

成層期から対流期へ移行する東京湾の流動特性

森 川 雅 行*・村 上 和 男**

1. ま え が き

一般に、内湾では春から夏にかけて淡水流入量の増加や日射量の増大に伴って成層が発達する。さらに、湾口部を南に有する内湾たとえば東京湾や伊勢湾では夏期に卓越する南風により高温低塩分水が湾内に滞留し、他の要因と相まって貧酸素水塊や赤潮などの形成に影響を与えている¹⁾。

ゆっくりと形成された成層は初秋に短期間で弱められ、海域は対流期へと移行する。この時期の流動特性を検討することは、内湾の特性や環境問題を考える上で非常に重要である。東京湾においては、移行の際に卓越風の特性変化が強く影響を及ぼすと言われている¹⁾。

著者らは、初秋の東京湾において流動調査を実施するとともに、気象・海象のデータを収集し²⁾、スペクトル解析、相関分析、主成分分析等の手法を用いて、成層期から対流期へ移行する東京湾の流動特性を検討した。

2. 観 測 方 法

東京湾内の観測点と東京湾周辺の資料収集点を 図-1 に示す。流動調査は、表-1 に詳細を示すように 10 地点において、1983 年 8 月下旬から 15 日間 (測点 1, 2, 5, 9, 10)、30 日間 (測点 3, 4, 6, 8)、60 日間 (測点 7) 実施した。測定は水面下 3 m 層と 2 層の場合は 1/3 水深、3 層の場合は 1/2 水深と海底上 5 m で実施した。以後、-3 m 層を上層、1/2 水深を中層、1/3 水深または +5 m 層を下層と呼ぶ。流速計は上層の場合は表面ブイを使用して門型に係留し、中層、底層については海底から吊り上げた。

全測点において、アンデラー流速計を用いて流向・流速、水温、塩分を 10 分間隔で測定した。数日毎に流速計の点検、取換えを実施し、観測開始に若干のずれはあるが期間中ほとんど欠測はない。

気象・海象の資料として、図-1 に示す地点から風、気圧、潮位、河川流量、降水量のデータを収集した。

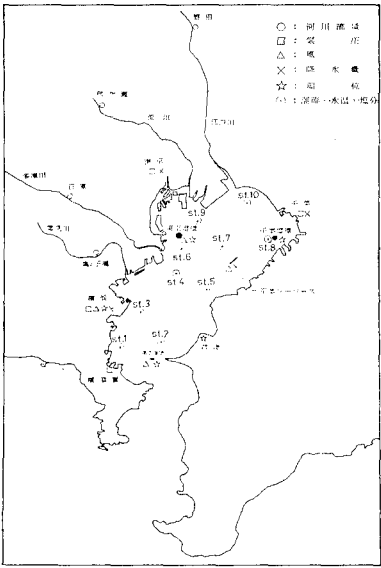


図-1 調査地域図

表-1 流動調査の詳細

測点	東 経	北 緯	水深 (m)	観 測 層*	観測期間
1	139°41'25"	35°20'01"	30	-3, +15, +5	8/28~ 9/11
2	139°47'06"	35°20'53"	12	-3, +4	8/27~ 9/10
3	139°44'52"	35°24'34"	26	-3, +13, +5	9/ 1~ 9/30
4	139°50'00"	35°28'10"	28	-3, +14, +5	8/30~ 9/28
5	139°54'49"	35°28'21"	19	-3, +9.5, +5	8/27~ 9/10
6	139°50'31"	35°31'35"	20	-3, +10, +5	8/26~ 9/24
7	139°55'47"	35°32'57"	18	-3, +6	8/26~10/23
8	140°02'34"	35°33'05"	12	-3, +4	8/26~ 9/24
9	139°51'55"	35°34'54"	12	-3, +4	8/26~ 9/ 9
10	139°58'29"	35°37'19"	9	-3, +3	8/26~ 9/ 9

* - は表面からの距離、+ は底面からの距離を示す。

3. 観測結果と考察

(1) 流 況

測得した流向の頻度図を上層、下層について図-2, 3 に示す。湾央の測点 7 を除く各点での卓越流向は海岸線とほぼ平行な往復もしくは 1 方向に集中した分布を示

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部主任研究官
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海水汚染水理研究室長

表-2 平均流速

	測点 1	測点 2	測点 3	測点 4	測点 5	測点 6	測点 7	測点 8	測点 9	測点 10
上層 (cm/s)	23.9	26.1	24.0	22.5	20.7	21.7	21.5	17.7	20.7	16.9
中層 (cm/s)	22.7		21.2	15.7	12.5	11.4				
下層 (cm/s)	15.4	21.4	12.3	11.5	12.4	10.2	11.5	7.0	11.3	10.7

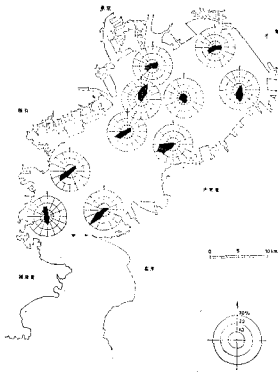


図-2 流向頻度図 (上層)

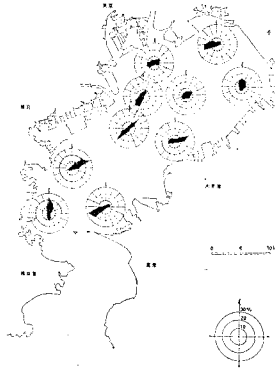


図-3 流向頻度図 (下層)

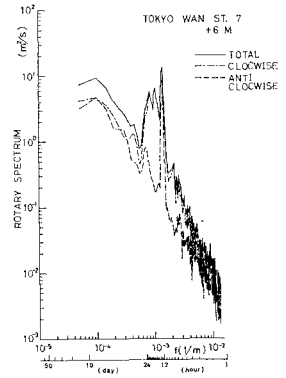


図-4 回転スペクトル (測点 7, 下層)

し、測点 6, 9 を除き上層は湾口へ流出、下層は湾奥へ流入する傾向がある。測点 2 では上下層ともに湾口へ流出する方向の頻度が高い。次に流速の平均値を表-2 に示す。上、中層では湾口部に近づくほど流速が大きい。また、下層は上層に比べて $1/2 \sim 1/3$ 程度の大きさである。

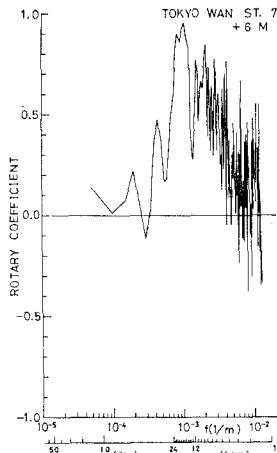


図-5 回転係数 (測点 7, 下層)

全測点において主要 4 分潮特に M_2 分潮が

卓越しているが、湾奥になるにつれて減少する。図-4, 5 に測点 7 の下層のデータから求めた回転スペクトルと回転係数を示す。半日周期にエネルギーのピークが存在し、長周期成分のエネルギーもかなり高い。日周期から半日周期にかけて時計まわりの運動が卓越しており、慣性周期 (20.6 時間) 付近では回転係数はほぼ 1 であり、地球自転の効果の影響が考えられる。同様な傾向は測点 4, 5, 6 でみられた。成層期の内湾の流動に対するコリオリ力の影響は宇野木⁸⁾により指摘されている。

(2) 気象・海象

観測開始から 9 月中旬までは夏型の安定した天候が続く。9 月中旬以後はオホーツク高気圧の南下により、本州南岸に前線が停滞しやすくなり、その前線上を低気圧

や台風が通過することが多かった。

第二海堡で観測された風ベクトルを図-6 に示す。8 月は南風の日が多いが、9 月の中旬から北風が卓越してくることがわかる。また、8 月の下旬から 9 月の月上旬は非常に風が弱い。次に、東京の降水量を図-7 に示す。大量の降水はみられず、流動調査中、荒川等の河川流量はほとんど変化していない。

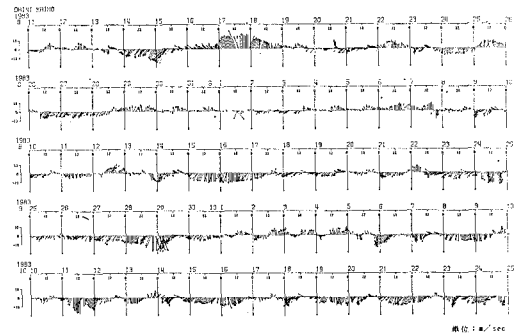


図-6 風の経時変化 (第 2 海堡)

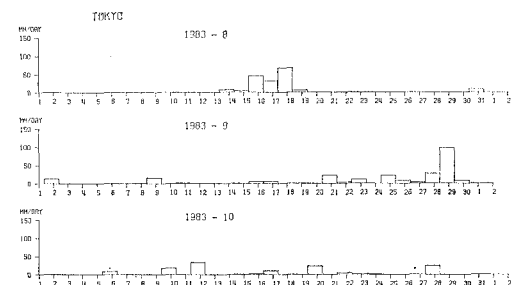


図-7 降水量の日変化 (東京)

4. 平均流の特性

近年、内湾での物資の輸送において、平均流（恒流）の役割の重要性が指摘されている。ここでは、従来からよく用いられる 25 時間移動平均流の特性を検討する。

各測点について平均流の鉛直モード特性を調べるために、Kundu ら⁴⁾が陸棚波の解析に用いた経験的直交関数展開を適用した。各平均流成分を直交する統計モードに分解し、そのモードの特性を検討した。3 層観測点について得られた統計的第 1 モードを表—3 に示す。測点 1 の東方成分を除いて、鉛直方向の固有関数は上層と下層とで符号が異なっており、このモードはバロクリニックの特性を有するものと考えられる。この特性を示す割合は、全分散の 47~87% であり、湾口部の測点 1, 3 では北方成分、他の測点では東方成分の方が大きい。

固有関数の符号が変わる深さは、測点 1 では中層と底層の間にあり、他の測点では表層と中層の間にある。鉛直方向の測点の数が少ないので断定的なことは言えないが、これは地点によって混合層の深さが異なるためと考

えられる。

次に、各測点における平均流の変動に影響を及ぼす要因を調べるために主成分分析を測点別に実施した⁵⁾。用いた変数は各層の平均流の東方、北方成分、水温、塩分、密度、風の東方、北方成分、東方、北方の水位差および気圧である。水温、塩分、密度、水位差については 25 時間、風については 24 時間の移動平均を施した。風、気圧は測点に近い地点のデータを用い、水位差は適当な二つの検潮所の潮位差から東方、北方の値を求めた。

得られた固有値と因子負荷量を第 2 主成分までについて表—4 に示す。この表から、測点 10 を除いて第 1 主成分は風および平均流と相関が高いことがわかる。測点 2, 3 では水位差とも相関が高い。この主成分は風の変動とそれに伴う平均流の変動を表すものと解釈できる。測点 10 では、これは第 2 主成分として求められている。測点 3, 5 では上層の平均流の因子負荷量の符号は風のものと同符号、下層では異符号であるのに対し、測点 9 の平均流の北方成分、測点 2, 10 の両成分の因子負荷

表—3 平均流の経験的直交関数展開

		測 点 1		測 点 3		測 点 4		測 点 5		測 点 6	
		東方成分	北方成分	東方成分	北方成分	東方成分	北方成分	東方成分	北方成分	東方成分	北方成分
固 有 値	固 有 値	1.41	2.32	1.70	1.81	2.09	1.66	2.33	1.83	2.22	1.96
	表 層	0.72	-0.60	-0.67	-0.66	-0.51	-0.59	-0.57	-0.43	-0.61	-0.44
	中 層	0.66	-0.55	0.46	0.54	0.56	0.41	0.59	0.60	0.56	0.57
	底 層	0.19	0.59	0.58	0.52	0.65	0.69	0.57	0.67	0.56	0.69
寄与率 (%)		46.7	77.5	56.6	60.2	69.6	60.8	77.6	60.8	74.2	65.2

表—4 海況要素の主成分分析

		測 点 2		測 点 3*		測 点 5*		測 点 9		測 点 10	
		第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分
上 層	東方成分	0.23	-0.48	0.64	-0.44	0.85	-0.04	-0.32	-0.60	0.04	-0.86
	北方成分	0.66	0.19	0.84	-0.22	0.83	-0.05	0.63	-0.20	-0.26	-0.63
下 層	東方成分	0.55	0.61	-0.49	0.59	-0.75	-0.28	0.96	-0.10	0.58	-0.60
	北方成分	0.91	-0.17	-0.37	0.66	-0.57	0.10	0.71	-0.42	-0.11	-0.77
上 層	水 温	-0.79	0.11	0.58	-0.09	0.59	0.22	0.62	0.27	0.82	-0.10
	塩 分	-0.23	0.96	0.61	0.44	-0.83	0.02	-0.31	0.85	-0.88	0.14
	密 度	-0.04	0.98	0.06	0.42	-0.81	-0.05	-0.48	0.77	-0.91	0.13
下 層	水 温	-0.09	0.52	0.13	0.27	-0.19	0.74	0.70	0.54	0.93	0.11
	塩 分	-0.78	0.23	-0.52	-0.37	0.15	-0.73	-0.83	-0.42	-0.89	-0.18
	密 度	-0.75	0.01	-0.64	-0.63	0.22	-0.92	-0.83	-0.48	-0.91	-0.17
風	東方成分	-0.59	-0.69	0.37	-0.40	0.93	0.09	-0.78	0.52	0.07	0.75
	北方成分	-0.77	-0.45	0.86	-0.30	0.88	0.17	-0.74	0.55	0.07	0.88
水位差	東 方	-0.79	0.41	0.86	0.26	0.36	0.70	-0.60	-0.25	-0.07	0.49
	北 方	-0.74	0.30	0.76	0.22	0.17	-0.59	0.39	0.67	0.40	-0.13
気 圧		-0.01	-0.63	-0.10	-0.35	0.09	-0.31	-0.24	-0.25	-0.49	-0.03
固 有 値		5.58	4.21	5.65	3.77	8.73	3.23	6.22	3.82	5.59	3.80
寄与率 (%)		37.2	28.1	28.2	18.9	43.7	16.2	41.5	25.5	37.3	25.3

* 中層での各項目の因子負荷量の記述は省略

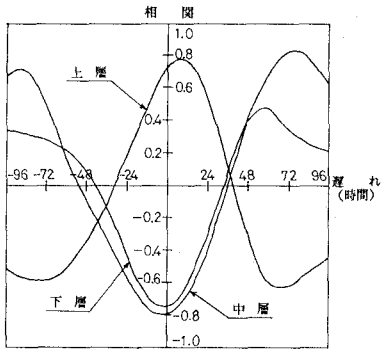


図-8 平均流(測点 5)と平均風(京葉シーバース)の相互相関(北方成分)

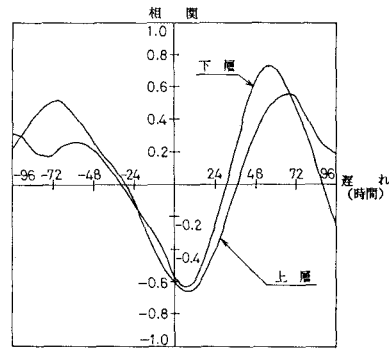


図-9 平均流(測点 10)と平均風(東京燈標)の相互相関(東方成分)

量は風のものと異符号である。これは風の変動に対する各測点での平均流の応答が異なることを示している。

第2主成分(測点 10では第1主成分)は全般に水温、塩分、密度と相関が高い、特に測点 2では上層、測点 5では下層測点 10では上下層での密度と相関が高い。

平均流の変動は風の影響を強く受けることが判明したので、平均流と 24 時間移動平均風との相互相関を求めた。淡水流入量は変動が小さく、平均流の変動に与える影響は小さいと考えられる。

表-5 平均流と平均風の相互相関

測点	層	東方流速成分の相関		北方流速成分の相関	
		風の東方成分	風の北方成分	風の東方成分	風の北方成分
1	上層	-0.70 (4)	-0.59 (4)	0.63 (8)	0.82 (8)
	中層	-0.58	-0.56	0.57 (1)	0.61
	下層	0.60 (33)	0.36 (31)	-0.74 (12)	-0.70 (8)
2	上層	0.21 (8)	0.07	-0.50 (1)	-0.57 (2)
	下層	-0.70	-0.56	-0.46 (11)	-0.70 (14)
3	上層	0.60 (3)	0.69 (3)	0.40 (14)	0.82 (5)
	中層	-0.32 (14)	-0.09	-0.12	-0.63 (14)
	下層	-0.29 (2)	-0.51 (3)	-0.21 (1)	-0.40 (3)
4	上層	0.59	0.62 (5)	0.26 (14)	0.51 (6)
	中層	-0.33	-0.36	-0.05	0.10
	下層	-0.41	-0.56 (3)	-0.15	-0.54 (3)
5	上層	0.78 (3)	0.82 (8)	0.82 (10)	0.85 (11)
	中層	-0.78	-0.67	-0.33	-0.24
	下層	-0.74	-0.74	-0.53 (9)	-0.45 (3)
6	上層	0.19	0.71 (1)	-0.16	0.45
	中層	-0.33	-0.64 (3)	-0.53 (10)	-0.51 (10)
	下層	-0.24	-0.51	-0.40	-0.63
7	上層	0.61 (1)	0.63	0.74 (22)	0.57 (7)
	下層	-0.49	-0.61 (1)	0.09 (4)	-0.07 (3)
8	上層	0.59 (6)	0.64	0.28 (3)	0.39 (5)
	下層	-0.61	-0.80	-0.34 (29)	-0.21 (34)
9	上層	-0.75 (32)	-0.69 (27)	-0.56	-0.62
	下層	-0.83	-0.77	-0.73 (8)	-0.78 (4)
10	上層	-0.63	-0.67	-0.49 (15)	-0.67 (9)
	下層	-0.26	-0.48	-0.51 (13)	-0.64 (6)

() 内の数値は遅れ時間を表す

得られた相互相関を測点 5(北方成分)と 10(東方成分)について 図-8, 9 に示す。正の遅れは風に対する流れの遅れを示す。遅れ時間がない場合、測点 5では、風に対して上層の平均流は強い正の相関、中層、下層の平均流は強い負の相関を示し、測点 10では上下層とも負の相関を示す。両点ともに遅れ 2~3 日での相関も高く、遅れ時間によって相互相関の値がかなり変動する。

次に、各測点で求めた相互相関の最大値と遅れ時間を表-5 に示す。各測点で平均流のいずれかの成分が風と絶対値 0.5 以上の相関を示す。風の東方成分と流れの北方成分またはその逆の相関もかなり高い。

表層では、風と正の相関、中層、下層では負の相関を示す測点が多いが、湾奥の測点 9, 10 では上下層ともに負の値を示す。測点 8, 9 では下層の方が風と強い相関を示す。湾奥では、風によって形成される水平や鉛直循環の影響を受けやすいと考えられる。湾口部の測点 2 の北方成分は上下層ともに負の相関を示す。測点 2 では、常に湾口へ平均流は流出しており(潮汐残差流の影響と考えられる)、変動特性が他と異なる可能性がある。

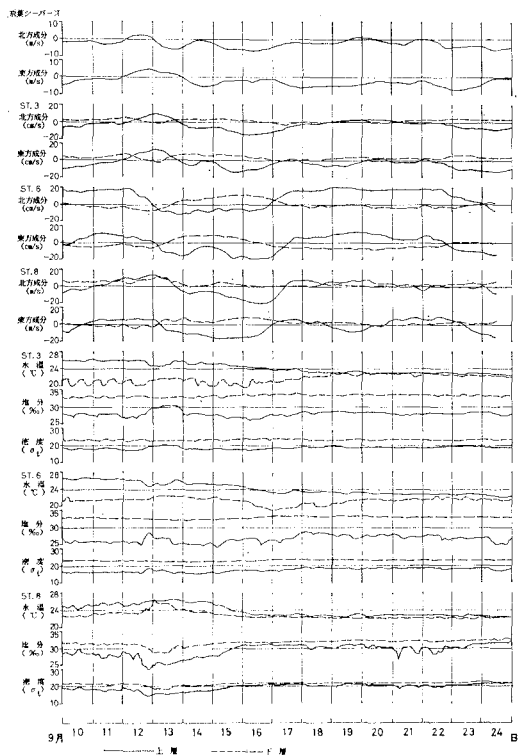
以上述べた平均流の特性は、風の直接的作用、風による水平・鉛直循環や潮汐残差流の影響を受けていた。さらに、密度差の影響もあり、平均流の変動は複雑である。

5. 成層期から対流期への移行

北風が卓越しはじめる 9 月中旬の海況変動を解析し、成層期から対流期へ移行する東京湾の姿を検討する。

9 月 10 日~24 日に観測された京葉シーバースの平均風、測点 3, 6, 8 の上層、下層の平均流の東方、北方成分および水温、塩分、密度の変動を 図-10 に示す。

9 月 13 日, 15 日~17 日に北もしくは北北東の風が強く吹いており、南風は 12 日の午後のみみられるだけである。この風の変動に伴い、各測点の上層の平均流が強く影響されていることがわかる。12 日~15 日にかけての



図—10 東京湾の海況変動 (1983年9月10日～24日)

風の変化に対して、測点 3, 8 の上層ではまず北東流となり、それから南西流に転じている。風が弱くなるにつれて、平均流も弱まっている。しかし、測点 6 の上層では北東成分の増加はみられない。また、各点で下層の平均流は上層のものと逆モードになっていることがわかる。

水温、塩分、密度については、12 日午後には顕著な変動がみられる。湾口部寄りの測点 3、湾奥西部の測点 6 では、上層で水温の下降、塩分の上昇がみられ密度が増加している。低温高塩分の外海系の水が進入してきたと考えられる。一方、湾奥東部の測点 8 の上下層では、逆に塩分の低下が認められ、密度も減少している。また、下層においては水温が約 4°C 上昇している。これは南西風により湾奥西側の高温、低塩分の水塊が移動してきたと推察される。9 月初旬は、湾の東部に比べて西部は

高温低塩分であった。

各点で表層の水温は 14 日すぎより急速に低下している。また、15 日からの北風の卓越により、測点 6, 8 では上層の塩分が増加し、上下の密度差が小さくなっている。特に、測点 8 では 17 日以後は上下層でほとんど密度差がないことがわかる。しかし、湾口に近い測点 3 では、上下層の密度差はあまり変化していない。

以上の検討から、9 月 10 日～24 日の海況は風により強い影響を受け、平均流の変化は水温、塩分などの海洋要素の変化をもたらすことがわかった。上層水温の低下に加えて、北風の卓越による上層塩分の増加のために、上下の密度差が減少し、成層が弱められる。これは、湾奥東部ほど顕著であった。そして、さらに気温の低下と北風の卓越により東京湾は対流期になると考えられる。

6. あとがき

1983 年 8 月下旬から実施した流況調査データを用いて、東京湾の流動特性を検討した。東京湾では平均流の変動は風に強く影響されること、平均流の変動に伴って水温、塩分が変動し、成層期から対流期への移行は卓越する風の変化の影響を受けることなどが明らかになった。

現地データを用いた検討のみでは、東京湾の流動特性、特に水平循環、鉛直循環を明らかにすることは困難であるので、今後は数値実験を含めて検討する所存である。

最後に、現地調査にあたり御協力をいただいた運輸省第二港湾建設局の関係者の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 平野敏行編：沿岸域保全のための海的环境科学，恒星社厚生閣，pp. 4～15, 1983.
- 2) 運輸省港湾技術研究所：東京湾流動調査報告書，53 p., 1983.
- 3) 宇野木早苗：内湾における湧昇現象，1983 年度日本海洋学会春季大会要旨集，pp. 10～11, 1983.
- 4) Kundu, P. K., J. S. Allen and R. L. Smith: Modal Decomposition of the Velocity Field near the Oregon Coast, J. Phys. Oceanogr., Vol. 5, pp. 683～704, 1975.
- 5) 森川雅行・村上和男：内湾における恒流と水質に影響を及ぼす諸因子について，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp. 695～699, 1984.