

青函プロジェクトによる津軽暖流流量調査

松原 久¹⁾・大川 光則¹⁾・西田 芳則²⁾・鹿又 一良²⁾・田中 伊織³⁾¹⁾ 青森県水産試験場, ²⁾ 北海道函館水産試験場, ³⁾ 北海道中央水産試験場

緒 言

日本海は、対馬海峡、関門海峡、津軽海峡、宗谷海峡、間宮海峡の5海峡だけで外海と連絡しており、対馬暖流のほぼ全流量は対馬海峡から流入し、そのほとんどが津軽海峡と宗谷海峡から流出する(図1)。従って、3海峡の流況が日本海を出入りする魚類等に与える影響は小さくないと推測される。

しかしながら、海峡を挟む両岸は、対馬海峡宗谷海峡では国が異なるため調査は容易ではない。これに対し、津軽海峡は道県の違いはあるものの両岸とも本邦であるため支障がない。一方、船舶が航行しながら流向流速を実測するADCPと呼ばれる測器が近年開発された。水産庁では海況情報収集迅速化システム開発試験で、各県の調査船にADCPの設置を奨励し、流況データの収集に努めてきた。しかしながら多くの場合ADCPのデータは、解析・応用に到っていない。

以上の状況の中で青函交流プロジェクトの共同研究テーマとして「ADCPによる津軽暖流の流量調査」が提案され、「津軽暖流の絶対流量の測流手法を確立し、津軽暖流の流量変動の実体(季節・経年変動)を把握する」を目的として実施した。

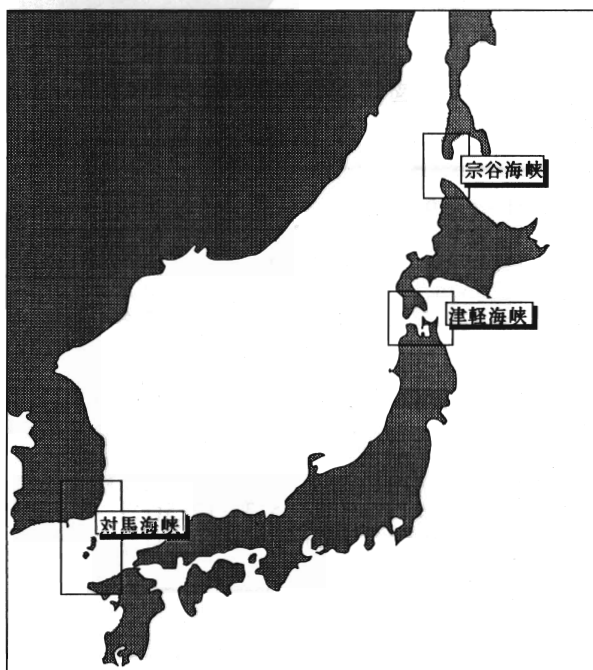


図1 日本海全容図.

材料と方法

津軽暖流の流量の測定は金星丸(函館水試)と本県試験船東奥丸のADCPを使用した。測流定線は海峡西口のADCPの対地モードがとれる海峡(図2)に設定した。定線の方向は170度とした。

津軽暖流の流量はADCPから得られた流向流速データ(図3)の定線直角方向(80度)成分から潮流成分を除去した平均流速と定線断面積(図4)との積とした。

なお、定線直角方向成分の求め方を図5に示した。

潮流成分の除去は、定線上を24時間50分で4往復し、各横断(計8回)ら得られた各位置における流測値を平均することでおこなった。

定線上の任意の測点を通過する8回の観測時刻は、半日(12時間25分)あるいは1日(24時間50分)の潮汐周期で互いに相殺する位相となるように計画した。

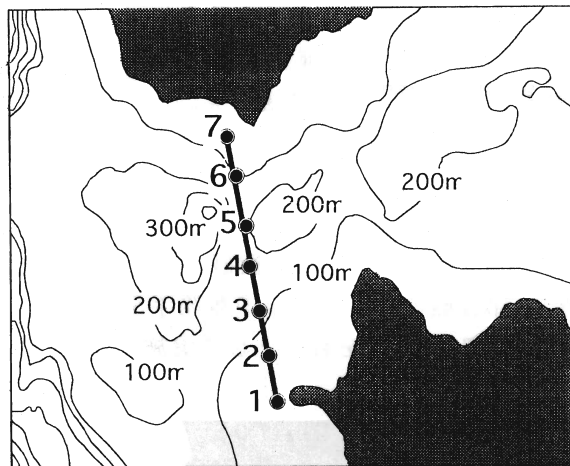


図2 観測定線図.

T,940322152350,	: 年月日時分秒各2桁
A,N35.23.16,0,E139.38.47,0,	: ロランA測位データ
L,N35.22.46,0,E139.38.47,0,	: ロランC測位データ
G,N35.24.265,0,E140.03.178,0	: GPS測位データ
F,+,12.3,182.9,185.1	: 船速・針路
E,1523.8,	: 水深
t,+21.1,	: 水温
W,N,05.1,153.7,0,	: 風向風速
C,1,150,+0.28,123.2,N,0,	: 第1層流向流速
C,2,250,+0.16,299.4,N,0,	: 第2層流向流速
C,3,300,+03.2,141.0,N,0,	: 第3層流向流速
a, ,12345.6, ,65432.1,+45.3,-12:5	: ロランA時間差
c, ,12345.6, ,65432.1,+45.3,-12:5	: ロランC時間差
C/R LF	

図3 ADCPから得られるデータの項目とその形式.

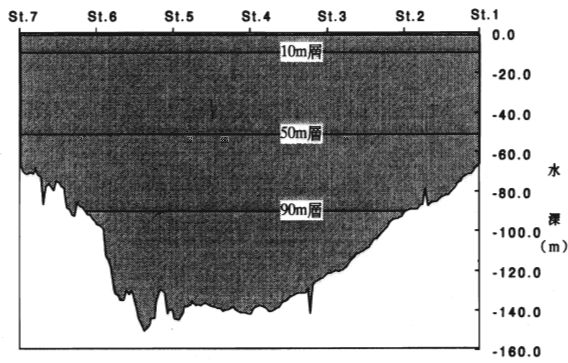


図4 定線断面図.

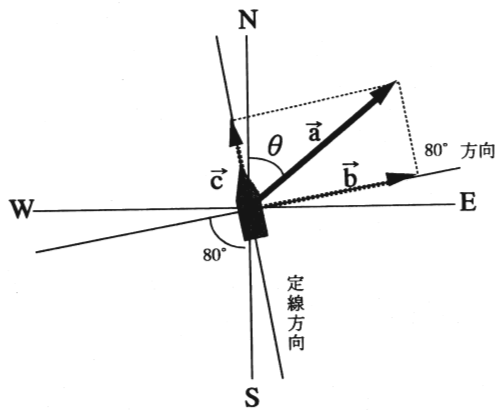


図5 流向流速ベクトルの80°方向成分変換.

表1 測流観測運行計画(タイムスケジュール).

	St.1	St.2	St.3	St.4	St.5	St.6	St.7
北緯	41° 08.5'	41° 10.9'	41° 13.4'	41° 15.8'	41° 18.2'	41° 20.6'	41° 23.2'
東経	140° 14.3'	140° 13.6'	140° 13.0'	140° 12.4'	140° 11.7'	140° 11.0'	140° 10.4'
1往	予定時間 26日 11:00	26日 11:30	26日 12:00	26日 12:30	26日 13:00	26日 13:30	26日 14:00
1往	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
1往	位相 0.00	0.25	0.48	0.69	0.85	0.95	1.00
1復	予定時間 26日 17:07	26日 16:37	26日 16:07	26日 15:37	26日 15:07	26日 14:37	26日 14:07
1復	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
1復	位相 0.05	0.29	0.52	0.72	0.87	0.97	1.00
2往	予定時間 26日 17:14	26日 17:44	26日 18:14	26日 18:44	26日 19:14	26日 19:44	26日 20:14
2往	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
2往	位相 -0.01	-0.26	-0.50	-0.70	-0.85	-0.96	-1.00
2復	予定時間 26日 23:21	26日 22:51	26日 22:21	26日 21:51	26日 21:21	26日 20:51	26日 20:21
2復	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
2復	位相 -0.03	-0.28	-0.51	-0.71	-0.87	-0.96	-1.00
3往	予定時間 26日 23:29	26日 23:59	27日 0:29	27日 0:59	27日 1:29	27日 1:59	27日 2:29
3往	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
3往	位相 0.03	0.28	0.51	0.71	0.87	0.96	1.00
3復	予定時間 27日 5:36	27日 5:06	27日 4:36	27日 4:06	27日 3:36	27日 3:06	27日 2:36
3復	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
3復	位相 0.01	0.26	0.50	0.70	0.85	0.96	1.00
4往	予定時間 27日 5:43	27日 6:13	27日 6:43	27日 7:13	27日 7:43	27日 8:13	27日 8:43
4往	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
4往	位相 -0.05	-0.29	-0.52	-0.72	-0.87	-0.97	-1.00
4復	予定時間 27日 11:50	27日 11:20	27日 10:50	27日 10:20	27日 9:50	27日 9:20	27日 8:50
4復	運航方向 ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨	⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨ ⇨
4復	位相 0.00	-0.25	-0.48	-0.69	-0.85	-0.95	-1.00
位相合計	1.766E-10	-1.706E-10	-5.023E-13	1.2385E-10	-9.199E-11	-9.548E-13	3.1051E-12

位相は、26日午前11時を起点とし、半日周期(12時間25分)のサインカーブの値として示した。

結 果

(1) 流向流速

データは10・50・90m水深で1分間隔で収録した。このうち5分毎のデータを抜粋し、流向流速をベクトル表示として対応する観測位置にプロットした(図6)。

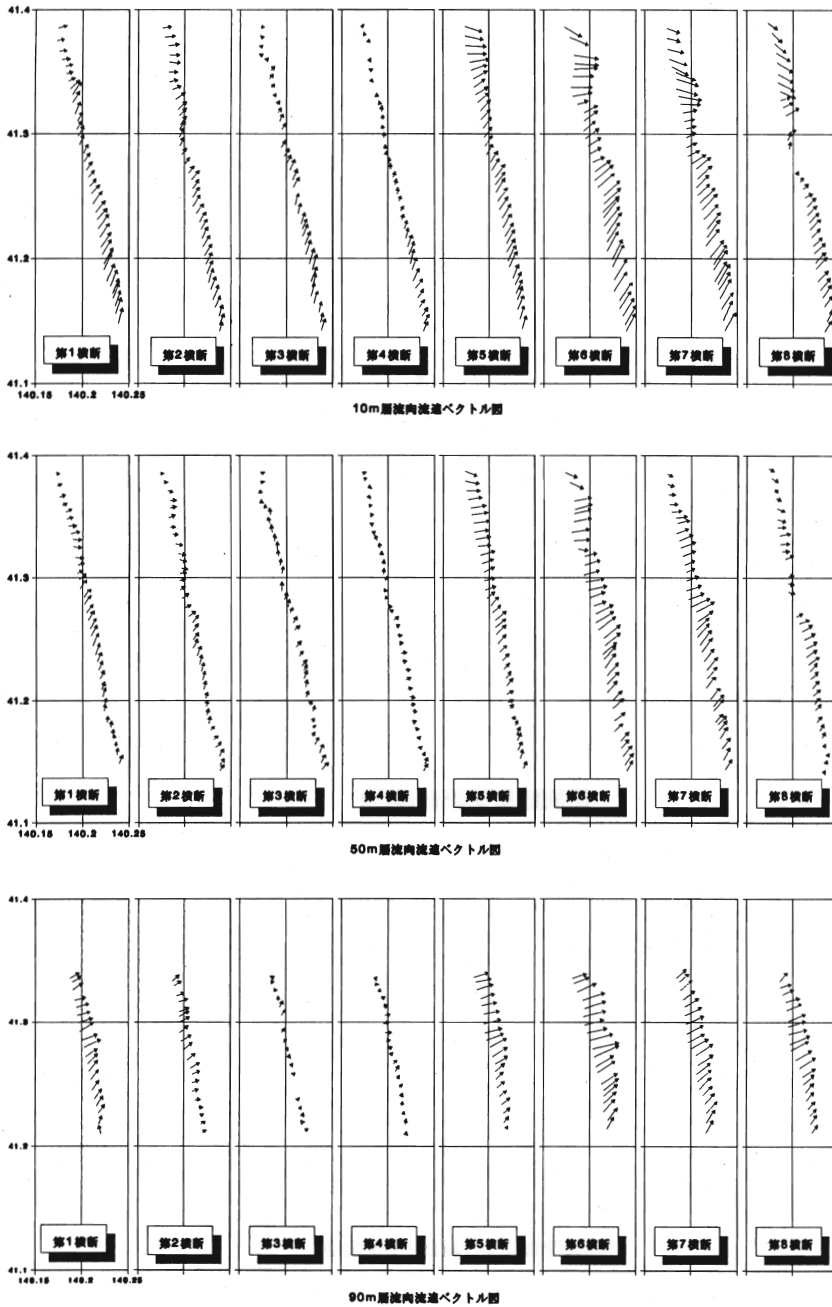


図6 8回の横断で観測された津軽暖流の流向流速。

流速は概ね、第1横断から第4横断まで弱性化傾向に推移し、第5横断から強勢化傾向に転じて第7横断をピークに、第8横断には再び弱性化に転じた。この流速の推移は24時間50分の潮汐に基づくものと考えられる。奇数番目の横断は北上、偶数番目の横断は南下しており、1横断には2時間を費やしている。北上する第5横断では、徐々に流速の速くなる様子がうかがえる。最高流速は90m水深で観測された3.0ノットだった。

流向は、ほぼ0~90度(以後、方向は北を基準として時計方向に回る度分秒で示す)の範囲内にあり、表層に近いほど北寄り、底層に近いほど東寄りの傾向であった。

(2) 定点別流速の経時変化

定線に直交する方向に絞った流速の変化を定点別に図7に示した。流速の変化は、St. 4~6で大きくSt. 1・2では小さかった。流速の変化は、どの定点でも1日(24時間50分)周期の潮汐の影響を示しており、位相はどの定点ともほぼ一致していた。

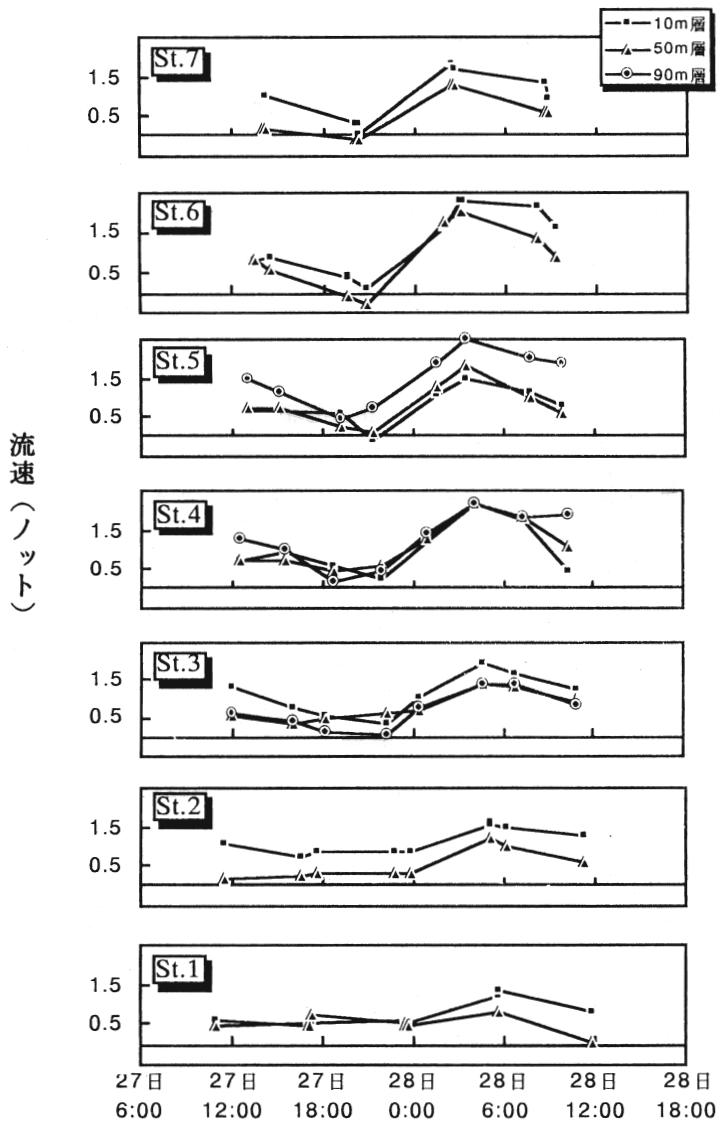


図7 定点別流速の経時変化図。

(3) 潮流成分の除去

潮流成分を除きたいいわゆる海流の流速は、各定点においてそれぞれ8回測定された流速を平均することによって求められる。

また、観測運航で各定点間に費やした時間は30分間であり、1分毎に収録されたデータによると各定点間における29点の位置は、8回の横断で誤差が小さかった。そこで、これらの点も定点とみなしてこれらの定点で8回観測した流速の平均流を求め、各緯度における各層の平均流として図8に示した。

潮流成分を除いた平均流は、海峡の両岸に近いほど表層を流れていたが、中央部では表層よりも底層で多く流れていた(以後、この平均流の速度を流速と呼ぶ)。

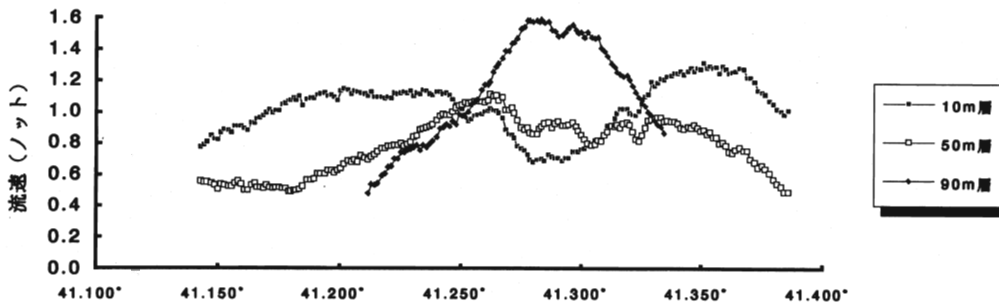


図8 各緯度における潮流成分を除いた平均流速。

(4) 流量計算

定点間断面の水深別平均流速を求め、断面積との積により流量とする。

① 層別定点間平均流速

各定点間の平均流速は、流速を定点間で層別に平均して算出し、表2に示した。流速は1ノットを1,852m/hとして、m/sに換算した。

これによると、St.4~5の90m層の平均流速が最も速く76.52m/s、St.1~2の50m層の平均流速が最も遅く26.82m/sであった。なお、表3の定点間距離は、球面三角法により算出した。

② 水深別流速の推定

水深毎の流速は、観測した3層の流速から直線補間(図9)することにより算出した。定点間平均流速から算出した水深別流速は表2に示し、その鉛直断面における分布は図10に示した。

定線断面における津軽暖流の流速は、海峡中央の最深部で速く、両岸の底層で遅い結果となった。

③ 定点間鉛直断面平均流速

定点間鉛直断面の平均流速は、水深別流速を平均することにより算出し、表3に示した。定点間鉛直断面平均流速は、St.4~5で最も速く66.8cm/s、St.1~2で最も遅く32.1cm/sであった。

表2 層別定点間平均流速と定点間距離.

	距離(km)	水深 (m)	平均流速 (cm/sec)		
			10m層	50m層	90m層
1~2	4.55	79.4	48.09	26.82	
2~3	4.70	106.9	56.72	33.99	30.66
3~4	4.52	132.8	54.82	49.47	47.24
4~5	4.55	138.9	39.86	48.09	76.52
5~6	4.55	131.0	53.70	45.90	61.62
6~7	4.89	80.4	61.99	38.35	

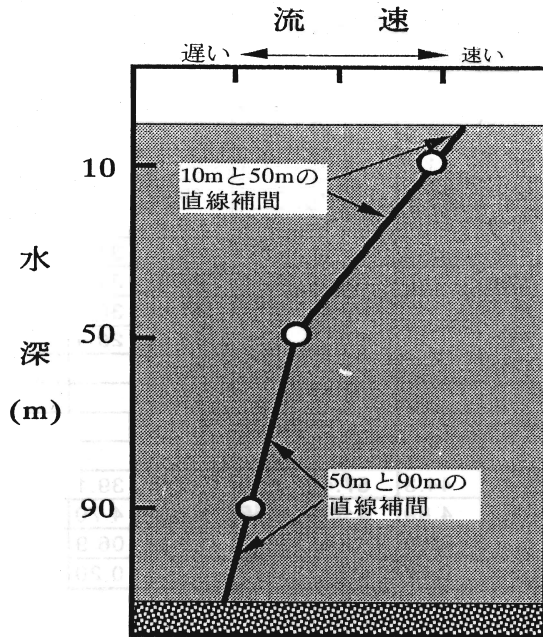


図9 流速補間方法概念図.

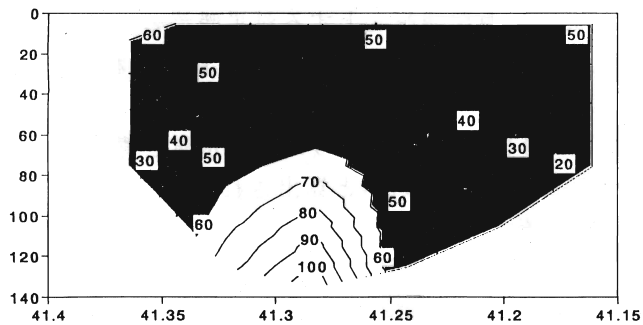


図10 断面流速分布図.

④ 定点間平均水深の算出

定点間平均水深は、各位置において観測された8個の水深データを平均し算出された平均水深を定点間の30個ずつ平均して求め、表3に示した。定点間の平均水深は、St.4～5で最も深く、138.9m、St.1～2で最も浅く79.4mであった。

⑤ 流量

定点間流量は、定点間鉛直断面平均流速と定点間平均水深と定点間距離との積として算出し、表3に示した。

定点間流量は、St.4～5で最も多く、0.42Sv、St.1～2で最も少なく、0.12Svであった。津軽暖流の流量は、定点間流量の和として、1.55Svと算出された。(Sv:10⁶m³/s)

表3 水深別平均流速・定点間平均流速・定点間平均水深・定点間流量。

	7～6	6～5	5～4	4～3	3～2	2～1
5m	64.9	54.7	38.8	55.5	59.6	50.8
15m	59.0	52.7	40.9	54.1	53.9	45.4
25m	53.1	50.8	42.9	52.8	48.2	40.1
35m	47.2	48.8	45.0	51.5	42.5	34.8
45m	41.3	46.9	47.1	50.1	36.8	29.5
55m	35.4	47.9	51.6	49.2	33.6	24.2
65m	29.5	51.8	58.8	48.6	32.7	18.8
75m	23.6	55.7	65.9	48.1	31.9	13.5
85m		59.7	73.0	47.5	31.1	
95m		63.6	80.1	47.0	30.2	
105m		67.5	87.2	46.4	29.4	
115m		71.4	94.3	45.8		
125m		75.4	101.4	45.3		
135m			108.5			
平均流速(cm/s)	44.3	57.4	66.8	49.4	39.1	32.1
水平距離(km)	4.89	4.55	4.55	4.52	4.70	4.55
水深(m)	80.4	131.0	138.9	132.8	106.9	79.4
区間流量(Sv)	0.17	0.34	0.42	0.30	0.20	0.12

考 察

(1) 青函試験場による流量結果の推移

過去にADCPで直接測流された津軽暖流の流量値と、北海道中央水産試験場が青森県沖を北上する対馬暖流と北海道西岸沖を北上する対馬暖流の傾圧地衡流量との差として求めた津軽暖流流量値と青函プロジェクトで測定した青函あわせて5回分の観測結果とをまとめて図11に示した。

1993年11月から1995年3月までに計5回行った函館水試と青森水試による津軽暖流流量調査結果から津軽暖流の流量は平均1.3Svと算出され、季節変動は小さいことが示唆された。

この結果は過去ADCPで観測・算出された結果にほぼ等しく、妥当な流量と考えられる。また、ADCPで算出されたこれらの流量は、青森県沖を北上する対馬暖流と北海道西岸沖を北上する対馬暖流の傾圧地衡流量との差として求めた津軽暖流流量値と、ほぼ等しく、地衡流量差による津軽暖流流量を裏付けた。

これらの結果は津軽暖流が1~4Svで季節変動しているとした過去の知見とは大きく異なるものであった。

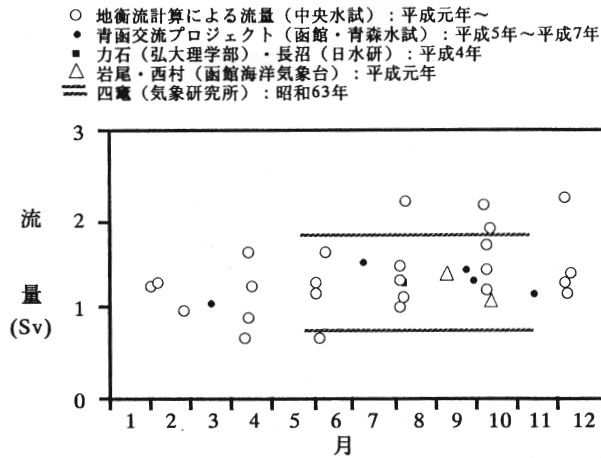


図11 津軽暖流の流量.

(2)地衡流計算による流速

今回の観測終了時に同じ定線で行った海洋観測結果から地衡流鉛直断面図を作成し、図12に示した。

潮流変動が大きく、海底付近でも流れの認められた津軽海峡で、1回の海洋観測結果を元に無流面の仮定が必要な地衡流計算を行うのは無理がある。その結果、地衡流計算による流速断面図は、図10に示した直接測流による流速断面図と大きく異なった。

地衡流計算による流量算出に不適當な津軽海峡で、比較的簡便な流量観測方法が確立された意義は大きい。

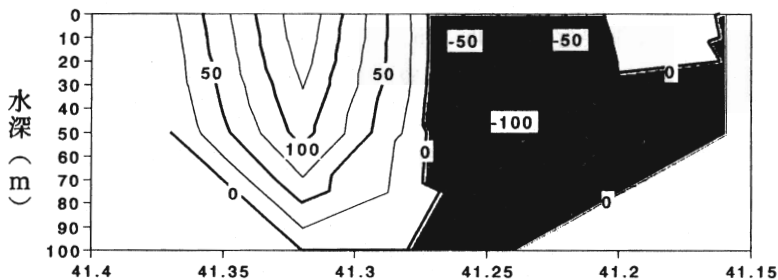


図12 地衡流計算による流速断面.

要 約

- (1)津軽暖流は年間を通じてほぼ1.3Sv程度の流量を維持しており、季節変化は小さい。
- (2)24時間50分往復観測による流量算出方法は、津軽暖流の流量観測法として利用できる。

今後の課題

津軽暖流流量の季節変動は、太平洋側の津軽暖流流出形態などの海洋構造変動、漁況変動の根拠とされてきた。また、日本海舂作崎沖で観測している対馬暖流は季節変動しており、ここで観測される北上流量は時には1.0Svを下回ることがある。これらのことは、津軽暖流の流量が1.3Sv前後で季節的には大きく変動しないだろうという結果からは説明し難いものであり、ここに整合性を求めていくことは今後の課題となるだろう。

本報告で推測された津軽海峡最深部の速い流れは、実際に観測されたものではない。これは、東奥丸のADCPの測流層が3層のみで、3層以外の水深の流速は比較的強引な方法で補間したためであった。結果的にはほぼ現実的な流量を算出できたが、津軽海峡最深部の速い流れを確認するため、開運丸に搭載された多層観測が可能なADCPで、今後この点を調査したいものである。

青森県では日本海と太平洋の定線で定期的にADCPによる測流調査を海洋観測と共に行っている。測流結果が潮流成分の小さい比較的恒常的なものであればデータの意義は大きいですが、定線観測時に収録したデータによると必ずしも潮流成分が小さい場合ばかりとはいえないようであった。このことを確認するため、今後各定線でも24時間50分4往復観測を行って潮流成分の割合を確認する必要がある。

文 献

- 岩尾尊徳(1992) 津軽海峡の流れについて(2). 月刊海洋, 24(4), 226-229.
- 加藤 修(1988) 超音波式潮流計による残差流の推定. 西海区水産研究報告, 66, 59-67.
- 西田芳則・鹿又一良(1955) 青函交流共同研究・函館水試成果報告会要旨.
- 西田芳則・鹿又一良・田中伊織・松原久(1995) 津軽暖流の流量変動. 1995年日本海洋学会秋季大会講演要旨.
- 大西光代・大谷清隆(1994) 北海道西岸の対馬暖流北上流流量の変動と渦構造. 1994年日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 205-206.
- 力石國男・長沼光亮(1992) 津軽暖流と対馬暖流北上流の流量の分配機構. 海と空, 68(2), 67-78.
- 田中伊織(1995) ADCPで測定された津軽海峡内の流れの構造と流量(ORIGINAL). 北海道中央水試, 海洋ゼミ要旨.
- 田中伊織・中多章文・鹿又一良・西田芳則・松原久(1955) 青函共同研究で得られた津軽暖流の流量. 1995年大槌シンポジウム「親潮とその周辺海域の構造と力学」講演要旨.
- TOBA Y, TOMIZAWA and K. HANAWA(1982) Seasonal and year to year variability of the Tsushima-Tsugaru warm current system with its possible cause. La mer, 20, 41-51.
- 四電信行(1994) 海底設置型ADCPにより実測された津軽海峡内の流量変動. 月刊海洋, 26(12), 815-818.