

東京湾における散逸率の縦断分布と鉛直混合

DISSIPATION AND VERTICAL MIXING ALONG LONGITUDINAL SECTION IN TOKYO BAY

中山恵介¹・岡田知也¹
Keisuke NAKAYAMA and Tomonari OKADA

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 主任研究官 沿岸海洋研究部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

This paper describes the investigation of dissipation and vertical mixing in an enclosed bay, Tokyo Bay. The field experiment was carried out on 17th of November, 2004 along the longitudinal section of Tokyo Bay to measure water temperature, salinity, turbidity and micro-structure of turbulence. It was revealed from vertical density distribution, which was identified by salinity and water temperature, and vertical turbidity distribution that either large velocity due to internal waves or mixing due to internal wave breaking caused resuspension of seabed sediment. Dissipation obtained from field experiment agreed well with those from numerical simulation. This may thus provide evidence that turbulent closure scheme used in the numerical simulation is valid to model flow fields in Tokyo Bay.

Key Words : *dissipation, Tokyo Bay, internal waves, vertical mixing, turbulent closure model*

1. はじめに

東京湾は、閉鎖性が強い湾として知られており、湾内に河川からの淡水が滞留しやすく、夏季には非常に強い成層場が形成される¹⁾。冬季には、夏季と比べて日射の影響が小さくなり、淡水の流入量も激減するが、それでも成層が形成されやすい状態は維持され、成層強度は季節的に変化する。成層の強度が小さくなり、大きなせん断もしくは乱れが界面で与えられた場合、成層は破壊され、混合域が発生する^{2) 3)}。この成層の破壊、混合は、生態系を評価する際に重要な要因となる貧酸素水塊などの生成に大きく関係しており、生態系の評価に重要な情報を与える。

例えば、東京湾の湾口部において、大潮期に与えられる大きな運動エネルギーにより、湾口部での成層が破壊されることがある^{2) 3)}。エスチュアリー循環により海水交換が卓越的に行われている東京湾では、この潮汐による湾口部での鉛直混合の発生により、海水交換されにくくなることが報告されている⁴⁾。

本研究では、夏季に比べて成層の強度が弱くなる秋季

から冬季にかけて、合計4回、東京湾を縦断するように、塩分、水温、微細乱流構造を計測したものの中から、11月17日の結果を利用し、乱れの発生に関する検討を行った。さらに、モデルにおいて用いられている乱流モデルの検証を、散逸率を用いて行った。

2. 2004年11月17日の観測結果

秋季から冬季にかけて、10月7日、10月13日、11月10日、11月17日の計4回、東京湾における水温、塩分、微細乱流構造、濁度の計測を行った。水温、塩分、濁度は多項目水質計(アレック電子株式会社, AAQ1183)、微細乱流構造はTurbomap9(アレック電子株式会社)により計測された。2004年9月、10月は、通常の年に比べて総雨量が大きかった。そのため、湾口部における運動エネルギーによる成層の破壊を検討するには、最終回の2004年11月17日の計測結果が適当であると考えられた。そこで本研究では、2004年11月17日における観測結果を利用することとした。観測は、湾外、湾内を含めてst5

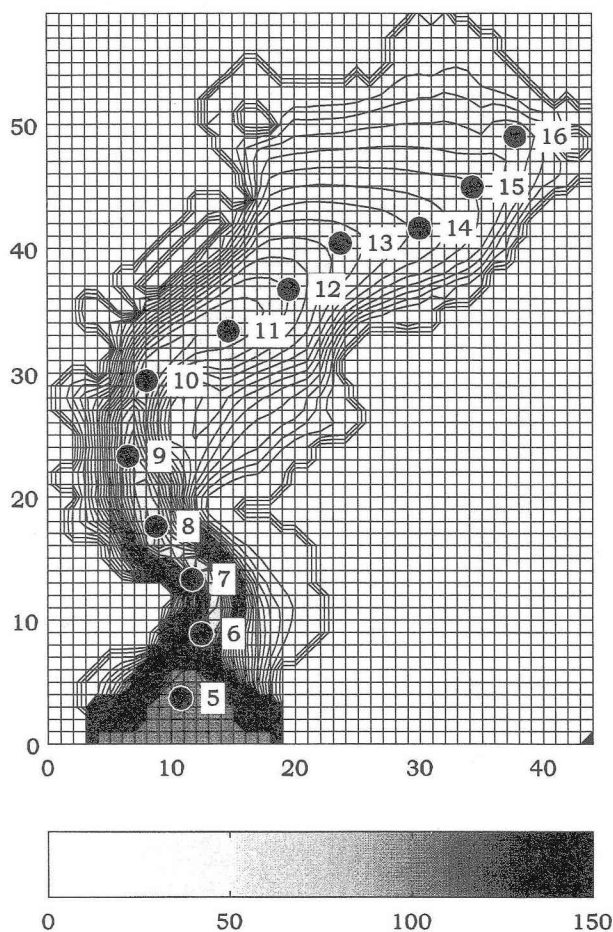


図-1 東京湾の計算に用いられたメッシュと観測地点st5からst16. St1からst4は計算範囲外に対応する. 縦軸, 横軸の単位はkm, およびコンタの濃度の単位はmgである.

からst16までの15点で行われた(図-1). 縦断観測は, 上げ潮終了時からst2からst16に向けて約8時間かけて行われた(図-1). 観測期間および前後において北風が卓越しており, 11月17日の日中, 平均風速は3m/s程度であった.

(1) 多項目水質計による観測結果

観測開始は, 上げ潮終了時に対応していた. そのため, 上げ潮時の内部潮汐による内部界面の大きな変動が計測されることが予想された. 結果, 湾口部において大きな振幅の内部波は測定されなかった(図-3). 湾内では上層に密度の小さな水塊が存在し, この季節としては成層が発達していた. st10において, 内部波による擾乱だと思われる密度界面の変位を確認することができた. この擾乱に対応して, st9, st10, st11における底層付近での濁度が大きく現れているのが分かった(図-4). 内部波の斜面上での作用による大きな流速, もしくは内部波の斜面上での碎波による混合が, 大きな濁度の発生に大きく寄与していたのではないかと推測される.

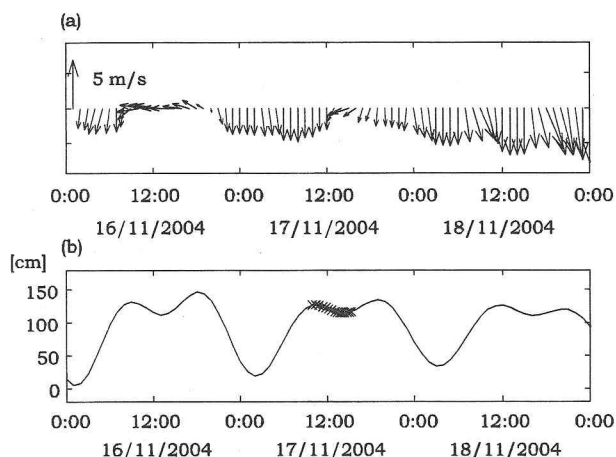


図-2 (a) 2004年11月16日から18日の横浜における風ベクトル. (b) 2004年11月16日から18日の横須賀における潮位.
× : 各stでの観測に対応する.

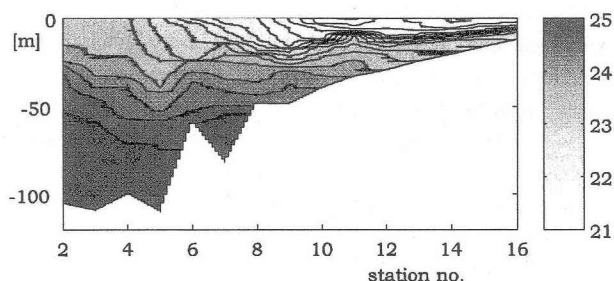


図-3 2004年11月17日における σ_t の鉛直断面分布図.

(2) ADCPによる観測結果

各stにおいて, ADCPによる流速測定も行われた(図-5). 計測器の都合上, st2からst6における計測は, 水深40mから50mまでしか行うことができなかった. 流速測定は, 各stにおいて5分程度行われたのみであるため, 濁度と流速の関係をこのデータのみから検討することは困難であるが, st9周辺の底層における流速は, 他の地点に比較して大きいことが分かる.

3. Turbomap9による観測結果

Turbomap9により, 微細流速変動量を直接測定し, 等方性の仮定のもと, 散逸率を得ることができる. 散逸率は, 以下の式により得られる.

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{du'}{dz} \right)^2 \quad (1)$$

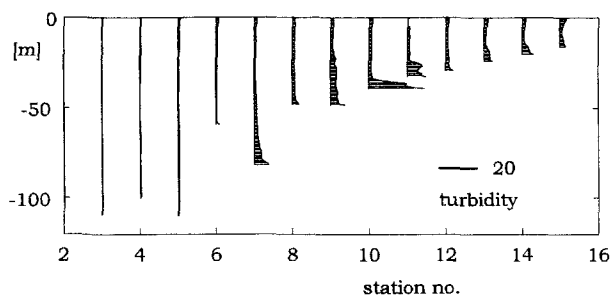


図-4 2004年11月17日における濁度の各stでの鉛直分布図。

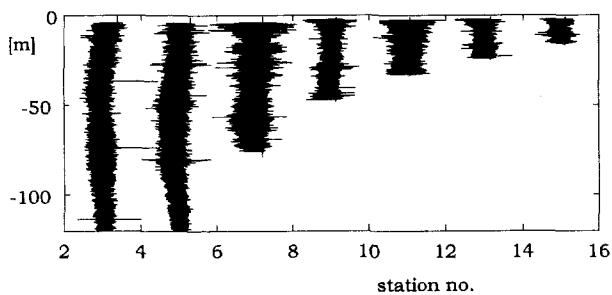


図-6 2004年11月17日における測線に沿ったの各stでの微細擾乱の鉛直分布図。

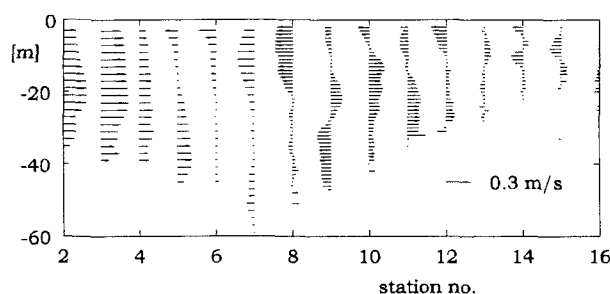


図-5 2004年11月17日における測線に沿ったの各stでの流速ベクトルの鉛直分布図。

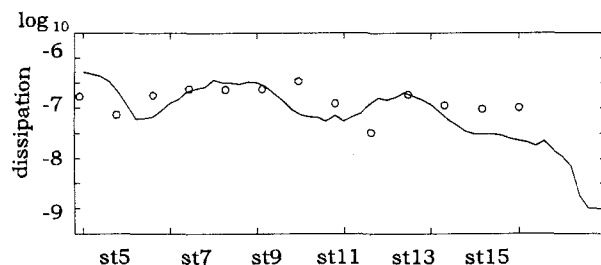


図-7 2004年11月17日における測線に沿ったの各stでの散逸率の縦断分布図。○：Turbomap9による計測値。実線：数値計算による再現結果。

$$S = \left(\frac{du'}{dz} \right) \quad (2)$$

ここで、 ν ：動粘性係数、 S ：シアの分散である。

まず、Turbomap9により得られた微細擾乱の鉛直分布を示す(図-6)。st2からst5における分布から、擾乱は鉛直方向にあまり大きく変化していないことが分かる。一方、st7からst9において、水深30m付近までの擾乱が、底層付近と比較して大きく現れていたことが分かる。上層での乱れが卓越して起こっていたと推定することができる。

擾乱の測定結果から、直接、水深平均された散逸率を計算した(図-7)。st2からst4までは、平均 $8 \times 10^{-8} (\text{m}^2 \text{s}^{-3})$ 程度であったが、湾口部に対応するst6からst8までは、 $24 \times 10^{-8} (\text{m}^2 \text{s}^{-3})$ と3倍近くに増大していた。また、湾奥にゆくに従い、再び減少していた。潮位変化から分かるように、上げ潮終了時に対応していたにもかかわらず、湾口部での地形的な効果による流速増大により、散逸率が大きくなっていたことは明らかである。

湾口部における散逸率の鉛直方向の変化を検討するため、上層10mとそれ以下の下層における散逸率を計算した(図-8)。上層における散逸率は、どのstにおいても下層のものより大きかったことが分かる。風は弱く、上層

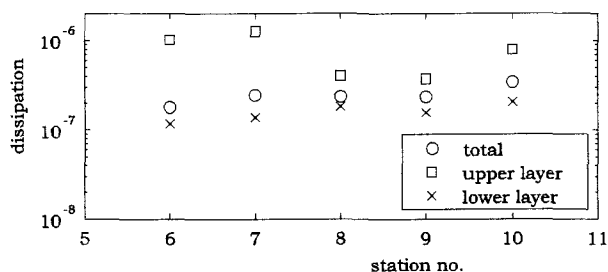


図-8 2004年11月17日における測線に沿ったの湾口部周辺のstでの散逸率の縦断分布図。○：全水深平均散逸率。□：上層水深10mまでの平均散逸率。×：水深10m以上の下層における散逸率。

における乱れの供給は大きくなかったと考えられる。そのため、散逸率が乱れの大きさに比例しているものと仮定すると、湾口部における乱れの発生は、底層に起因しているものである可能性は低いことが分かる。湾口部における乱れは、上層における内部波の不安定などに起因しているのではないかと予想される。

4. 非静水圧3次元モデルによる再現計算と検討

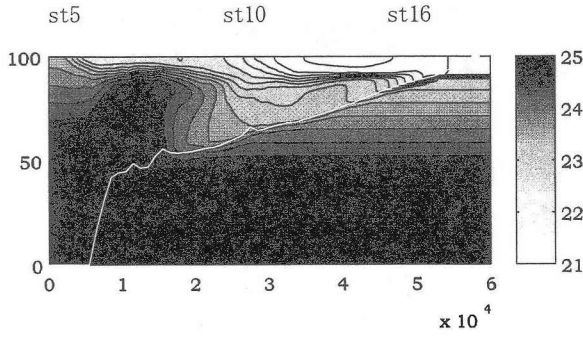


図-9 MEL 3Dにより再現された σ_t の縦断分布図. 上横軸は、各観測stに対応する.

(1) 非静水圧3次元LESモデルMEL3Dの概要

本論文では非静水圧3次元LESモデルであるMEL3Dを用いる^{30) 37)}. 成層状態による鉛直フラックスの変化を考慮するために、定常状態を仮定し代数方程式化した2方程式モデルから、乱流プラントル数を計算し用いることとする^{33) 34) 40)}.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial R_{ik}}{\partial x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{i3} \frac{g\rho'}{\rho} + \nu \nabla^2 u_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{hk} \frac{\partial \theta}{\partial x_k} \right) + \kappa \nabla^2 \theta \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} + u_k \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{hk} \frac{\partial \theta_s}{\partial x_k} \right) + \kappa_s \nabla^2 \theta_s \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + u_k \frac{\partial E}{\partial x_k} + R_{ik} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(K_{hk} \frac{\partial E}{\partial x_k} \right) + \delta_{i3} g \frac{1}{\rho} \overline{u'_i \rho'} \\ &\quad - C_\epsilon E^{3/2} / \Delta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\rho' = f_\rho(\theta, \theta_s) \quad (8)$$

$$R_{ik} = \overline{u'_i u'_k} \quad (9)$$

$$\overline{u'_i u'_k} = \delta_{i3} \frac{2}{3} E - K_{mk} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

$$\overline{u'_i \rho'} = K_{mi} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$K_{m1}, K_{m2}, K_{m3} = C_m E^{1/2} \Delta \quad (12)$$

$$K_{h1}, K_{h2} = C_m E^{1/2} \Delta / \text{Pr}, \quad K_{h3} = C_m E^{1/2} \Delta / \text{Pr}_t \quad (13)$$

$$\text{Pr}_t = 1 + 0.3 \Delta^2 N^2 / E \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_\epsilon = 0.845 \\ C_m = 0.0856 \\ \text{Pr} = 0.420 \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $i=1,2,3$: x, y, z に対応、 u_i : 流速、 θ : 水温、 θ_s : 塩分、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 κ, κ_s : 水温と塩分に関する拡散係数、 ρ : 密度、 Δ : メッシュに代表される代表長さ、 N : 浮力振動数、 Pr : プラントル数、 u'_i : メッシュスケール以下の流速の変動成分、 ρ' : メッシュスケール以下の密度の変動成分、 K_{mi} : 渦粘性係数、 K_{hi} : 渦拡散係数、 E : 乱流エネルギー、 C_ϵ, C_m : LES定数、 R_{ij} : 乱流によるせん断に関する項、 θ_s : 塩分、 θ : 水温、 f_ρ : 水温と塩分により密度を推定する式、である。

時間積分に、Time Splittingを用いて予測子、修正子を計算し、CIP法^{41) 42)}を組み合わせたものを用いる。表面波による非線形な影響は、東京湾の計算において小さいため、表面波によるCFL条件が1以上でも計算できるように、完全陰解法により表面波を解いている。

空間微分に関して、拡散項は保存型の有限体積法に基づき計算されている。対流項はCIP法による。非静水圧成分を計算する際のポアソン方程式の解法には、残差除除法⁴³⁾を用いている。その際、近似解を得るために、SOR法を用いた。水面はALE法⁴⁴⁾により計算されている。メッシュ数は $60 \times 45 \times 50$ 、メッシュ間隔 $1\text{km} \times 1\text{km} \times 3.5\text{m}$ から 1m を与えた。

(2) 再現計算結果

初期条件は、観測結果を参考に、湾内上層10mに下層に比して 4 kg m^{-3} 軽い水塊を配置した。境界では下層と同じ密度を常に与えた。潮汐は、日潮不等を考慮するために、0.7mの振幅と0.175mの振幅を組み合わせた24時間周期のものを与えた。一様な流れ場が得られるまで、3潮汐を計算の前処理として行い、その後、9日間の計算を行った。短期間での計算であり、平水時における河川

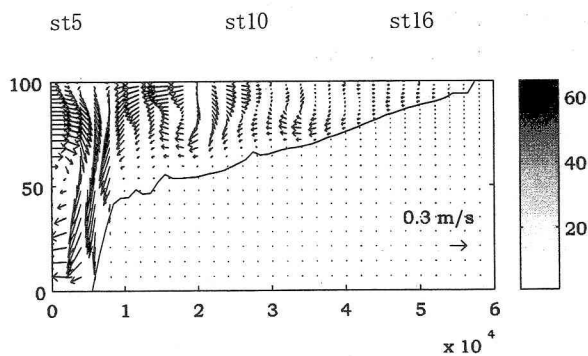


図-10 MEL 3Dにより再現された流速ベクトルの縦断分布図。
上横軸は、各観測stに対応する。

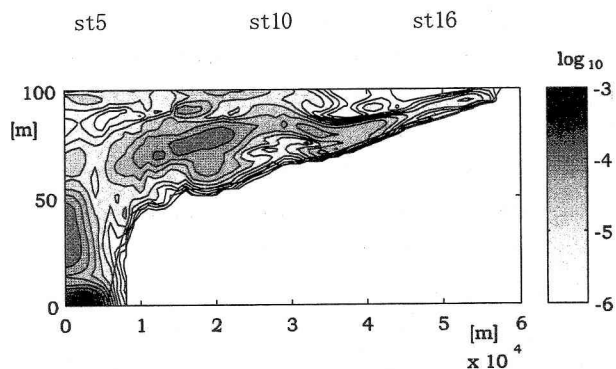


図-11 MEL 3Dにより再現されたSGS乱流運動エネルギーの縦断分布図。上横軸は、各観測stに対応する。

流量の影響は吸10日以上スケールで現れるため、河川流入は考慮されていない。内部波は、境界での潮汐により地形の影響を受けて発生するものであり、急な斜面がその発生源である²⁾。そのため、湾口部における内部波の不安定に起因する混合が卓越して発生することが予想される。

σ_t の再現計算結果と観測結果を比較すると、再現計算により得られた湾口部における混合が、観測されたものよりも大きく現れた(図-9)。計算における開境界の位置が湾口部に近く、そのため実際より大きな振幅の内部波が発生し、湾口部において図のような σ_t の分布を与えたものと考えられる。開境界の位置の設定を、今後、修正する必要があると考えられる。

観測期間に対応する、流速ベクトルの縦断分布と、ASCP観測結果を比較すると、st8, st9に対応する横軸20km付近において、卓越した上層の湾外への流れ出し、底層における流れ出しが再現できていることが分かる(図-10)。ただし、再現計算結果から得られた流速ベクトルは、観測期間における平均値であり、観測結果に直接対応するものではない。大きな濁度が得られたst10は、30km周辺に対応しており、計算結果において、湾奥から湾口に向けて底層に発生した流れが、海底面から剥離する部分に対応していたことが分かる。

濁度の発生とLESにより再現されたSGS乱流運動エネルギー(TKE)に関して、st10周辺で大きな値のTKEが得られた(図-11)。大きなTKEが、濁度の巻き上げに何らかの寄与をしていたのではないかと推測される。また、水深平均された再現計算による散逸率と、Turbomap9による観測結果の比較から、定量的によく一致した値が計算により得られていることが分かった(図-7)。湾口部における散逸率の増大といった、東京湾における特徴的な分布も再現されていた。

7. おわりに

2004年11月17日において、水温、塩分、濁度、微細乱流構造を測定し、非静水圧3次元LESモデルを用いて比較検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 濁度と密度の分布から、内部波の作用による流速の増大、内部波の碎波による混合が、濁度の増大に起因していることが推測された。
- (2) Turbomap9の観測から、湾口部における乱れは、海底の摩擦に起因した乱れではない可能性が高いことが示された。
- (3) 非静水圧3次元LESモデルによる散逸率の再現計算結果と観測結果から、モデルで用いられている乱流モデルが良好にTKEを再現していることが示された。

参考文献

- 1) Guo, X., Yanagi, T.: Variation of residual current in Tokyo bay due to increase of fresh water discharge, *Continental Shelf Research*, Vol.18, 677-693, 1998.
- 2) 中山恵介, 清木莊一郎, 石川忠晴, Alex S.J. Wyatt, 東京湾湾口部におけるフロント形成過程の究明, 水工学論文集, 第49巻, pp.1291-1296, 2004.
- 3) Nakayama K., S. Kiyoki and A. Wyatt, Mechanism responsible for front in Tokyo Bay, *Civil Engineering in the Oceans VI proceedings*, accepted, 2005.
- 4) Yanagi, t., Shimizu, M., Nomura, M., Furukawa, K.: Spring-neap tidal variations of residual flow in Tokyo bay, japan, *Continental Shelf Research*, Vol.23, pp.1087-1097, 2003.
- 5) 中山恵介, 佐藤圭洋: LESモデルによる水平面上張り出しブルームの解析, 土木学会論文集, 第628号, pp.97-114, 1999.
- 6) Nakayama, K., Okumiyu, E., Nakamura, Y.: The effect of radiation cooling on convective circulation in a brackish-water lake, *6th Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Vol.19, pp.105-117, 2001.
- 7) 中山恵介, Dutta Dushmanta, 田中岳, 岡田知也, 河道モデルと沿岸流動モデルの統合とその必要性に関する検討, 水文

- 8) Schumann, U.: Subgrid Length-Scales for Large-Eddy Simulation of Stratified Turbulence, *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, 2, pp.279-290, 1991.
- 9) Lilly, D. K., Waco, D. E., and Adelfang, S. I.: The representation of small-scale turbulence in numerical simulation experiments, *Proc. IBM Sci. Comput. Symp. on Environmental Science*, pp.195-210, 1967.
- 10) Schmidt, H., and Schumann, U.: Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 200, pp.511-562, 1989.
- 11) Yabe, T., Takeo, I., and Yusaku, K.: A multidimensional cubic-interpolated pseudoparticle (CIP) method without time splitting technique for hyperbolic equations, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.59, No.7, pp.2301-2304, 1990.
- 12) Yabe, T., Ishikawa, T., Wang, P. Y., Aoki, T., Kadota, Y. and Ikeda, F.: A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation ii. two-dimensional solvers. *Computer Physics Communications*, 66, pp.233-242, 1991.
- 13) Tamura, A., Kikuchi, K. and Takahashi, T.: Residual cutting method for elliptic boundary value problems: application to poisson's equation. *Journal of Computational Physics*, 137, pp.247-264, 1997.
- 14) Hirt, C.W., Nichols, B.D. and Romero, N.C.: SOLA : A numerical solution algorithm for transient fluid flows, *Los Alamos Scientific Laboratory, report LA-5852*, 1975.