

ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事における流況予測モデルのシステム化と精度検証

SYSTEMATIZATION OF THE CURRENT FORECAST MODEL IN THE RAILWAY BOSPHORUS TUBE CROSSING CONSTRUCTION

織田幸伸¹・伊藤一教²・上野成三³・小山文男⁴・栄枝秀樹⁵

Yukinobu ODA, Kazunori ITO, Seizo UENO, Fumio KOYAMA and Hideki SAKAEDA

¹正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²正会員 博(工) 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

³正会員 博(工) 大成建設(株)技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

⁴正会員 大成建設(株)ボスポラス海峡横断鉄道トンネル建設工事

⁵(株)パシフィックコンサルタンツインターナショナル プロジェクトマネジメント事業部
(〒206-8550 東京都多摩市関戸1丁目7番地5)

The Bosphorus tube crossing in Turkey is constructed in the two-layered and very fast current. To ensure the safety and accuracy of the tunnel immersion, the current forecast models have been developed based on the observation results. In this study, these models are systematized and their reliability is estimated. The forecast system consists of two systems, the water level forecast system and the current forecast system. The former includes wind, air pressure astronomical tide and seasonal effect. The latter is calculated from the water level difference between the both sides of the strait considering the stratification effect.

The system is mainly used for the "Go/No go" decision of the immersion work. According to the validation with the past monitoring data, the 90 % confidential range, which includes meteorological forecast error and model error, is almost 0.4 m/s. In the same period of that monitoring, the "Go" decision went well in 90 % using the forecast directly, in 100 % considering the 90 % confidential range.

Key Words : The Bosphorus strait, forecast, two layer current, marine work, immersion tunnel

1. はじめに

現在, 沈埋トンネルを施工中のトルコのボスポラス海峡は, 黒海からの淡水系の流れとマルマラ海からの塩水系の流れによる二層流となっていることが知られている. また, 表層の流れは不規則で変わりやすく, ほぼ流れのない状態から, 1日で2m/sを越える流れへと急変する場合もある. この様な複雑な流況下で, 沈埋トンネルを安全に精度良く施工するためには, 施工に先立って水域の流況を精度良く予測する必要がある.

著者らは既に, 1年以上の長期にわたる流況, 水位, 風および気圧の連続観測¹⁾と数値シミュレーションによる流況解析²⁾を実施し, それに基づいて水位予測モデル, 流況予測モデルを構築した³⁾. 本論では, これらのモデルをシステム化し, 過去のデータを用いてその精度について検証した結果を示す. また, 本システムを用いてトンネル沈設実施の可否判断をした場合の正答率と, 判断の方法についても言及する.

2. 流況予報システム

(1) 流況予報システムの概要

本システムは, 現在の流況や気象の状況をリアルタイムで取得するオンライン観測システムと, これを初期値として, 気象予報サービスから取得する気象予報をもとに今後の流況変化予測を算出する予測システム, 予測結果を配信する流況情報配信システムの3つのシステムからなる. 各システム間のデータ転送や, データ処理は全て自動化されており, 24時間, いつでも最新の情報が取得できる(図-1参照). 以下に各システムの詳細と, システムにおけるデータの流れを示す.

(2) オンライン観測システム

図-2に, ボスポラス海峡とトンネルの施工位置, オンライン観測の観測位置を示す. 観測項目は, 海峡両端における風, 気圧, 水位およびトンネルライン上の代表点における流速の鉛直分布である. 流速は, 海底設置型のドップラー多層流速計により計測

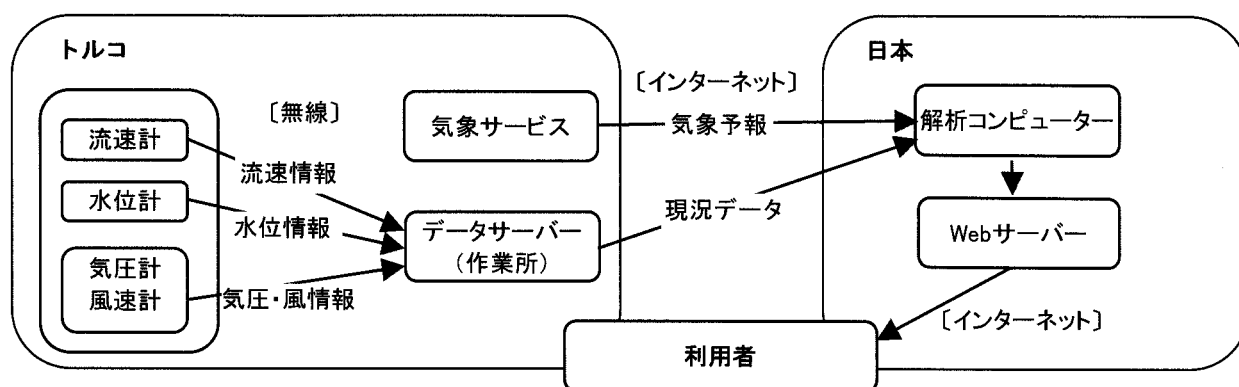


図-1 システムのデータの流れ

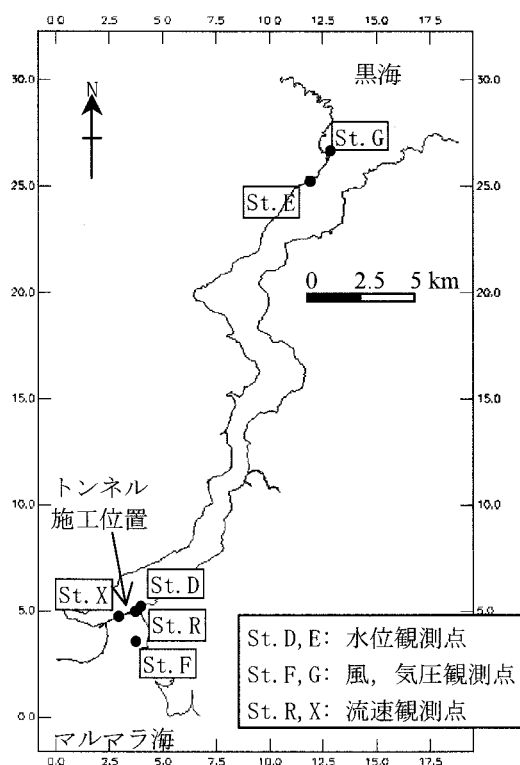


図-2 トンネル施工位置と観測点

している。各計測結果は、逐次無線により現地事務所に設置したデータサーバーに伝送される。観測の頻度は1時間毎とした。

(3) 予測システム

流況予測の解析システムは、メンテナンスの観点から日本に設置した。流況予測には、現況の代表点における流速(St. R)および海峡両端における水位(St. D, St. E)、風、気圧(St. F, St. G)の観測結果と、将来の風、気圧変化の予測値が必要である。前者は現地の観測データサーバーからインターネットを介して、予測システムに逐次データを取り込む。後者は、Eメールにより、トルコの気象サービスから1日2回、48時間の予報値が送られてくる。

予測システムは、観測値を初期値として、気象予報値をもとにその後の流況の変化を予測する。観測

値は1時間に1回更新されるため、予測値も1時間に1回更新される。予測モデルの詳細については後述する。

(4) 流況情報配信システム

予報システムは、流況情報配信システムの持つデータベースへ、観測値と予報値を直接登録する。流況情報配信システムは、これらのデータをもとに様々な形式のグラフや図を作製し、インターネット(WWW)を通じて関係者に配信する。

3. 予測モデル

予測システムは、まず海峡両端の水位を水位モデルに基づいて予測し、その水位差から流況モデルを用いて流況を予測する。各モデルの詳細については、参考文献³⁾を参照されたい。ここでは、具体的なデータ処理の流れについて示す。

予測システムのデータ処理の流れを図-3に示す。水位モデルは、風成分 η_w 、気圧成分 η_p 、潮汐成分 η_t 、季節変動成分 η_s の4つの成分の足し合わせで表わされており、それぞれは独立したモデルとなっている。

$$\eta = \eta_w + \eta_p + \eta_t + \eta_s \quad (1)$$

まず、現時点での各成分を求める。風成分と気圧成分は、風と気圧のそれまでの気象観測値から、現時点での値が求められる。潮汐成分は、あらかじめ長期観測結果から求められた調和定数を用いて、任意の時間の値が求められる。季節変動は、水位の観測値から風、気圧、潮汐成分を引いたものとして求められる。したがって、季節変動は、モデルや観測の誤差を含んだものとなっている。将来の値についても同様のモデルにより、風成分と気圧成分がそれぞれ風と気圧の気象予報値から、潮汐成分が調和定数から求められる。季節変動成分については、数日の間に大きく変動することはないとして、現時点の値を一定値として与える。以上の様に将来の水位変動を求め、海峡両端の水位差の予測値を計算する。

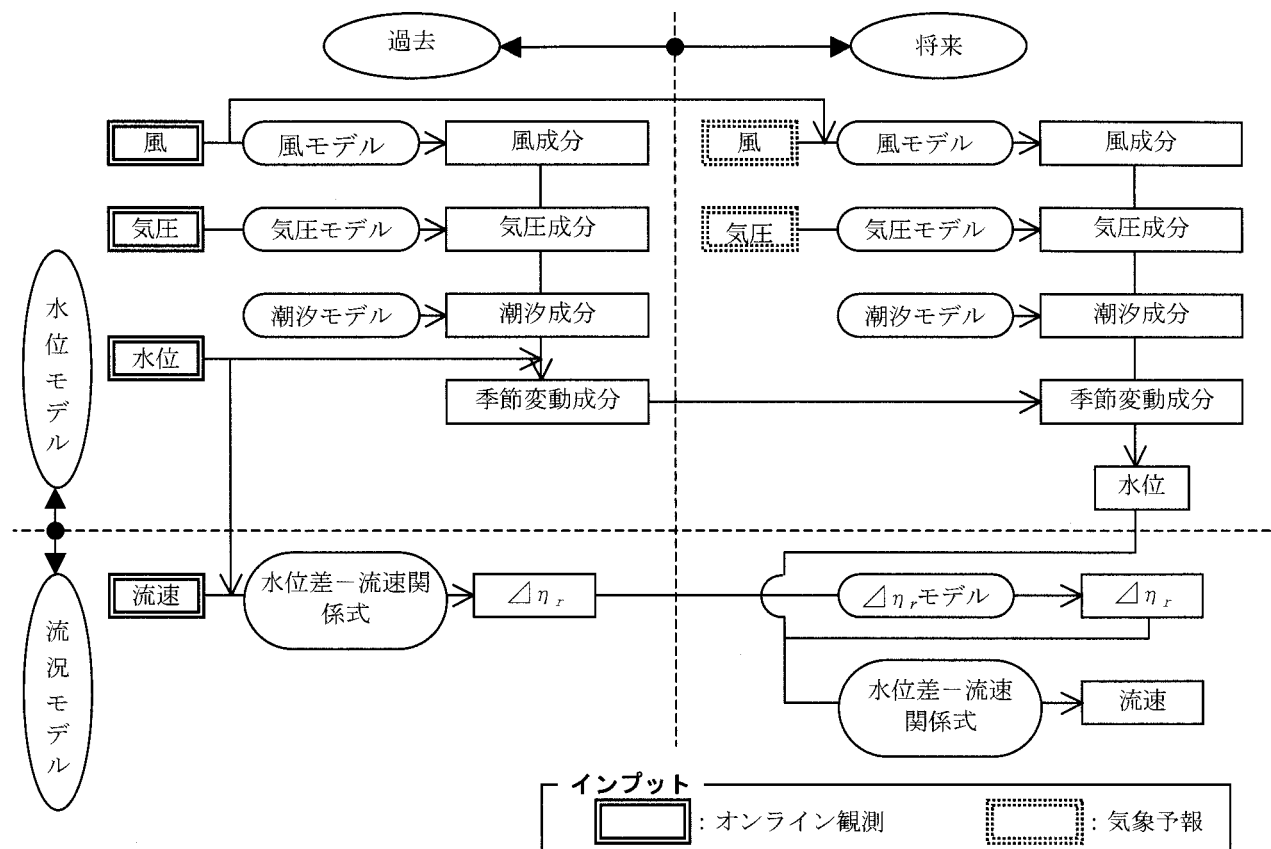


図-3 予測システムのデータ処理フロー

流況モデルは、水位差と流速の関係式を長期観測結果に基づいて定義し、これにより上述の水位差から流速を求める。ただし、二層流の影響を取り込むため、この時の水位差として見掛けの水位差という概念を導入した。このため、流況モデルは以下の様に、流速 u と水位差 $\Delta\eta$ 、その見掛けの水位差に対する補正值 $\Delta\eta_r$ の関係式により表わされる。

$$u = f(\Delta\eta - \Delta\eta_r) \quad (2)$$

水位差と流速は観測値が得られるため、式(2)を用いて $\Delta\eta_r$ の現在の値を求めることが出来る。この値を初期値として、将来の $\Delta\eta_r$ を求める。 $\Delta\eta$ の予測値は既に上述の方法により求められているので、これと $\Delta\eta_r$ の予測値を用いて式(2)より流速 u の予測値を求めることが出来る。

4. 予測モデルの検証

(1) 水位予測モデル

2006年4月15日から2006年6月30日まで、予報システムを試験運用した。その結果に基づいて予測精度を検証した結果を以下に示す。

図-4は、この期間の黒海側水位 η_B 、マルマラ海側水位 η_M および水位差 $\Delta\eta$ の観測結果と予測結果の時系列である。ここで予測値は、毎日のAM3:00 (GMT±0)の時点の24時間の予測値を繋げることによって連続データとしたものである。また、観

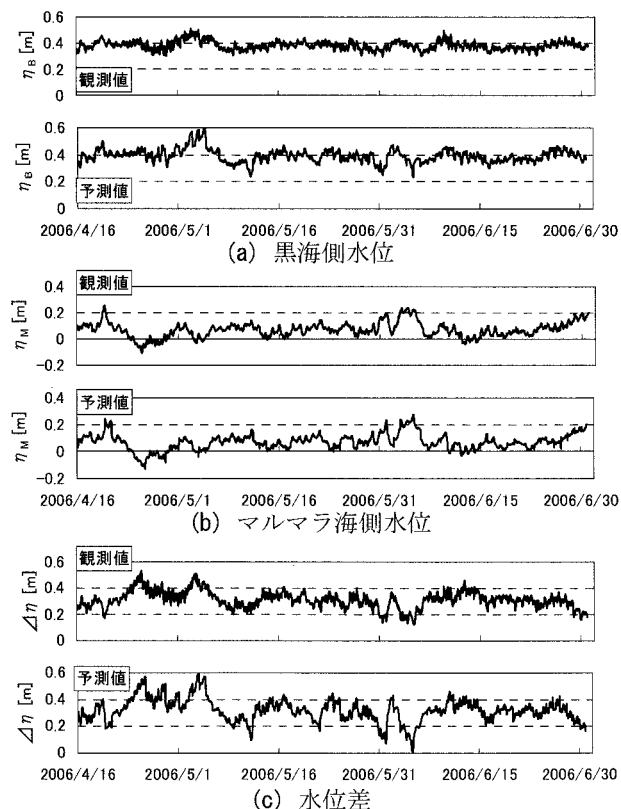


図-4 水位の観測結果と予測結果

測値と予測値を比較したものを図-5に示す。これらによると、水位の変動幅は黒海側よりもマルマラ海側の方が大きいことが分かる。これまでの観測結果

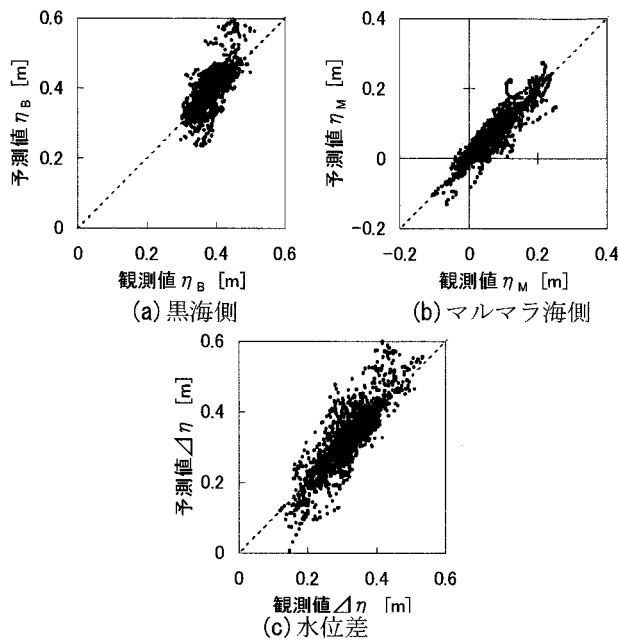


図-5 水位の観測値と予測値の比較

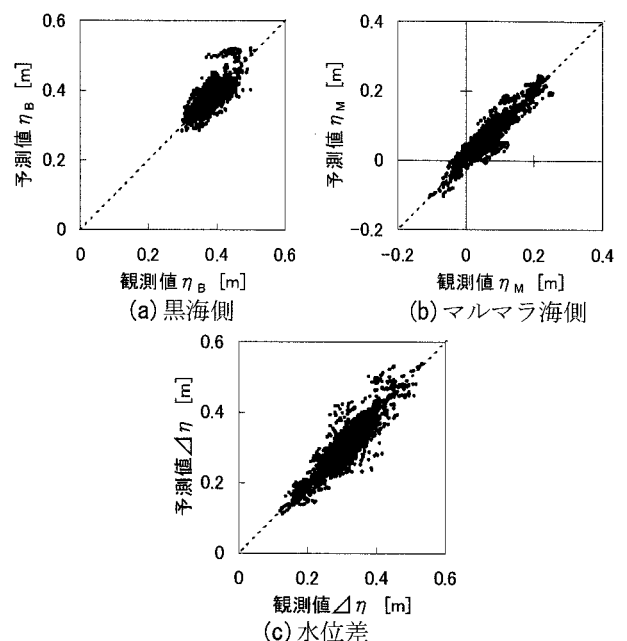


図-7 水位の観測値と予測値の比較（気象観測値使用）

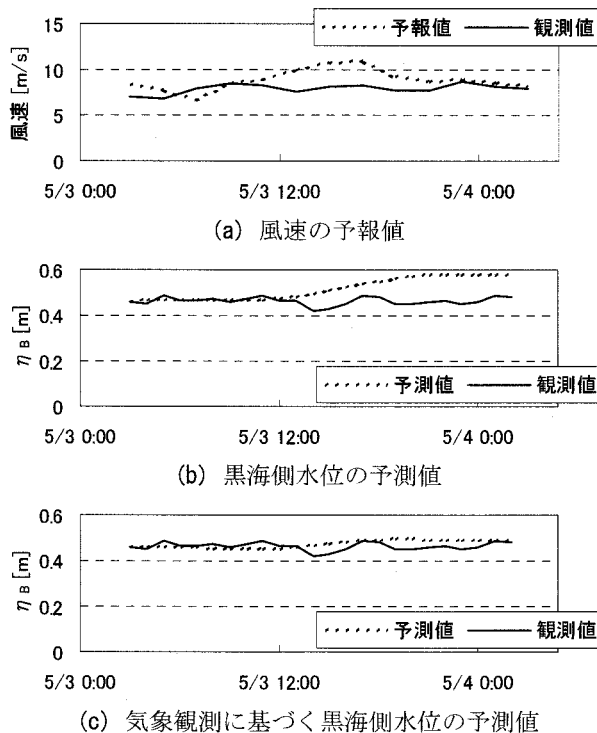


図-6 黒海側の水位予測の例

から、黒海側の水位は主に風の吹き寄せ効果によって変動し、マルマラ海側の水位は風と気圧の影響を受けて変動することが分かっている。また、両者の風による変動は同程度であるため、気圧の影響を受ける分、マルマラ海側の方が変動が大きいと考えられる。しかし、両者の誤差（＝予測値－観測値）の標準偏差を比較すると、黒海側が3.4cm、マルマラ側が2.5cm（表-1参照）とマルマラ海側の方が小さい。風による変動はその風向きや継続時間などにより複雑に変動するためモデルの誤差が大きい、気

表-1 気象データの違いによる誤差の標準偏差の比較

	黒海側	マルマラ海側	水位差
気象予報値を使用	0.034	0.025	0.047
気象観測値を使用	0.024	0.022	0.032

単位:m

圧による変動は比較的ゆっくりとした変動であり、気圧との相関も高くモデルの誤差も小さい。したがって気圧成分の割合の大きなマルマラ海側の方が、黒海側よりも誤差が小さいものと考えられる。

図-6に、比較的予測誤差の大きな例として、5月3日の黒海側水位の予測値を示す。図中にはその時使用した風速の予報値も示した。なお、気圧については予報値と観測値はほぼ一致している。この時の風速の予報値は実際よりも大きな値であったため、吹き寄せ効果を過大に評価し、予測値が観測値よりも大きくなった。そこで、風の予報値の代わりに実際の観測値を使用して予測をし直したものを図-6(c)に示す。風の入力値が正しければ、水位をほぼ正しく予測できたことが分かる。同様に、図-7は、図-5と同じ図を、気象予報値ではなく気象観測値を使用して算出し直したものである。図-7と図-5を比較すると、全体のばらつきはあまり変わらないが、大きな誤差が発生しなくなることが分かる。

表-1は、予測値と観測値の差を誤差として、その標準偏差を示したものである。気象データとして予報値を使用した場合と観測値を使用した場合の値を示した。これによれば、上述した様にマルマラ海側よりも黒海側の方が誤差の大きいことが分かる。

黒海側とマルマラ海側では風に対する水位の変動が逆であり、例えば、北風によって黒海側水位は上昇し、マルマラ海側水位は低下する。したがって、

気象予報の誤差の影響は水位差にもっとも大きく表れる。図-4によれば、水位差はおよそ0.1mから0.5mの間を変動しており、誤差の標準偏差は4.7cmと変動幅の1割を越える。気象予報値の代わりに気象観測値を使用した場合、誤差の標準偏差は、2/3程度の3.2cmになっている。水位差には、気象予報の誤差が大きく影響していると言える。

(2) 流況予測モデル

次に、流況予測モデルの精度について言及する。ここでは流速の代表値として、St. Rの水深7mにおける流速についてその精度を検証する。図-8は、流速の観測結果と予測結果の時系列を図-4と同様に示したものである。ここで u^* は、流速の絶対値に北流は+、南流は一符号を付けたものである。また、観測値と予測値を図-5と同様に比較したものを図-9(a)に示す。

図-8によれば、予測値は観測値の変動の傾向を良く表わしている。しかし、観測値の方が予測値よりも流速のばらつきが大きく、特に、流速が小さい時に顕著である。これは、流速が小さいときには内部波の影響や、様々な原因によって発生した乱れの影響が強く表れるためと考えられる。しかし、この乱れは不規則であるため、モデルに直接取り込むことは困難である。したがって、後述するように予測結果を評価する際に、モデルの誤差としてこの影響を考慮することとした。

一方、流速の予測値は水位差を入力として算出するため、水位差の予測値にすでに含まれている誤差の影響を受ける。図-10は、流速が1日で急激に大きくなった時の予測の例である。水位差の予測値と観測値を比較すると、水位差の上昇を過大に評価して

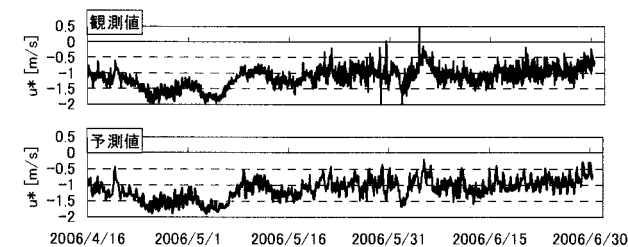
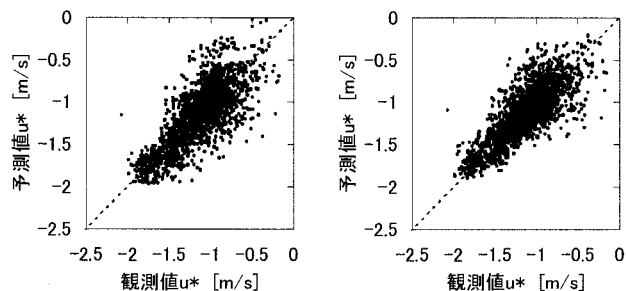


図-8 流速の観測結果と予測結果



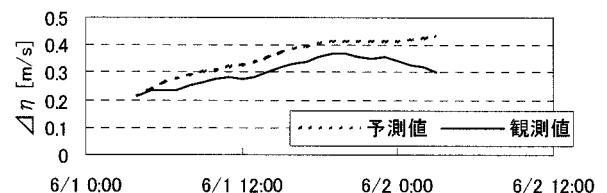
(a) 水位差の予測値を使用 (b) 水位差の観測値を使用

図-9 流速の観測値と予測値の比較

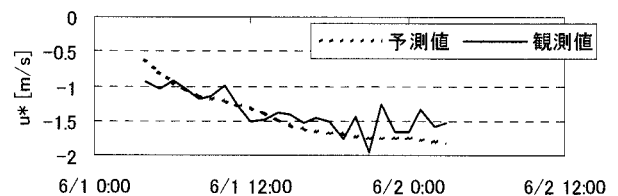
いることが分かる。この影響で、流速についても実際よりも大きな流速を予測した。水位差の予測精度の影響を取り除くため、水位差の観測値を入力として流速の予測計算をやり直した結果を図(c)に示す。これによれば、予測値が観測値を高い精度で再現できることが分かる。同様に、予測水位差の代わりに観測水位差を入力として流況予測をやり直した結果を図-9(b)に示す。図-9(a)と比較すると、特に流速の大きな場合に、誤差が小さくなり、ばらつきが小さくなっている。

表-2に、水位差の予測値を使用した場合と、観測値を使用した場合の流速予測誤差の標準偏差を示す。図-8によれば、流速はおよそ0.5から2m/sの間を変動している。これに対し、水位差の入力値として予測値を使用した場合と、観測値を使用した場合の誤差の標準偏差の違いは0.02m/sと非常に小さい。水位差の予測値のもつ誤差の標準偏差は、前述したように全体の変動幅の1割程度の大きさがあるが、その誤差が除去できたとしても、流況予測の誤差の程度は変わらないことが分かる。これは前述したように、流速においては短時間の間に変動する乱れの影響の方が、水位差の予測値の持つ誤差の影響よりも大きいと考えられる。

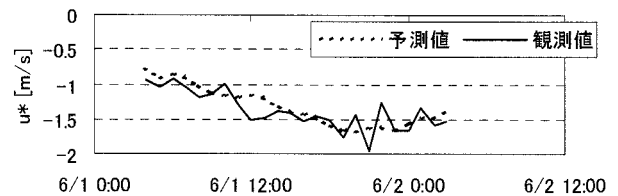
次に、予測誤差の程度について検討した結果を以下に示す。図-11は、流速の予測誤差について、ヒストグラムと正規分布に従うとして求めた確率密度



(a) 水位差の予測値



(b) 予測水位差に基づく流速の予測値



(c) 観測水位差に基づく流速の予測値

図-10 流速予測の例

表-2 水位差データの違いによる流速誤差の標準偏差の比較

予測水位差を使用	0.24
観測水位差を使用	0.22

単位:m/s

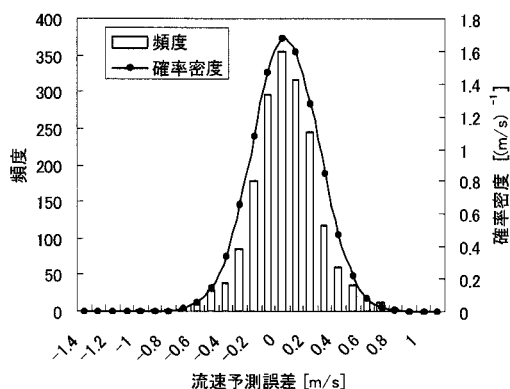


図-11 流速の予測誤差の分布

表-3 流速誤差の統計量

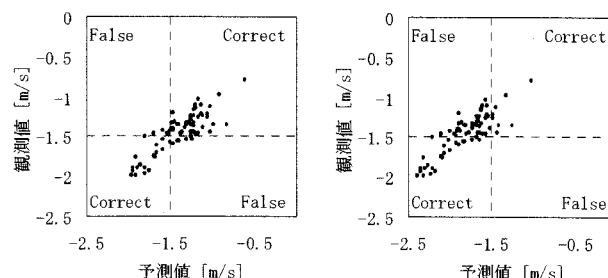
平均		-0.026
標準偏差		0.237
90%確率区間	上限	0.36
	下限	-0.42

単位:m/s

関数を示したものである。図-11によれば、流速の予測誤差は正規分布にほぼ従うと言える。そこで、これに従い流速の予測誤差の90%確率区間を算出した結果を表-3に示す。これによると、流速の予測値に対して0.42m/sの誤差を見込めば、ほぼ安全側の判断が出来ることが分かる。

5. 沈埋函沈設の可否判断への利用

本予報システムの主な目的は、沈埋函の沈設に先立って、沈設作業中に設定流速を越える流速が発生しないことを確認することである。図-12は、現時点から24時間先までの間の流速予報値の最大値と、実際に観測値から求められた、その間の流速の最大値を1日1回比較したものである。ここで、沈設可否判断の流速の基準値を1.5m/sとすると、図の点線よりも左側は沈設不可の判断をしたケースで、そのうち下側がその判断が正しかったケースである。右側は沈設可を判断したケースで、そのうち上側が判断の正しかったケースとなる。右下の部分が、沈設可と判断したにも関わらず、実際は不可だったケースだが、これは重大な事故に繋がる危険があり、回避する必要がある。図-12(b)は、上述の予測誤差0.42m/sを見込んで安全側の判断をした場合の図である。右下の領域に入るケースはなくなるが、沈設可を判断したケースが非常に少なくなり、稼働率が極端に低下する。表-4は、図-12に基づいて可否判断の正答率を算出したものである。予測結果をそのまま使用した判断でも、正答率は90%と非常に高いことが分かる。誤差を考慮した場合、沈設可の判断の正答率は100%になるものの、74日中8日しか沈設可能日がないことになる。したがって実際の判断では、上述のような単純な判断基準に加えて、流速が



(a) 誤差を考慮しない場合 (b) 誤差を考慮した場合

図-12 流速の観測結果と予測結果

表-4 沈設可否判断の正答率

(a) 誤差を考慮しない場合

		判断	
		沈設可	沈設不可
観測結果	沈設可	46日	6日
	沈設不可	5日	17日
正答率		90%	74%

(b) 誤差を考慮した場合

		判断	
		沈設可	沈設不可
観測結果	沈設可	8日	43日
	沈設不可	0日	23日
正答率		100%	35%

単位:m/s

上昇フェーズにあるのか下降フェーズにあるのか等の状況を総合的に検討して判断する必要がある。現在、システムの運用を通じて、誤差の特性等を確認しながら判断方法について検討中である。

6. おわりに

非常に複雑な流況を示すボスボラス海峡において、沈埋トンネルの施工を支援するための流況予報システムを開発した。本システムは、実際の流況をよく再現しており、沈設作業における有用な情報を提供できることが確認された。実際の沈設判断においては、気象予報の精度や乱れの影響を考慮する必要があり、実際の運用を通じて判断の精度を高めている。

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: ボスボ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) 織田幸伸, 伊藤一教, 高山百合子, 上野成三, 栄枝秀樹: ボスボ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, 第21巻, pp.903-908, 2005.
- 3) 織田幸伸, 伊藤一教: 二層流場の動的変動を考慮した流況予測手法の開発, 沿岸域学会誌 (Vol.19, No.4, 2007掲載予定) .