津軽海峡の流量調査

（青函交流プロジェクト）

高　橋　進　吾・佐　藤　晋　一・小　向　貴　志

目　　的

津軽暖流の絶対流量の測定手法を確立し、津軽暖流の流量の季節変動や経年変動を把握する。

背　　景

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海峡で外海と連絡しており（図1)、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と考えられる。したがって、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、海峡をはさむ両岸は対馬海峡・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と呼ばれる測機が近年開発され、このデータの活用に努めているところである。

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」が提案された。

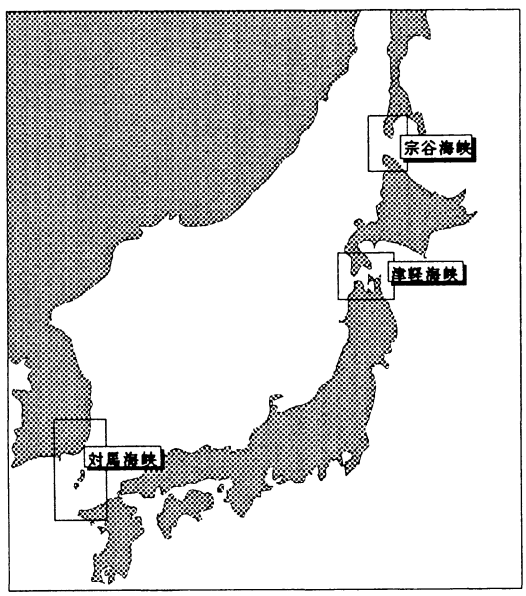


図1　日本海全容図

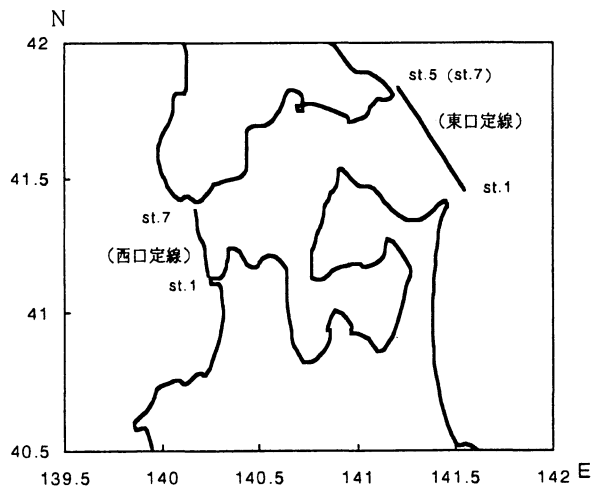


図2　観測定線図

※本報告は函館水試との共同調査の一部である。北海道側の担当者は下記のとおり。

函館水試：西田芳則・鹿又一良、北海道中央水試：田中伊織

材 料 と 方 法

津軽暖流の流向流速の測定は、金星丸（函館水試）と青鵬丸（古野電気社製）、東奥丸（JRC社製）及び開運丸（RD社製・JRC社製）のADCPを使用し、図２に示す観測定線について、今年度は西口定線に加え、東口定線においても4往復横断観測を行った。

調査はこれまでと同様に、定線上を24時間50分で４往復し、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。また、各調査（西口定線は７定点、東口定線は５定点）で任意の１横断時にCTDによる海洋観測を実施した。

測流水深は、３層式ADCPによる西口定線での場合は10・50・90m層に、東口定線での場合は10・50・100m層に設定、そして多層式ADCPの場合は８mごとに設定した。データ収録間隔は、JRC（日本無線株式会社）社製３層式ADCPの場合は１分平均で測定し１分間隔で、古野電気株式会社製３層式ADCPの場合は２分平均で測定し２分間隔で、そしてRD社製多層式ADCPの場合は３分平均で測定し３分間隔で、それぞれデータを収録した。

津軽暖流の流量は、３層式ADCPの場合は流向流速データの定線垂直方向成分から定点間ごとの水深別平均流速を求め、断面積との積により算出した。多層式ADCPの場合は収録ソフトで自動的に計算される１横断ごとの値を使用した。また、潮流成分を除去した流量（流速）の算出は、４往復で得られた８回分の流量（流速）を平均し求めた。

結　　果

流向流速データ収録状況

ADCPによる４往復横断観測は、表１のとおり各調査船により年４回の調査を実施した。

表１　流向流速データ収録状況

調査年月日	調査船名	調査定線	ADCP機種名	測定層
1998.6.9～10	青鵬丸	西　口	FURUNO CI-30	３層式
1998.8.5～6	青鵬丸	〃	〃	３層式
1999.2.24～25	東奥丸	〃	JRC JLN-615	３層式
1998.11.5～6	開運丸	東　口	RD-9HP075P	多層式(層厚８m)
			JRC JLN-615	３層式

2月の東奥丸による調査では、初期設定不良等により正常にデータ収録ができなかったため、西口定線で２回、東口定線で１回の計３回のデータ収録であった。

西口定線（３層式ADCP）

１　流向流速

各調査における１横断ごと（約３時間６分）の測流層別平均流速（定線に直交する成分の流速）の時間変化を図３に示した（東向きの流れを正（西向きの流れを負）とした）。なお、測流３層の流速ベクトル図は「海洋構造変動パターン解析技術開発試験事業」で報告しているので、参照されたい。

６月は１～６横断目まで徐々に流れが弱まり、その後７～８横断目で再び強まる時間変化を示した。流れが弱まった５～６横断目にかけては、北海道側の10・50m層で弱い西向きの流れが観測された。

最高流速は10m層で180cm/s（1横断目）、50m層で170cm/s（８横断目）、90m層で165cm/s（１横断目）であった。

８月も１～６横断目まで徐々に流れが弱まり、その後７～８横断目で再び強まる時間変化を示した。流れが弱まった５～６横断目にかけては、北海道側の50・90m層で６月に比べやや強めの西向きの流れが観測された。最高流速は10m層で175cm/s、50m層で164cm/s、90m層で144cm/s（いずれも８横断目）であった。これまでの調査結果と同様に、各調査における測流３層の流速の時間変化はほぼ同様で、鉛直方向での変化は小さかった。

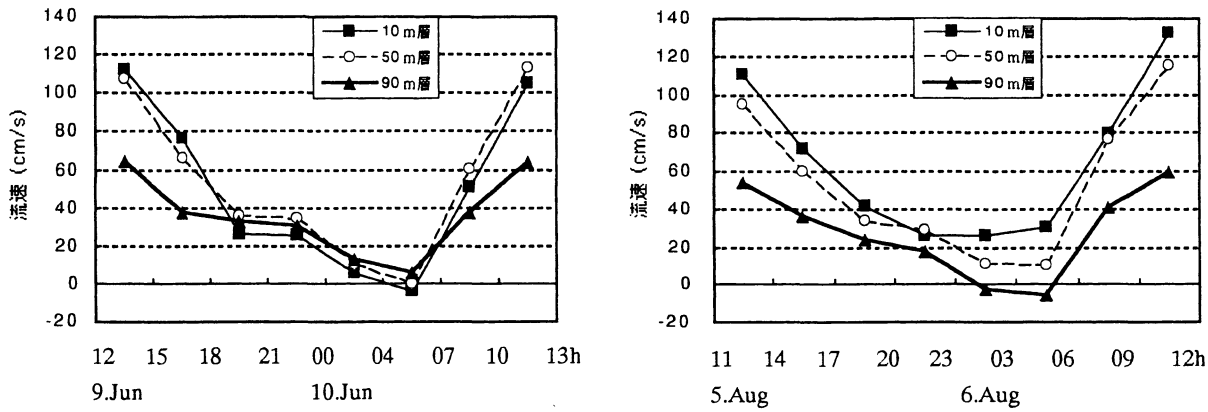


図３　１横断ごとの測流層別平均流速の時間変化（左図：６月調査、右図：８月調査）

２　潮流成分を除去した流速（恒流）及び津軽暖流の流量

１横断ごとに測流３層の定点間ごとの平均流速を直線補完して水深別の流速を求め、これを８横断平均（潮流成分の除去）した流速及び流量について、各調査ごとに図４及び表２～３に示した。

各調査とも恒流としては全体的に東向きの流れがみられ、海峡中央部が最も流れが強く、断面全体を平均すると50cm/s（約１ノット）前後の速さで津軽海峡に流入している状況がうかがえる。流れの強さは、青森側に比べ北海道側でやや強い傾向にあり、８月調査では、５～６横断目にかけて北海道側でみられた西向きの流れが６月に比べてやや強かったため、青森側との流速の差は小さいという特徴がみられた。

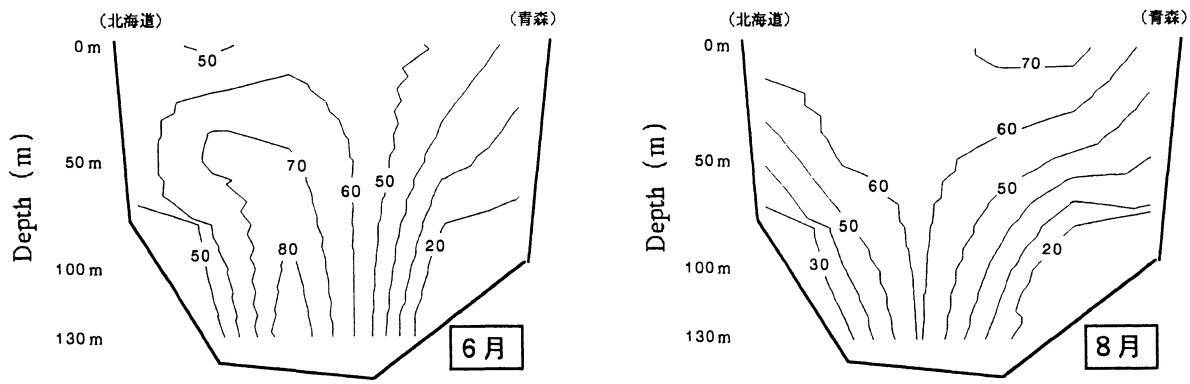


図４　潮流成分を除去した流速（恒流）の鉛直分布（左図：６月調査、右図：８月調査）
定線に直交する東向きの流れを正、単位はcm/s

各調査における津軽暖流流量（１横断毎）の時間変化（図５）は、前述した測流層別平均流速と同様の変動を示しており、変動幅は６月は0.1～3.2Sv、８月も0.1～3.2Svであった。

潮流成分を除去した津軽暖流の流量は、６月は1.62Sv（Sv：×106m³/s）、８月は1.54Svであった。

表２　定点間ごとの水深別平均流速及び定点間流量
（６月９～10日、青鵬丸）

	7～6	6～5	5～4	4～3	3～2	2～1
5m	54.12	47.64	56.02	52.01	49.39	36.97
15m	54.31	53.55	59.08	53.23	46.68	34.48
25m	54.50	59.45	62.14	54.45	43.96	31.99
35m	54.70	65.35	65.20	55.67	41.25	29.50
45m	54.89	71.26	68.26	56.89	38.54	27.02
55m	55.08	72.44	70.96	57.30	34.84	24.53
65m	55.27	68.90	73.32	56.88	30.14	22.04
75m	55.46	65.36	75.68	56.47	25.45	19.55
85m		61.83	78.04	56.05	20.75	
95m		58.29	80.40	55.64	16.06	
105m		54.75	82.76	55.23	11.36	
115m		51.21	85.12	54.81	6.67	
125m		47.67	87.48	54.40		
135m		44.13	89.84	53.98		
平均流速(cm/s)	54.79	58.70	73.88	55.22	30.42	28.26
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)	0.22	0.35	0.47	0.33	0.15	0.10
					流量	1.62(Sv)

表３　定点間ごとの水深別平均流速及び定点間流量
（８月５～６日、青鵬丸）

	7～6	6～5	5～4	4～3	3～2	2～1
5m	66.64	63.59	62.80	72.62	74.00	56.88
15m	61.52	63.54	62.95	69.49	69.18	53.47
25m	56.41	63.49	63.10	66.35	64.35	50.06
35m	51.29	63.44	63.26	63.22	59.53	46.65
45m	46.18	63.39	63.41	60.08	54.71	43.24
55m	41.06	61.13	63.37	56.52	47.70	39.84
65m	35.95	56.63	63.14	52.54	38.47	36.43
75m	30.83	52.14	62.91	48.56	29.23	33.02
85m		47.65	62.68	44.58	20.00	
95m		43.15	62.45	40.60	10.77	
105m		38.66	62.22	36.61	1.53	
115m		34.16	62.00	32.63	-7.70	
125m		29.67	61.77	28.65		
135m		25.17	61.54	24.67		
平均流速(cm/s)	48.73	50.42	62.69	49.79	38.48	44.95
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)	0.19	0.30	0.40	0.30	0.19	0.16
					流量	1.54(Sv)

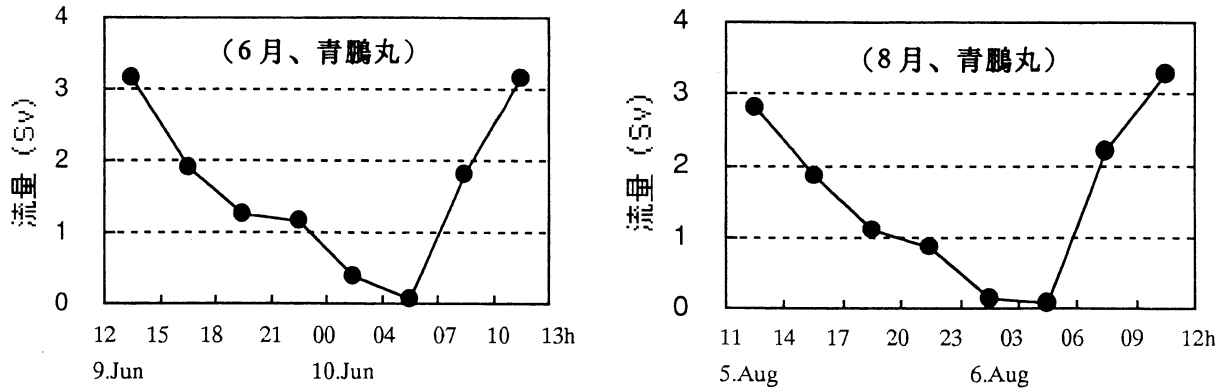


図５　津軽暖流流量（１横断毎）の時間変化（左図：６月調査、右図：８月調査）

東口定線（多層式・３層式ADCP）

１　流向流速

11月には開運丸に搭載された２種類の多層式と３層式ADCPを用いて、海峡東口において初めての4往復横断観測を行った。

多層式ADCPにより収録された８ｍごとのデータを用いて、１横断ごとの流速鉛直分布を図６に示した。

各横断をみると、北上する横断（尻屋崎→恵山岬）では、海峡中央付近の表層を強流部に東向きの流れがみられるが、南下する横断（恵山岬→尻屋崎）ではその中心が50m層に移り、流れがやや弱まるという異なる分布をみせ、誤差成分が含まれていることが示唆された。

一方、３層式ADCPで得られた10・50・100m層のデータを西口定線と同様の方法で、１横断ごとに定点間ごとの平均流速を直線補完して水深別の流速を求め、鉛直分布として図７に示した。東口定線における測流３層のデータからの補完は、西口定線に比べ水深が深いこと、底層まで直線補完すると誤差が大きくなる恐れがあることなどから、今回は平均水深の約80％の水深までの直線補完とした（表４参照）。

多層式（図６）と３層式（図７）の各横断の流速鉛直分布を比較すると、両者の分布範囲は類似しており、このことからも多層式ADCPの場合は、流速ベクトルが針路方向の右側に偏っていることが考えられ、このため、北上時は東向きの流れが強め（西向きは弱め）に、逆に南下時は弱め（西向きは強め）になったものと考えられた。現時点では、誤差成分の補正方法が確立していないため、今後の課題としたい。

これらの理由から、３層式ADCPによる結果を代表として述べると、東向流の分布中心（強流部）は、１横断目は海峡中央付近～やや北海道側にあったものが、時間の経過とともにやや青森側に移り、そして再び北海道側に移るという分布移動がみられた。一方、主に北海道側にみられる西向流の分布は、３横断目には表層から底層にかけてのやや弱い流れであったものが、時間の経過とともに西向きの流れを強めながら、その分布は海峡中央付近までの中層以深へと移動し、東向流の分布と比較的対応している状況がうかがえた。

また、東向きの流れの時間変化は、海峡西口でみられる全体的に著しく弱くなるような流れは観測されず、表層の強流部では常に100～150cm/s（約２～３ノット）程度の流れがみられ、その変動幅は小さかった。

最高流速は10m層で179cm/s（３横断目）、50m層で187cm/s（４横断目）、100m層で135cm/s（３横断目）で、一方、定点間ごとの平均流速の最高流速は10m層でst.４～５間の152cm/s（１横断目）、50m層でst.４～５間の150cm/s（1横断目）、100m層でst.３～４間の94cm/s（３横断目）と海峡中央部で速い傾向がみられた。

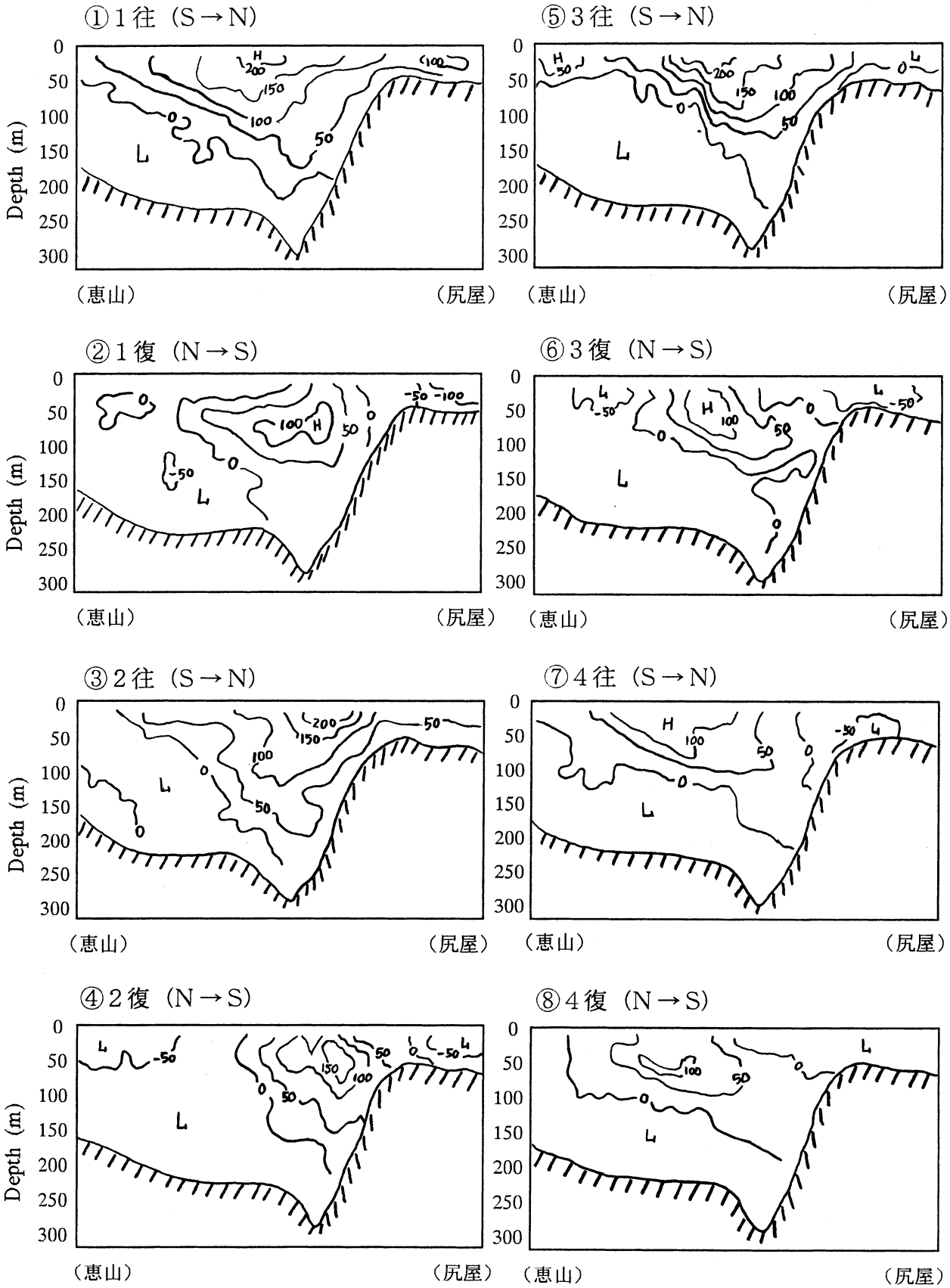


図6　多層式ＡＤＣＰにより測流された１横断ごとの流速鉛直分布図
各横断とも左側が北海道（恵山岬（st.７））、右側が青森（尻屋崎（st.１））
東方向の流れを正（西方向を負）、単位はcm/s

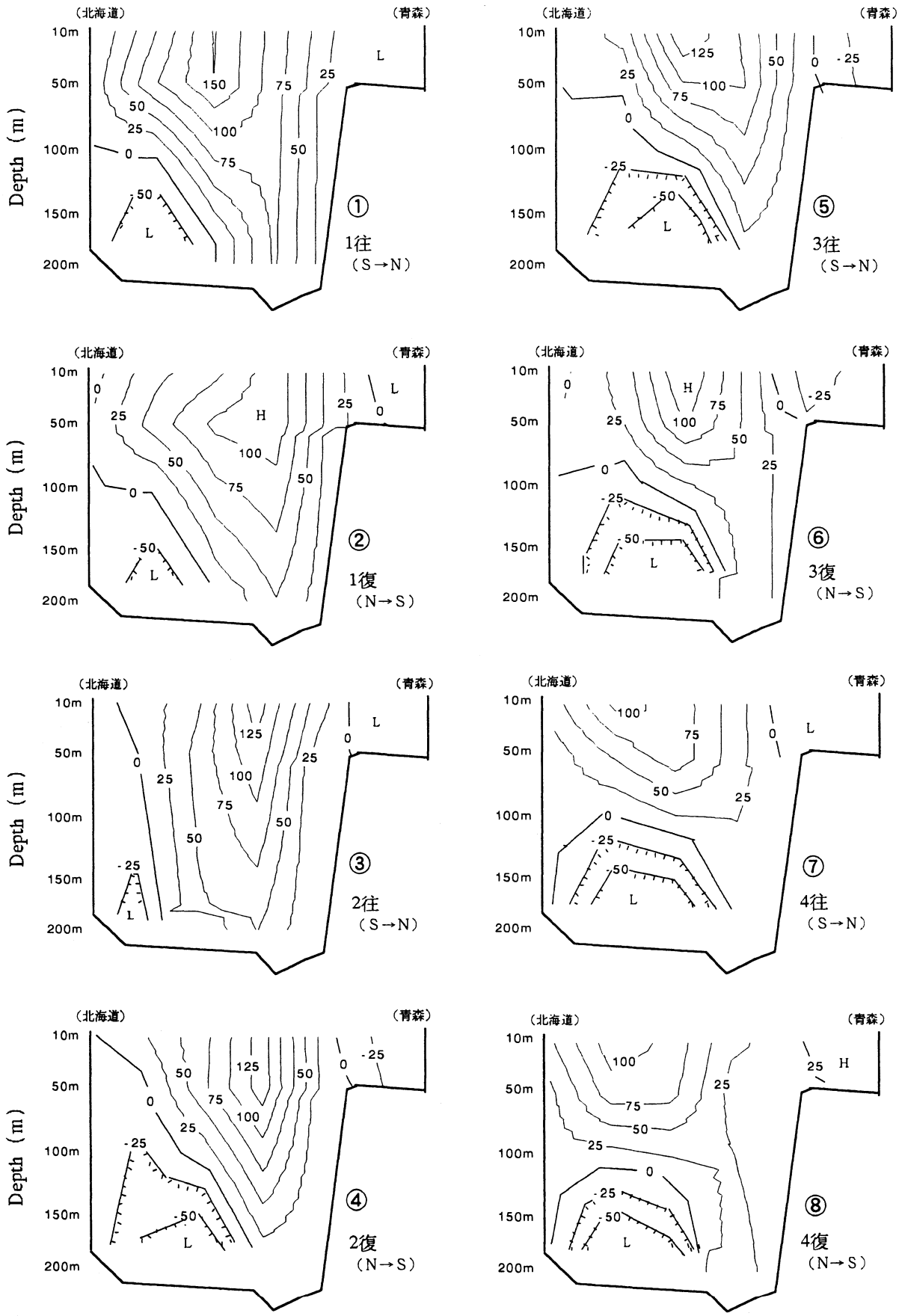


図７　３層式ＡＤＣＰにより測流された１横断ごとの流速分布図
定線に直交する東向きの流れを正（西向きを負）、単位はcm/s

2　潮流成分を除去した流速（恒流）及び津軽暖流の流量

1横断ごとに測流3層の定点間ごとの平均流速を直線補完して水深別の流速を求め、これを8横断平均（潮流成分の除去）した流速及び流量について、図8及び表4に示した。

恒流としては、海峡中央の表層を強流部とした東向きの流れと、北海道～海峡中央にかけての水深約100m以深にみられる西向きの流れが分布し、東向流の鉛直方向での変化は海峡西口と同様に小さかった。

津軽暖流流量（1横断毎）の時間変化は図9のとおりで、変動幅は1.0～3.8Svであったが、海峡西口のように全体的に流れの強さが変化するのではなく、むしろ流れの強さは大きく変化せずに、東向流と西向流の分布範囲の拡大縮小により流量が時間変化するものと推測される。

このときの潮流成分を除去した津軽暖流の流量は2.09Svであった。

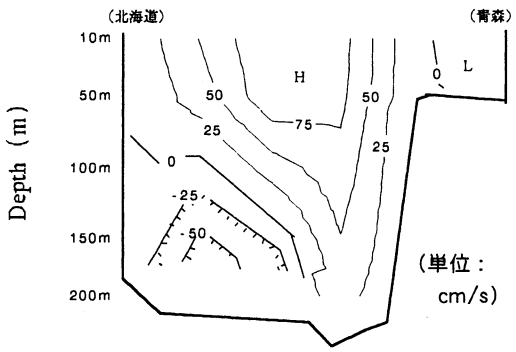


図8　潮流成分を除去した流速（恒流）の鉛直分布
定線に直交する東向きの流れを正（西向きを負）

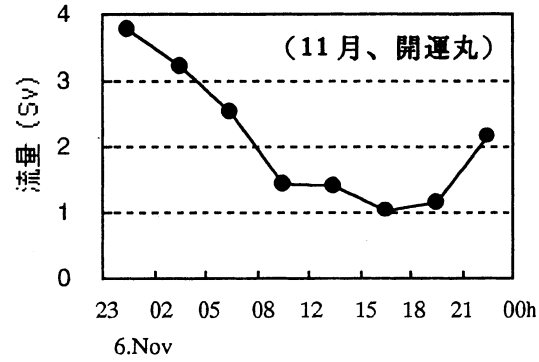


図9　津軽暖流流量（1横断毎）
の時間変化

表4　定点間ごとの水深別平均流速及び定点間流量
（11月5～6日、開運丸）

	7～6	6～5	5～4	4～3	3～2	2～1
10m	7.41	53.70	99.10	86.18	8.55	-11.91
20m	5.89	50.14	98.01	85.24	8.34	-11.23
30m	4.37	46.58	96.92	84.30	8.14	-10.54
40m	2.86	43.01	95.82	83.36	7.93	-9.86
50m	1.34	39.45	94.73	82.43	7.73	-9.18
60m	0.90	30.12	83.18	79.06		
70m	0.47	20.78	71.64	75.69		
80m	0.04	11.45	60.09	72.32		
90m	-0.40	2.11	48.55	68.95		
100m	-0.83	-7.22	37.00	65.58		
110m	-1.27	-16.56	25.46	62.21		
120m	-1.70	-25.89	13.92	58.84		
130m	-2.13	-35.23	2.37	55.47		
140m	-2.57	-44.56	-9.17	52.10		
150m	-3.00	-53.90	-20.72	48.73		
160m	-3.44	-63.23	-32.26	45.37		
170m		-72.57	-43.81	42.00		
180m				38.63		
200m				35.26		
210m						
平均流速(cm/s)	0.50	-1.28	42.40	64.30	8.14	-10.54
水平距離(km)	8.38	8.62	8.39	8.39	8.62	8.39
平均水深(m)	181.5	215.8	219.0	246.0	77.8	61.6
区間流量(Sv)	0.01	-0.02	0.78	1.33	0.05	-0.05
					流量	2.09(Sv)

ちなみに、誤差成分の含まれる多層式ADCPの場合の流量の変動幅は－0.12～5.64Svで、３層式ADCPと比べると（図10）、全般的に北上時（奇数横断）に多く南下時（偶数横断）に少ない傾向がみられ、流量からも前述のような誤差成分の傾向が確認される。これらを８横断平均することにより多少誤差成分が除去されるため、多層式ADCPの潮流成分を除去した流量は2.22Svとなり、３層式の結果とほぼ程度の値となった。

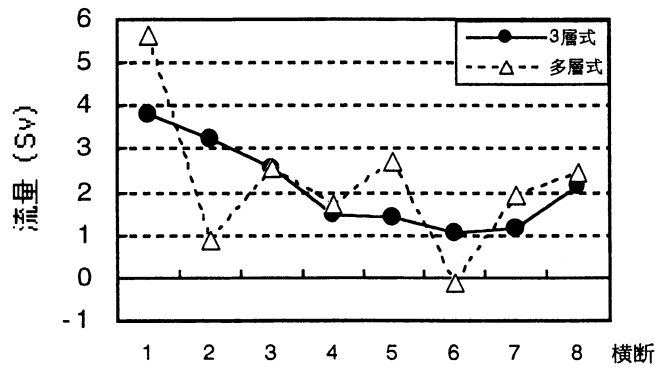


図10　多層式と３層式ADCPにおける津軽暖流流量の時間変化の比較

考　　察

1993（平成５）年～1998（平成10）年に青函交流プロジェクトで測流され、流量が算出された西口定線における調査結果を表５に示した。この調査結果から潮流成分を除去した津軽暖流の流量は、最大で７月に観測された1.99Sv、最小で３月の1.17Svで、平均は1.53Svであった。

表５　潮流成分を除去した津軽暖流の流量（西口定線）

No.	調査年月日	流量(Sv)	調査機関	ADCP機種
1	1993 11 10～11	1.20	函館水試　金星丸	ＪＲＣ
2	1994 7 5～7	1.55	〃	〃
3	9 21～22	1.60	〃	〃
4	9 26～27	1.55	青森水試　東奥丸	〃
5	1995 3 14～15	1.17	函館水試　金星丸	〃
6	9 18～19	1.35	〃	〃
7	12 4～5	1.73	〃	〃
8	1996 3 28～29	1.30	〃	〃
9	6 12～13	1.33	〃	〃
10	8 28～29	1.41	青森水試　東奥丸	〃
11	9 3～4	1.47	函館水試　金星丸	〃
12	12 2～3	1.83	〃	〃
13	1997 5 12～13	1.63	青森水試　青鵬丸	FURUNO
14	6 11～12	1.54	函館水試　金星丸	ＪＲＣ
15	6 30～7/1	1.99	青森水試　青鵬丸	FURUNO
16	9 1～2	1.84	〃　東奥丸	ＪＲＣ
17	9 1～2	1.83	函館水試　金星丸	〃
18	11 4～6	1.44	青森水試　開運丸	ＲＤ
19	1998 3 2～3	1.22	函館水試　金星丸	ＪＲＣ
20	6 9～10	1.62	青森水試　青鵬丸	FURUNO
21	7 23～24	1.62	函館水試　金星丸	ＪＲＣ
22	8 5～6	1.54	青森水試　青鵬丸	FURUNO
	平　均	1.53		

流量の季節変動（図11）は、昨年度までと同様に、春季に少なく、夏・秋季に多く、また12月にも多い傾向がみられるが、年によりばらつきがあり、明確な季節変動はみられなかった。

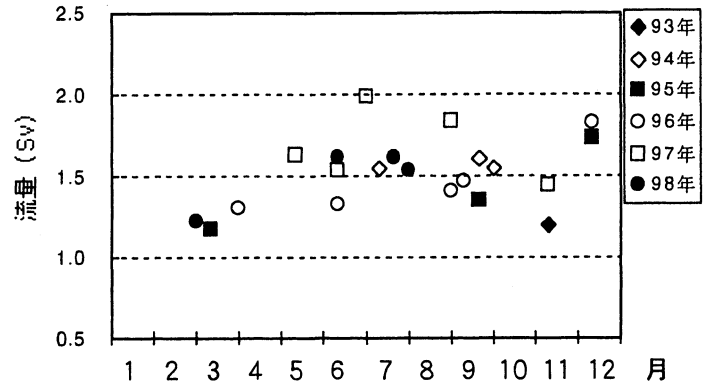


図11　潮流成分を除去した津軽暖流の流量の月別変化

各調査において任意の１横断時に海洋観測を行ったので、同時期に行った日本海定線観測における舳作崎線（北緯40度36分）の結果も合わせて図12～16に水温・塩分鉛直分布を示した。

日本海舳作崎線と西口定線における水温・塩分鉛直分布をみると、日本海からは西口定線とほぼ同程度の水深帯の沿岸側の水が津軽海峡に流入している状況がうかがえる。

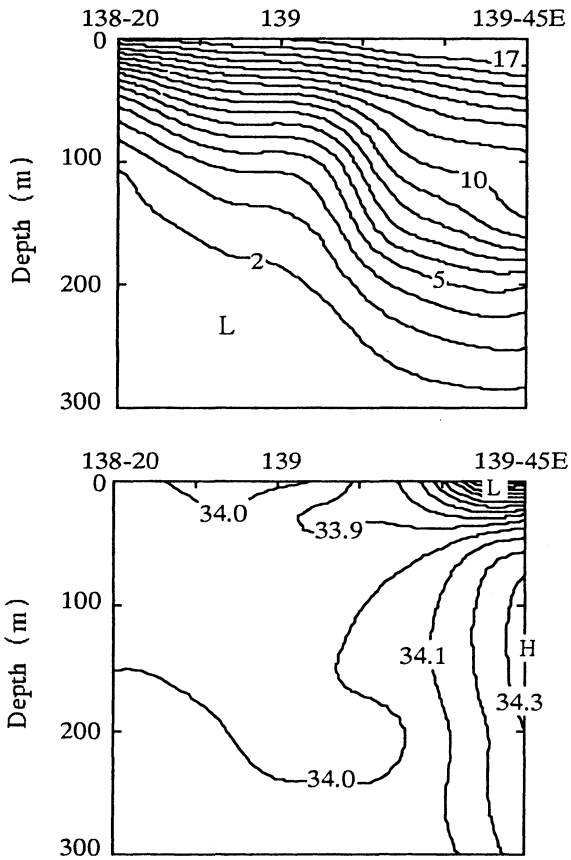


図12　舳作崎線における水温・塩分鉛直分布
（６月10～11日日本海定線観測、東奥丸）
上図は水温、下図は塩分分布図

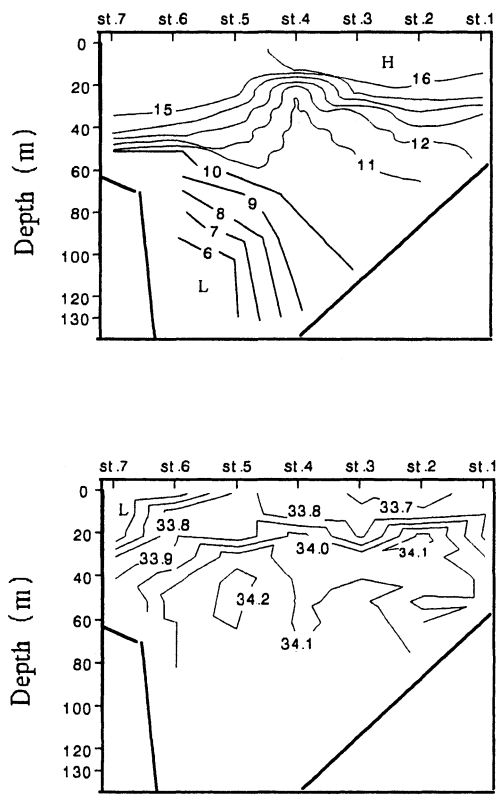


図13　西口定線における水温・塩分鉛直分布
（６月９～10日調査、1横断目に観測）
上図は水温、下図は塩分分布図

また、東口定線における水温・塩分鉛直分布をみると、尻屋沖の表層を中心に海峡西口から流入したと思われる沿岸部表層低塩水、それ以深の中層には塩分33.8～33.9の分布範囲を中心とした海峡内で変質をうけ低塩分化した対馬暖流系水、そしてその下層には北側から潜り込むように侵入していると思われる低温・低塩分水が分布している。特に、下層に潜り混むように侵入している水は、流速鉛直分布の西向きの流れとよく対応している状況がうかがえる。

今年度は、海峡東口での4往復横断観測から流れの時間変化をある程度把握できたが、今後さらに調査を重ね、季節変動などについても把握していきたい。また、多層式ADCPにおける誤差補正方法の確立と東口定線における津軽暖流の流量の算出方法の検討も行っていきたい。

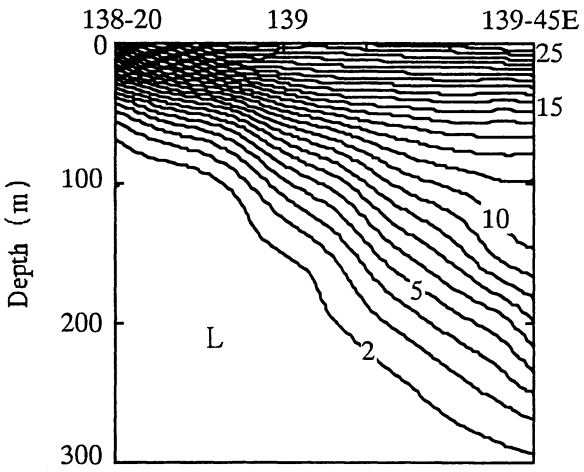


図14　舳作崎線における水温・塩分鉛直分布
（7月28～29日日本海定線観測、東奥丸）
水温のみ（塩分値異常のため図は省略）

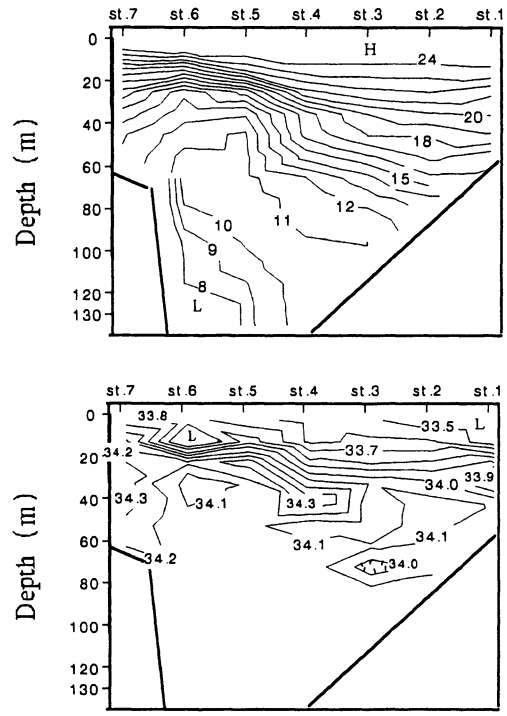


図15　西口定線における水温・塩分鉛直分布
（8月5～6日調査、1横断目に観測）
上図は水温、下図は塩分分布図

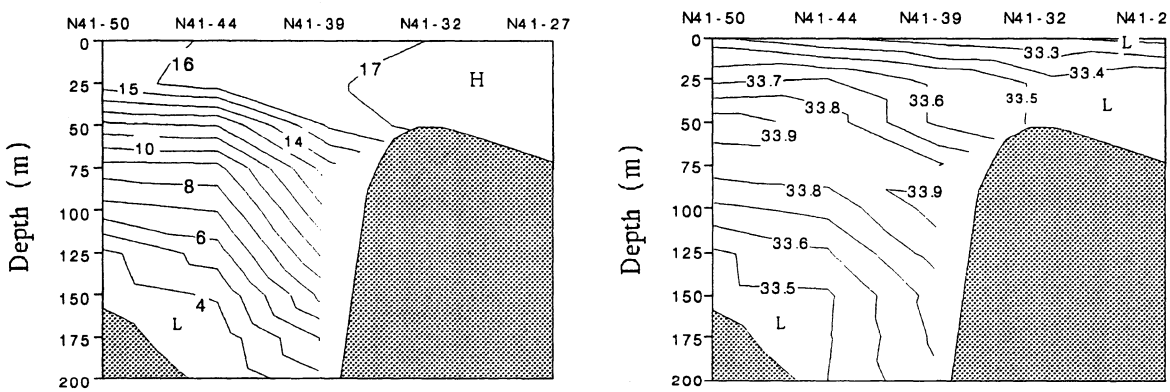


図16　東口定線における水温・塩分鉛直分布　（11月5～6日調査、4横断目に観測）
左図は水温、右図は塩分分布図

なお、津軽暖流の流量についてはADCPによる測流のほか、電位差（北海道福島－青森県今別間に設置された海底ケーブルによる電位差）や水位差（例えば、深浦-函館間や竜飛－吉岡間の水位差）からの流量の推定についても報告されており、これらとADCP４往復横断観測法との関連についても検討していくとともに、漁況等との関係についても考察していきたい。

謝　　辞

青鵬丸、東奥丸及び開運丸各船長はじめ乗組員の方々には、各定点を限られた時間で航走するうえ長時間の連続観測である本調査にご協力いただいき、貴重なデータを収得することができた。ここに記して深く感謝申し上げる。

参　考　文　献

天野　勝三（1986）：青森県沖合の海況変動に関する研究その２．青森県水産試験場

石川　孝一・柴田誠司・宮尾　孝（1987）：津軽海峡の海洋構造．月刊海洋，19（1），34-39.

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.

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

長沼　光亮・市橋　正子（1993）：ADCPによる津軽海峡西口の横断測流．1993年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨

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

塩脇　清一（1994）：地電位差観測による津軽海峡の海潮流モニタリングの研究．平成７年度弘前大学大学院修士論文

四竈　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.

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

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年度日本海洋学会秋季大会講演要旨

西田　芳則・鹿又　一良・田中　伊織・松原　　久（1996）：ADCPにより実測した津軽暖流流量と水位差との相関．1996年度日本海洋学会秋季大会講演要旨

松原　　久・西田　芳則・鹿又　一良・田中　伊織（1996）：津軽暖流の流量について．青森県水産試験場事業報告

佐藤　晋一：津軽海峡の流量調査（青函交流プロジェクト）．平成8年度青森県水産試験場事業報告

佐藤　晋一（1999）：青森県舮作崎西方における対馬暖流の地衡流量について．平成９年度青森県水産試験場事業報告

中多　章文・田中伊織（1998）：北海道西岸における対馬暖流傾圧地衡流量について．1998年度日本海洋学会春季大会講演要旨

高橋　進吾・佐藤晋一（1998）：津軽海峡の流量調査（青函交流プロジェクト）．平成９年度青森県水産試験場事業報告