

浅海域の海面境界層における乱流モデリングの重要性と改良の方向性

村上 智一*・大澤 輝夫**・伊藤 秀文***・安田 孝志****

本研究では、海面境界層において物理量の下方輸送を担う鉛直渦動粘性係数・拡散係数に着目し、伊勢湾大気海洋結合モデルに Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャーモデルと Richardson 数に依存した関数型に基づく乱流モデルを組み込み、冬季の伊勢湾において、海面境界層から下層までの計算精度について比較・検討した。その結果、MY モデルは流れ場・温度場を鉛直一様にする傾向が強く、Ri 数モデルは強風時に表層の流速が顕著な過大評価傾向があるなど、鉛直渦動粘性係数・拡散係数の算出手法の違いが局所的な鉛直混合のみならず、内湾全体の流れ場および温度場の計算結果に非常に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

1. 緒 言

伊勢湾における自然災害の予測や環境問題への対策を目的として、筆者らは伊勢湾大気海洋結合モデルの構築を行っている(水谷ら, 2003)。この大気海洋結合モデルを用いることによって、内湾の海水流動や水温・塩分・密度場に強く関わっている潮汐、河川、風・日射などの各素過程を数値計算に取込むことができる。特に気象条件ではペンシルベニア州立大学と米国大気研究センターで開発された気象モデル MM5 を用いているので、海面上のフラックスがモニン・オブコフ相似則に代表される接水境界層理論に基づいて算出できる点に利点がある。

このようにして算出される気象条件は、海面境界条件を通して海洋モデルに入力されるが、伊勢湾などの内湾は浅海域のために気象場の影響は相対的に大きく、これらを扱う海面境界層内の物理過程の定式化とその下方輸送を担う乱流モデルの高精度化が重要となる。しかし、現在のところ、波浪や碎波、安定度までを考慮に入れた海面境界層内の物理過程の定式化および乱流モデルの統一的な理論はまだ十分に確立されていない。これは、内湾で対象となる海面境界層の鉛直解像度が、外洋で卓越する海洋混合層厚スケールと碎波を含めた波動スケールの中間に位置することによって生じる新たな問題であり、海面境界層が本質的な役割を担う伊勢湾のような浅い内湾における数値計算では、これらの理論の確立が火急の課題となっている。

本研究は、物理量の下方輸送を担う乱流モデルに着目し、従来の内湾流動計算に多く用いられてきた Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャーモデルと Richardson 数に依存した関数型に基づく乱流モデルを用いて、伊勢湾内の海面境界層から下層までの流れ場および温度

場の計算精度の比較・検討を行い、その重要性および改良の方向性を示したものである。

2. 計算条件

海洋モデル POM (プリンストン大学) と気象モデル MM5 を結合させた伊勢湾大気海洋結合モデル(水谷ら, 2003)を用いて、乱流モデルによる計算精度の比較を行った。MM5 から出力される摩擦速度、潜熱・顕熱フラックス、短波放射、下向き長波放射、蒸発、降水量、気圧と POM から出力される海面温度を用いて、海面での運動量フラックス、熱・水蒸気・塩分フラックス、上向き長波放射、気圧勾配を計算し、両モデルへ入力している。また潮汐計算のために、国立天文台で開発された日本周辺潮汐モデル NAO99Jb (Matsumoto ら, 2000) を結合し、各タイムステップで算出される潮位変動が POM の外洋開境界条件として入力されるようにしている。

計算領域は、図-1 とした。ここでは計算の簡略化のため、100 m 以下の水深をすべて 100 m に設定して計算した。各モデルの水平解像度は MM5 を 3 km, POM を 1 km とし、鉛直層数は大気を 20 層、海洋を 16 層とした。計算期間は、愛知県企業庁・中部国際空港株式会社および(財)電力中央研究所による観測値の期間に合うように

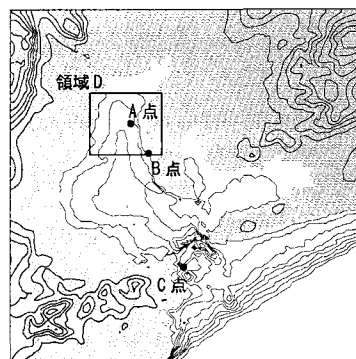


図-1 計算領域：水深のコンターは 10 m 間隔、標高のコンターは 100 m 間隔。

* 学生会員 修(理) 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

** 正会員 博(理) 神戸大学助教授 海事科学部

*** 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

**** 正会員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

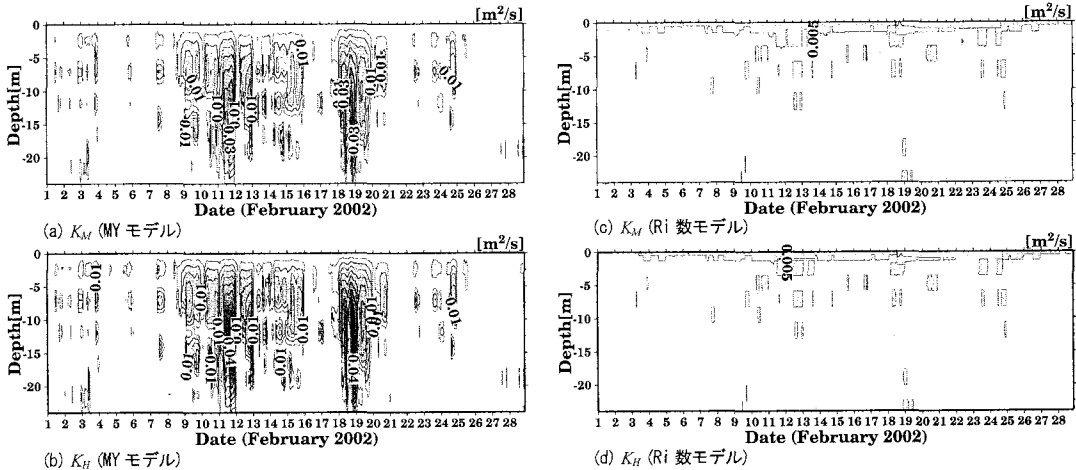


図-2 図-1のA点における鉛直渦動粘性係数 K_M および鉛直渦拡散係数 K_H の鉛直分布の日変化；コンターは $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$ 間隔。

2002年2月の1ヶ月間とした。また、海洋モデルの初期値は、NOAA 海面温度データおよび気候値 (Sekine ら, 1993) を基にして作成した。この時、外洋では黒潮による高温・高塩分、内湾では塩分による成層のために下層で高温であるなど冬季の伊勢湾の特徴は現したが、3次元的な初期値を求めるには余りにも観測データが少な過ぎるため、やや主観的な推測が入ったことは否めない。

3. 乱流モデル

本研究で比較に用いた乱流モデルは、Mellor・Yamada (1982) による Mellor-Yamada Level 2.5 乱流クロージャーモデル (MY モデル) と Richardson 数に依存した関数型に基づく乱流モデル (Ri 数モデル) である。Ri 数モデルは次式で表され、その適用性は中辻ら (1991) によって検討されている。

$$K_M = K_0(1 + 5.2Ri)^{-1} \dots \dots \dots (1)$$

$$K_H = K_M \frac{(1 + 10Ri/3)^{-3/2}}{(1 + 10Ri)^{-1/2}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 K_M は鉛直渦動粘性係数、 K_H は鉛直渦拡散係数、 K_0 は中立状態の鉛直渦動粘性係数、Ri は Richardson 数である。この Ri 数モデルは、 K_M を Webb (1970) の提案式、 K_H を乱流 Schmidt 数に対しての Munk・Anderson (1948) の提案式でそれぞれ求めている点に特徴がある。また、 K_0 の値は、 $K_0 = 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ を用いた。

図-2 は、これらの乱流モデルで算出された前述の図-1のA点における K_M および K_H を示したものである。この図によると、MY モデルは Ri 数モデルに比べて過大な K_M および K_H を与えることがわかる。MY モデルは安定状態から不安定状態までの広い範囲の Richardson 数に対応しており、不安定状態になった場合に K_M

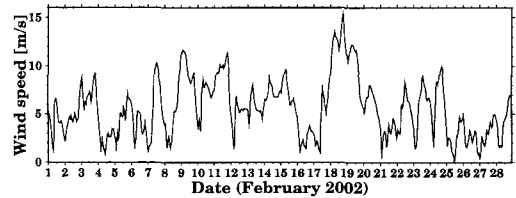


図-3 図-1のA点における気象モデルMM5による風速。

および K_H の値を増大させるが、Ri 数モデルは安定から中立状態までの Richardson 数のみに対応し、不安定状態になっても K_M 、 K_H の値を特別に増大させることはないからである。また、MY モデルは乱流エネルギーの支配方程式の海面境界条件において海面応力を扱っているため、海面応力が大きくなることで、乱流エネルギーが増加し K_M 、 K_H も大きくなることが考えられる。これに対して、Ri 数モデルでは、Richardson 数の計算の際にシア流は考慮しているものの、海面境界条件を取扱わないため海面応力の影響は考慮されない。これらのことは、A点におけるMM5による風速を示した図-3との対応からもわかる (精度の詳細は大澤ら (2001) を参照のこと)。MY モデルでは、海面応力が大きくなる強風時の2月9日～11日、18日～19日に対応して K_M 、 K_H の値が大きくなるが、Ri 数モデルでは強風時においても K_M 、 K_H の値に変化がみられない。

また、MY モデルでは、海面において乱流場の長さスケールを0とする Rigid-lid の仮定の境界条件のために K_M 、 K_H 自体も0となる。このため、表層よりもむしろ中層で K_M 、 K_H が大きくなっている点に特徴がある。これに対して Ri 数モデルでは、 K_M 、 K_H の値が Richardson 数のみに依存するため、冬季の海面冷却による不安定の

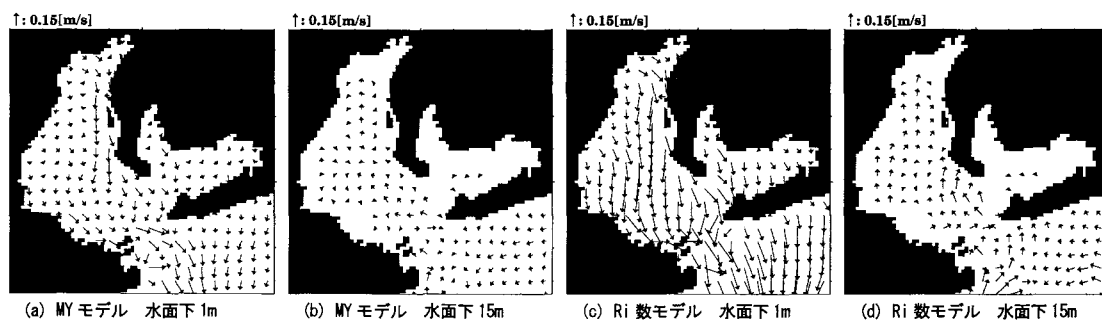


図-4 計算期間中の残差流。

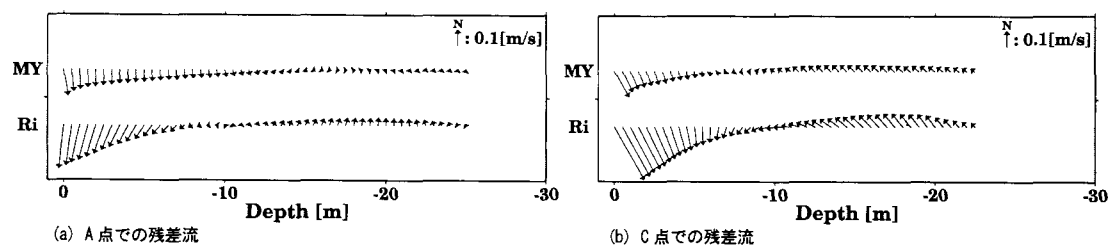


図-5 計算期間中の残差流の鉛直分布。

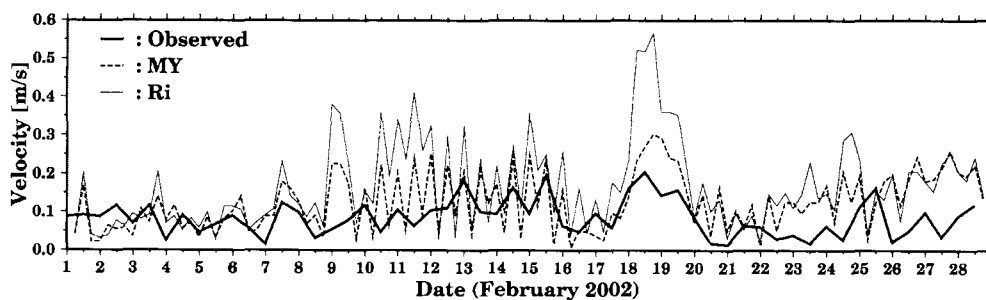


図-6 図-1のB点における水面下2mの流速。

結果、海面付近で極大になる傾向がある。さらに、 K_M と K_H の関係は、MYモデルではPrandtl数を0.8とする実験定数 (Mellor・Yamada, 1982) のために常に $K_M < K_H$ であるが、Ri数モデルでは乱流Schmidt数に対してのMunk・Anderson (1948) の提案式を用いたために常に $K_M > K_H$ と正反対の関係になっている。

4. 精度検証

(1) 流 速

図-4は計算期間中のMYモデルとRi数モデルの残差流をそれぞれ示したものである。水面下1mの残差流は、両モデル共に冬季の伊勢湾に卓越する北西風のために湾内から外洋へ流出する流れが見られるが、Ri数モデルではMYモデルに比べてその流速が強くなっている。水面下15mでの残差流では、表層流出を補うために下層から内湾に侵入する流速がみられ、表層流出が強いRi

表-1 B点における水面下2mの流速のBIASとRMSE

		BIAS(m/s)	RMSE(m/s)
1日～28日	MY	0.04	0.08
	Ri数	0.08	0.14
通常日	MY	0.03	0.07
	Ri数	0.05	0.09
強風日	MY	0.08	0.12
	Ri数	0.22	0.26

数モデルの方が下層からの侵入も強くなっている。このように乱流モデルによって流れ場に非常に大きな差が生じることが明らかになった。

このことは前述の図-1の湾奥のA点、湾口のC点での残差流を示した図-5からもわかる。この図からA点、C点いずれもMYモデルでは K_M が大きいためRi数モデルに比べて流速・流向が鉛直一様になる傾向にあ

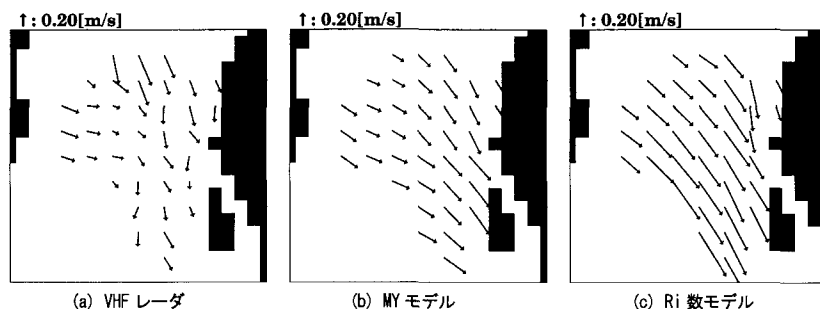


図-7 2002年2月18日18時の表層流速ベクトル分布。

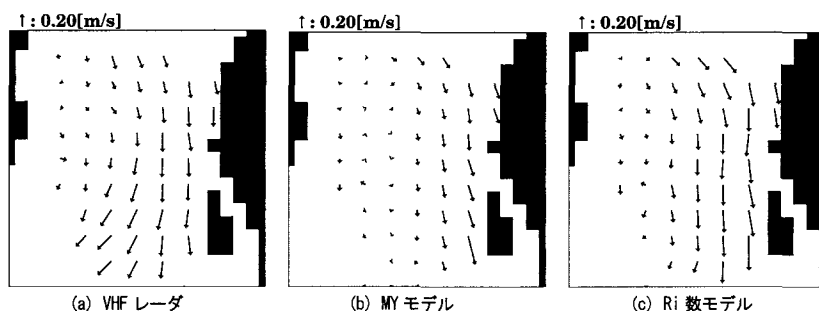


図-8 2002年2月18日～2月26日までの平均表層流速ベクトル分布。

ることがわかる。そして、Ri 数モデルでは K_M が小さいために表層で湾内から流出する流れ、下層で湾内へ侵入する流れがそれぞれ強く現れていることがわかる。

図-6は、図-1のB点において水面下2mの流速を愛知県企業庁・中部国際空港株式会社による観測値と比較したものである。そして表-1に、計算期間中の全ての日、通常的气象条件の2月1日～8日、12日～17日および2月20日～28日の通常日、強風が吹いた2月9日～11日および18日～19日の強風日に場合別けてBIAS, RMSEを示した。これらの結果から、全体的にMYモデルの方が精度が良いことがわかる。また、BIASから、両モデル共に流速が過大評価傾向であることがわかる。特にRi数モデルでの強風日は、非常な過大評価で精度が極めて悪くなっている。

図-7は、前述の図-1の領域Dにおいて(財)電力中央研究所によるVHFレーダ観測値とMYモデルおよびRi数モデルの結果を比較したものであり、風速15m/sの強風時であった2月18日18時での表層流速ベクトル分布を示す。なお、VHFレーダは、極表層の流れ場を観測するため、計算値も最上層の流速を用いている。この図からもRi数モデルの流速が全体に過大評価傾向にあり、計算精度に問題のあることがわかる。MYモデルは、Ri数モデルに比べると流速は弱まっているものの、流向など精度が良いとは言えない。

図-8は、VHFレーダ観測値とMYモデルおよびRi

数モデルの結果を図-1の領域Dにおける2月18日～2月26日の観測期間平均して比較したものである。この図によると、MYモデルでは全体的に流れが弱く、特に湾央付近ではほとんど流れが見られない。これに対して、Ri数モデルでは湾央から東側での強い流速、西側での弱い流速と観測値の再現性は良い。このように極表層の平均流のパターンという面では、Ri数モデルの方が再現性が良い。このことから、外洋など水深が大きく鉛直解像度が低い場合では、海面で K_M が常に0となるMYモデルの仮定は問題にならないが、浅海域のように鉛直解像度が高くなる場合では、この仮定が問題になる可能性が示唆された。

これらの結果から、Ri数モデルは強風時に過大評価傾向にあることが明らかとなった。Ri数モデルでは、 K_M に及ぼす海面応力の影響が考慮されていないため、強風時に活発になる運動量の下方伝達が正しく計算されず、表層流速が過大に評価されたと推察される。また、MYモデルでも弱風時に比べて強風時は、精度が悪くなっている。これは、強風時の碎波のために水面直下の乱流成分が大きくなり、MYモデルで用いられているRigid-lidの仮定が適さなくなったためだと考えられる。事実、小笠原ら(2000)は強風時の白波立った水面下では壁法則を仮定したせん断応力の連続条件がべき則層の発達のため成立しないことを明らかにしている。以上より、強風下吹送流を正しく記述するには、海面応力の影響だけでな

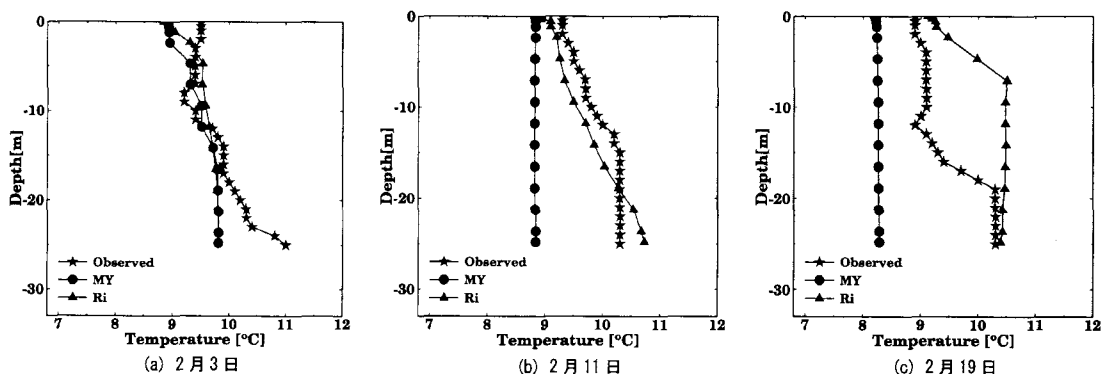


図-9 図-1のA点における水温。

く、強風時の白波を伴う海面直下の乱流構造を踏まえた乱流モデルが必要となる。

(2) 水 温

図-9は前述の図-1のA点における水温であり、ここでは代表的な2月3日、11日、19日のものを示した。2月3日は弱風日で、両モデル共に平均的な K_H の値を与えており、観測値の再現性は良い。2月11日、19日は、強風日である。この時のMYモデルは K_H が急激に大きくなり、その結果、水温は鉛直一様で再現性は悪い。また、前述の図-4および5で示されたように、MYモデルでは流れ場の表層流出および下層侵入が共に弱く、外洋の高温水が浸入して来ないため、観測値に比べて温度が低下している。これに対してRi数モデルでは、外洋の高温水が浸入しているのがわかる。しかし、19日のように高温になり過ぎる場合がある。これは、Ri数モデルの表層流速が強風時に顕著な過大評価となり、それに対応して、外洋水の下層侵入も強くなり過ぎたと考えられる。以上のことから、MYモデルでは鉛直一様になる傾向が示され、温度場においても乱流モデルによって計算結果に非常に大きな差が生じることが明らかになった。

5. 結 語

以上、冬季の伊勢湾における流れ場および温度場について乱流モデルによる計算精度の比較・検討を行った。その結果、 K_M および K_H の算出手法の違いが局所的な鉛直混合のみならず、内湾全体の流れ場および温度場の計算結果に非常に大きな影響を及ぼすことが明らかになり、乱流モデルの重要性が示された。

MYモデルによる K_M および K_H の値は、海面で0になると仮定された境界条件のために、表層よりもむしろ中層の値を増大させ流れ場や温度場を鉛直一様化する傾向にあることがわかった。一方、Ri数モデルでは、 K_M および K_H の値は表層で極大となり、極表層の流動パターンの再現性は良いものの、強風時に表層の流速が顕著な

過大評価傾向になった。今後、両者の長所を組み合わせる意味では、高次モデルであるMYモデルの方を改良していくことが現実的と判断される。そして、波浪や碎波の影響を考慮し、海面付近の K_M および K_H の値の低減を抑制、かつ中層での過大評価傾向を抑えるようなチューニングも必要である。

謝辞：精度検証に用いた海洋観測データは愛知県企業庁・中部国際空港株式会社より、VHFレーダデータは(財)電力中央研究所からご提供頂いた。また本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(2)16360243および若手研究(B)14750426による成果であることを付記し、ここに併せて謝意を表する。

参 考 文 献

- 大澤輝夫・深尾一仁・安田孝志 (2002): 伊勢湾地域における高解像度気象場の再現計算とその精度検証, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 181-185.
- 小笠原敏記・久保田踊児・安田孝志 (2003): 白波碎波を伴う強風時吹送流の平均水面直下の鉛直分布とそのモデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 351-355.
- 中辻啓二・許 再寧・室田 明 (1991): 三次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, No. 434/II-16, pp. 19-28.
- 水谷英朗・大澤輝夫・村上智一・小林智尚・安田孝志・藤原建紀 (2003): 伊勢湾大気海洋結合モデルの構築とその精度検証, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 431-435.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000): Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional around Japan, J. Oceanography, 56, pp. 567-581.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20, No. 4, pp. 851-875.
- Munk, W.H. and E.R. Anderson (1948): Notes on a theory of the thermocline, J. Marine Res., Vol. 7, pp. 276-295.
- Sekine, Y. and H. Mizutani (1993): Seasonal variations in vertical distribution of temperature, salinity and density in and off Ise Bay, Bull. Fac. Bioresources, Mie Univ., No. 10, pp. 147-164.
- Webb, E. K (1970): Profile-relationships, the log-linear range and extension to strong stability, Quart. J. R. Met. Sci., Vol. 96, pp. 67-90.