



Title	海洋表層混合層底部のエントレインメント係数について
Author(s)	小林, 智加志; KOBAYASHI, Chikashi; 金成, 誠一 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 61, 11-22
Issue Date	1998-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.61.11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14256
Type	departmental bulletin paper
File Information	61_p11-22.pdf



海洋表層混合層底部のエントレインメント係数について

小林 智加志・金成 誠一

北海道大学大学院理学研究科

(1997年11月26日受理)

On the Entrainment Coefficient at the Ocean Surface Mixed Layer Base

Chikashi KOBAYASHI and Sei-ichi KANARI

Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received November 26, 1997)

Entrainment coefficient at the base of mixed layer is estimated using the data obtained from TOGA COARE 1992. The data of vertical profiles were obtained at 156 °E of equator with every 3 hours interval. The mixed layer thickness were determined from the profiling using a criterion of temperature difference of 0.1 deg. C. from SST. The estimated coefficient, A , which is defined as a ratio of the net turbulent momentum flux in the mixed layer to the buoyancy flux at the base of the mixed layer, is quite dispersive, especially for the mixed layer shallower than 15 m. Entrainment rate E which is defined as a ratio of erosion velocity to friction velocity, also showed a slight lower value than the result of Kato and Phillips (1969) for the shallower mixed layer. These dispersive values are corrected using an empirically corrected erosion velocity. It is concluded that the experimental result by Kato and Phillips (1969) can be applied to the real oceanic mixed layer only within a certain restricted conditions.

I. はじめに

海洋表層混合層底部はひとつの密度境界面を形成し、混合層の深化はこの密度境界面での水の鉛直混合によって達成される。混合によって、下層水が上層に取り込まれることにより、混合層底部の浸食が行われるわけであるが、この過程がエントレインメントと呼ばれている。このような、密度境界面における混合が、表層の水面に作用する応力とどのように関わるかを調べる注意深い実験がKato and Phillips (1969) によっておこなわれた。この実験で、エントレインメント比 E は、浸食速度 u_e と摩擦速度 u_* の比で定義される量で、Kato and Phillips (1969) の実験では、 E がバルク・リチャードソン数に逆比例するという結果が導かれている。ただし、この実験のバルク・リチャードソン数のレンジは20~30の間であった。

海洋混合層の一次元バルクモデルを導く際に、乱流エネルギー方程式を混合層厚さで積分するが、この過程で、混合層下部の境界条件が必要になる。この境界条件として、パラメータ化された混合層底部でのエントレインメント式を導入することが行われる (e.g. Kraus and Turner (1967), Li (1971)). Li (1971) では、混合層底部での乱流フラックスが底部での密度差とエントレインメント

速度の積に比例するとし、その比例係数A（エントレインメント係数）をKato and Phillips (1969)の実験結果に基づいて0.4としている。

そこで、上記のKato and Phillips (1969) のような室内実験結果が、現実の海洋にそのまま適用できるか、また、室内実験のバルク・リチャードソン数のレンジが、実際の海洋ではどうなるか、更に、エントレインメント係数A=0.4は普遍常数たりうるかという問題に焦点をあて、TOGA-COAREに関連して行われた西太平洋赤道域での乱流観測（MSP）データを用い検討した。

II. 一次元混合層における連行係数

混合層の水温を T_s 、混合層底部の水温を T_h 、混合層厚を h (Fig. 1) とするとき、混合層底部を通じた乱流熱フラックスは、混合層と混合層底部の温度差と混合層底部の浸食速度の積に比例する。すなわち、

$$w'T'|_{z=h} = A(T_s - T_h)w_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 w_t は混合層の浸食速度（下向き正）、 A は比例係数で、連行係数（Entrainment Coefficient）と呼ばれている。

定常状態の乱流エネルギー方程式を混合層内で積分することにより、次のような混合層内のエネルギー収支式、

$$G^* + W^* + D^* = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られる（Krauss and Turner, 1967）。ただし、 G^* は風からのモーメントフラックス、 D^* は積分分散逸率、 W^* は浮力によるポテンシャルエネルギーで、それぞれ次式で表される。

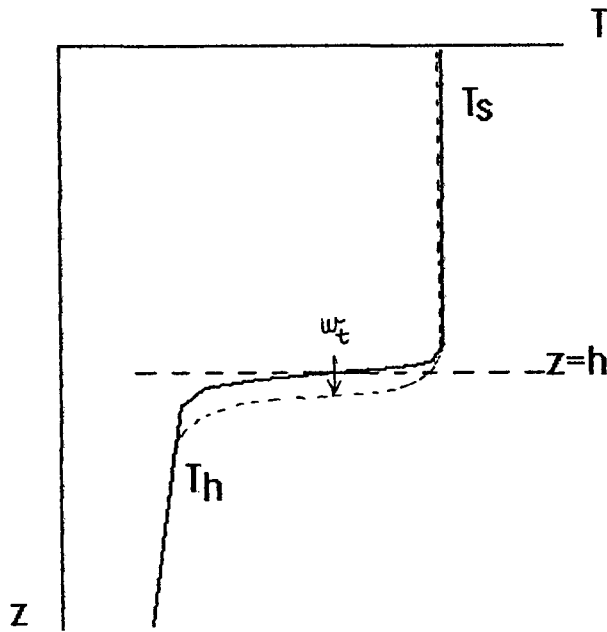


Fig. 1. Schematic Definition of the quantities in the one-dimensional mixed layer.

$$G^* = \rho_0 u_*^3 \dots\dots\dots (3)$$

$$D^* = \int_0^D \epsilon dz \dots\dots\dots (4)$$

$$w^* = \int_0^D \alpha \rho_0 g w' T' dz \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_* は摩擦速度、 ρ_0 は密度、 α は海水の熱膨張率、 ϵ は散逸率である。

(1)、及び (3) ~ (5) の関係を (2) に代入すると、

$$A = (G^* - D^*) / \alpha \rho_0 g h w_t (T_s - T_b) \dots\dots\dots (6)$$

が導かれる。(6) の右辺の温度差 ($T_s - T_b$) の代わりに密度差で置き換える場合は

$$A = (G^* - D^*) / \Delta \rho g h w_t \dots\dots\dots (7)$$

となる。

(6) または (7) の右辺の量は全てMSP観測データ並びに海上気象データから見積もることが可能である。そこで、初めに(6)式に基づいて、連行係数Aの評価を試みる。しかる後に、Kato and Phillips (1969) にならって連行比Eとバルク・リチャードソン数の関係を調べることにする。

III. 乱流観測データ

この解析に用いたデータは、1992年11月に西太平洋赤道域の東経156度で行われたTOGA-COAREのMSP観測で取得したもので、11月14日から11月20日までの7日間のプロファイル時系列である。14日04:30から15日04:30までは6時間間隔、それ以降は3時間間隔でMSP投入を行った。このプロファイル時系列から混合層内平均の乱流エネルギー散逸率等を計算し、その時の海上気象データ並びに混合層厚さ(MLD)と対比した時系列図をFig. 2に示す。横軸は12日22:30を起点とした時間で表してある。Fig. 2の(a)は風速、(b)は混合層内の平均散逸率、(c)は $\Delta T = 0.1$ 度Cで決めた混合層厚、(d)は混合層厚の時間変化率で、値が負のとき混合層の浸食(Entrainment)に対応する。(e)は混合層底部での浮カフラックスをそれぞれ示してある。この期間の混合層厚の変化は、前半で約2日周期の比較的大きな変動がみられるが、後半では変動の振幅が急減し、130時間以後は目立った変化がみられない。これは、後半で浮力フラックスの流入が殆ど消失していることによるものである。なお、混合層厚は、表層水温と混合層底部の水温差を0.1度Cとして決定した。これは、密度差にして $\alpha = 0.005$ に相当する。この温度差で決定した混合層厚と上記の密度差で決めた混合層厚は極めて良く一致することは確認済みである(Kanari et al., 1995)。

IV. 連行係数

1. 連行係数Aの見積り

混合層の層厚変動は移流に起因する変動を除けば、表層の加熱と風によるモーメントの投入、並びに表層の冷却に起因する対流によって支配されている。海面からの熱の流入は混合層の浅化に寄与し、このとき、混合層底部の連行過程は消失する。従って、時系列から連行係数Aを見積もるにあたっては、表層加熱に相当するデータは除外しなければならない。結果的には、浸食速度の時間変化率が正になっているデータのみが有効ということになる。更に、連行過程は、下層の低温水が混合層に取り込まれる過程であるので、混合層水温が上昇しているケースは望ましくない。従って、時系列のうち

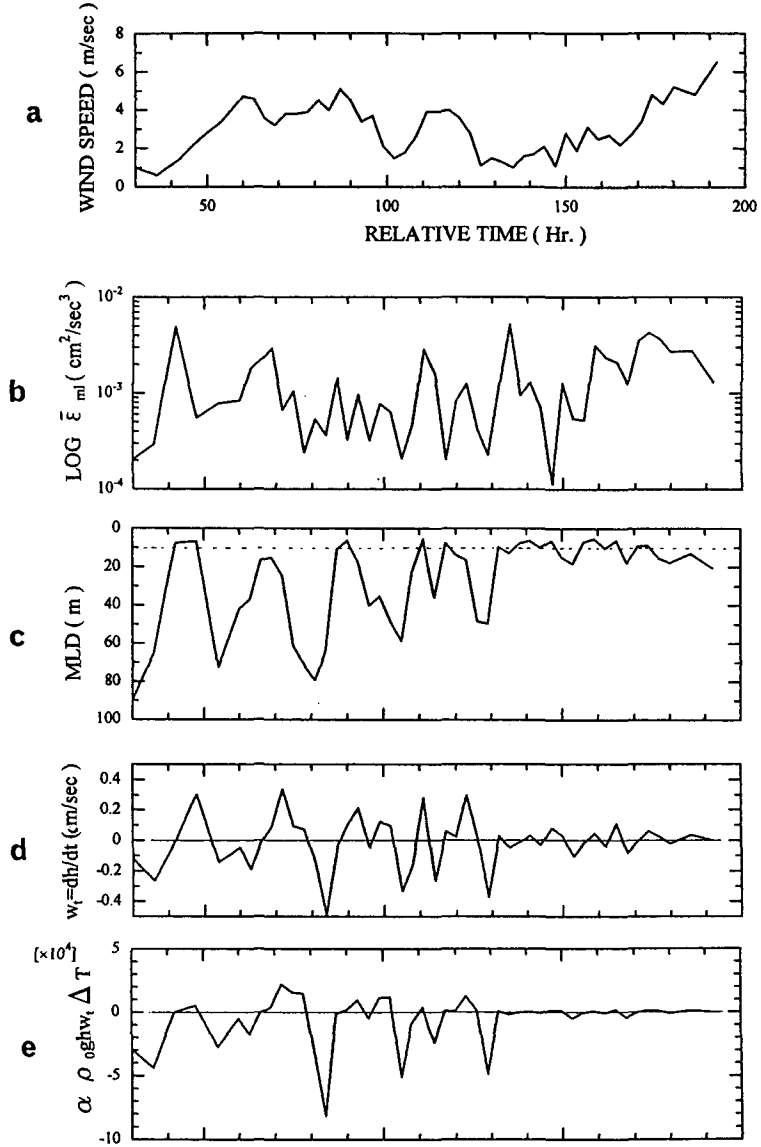


Fig. 2. Time series of wind speed (a), turbulent energy dissipation rate averaged in the mixed layer (b), mixed layer depth (c), entrainment velocity (d), buoyancy flux (e).

$$(1) W_i = dh/dt > 0$$

$$(2) dT_s/dt < 0$$

の条件を満たすデータのみを選び出し、そのデータについてAの評価を行う。

上記の条件以外に、非定常性の大きいデータも好ましくないが、非定常性の評価が困難なため、この条件は適用しなかった。当然、非定常性によるばらつきは覚悟しなければならない。

以上の方針のもとに連行係数Aを見積った結果をTable 1に、また、A値とMLDの相関をFig. 3に示す。予想どおり、浅い混合層でAのばらつきが大きい。15m以深の混合層では、Aは1以下となっている。しかしながら、1以下でのばらつきもそれなりに起こっており、15m以深のデータのみを平均したとしてもA=0.4という結論に到達することは難しい。こうしたばらつきの要因は、Aの評価がエネ

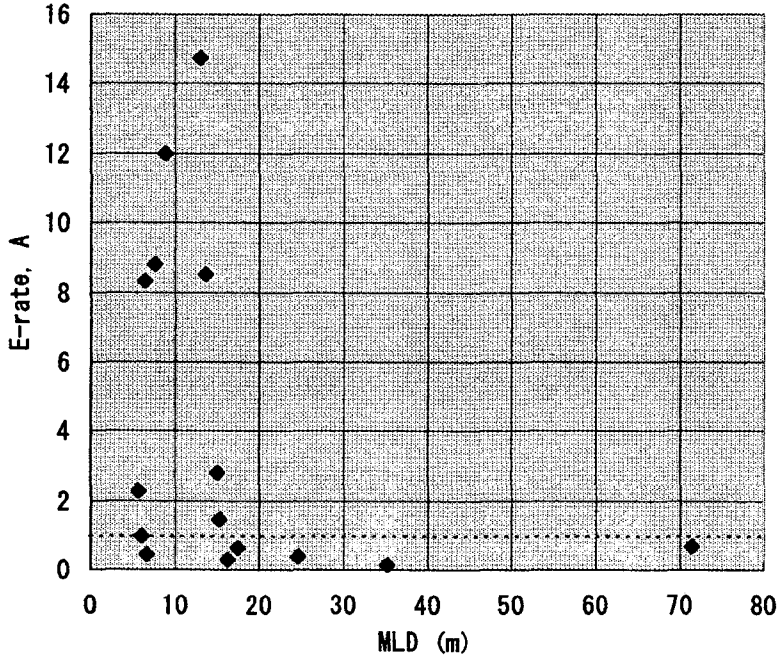


Fig. 3. Estimated entrainment coefficient A plotted as a function of MLD.

Table 1. Measured quantities and estimated entrainment coefficient A.

TIME (hr)	Wind (m/s)	$\bar{\epsilon}$ (cm ² /s ³)	MLD (m)	Wt (cm/s)	dT/dt (deg. C/s)	$h\bar{\epsilon}$ (cm ³ /s ³)	Entrainment Rate, A
48	2.5	0.000556	6.71	0.304537	-1.18E-05	0.373075	0.4530957
69	3.2	0.002931	15.19	0.088148	-1.13E-05	4.452189	1.4473496
72	3.8	0.000666	24.71	0.337407	-7.65E-06	1.645686	0.389952
78	3.9	0.000241	71.28	0.074167	-6.58E-07	1.717848	0.6648308
90	4.5	0.000328	6.9	0.101574	-2.13E-06	0.209592	8.3223925
93	3.4	0.000963	17.36	0.211574	-8.57E-06	1.671768	0.6338962
99	2.1	0.000774	35.27	0.122593	-2.72E-06	2.729898	0.1263248
111	3.9	0.002882	5.55	0.280833	-2.71E-06	1.59951	2.2550777
117	4	0.000203	7.59	0.056759	-1.52E-06	0.154077	8.8063009
120	3.6	0.000824	13.72	0.023704	-1.71E-06	1.130528	8.5009413
123	2.8	0.001252	16.28	0.297685	-4.56E-06	2.038256	0.2680898
150	2.8	0.001268	14.95	0.031019	-4.38E-06	1.89566	2.8020646
165	2.2	0.002105	6.11	0.109259	-1.60E-05	1.286155	0.9435753
174	4.8	0.004273	8.86	0.061759	-1.26E-06	3.785878	11.974098
186	4.8	0.002762	13.1	0.033889	-9.06E-06	3.61822	14.759155

ルギーのフラックスに基づいていることにあり、フラックスの評価精度に大きく左右されることが考えられる。また、通常、自由落下型のMSPの計測では、散逸率は水面下 10 m以深についてのみなされ、水面から 10 m深までの散逸率データは、取得できても信頼性は低いと考えられる。TOGA-COAREのデータは、水面下 5 mから取得開始しているが、5 m以浅の散逸率データの欠落による混合層内のエネルギー・フラックス評価誤差の影響は、浅い混合層ほど大きい。このような散逸率評価誤差もばらつき要因になりうる。

2. 連行速度比 E の見積り

Kato and Phillips (1969) が実験的に求めた連行速度比 E は、混合層底部の浸食速度 w_t と摩擦速度 u_* の比で表される。すなわち

$$E = w_t / u_* \dots\dots\dots (8)$$

混合層の深化が進行している時の混合層ベースの深化速度（浸食速度）はMLDの時系列から直接もとめることが可能である。この速度比 E には、フラックスのような高次の物理量が含まれないので、A よりは妥当な評価が期待できる。この場合も、A の見積りの際に用いた条件が適用されることは言うまでもない。このようにして、観測データから決定した E と次式で定義されるバルク・リチャードソン数の関係を見る。

$$R_{i*} = \Delta\rho gh / \rho u_*^2 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\Delta\rho$ は混合層底部での上下の層の密度差で、混合層厚を $\delta\alpha = 0.05$ で決定したことを考慮して、 $\Delta\rho = 0.05 \times 10^{-3}$ (g/cm³) に固定する。

この一連の評価結果は Table 2 にしめす。決定された E は Table の最右欄に、また、バルク・リチャードソン数は R_{i*} の欄に示してある。Fig. 4 は、この評価結果を R_{i*} の関数としてプロットしたもので、 $R_{i*} = 10 \sim 300$ の範囲に図示された細長い矩形は Kato and Phillips (1969) の実験データ領域を示したものである。ここで決定した E の点の上限は、ほぼ、Kato and Phillips (1969) の延長上に並んで

Table 2. Measured quantities and estimated bulk Richardson number R_{i*} , entrainment rate E.

TIM	W	MEPS	MT	MLD	WT	R_{i*}	E = w_t / u_*
48	2.5	0.000556	29.2498	6.71	0.304537	0.7014184	3.145244
69	3.2	0.002931	29.1511	15.19	0.088148	0.9691532	0.711241
72	3.8	0.000666	29.0296	24.71	0.337407	1.1179952	2.292581
78	3.9	0.000241	28.9528	71.28	0.074167	3.0617766	0.491022
90	4.5	0.000328	29.0962	6.39	0.101574	0.2061628	0.582806
93	3.4	0.000963	29.0732	17.36	0.211574	0.9811292	1.60671
99	2.1	0.000774	28.9624	35.27	0.122593	5.2251818	1.507303
111	3.9	0.002882	29.0468	5.55	0.280833	0.2383959	1.859251
117	4	0.000203	29.1862	7.59	0.056759	0.3099252	0.366378
120	3.6	0.000824	29.1698	13.72	0.023704	0.6916459	0.17001
123	2.8	0.001252	29.1513	16.28	0.297685	1.3566638	2.745066
150	2.8	0.001268	29.2853	14.95	0.031019	1.2458307	0.286038
165	2.2	0.002105	29.6996	6.11	0.109259	0.8247658	1.282298
174	4.8	0.004273	29.3633	8.86	0.061759	0.2512383	0.33221
186	4.8	0.002762	29.5608	13.1	0.033889	0.3714697	0.182294

E(Ri*) with Kato & Phillips(1969)

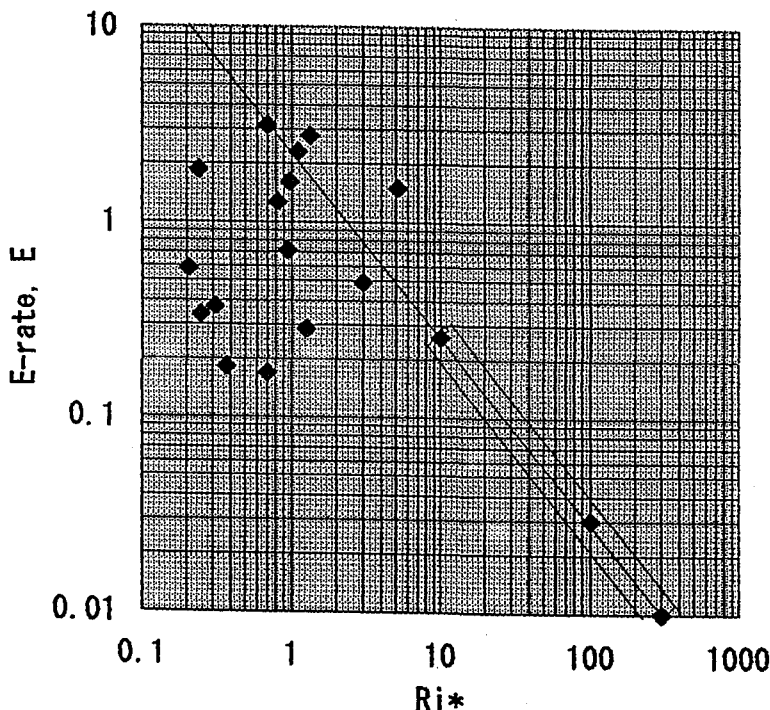


Fig. 4. Estimated entrainment rate E plotted as a function of bulk Richardson number Ri^* . Thin rectangular shows the experimental data points area of Kato and Phillips(1969) and the solid line shows the extension of the experimental results.

いるが、やはり、 $Ri^* < 1$ での点のばらつきがみられる。直線からのはずれの大きな点は殆どMLDが15m以浅のものに限られていることも、Aの評価の際の傾向と一致している。このことは、浅い混合層での深化速度の見積りに原因があると考えざるを得ない。15m以深の混合層に関するEは、ほぼ Ri^{*-1} の線上にあることから、Kato and Phillips (1969) の関係、 $E \propto Ri^{*-1}$ は外洋でも成り立っているようにみえるが、こうした推定値のばらつきの要因について以下に考察してみる。

V. A, E の評価結果の考察

前述のAおよびEの評価結果のばらつきの特徴は、浅い混合層で

- (1) Aが異常に大きい
- (2) Eが低めの値

ということである。こうした傾向が現れる要因を検討するために、A, Eの評価式に立ち戻ってみる。

(7) 式から

$$A \propto (G^* - D^*) / w_t \dots\dots\dots (10)$$

であり、また、(8) 式でみるとおりEは

$$E = w_i/u_*$$

であるから、この両者を比較すると、傾向 (1), (2) が同時に起こるのは w_i が過小評価になっている時である。一方、Aの見積りのみが過大な場合は、(10) の分子が過大に評価された場合しかない。このケースで、 u_* が過大に評価された場合は傾向 (1), (2) と同様になりうるが、しかし、この場合は浅い混合層で評価誤差が現れる理由が考えにくい。従って、残る可能性としては、散逸率項 D^* の過小評価のみとなる。

Fig. 5 は 7 日間の全プロファイルについて混合層平均散逸率と MLD の関係をみたもので、図中の点線は勾配 -1 を表し、実線は左下側の浅い混合層の点 5 点を除くデータ点の傾向をしめしたものである。明らかに、大部分の点は勾配 -1 の傾向を示しているが、MLD が 8 m 以浅で平均散逸率の低下がみられる。このデータには表層加熱時のデータが含まれているので、表層加熱時の浅い混合層では、当然散逸率が低下してもおかしくない。そこで、この中から、エントレイメント生起中のデータのみを選び出して、同様なプロットをした結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 の点は、A, E の評価に用いたものと同一であるが、浅い混合層での散逸率の低下はわずか 3 点しかない。A の評価にみられる $A > 8$ の 5 点の過大評価の理由を説明するには不足である。そのうえ、確かに、浅い混合層での散逸率の過小評価の可能性はあるが、この値を一桁引き上げて評価したとしても、 D^* に比べ G^* は圧倒的に大きいので、A の評価改善につながる可能性は極めて低い。そこで、残る w_i の過小評価を検討してみる。

エントレイメント生起中のデータについて、 w_i と MLD の関係をプロットした結果を Fig. 7 に示す。左下のグループ 8 点は、明らかに浅い混合層で w_i が低下している。エントレイメント生起中は、浅い混合層ほど乱流エネルギーの集中が大きいのので、エントレイメント速度は大きくなる筈である。図中の実線は、左下の点のグループを除いた点についてみられる w_i と MLD の傾向を示したもので、

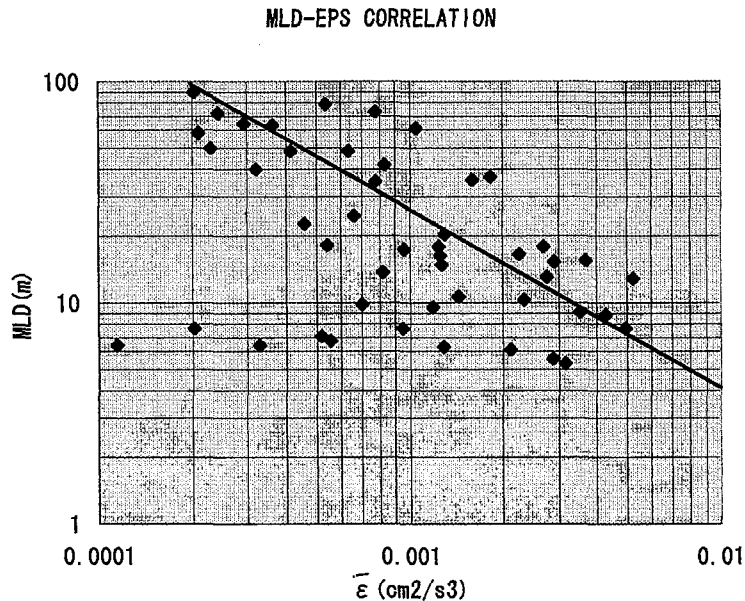


Fig. 5. Scatter plott of averaged dissipation rate vs MLD for whole profiles. Solid line shows the tendency of the points except those with the MLD shallower than 8m.

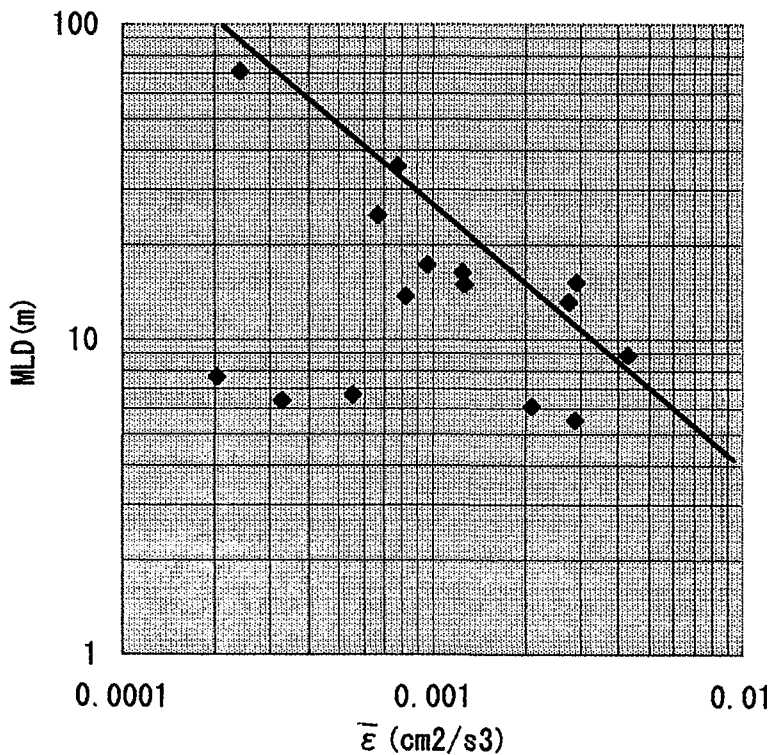


Fig. 6. Scatter plott of averaged dissipation rate vs MLD for entraining profiles. Solid line is the same in Fig. 5.

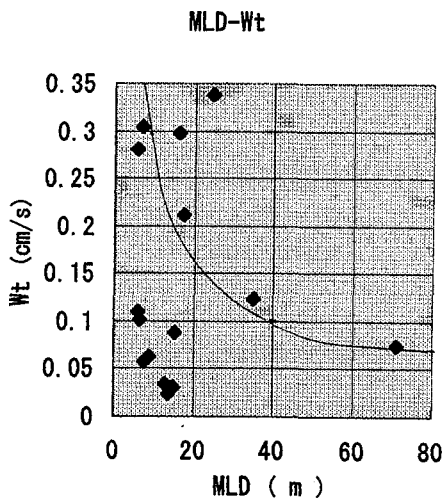


Fig. 7. Assumed w_t as a function of MLD (solid line). Seven points in the groupe left below belong to the MLD shallower than 15m. Only one point belongs deeper MLD.

$$w_t = (3.143/MLD) + 0.0357 \dots\dots\dots (11)$$

で表される曲線である。この曲線から大きくはずれた左下の点について、はたしてこの点がAの過大評価につながっているかどうかを検証するために、これらの点の w_t を曲線与えられる位置まで引き上げてA及びEを再評価してみた。その結果をTable 3およびFig. 8, Fig. 9に示す。ただし、左下のグループ8点の内1点は15 m以浅の混合層に対応していないので、再評価からは除いてある。Fig. 8およびFig. 9から明らかにAの過大評価並びにEの過小評価傾向が劇的に改善され、浅い混合層のE値がKato & Phillips (1969) の延長線により一層近づいていいるのがわかる。この結果は、浅い混合層での w_t の見積りに問題があったという結論に導く。しかしながら、Aは1以下の値に修正されたとは言え、以然としてばらつきが大きく、また、Eの値も1を超えた部分がある。これは、エントレインメントの生起条件でセレクトしたデータとは言え、対流混合による混合層の深化の影響を完全に排除し得

Table 3. Revised estimate of the entrainment coefficient A_* and the entrainment rate E_* corrected with an assumed w_{t*} .

TIME (hr)	MLD (m)	W_t (cm/s)	A	E	Correction		Corrected	
					W_{t*}	W_{t*}/W_t	A_*	E_*
48	6.71	0.3045	0.453	3.145	0.38	1.248	0.363	3.925
90	6.39	0.1015	8.32	0.583	0.39	3.842	2.166	2.239
117	7.59	0.056	8.8	0.366	0.38	6.786	1.296	2.484
120	13.72	0.023	8.5	0.17	0.225	9.783	0.869	1.663
150	14.95	0.031	2.802	0.286	0.21	6.774	0.414	1.937
174	8.86	0.0618	11.97	0.3322	0.37	5.987	1.999	1.989
186	13.1	0.0339	14.76	0.1823	0.24	7.08	2.085	1.293

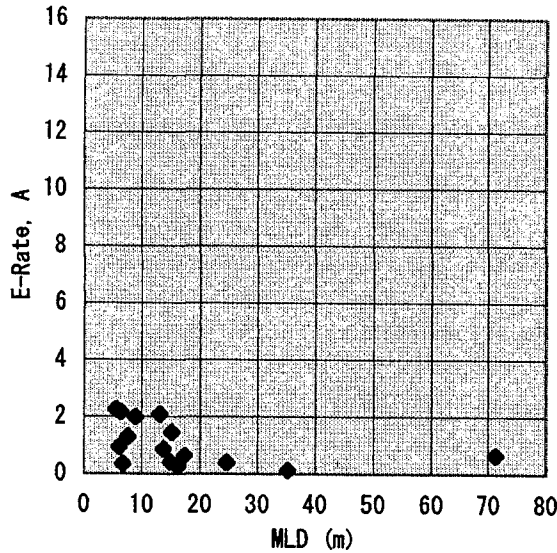


Fig. 8. Revised estimate of the entrainment coefficient A.

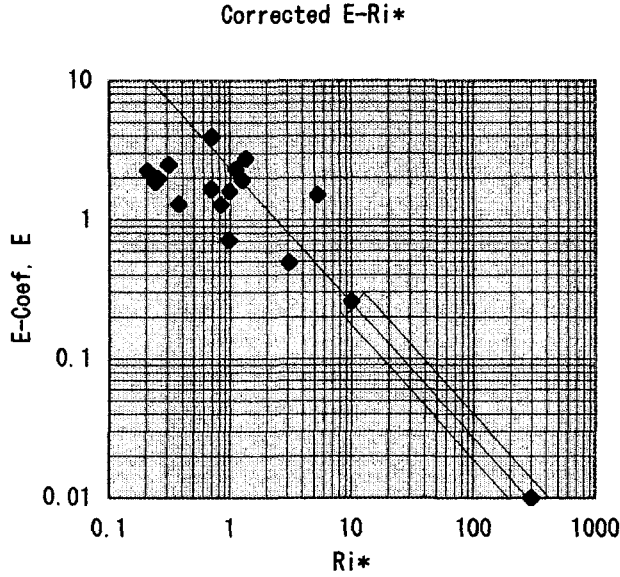


Fig. 9. Revised estimate of the entrainment rate E. The solid rectangular and solid line are the same in Fig. 4.

ていないことによるものと考えられる。

VI. エネルギー収支式からみたAとEの関係

移流や内部砕波による混合がなければ、混合層底部での浮力フラックスは混合層に与えられた風の仕事と散逸の差と釣り合う。この関係は (7) 式を単に書き換えるだけで次のように得られる。

$$\Delta\rho gh w_t A / \rho = u_*^3 - h\varepsilon \tag{12}$$

一方、Eの定義式

$$E = w_t / u_*$$

及び (9) を組み合わせることにより、

$$E = 1/R_{i*} \{1 - R_{i*}^2 u_* h \varepsilon / (gh)^2\} / A \tag{13}$$

が導かれる。観測ならびに室内実験の結果によるE-R_{i*}の経験的關係は

$$E = 2.5/R_{i*} \tag{14}$$

と表せるので、次の条件

$$R_{i*}^2 u_* h \varepsilon / (gh)^2 \ll 1 \tag{15}$$

が成り立てば、直ちに、A=0.4に帰着する。条件 (15) を (9) 式で書き直してみると、

$$(\Delta\rho/\rho)^2 (h\varepsilon/u_*^3) \ll 1 \tag{16}$$

に他ならず、この条件は u_* が0に限りなく近い場合を除いて、外洋ではほぼ常に成り立っていると考えて良い。

以上の考察により、Kato and Phillips (1969) の実験による R_{i*} の範囲をより小さい領域まで拡張しても(14)の関係が成り立ち、その結果、極めて実験室に近い条件下という制約の元で $A=0.4$ が得られることになる。

VII. ま と め

TOGA COAREのデータに基づいて、西太平洋赤道域の混合層底部のエントレインメント係数 A およびエントレインメント比 E を評価し、従来の室内実験結果との比較を行った。その結果以下のような結論に達した。

1. A , E いづれの評価も浅い混合層で特有のばらつきを示す。従来の結果は $A=0.4$ とされているのに対し、浅い混合層では1以上の値となった。対応する E は、Kato and Phillips (1969) から予想される値よりも低めであった。
2. 赤道遺域の海洋混合層底部のバルク・リチャードソン数は、Kato and Phillips (1969) の実験のレンジよりも小さい領域にある。
3. 浅い混合層での A の過大評価 (E の過小評価) はエントレインメント速度の過小評価が原因であった。
4. エントレインメント速度とMLDの逆比例関係は A , E の評価改善に対して調和的である。
5. 改善された E の評価結果は、Kato and Phillips (1969) によって与えられた $E=2.5/R_{i*}$ の関係が、室内実験のみならず外洋でも成り立つことを示している。
6. 乱流エネルギー収支式にもとづいて A と E の関係を定式化した。その結果、 $(\Delta\rho/\rho)^2 h \varepsilon / u_*^3 \ll 1$ の条件が成り立てば、 $E=1(R_{i*}A)$ の関係が成立し、 $A=0.4$ が帰結される。この条件は、海洋では多くの場合満たされてはいるが、対流混合が卓越する場合には適用できないことに注意すべきである。

参考文献

- Li T. Y., 1971. Maintenance of Thermocline in a Stratified Lake. Proc. 14th Conf. Great Lake Res., 582–592.
- Kanari S., C. Kobayashi and H. Otake, 1995. Estimates of Turbulent Flux and Heat Budget in the Upper Layer of the Western Equatorial Pacific Ocean. Journal of the Meteorological Society of Japan, 73, 2B, 597–609.
- Kato H. and M. Phillips, 1969. On the Penetration of a Turbulent Layer into Stratified Fluid. Journal of Fluid Mechanics, 37, 4, 643–655.
- Krauss E. B. and J. S. Turner, 1967. A One Dimensional Model of the Seasonal Thermocline, II. Tellus, 19(1), 98–105.