

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観測と流況解析

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*****

ボスポラス海峡は、4 kt を超える表層流と、逆向きの底層流の 2 層流となっていることが知られている。ここに沈埋トンネルを施工するにあたり、海峡の流況構造を把握するための流況観測を行った。観測結果の解析から、流速は海峡両端の水位差が支配的であること、またその水位差は風との相関が非常に強いこと、トンネル周辺の流況は、水面近くの南向き流れは東側で速く、底面の北向き流れは西側で速いことなどが明らかとなった。また、将来の流況予測を行うため、水位差に対する流速の変動特性、風に対する水位差の変動特性を解明した。

1. はじめに

現在、トルコ共和国のイスタンブールに、ボスポラス海峡を横断する鉄道トンネルを、沈埋トンネル工法により建設中である (図-1, 2)。ボスポラス海峡は、黒海からマルマラ海へと流れる 4 kt を超え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による 2 層流となっていることが知られている。このような複雑な流況下において沈埋トンネルを確実に施工するためには、ボスポラス海峡の流況構造とその変動特性を詳細に解明する必要がある。

ボスポラス海峡の流況については、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 (例えば Arisoy・Akyarlı, 1989)。しかしそれらは、海峡全体を対象にしたものがほとんどであり、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。本論では、流況及び気象の連続観測を行い、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検討した結果について報告する。また通常、トンネルライン上の鉛直断面流速の分布を時系列で取得することは困難であるが、これを周辺の定点観測の結果から内挿計算することにより算出するモデルについても記す。なお、本研究では流況構造を解明するため、ボスポラス海峡全体を対象に数値シミュレーションを行っている。この詳細については別の機会に報告する予定である (織田ら, 2005a; 織田ら, 2005b)。

2. 観測方法

ボスポラス海峡と計測点の位置及びトンネルライン周辺の水深を図-1 に示す。流速の鉛直分布を計測するた

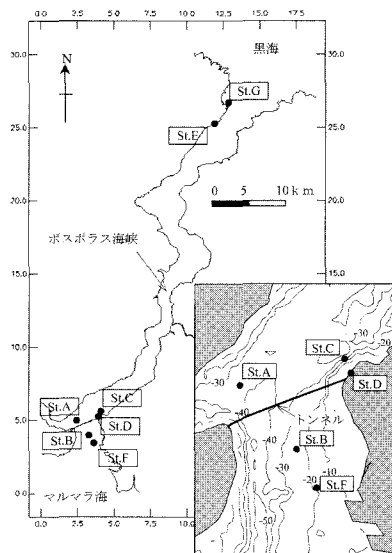


図-1 観測点

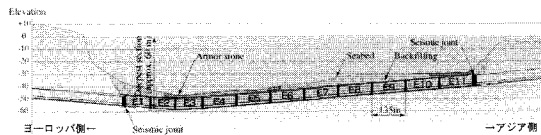


図-2 トンネル設置水深

表-1 流速計設置水深

観 測 点	St.A	St.B	St.C
設置水深[m]	35	26	30

め、トンネルを挟むように St. A, B, C の 3 点に海底設置型の ADCP を設置した。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、塩分計及び水温計を、St. F, G に風速計、気圧計を設置した。観測頻度は全て毎正時10分間とし、函体沈設作業開始前の 1 年間の長期連続観測を実施中である。また、トンネルライン上の流速の断面分布を、船舶搭載型の ADCP

* 正 会 員 工 修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
** 正 会 員 工 博 大成建設(株)国際支店
*** フェロー 博(工) 大成建設(株)技術センター土木技術研究所
**** 正 会 員 博(工) 沖縄総合事務局港湾計画課長
***** 正 会 員 工 修 大成建設(株)国際支店
***** (株)PCI

により1.5ヶ月に1回の頻度で計測中である。St. A～CのADCP設置水深を表-1に示す。

3. 観測結果

(1) 観測結果の時系列

図-3に観測結果の時系列の例を示す。図-3は、2004年10月から12月までの風速の南北成分 W_N 、気圧 P_a 、水位差 $\Delta\eta$ および流速 u^* の時系列を示したものである。ここで風速および気圧はSt. Fの値であり、水位差はSt. Eの水位からSt. Dの水位を引いたものである。また流速 u^* は、St. Bにおける水深8mでの値を示した。ここで流速は、式(1)に示す様に、その大きさと南北の方向性を表すため、絶対値に南北方向の符号を加えたものである。

$$u^* = \text{sign}(u_N) \sqrt{u_N^2 + u_E^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 u_N 、 u_E は流速の南北成分、東西成分である。以降、流速はこの符号付の絶対値の値を意味するものとする。なお、流速は北向きが+、風速は南向きが+である。

図中の矢印のイベントで示す様に、高気圧下の北風強風時において水位差が増大し、その結果南向きの流れが増加するという明瞭なパターンが読み取られる。北風が強くなると水位差が増大するのは、吹寄せ効果によりマルマラ海の南岸水位が上昇し、北岸の水位が低下するためと考えられる。東西方向の風についても同様の傾向が現れ、西向きの風が強くなると水位差が大きくなる。

(2) 流況特性

図-4は、2004年10月における、水面から8mの位置

と底面から3mの位置でのSt. Bの流速の分布図である。これによれば、流れの方向は、南向き、北向きのそれぞれではほぼ一定している。その他の計測点でもこの特徴が現れており、上述の式(1)により流れの特性を記述することが出来ることが分かる。

各計測点における流速の鉛直分布を図-5に示す。観測結果を解析すると、流速の鉛直分布は、強流時、常時および逆流時の大きく3つのパターンに分けられる。図-5(b)に示す常時は、水位差およそ0.1～0.4mの場合に現れるパターンで、St. A, Bの上層と下層で流向が逆転する2層流分布となっている。図-5(a)の強流時は、これよりも水位差が増大し流速が大きくなった場合で、全ての計測点で流向が水面から底面まで南向きとなる。別途行った数値計算では、この時フロント面の底端部がほぼトンネルラインまで南下しており、水位差の上昇とともにフロント位置がSt. A, Cよりも南に移動するため、底層の逆流が存在しなくなると考えられる。図-5(c)に

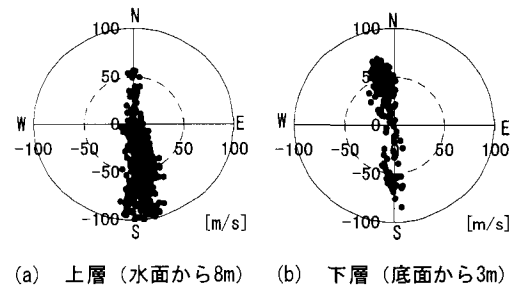


図-4 水平方向流速の分布 (St.B)

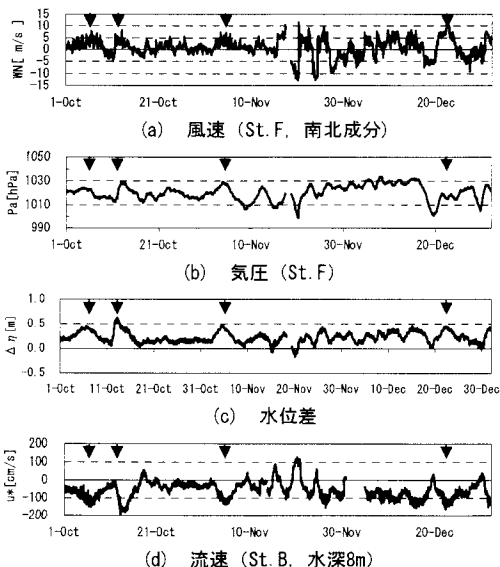


図-3 観測結果の時系列

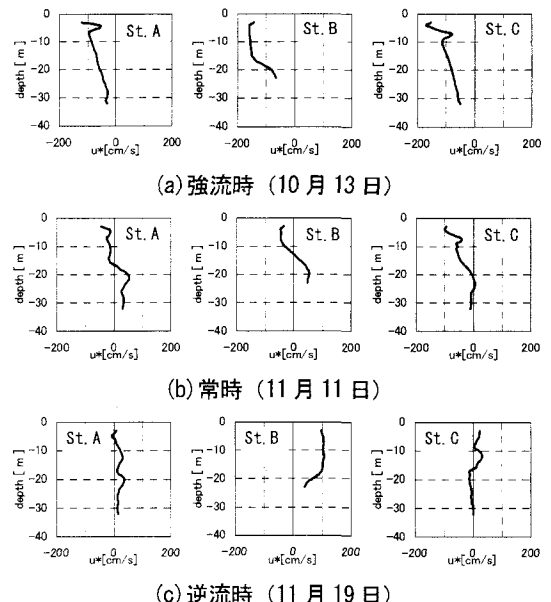


図-5 流速の鉛直分布

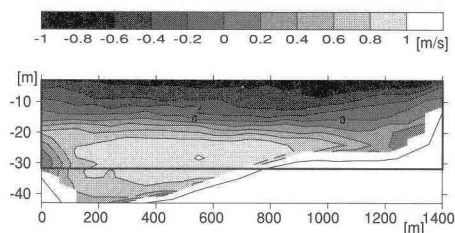


図-6 トンネルライン上の断面流速分布 (11月11日)

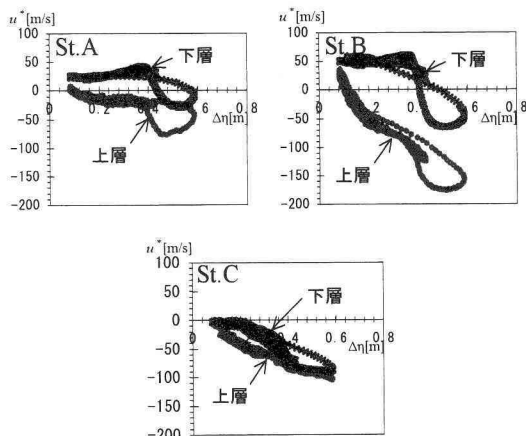


図-7 トンネルライン上の断面流速分布 (24 時間平均)

示す逆流時は、水位差が0.1 m 以下の場合に現れるパターンで、全ての計測点の流れが北向きとなる。

図-5(b)では、上層の流速は St. B および St. C において大きく、St. A では小さい。一方、下層の流速は St. A および St. B で大きく、St. C では小さい。このことから、上層の南向きの流れは東側で速く、逆に下層の北向きの流れは西側で大きくなることが分かる。船舶搭載型の ADCP により計測したトンネルライン上の流速の鉛直断面分布を図-6 に示す。図-6 においても、上述の流況特性が表れており、St. A～C の流速の鉛直分布は、トンネルライン上の断面流速分布の特徴を示していることが分かる。

図-7 に、水位差と流速の関係について10月の結果を示す。上層、下層の代表点としてそれぞれ、水面から8 m の深さと水底から3 m の高さの流速を示した。ただし、境界面が深くなった場合には図中の下層の流速は境界面よりも上の流速を示すことになり、下層流速とはならない。なお、図中の値は、24時間の移動平均により短周期成分を除いたものである。

上層流速では、St. B, C の流速が水位変化に対する反応が大きく、St. A が小さい。上述した上層流速が東側で発達する特徴が現れている。下層流速では、St. A, B では北向きの流れとなっており、St. A では若干の傾きをもっているものの、St. B ではほぼ一定の値となって

いる。水位差が大きくなると、下層も南向き流れへと変化し始め、境界面が深くなっていることが分かる。一方、St. C では下層の流れは北向きとならず、流速0もしくは南を向いている。図示している深さは St. C では水深-27 m であり、図-5(b)の St. A, B と比較すると下層流れの範囲にある。それにもかかわらず流れが南を向くのは、上層の流速が西側よりも大きく、また水深が浅いために下層の厚さも薄いことから、境界面よりも下の北向き流れが弱く、上層の流速に引っ張られて南寄りになっていると考えられる。

水位差と流速を比較すると、水位差0.4 m 以下においては相関が非常に高い。しかし、水位差が0.4 m を超える範囲で流速の軌跡が一定でなくなっている。これは図-3 に示す10月12日のイベントの時であり、この時水位差は急速に大きくなっている。水位差0.4 m 以下では、水位変動が比較的緩やかなため、流況は定常状態に近く、水位差に対して一意に決まっている。しかし、水位差の変動が急激に起こると境界面の移動が追従できず時間遅れが発生し、定常状態の流況と違った値になると考えられる。

(3) 水位差の変動特性

水位差の支配要因としては、風、気圧、潮位及び河川流入や外洋への流出等による長期変動が主に考えられる。黒海及びマルマラ海は海峡を通じて外洋と繋がっているため気圧により水面が変動するが、一般の外洋よりもその反応は小さいと考えられる。今回の観測結果では観測期間が十分でないため、図-3 に示したように、気圧と南北風の風向の相関が高く、気圧由来の水位変動成分と風由来のものとを分離できない。したがって、今回は気圧の影響を無視した。今後、気圧と風向の関係が逆になる観測結果を加えて、再度解析する予定である。

潮汐の影響を検討するため、水位差について主要4大分潮による調和解析を行い求めた潮汐成分の振幅を表-2 に示す。表-2 によると、潮汐成分は非常に小さく、全ての分潮を足し合わせても0.036 m となった。一般の湾などと比べて、外洋に対して閉じた状況に近いため潮汐の影響が小さいことが分かる。

次に、水位差と風速の関係を調べる。風速の吹寄せ効果により水位差が変動しているとする、水位差は風速の2乗に比例する。図-8 は、図-3 と同時期の南北風速の2乗の値に、風向を示すため南北成分と同じ符号をつけたものの時系列である。図-8 と図-3 を比較すると、水位差は風速の2乗の値よりもむしろ、風速の1乗の値

表-2 潮汐成分の振幅

分潮	M2	S2	K1	O1
成分振幅[m]	0.020	0.009	0.004	0.003

と類似の形状となっている。これは、風速の変動時間に対して吹寄せ効果が十分に発達せず、2乗に比例した値に達していないためと考えられる。観測された風速の変動よりも長時間の変動に対しては、風速の2乗に比例する変動特性を示すと考えられるが、ここでは水位差は風速に比例するものとしてモデル化を試みる。

風速と水位差をフーリエ変換し、各周波数成分について、風速の成分に対する水位差の成分の応答関数を求めたものを図-9に示す。図から、応答関数は長周期の成分ほど大きくなる傾向にある。前述したように、時間の短い変動に対しては吹寄せ効果が発達しないため、短周

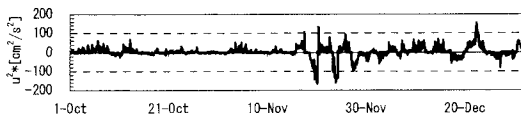


図-8 風速の2乗値 (St.F, 南北成分)

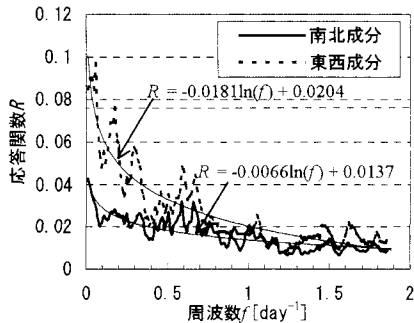
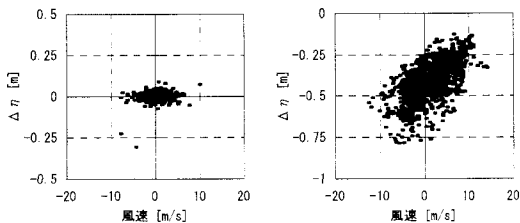
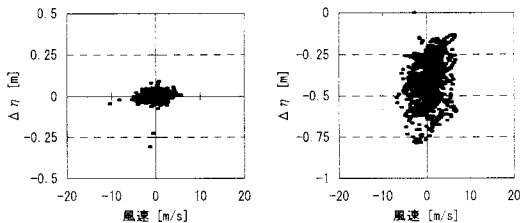


図-9 風速に対する水位差の応答関数



周期1日以下の成分 周期1日以上成分
(a) 南北風と水位差の関係



周期1日以下の成分 周期1日以上成分
(b) 東西風と水位差の関係

図-10 風速と水位差の関係

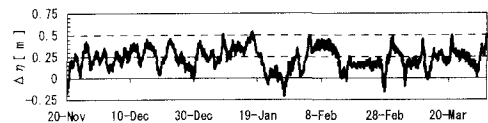
期成分に対する応答が小さく、長周期の成分ほど大きくなると考えられ、吹寄せ時間の影響が周波数分布として表れていることが分かる。

図-10は、水位差と風速の時系列を、1日周期よりも短い変動成分と、それよりも長い成分に分離し、それぞれについて水位差と風速の関係を示したものである。これによると、1日周期よりも長い周期成分は風速と水位差の相関が比較的強く、それよりも短い周波数成分では風速の変化に対して水位が変動していないことが分かる。

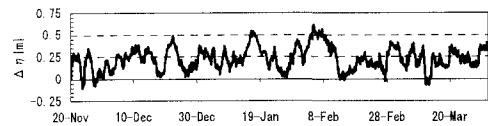
南北風と東西風の応答関数は、水位差をそれぞれの応答成分に分離してから求める必要がある。しかしこれを分離するのは困難であるため、今回は南北成分と東西成分が合成された水位差の変動に対して、それぞれ応答関数を単独に求めた。今回の観測結果では、東西の風速が南北の風速よりも小さく、そのため東西成分の応答関数が南北成分よりも大きくなっている。

図-9に示した応答関数によって、風速から水位差の変動を算出することを試みる。応答関数を、図中に示した式で近似し、風速の時系列を周波数分解した後、応答関数を乗じて再度合成した。図-11に水位差の観測値と再現値を示す。南北成分と東西成分から再現した水位差の時系列を別々に示している。なお、図中の再現値は、上記の方法により風から求めた水位に、表-2に示した潮汐成分および観測値と再現値で平均値が一致するように定常値を加えたものである。

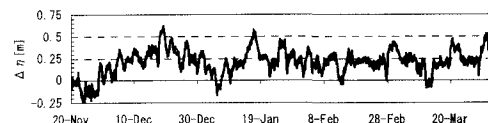
水位差は、図-11(b)と(c)にそれぞれ1以下の値を掛けたものの足し合わせとなる。最小二乗法によりこの係数を求めたところ、東西成分の係数はほぼ0となった。今回の観測では、東西成分の卓越するイベントが観測されていないため、今後の観測結果をもとに再度検討する予定である。



(a) 観測値



(b) 再現値(南北風から算出)



(c) 再現値(東西風から算出)

図-11 水位差の観測結果と再現値

図-11(a)(b)を比較すると、水位が急に变化する時期やその変化量ともに精度良く再現できている。ただし、数10日単位の長期的な変動の再現精度があまり良くない。長周期の変動に対する応答関数が小さめに評価されていると考えられる。これについては、今後の長期間の観測結果を対象に同様の解析を行うことにより、精度が向上するものと考えられる。

なお、水位差の再現モデルの目的は、施工時の流況予測を行うための入力値としての水位差を予測することである。ここで求めた応答関数と畳み込み積分を用いることにより、観測値から将来の水位変動を予測することが可能となる。

4. トンネルライン上の流速断面分布算定モデル

施工の安全性や効率性を確保するためには、トンネルライン上の鉛直断面流速を把握する必要がある。しかし、断面流速を直接時系列で連続的に観測することは困難である。本研究では、St. A~Cの流速の鉛直分布連続観測から、トンネルライン上の断面流速を算出するモデルを構築した。

トンネルライン上の断面流速を、St. A~Cの鉛直分布全体の線形足し合わせで表現できると仮定すると、流速は以下のように表される。

$$\begin{aligned}\bar{V}(x, z) = & \int f_A(x, z, z') \bar{V}_A(z') dz' / h_A \\ & + \int f_B(x, z, z') \bar{V}_B(z') dz' / h_B \cdots \cdots (2) \\ & + \int f_C(x, z, z') \bar{V}_C(z') dz' / h_C\end{aligned}$$

ここで、 $\bar{V}$: トンネルライン上の流速、 $\bar{V}_{A,B,C}$: St. A~Cでの流速、 $f_{A,B,C}$: St. A~Cの流速に掛かる内挿関数、 $h_{A,B,C}$: St. A~Cの水深、 x : トンネルラインに沿った距離である。内挿関数は、式(2)を離散化して観測結果もしくは数値計算の結果から、最小二乗法により求めることができる。しかし、式(2)では自由度が大きすぎるため、最小二乗法で解くには多くの入力データを必要とする。そこで、本研究では、以下の2つを仮定する。

・トンネルライン上の流速は、同じ深度のSt. A~Cの流速により一意に決定される。

・同じ位置では、流れの向きは一定である。

この2つの仮定により式(2)は次のように簡略化される。

$$\begin{aligned}U(x, z) = & \alpha(x, z) U_A(z) \\ & + \beta(x, z) U_B(z) + \gamma(x, z) U_C(z) \cdots (3)\end{aligned}$$

ここで U 、 $U_{A,B,C}$ は、前述したトンネルライン上およびSt. A~Cの流速の符号付き絶対値であり、 α 、 β 、 γ

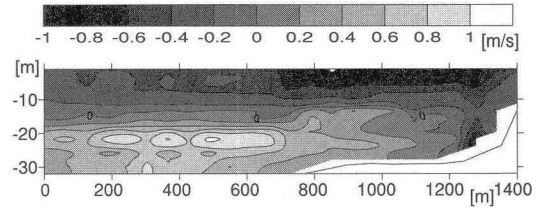


図-12 トンネルライン上の断面流速算定結果

はSt. A~Cの流速に掛かる内挿関数である。式(3)は最低3ケースの観測結果もしくは計算結果があれば、最小二乗法により内挿関数を算出することができる。

図-12は、図-6の計測結果と同じ時間のSt. A~Cの鉛直流速分布の観測結果から、トンネルライン上の断面流速分布を内挿計算した結果である。なお、今回内挿関数の算出には、観測データが不足しているため数値計算の結果を用いた。図-6と比較すると、流速分布のパターン、表層流速の値ともに良く一致しており、本モデルによりトンネルライン上の断面流速分布を算定することが可能であることが分かる。今後、観測データをもとに内挿関数の精度を向上させる予定である。

5. おわりに

本研究では、ボスポラス海峡の沈埋トンネル施工のための流況観測を行い、その流況特性、変動特性について検討した。本論で得られた結論を以下に述べる。

- 1) トンネル周辺の流れは、表層付近の南向き流れは東側で速く、底層の北向き流れは西側で速い。
- 2) 流況構造は、強流時、常時、逆流時の大きく3つのパターンに分けることが出来る。
- 3) 流速は、海峡両端の水位差との相関が強く、水位差に対して一意に決まるが、短時間で水位差が変動した場合には流速が水位差の変動に追従しなくなる。
- 4) 水位差は風により大きく変動する。風速の変動時間が短い場合には、風に対する応答は小さく、緩やかな変動に対する応答ほど大きい。
- 5) 本研究で構築したモデルにより、トンネルライン上の流速の断面分布を時系列で取得することが可能である。

参考文献

- 織田幸伸・伊藤一教・上野成三・小山文男・栄枝秀樹(2005a): 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解析とその予測について、第60回年次学術講演会、投稿中。
- 織田幸伸・伊藤一教・高山百合子・上野成三・栄枝秀樹(2005b): 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, 投稿中。
- Arisoy, Y. and A. Akyarlı(1989). Long Term Current and Sea Level Measurements Conducted at Bosphorus, The Physical Oceanography of Sea Straits, pp. 61-93.