海岸工学論文集，第 53 巻（2006）
土木学会，246-250

時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測

泉宮尊司[1]・中島俊秋[2]

本研究では，海洋短波レーダにより観測される海表面流速場を用いて，津波のリアルタイム予測を行える方法を開発した．海洋短波レーダで流速場を取得するためには，1 分間程度以上の観測時間が必要であり，数値シミュレーションでは，1 分および 2 分間の時間平均流速場を用いて，推定される特定時刻における水位，初期水位および沿岸域での水位変化の誤差を評価している．その結果，1 分間の時間平均流速を用いることにより，それらの水位がほぼ適切に推定され，沿岸域の水位変化に関しては，全ての地点で相関係数が 0.99 以上となり，誤差の標準偏差も 0.2 m 以下となることが示された．このことから本研究の計算手法の実用性が検証された．

1. はじめに

津波が沿岸に到達する前に津波の流速場をすばやく検知し，迅速に精度よく津波を予測することは，正確な津波情報を伝達する上で重要であり，効率のよい避難行動を促進することができる．近年気象庁では，日本近海で地震が発生すると，地震後 3 分を目標に約 10 万ケースの数値シミュレーションを行った結果を利用して津波予報を行っている（舘畑，1998）．しかしながら，津波地震の場合には誤差が大きくなる可能性があるため，GPS 津波計で実際の津波をできるだけ沖合で捉えて，早期津波予報に役立てようとする研究も行われている（永井ら，2003）．

一方，近年わが国においても海洋短波レーダが開発され，海表面流速場の計測が可能となってきた（徳田ら，1993，藤井・徳田，2001）．著者らは，その流速場を用いることを想定して，ある時刻の水位分布を推定する方法を提案している（泉宮・今井，2005）．しかしながら，海洋には潮流，海流および吹送流など様々な流れが存在し，かつ海洋短波レーダによる計測誤差が含まれるため，津波流速成分を精度よく計測分離するには，未だ多くの課題がある．その解決策の 1 つとして，平常時は海流・潮流などを観測し，地震発生時にモードを切り替えて流速場を計測し，直前の流速場を差引くことにより，津波流速成分がある程度の精度で得られる可能性がある．吹送流に関しては，非波動性であるのでその成分の発散はほぼ 0 となるため，津波水位推定には余り影響しない．

本研究では，海洋短波レーダにより観測される海表面流速場を用いることを想定し，数分間隔で時間平均された流速場から津波のリアルタイム予測を行うことを研究の目的とする．また，本手法の精度を検証するために，津波の順問題の数値シミュレーションを行い，得られた流速場を数分間の平均をとったデータを用いて，特定の時間の水位分布を推定し，その推定精度や沿岸で観測される水位と予測水位との比較を行うことを目的とする．

2. 津波のリアルタイム予測法

津波のリアルタイム予測法の原理は，泉宮・今井（2005）が示した方法とほぼ同様であるが，本研究では時間平均された流速場を用いることが異なる．いま，時刻 t_1 から $t_1+\tau$ までの時間平均を連続式および運動量方程式に適用すると，

$$\frac{1}{\tau}(\eta_2-\eta_1)+\frac{\partial\overline{M}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{N}}{\partial y}=0 \cdots\cdots(1)$$

$$\frac{1}{\tau}(M_2-M_1)+gh\frac{\partial\overline{\eta}}{\partial x}=0 \cdots\cdots(2)$$

$$\frac{1}{\tau}(N_2-N_1)+gh\frac{\partial\overline{\eta}}{\partial y}=0 \cdots\cdots(3)$$

となる．ここに，η は水位，M および N は x および y 方向の線流量であり，下添字 1 および 2 は，時刻 $t=t_1$ および $t=t_1+\tau$ における値を示し，$\overline{\ }$ は時間平均量であることを示している．下添字のついた諸量を時刻 $t=t_1+\tau/2$ の回りに Taylor 展開し，その時刻の値を＊印を付けて表すと，

$$\eta_1(t_1+\tau/2-\tau/2)=\eta^*-(\tau/2)\eta_t^*+(\tau/2)^2\eta_{tt}^* \cdots(4)$$

$$\eta_2(t_1+\tau/2-\tau/2)=\eta^*+(\tau/2)\eta_t^*+(\tau/2)^2\eta_{tt}^* \cdots(5)$$

$$M_1(t_1+\tau/2-\tau/2)=M^*-(\tau/2)M_t^*+(\tau/2)^2M_{tt}^* \cdots\cdots(6)$$

$$M_2(t_1+\tau/2-\tau/2)=M^*+(\tau/2)M_t^*+(\tau/2)^2M_{tt}^* \cdots\cdots(7)$$

となり，これらの関係式を式（1）から式（3）に代入すると，次式を得る．

$$\frac{\partial\eta^*}{\partial t}+\frac{\partial\overline{M}}{\partial x}+\frac{\partial\overline{N}}{\partial y}=0 \cdots\cdots(8)$$

$$\frac{\partial M^*}{\partial t}+gh\frac{\partial\overline{\eta}}{\partial x}=0 \cdots\cdots(9)$$

1 正会員　工博　新潟大学教授　工学部建設学科
2 　　　　　　　新潟県十日町地域振興局

$$\frac{\partial N^*}{\partial t}+gh\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

上式の関係より，時間平均された流速場から，式（8）を用いて η^* の時間変化が得られ，同様に次の観測された流速場を用いることによって，水位変動 η^* の時間に関する2階微分値が得られる．この結果を用いることにより，著者らの方法（泉宮・今井，2005）をほぼそのまま適用することができる．この方法は，流速が時間平均される間，水位ならびに線流量の時間波形が放物線で近似できることを利用したものであり，その誤差は時間間隔 τ の2乗と水位波形の時間に関して3階微分値の積のオーダであるので，かなり小さいことが予想される．

3. 数値シミュレーション方法

時間平均された流速場を用いた津波のリアルタイム予測の精度および妥当性を検討するために，まず津波の順問題の数値シミュレーションを行った．対象とした海域は，泉宮・今井（2005）と同じ新潟県沿岸の日本海であり，海底地形は日本海洋データセンターのJ-EGG500を使用し，主として外海計算を行うので2kmメッシュとした．佐渡の北東沖にある大陸棚の東淵に走向N20°E，断層の長さ98km，幅37km，断層傾斜角56°，断層上縁深さ2.0km，変位量 $U_s=0.0$ m，$U_d=-3.0$ m の逆地震断層を想定した．これらの断層諸元を用いて，Mansinha・Smylie（1971）の理論解より海底の鉛直変位を計算し，それを初期水位として津波計算を行った．沖側および側方境界条件は，任意の波向角にも適用できる泉宮・磯部（1986）の自由透過境界条件を用いた．海洋短波レーダで津波の流速を計測することを前提に，計算により得られた流速場を4分後から1分間隔あるいは2分間隔で平均し，その流速場を用いて津波水位等の予測を行った．

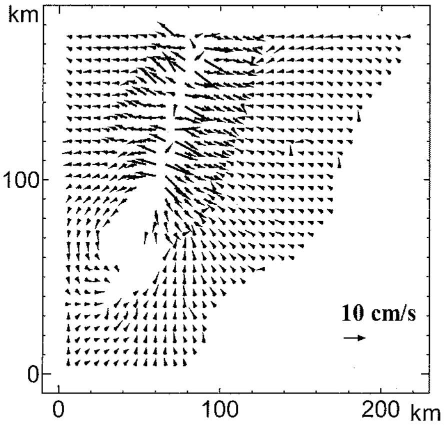

図-1　地震発生から4分から5分までの時間平均流速場

図-1は，地震発生から4分から5分までの時間平均流速場を示したものである．この時間帯では，津波波源域から流速が発生しだし，1分間の時間平均を取っているが，流れのフロントを形成しているのが見える．この流速場より線流量を算定し，連続式を用いて4分30後の水位変動の時間変化を算定した．さらに，地震発生から5分から6分までの時間平均流速場を用いて同様な計算を行い，水位変動の時間変化を求め，前の時間帯で得られたそれを用いて，水位の時間に関する2階微分値を求めている．

4. 津波のリアルタイム予測の結果

（1）水位の時間変化率の比較

図-2は，地震発生から4分から5分の平均流速場から4分30秒後の水位の時間変化率を算定した結果である．この図において，単位はm/sであり，1s当り絶対値で最大9mm程度，その他の所では数mm以内の変動が生じていることが分る．同じく図-3は，津波の数値計算による真値と思われる水位変動の時間変化の分布を示したものである．図-2と図-3を比較すると，大局的な変動パターンは再現されているが，時間平均流速場を用いた方は，少し平滑化されたような結果となっている．

（2）特定の時間における水位の推定結果

図-4は，1分間隔で平均された流速場を用いて，地震

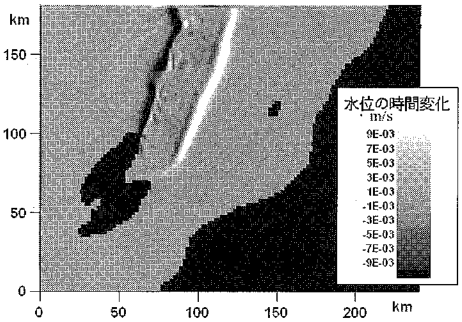

図-2　水位の時間変化率の推定値（4分 30秒後）

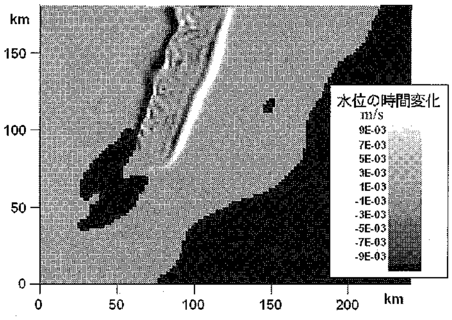

図-3　水位の時間変化率の真値（4分 30秒後）

発生から5分後の水位を推定した結果で，図-5は2分間隔で平均された流速場を用いて推定したものである．図-6には，数値計算によって得られた真の水位分布を示している．1分間隔で平均された流速場を用いた結果は，図-6の真値の分布に近く，若干絶対値が小さくなっているのみであるが，2分間の時間平均の流速場を用いた図-5では，真値と比べると鈍りがかなり大きく，

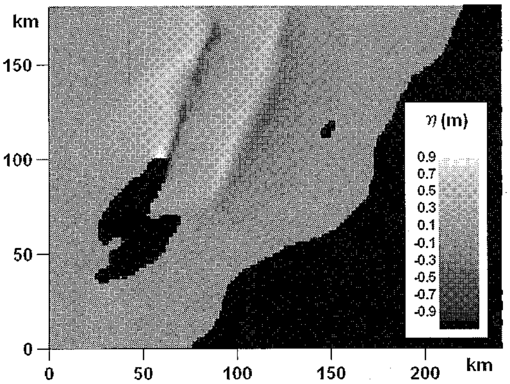

図-4　5分後の推定水位（1分間の時間平均）

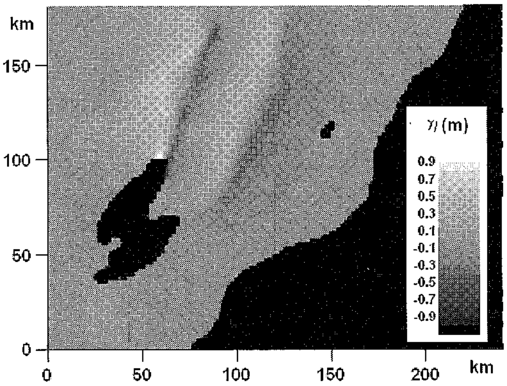

図-5　5分後の推定水位（2分間の時間平均）

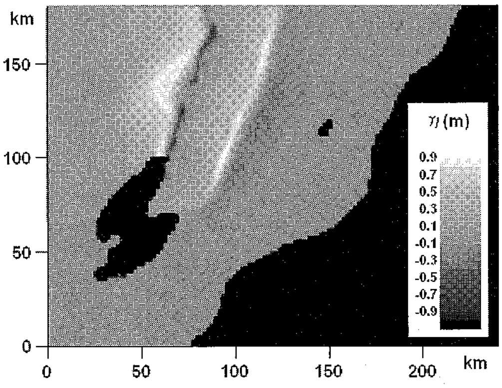

図-6　5分後の津波水位（真値）

より平坦な結果となっていることが分る．

特定の時間における水位の推定結果の精度をもう少し詳しく調べるために，東西方向の断面での津波の空間波形を比較することにした．図-7および図-8は，それぞれy軸の距離が110 kmおよび130 kmにおける東西方向の水位の分布を比較したものである．この図において，真値を実線で，1分間平均した流速場から求めた結果を点線，および2分間平均した流速場から求めた結果を1点鎖線で示している．推定された結果は，空間波形のパターンはかなり類似しており，1分間平均した流速場から求めた結果の方が良好な結果となっているが，津波の波峰部において，幾分か小さめの値を示している．これは，津波のフロント部においては，やや急激な水位や流速場の変化が現れるので，数分程度でも時間平均をとることによって，その急激な変化が消失するためであると考えられる．

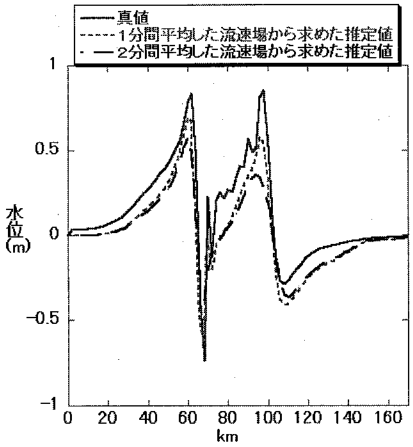

図-7　水位の断面分布の比較（y=110km）

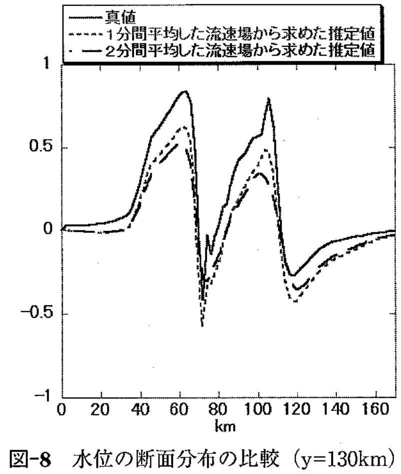

図-8　水位の断面分布の比較（y=130km）

（3）初期水位分布の比較

観測された流速場と推定された特定の時刻の水位分布を用いて，比較的容易に初期水位分布を逆推定することができる．図-9は，津波の初期波形の真値であり，図-10および図-11にそれぞれ1分間平均した流速場を用いた結果および2分間平均した流速場を用いた結果を示したものである．真値の方は，逆断層上縁の深さが2kmとかなり浅いので，地形変化が断層線の左右で大きく異なり，シャープな特徴を示している．1分間の平均流速場を用いた図-10では，真値ほどシャープな感じではないが，断層線の位置がわかるほどの結果となっており，全体的な上昇，下降のパターンもかなり類似していることが分る．一方，2分間の平均流速場を用いて推定した図-11は，前の2つの図と比較して，かなり平滑化された結果となっている．

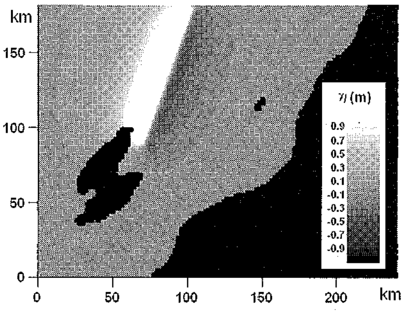

図-9　初期水位分布（真値）

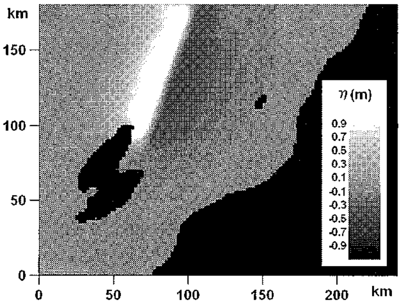

図-10　初期水位分布（1分間平均流速場）

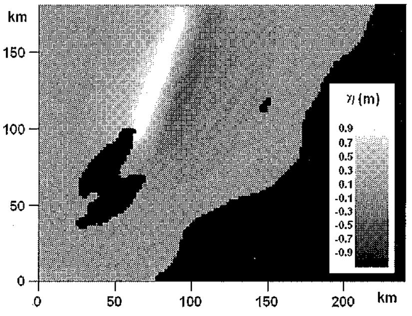

図-11　初期水位分布（2分間平均流速場）

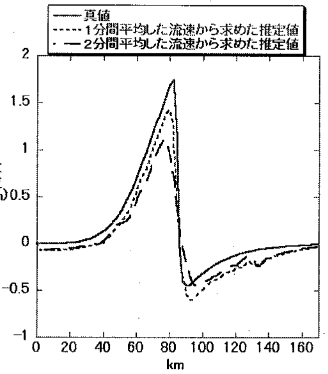

図-12　初期水位の断面分布の比較

初期水位の分布をもう少し詳しくみるために，$y=130$ kmの位置における東西方向の断面で比較したのが，図-12である．水位分布の形状は，それぞれ相似な形となっており，断層の位置に相当する鉛直変位が0の位置もよく一致しているが，平均時間が1分から2分へと長くなるにつれて，水位上昇部分の大きさがより小さくなる傾向にあり，誤差の絶対値を考えると，時間平均は1分が許容限界と言える．

（4）沿岸域における水位変動の比較

前節で求められた初期水位分布を用いて，通常の津波計算を行い，沿岸域における水位変動を比較することにした．図-13から図-15は，それぞれ鼠ヶ関，三面川および新潟東港付近の水位変動を示したものである．1分間の平均流速を用いた結果は，最初の引き波時の水位の低下量が多少大きく，水位の峰の高さも多少低いものの，水位の谷の部分での一致度は高いことが分る．一方，2分間の平均流速を用いた場合には，水位の峰と谷の両方において，その絶対値が小さくなっている．

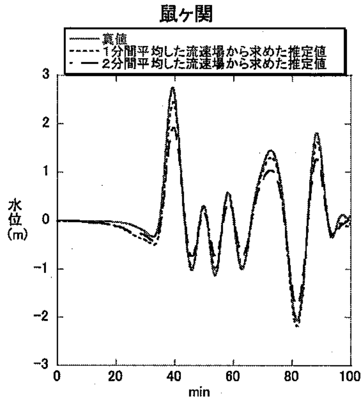

図-13　鼠ヶ関における水位変動の比較

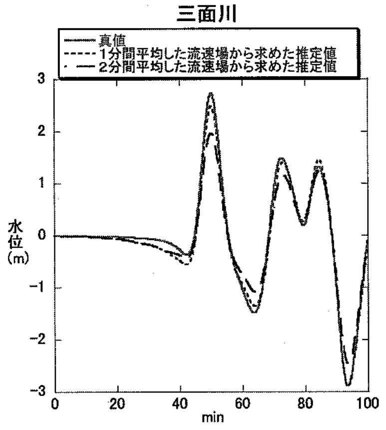

図-14　三面川における水位変動の比較

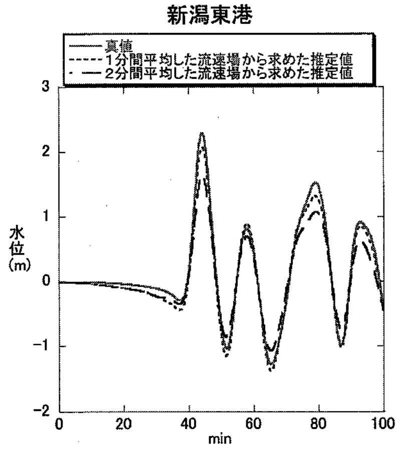

図-15　新潟東港における水位変動の比較

もう少し定量的に誤差を評価するために，真の水位変化との相関係数と誤差の標準偏差を求めることにした．1分間の平均流速場を用いた場合には，相関係数は，鼠ヶ関，三面川および新潟東港でそれぞれ0.993，0.995および0.996であった．また，誤差の標準偏差は，同じ順番で0.133 m，0.115 mおよび0.099 mと15 cm以下の値が得られている．一方，2分間の平均流速場を用いた場合には，相関係数は，鼠ヶ関，三面川および新潟東港でそれぞれ0.991，0.992および0.993であった．また，誤差の標準偏差は，同じ順番で0.248 m，0.231 mおよび0.205 mと1分間の平均流速を用いた場合と比べて，2倍以上の誤差となっている．

5. 結　　論

時間平均された海表面流速場を用いて津波のリアルタイム予測を行い，その結果の精度に関して検証を行ったところ，以下の事柄が明らかとなった．

(1)本手法では，時間平均された海表面流速場から如何に精度良くある特定の時刻の水位加速度を推定するかに懸かっているため，Taylor展開を用いて誤差が最小となる推定時刻を求めた．その結果，1分間隔の差分においても，誤差が小さく安定した結果が得られることが分った．

(2)推定される水位の時間変化の誤差について理論的に検討したところ，時間平均した流速場を用いても水位の時間に関して3階微分のオーダであることが示され，誤差は比較的小さいことが分った．

(3)流速場の時間間隔および平均時間を1分および2分程度に長くしても，推定された水位は滑らかで安定していた．また，真の水位分布と比較すると，水位変化の極めて大きい所では多少の誤差が見られるが，波形のパターンはかなり類似していた．

(4)推定された水位と時間平均された流速場を用いて，逆推定された初期水位分布は，断層線が明確に現れており，真値との比較においても1分間の時間平均された結果は，実用に用いることのできる精度を有していることが明らかとなった．

(5)本手法で津波のリアルタイム予測を行ったところ，沿岸域の水位変動は，1分間平均した海表面流速場から算定したものは相関係数0.99以上，誤差の標準偏差10 cm程度，2分間平均したものは相関係数0.98以上，誤差の標準偏差20 cm程度とかなり高い精度であった．

なお本研究の一部は，日本学術振興会の平成17年度科学研究費基盤研究Cの補助を受けたことを付記し，謝意を表す．

参　考　文　献

泉宮尊司・磯部雅彦(1986)：領域分割による津波の数値計算法に関する研究，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 214-218.

泉宮尊司・今井達也(2005)：海洋レーダによる海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測に関する研究，海岸工学論文集，第52巻，pp. 546-550.

舘畑秀衛(1998)：津波計算技術の津波予報への応用，月間海洋／号外No.15，pp. 23-30.

徳田正幸・久木幸治・大野裕一(1993)：短波海洋レーダによる流れと波浪の計測(2)，海岸工学論文集，第40巻，pp. 126-130.

永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信(2003)：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集，第50巻，pp. 1411-1415.

藤井智史・徳田正幸(2001)：陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測，第6章，HFレーダによる観測，土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会編，pp. 68-89.

Mansinha,L. and Smylie, D.E. (1971)：The displacement fields of inclined faults, Bull. Seismol. Soc. Amer. Vol.61, pp. 1433-1440.