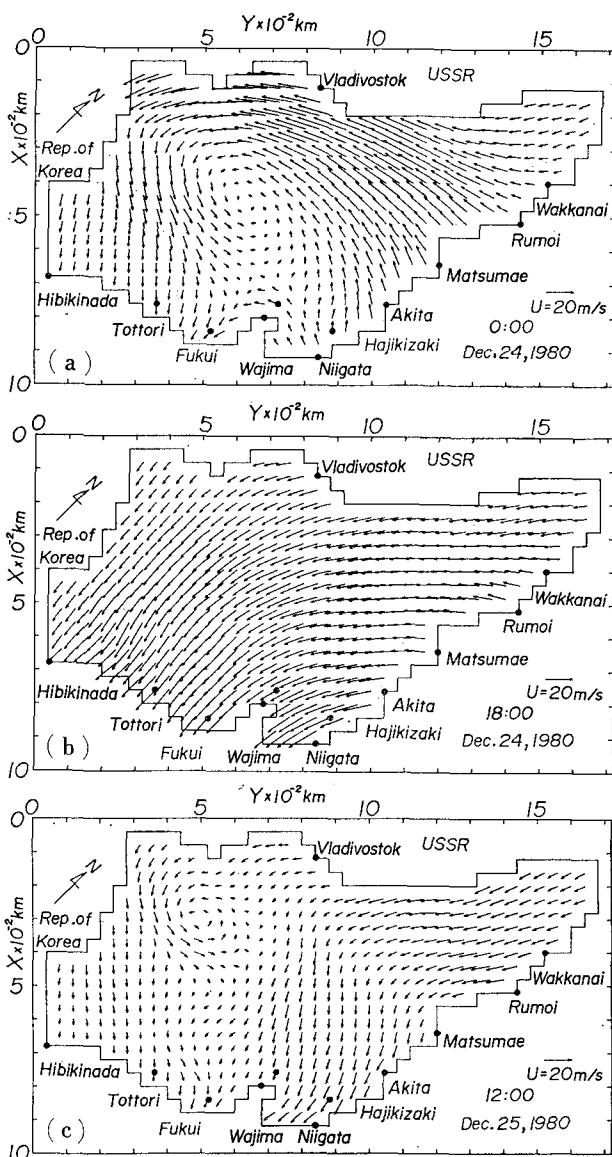


図-4 日本海における海上風の平面分布

結果の妥当性を検証することは難しいけれども、ここではできるだけ地形特性の影響を受けない位置にある風観

測値を用いて考察を進める。図-5は弾崎(佐渡島北端)、鳥取港および響灘(北九州市若松地区)での比較例を示したものである。これらの図によると、実測結果との対応は弾崎、響灘のほか、舩倉島、輪島、新潟の各地点においてよく、ことに2つ玉低気圧が1つになった24日15時以降ではその傾向が著しい。しかし15時以前ではこれらの観測地点が2つ玉低気圧の間に入って等圧線の判定が難しくなるので、両者の対応関係はやや低下しているし、図の中では鳥取港の風向の対応が悪くなっている。また、その他の実測風速は計算風速に比べ小さい場合が多かった。

#### 4. 結 語

本研究では、スプライン関数近似を用いて等圧線の曲率半径および気圧傾度を推定し、天気図から計算機を利用して自動的に格子点での海上風の平面分布を算出する方法を提案するとともに、この方法を季節風時における日本海上の海上風推定に適用し、観測結果との比較・検討を行なった。その結果、本研究の方法は2つ玉低気圧という一般に風の推定が難しいケースに対しても十分適用可能であることが明らかになった。

最後に、貴重な風資料を提供載いた運輸省第一港湾建設局を始めとする関係各省庁に謝意を表明するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(研究代表者 京都大学 土屋義人教授)による研究成果の一部であることを付記する。また、本研究の計算は愛媛大学情報処理センターの M-180 II AD および九州大学大型計算機センターの Facom M-382 によった。

#### 参 考 文 献

- 1) 山口正隆・渡辺 健・畑田佳男: 大阪湾における海上風の平面分布特性について, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 168~172, 1981.
- 2) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所: 室津港波浪推算調査報告書—有義波法による太平洋沿岸波浪推算—, 1982.
- 3) FACOM FORTRAN SSL II 使用手引書(科学用サブルーチンライブラリ), 富士通株式会社, 1980.

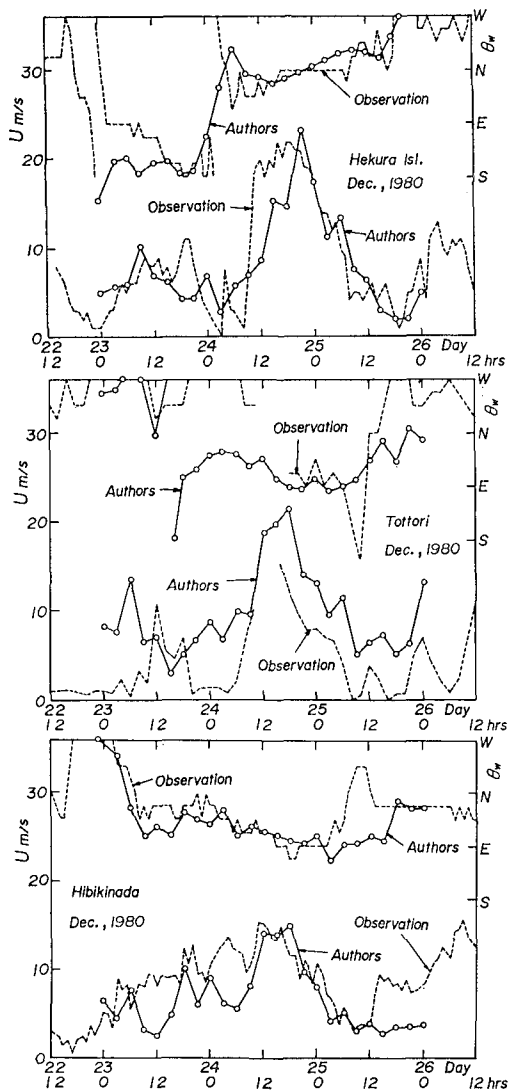


図-5 計算結果と観測結果との比較