

陸奥湾における水温変動 I

——時間領域でのブイの相互関係——

仲村 俊毅

はじめに

陸奥湾にブイロボットが設置されて5年を経過した。この間に蓄積された資料は陸奥湾の海況変動機構を知るうえできわめて貴重なものとなっているものの、充分な解析がなされているとはいいがたい。本報告はブイのいくつかの測定項目のなかで、もっとも信頼性が高く、かつ欠測の少ない水温の資料を用い、ブイ相互間の相関関係を検討し、それらの結果を海洋構造や海況変動と関連づけることを試みたものである。なお、統計計算にあたっては県総務部電子計算課の御助力をいただいた。

資料ならびに解析法

ブイの資料は故障あるいは保守管理により長期にわたって欠測することがあるため年間を通しての相関の検討はむずかしい。したがって月別に10~20日間の毎時のデータを用い、相関の季節変化についても検討を行った。資料は極力50年度のものを使用するようにしたが、欠測によりやむを得ない場合は49年度、51年度のものも用い、年度のちがいは無視してとりまとめた。計算は同時相関係数および時差相関係数である。また一部にはMEM法によるスペクトル解析を行っている。なお観測地点は図1に示した5地点である。

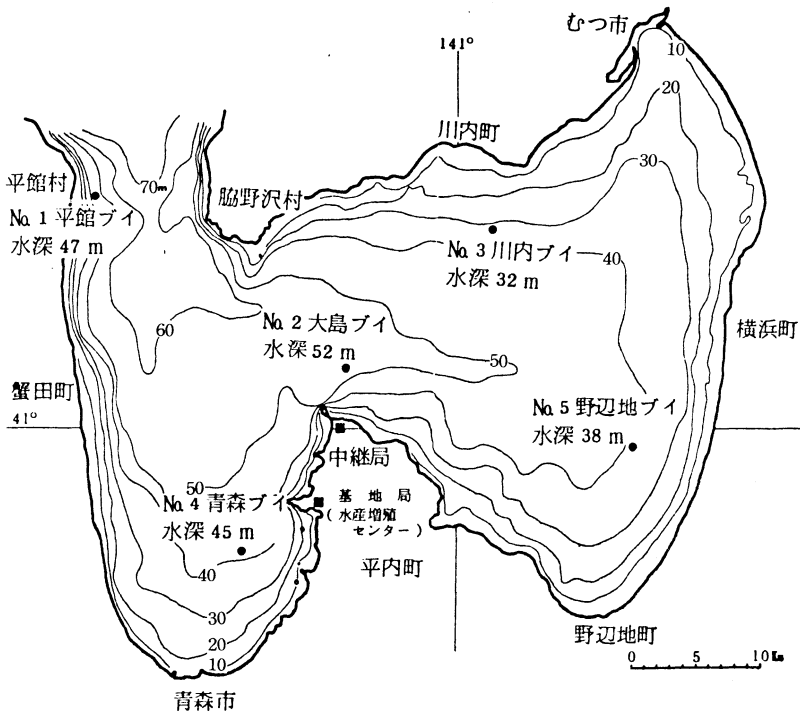


図1 観測地点

結 果

1) 深さによる相関

1-1) 同 時 相 関

図2に各ブイの各層間の同時相関係数を示した。この計算には図中の黒丸を中心にした前後5日間、計10日間の毎時の水温資料を用いた。相関係数0は破線で示し、負の部分には斜線を引いてある。

No.1ブイでは周年にわたって相関がよい。加熱期に一時的に相関が悪くなるが、これは表層での加熱が急激に起こるためであろう。このように同時相関が比較的高いのは水温変化の様相に深さによる違いが小さいことを意味している。

No.2ブイでは冷却期の表層、中層間を除き、相関はよくない。加熱初期の中、底層間で一時的に相関がよくなるが、この理由についてはよくわからない。

No.3ブイでは加熱期に負の相関が現われるが、他の時期には相関は良好である。加熱期に現われる負の相関は表面に加えらわれる周期的な熱量変化が、鉛直混合、拡散などにより下層へ伝播される際に、その位相にズレを生じるためと思われる。

No.4ブイでは冷却期を除いて相関はよくない。加熱初期から冷却初期に現われる負の相関は前述したNo.3ブイにおける場合とは機構が異なるように思われる。これは表層水温が安定から低下へ向う時期においても、中、底層水温はさらに上層を続けていることによるのであろう。す

なわちNo.3ブイの場合は短期の変動に対する応答の遅れ(位相のズレ)を意味し、No.4ブイの場合は年周期の変動に対する応答の遅れというように、同じ負の相関であっても出現時期の違いによって解釈も異なってくる。

No.5ブイでは加熱期を除いて比較的相関がよく、相関係数の季節変化のパターンはNo.3ブイの場合とよく似ている。これに両者ともに東湾に位置し、ブイの設置水深、観測水深ともに浅いことによるのであろう。しかし、加熱期に負の相関が現われないことから、鉛直混合、拡散などの活発さに多少の差はあるものと思われる。

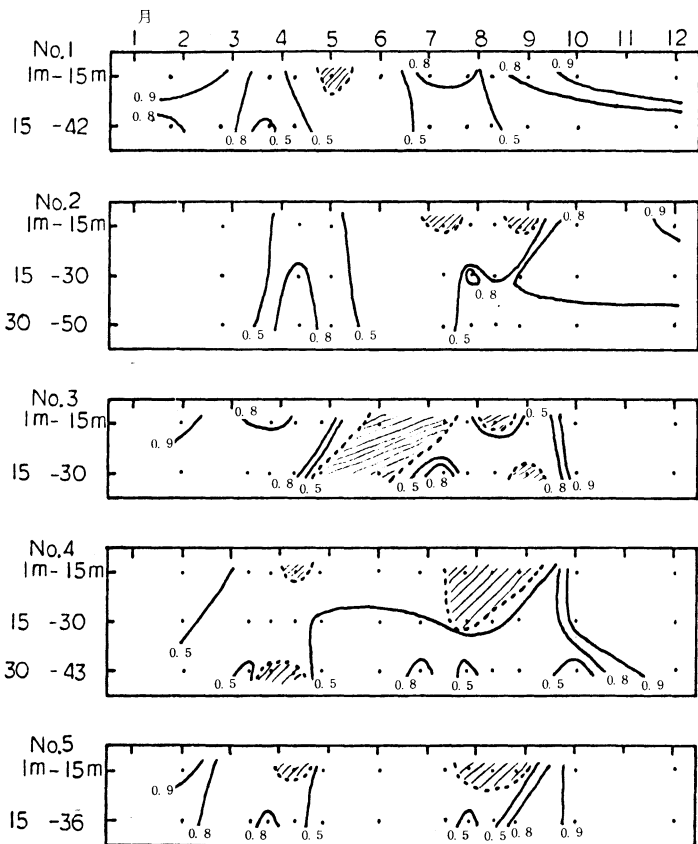


図2 各ブイ各層間の同時相関係数

1-2) 時 差 相 関

図3に同時および時差相関係数の最大値と時差を示した。計算に使用した資料は同時相関係数の場合と同じである。同時相関の場合と同様に相関係数0は破線で示し、負の相関には斜線を引いてある。時差については、同時相関が卓越する場合は0となり破線で示した。時差が正の場合は図中のXの方を進めた場合、負はYを進めた場合である。この時差相関係数の挙動は大まかに言って熱の鉛直方向の移動の様相を示すものと言えよう。

No.1ブイの相関係数の変化パターンは同時相関係数の場合とほとんど差がなく、水温変化の様相に鉛直的な相違がないことを意味している。

No.2ブイの場合も同時相関の変化パターンと大きな差はない。しかし、加熱末期から冷却期にかけての中一底層間にしばしば負の相関や、高い正の相関が現われている。この理由についてはこの計算結果だけではよくわからない。

No.3ブイでは加熱期に大きな負の相関が現われ時差も負となっている。これは上層での水温変化が下層のそれよりも常に先行していることを意味すると同時に、位相のズレはあるものの上層での変化の下層への伝播が良好に行われていることも意味している。

No.4ブイでは加熱期に一時的に高い相関が中、底層に現われ、水温変化に作用する機構が中、底層間で変わらないことを予想させる。

No.5ブイは周年にわたって相関は比較的良好で変化のパターンはNo.3ブイとよく似ている。

いずれのブイにおいても冷却期には深さによる相関が良くなり、かつ有意な時差を生じなくなる。これは、いうまでもなく、鉛直混合、対流などにより水温に鉛直的な差がなくなるためである。しかし、水深の深いNo.2、No.4の底層ではかならずしもその上層に比べて相関がよいとは言えず、鉛直混合、対流の影響が底層まで及んでいないように思われる。また、この両ブイでは他のブイと比べて冬季において深さによる相関がよくない。これはおそらく冬季間における湾内の水塊分布とブイの設置位置の関係によるものと思われ、以下のブイ相互間の相関のなかで議論される。

2) ブイ相互の相関

2-1) 同 時 相 関

図4にブイ相互間の同時相関係数を示した。計算は図中の黒丸を中心とした20日間の資料について行った。

No.1ブイとNo.2ブイは加熱期の表層、冷却期の表層、中層間で相関が良い。これは他のブイにも共通しており、加熱、冷却の季節変化が局所的ではなく全湾的に起こるためである。

No.1ブイとNo.4ブイの相関は周年にわたって比較的良好である。

No.2ブイとNo.4ブイでは冬季および底層間の相関がよくない。冬期の陸奥湾では東湾と西湾の間に最大4℃にも及ぶ水温差を生ずるが、その中間に位置するNo.2ブイと、空間的な水温差の小さい西湾奥部に位置するNo.4ブイとの差が現われたものと思われる。また底層間の相関がよくないのは水温変化に作用する機構が同一でないことを予想させる。

No.2ブイとNo.3ブイの場合、およびNo.2ブイとNo.3ブイでは相関の季節変化のパターンがよく似ている。底層間の相関がよくないのは設置水深の違いによるものと思われる。

No.3ブイとNo.5ブイは同年にわたって相関が良好である。これは両ブイともに東湾に位置しているため水温変化に作用する機構が同一なのであろう。しかし、鉛直的な水温差の大きい加熱期、加熱末

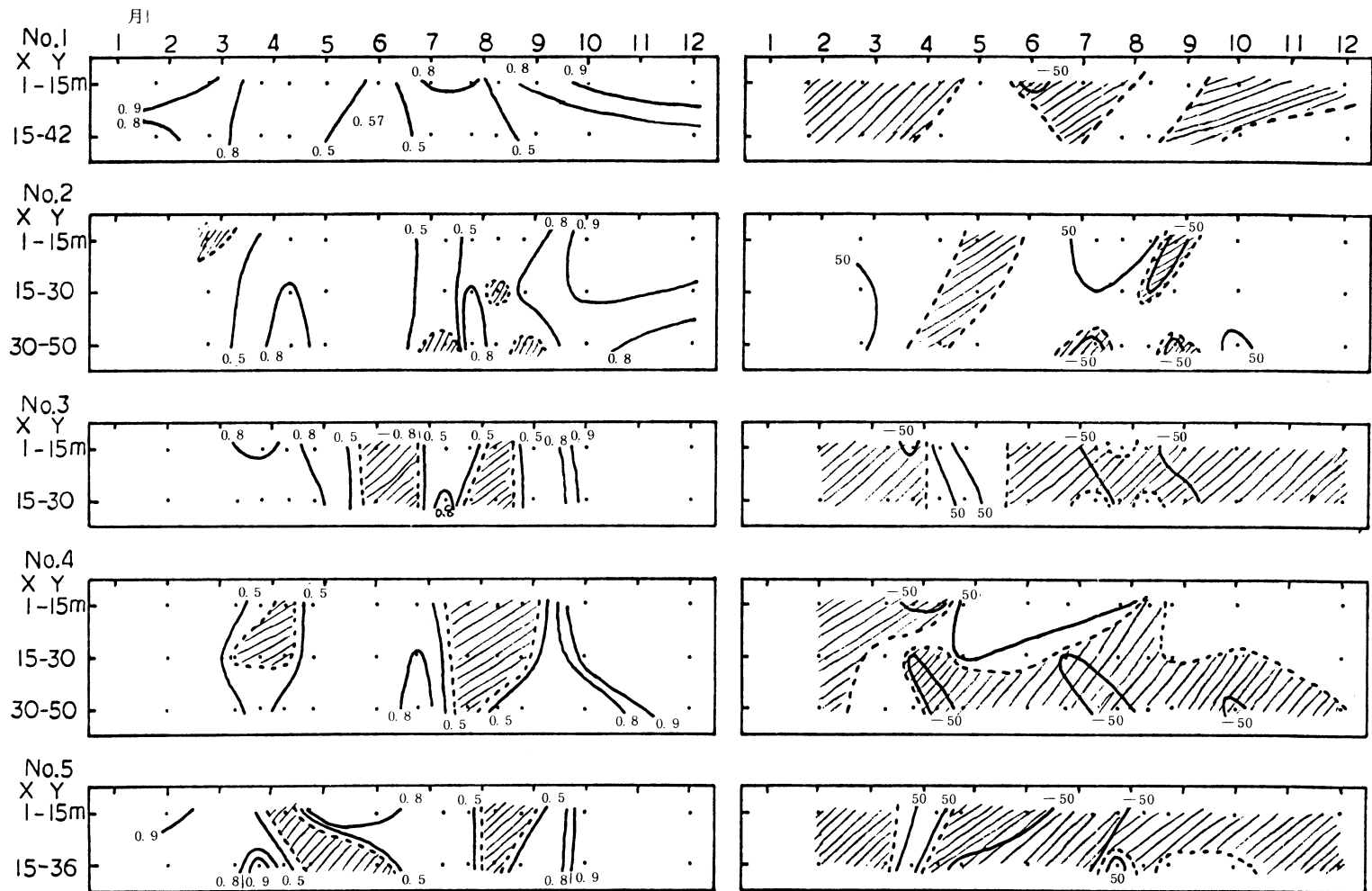


図3 同時および時差相関係数の最大値(左)と時差(右) (時差の単位は時間)

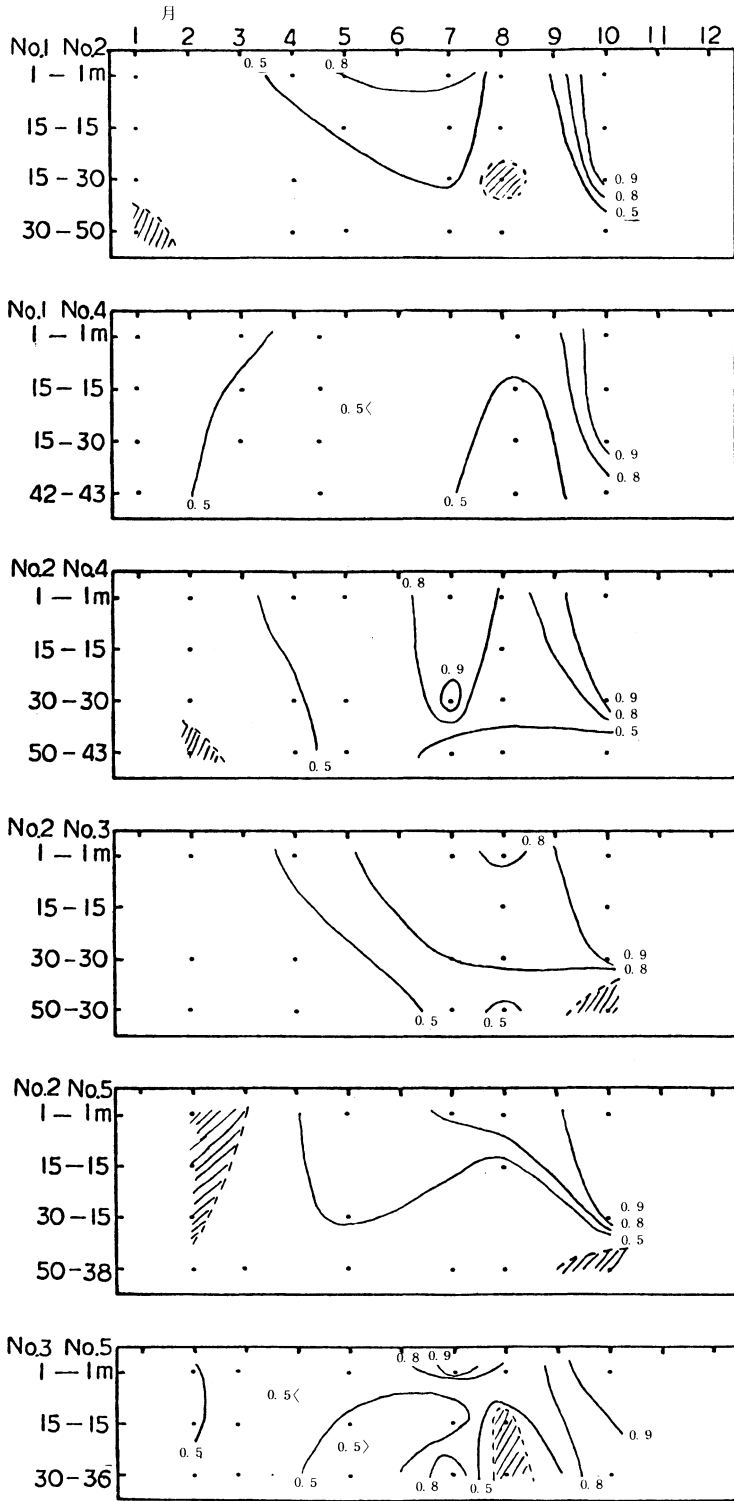


図4 ブイ相互間の同時相関係数

期の中、底層において相関が悪く、また負の相関が現われる。これは東湾全体での水の鉛直的な水の運動となんらかの関係があるように思われる。

2-2) 時差相関

時差相関係数の挙動は水の動きやそれに伴う混合拡散過程を含めた熱の移動と関連がある。したがって我々の興味は同時相関係数と時差相関係数との間に有意な差を生じたとき、その差がいかなる理由により生じたかということにある。いうまでもなく水温の変化から水の動きを推定できるのは空間的に水温差がある場合や熱の収支が局所的に起こっている場合に限られる。

図5に同時相関係数と時差相関係数の最大値との絶対値での差を示した。図から一見してわかるとおり冬季および底層間において差が大きくなる。加熱、冷却期の表層、中層においては差は小さく、時間的なズレによる相関に変化がないことを示している。

この時差相関係数の挙動をより詳細にみるために同時相関係数との差が0.3を上回るもののみをとりあげて表1に示した。表中の時差が正の場合はXの時間を進めた場合で、Yに対するXの遅れ時間を意味し、負の場合はその逆である。

1月のNo.1ブイとNo.2ブイの関係は注目に値する。全層において時差がほぼ一致し、相関係数もほぼ様な値となっている。図6に昭和50年1月下旬のNo.2ブイの水温変化を示した。24日~25日にかけて急激な水温のジャンプあるいはドリフトが起っている。この時期のこのような現象は暖水塊の張り出し以外にはなく、この場合はおそらく津軽暖流水と考えてよいであろう。前述した時差相関はこのように示しているように思われる。すなわち津軽暖流水は湾口部を通過後5日経過して大島沖に達し、相関係数の減少はその間の変質をものがたっているものと解釈できる。

2月におけるNo.2ブイとNo.3ブイ、あるいはNo.2ブイとNo.5ブイも面白い関係にある。つまり表層、中層では時差は負、底層では正となっている。これは冬季に東湾で冷却された水が底層において西湾へ張り出すためと考えられる。

No.3ブイとNo.5ブイの中、底層では2月から8月まで常に有意な時差相関が出現し時差も5~7日となっている。これは同時差相関のところでも述べたが、東湾全体でのなんらかの水の動きと関連するように思われる。このような事情をより詳細に調べるため水温と風の資料についてスペクトル解析を行った。

図7にNo.3ブイ30m層とNo.5ブイ38m層の日平均水温の差、および川内午前9時測定⁽²⁾の風向、風速の南北成分、東西成分についてそれぞれMEM法によるスペクトル解

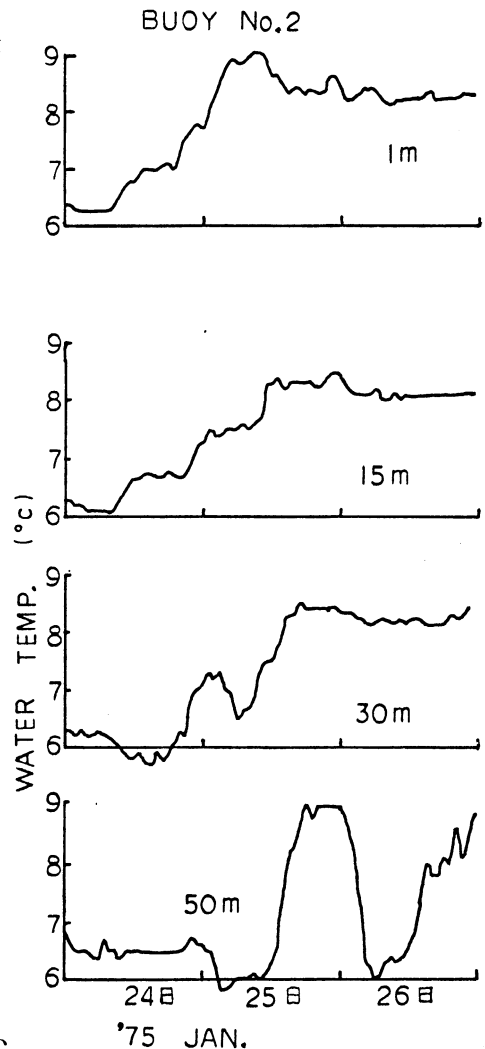


図6 50年1月No.2ブイの水温変化

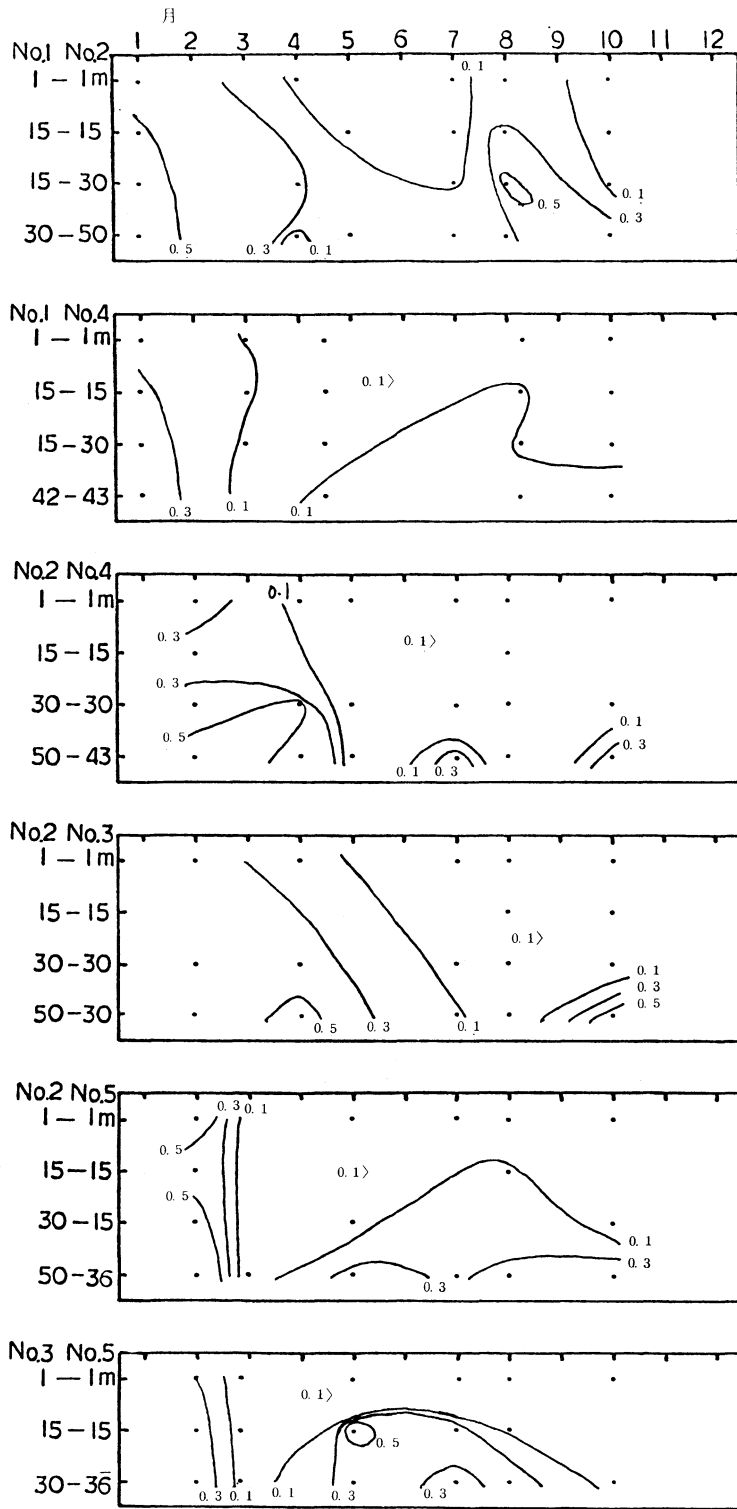


図5 時差相関係数の最大値と同時相関係数の差
(注) 絶対値の差を示してある。

表1 時差相関係数と時差

1 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 1	1 m	No. 2	1 m	0.58	- 4.9
	15 m		15 m	0.64	- 4.9
	15 m		30 m	0.64	- 5.0
	42 m		50 m	0.46	- 5.1
No. 1	15 m	No. 4	15 m	0.73	- 2.7
	15 m		30 m	0.72	- 2.9
	42 m		43 m	0.61	- 4.5

2 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 2	1 m	No. 4	1 m	- 0.64	5.9
	30 m		30 m	- 0.61	3.5
	50 m		43 m	0.67	- 7.0
No. 2	1 m	No. 3	1 m	- 0.48	- 5.7
	30 m		30 m	- 0.56	- 5.3
	50 m		30 m	- 0.53	4.4
No. 2	1 m	No. 5	1 m	0.65	- 7.0
	15 m		15 m	0.58	- 7.0
	50 m		36 m	0.62	4.7
No. 3	15 m	No. 5	15 m	- 0.85	- 6.9
	30 m		36 m	- 0.86	- 7.0

4 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 1	15 m	No. 2	30 m	0.48	- 5.6
No. 2	30 m	No. 4	30 m	- 0.53	- 5.2
	50 m		43 m	- 0.58	5.2
No. 2	30 m	No. 3	30 m	- 0.52	5.6
	50 m		30 m	- 0.72	6.3

5 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 2	50 m	No. 5	36 m	- 0.76	- 6.8
No. 3	15 m	No. 5	15 m	0.80	4.9
	30 m		36 m	0.63	1.8

7 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 2	50 m	No. 4	43 m	0.67	0.2
No. 3	15 m	No. 5	15 m	0.65	4.6

8 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 1	15 m	No. 2	15 m	- 0.43	2.2
	15 m		30 m	- 0.44	- 0.8
No. 2	50 m	No. 5	36 m	0.46	6.5
No. 3	30 m	No. 5	36 m	- 0.50	6.7

10 月					
X		Y		時差相関	時差(日)
No. 1	42 m	No. 2	50 m	0.43	- 3.3
No. 2	50 m	No. 4	43 m	- 0.49	- 7.0
No. 2	50 m	No. 3	30 m	0.72	7.0
No. 2	50 m	No. 5	36 m	- 0.57	2.9

(注) 本表の時差相関係数は同時相関係数との差が絶対値で 0.3 以上のもののみを記載した。

折結果を示した。資料は昭和50年 4月1日から同 7月31日までの 122 個である。

風速成分のスペクトルをみると東西成分が南北成分よりもエネルギーレベルで約 2 倍となっている。そのスペクトルピークは周期にして 5.5、7.1、11 日にあり、水温差のスペクトルピークの 5.5、7.1、10.0 日とそれぞれほぼ一致している。このような結果とさらに No. 3 ブイ、No. 5 ブイが風の東西成分に対して直交するように位置していることも考え合わせると、この水温差の変化は風の東西成分による

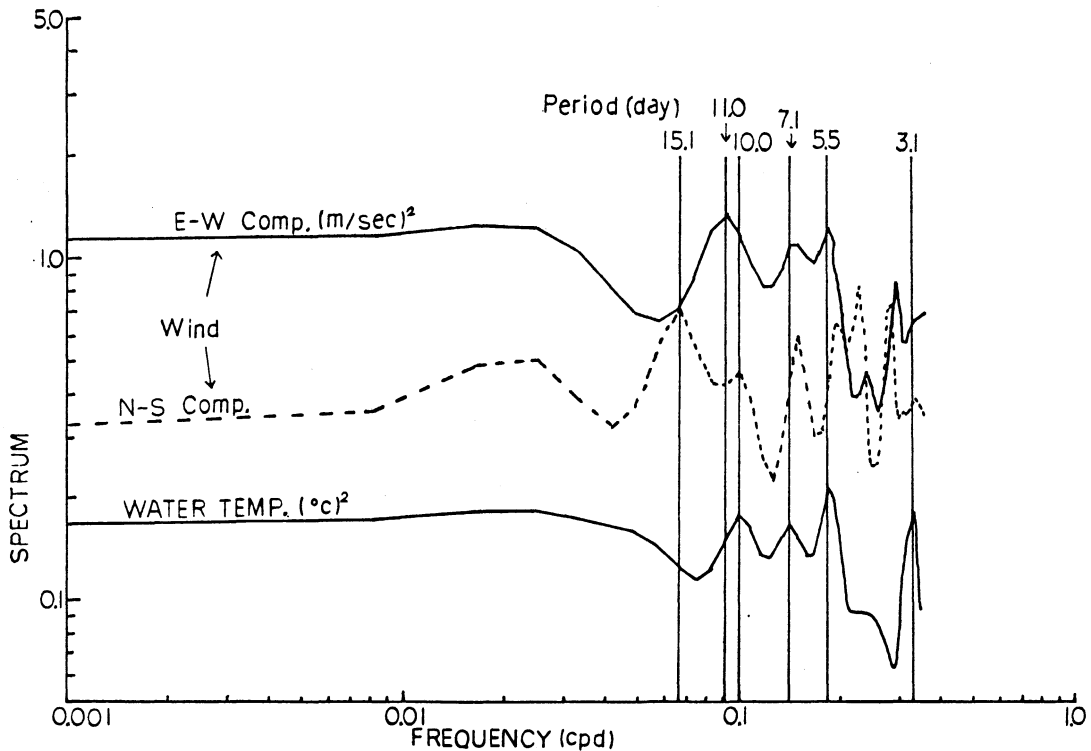


図7 No. 3 ブイ30m層とNo. 5 ブイ36m層の日平均水温の差、および川内における風の南北成分と東西成分のスペクトル (MEMによる)

エクマントランスポートに関連するものと考えられる。しかし次元のスペクトル解析だけでは位相やコヒーレンスに関する情報は得られないので、さらに高次のスペクトル解析法や回転スペクトルなどの解析法を導入する必要がある。

10月における結果をみると底層においてのみ有意な時差相関が得られ、冷却期における底層で水平的な温度差が維持されていることを示している。

考察と要約

深さによる相関はNo. 1、No. 3、No. 5 ブイでは年間を通じて良好である。No. 3 ブイとNo. 5 ブイはともに東湾に位置し、かつ水深も浅いことから相関の季節変化パターンはよく似かよっている。設置水深の深いNo. 2、No. 4 ブイの中、底層間の相関は加熱期の一時期を除いて相関がよくない。特に水温が全湾的に均一になり、深さによる水温差のなくなる冷却期においても相関係数は相対的に小さい。これはおそらく鉛直混合、対流の不活発さによるものと思われるので鉛直渦動拡散係数の見積りを行ってみた。

鉛直次元の非定常熱伝導式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \quad \text{—— (1)}$$

ここで θ は温度、 t は時間、 Z は深さ、 $\alpha^2 = K/C \cdot \rho$ 、 K は渦動拡散係数、 C 、 ρ はそれぞれ海水の比熱と密度でその積はおおよそ1である。したがって $\alpha^2 = K$ と考えてよい。今、海面 $Z = 0$ で R_0 なる振幅を持った周期的な温度変化が与えられたとき解は

$$\theta(z, t) = \bar{\theta} + R_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right) \quad \text{--- (2)}$$

となる。このとき深さ z における水温変化の振幅は

$$\frac{R(z)}{2} = R_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right) \quad \text{--- (3)}$$

そこで深さ z_1 、 z_2 ($z_2 > z_1$) における水温較差 (振幅の 2 倍) を R_1 、 R_2 とし、 R_1/R_2 なる比を用いると (3) 式より

$$\alpha^2 \div K = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(\ln R_1 / R_2)^2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \quad \text{--- (4)}$$

となり渦動拡散係数 K を算出できる。この (4) 式を使って筆者が前に計算したブイの日平均水温の調和解折の結果から、⁽¹⁾ 年周期変動の振幅の 2 倍を年較差として渦動拡散係数の値を表 2 に示した。これを見ると No. 4 ブイの 30 m と 43 m 間の渦動拡散係数は他に比べて 1 オ

表 2 渦動拡散係数の値

ーダー小さく鉛直拡散が不活発であることを示していよう。もちろんこのような方法での拡散係数の見積りには問題はあるが、しかし陸奥湾においては 30 m という水深は物理的に重要な意味を持つものと思われ 30 m 以浅と以深で水の動きを支配する機構が異なるものと考えられ、これがさらに水深 30 m 近辺に泥線が明瞭に形成されていることと関連するのであろう。

No. 3 ブイと No. 5 ブイの間には風によって引き起こされると思われる水温変動があるが、これは今後さらに詳細に検討する予定である。

冬季に西湾に起こる水温のジャンプは流入した津軽暖流水の挙動によるものと思われる。これは陸奥湾での海水交換にも関連する問題でありさらに詳細に検討する必要がある。

ブイ	水深	年較差(°C)	K (cm ² /sec)
3	1 m	18.48	26.5
	15 m	16.96	12.6
	30 m	14.84	
4	1 m	17.52	73.6
	15 m	16.64	72.5
	30 m	15.74	4.7
	43 m	13.02	
5	1 m	19.32	26.8
	15 m	17.72	22.6
	36 m	15.20	

文献、資料

- (1) 青森県 (昭和 51 年 3 月) 陸奥湾漁業開発基本計画調査最終報告書
- (2) 青森県、青森地方気象台 青森県気象月報