

長江河口域におけるフロントの特性

宋 元 平*・小田 一 紀**・沈 煥 庭***

1. ま え が き

長江は、全長 6,300 km の中国最大の河川であり、次のような特徴を有している。河川流量は非常に大きく、平均年流出量は $9,240 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、平均流量は $29,300 \text{ m}^3/\text{s}$ に達する。これは中国の沿岸海域に流出する全河川水の 57% を占める。上流から輸送されてくる浮遊砂（ウオッシュロード）の量と濃度は極めて膨大で、統計によると、平均年流出量は $4.86 \times 10^8 \text{ t}$ 、平均濃度は $0.5 \sim 1.9 \text{ kgf}/\text{m}^3$ である。その中の約半分は河口域に堆積し、残りはさらにそれより沖へ拡散していき、やがて沈積する。このため、長江河口域には広大な水面下のデルタが形成されている。

長江河口では 1 日 2 回潮が生じ、年平均潮差はほぼ 2.5 m である。河川流と潮汐の衝突によって河口域では時間的、空間的に変化する複雑な流動が形成されている。海水が下層から上流へ遡上し、表層を沖側へ向かう河川水との密度差によって河口循環流が発生している。河川水と海水の界面付近では微細粒子の凝集が活発に起こり、大規模な沈積が生じている。

フロントは 2 つの密度の異なる水塊の界面を指し、両者の水塊の物理的性質の違いによって様々なフロントが存在する。長江河口域には①プリューム フロント（塩分フロント）、②浮遊砂フロント、および③海洋フロントが形成され、土砂粒子を主とする懸濁物質の輸送・沈積・堆積過程や生物環境に大きく関わっている（胡ら、1993）。

著者らは 1988 年 8 月、12 月、および 1989 年 8 月に長江河口域のフロントの観測と同時に水理量、浮遊砂濃度、化学量および生物などの調査を行った。本文では、塩分分布、浮遊砂濃度分布、水温分布など一連の現地観測結果に基づいて長江河口域におけるフロントの特性を分析する。

2. プリューム フロント（塩分フロント）

ここでは、主に塩水くさびが発達している夏期におけ

るプリューム フロントの特徴について述べる。

長江河口域では、淡水と塩水との混合によるプリューム フロントが最も重要なフロントと考えられ、多くの研究者がこの問題について研究している。1988 年 8 月、12 月および 1989 年 8 月における筆者らの現地観測によると、夏期におけるプリューム フロントは次の特徴を持っている。

長江河川水は大きな慣性力をもって表層を流出し、塩水は河口上流部まで底層を遡り、典型的な塩水くさびを形成する。このとき一般にプリューム フロントは河川水と混合水あるいは混合水と沿岸海水との界面付近に形成されている（表-1 参照）。

表-1 長江河口域水塊の分類

塩分 S	$S < 6‰$	$6 \leq S < 25‰$	$25 \leq S < 31‰$	$S \geq 31‰$
分類	河川水	混合水	沿岸海水	外海水

1988 年 8 月、12 月および 1989 年の定点観測によると、図-1 に示すようにプリューム フロントは前進したり、後退したりしていることが分かる。1988 年 8 月の観測によると、このときのプリューム フロントは河川水と混合水の境界付近に形成され、フロントでの表層の塩分は $5 \sim 14‰$ 、水平方向の濃度勾配はほぼ $0.30‰/\text{km}$ と比較的大きく、鉛直方向の成層指数 n （＝（底層塩分－表層塩分）/鉛直平均塩分）は $0.30 \sim 0.40$ と比較的小さかった。これは、この水域の水深が浅く、潮流も強いので、鉛直混合が激しかったためであると考えられる。また、このプリューム フロントのセンターライン付近には多くの泡沫、ゴミ、草根、動物死体などが集まっているのが観察された。

表-2 は異なった 2 地点で、異なった日に観測されたプリューム フロントの河川側と海側（観測船の船首と船尾）における水理量を表したものであるが、この表によると、表層における塩分と浮遊砂濃度はプリューム フロントを挟んで河川側と海側とで大きな差が見られる。8 月 15 日に観測された表層での塩分差は $5.2‰$ 、浮遊砂濃度差は $0.036 \text{ kgf}/\text{m}^3$ 、流速差は $6 \text{ cm}/\text{s}$ 、流向差は 101° である。

* 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科
 ** 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
 *** 上海華東師範大学河口海岸研究所所長

表-2 プリウム フロント両側での水理量 (1988年8月)

観測 年月日	観測側	塩分 (‰)			浮遊砂濃度 (kgf/m ³)		
		表層	5m層	底層	表層	5m層	底層
1988. 8.12	河川側	22.5	30.0	29.1	0.630	0.069	0.179
	海側	27.6	29.4	29.6	0.037	0.081	0.276
1988. 8.15	河川側	24.3	27.4	28.1	0.064	0.085	0.192
	海側	29.5	29.6	29.5	0.028	0.048	0.192
観測 年月日	観測側	流速 (cm/s)			流向 (°)		
		表層	5m層	底層	表層	5m層	底層
1988. 8.12	河川側	27	89	99	217	311	315
	海側	93	38	44	187	262	308
1988. 8.15	河川側	23	99	133	167	321	324
	海側	17	43	103	66	312	305

潮流の流速が1 m/s程度以上になると、大きな移流と渦乱の作用によってプリウム フロント付近の泡沫帯が消えてしまい、明確なフロントが見られなくなった。

1989年8月の観測結果は前述の1988年8月の観測結果と幾分異なる結果が得られた。このときのフロントは混合水と沿岸海水の境界付近に形成された。このとき、表層では、図-2 (観測点0~8断面)に見られるように塩分が20~30‰の間に大きな水平方向の勾配が存在し、明確なプリウム フロントが形成され、塩分25‰の等濃度線がほぼプリウム フロントのセンターラインと一致した。このプリウムフロントのセンターラインの底層での塩分は31~33‰で、水面から水底まで塩分分布をもった混合水で占められているが、さらに海側に向かってしだいで混合水は海底を離れ、その厚さは徐々に薄くなっていく。

図-3の表層塩分の平面分布から推定されるように、

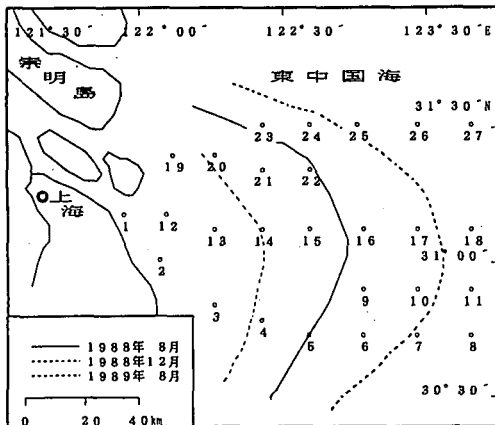


図-1 長江河口域における定点観測点およびプリウムフロントの位置

長江河口水は河口から海に流出した後、その慣性力とコリオリ力の影響によって直進しながら南東方向に偏向し、122°20'~30'E 辺りに達した後、地形の変化、台湾暖流および夏期の南東風によって緩やかに北東方向に転向している。

このプリウム フロントの特徴として水平方向の塩分勾配が著しく大きいだけでなく、鉛直方向の成層現象も著しい。すなわち、図-2と図-3から概算されるようにプリウム フロントのセンターライン付近の塩分の水平勾配はほぼ0.38‰/km、成層指数 n は0.49である。

一方、図-4に示すように長江河口域におけるクロロフィル a の高レベル領域はほぼプリウム フロント付近に位置しており、表層における溶存酸素濃度および pH 値も高い値になっていることが観測され、大量の植物プランクトンの存在が確認された。1988年8月の現地観測によると、図-5に示すように、長江河口122°30'~50'E では溶存酸素濃度は6.0 ml/l 以上に達し、平均飽和度は100%を超え、最大 pH 値も8.3であった。しかし、この区域以外でのクロロフィル a、溶存酸素濃度、pH 値などは比較的低く、また、図-6に示すように、底層では溶存酸素濃度はかなり低下しており、pH 値も低くなっている。この原因は、沖合に堆積した植物プランクトンを

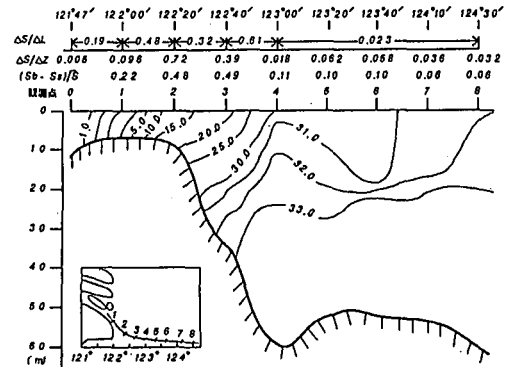


図-2 鉛直方向の塩分分布 (1989年8月) (‰)

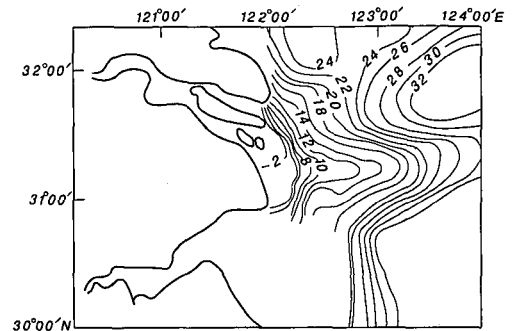


図-3 表層における塩分の平面分布 (1989年8月)

中心とした海洋生物の死骸(有機物質)の分解によるためであり、プリューム フロント下の成層化がこれを助長していると考えられる。プリューム フロントの中心付近

を境にして浮遊物質が沈澱し、河川水中の物質濃度が減少するので、この現象を河口濾過と称している。これは長江河口域における水面下のデルタの形成と発達に密接に関連している(陳ら, 1988)。

3. 浮遊砂フロント

浮遊砂フロントは浮遊砂濃度の水平勾配が著しく大きいところを指し、フロントの位置は目視によって確認できる。長江上流から流れてくる大量の浮遊砂(ウオッシュロード)は河川流と潮流的作用によって河口域に拡散し、濃度の高い浮遊砂場が広範囲に形成され、浮遊砂は河口から沖合に向かって平面的に扇形に広がっている。

浮遊砂濃度の鉛直分布は水理量と地形条件に依存して様々な状態を示す。図-7は1989年8月に観測されたその1例である。この図によると、フロントの先端付近の濃度 $0.05\sim 0.1\text{ kgf/m}^3$ の等濃度線は、観測点21付近($122^{\circ}20'E$)および観測点5と6の間($122^{\circ}35'E$)に位置し、かなり沖合にまで達している。

浮遊砂フロントは一般に大潮以外のときに出現し、上げ潮、下げ潮とともに前進、後退を繰り返している。冬期は風浪が発生し、その混合作用によって浮遊砂フロントは発生しにくい。

図-7において注目すべきことは、浮遊砂フロント先

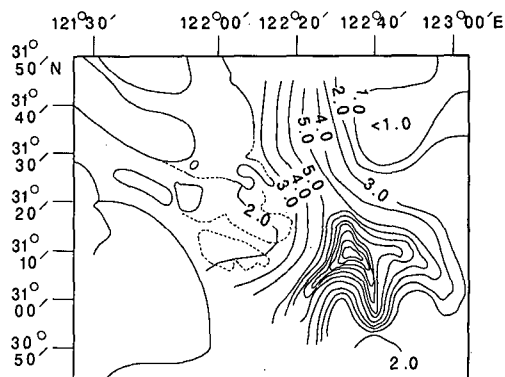
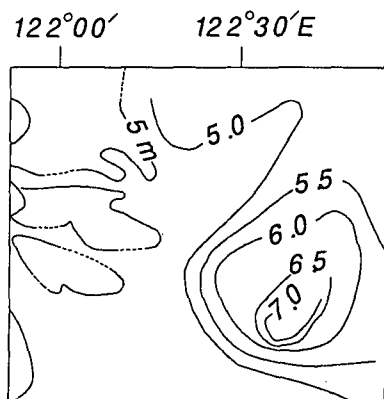
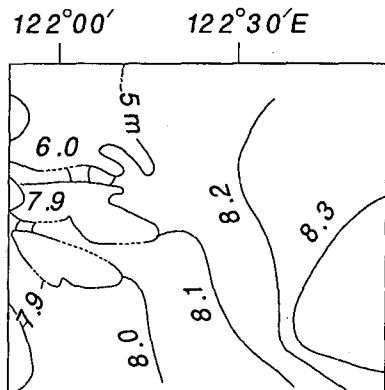


図-4 クロロフィル a の平面分布 (1988 年 8 月)

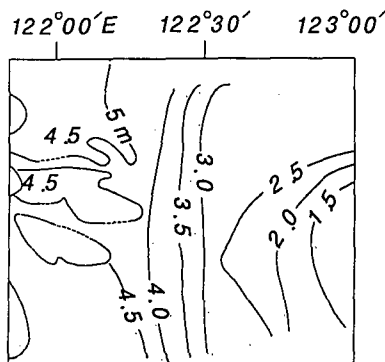


(a) 溶存酸素濃度 (ml/l)

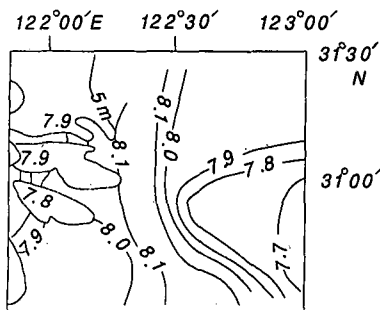


(b) pH

図-5 表層における溶存酸素濃度および pH の平面分布 (1988 年 8 月)



(a) 溶存酸素濃度 (ml/l)



(b) pH

図-6 底層における溶存酸素濃度および pH の平面分布 (1988 年 8 月)

端部から少し上流側観測点4および20の底層付近に極めて濃度の高い領域が存在することである。その中心付近の最大濃度は $2.0 \sim 5.0 \text{ kgf/m}^3$ にも達しており、この点を中心に半円弧状の濃度分布が見られる。この領域は濃度極大帯あるいは最大混濁帯 (turbidity maximum) と呼ばれており、長江河口域でも明瞭に観測された。その発生機構については様々な説があるが、沈ら(1988年)は、弱混合時には塩水くさびの先端 (null point) 付近では水平流速が小さく、且つその上層部の浮遊砂が塩水との混合によって活発な凝集 (flocculation) を生じ、そのため塩水くさびの先端付近を中心として浮遊砂濃度の高い領域が形成されるとしている。

表-3は浮遊砂フロントを境にしてその河川側と海側での浮遊砂の諸量についての観測結果の1例を示す。表-3によるとフロントを境にして浮遊砂濃度は河川側と海側のわずかな距離をおいて大きな差が見られるが、塩分にはほとんど差は見られない。平均粒径 ($M\phi$) は河川側で $7.8 \sim 8.9$ 、海側で $8.2 \sim 9.4$ と海側の方が大きい。この理由については未解明であり、今後の課題である。

浮遊砂フロントの先端付近にもプリュームフロントの場合と同様にゴミなどの浮遊物質が集まる。これらの浮遊物質は浮遊砂とともに化学的あるいは生物化学的過程によって凝集・粒子化し、フロント先端付近に発生する鉛直渦によって下降し、水底に堆積する (Tian, 1991)。このような現象から浮遊砂フロントは、プリュームフロントの場合と同様にある意味では浮遊物質に対する濾過作用を有していると見ることもできる。このような過程で水底に堆積した浮遊砂と浮遊物質は長江河口の水面下

表-3 浮遊砂フロント両側での水理量 (1989年8月)

年月日	観測側	浮遊砂濃度 (kgf/m^3)	平均粒径 ($M\phi$)	塩分 (%)	流速 (cm/s)
1989. 8.14	河川側 海側	0.677 0.315	8.9 9.4	14.2 14.3	48 46
1989. 8.17	河川側 海側	0.517 0.465	7.8 8.2	10.9 10.4	38 40

デルタの主要な材料となっているが、潮流による底層流と冬期の風浪によって巻き上がり、再び浮遊、堆積を繰り返す、デルタを発達させていくと考えられる。

4. 海洋フロント

海洋フロントは沿岸海水と外海水との境界に位置し、フロント付近では塩分は水平、鉛直勾配ともかなり小さいが、水温の鉛直勾配は大きい。

図-8(a), (b) は1988年12月に観測された長江河口沖における塩分および水温の鉛直分布の1例である。この図から分かるように、観測点17~18付近における塩分の水平、鉛直方向における勾配はこれより上流側に比べて小さいが、水温の鉛直勾配に関してはこれとは逆になっており、それより上流側に比べて大きくなっており、この辺りに海洋フロントが存在することがうかがえる。

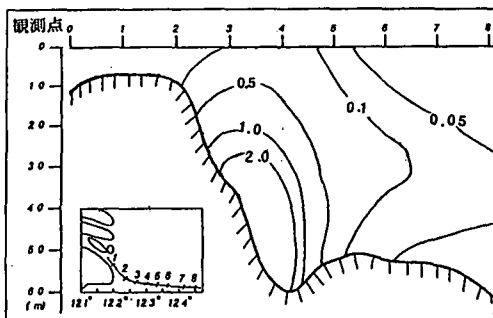
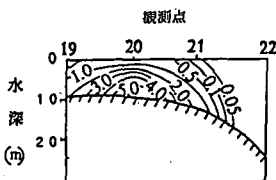
5. 結 論

1988年と1989年に実施した長江河口域におけるフロントに関する現地観測の結果は以下のようにまとめられる。

(1) プリュームフロント (塩分フロント) は河川水と混合水、あるいは混合水と沿岸海水との界面表層付近の塩分の水平勾配の大きなところに形成される。また、その下方では塩分の成層化も比較的大きい。1989年8月の観測では、プリュームフロントセンターライン付近の塩分は25‰程度、その水平勾配は 0.38 ‰/km 程度、成層指数は0.49程度であった。

(2) プリュームフロント付近にはクロロフィルaの高濃度領域と高溶存酸素領域が形成され、大量の植物プランクトンの存在が認められた。同時に、フロントにはゴミなどの浮遊物質が集まり、これらとともに植物プランクトンを中心とした生物の死骸が沈澱・堆積し、貧酸素化を招いている。また、この堆積は長江河口水面下デルタの形成と密接に関係している。

(3) 浮遊砂フロントは表層における浮遊砂濃度の水平勾配の著しく大きいところに発生する。浮遊砂フロントの先端付近ではプリュームフロントの場合と同様にゴミなどの浮遊物質が集まり、浮遊砂とともに凝集・沈澱し、河口デルタの形成の主因となっている。

図-7 鉛直方向の浮遊砂濃度分布 (1989年8月) (kgf/m^3)

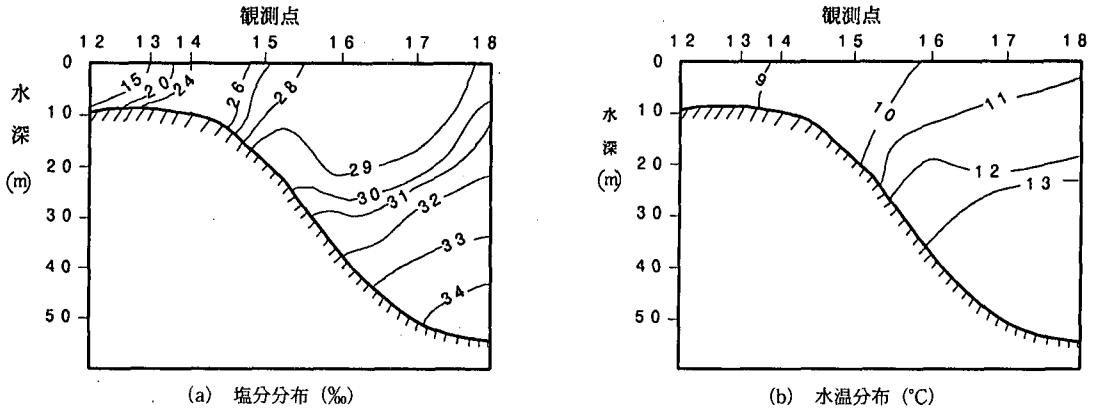


図-8 冬期における長江河口沖の塩分および水温の鉛直分布 (1988 年 12 月)

(4) 浮遊砂フロント先端から少し上流側の底層付近に中心濃度 $2.0 \sim 5.0 \text{ kgf/m}^3$ 程度の半円弧状の濃度極大帯 (turbidity maximum) が観測された。

(5) 冬期には波浪による混合が活発なため、プルームフロントも浮遊砂も形成されにくい。

(6) 長江河口域沖合には沿岸海水と外海水の水温差による海洋フロントの存在が確認された。

謝辞: 本論文で用いたデータは上海華東師範大学河口海岸研究所から提供を受けた。また、作図に当っては松尾純也君 (大阪市立大学工学部大学院学生) の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 胡 方西・胡 輝・宋 元平 (1993): 中国河口における主要な堆積過程に関する研究および応用, 河口フロントに関する研究論文集, 上海華東師範大学河口海岸研究所, pp. 1-17.
- 沈 煥庭・郭 成壽・朱 慧芳・徐 海根・陳 邦林 (1988): 長江河口域における最大混濁帯に関する変化過程とその発生機構, 長江河口の流動過程と地形形成過程論文集, 上海科学技术出版社, pp. 216-228.
- 陳 吉余・徐 海根 (1988): 長江河口および水面下のデルタの発達, 長江河口の流動過程と地形形成過程論文集, 上海化学技術出版社, pp. 38-48.
- Tsai Rucheng (1991): Dual Filtration Effect of Geochemical and Biogeochemical Processes in the Changjiang Estuary, China Journal of Oceanology and Limnology, Vol. 9, pp. 33-43.