

福島沖合海域における流動と拡散特性

Current variability in the sea off Fukushima, Japan

(財)電力中央研究所 正会員 ○ 加藤 正 進
同 上 同 上 和 田 明
同 上 同 上 角 湯 正 剛

1. はじめに

海域における物質の拡散に関する研究は、海洋における大スケール拡散現象に関する研究、沿岸海域における比較的小スケールの拡散現象に関する研究など種々の時間・空間スケールを有する現象に対して展開されており、特に近年においては、環境保全に関連して産業排水や発電所の温排水などの沿岸海域における拡散現象に着目した研究が積極的に進められている。

海域における物質の拡散現象は、海域の流動特性にきわめて強く影響されるため、拡散現象を把握するに当っては対象とする現象の時間・空間スケールを考慮した現地観測が不可欠であるものと考えられる。

著者らはこれまで、我国沿岸数km以内で実施された15日程度の流動連続観測記録に基づき、1～2日程度の時間スケールを有する現象を対象として、我国沿岸海域における流動、拡散特性を検討し、また数日以上¹⁾²⁾³⁾の時間スケールを有する現象に対処すべく、約10ヶ月間の流動連続観測記録に基づき、流動の長周期変動や流動および拡散特性の季節的变化について検討を加えて来た。

本報告は、福島沿岸海域および沖合5・10・15km海域で実施された流動連続観測の結果と、沿岸海域で実施された水温連続観測の結果に基づき、当該海域の流動および拡散特性の時間、空間的な変動を検討し、その結果について述べるものである。

2. 現地観測地点の概要

福島沖合海域においては、北上する親潮と南下する親潮が対合し黒潮暖水と親潮冷水の混合水域が形成され、さらに沿岸に沿って南下する津軽暖流の影響も加わるため、きわめて複雑な海流構造が観測されており、混合水域には数多くの水温前線が不規則に分布し、広域にわたりさ迷い動く水塊も観測されている。

図-1に今回の解析に用いた流動と風の観測点の配置を示す。

各観測点における観測期間、離岸距離、観測水深および測定間隔を表-1に示す。

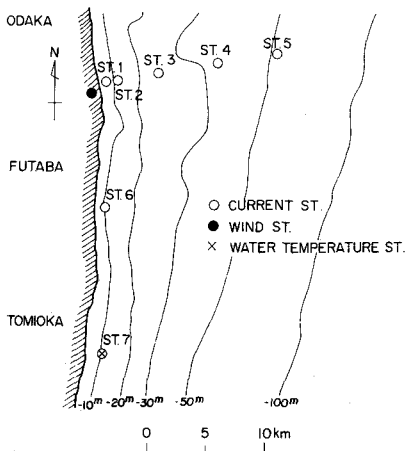


図-1 観測点の配置

表-1 観測諸元

観測点	ST.1	ST.2	ST.3	ST.4	ST.5	ST.6	ST.7
離岸距離	0.6 Km	1.6 Km	5 Km	10 Km	15 Km	1 Km	1.6 Km
観測水深	-2 m		-2 m, -10 m, -15 m			-2 m	-2.5 m
測定間隔	15分		5分			5分	15分
観測期間	'74. 6			'76.2		'74.12	'75.12
	'74. 7			1			1
	'74.10			'76.3			'76. 9
	'74.12						
	(各15日間)		(15日間)			(15日間)	(10ヶ月)

なお、表-1に示した各観測点における観測は、東北電力株式会社（ST.1～ST.5）および東京電力株式会社（ST.6、ST.7）により実施された。

3. 流動特性

3.1 平均的流動の特性

福島沖合海域における平均的な流動特性を調べるために、観測記録に基づき、15日平均流および24時間平均流を求め、その特性を検討した。図-2は、ST.3、ST.4およびST.5における'76年2～3月の15日平均流ベクトルを水深別に示したものである。

この結果によれば、ST.3およびST.4における15日平均流はほぼ同一の特性を有しており、流向は南東方向、流速値は-2m層で約 10 cm/sec と大きく、-10、-15m層では 5 cm/sec 以下である。ST.5における15日平均流はST.3、ST.4と若干異なり、-2m層における流速値がきわめて小さく、-10、-15m層においてはST.3、ST.4とほぼ同程度の流速値であるが流向は南向である。

図-3は、ST.7で観測された約10ヶ月の流動観測記録より、各月の代表的な15日間の記録を抽出して求めた各月における15日平均流ベクトルである。各月の15日平均流の流速値はきわめて変動しているが、流向は1月および5月を除き比較的安定しておりほぼ南向である。

また、全観測期間の平均流は、約 3 cm/sec の流速値を有する南流である。

図-4は、ST.3、ST.4およびST.5の-10m層における24時間平均流の東方分速(U)、北方分速(V)の頻度分布である。

ST.3およびST.4の東方分速頻度分布には $\pm 5\text{ cm/sec}$ 付近に比較的確かなピークが存在するが、北方分速頻度分布は比較的一様な形状を有しており、 15 cm/sec 以内の北流および南流の発生頻度はほぼ等しいことを示している。

上述の24時間平均流および15日平均流の特性は、ST.1、ST.2およびST.6における観測記録にも認められ、福島沖合海域の一般的な特性と考えることができよう。

以上の結果より、福島沖合海域においては、南流が基本的流動特性であり、その上に数日の変動周期を有する流動現象が重畳されているものと推定することができる。

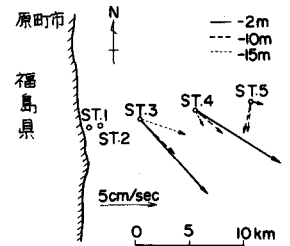


図-2 平均流ベクトル

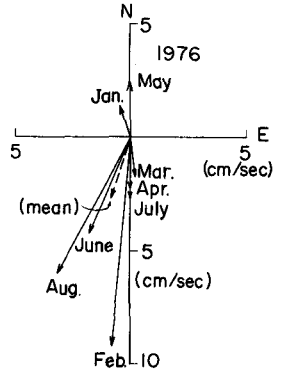


図-3 各月における平均流のベクトル

3.2 流動の長周期変動

福島沖合海域における流動の長周期変動特性を調べるため、各観測点における観測記録を統計解析してその特性を検討した。図-5は、'76年2～3月の観測記録より得られたST.3、ST.4およびST.5の-2m層とST.7の-2.5m層における流速ベクトルである。なお、図中には図-1に示した観測点で得られた風のベクトル（ベクトルの方向は風の吹送方向）も合せて示してある。

各観測点で得られた流速のベクトルは比較的良好に対応しており、観測期間中にはほぼ同程度の流速値を有する南流および北流が1日前後の継続時間を有して交互に出現して

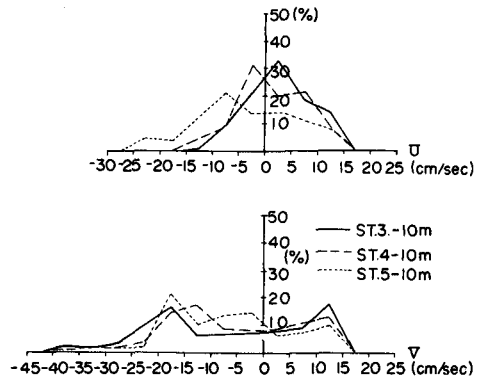


図-4 24時間平均流の頻度分布

いることがわかる。

また、ST.1・ST.2およびST.6において'74年に観測された15日間の流速観測記録にも、同様の流速変動が認められる

15日間の流動観測記録からは、数日の変動周期を有する現象を明確に把握することは困難であるが、ST.7における約10ヶ月の流動観測記録からは、長周期の流速変動現象を比較的明確に把握することが可能である。図-6は、ST.7におけるエネルギースペクトルである。³⁾

流れの基本的エネルギーは、数日以上の変動周期を有する低周波域に集中しており、潮汐運動による1日および半日周期のスペクトルのピークの外に、約16日、7日、5日、3日程度の周期にスペクトルのピークが認められ、前述の数日周期を有する流速変動の存在が確認できる。

しかし、観測記録を数ヶ月単位に分割すれば、観測期間により5日前後の周期変動が卓越する期間あるいは3日前後の周期変動が卓越する期間が認められ、福島沖合海域における流動の変動周期は季節的に変動するものと考えることができる。

流速変動の空間的ひろがり調べのため、

ST.3・ST.4およびST.5間の相互相関から沿岸に直角な方向における現象の相関を、ST.3・ST.2およびST.6間の相互相関から沿岸に沿う方向における現象の相関を検討した。この結果、ST.3・ST.4およびST.5の各測点間、各観測層間の相関度はきわめて高く、位相遅れもほとんど認められないことが明らかとなった。

ST.1・ST.2とST.6間の相関も強く、ST.6の流動現象は、ST.1およびST.2と比較し約2時間程度の位相遅れを有している。

これらの結果より、福島沖合海域における数日周期の流速変動の空間スケールは数10 km以上であり、変動現象は沿岸に沿う方向に位相差を有して生起している可能性がある。

W. O. Duingらは、Florida Currentの長期間にわたる観測記録の統計解析結果から、2~3、4~5、8~25日の周期を有する流動変動現象を見出し、これらの長周期変動が気象要素、特に風の変動と比較的強い相関関係にあることを指摘している。⁴⁾

また、D. A. Brooksは、Florida Currentの長周期変動を、久保田らは福島沖合における数日周期の変動を陸棚波との関連で論じているが、現段階では十分に結論に達していない。⁵⁾

図-6は、気象要素として風を選び、ST.3・ST.4およびST.5の流速変動との相互相関を計算した結

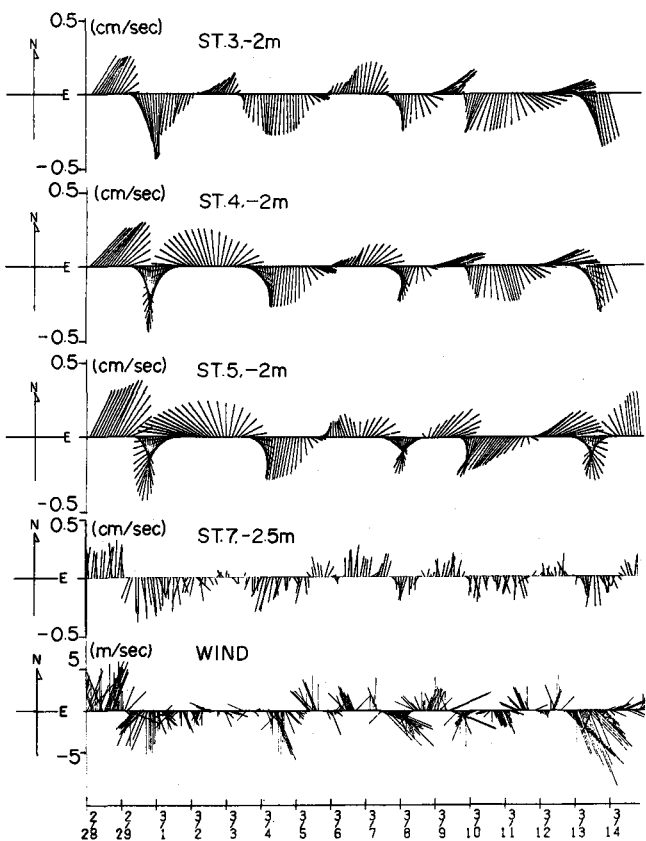


図-5 流速ベクトルと風のベクトル

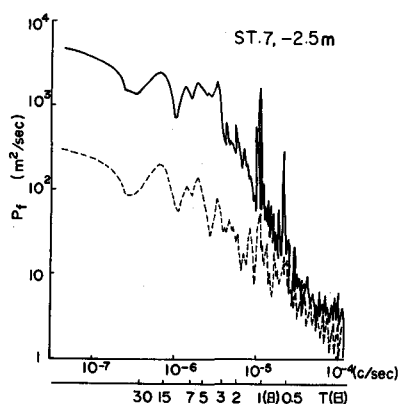


図-6 10ヶ月データのスペクトル

果である。なお図中にはユヒーレンシイも合せ示してある。

この結果によれば、福島沖合海域の数日周期の流速変動と風の
変動との間には比較的良好な相関関係が認められるが、相互
相関の最大は遅れ時間約15時間付近に生じており、各観測点
における流動現象が風に対して遅れすぎているように思われる。

福島沖合海域における長周期変動の発生過程には、風の変動
のみならず他の諸気象要素や、海流構造の変動などが要因とし
て作用するものと考えられ、現象の発生機構の解明に当っては
さらに詳細な検討が必要である。

3.3 流動の短周期変動と拡散係数の推定

福島沖合海域における1日以下の短周期変動の特性と拡散係
数の推定値を観測記録に基づき検討した。

図-8は、ST.3・ST.4およびST.5の-10m層にお
ける北方分速のエネルギースペクトルである。

変動のエネルギーは、周波数の増大とともに急激に減少して
おり、 10^{-5} から 10^{-4} の間では-3乗程度、さらに高周波側で
は $-5/3$ 乗程度の減少勾配を有している。この傾向は、乱流理
論における浮力領域および慣性領域のエネルギー減少傾向と類似している。

各観測点におけるエネルギースペクトルには顕著なスペクトルのピークが
認められず、卓越した短周期変動は存在していないものと推定できる。

また、各観測点におけるスペクトルの形状やエネルギーレベルはほぼ同一
であるから、流動の短周期変動の統計的性質は、空間的にほぼ一様である
ものと考えられる。ST.7における10ヶ月データを15日間データに
分割して統計解析した結果によれば、1日以下の短周期変動のエネルギー
スペクトルはそれぞれの観測期間でほぼ同一であり、短周期変動の統計的
特性の季節的な変動は比較的小さいものと考えることができる。³⁾

1日程度の拡散現象を考える場合には、1日以下の短周期変動が乱れと
して拡散現象に作用し、長周期変動は移流効果として寄与する。

表-2は、1日程度の拡散現象に着目し、Taylorの理論を自己相関の
相似性の仮定のもとにオイラー系に拡張し、流速変動の2乗平均と積分時
間スケールの積から求めたST.3・ST.4およびST.5

における拡散係数の推定値である。なお解析に当って
は、1日以上で長周期変動成分を観測データから除去
し、ラグランジェ、オイラー変換係数は1とした。

この結果によれば、海面下2mの拡散係数は他の水
深における値にくらべ若干大きめではあるが、空間的
にほぼ一様であることが判断できる。この結果は、
短周期変動の空間的な一様性からも理解できる。

ST.7における10ヶ月データを15日データに分
割して得た拡散係数の推定値も、短周期変動が季節的に一様であることから、比較的一様であり季節的変動
は少ない。³⁾

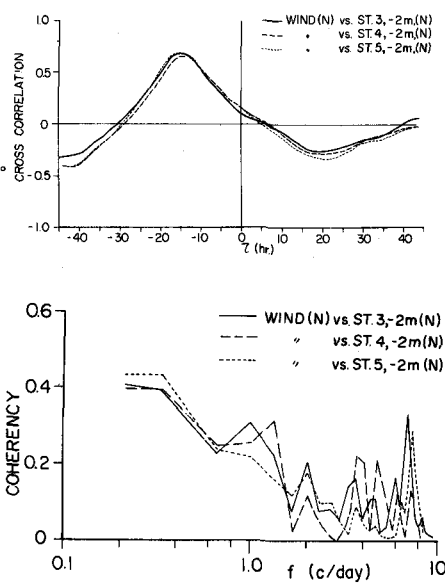


図-7 風と流れの相互相関

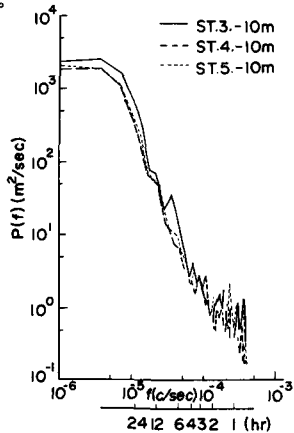
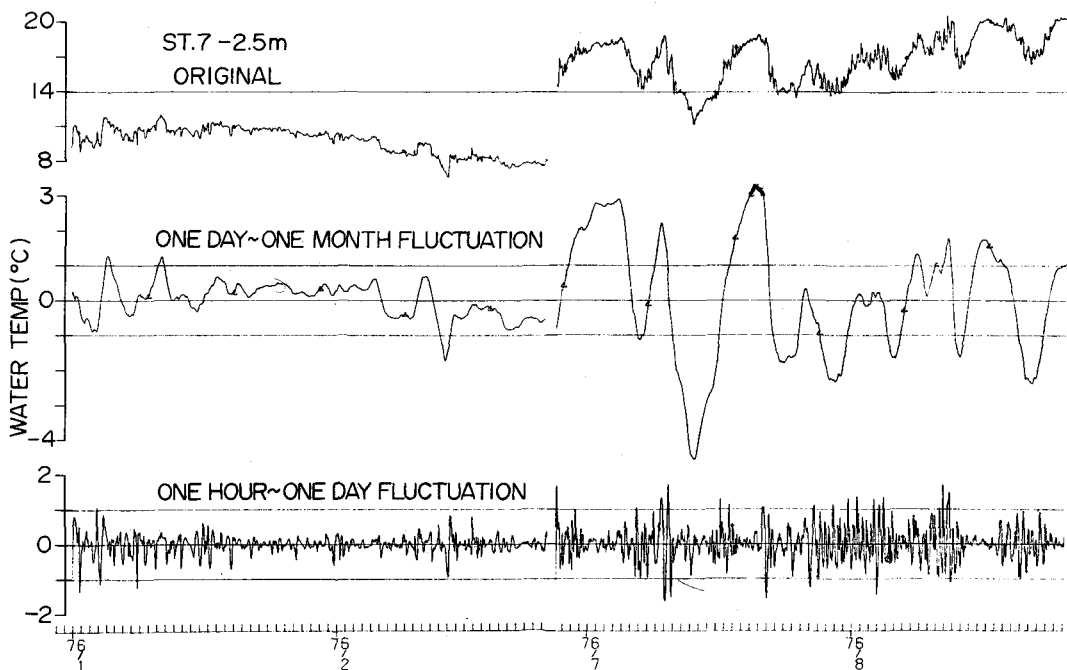


図-8 観測点別スペクトル

表-2 拡散係数の推定値

		ST.3			ST.4			ST.5		
		-2 m	-10 m	-15 m	-2 m	-10 m	-15 m	-2 m	-10 m	-15 m
$\sqrt{u^2}$ (cm/sec)	E	11	8	6	10	6	6	9	7	5
	N	11	9	8	10	7	7	11	6	6
K $\times 10^5$ cm ² /sec	E	7.8	3.4	1.8	5.5	2.2	2.3	4.5	2.5	1.5
	N	9.1	6.9	5.6	6.7	2.3	3.9	7.8	2.6	2.0



図－9 水温変動の時系列

4. 水温変動の特性

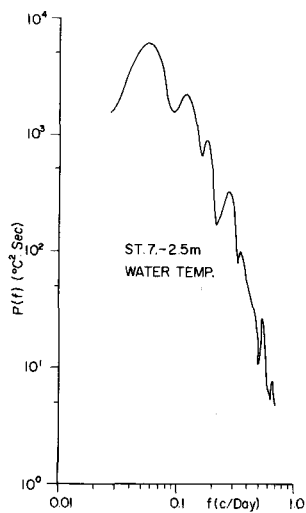
福島沖合海域における水温変動の特性を調べるため、'75年12月から'76年9月までの約10ヶ月間ST.7の-2.5m層において長期間観測された水温変動記録を統計解析して、その変動特性を検討した。変動解析に当っては、観測記録の1時間平均原データ、原データを31日移動平均し原データから31日以上の変動成分を除去しさらに25時間移動平均をかけたデータ（中規模変動データ）、および原データを25時間移動平均し25時間以上の変動成分を除去したデータ（短周期変動データ）を用いた。

図－9は、これらの変動データの内、冬期（1月～3月）および夏期（7月～9月）のデータである。

海水温は2月下旬に最低となり、8月下旬に最高となるが、6月下旬から8月中旬にかけての水温上昇期間には最大6℃程度の水温変動が認められその周期は比較的長い。この傾向は、中規模変動データに顕著に示されており、冬期における中規模変動が±1℃の範囲内にあるのに比較し、夏期における中規模変動はきわめて大きいことが判断できる。

図－10は、図－9に示した中規模変動データを用いて計算した中規模水温変動スペクトルである。この結果によれば、約10日以上を有する水温変動のエネルギーはきわめて高く、周波数の増大とともに急激に減少しており、約18日、9日、6日、3.5日前後の周期に比較的光明なスペクトルのピークが認められる。

これら中規模水温変動スペクトルのピークは、図－6に示した同一測点における流速変動スペクトルのピ



図－10 中規模水温変動のスペクトル

ークと比較的良く対応しており、福島沖合海域における中規模水温変動と流動変動との間には強い相関関係が存在するものと考えられ、大規模な水塊移動現象が生起しているのかもしれない。

一方、1日以下の短周期水温変動は、冬期においては夏期に比較して若干小さ目ではあるが、季節の変化は小さくほぼ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の変動幅を有しているものと考えることができる。

5. 結 論

福島沖合海域で観測された流動および水温の変動記録を統計解析して、流動および拡散特性の時間・空間的な変動を調べ以下の結論を得た。

1) 福島沖合海域においては、南流が基本的流動特性と考えられるが、その上に長周期・短周期変動が重畳されている。長周期変動の空間スケールは数10 km以上であり、変動現象は沿岸に沿う方向に位相差を有している可能性がある。また長周期変動の周期は季節的に一定ではない。

短周期変動の統計的特性は空間的にはほぼ一様であり、また季節の変動も小さい。

2) 長周期変動の発生過程においては、気象要素や海流構造の変動が関与しているものと考えられるが、長周期変動と風との間に比較的強い相関が認められた。

3) 1日程度の拡散現象に対応する拡散係数の推定値は空間的にはほぼ一様であり、季節変化も小さい。

4) 海水温の中規模変動はきわめて大きく、特に夏期においては最大 6°C 程度の変動が認められる。

また、海水温の中規模変動周期は流動の長周期変動周期と比較的良く対応しており、両者の現象間に強い相関関係が存在するものと考えられる。短周期水温変動における季節変化は小さく、変動幅は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 程度である。

参 考 文 献

- 1) 和田明・片野尚明：海域での物質拡散におよぼす流れの影響，第18回海岸工学講演会論文集，1971。
- 2) 和田明・角湯正剛：瀬戸内海における流況と分散特性，第21回海岸工学講演会論文集，1974。
- 3) 角湯正剛・和田明：太平洋沿岸海域における流動特性，第32回土木学会年次学術講演会講演概要集，第2部，昭和52年。
- 4) Düing, W. O., C. N. K. Mooers and T. N. Lee : Low-frequency variability in the Florida Current and relations to atmospheric forcing from 1972 to 1974. J. Marine Research, 35. 1. 1977.
- 5) Brooks, D. A. and C. N. K. Mooers : Wind-Forced Continental Shelf Waves in Florida Current J. Geophysical Research, vol.82, No.18, 1977.
- 6) 久保田雅久・中村義治・中田喜三郎：福島沖での低周波流速変動の特性(3)，日本海洋学会秋季大会講演要旨集，1977。