

瀬戸・海峡部における流れの特性, ドップラープロファイラーによる流速測定*

高杉由夫**・肥後竹彦**・埜口英昭**

Characteristics of velocity distributions in a strait: Current measurements by Doppler Current Profiler*

Yoshio TAKASUGI**, Takehiko HIGO** and Hideaki NOGUCHI**

Abstract: Current measurements by Doppler Current Profiler (DCP) were made along two sections in the Neko Seto strait, a small strait in the western part of the Seto Inland Sea. The currents in the strait are vertically uniform and semi-diurnal tidal currents are predominant. The currents vary from eastward flow to westward flow, mostly normal to the strait and a strong eastward current, caused by topographical effect, reversal to the westward transport is observed near the southern end of the strait.

Further, the extent of the recirculation region or the region with reversal currents is estimated by the experimental results in an open-channel flume. The region may be defined by the ratio of reattachment length to protruding topography length, which is about 4 in the strait.

1. まえがき

瀬戸内海のように多数の島々が散在する海域では、多くの瀬戸や海峡などの海峡群があり、この海峡群を通じて内海内の海域相互間や、内海外の他の海域とつながっている。これら海峡群における流れの特性は、それにつながる海域の水位、流れなどの物理的諸特性を支配し得るほど、海域の水理現象にとって重要な役割を果たしていると考えられる。一方、明石および鳴門海峡の海水交換の研究(清水・川村, 1981; 今里・淡路, 1982)にみられるように、人間の生産活動や生活に密接に関係する沿岸海域の物質循環を解明するためにも、海峡群を通しての海水交換が重要であることが注目されている。海峡群では流れが激しく、係留系による通常の流速測定が困難であることなどのため、流れについての実測データは

非常に乏しく、断面の流速分布など流れの構造については未知の点が多い。このため、海峡群の水理にとって最も基礎的な要素である流れの実態を知ることは非常に意義のあることである。

海峡強流域の流れを、従来のように係留線による流速計で測定することは不可能であると考えられるが、近年、船で航走しながら海中の多層の流速が測定できる超音波ドップラープロファイラー(DCP)が開発されている(松澤ら, 1985; 山県・神崎, 1985)。そこで、このDCPを使用して、瀬戸内海の小瀬戸で瀬戸断面の流速分布の測定を行った。

ここでは、瀬戸における流速分布の実態を述べるとともに、この測定から観測された地形形状の急激な変化に伴う逆流現象について報告する。

2. 測定方法

流速分布の測定は、瀬戸内海の安芸灘北部に位置する広島県の呉市と下蒲刈島との間にある猫瀬戸を対象として行った(Fig. 1)。猫瀬戸は幅が約1kmの狭い瀬戸

* 1987年8月14日受理 Received August 14, 1987

** 中国工業技術試験所 海洋利用研究室,
〒737-01 広島県呉市広末広2-2-2
Government Industrial Research Institute, Chu-
goku, Hiroshiro 2-2-2, Kure, Hiroshima,
737-01 Japan

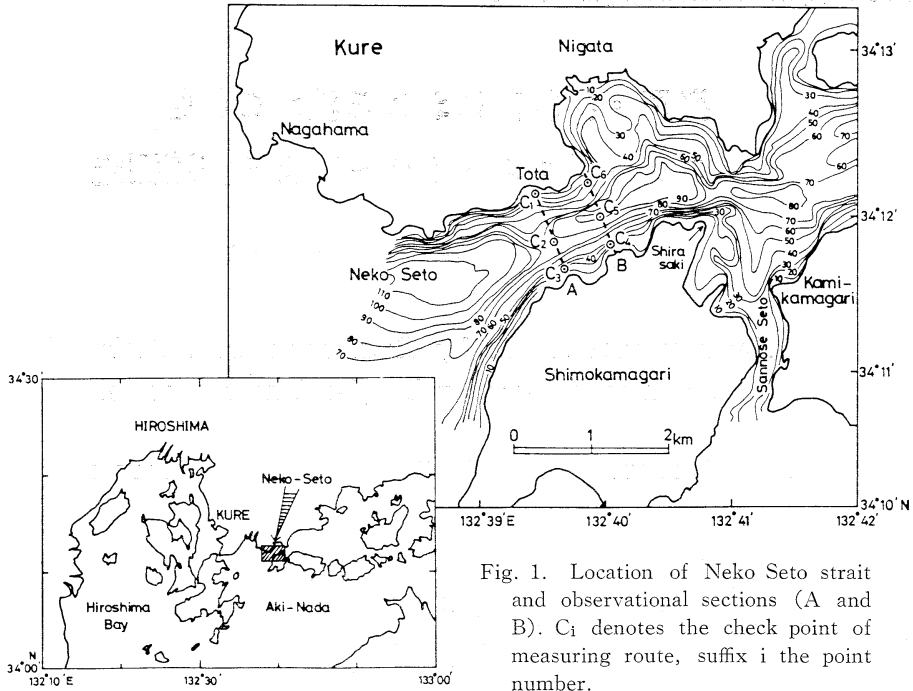


Fig. 1. Location of Neko Seto strait and observational sections (A and B). C_i denotes the check point of measuring route, suffix i the point number.

で、最狭部付近の水深は最大90mである。この瀬戸のすぐ東側にも三之瀬瀬戸という安芸灘につながる小さな瀬戸があり、瀬戸の流れは上げ潮時には、猫瀬戸では東向き、三之瀬瀬戸では北向きの流れとなり、上蒲刈島の北側の海域で合流して東向きに流れる。また、下げ潮時には、猫瀬戸は西向き、三之瀬瀬戸は南向きの流れを示す。

測定期間は、大潮期を少し過ぎた1985年8月19日10時から20日10時までの25時間である。Fig. 1のA, Bの2断面において、DCPを装備した船(5t)で航走しながら瀬戸断面の流速を測定した。A断面のC₁点から出発してC₂, C₃, B断面のC₄, C₆の順に5~6ノットで航走し、これを1時間毎25回連続して測定した。この間、測定中の位置確認のために設けたマーカーブイで測定位置をチェックした。1回の断面流速測定に要した時間は約20~25分である。

使用したDCP(日本無線社製)は測定可能深度が2~100m(水深5m以上で水深の80%以内の範囲)、測定層の厚さは2m(40m以浅の場合)と6m(水深40~100m)であり、測定層数は最大16層である。この装置の測定性能については、測定船を停船係留して、静止状態でのMTCM-4型流速計との測定比較がある(松澤ら, 1985)。そこで、航走時での性能を調べるため、航路灯浮標にアンデラー流速計(RCM)を係留し、その回りを半径約50

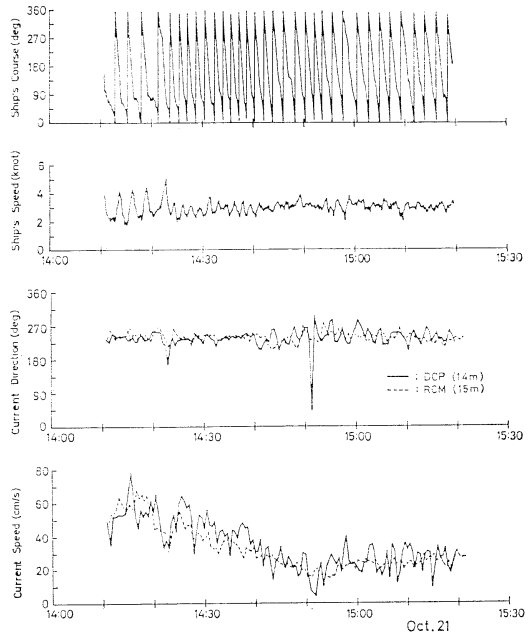


Fig. 2. Time series of ship's course, ship's speed, current directions and current speeds by DCP and RCM. The former turned with a radius of 50m around a moored Aanderaa Current Meter (RCM). DCP denotes the Doppler Current Profiler.

mで回りながら DCP で流速を測定した (Fig. 2)。このときの船速は 3~4 ノットである。RCM に比べて DCP

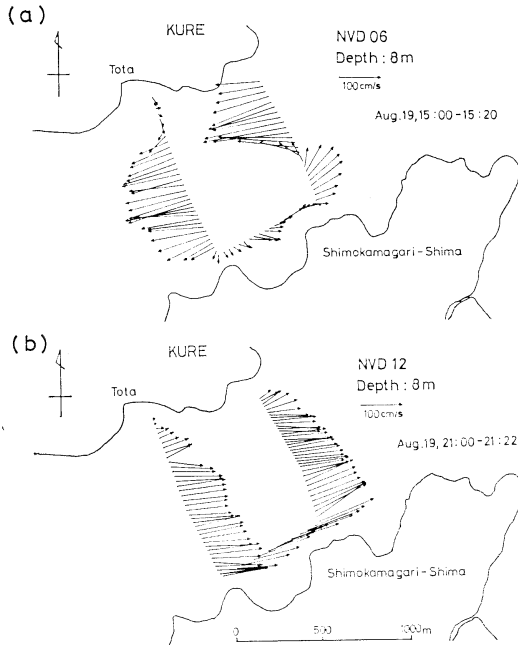


Fig. 3. Horizontal velocity vectors measured by DCP at maximum westward flow (a) and maximum eastward flow (b) in Neko Seto strait. NVD 06 means that NVD represents the title name of data observed and 06 shows the 6th of observations which were conducted at every one hour.

の方が変動が大きいものの、これは両者のサンプリング間隔の違いから生じていることもあり、この点を除けば、流向、流速ともよく対応している。この結果からみて、DCP の測定値は従来の係留系による測定方法による値と本質的な差はみられないことが明らかにされた。

DCP による猫瀬戸の測定では、測定層の厚さを 6 m とし、1.5 秒間隔で得られる生データに平均化時間 20 秒の平滑化を施したものを 3 秒間隔で収録した。

3. 測定結果

3.1. 断面流速分布

断面流速測定結果の一例を Fig. 3 に示す。図は西流最強時 (下げ潮最強) および東流最強 (上げ潮最強) の水平流速ベクトルで、第一層、水深 8 m におけるものである。猫瀬戸の最大流速は西流時に現われ、2 m/s 強の流速値を示す。西流最強時には、西側の A 断面では戸田の岸近くで流れが弱く、この付近から瀬戸中央に向かって水平シアーは大きいものの、強流帯は幅広く分布している。これに対して、東側の B 断面では下蒲刈島側で東向きの流れとなっており、大きな逆流が見られる。この逆流の最大流速はほぼ 1 m/s にも達し、逆流域は瀬戸中央部近くまで及んでいる。この大きな逆流は、下蒲刈島の白埼付近の、瀬戸に突出した地形のため一旦狭まった瀬戸断面が、すぐ西で急激に広がったことにより、流れにはく離が生じたものと考えられる。一方、東流最強時の流速分布は、A、B 両断面とも逆流域もなく、水平シアーも小さく、ほぼ一様な流速分布を示している。

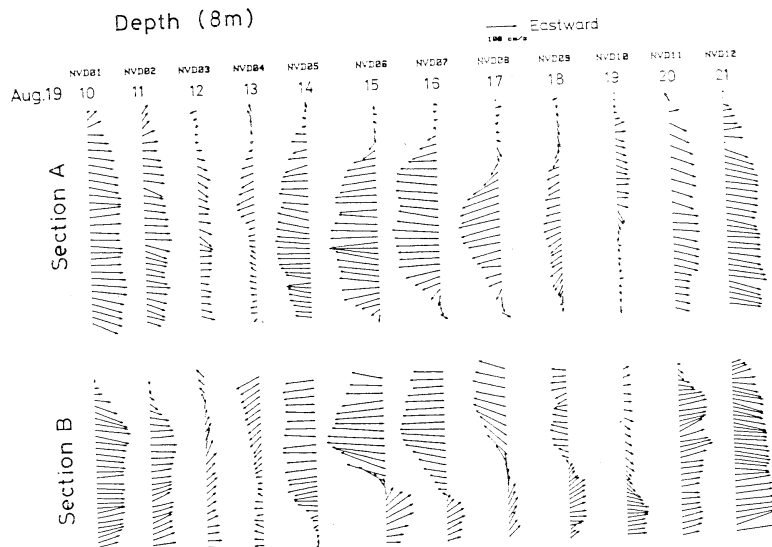


Fig. 4. Temporal change of horizontal velocity vectors at 8 m depth.

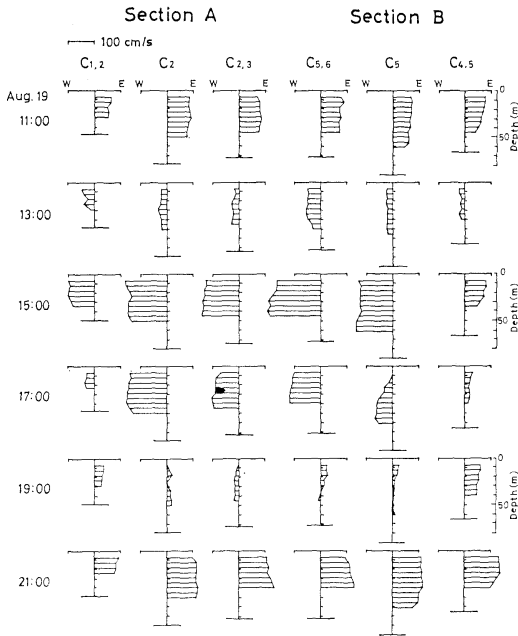


Fig. 5. Vertical distributions of the current normal to the section at specific points. The $C_{i,j}$ denotes the middle point between C_i and C_j . Currents near the bottom cannot be measured, because the range of DCP measurements is limited within 80 per cent of the depth.

このように瀬戸部では複雑な地形のため、上げ潮時と下げ潮時とで流速分布の様相が大きく異なることが明確に示されている。

Fig. 4 は水平流速ベクトルの一潮汐間における変化を示したもので、第一層、水深 8 m のものである。A, B 両断面とも西流時において流速の水平シアーは大きい。特に、B 断面では西流最強時の 1 時間前頃から下蒲刈島側での逆流が始まって、最強時に最も大きくなり、この逆流は東流に転流するまで続いている。一方、東流時においては両断面とも水平シアーも小さく、ほぼ一様に流れていることがわかる。

Fig. 5 は A, B 断面、それぞれ 3 地点における断面に直角な水平流速成分の鉛直分布を示したものである。図は一潮汐間の変化を 2 時間おきに示しているが、いずれの場合も流速の鉛直シアーは小さく、流れの激しい瀬戸部の流速分布は、鉛直的にはほとんど一様であるといえる。

Fig. 6 は A, B 両断面の鉛直平均流速の時間変化を示したものである。下蒲刈島側の測点 (C_3 および C_4)

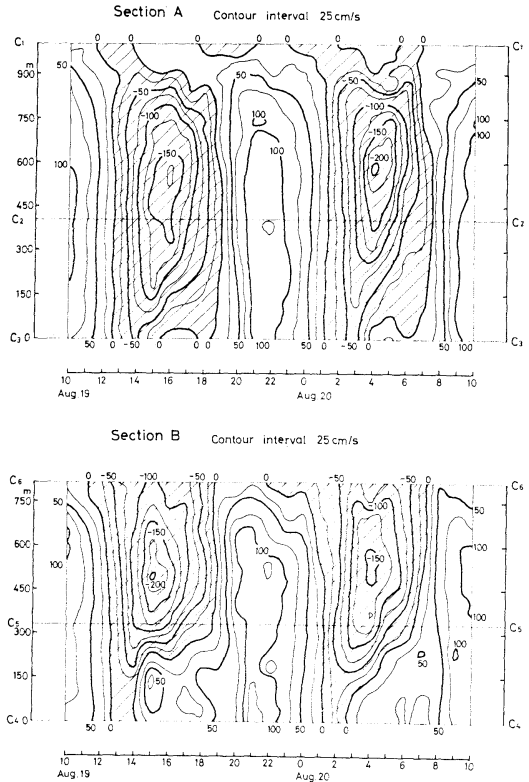


Fig. 6. Time sequences of axial current, the normal component of the vertically averaged current. Shaded portions indicate the westward flow.

位置を基準として断面の位置を表している。両断面とも最大流速を示す位置は瀬戸中央部よりやや呉側に存在している。流れは西流の方が速く、最大 2 m/s である。A 断面が、 C_1 点付近を除いて等値線は瀬戸断面と平行になっており、流速は断面全体で時間と共にほぼ一様に変化しているのに対して、B 断面では島側の逆流のため、等値線の形は複雑になっている。西流最強時のこの逆流域は C_4 点から 220~230m (逆流の中心は約 150m) の位置にある。このような逆流域においては、恒流成分と 1/4 日周期成分が大きく観測されることになる。Table 1 は A, B 両断面の特定点における鉛直平均流速の 25 時間の資料から 1 日, 半日, 1/4 日周期潮群について調和解した結果である。次節に示すように、断面流量は半日周期で規則正しく変動しているのに対して、流速については、断面中央部の $C_{1,2}$, C_2 , $C_{2,3}$, C_5 , $C_{5,6}$ 点では半日周期成分が強いが、岸近くの C_1 , C_3 , C_6 および強い逆流の生じていた C_4 , $C_{4,5}$ では、恒流成分および

Table 1. Harmonic analysis of velocity at specific points. D1, D2, D4 and V0 denote diurnal tide, semi-diurnal tide, 1/4 diurnal tide and residual component, respectively. Phase is shown in lag from 0000 20 August 1985.

		D1		D2		D4		V0
		Amp. (cm/s)	Phase (deg)	Amp. (cm/s)	Phase (deg)	Amp. (cm/s)	Phase (deg)	(cm/s)
Sec. A	C ₁	2.1	313	15.2	34	13.0	115	8.7
	C _{1,2}	12.8	5	103.0	55	5.8	345	-6.6
	C ₂	19.0	8	135.5	61	18.1	340	-17.6
	C _{2,3}	18.4	65	122.7	58	4.0	345	-6.0
	C ₃	8.3	56	70.3	50	25.6	139	20.7
Sec. B	C ₄	16.6	16	36.4	28	29.7	130	43.0
	C _{4,5}	14.9	336	57.0	31	19.7	161	33.3
	C ₅	17.2	58	123.2	52	10.4	277	-5.7
	C _{5,6}	19.4	54	130.5	54	8.3	324	-15.0
	C ₆	9.0	89	62.2	41	11.7	355	-29.4

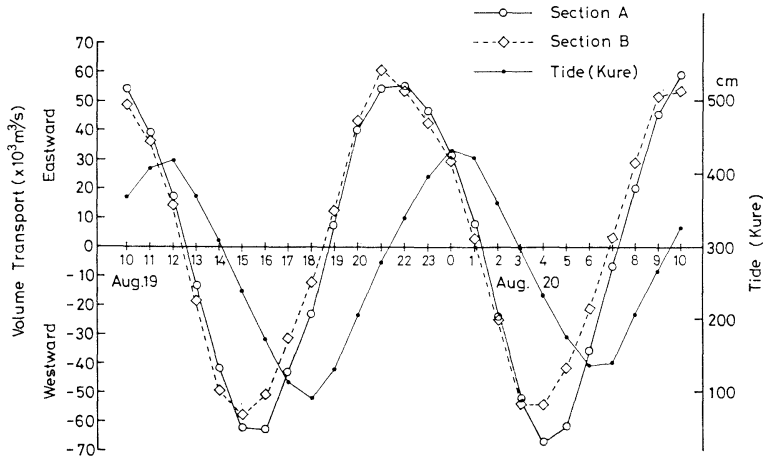


Fig. 7. Time series of the volume transport.

1/4日周期成分が強く, C_{4,5}点では, 恒流成分は半日周期成分の58%, 1/4日周期成分は35%にも達している。

このように, 猫瀬戸のような狭い範囲においても, 断面内の位置によって, 流れの状態が著しく異なることが明らかにされた。

3.2 断面流量

Fig. 7は断面の流速を積分して求めた断面流量の25時間における時間変化を示したものである。A断面とB断面では測定時間に少しずれがあり, B断面の方が平均して約10分程度遅れて測定されているため, 図中ではB断面の位相が少し進んでいるように描かれている。測定時における最大流量は $70 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。A, B両断面の流量は等しくなるはずであるが, 西流最強時頃にその差が大きく, 最大 $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の差がみられ

る。この理由として, 測定にかからない岸近くや海底付近の流量が影響しているためか, 逆流がみられるような大きなシアアのあるところでの測定誤差が大きいためか, あるいは, 測点の位置, 取り方に問題があるためかなどが考えられる。しかし, この西流最強時以外では両断面とも流量はほぼ等しくなっており, 現地での瀬戸断面における流量測定としてはよい結果を示している。

A, B両断面の流量の調和分解結果をTable 2に示す。流量はほとんど半日周期で変動しており, その振幅は $55 \sim 59 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ である。これらは大潮期を少し過ぎた頃の一昼夜観測の結果に基づいたものであるが, 過去の潮流観測資料(海上保安庁, 1982)を基に, M₂およびS₂分潮に対する流量の調和定数を計算してみると, 振幅はM₂が $48 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, S₂が $17 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ とな

Table 2. Harmonic analysis of volume transport. Symbols are the same as in Table 1.

	D1		D2		D4		V0 (10 ⁹ m ³ /s)
	Amp. (10 ³ m ³ /s)	Phase (deg)	Amp. (10 ³ m ³ /s)	Phase (deg)	Amp. (10 ³ m ³ /s)	Phase (deg)	
Section A	7.41	26	59.4	57	1.93	322	-2.96
Section B	7.25	38	54.9	49	1.34	211	0.75

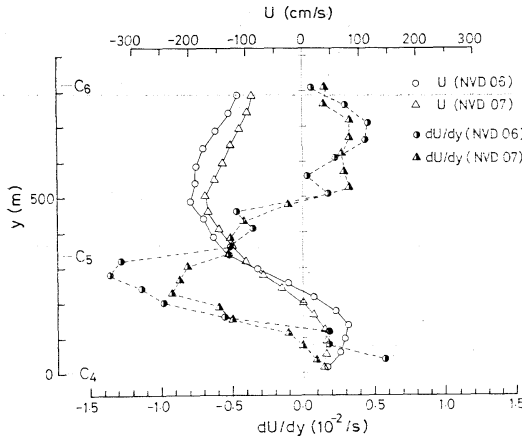


Fig. 8. Distributions of mean velocity U and velocity gradient dU/dy in section B at reverse flow occurrence. y denotes distance along the section from point C_4 .

り、猫瀬戸の大潮期における半日周期の流量振幅は、 $65 \times 10^9 \text{m}^3/\text{s}$ 程度になる。

4. 逆流域の流速分布特性と範囲

ここでは、従来からの測定方法では捉えられなかったような地形性による逆流現象について検討してみる。

Fig. 8 は逆流の起こっている NVD 06 および NVD 07 における断面に直角方向の流速（鉛直平均）とその水平シアアの分布である。この分布はデータ数 7 個、水平距離にして約 45m 間の平均値から求めたものである。NVD 06 が西流最強時で、NVD 07 はそれより流速が少し弱まった頃のものであり、NVD 06 に比べて逆流域も小さい。水平シアア dU/dy のもっとも強いところは、いずれも、逆流域よりやや順流（西流）域に入った付近に位置しており、NVD 06 では、 C_4 点から約 270m の位置で、絶対値で最大 $0.014/\text{s}$ となっている。このように、この逆流域の逆流側から順流側にかけては強い過度の形成がみられる。

Fig. 9 は大きな逆流のみられる NVD 06, 07, 19, 20 における流速分布を次のガウス分布で近似したもので

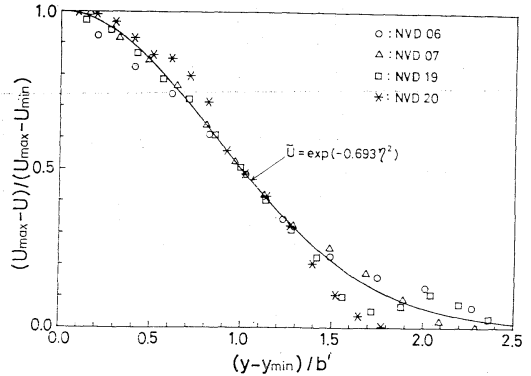


Fig. 9. Comparison of the velocity distributions at reverse flow occurrence with the Gaussian distribution. U_{\max} and U_{\min} are maximum and minimum velocities at section B, respectively.

ある。

$$\tilde{U} \equiv \frac{U_{\max} - U}{U_{\max} - U_{\min}} = \exp(-\alpha\eta^2)$$

$$\eta \equiv (y - y_{\min})/b$$

ここで、 U は流速、 U_{\max} 、 U_{\min} は断面での最大流速および最小流速であるが、 U_{\min} は最大の逆流速度でもある。 y は C_4 点からの距離で、 y_{\min} は U_{\min} となる距離、 b は流速が U_{\min} の位置から $(U_{\max} - U_{\min})/2$ になる点までの距離、 $\alpha = 0.693$ である。

NVD 20 については、このガウス分布からのずれが少し大きい、全体的にみると、この曲線で近似でき、地形形状の急激な変化によって生ずる逆流域の流速分布は、開水路流れ等において混合層で成立するとされているガウス分布にほぼしたがうものと考えられる。

水路断面の急激な変化によって生ずる逆流現象については、水路の水門や堰の背後に生ずるはく離流として水工学の分野では重要視され、古くから実験的研究がなされてきた。ここでは、猫瀬戸の西流時における逆流現象を断面急拡部流れの開水路実験結果（津津ら、1986）と対比してみる。

瀬戸の流れは水深 10m 以浅の地形に支配されるものと

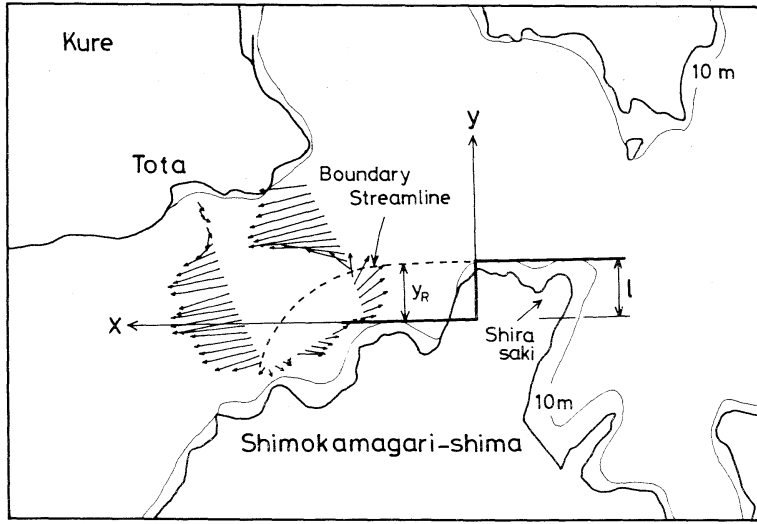


Fig. 10. Schematic diagram of the coordinate system for analysis of recirculation region. l denotes the protruding topography length, y_R the length between x-axis and boundary streamline.

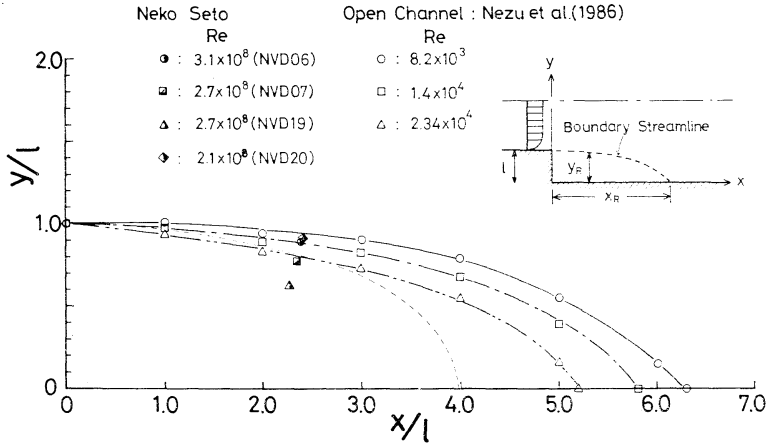


Fig. 11. Boundary streamline in open-channel step flow and in the reverse flow at the Neko Seto strait. Re denotes the Reynolds number, x_R the reattachment length. Open symbols stand for the experimental results in an open-channel flume (NEZU *et al.*, 1986), half closed symbols for the Neko Seto reverse flow.

し, Fig. 10 に示すように, 西向きを x 軸, 北向きを y 軸とし, 東側から入ってきた流れが, 白埼の突出部をすぎたところから急に断面が広がることにより, その背後にはく離を伴った局所流ができるものと考え, 一次元開水路実験における段落流れなどと同じ取り扱いができるとして, はく離流線を求める。はく離流線 y_R は流速を U , 水深を h としたとき, $\int_0^L U h dy = 0$ となる点 L と

して定義する。

Fig. 11 は, 猫瀬戸の B 断面におけるはく離位置 y_R と祢津ら (1986) の段落流れの開水路実験によるはく離流線を示したものである。ここで, 猫瀬戸でのレイノルズ数 $Re = V l / \nu$ は断面平均流速 V , 地形突出部の長さ l , $\nu = 0.01$ として求めた。実験では Re 数は $10^3 \sim 10^4$ であるのに対し, 瀬戸の流れは 10^8 のオーダーであ

る。実験結果から、はく離流線は Re 数が増加するにしたがって減少する傾向がみられる。しかし、猫瀬戸での結果は、水路実験の結果のような一定の傾向は示さず、 y_R の位置は $x/l=2.3\sim 2.5$ で、 $y/l=0.65\sim 0.9$ とバラついている。さらに、はく離流線が x 軸と接する点、すなわち再付着点 x_R については、苅津ら (1986) は過去の開水路実験の結果 ($Re=2.5\times 10^3\sim 3.7\times 10^4$) をまとめた。それによれば、 Re 数が増加すると x_R は減少し、Fig. 11 に見られるように逆流域は小さくなり、逆流流量も減少する。また、 x_R/l はほぼ 5 に収束するようである。

猫瀬戸での観測結果からは直接この x_R を求めることはできないが、A断面の流速分布では逆流が生じていないことから、このA断面の位置が x_R にあたると推定して x_R/l を求めると、約 3.8 となる。この値は実験における推定値 $x_R/l=5$ よりも小さいが、これは瀬戸部での流れが Re 数 10^3 と開水路の流れよりも 10^4 もオーダーが大きいことから x_R/l の値も小さくなることが考えられ、瀬戸部での地形形状に伴う逆流域の範囲 x_R/l は 4 程度であると推定される。

複雑な瀬戸においての一次元化や座標の取り方など、検討すべき点もあるが、はく離流線や逆流域の範囲については開水路における実験と同じような取り扱いができると考えられる。

5. あとがき

DCP を用いて瀬戸断面の流速分布の測定を行った。その結果、流速分布は鉛直的にはほぼ一様であること、

瀬戸の複雑な地形の変化により、西流時には地形性ははく離に伴う大きな逆流現象が観測され、上げ潮時と下げ潮時とで流速分布の様相が大きく異なることなど、従来の係留系による流速測定では捉えられなかった瀬戸断面内の流れの実態を知ることができ、さらに、断面流量も正確に把握することができた。また、逆流現象についても、過去になされた開水路実験結果と比較して、その範囲についての検討を試みた。

この逆流現象を含めて、複雑な海峡群の流れの構造を明らかにするためには、さらに観測を重ねて、詳細なデータの蓄積を待たねばならないが、本報告はその足掛りとなるものと考えられる。

文 献

- 今里哲久・淡路敏之 (1982) : 明石・鳴門海峡を通しての海水交換の数値実験. 沿岸海洋研究ノート, **20**, 19-32.
- 松澤誠二・甲斐源太郎・神崎 正 (1985) : 小型超音波ドップラー式流況精査装置の開発. 海洋科学技術センター試験研究報告, **15**, 111-122.
- 苅津家久・中川博次・天野邦彦 (1986) : 開水路段落ちにおける剝離流の乱流構造に関する研究. 第30回水理講演会論文集, p. 601-606. [土木学会, 東京]
- 清水浩輔・川村雅彦 (1981) : 明石海峡を通じたの海水交換. 海と空, **57**, 41-56.
- 海上保安庁 (1982) : 水路部 観測報告 (潮汐編), 17 [海上保安庁, 東京. 86pp.]
- 山県 守・神崎 正 (1985) : 高度システム化による本四明石海峡大橋建設海域の調査. 土木学会誌, **9**, 9-16.