

## 二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発

### Forecast Method of Two-layer Current System Considering Dynamic Variations

織田 幸伸\*・伊藤 一教\*\*

Yukinobu ODA and Kazunori ITO

**要旨:** 現在, トルコのボスポラス海峡に沈理工法による鉄道トンネルを施工中である。ボスポラス海峡は, 黒海から流入する淡水系の上層流とマルマラ海から逆流する塩水系の下層流の二層流となっており, その流れは非常に変わりやすい。そこで本研究では, 施工時の精度と安全性を確保するため, 流況予報システムを開発した。本システムでは, 流速, 水位, 気圧, 風の常時観測値と, 気象サービスから得られる風, 気圧の予報値から, 将来の流況をリアルタイムで予測する。まず, 風, 気圧の予報値から海峡両端の水位を予測し, これに二層流界面の位置による補正を加えて流況を予測する。予測手法の開発においては結果の速報性を重視し, 高度な数値計算モデルではなく, 入力(風や気圧)と出力(水位や流速)の関係を現地観測と三次元数値シミュレーションの結果をもとにモデル化する回帰モデルを採用した。本手法による予測は現地の流況を精度よく再現しており, 現在, 実際の施工で利用中である。

**キーワード:** 二層流・流況予測・沈埋トンネル・ボスポラス海峡

### 1. はじめに

現在, トルコのイスタンブール中心部を東西に結ぶ鉄道トンネルを施工中であり, このうちボスポラス海峡を横断する部分を沈埋トンネルで施工する(図1, 2参照)。ボスポラス海峡は黒海とマルマラ海をつなぐ長さ約30kmの海峡であり, 黒海からマルマラ海へと流れる淡水系の表層流と, マルマラ海から黒海へと逆流する塩水系の底層流とによる二層流になっていることが知られている。現地計測の結果, 表層の流速は2.0m/sを越える場合があり, 底層では, 定常的に0.5~1.0m/sの逆向きの流れが生じていることが分かった<sup>1)</sup>。

本研究の目的は, このような複雑な急流下において函体沈設の精度と安全性を確保するため, そ

の実施に先立って, 沈設時の流況を予報するシステムを開発することである。

密度流に関しては既に多くの研究がなされており, 淡塩二層流場に対する基礎方程式として須賀ら<sup>2)</sup>の報告を始め, 様々な方程式が提案されている。また, 塩水くさびの非定常運動を再現する数値解析<sup>3), 4)</sup>もなされており, 断面形状の変化が比較的小



図1 ボスポラス海峡の位置

\* 正会員 大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所, \*\* 大成建設株式会社 国際事業本部

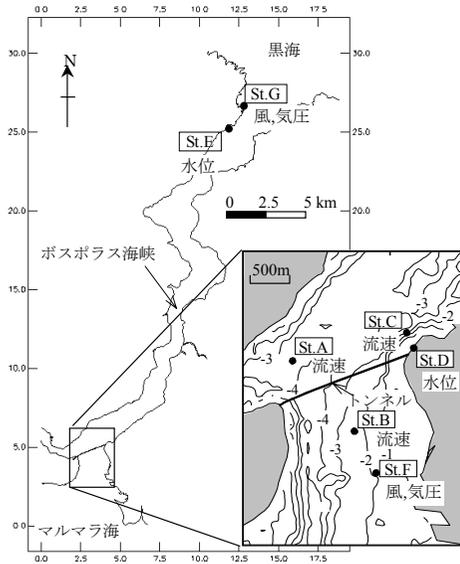


図2 ポスボラス海峡と観測点

さく、直線的に海域に流入する河口部での密度流については、精度の高い解析が可能となっている。しかし、本研究で対象とする沈埋トンネルの施工域は、図2に示すように海峡が屈曲しながら塩水域に流入し、また、海峡断面も複雑に変化する場所のため、上述の二層流場に対して提案されている方程式を適用することは難しい。適切な界面抵抗係数や連行係数が設定できれば、数値解析は可能と考えられるが、計算精度を確保するためには計算格子を非常に細かくする必要があり、多大な計算時間を必要とする。そのため、結果の速報性を重視する施工への適用は困難であると判断した。そこで本システムでは、風や気圧の気象現象と水位の関係、海峡両端の水位差と流況の関係を明らかにし、その応答特性をモデル化することにより将来の流況を予測する手法を開発した。

ボスボラス海峡に関わる水位や流況については、現地観測や数値計算により検討した報告がいくつかある<sup>5),6)</sup>。しかしそれらは、対象範囲が広域であり、今回の施工範囲の局所的な流況構造を精度良く把握できるものではない。本研究では、トンネルの施工範囲を中心とした流況の現地観測と、数

値シミュレーションの結果をもとに、風、気圧などの気象現象と海峡両端の水位差、流速の応答特性や海峡の流速分布構造を明らかにした。この解析結果をもとに、それぞれの応答特性を再現するモデルを構築し、これらを組み合わせることにより、流況予報システムを構築した。

## 2. 現地観測と数値シミュレーション

### 2.1 現地観測

現地の流況特性を解明するため、一年間にわたる現地観測を実施した。観測項目はトンネルライン周辺の流況と、海峡の南北両端部での水位、流速、風向、気圧である。計測点を図2に示す。

流速は、海底設置型のドップラー多層流速計 (Acoustic Doppler Current Profilers, 以後 ADCP と略す) により、1時間毎に10分間の平均値として、断続的に鉛直分布を計測した。ただし、観測期間中は既に地盤改良工事のため、トンネルライン上に計測装置を設置できない。そこで、トンネルラインを挟む St.A, B, C の3点に ADCP を設置した。設置水深はそれぞれ、35, 26, 30m である。また、海峡両端部の気象条件および水位を計測するため、St.D, E に水位計を、St.F, G に風速計、気圧計を設置した。計測頻度は1時間毎とし、2004年10月から2005年9月の1年間の長期連続観測を実施した。また、トンネルライン直上の流速の鉛直断面分布を、船舶搭載型の ADCP により1.5ヶ月に1回の頻度で計測した。

### 2.2 数値シミュレーション

#### 2.2.1 計算モデルと計算条件

流況の時間変化を予測するためには、海峡の縦断的な流速の分布や、密度界面の変動特性を明らかにする必要がある。しかしこれを現地計測により把握することは困難なため、海峡全体を対象とした数値シミュレーションを実施した<sup>7)</sup>。

計算には、デルフト水理研究所が開発した Delft3D-FLOW を使用した。本モデルは、座標系として水平方向に曲線座標系を、鉛直方向に  $\sigma$  座標系を採用し、塩分や温度による密度分布の影響を取り込んだ3次元非定常解析が可能である。なお、乱流モデルは  $k-\varepsilon$  モデルを採用し、流れおよび密度に対する乱れの影響を考慮した。数値シミュレーションに用いた計算メッシュと境界条件を図3に示す。鉛直方向は10層の  $\sigma$  座標系を用いた。なお、水平方向のメッシュサイズ、鉛直方向の層数は、予備計算により最適なサイズを求めた。境界条件は、マルマラ海側境界の塩分の鉛直分布を図3に示すステップ形状で与えた。水温の鉛直分布についても、塩分と同じ深さを境界とするステップ形状とし、表層  $20^{\circ}\text{C}$ 、底層  $15^{\circ}\text{C}$  とした。黒海側は塩分  $18\text{psu}$ 、水温  $20^{\circ}\text{C}$  で鉛直方向に一定とした。これらの境界条件は既往の観測結果<sup>8)</sup>および現地観測の結果を参考に決定している。

### 2.2.2 計算結果の検証

図4、5に計算結果と観測結果の比較の一例を示す。なお、ここに示した数値シミュレーションは、一定の境界条件のもとに安定計算を行った定常計

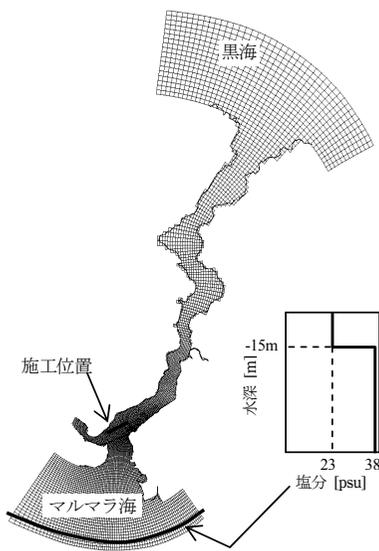


図3 計算メッシュと塩分境界条件

算の結果である。図4は、トンネルライン上の海峡横断面における流速分布を比較したものである。ここで流速  $u^*$  は、流速の絶対値に、南北方向の流速成分の符号を付けたものであり、北向きの流れを+、南向きの流れを-として示した。以降本論では、流速はこの  $u^*$  を意味する。また、 $\Delta\eta$  は海峡両端の水位差で図2に示す St.D と St.E の水位の差であり、 $\Delta\eta=0.3\text{m}$  は、年間の平均的な値である。数値シミュレーションと現地観測を比較すると、アジア側で比較的速い表層流速や、ヨーロッパ側の底層部での逆流の状況を数値シミュレーションは精度良く再現できていることが分かる。

図5は、水位差と流速の関係と比較したものである。実現現象は非定常であるため、観測結果にばらつきはあるものの、両者は概略一致している。上述したように、数値シミュレーションは計算結果を直接予測モデルに適用するためではなく、水

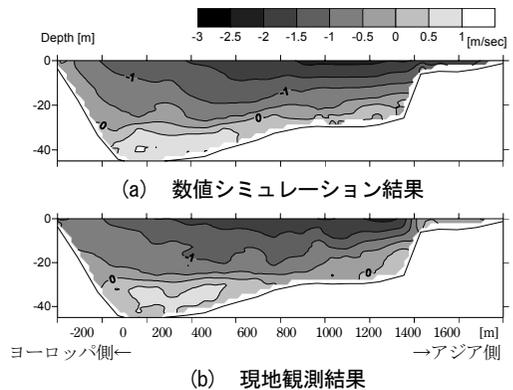


図4 数値シミュレーションと現地観測の流速比較 (流速の鉛直断面分布,  $\Delta\eta=0.3\text{m}$ )

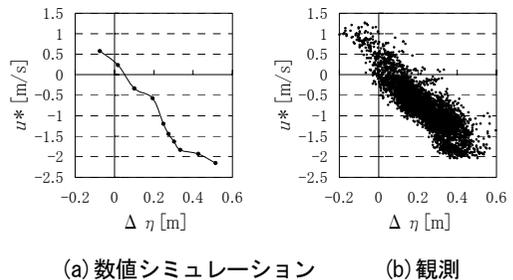


図5 数値シミュレーションと現地観測の流速比較 (水位差と流速の関係, St. B, 水深 7m)

位の変化に伴う流況の変化特性や、境界の密度界面の影響等、定性的な流況特性を把握するために実施した。この目的において、数値シミュレーションは十分な精度をもっていると考えられる。

### 3. 予測モデル

#### 3.1 モデルの概要

本予測モデルは、水位予測モデルと流況予測モデルの2つに大きく分けられる。水位予測モデルでは、潮汐、気圧、風、季節変動を支配因子とし、それぞれを個別にモデル化することにより、その重ね合わせで水位を予測するモデルを構築した。流況予測モデルでは、流況は主に海峡両端水位差により支配されるものとし、これに密度界面の影響を考慮した補正を加えるモデルを構築した。

#### 3.2 水位予測モデル

##### 3.2.1 水位の変動特性

図6に、黒海側 (St.E) の水位  $\eta_B$ 、マルマラ海側 (St.D) の水位  $\eta_M$ 、マルマラ海側 (St.F) の気圧  $P_M$  および南北風と東西風の風速  $W_{NM}, W_{EM}$  の11月の変動を示す。ここで、南北風、東西風はそれぞれ北風、東風を正、南風、西風を負として示した。

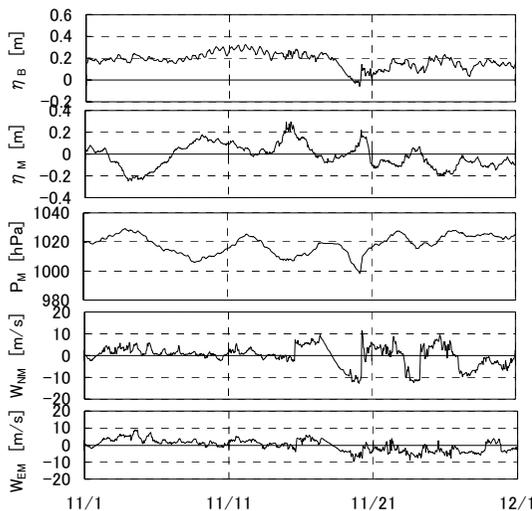


図6 水位と気圧・風の観測結果

なお、黒海側とマルマラ海側で気圧はほぼ等しく、風についても、風速に多少の違いはあるものの、その傾向はほぼ一致している。

一般の海域では、気圧が高くなると海面水位は低下するが、図6のマルマラ海の水位と気圧には、この関係が明瞭に表れている。高気圧によりマルマラ海の水がエーゲ海へと押し出され、水位が低下していることが分かる。一方で、黒海側水位については、気圧との相関が低い。黒海は、その面積に対して非常に狭い海峡で外洋と繋がっており、外洋に対してほぼ閉じているため、気圧に対する応答が明瞭でないと考えられる。

風に対する水位の応答は、北風、東風に対し黒海側水位が上昇、マルマラ海側水位が低下し、南風、西風の場合にはその逆になる傾向が概略読み取れる。これは、風の吹寄せ効果によるものと考えられるが、北風と高気圧は同時に発生することが多いため、気圧による水位の応答を分離して、風の応答を考える必要がある。

この他、水位変動としては、日周期の変動成分である潮汐成分と、主に雪融け水の流入の影響による季節変動を本モデルでは考慮した。以下に、それぞれのモデルについて詳述する。

##### 3.2.2 潮汐モデル

潮汐モデルでは、1年間の水位観測のデータから調和解析により潮汐成分を抽出した。主要4分潮について解析結果を表1に示す。

##### 3.2.3 気圧モデル

一般に、気圧  $P$  の変化による水面の変動  $\eta_p$  は、以下の式で表わされる。

$$\eta_p = \alpha(P_0 - P) \dots\dots\dots (1)$$

表1 各潮汐成分の振幅

成分	$O_1$	$K_1$	$M_2$	$S_2$
周期 [hr]	25.82	23.93	12.42	12.00
黒海側 (St. E) [m]	0.007	0.010	0.015	0.006
マルマラ側 (St. D) [m]	0.009	0.010	0.005	0.004

ここで、 $P_0$  は基準気圧、 $\alpha$  は空気と海水の比重から求められる係数であり、一般の海域ではそれぞれ 1013hPa、0.00991m/hPa となる<sup>9)</sup>。本モデルでも、この式を適用した。ただし黒海側においては、黒海が外洋に対して閉じていると仮定し、基準気圧  $P_0$  を黒海全域の平均気圧  $P_{B\_mean}$  として時間的に変化させた。なお、モデルのキャリブレーションにおいては、NCEP (米国環境予測センター) 客観解析データを用いてこれを計算した。マルマラ海側については、 $P_0$  として 1013hPa を採用した。また、 $\alpha$  については、以下の様に観測値をもとにキャリブレーションして決定した。

図 7 は、気圧と水位の関係について、1 年間の計測結果を示したものである。ここで水位は、上述の潮汐モデルにより算出した潮汐成分  $\eta_{B\_t}$  および  $\eta_{M\_t}$  と、90 日の移動平均によって求めた長周期成分を観測値から取り除いている。

図 7(a) は、黒海全域の平均気圧と St.G の気圧の差  $P_{B\_mean} - P_B$  と、水位の関係を示している。傾きを式(1)の  $\alpha$  とし、最小自乗法によりこれを求めると、0.00582m/hPa となった。黒海は、塩分濃度の低い表層と高い底層の二層化しているため、一般の海域よりも気圧の変化に対する応答が小さいと考えられる。また、図 7 に示した水位は風による成分を含んでおり、黒海側については気圧の影響よりも風の影響の方が大きいため、非常にばらつきが大きいと考えられる。

図 7(b) は、マルマラ海側の気圧と水位の関係に

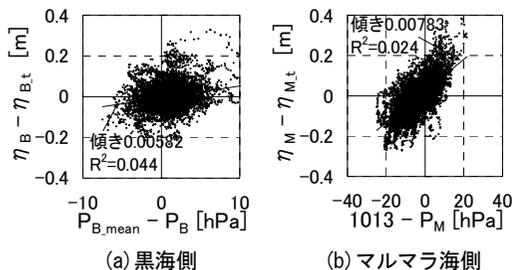


図 7 気圧と水位の関係

ついて示したものである。図 7(a)と比較して、ばらつきが小さく、傾きも大きいことが分かる。最小自乗法により  $\alpha$  を求めると、0.00783m/hPa となった。マルマラ海も海峡を通じて外洋と接続しているが、面積が小さいため気圧変化に対する応答が黒海に比べて大きいと考えられる。図 7(b)は 1 年分の観測結果を同時にプロットしているが、これを月毎に求めると、平均水位の高い夏季には傾きが小さく、冬季に大きくなる傾向があった。したがって本モデルでは、 $\alpha$  を平均水位の関数として、以下の式でモデル化した。なお、平均水位については、後述の季節変動の項で言及する。

$$\alpha = -0.0061\eta_{M\_mean} + 0.0084 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\eta_{M\_mean}$  は、St.D の 1 ヶ月の平均水位を表わす。

### 3.2.4 風モデル

風に対する水位の応答モデルは、黒海側とマルマラ海側で同じものを用いた。以下に、マルマラ海側についてモデルの詳細を示す。

湾内の風による吹寄せの効果は、風速の自乗に比例すると考えられる<sup>9)</sup>。図 8 は、マルマラ海側の水位と、南北風の風速の自乗の時系列を示したものである。ここで風速は、その自乗値に、北風が +、南風が - となるように符号を付けたものである。また水位は、上述のモデルにより求められた潮汐成分  $\eta_{M\_t}$  と気圧成分  $\eta_{M\_p}$  を除いている。

図 8 によれば、北風により水位が下降していることが分かる。しかし、風速には日単位程度の短周期の変動があるのに対し、水位変動にはその短期の変動が現れていない。また、風の吹き始めから水位が応答するまでに、時間的な遅れがあることも分かる。

図 9 に、図 8 に示した時系列のスペクトルを示した。風速には周波数 0.2/day 付近と 1.0/day 付近に大きなエネルギーが存在する。これに対し、水位は長周期の風の変動には応答しているが、短周

期の変動に対しては応答していない。図 10 は、図 9 と同様に 1 ヶ月毎の風速と水位のスペクトルを求め、その比として算出した応答関数の周波数分布を、12 ヶ月分同時に示したものである。ここで、水位のスペクトルは対象とする風に起因する成分以外のエネルギーを含んでいるため、風のエネルギーのない周波数帯でも水位のスペクトルは有意な値を示している。この時応答関数は、風のスペクトルを分母として計算するため、大きな値となる。そこで応答関数を図 10 の計算結果の下限値と考えると、太線の様になり、長周期成分に対する応答が大きいことが分かる。

風の吹寄せによる水位の上昇は、沿岸部に鉛直方向の循環流が発生することにより発生すると考えられている。したがって、対象とする海域が大きいと、吹寄せ効果が十分発達するのにある程度の時間を要すると考えられる。このため、短時間の風速の変動に対する水位の応答が小さく、また、風が吹き始めてから完全に吹寄せ効果が発達するまでに時間遅れが生じるものと考えられる。

本モデルでは、風に対する水位の応答として、図 10 に太線で示した周波数依存の応答関数を適用した。ただし、周波数領域で表現された応答関数

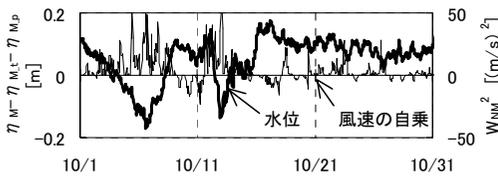


図 8 水位と風速の時系列

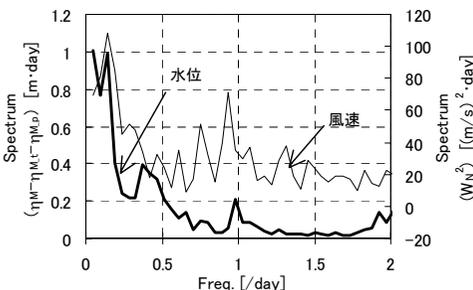


図 9 水位と風速のスペクトル (10月)

を時系列解析に適用するため、インパルス応答関数を用いている。図 11 に、本モデルで採用したインパルス応答関数を示す。インパルス応答関数は応答関数の周波数分布の積分値として求められるが、この際、周波数毎の位相が必要となる。ここでは、周波数毎の位相を評価することが困難なため、全周波数で位相を同一とし、ステップ関数で与えた風に対する水位の応答が、32 時間遅れるように位相を調整した (図 12(a)参照)。この 32 時間は、風と水位の観測結果の比較から求めた値である。図 11 に示したインパルス応答関数の特性を確認した例を、図 12 に示す。図 12(a)は、風速が 0 から 10m/s に急変した場合の水位の応答特性を示しており、図 12(b)(c)は、12 時間と 48 時間の周期変動をする風速に対する応答をそれぞれ示している。図 12 によれば、風速の急変に対して水位の応答が遅れる現象と、長周期の変動に対する応答が大きく、短周期の変動に対する応答が小さい現象を良く再現できていることが分かる。

### 3.2.5 季節変動

図 13 は、黒海側の水位の観測値から、上述のモデルにより求めた潮汐成分、気圧成分、風成分を除いたものである。季節変動  $\eta_{B_s}$  は、年間を通して

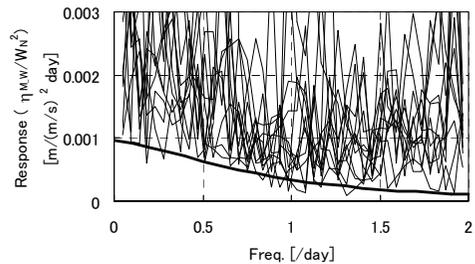


図 10 風による水位の応答関数

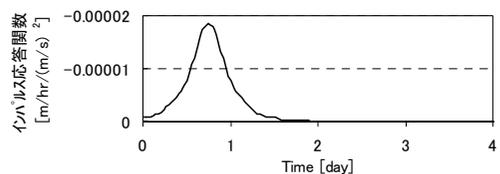


図 11 インパルス応答関数

の長期的な変動と考えられるため、図 13 から 30 日の移動平均により季節的な変化を求めると、太線の様になる。これによると、4月から上昇ははじめ、6月をピークとして9月まで水位が比較的高い状況が続いていることが分かる。これは、黒海に流入する雪融け水の影響であり、この影響により、夏季は比較的速い流速が継続的に続いている。ここには黒海の場合を示したが、マルマラ海側でも同様の現象が確認された。なお、季節変動は年毎に違うため、実際の予測では後述するように、その時の観測値から値を求める。

### 3.2.6 水位モデルのまとめ

図 14, 15 に、本モデルによる水位の再現計算の結果を示す。風と気圧の 1 年間の観測結果を入力として、上述のモデルにより算出した潮汐、気圧、風、季節変動の各成分を足したものを、観測結果と比較したものである。図 14 によれば、本モデルにより、数日の間に 20cm 以上水位の変動する現象を、精度良く再現できていることが分かる。

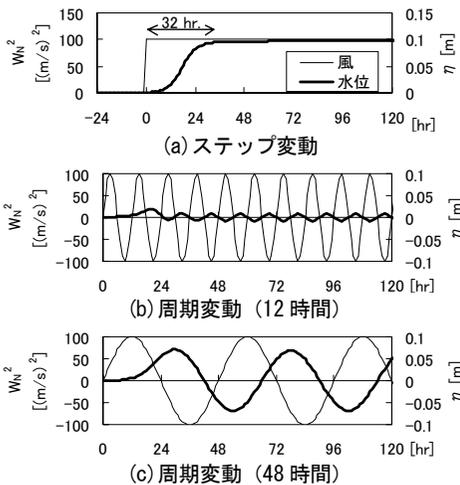


図 12 応答関数による水位の応答特性

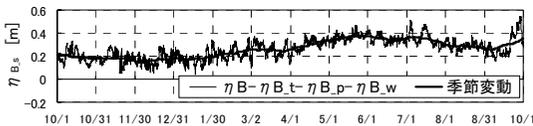


図 13 季節変動成分 (黒海側)

図 14(b)では、観測結果よりも計算結果の方が、水位が低くなる場合がある。これは、黒海からの流入量をモデルが考慮していないためと考えられる。気圧や風の影響によりマルマラ海側の水位が低下した場合には、黒海からの流入が大きくなり、マルマラ海の水位が上昇する。このため、実際の現象では本モデルの再現値ほど、水位の低下が顕著でないと考えられる。しかし、本モデルにおいてこの影響を取り込むと、一部でマルマラ海側の水位を高く見積もり、水位差が小さくなるために流速が小さくなる場合があった。本予報システムの主な目的は、急流現象を予め把握することであり、流速を小さく見積もることは危険側の結果となる。また、この黒海からの流入の影響が顕著となる現象は、年に数回の頻度であることから、本モデルではこの影響を考慮しないこととした。

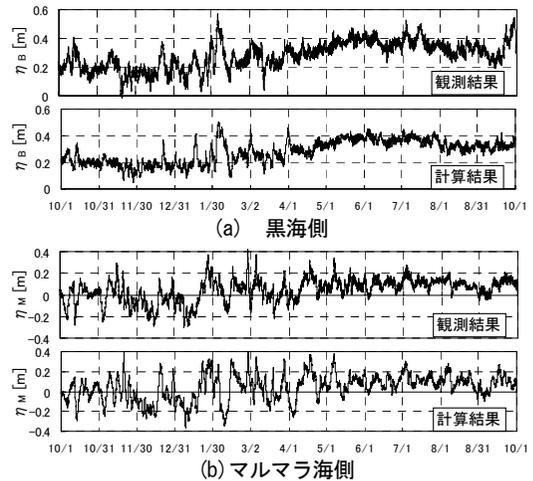


図 14 水位モデルによる水位変動の再現

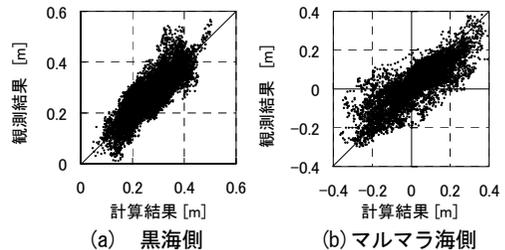


図 15 水位の観測結果と計算結果の比較

### 3.3 流況モデル

#### 3.3.1 水位差と流速の関係

河川や水路では、流速は水位差の関数であると考えることができる。トンネル施工位置での流況においても、前述の図 5(b)の観測結果に示すように、海峡両端の水位差 $\Delta\eta$ と非常に高い相関があることが明らかとなっている。そこで観測結果をもとに、流速を水位差の関数としてモデル化した。以下では、例として St.B の水深 7m の流速について示す。図 16 は、図 5(b)に示した結果について、24 時間の移動平均により短周期の成分を取り除いたものである。図 5(a)に示した数値シミュレーションの結果を参考に、水位差と流速の関係が図 16 に示す 1 本の曲線で与えられると仮定する。水位差と流速は 1 対 1 の関係になるため、この $\Delta\eta-u^*$ 曲線により、水位差から流速を算出することができる。図 17 に、観測された水位差から上述の関係を用いて計算した流速と、流速の観測値を示す。モデルによる計算結果は観測値の変動を再現しているものの、両者には“ずれ”が生じている。図 16 において、観測結果はある程度の幅を持って分布しているが、これは計測誤差等によるばらつき

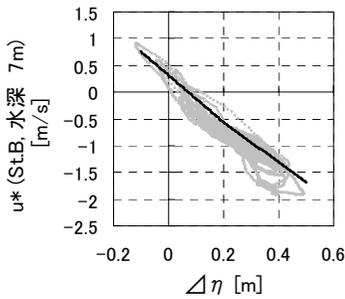


図 16 水位差と流速の関係

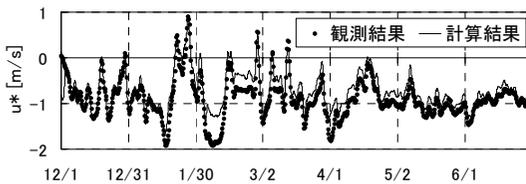


図 17 流速の再現結果 (補正なし)

ではなく、意味を持った“ずれ”であると考えられる。

#### 3.3.2 密度界面の影響のモデル化

図 16 に示した $\Delta\eta-u^*$ 曲線を用いることにより、図 17 とは逆に、流速から水位差を求めることができる。これを $\Delta\eta^*$ とし、実際の観測値 $\Delta\eta$ との差 $\Delta\eta_r$ を計算した結果を、図 18 に示す。1 本の $\Delta\eta-u^*$ 曲線は、定常的な流況場での、水位差と流速の関係を表わしていると考えられる。しかし実際は、同じ $\Delta\eta$ であっても海峡内の密度界面の形状が異なるため、流況は一意に決まらない。これが $\Delta\eta_r$ が生じる原因と考えられる。

図 18 によれば、 $\Delta\eta_r$ は日単位の短期の変動と、数十日単位の長期の変動に分けることができる。そこで、30 日の移動平均により、短期変動成分 $\Delta\eta_{r1}$ と長期変動成分 $\Delta\eta_{r2}$ に分離した。結果を図 18 に示す。本モデルでは、この $\Delta\eta_{r1}$ と $\Delta\eta_{r2}$ をモデル化することにより $\Delta\eta-u^*$ 曲線を補正し、水位差から流速を求める。

##### (1) $\Delta\eta_{r1}$ による補正

短期的な密度界面の動きとして、水位差が大きくなると、密度界面のフロントは流れにより南側に押し流される。しかし、この密度界面の動きは緩慢なため、水位差の上昇速度が大きいと、定常

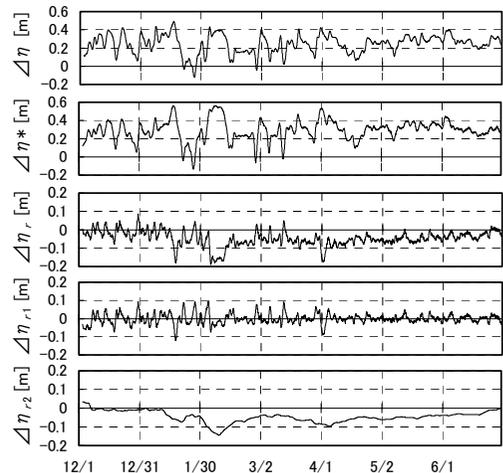


図 18 水位差の補正

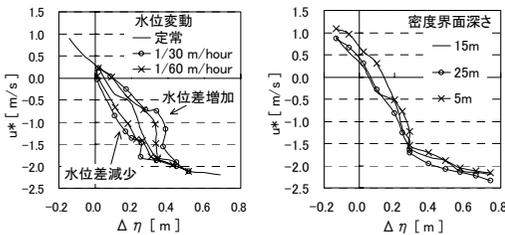
的な状況に比較してフロントの動きが遅れる。海峡全体で考えると底層の逆流の影響範囲が長くなるため、流速は小さくなる。逆に、短時間に水位差が小さくなる場合には、流速は定常の場合に比べて大きくなる。図 19(a)は、この現象を確認するため、数値シミュレーションを実施した結果である。図中には、定常計算により求めた水位差と流速の関係と、一定の割合で水位差を大きくした場合および小さくした場合の計算結果を示した。水位の変化時間は、1m あたり 30, 60 時間の 2 種類について計算した。これによると、水位が上昇する場合には定常計算に対して、 $\Delta\eta\text{-}u^*$  曲線が右側にシフトし、低下する場合には左側にシフトすることが分かる。また、そのシフト幅は、変化が急速なほど大きい。図 18 に示した  $\Delta\eta_{r1}$  は、このシフト幅と考えることができる。図 20 は、観測結果について、この  $\Delta\eta_{r1}$  と水位差の変化の割合  $\partial(\Delta\eta)/\partial t$  の関係を示したものである。水位の変化の割合が大きくなると  $\Delta\eta_{r1}$  は大きくなる傾向が表れている。本モデルでは、図 20 の関係を適用し、以下の式により  $\Delta\eta_{r1}$  を求める。

$$\Delta\eta_{r1} = 0.17 \frac{\partial(\Delta\eta)}{\partial t} \quad (\text{時間の単位は日}) \dots\dots (3)$$

(2)  $\Delta\eta_{r2}$  による補正

長期的な密度界面の動きとしては、マルマラ海側の流出部での密度界面の位置の変化が考えられる。3月以降、雪融け水の影響により淡水系の流入が増加し、マルマラ海側の密度界面の位置が深くなるのが過去の観測結果から明らかとなっている。図 19(b)は、南側境界の境界条件として与えた密度界面位置を、水深 5,15,25m と変化させて定常計算を行った結果である。界面位置が深くなると  $\Delta\eta\text{-}u^*$  曲線が左側に、低下する場合には右側に計算結果がシフトすることが分かる。また、図 21 は、12月と4月の、水位差と流速の関係を示したものであるが、12月に比較して4月は左側にシフトしており、これはマルマラ海側の界面が深くなる現象に一致する。

予測モデルにおいて、 $\Delta\eta_{r2}$  をこのマルマラ海側の密度界面の深さと関連付けてモデル化するためには、この密度界面を連続的にモニタリングする必要がある。しかし、密度の鉛直分布を連続的に計測するのは困難なため、本モデルでは流速と水位差のモニタリング結果から、その時の  $\Delta\eta_{r2}$  を算出し、これを一定値として将来の  $\Delta\eta_{r2}$  とした。実際には、 $\Delta\eta_{r2}$  は緩やかに変動していると考えられるが、本システムで目的としている予測時間は 2 日程度であるため、この予測時間内には大きく変動することはないとした。



(a) 水位差変動の影響 (b) 密度界面深さの影響  
図 19 数値シミュレーションによるモデルの確認

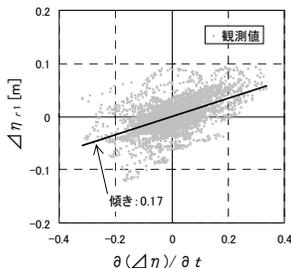


図 20 水位変化の割合と  $\Delta\eta_{r1}$  の関係

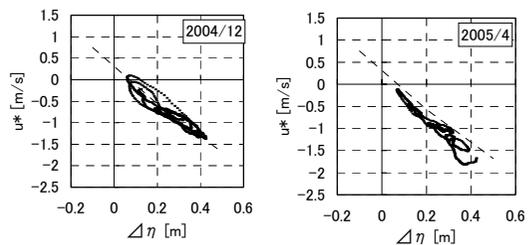


図 21 水位差一流速関係の季節変化

### 3.3.3 水位差の補正による流況モデル

上述の流況モデルをまとめると、以下の様になる。水位差 $\Delta\eta$ に対し、流況予測のための補正值、 $\Delta\eta_{r1}$ および $\Delta\eta_{r2}$ を求める。 $\Delta\eta_{r1}$ は、式(3)により水位差から求められる。 $\Delta\eta_{r2}$ は、式(4)に、過去の流速および水位差の観測値から図16に示す $\Delta\eta-u^*$ 曲線により求めた $\Delta\eta^*$ を代入することにより算出し、数日の間は一定と仮定する。

$$\Delta\eta = \Delta\eta^* + \Delta\eta_{r1} + \Delta\eta_{r2} \dots\dots\dots(4)$$

式(4)により、将来の $\Delta\eta^*$ が求められるため、これを用いて $\Delta\eta-u^*$ 曲線により流速を予測する。以上の流況モデルにより、図17の流速を改めて算出したものを図22に示す。図17に比較して、モデルの計算精度が向上し、水位差の補正による本モデルの有効性が検証された。

$\Delta\eta_{r2}$ の算出には過去の流速値が必要となる。本予報システムでは、トンネルライン近傍に代表点を設定し、ここに流速計を設置して $\Delta\eta_{r2}$ を算出する。トンネルライン上では、横断方向に約130m毎、水深方向に1m毎に $\Delta\eta-u^*$ 曲線を作成し、この各点で $\Delta\eta_{r2}$ は一定と仮定して海峡横断面における流速分布を求める。この妥当性を検証するため、St.Cを代表点としてトンネルライン上の別の点での流速を算出した結果を、図23に示す。図23は、ト

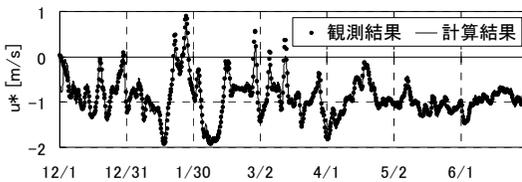


図22 流速の再現結果 (補正あり)

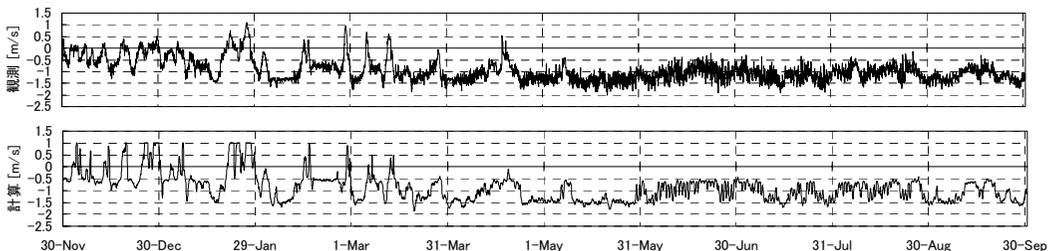


図23 流速の再現結果 (トンネル中央)

ンネル中央付近の、表層15mの流速の平均値を示したものである。St.Cからは、約800m離れているにもかかわらず、本モデルにより流速を精度良く再現できていることが分かる。また、トンネルライン上のほかの位置についても、全断面で同様の精度が確認されている。

### 3.4 予報システム

本モデルでは入力値として、海峡両端の水位、気圧、風向風速、およびトンネル近傍の代表点における流速を、オンライン計測により随時取得する。また、気象サービスから、将来の気圧、風の予報値を取得する。以下に、流況予報システムの計算手順の概略について述べる。

- 1)過去の気圧、風の観測値から、水位の各成分を算出する。水位の観測値から、これらの成分および潮汐モデルを除いて、季節変動成分を求める。
- 2)季節変動成分は一定とし、残りの水位成分を気圧、風の予報値から算出し、将来の水位変化を予測する。
- 3)過去および将来の水位から水位差を求め、その時の $\Delta\eta_{r1}$ を式(3)により算出する。
- 4)過去の流速の観測値から、 $\Delta\eta-u^*$ 曲線を用いて過去の $\Delta\eta^*$ を求め、前記の過去の $\Delta\eta_{r1}$ の値とともに式(4)により過去の $\Delta\eta_{r2}$ を計算する。
- 5)  $\Delta\eta_{r2}$ は一定とし、これと将来の $\Delta\eta_{r1}$ から将来の $\Delta\eta^*$ を求め、 $\Delta\eta-u^*$ 曲線により将来の流況予報値を計算する。

## 4. 予報システムの検証

構築した予報システムにより流況を予測した結果を、図 24, 25 に示す。例として 2006 年 9 月 9 日 AM3:00 発表の気象予報をもとに、翌日までの 48 時間の流況を予測した結果を示した。図 24 には、トンネル中央付近の表層 15m の平均流速について、予測した流速と船舶搭載型の ADCP により実際に計測した流速から算出した結果を示している。また、図 25 は、9 月 10 日 PM3:00 の断面流速の予測結果と ADCP による断面計測結果を比較したものである。

沈設は、表層 15m の平均流速を 1.5m/s 以下として計画しており、流速がこれを越えた場合は中止する必要がある。図 24 によれば、9/9 の平均流速は 1.0m/s 程度であり沈設可能な状況であった。しかし翌日には 2.0m/s まで流速が増加しており、沈設不可能な流況となっている。沈設を一旦開始すると、函体着底までの一連の作業は途中で中止できない。沈設を開始する前に、予め流況を予測し、必要時間内に流速が設定値を越えないことを確認する必要がある。したがって本予報システムは、

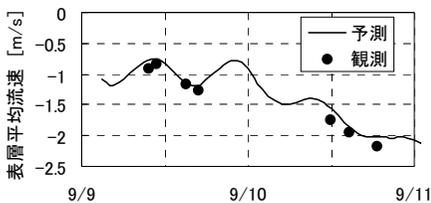


図 24 流況予測結果

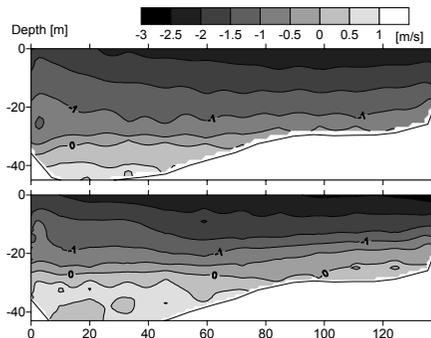


図 25 流況の予測と観測の比較

施工の可否判断のために重要な役割を果たす。

## 5. おわりに

本研究では、流況変動の大きい二層流場における沈埋トンネルの施工を支援するため、流況予報システムを構築した。海峡両端の水位は、気圧と風に対する水位の応答を、観測結果をもとにモデル化した。流況は海峡両端の水位差の関数とし、これに密度界面の位置に基づく補正を加えるモデルを構築した。実際の流況予測においては、水位や流況をオンラインで取得し、気象サービスから入手する気圧と風の予報値をもとに、将来の流況を予測する。本モデルにより、トンネル断面における流況を精度良く予測することが可能となった。

なお、既に本流況予報システムは稼動中であり、毎日の工事計画に活用されている。流況の予測値は、オンライン計測結果をもとに 1 時間に 1 回更新され、インターネットを通じて各関係者に配信される。今後、予測の精度をより高めるため、観測結果をもとにモデルの改良を進める予定である。

## 引用・参考文献

- 1) 織田幸伸・伊藤一教・上野成三・勝井秀博・東江隆夫・小山文男・栄枝秀樹: ポスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況観測と流況解析, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1421-1425, 2005.
- 2) 須賀堯三・高橋 晃: 感潮河川の塩水くさびの水理, 土木研究所報告, 第 160 号, 1983.
- 3) 森平倫生・片岡信二・安井誠人・川原陸人・長谷川賢一: 有限要素法による淡水海水二層流域の潮流と水質の解析, 第 24 回海岸工学講演会論文集, 土木学会, pp.452-456, 1977.
- 4) 岩佐義朗・井上和也・田中 靖: 河口感潮域の流れと拡散の数値シミュレーション, 京大防災研年報, 第 25 号 B-2, pp.585-596, 1982.

- 5) Arisoy, Y. and Akyarli, A.: Long Term Current and Sea Level Measurements Conducted at Bosphorus, The Physical Oceanography of Sea Straits, pp.61-93, 1989.
- 6) Hüseyin YÜCE: Water Level Variations in the Sea of Marmara, Oceanologica Acta, Vol.16-4, pp.335-340, 1993.
- 7) 織田幸伸・伊藤一教・高山百合子・上野成三・栄枝秀樹: ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事の施工支援ツールとしての3次元流動シミュレーション, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp.903-908, 2005.
- 8) Ministry of Transport and Communication, Turkey : Feasibility Study and Preliminary Designs, Bosphorus Railroad Tunnel and Istanbul Metro System Project, Bosphorus Railroad Tunnel, Hydrographic survey, 1985, 1986.
- 9) 土木学会 : 海岸施設設計便覧, p.71, 2000.

## 著者紹介



織田 幸伸 (正会員)

大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所 (神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1), 昭和44年生まれ, 平成5年3月名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年4月大成建設株式会社に入社, 現在同社技術センター土木技術研究所勤務, 土木学会会員。

E-mail: od-ykn00@pub.taisei.co.jp

http://www.taisei.co.jp



伊藤 一教

大成建設 (株) 国際事業本部 (東京都新宿区西新宿6-8-1), 昭和41年生まれ, 平成3年3月岐阜大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年4月大成建設株式会社に入社, 現在同社国際事業本部ボスポラス海峡横断鉄道工事作業所勤務, 工学博士, 土木学会会員。

E-mail: kitoh@taisei.com.tr

http://www.taisei.co.jp

## Forecast Method of Two-layer Current System Considering Dynamic Variations

Yukinobu ODA and Kazunori ITO

**ABSTRACT** : The Bosphorus tube tunnel, which is constructed under the Bosphorus strait by the immersed tunnel method, is under construction in Istanbul, Turkey. It is well known that the Bosphorus strait has two-layer current system and its current situation changes rapidly. To keep quality and safety of installation of the tunnel elements, it is important to know the current situation in the immersion process before its practice. In this study, the current forecast system is developed to provide the current information required in the immersion process. The system consists of the water level forecast model and the current forecast model. The water level is forecasted from air pressure and wind, which are obtained from on-line monitoring and meteorological service. The current is forecasted from the water level, taking the density interface into consideration. The system is already under operation and it gives good current information for marine works.

**KEYWORDS** : *two-layer flow, current forecast, immersed tunnel, the Bosphorus strait*