

沿岸流のある海域に流出する河川水の三次元挙動について
Three-Dimensional Behaviour of River Plumes Discharged in a Uniform Cross Flow

大阪大学工学部 正員 室田 明 Akira MUROTA
大阪大学工学部 正員 中辻啓二 Keiji NAKATSUJI
大田大学校工科大学 許 再寧 Jae Young HUH

A three-dimensional, primitive equation model that describes the spreading behaviour of a frontally bounded river plume is presented. First, the scheme is successfully confirmed to apply the thermal plume in a cross flow through comparison with field data obtained in the thermal plume discharged from Widows Creek steam plant. Secondly, computations for the growth of river plumes discharged into a uniform cross flow are presented and discussed for a variety of crossflow velocities. These results demonstrate the dynamics of river plumes, especially the formation of frontal structure.

Key words : river plume, frontal structure, cross flow, three-dimensional computation

1. まえがき

河川水の海域での拡がりには河口近傍を除いてブルーム的挙動を呈し、密度差による水平方向圧力勾配によって海面上を放射状に拡がることから知られている。(Luketina・Imberger, 1987; 室田ら, 1989) その先端部は gravity current 的な挙動を呈しており、河川フロントと称される。同様のフロントは温排水の拡がりにおいても Wright・Coleman(1971) によって観測されている。とくに、沿岸流のある海域ではフロントの形成は顕著である。写真-1の明石川河川ブルームに見られるように、明瞭な潮目が河川水と沿岸流の境目で観測できる。潮目は水表面収束と沈降によって惹起されるものであり、河川水と海水との色調の違いや泡の連なりによって容易に識別できる。河川フロントは局所的な物理過程や生態系に重要な役割を果たすにも拘らず、その三次元流動に関しては未だ未知な部分が多い。わずかに Garvineのグループの研究(1974, 1984)や柳ら(1984)の実測、香川ら(1987)の実験があるに過ぎない。最近、O'Donnell(1988)は平面二次元の基礎式を用いて河川フロントの数値計算を実施している。

そこで、本研究では今まで明石川・淀川等の河川ブルームの解析に用いてきた三次元密度流数値モデル(Murota et al., 1988; 室田ら, 1989) を使って、沿岸流のある海域に流出する河川ブルームの流動特性を検討し、河川フロント構造の解明の足掛りとする。

2. 数値実験の概要

三次元流動を支配する連続方程式、運動方程式ならびに密度偏差 $\Delta\rho$ の保存方程式は、静水圧近似、ブーシネスク近似を用いるならば、次のように表現される。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

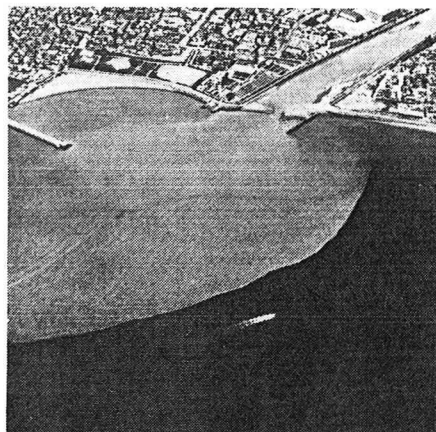


写真-1 明石川で観測されたフロント

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial U}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial V}{\partial z}) \quad (3)$$

$$0 = g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Delta \rho}{\partial t} + U \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x} + V \frac{\partial \Delta \rho}{\partial y} + W \frac{\partial \Delta \rho}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \Delta \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \Delta \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \Delta \rho}{\partial z}) \quad (5)$$

ここに、座標系は河口の中心軸の平均水面を原点にとり、沖合い方向にx軸、沿岸方向にy軸、鉛直下方にz軸とする。U, V, W はそれぞれx, y, z方向の平均流速、P は圧力、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ および K_x, K_y, K_z はx, y, z方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数である。 $\Delta \rho (= \rho_s - \rho)$ は密度 ρ の海水の密度 ρ_s からの密度偏差である。圧力Pは式(4)を水表面($z = \zeta$)から任意の水深まで積分することにより得られる。したがって、圧力勾配 dP/dx は水面勾配 $d\zeta/dx$ と密度勾配 $d\rho/dx$ の関数として表される。

水平方向、鉛直方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数は河口条件(流速 U_0 、幅 B_0 、水深 H_0)を用いてそれぞれ $0.0256 U_0 B_0$ 、 $0.0256 U_0 H_0$ で与えた。ただし、成層流では鉛直方向の運動量や質量の乱流輸送が浮力効果によって抑制されることから、 ϵ_z は勾配型リチャードソン数の関数として Webb(1970)式により、 K_z は Munk・Anderson(1974) 式により与えた。両式の選択は Murota et al.(1988) に基づいている。数値モデルは室田・中辻(1986) や室田ら(1989) と本質的に同じものを採用した。

数値計算は密度一定で一様な流速で流動する海域に河口から河川水を放流して行った。境界条件は沿岸、沖合いならびに海底面で non-slip 条件；上流端・下流端開境界で水位ならびに流速が一定；また、全ての境界で密度流束が 0.0 である。

3. 数値モデルの検証 — Widows Creek 発電所の温排水への適用

(1) 数値計算の内容

横断流のある流動場へ流出する河川流や温排水の実測結果は日本ではほとんど報告されていない。そこで、数値モデルの検証実験は1969年 8月にテネシー川開発公社によって実施された Widows Creek 発電所からの温排水の現場実測 (Tennessee Valley Authority, 1974) に対して行った。発電所近くの河川は比較的一様な断面形を有しており、水深約 7m、幅約 500m である。実測時の河川流量は $1,330 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温排水の放流量は $62 \text{ m}^3/\text{s}$ である。河川水温は 23.7°C 、温排水の水温は 29.4°C であり、相対密度差 $\Delta \rho / \rho_s = 0.00155$ である。温排水は放流口幅 $B_0 = 240 \text{ m}$ で全水深 ($H_0 = 7 \text{ m}$) から放流されており、放流密度フルード数は $Fd_0 = 0.11$ と非常に小さい。また、河川流速 $V_0 = 0.38 \text{ m/s}$ と放流流速 $U_0 = 0.037 \text{ m/s}$ との比 V_0/U_0 は 10.3 である。計算領域は放流口から上流側に 800m、下流側に 2,400m の範囲であり、格子網は $\Delta x = 20 \text{ m}$ の 35メッシュ、 $\Delta y = 40-80 \text{ m}$ の 65メッシュ、 $\Delta z = 0.5 \text{ m}$ の 14メッシュから構成されている。

(2) 計算結果

図一は水面下2点で実測された温度分布と計算した密度差分布の比較を示す。ただし、両水深は実験と計算とは正確に一致しない。水面下 0.25m に対しては計算した流速ベクトルも示した。等温度線は華氏 85° から 75° まで 1° 毎に示しているが、それは等密度差線 $\Delta \rho / \rho_s$ の 10% から 100% までのほぼ 10% の増加に相当している。図中の丸印は測定地点を示す。河川流の流速に対して温排水の初期流速が非常に小さいために、温排水は放流後すぐに河川の下流側に曲げられ、温排水の運動量は河川流によって下流側に輸送される。その結果、水表面近傍の流速ベクトルには流速の増加が認められ、温排水は沿岸に沿って流動する傾向にある。実測された温度分布と計算した密度差分布は比較的良好に一致している。このことから本モ

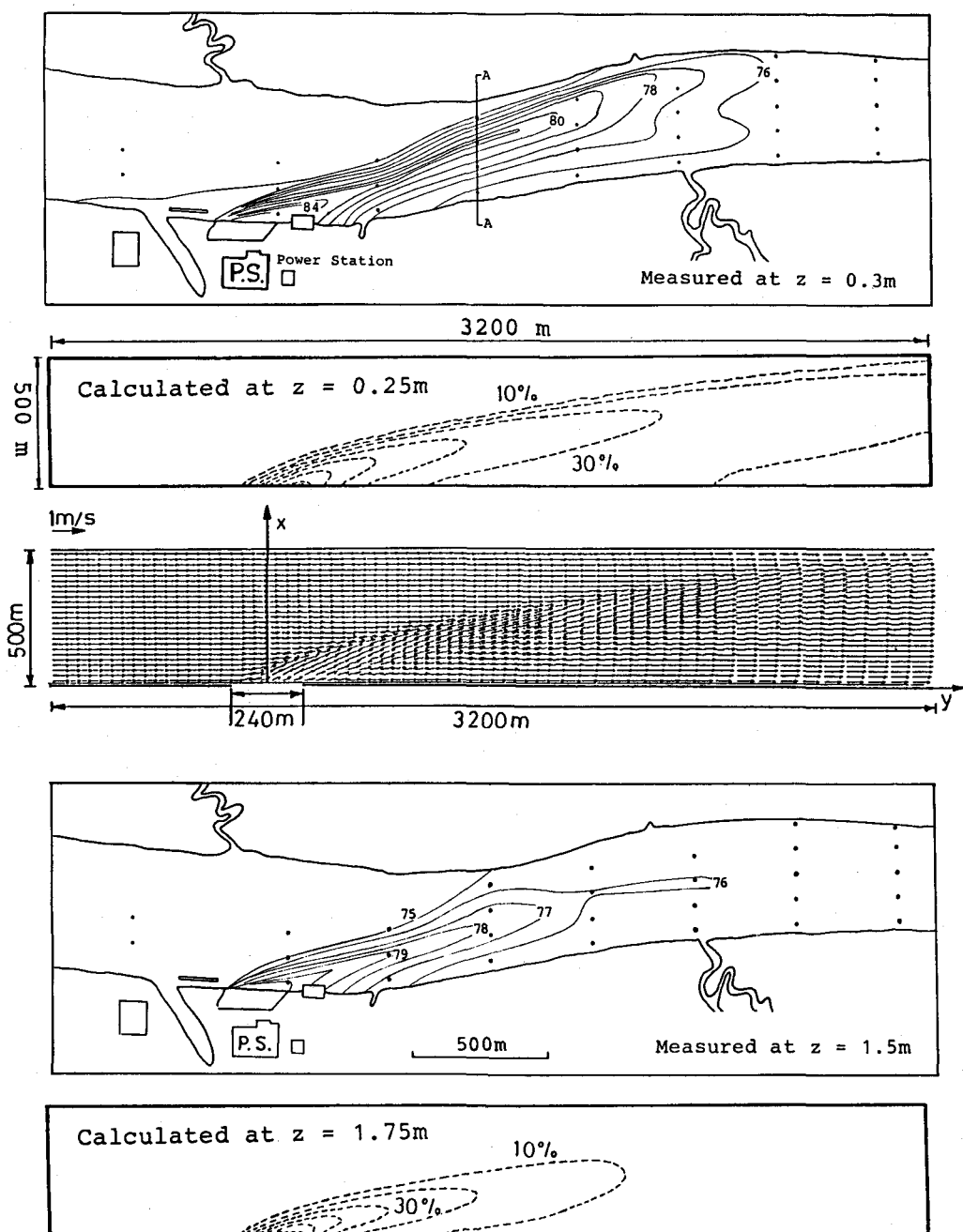


図-1 Widows Creek 発電所からの温排水の実測結果と計算結果の比較

デルは流れ場へ横流入する温排水の三次元挙動の解析に対しても精度的に妥当であることが確認できた。

図-2は 図-1のA-A断面における温度ならびに密度差分布の比較を示す。同図から計算結果は温排水の平面的な拡がりのみならず成層化の影響による鉛直方向の拡がりの抑制も良好に再現できることが分かる。このときの断面内流速ベクトルを示したのが 図-3である。絶対値が小さいため、ベクトルの方向のみを示した。温排水の断面内において鉛直循環が生じており、河川水との境目で温排水ならびに周囲河川水

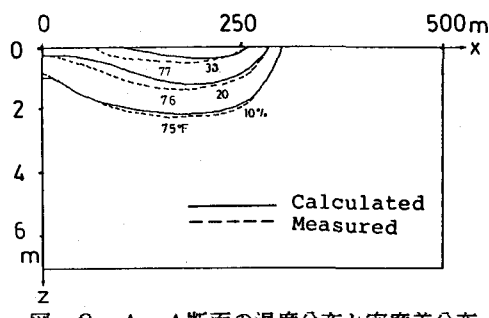


図-2 A-A断面の温度分布と密度差分布

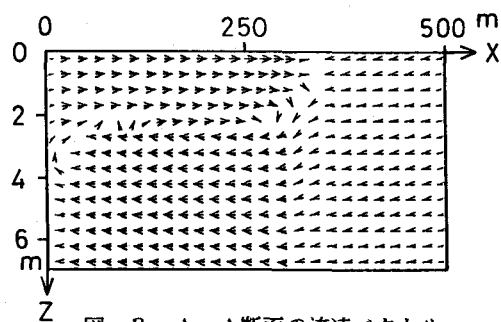


図-3 A-A断面の流速ベクトル

が水表面から沈降する潮目が観察される。それは 10%等密度差線に沿って沈降しており、Garvine・Monk (1974) が Connecticut River で観測したフロントと同じ性状を示している。河川水の温排水中への連行は専ら沿岸部で生じているのが下層流の流速ベクトルから推測できる。

4. 数値実験結果とその考察

(1) 実験条件

沿岸流のある海域に表層放流される河川プルームの数値実験を表-1の水理条件で行った。計算領域はx方向に 700m, y方向に 3,100m, z方向に 20mであり、 $25(x) \times 60(y) \times 22(z)$ の格子網で構成される。格子間隔はそれぞれ $\Delta x=20\text{--}30\text{m}$, $\Delta y=20\text{--}100\text{m}$, $\Delta z=0.5\text{--}2.0\text{m}$ の不等間隔格子網を採用した。河口形状は幅 $B_o=40\text{m}$, 水深 $H_o=2\text{m}$ である。

表-1 実験条件

Run	U. m/s	H. m	B. m	V. m/s	Fd.	V_o/U_o
1	0.22	40	2	0.05	1.3	0.23
2	0.265	40	2	0.16	1.9	0.60
2'	0.22	40	2	0.25	1.3	1.13
3	0.48	40	2	0.06	3.7	0.125

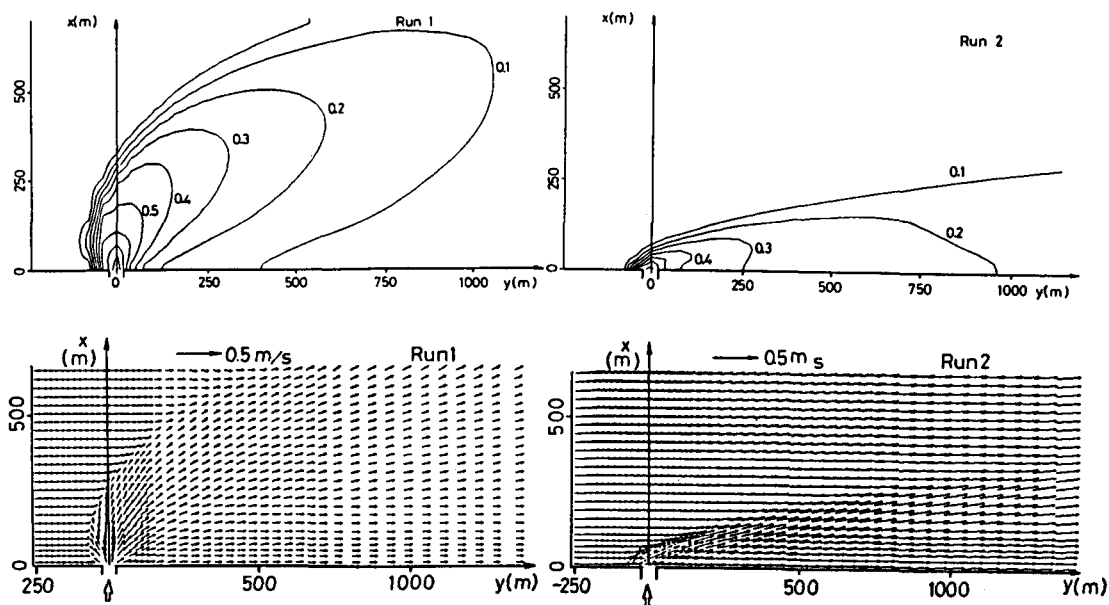


図-4 河川プルームの拡がりに及ぼす沿岸流速の影響 (左; $V_o/U_o = 0.23$, 右; $= 0.60$)

(2) 河川プルームの拡がり特性

河川プルームの発達に及ぼす沿岸流速の影響を定量的に評価するために、水表面での流速ベクトルと等密度差線を示したのが 図-4 である。一様な沿岸流が岸に平行に y 軸の正方向に流れている。河口密度フルード数は河川プルームで一般に観測される約 1.0 の値とした。河川プルームの発達と拡がり形状、とくにフロントの位置は沿岸流速によって大きく変化する。沿岸流速の小さい Run-1 の場合には、プルームは河口近傍で運動量流束の卓越した噴流的拡がりを示し、沖に進むにしたがって流軸が下流側に曲げられる傾向にある。プルームの上流側では明瞭なフロントを形成しており、流速ベクトルはフロントに沿って不連続になる。一方、沿岸流速の大きい Run-2 の場合には、プルームは下流側へ大きく拡がり、沖合いあるいは上流側へのフロントの拡がりほとんど抑制される。つまり、河川水は岸に沿って流動することになる。

河川プルームの曲げ率を表現するために、河口から x 軸上のフロントの位置までの距離 X と流速比 V_c/U の関係を示したのが 図-5 である。沿岸流速が大きいほど、フロントの沖合い方向への拡がりが抑えられ、流軸が強く曲げられることが分かる。同図には香川ら(1987)の実験値も載せたが、今回得られた計算値

は彼らの実験値と比較して少し小さいようである。また、流速ベクトルの流軸は河口付近では密度差分布のそれと一致するが、流下するにつれてわずかながら岸側にずれるようになる。これは 図-3 に示したプルーム断面内の鉛直循環による移流効果を反映したものと理解できる。

そこで、 $x = 10\text{m}$ の断面での等密度差線の分布を示したのが 図-6 である。 $x = 10\text{m}$ 断面は噴流という形成領域に位置するが、 V_c/U の大きい Run-2 ではすでに沿岸流速の影響を受けて等密度差線が下流側に大きく引き伸ばされているのが観察される。また、断面内での最大密度差の位置も $y = 60\text{m}$ 近くに移動している。一方、 V_c/U が小さく、且つ F_d の大きい Run-3 では中心軸 (x 軸) に対して対称な密度差分布を呈している。しかし、等密度差線は下流側水表面で少し拡がっており、沿岸流速の影響も認められる。

(3) 河川プルームの混合特性

図-7 は水表面における密度差のプルームの流軸に沿った通減特性を示す。縦軸は河口での密度差で無次元化した密度差、横軸は河口の半幅で無次元化した河口からの流軸の距離を示す。密度差の通減特性は沿岸流速のない表層密度噴流のそれと大きく異なり、河口近傍から混合希釈が生じている。その低減傾向は V_c/U の大きいほど顕著であり、それは 図-6 の密度差分布からも十分推測できる。とくに、 $S/(B_c/2)$ が

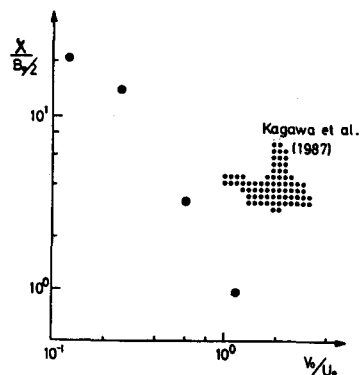


図-5 河川プルームの曲がり度

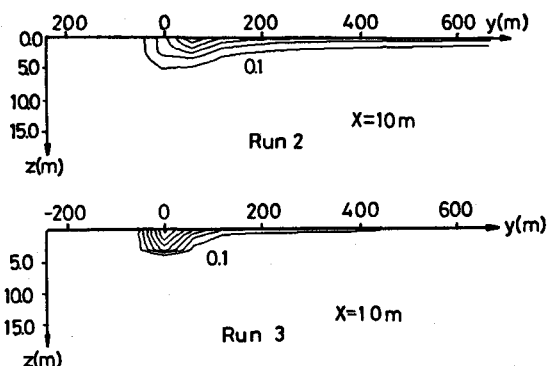


図-6 断面内の密度差分布

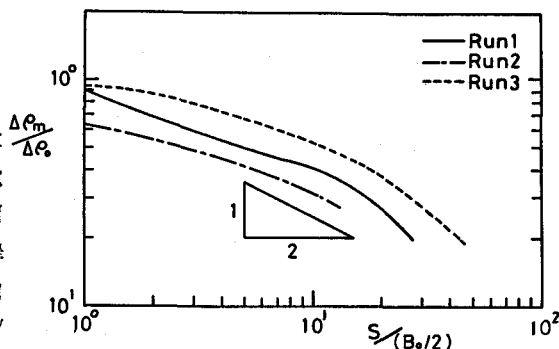


図-7 流軸に沿った密度差の通減特性

20 を越える領域での密度差 $\Delta \rho_w / \Delta \rho$ の低減割合は流下距離 S の -1 乗則にしたがっており、沿岸流のない河川ブルームの $-1/2$ 乗則と比較して大きい。この低減特性は Alavian・Hoopes(1982) の実験結果と類似している。

5. あとがき

河川水は沿岸流のある海域に流入するのが常態であるが、沿岸流場での河川ブルームの振舞いに関する研究は意外と少ない。本研究では三次元密度流数値モデルを用いて一般的な沿岸流に放流された河川ブルームの拡がり特性を検討した。まず、テネシー川に横流出された Widows Creek 発電所からの温排水の現場実測に適用して、本モデルが熱ブルームの拡がりを良好に再現することを確認した。つぎに、種々の沿岸流速の下で河川ブルーム ($F_d \approx 1.0$) の数値実験を実施して、河川ブルームの発達に及ぼす沿岸流速の影響をフロントの位置に着目して検討した。現地実測や水理実験では詳細な情報を提供し難い河川フロントに対して、三次元数値実験はその動力学的な洞察を与える可能性がある点で重要な意味を持つと考えられる。

謝辞

Widows Creek 発電所の実測データの所在について大阪大学工学部環境工学科 中村安弘博士に教えて頂いた。また、本研究の一部は平成元年度文部省科学研究費補助金 試験研究(代表: 神戸大学工学部 篁源亮教授)の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- Alavian, V. and J.A. Hoops (1982): J. Hydraulics Division, ASCE, Vol.108, No.HY5, pp.707-725.
Garvine, R.W. (1974): J. Geophysical Research, Vol.79, No.6, pp.831-846.
Garvine, R.W. (1984): J. Geophysical Research, Vol.89, No.C2, pp.1989-1996.
香川健一・中村由行・早川典生 (1987): 第31回水理講演会論文集, pp.449-454.
Luketina, D.A. and J. Imberger (1987): J. Geophysical Research, Vol.92, No.C5, pp.5435-5447.
室田明・中辻啓二 (1986): 第30回水理講演会論文集, pp.715-720.
Murota, A., K. Nakatsuji and J.Y. Huh (1988): Proc. 6th Cong. APD-IAHR, Vol.3, pp.33-40.
室田明・中辻啓二・許 再寧 (1989): 海岸工学論文集, 第36巻, pp.214-218.
Munk, W.H. and E.R. Anderson (1948): J. Marine Research, Vol.7, pp.276-295.
O'Donnell, J. (1988): J. Physical Oceanography, Vol.18, No.11, pp.1584-1600.
Webb, W.K. (1970): Quart. J. Royal Meteorological Society, Vol.35, pp.67-90.
Wright, L.D. and J.M.Coleman (1971): J. Geophysical Research, Vol.76, pp.8649-8661.
柳哲雄・武岡英隆・秋山秀樹 (1984): 日本海洋学会春季大会講演概要集。