



Title	本州南方海域混合層のdiurnal cycleとtrapping depth
Author(s)	金成, 誠一; KANARI, Sei-ichi; 小林, 智加志 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 51, 55-61
Issue Date	1988-09-30
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.51.55
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14196
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_p55-61.pdf



本州南方海域混合層のdiurnal cycleとtrapping depth

金成 誠一・小林智加志

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和63年6月20日受理)

Variation of Trapping Depth due to Diurnal Cycle of Mixed Layer in the South Western Area off Honshu.

Sei-ichi KANARI and Chikashi KOBAYASHI

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received June 20, 1988)

A series of hourly temperature profiles are taken at the site of TANGO (29° N, 135° E) in December of 1987 (The Hakuho-maru cruise of KH-87-5), using the digital recording XBT system.

Faint temperature rises due to diurnal heating are recognized in the exaggerated temperature profiles of the nearly constant mixed layer-like profiles.

The trapping depth D_T estimated from the diurnal cycle heat anomaly shows nearly constant of about 40m during the daytime, and it rapidly increases towards the seasonal thermocline depth of about 100m in the evening.

The change of the trapping depth follows well with the scaling presented by Price et al. (1986).

I. は じ め に

海洋表層混合層の中心的な問題は風による混合と海面のヒーティングの競合効果によって、表層にインプットされた熱がどのような形でトラップされ、またどのような過程によって混合層外に輸送されるかということに尽きる。Diurnal cycleの中では、適当な風の場合では、混合層内にとり込まれた熱は比較的すみやかに下方に拡散され、トラップされた熱による混合層の昇温はきわめて小さい。しかし、無風に近い状態では、混合層のごく表層にトラップされた熱による昇温は2~3℃に達するという報告もある (Halpern and Ree, 1976)。こうした局所的高温域が大気-海洋間のエネルギー交換に大きな影響を与えることは疑い得ない。

混合層の diurnal な熱サイクルの解明のために R/P フリップを用いた長期の観測が Price et al., (1986) によって行われ、カリフォルニア沖の混合層の diurnal cycle の特性が調べられている。Price らの観測によると、太平洋東部の 4～5 月期の混合層の diurnal cycle における水温振幅は、僅かに 0.3°C 以内で、サイクルに伴う混合層の厚さは、せいぜい 40 m ほどでありであるという。Price らは、diurnal cycle で形成される混合層を trapping depth によって定義し、混合層に対す

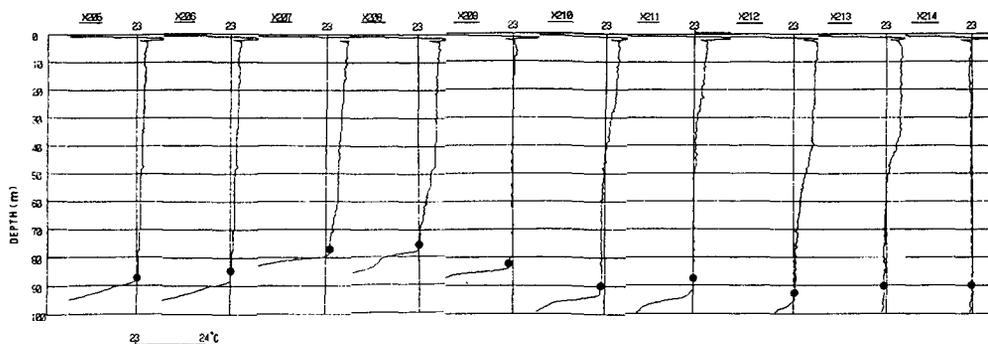


Fig. 1. Exaggerated hourly temperature profiles with the offset of about 1°C .

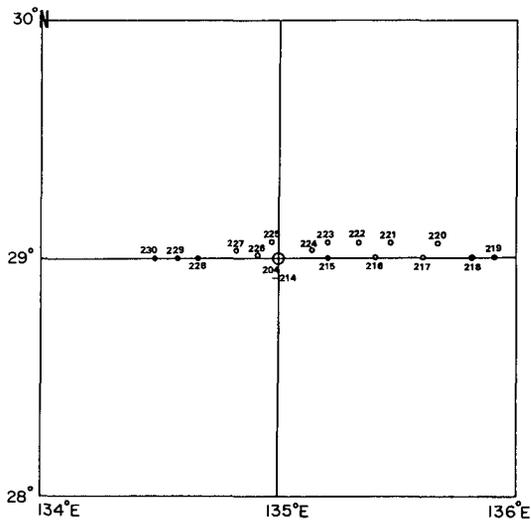


Fig. 2. Location map of the XBT casts. The profiles show in Fig. 1 are taken at the fixed site of 29°N , 135°E .

る従来のスケーリング (Turner, 1973) とは違ったスケーリングを提案している。

本論文で示すように、昭和 62 年 12 月に白鳳丸によって行われた XBT 観測データから、diurnal cycle の trapping depth に対する Price のスケーリングが、この海域でも良く成り立つことを支持する結果が得られた。

II. 観測データ

昭和 62 年 12 月に行われた KH-87-5 の航海で、12 月 7 日 12 時から 12 月 11 日 0 時まで、1 時間毎に XBT 投入観測が本州南方定点 (29°N , 135°E) の近傍で行われた。この観測期間に、船は 29°N 線を 135°E を中心に東西に $\pm 1^{\circ}\text{E}$ の間を移動し、定点 (29°N ,

135°E) における固定点の観測とみなせるデータは XBT 投入番号 X 214 までの約 10 個のデータ (Fig. 1) のみである。それ以外のデータは、明らかに異水塊の影響と思われるプロファイルを示し、本論文の解析には不適当と思われるので解析の対象から除外した。Fig. 1 のプロファイルは海面から 120 m 層までの XBT プロファイルの水温軸 (横軸) を拡大したもので、X21A の右側の 23,

24 の数字の間が約1.5°Cの中を示す。Fig. 2は XBT の投入番号に対応する観測点位置を示したものであるが、以下の解析では、12月8日8時 (No.205) から12月8日17時 (No.214) までの10個の毎正時データが使われる。

Fig. 1に示した XBT データには70 m~120 mの間に顕著なサーモクラインが見られ、その鉛直位置は時間と共に大きく変動している。しかし、この変化は表層の風や日射とは直接関係しているようには見えず、このサーモクラインを密度境界とする内部波の影響と考えられる。この顕著なサーモクラインと海面の間の、一見混合層と思われる領域に、僅かな水温躍層が横軸拡大によってやっと見出しされるが、これが diurnal cycling に基づく水温躍層である。定点観測期間 (12月7日12時から11日0時まで) の諸気象要素の時系列を Fig. 3に示すが、この中MLD(混合層深度)は diurnal cycle に基づく躍層深ではなく、70 m~120 mで見られる顕著なサーモクラインの深度を示したものである。明らかに、このサーモクライン深度の変動は日射量Sおよび風の応力 τ とは明瞭な相関が見られない。

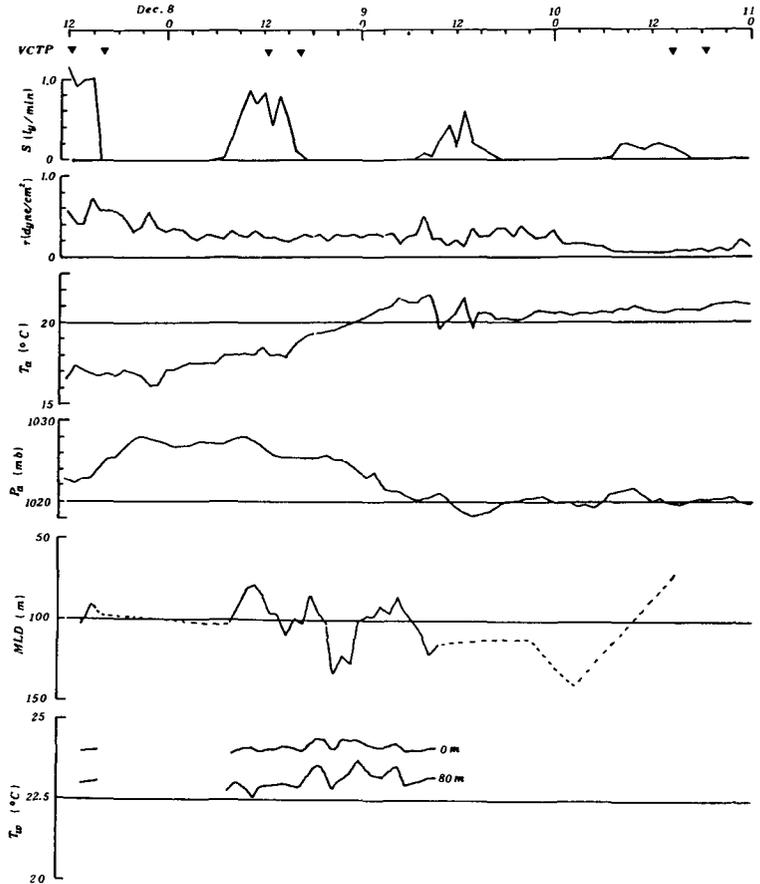


Fig. 3. Weather and thermal conditions during the XBT casts. Upper to lower panel ; solar radiation S (ly/min), wind stress τ (dyne/cm²), air temperature T_a (°C), atmospheric pressure P_a (mb), mixed layer depth MLD (m), water temperature T_a (°C) at the surface and 80 m layers.

III. diurnal cycle の温度変化

前節で述べたように、顕著な温度躍層の深度変化は、内部波の影響を大きく受けていると考えられるので、こうした内部波の影響を除く目的で、躍層頂部 (Fig. 1のプロファイル中の丸印) を基準として、それより浅い部分の水温プロファイル $T'(z, t)$ を次式で定義する。

$$T'(z, t) = T(z, t) - T(z_r, t) \quad (1)$$

ここに、 $T(z, t)$ は元の水温プロファイル、 $T(z_r, t)$ は、基準深度 z_r における水温を示す。 $T'(z, t)$ は diurnal cycle によって生じた水温変化と考えられるから、この diurnal cycle に直接関係する heat content anomaly は

$$HCA = \int_{z_r}^{z_s} T'(z, t) dz \quad (2)$$

で与えられる。ここに z_s は海面を表すが、海面そのものの水温と海面直下の水温は、海面の表皮効果のために一般に等しくない。ここでは、特殊な表皮水温と表面水温の混同を避けるために、海面下 5 m の水温を表面水温 (SST) と定義する。故に z_s は 5 m にとる。

Fig. 4 は横軸に表面水温、縦軸に HCA をとったときの diurnal cycle に基づく HCA の変化を時間をパラメーターとしてプロットしたものである。1 日の HCA の軌跡はひとつの閉ループからなる履歴曲線をたどると考えられているが、Fig. 4 では、12 時の局所的な温度低下のために、部分的に二重閉ループとなっている。この閉ループの平均勾配は次式で与えられ、Price et al. (1986) は、これを trapping depth, D_T と名付けている。

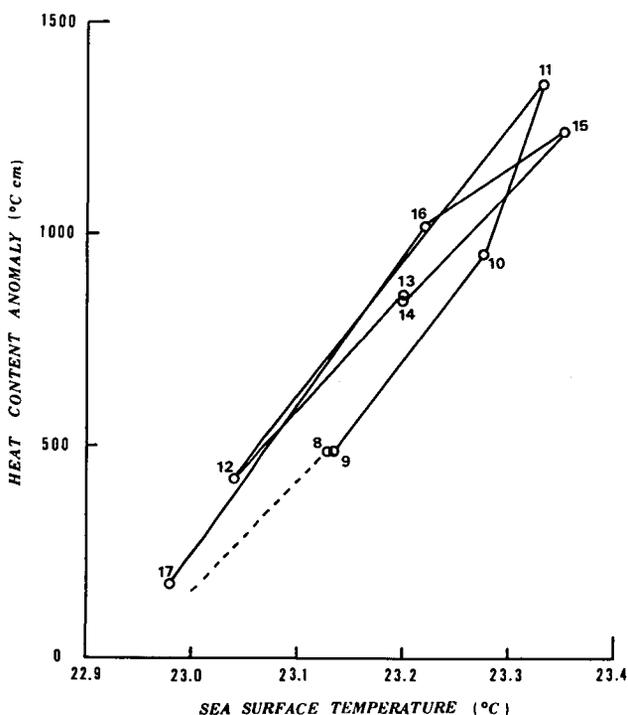


Fig. 4. The closed loop of the diurnal heat content anomaly HCT. The numeral the local time (in hour).

$$D_T = \frac{1}{T'_s} \int_{z_r}^{z_s} T'(z, t) dz = \frac{HCA}{T'_s} \quad (3)$$

ここに T'_s は表面水温アンノマリーである。Fig. 4 の最大表面水温のアンノマリー -0.4°C に対する平均勾配は 32.5 m で、これが diurnal cycle におけるこの海域の代表的な trapping depth を表している。即ち、diurnal cycle によって形成される混合層は高々 40 m 程度であり、XBT プロファイルに顕著にみられシャープな水温躍層の変動は必ずしも daily heating や cooling と直接結び付

くものではないことを示している。

IV. Trapping depth のスケーリング

Price らは diurnal cycle に伴う混合は基本的に shear flow instability に支配されており、この主要な役割を果たす shear flow は基本的には海面の風によるエクマン流と考えている。しかし、エクマン過程との基本的なちがいは、風による混合が shear flow instability を軽減する方向に働くこと、及び、比較的定常な風の応力に基づく momentum が、heat flux と同じ D_T の深さ内に trap され、そのために混合層内に diurnal jet が形成され、この構造はエクマン・スパイラルとはかなり構造が異なるということである。一旦、表層に形成された jet は慣性流として時間と共にベクトルの向きを変え、これと表層に新たに形成されるエクマン流との合成により diurnal cycle 特有の shear flow が形成され、これが trapping depth の形成に再度フィードバックされる。このような考えに基づいて、Price らは次のような trapping depth, D_T のスケーリングを与えている。

$$D_T \sim \frac{\tau}{Q^{1/2}} \cdot \frac{P_\tau}{P_Q^{1/2}} \left(-\frac{c}{ag}\right)^{1/3} \quad (4)$$

ここに、 τ は風の応力振幅、 Q は海面を通る熱フラックス、 P_τ 及び P_Q はそれぞれ流れの加速及び加熱に関するタイムスケールで、ここでは P_τ に慣性周期、 P_Q に 12 時間をとる。また、 g は重力の加速度、 c 及び α はそれぞれ海水の比熱、熱膨張率である。今、 P_τ 、 P_Q 、 c 及び α などが一定であると考え、trapping は風の応力 τ と heat flux Q によって

$$D_T \sim \frac{\tau}{Q^{1/2}} \quad (5)$$

のように表される。これが、Turner (1973) によって与えられている trapping depth のスケーリング、即ち

$$D_T \sim \frac{\tau^{3/2}}{Q} \quad (6)$$

と根本的に異なる点である。

V. D_T スケーリングの係数

Price らによって与えられた trapping depth の式(4)は無次元の係数によって等式化できる。この係数を C_1 とすると(4)式は

$$D_T = C_1 \frac{\tau}{Q^{1/2}} \cdot \frac{P_\tau}{P_Q^{1/2}} \left(-\frac{c}{ag}\right)^{1/3} \quad (7)$$

となる。

観測海域に対して、 $P_\tau/P_Q^{1/2} \sim 240$ 、 $(c/ag)^{1/3} \sim 2$ (in c. g. s) となるが、実測の短波放射データ及び風のデータから τ/\sqrt{Q} を計算し、 C_1 を求めると $C_1=0.087$ を得る。

Fig. 5 の(a)は対象とする期間の短波放射 (ly/min) 及び風速 (m/s) を, また Fig. 5 (b)及び(c)はそれぞれ表面水温 (°C) 及び HCA を示してある. Fig. 5 (d)の白丸と実線は水温データから(3)式に基づいて計算した trapping depth を示す. 一方, Fig. 5 (d)の黒丸は風速と短波放射データを用い

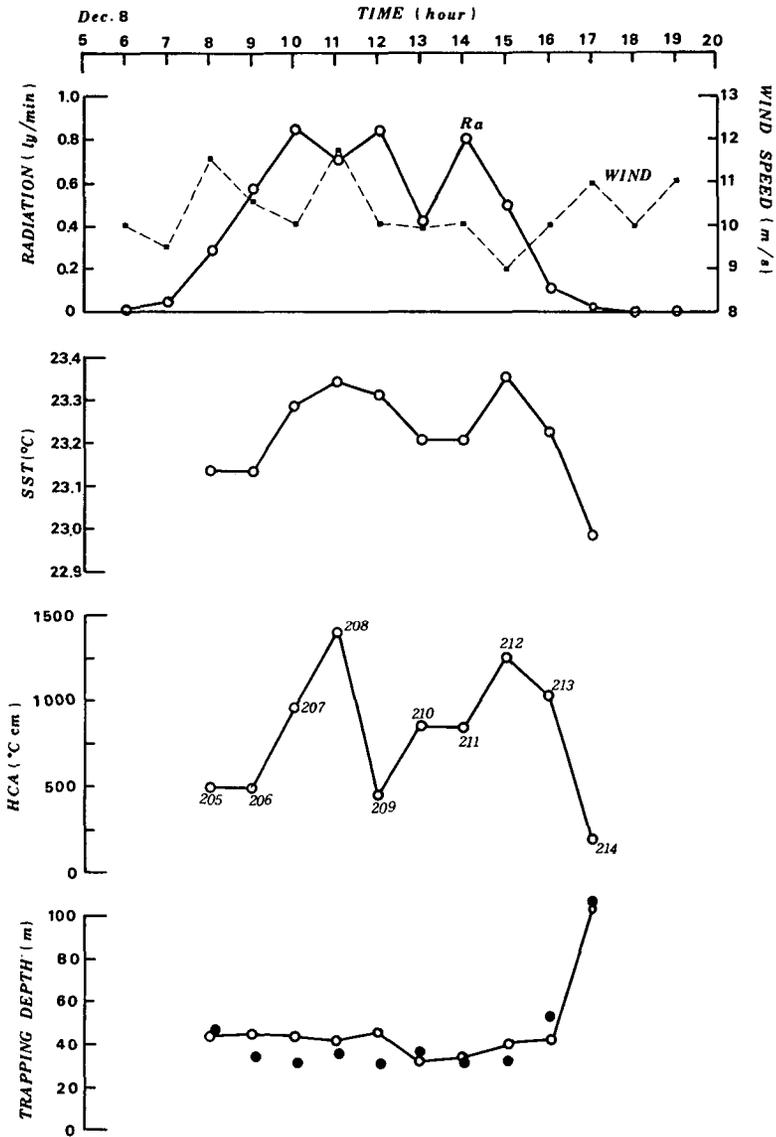


Fig. 5. The estimated trapping depth D_T (m), compared with the equation(7) calculated using the measured wind and short wave solar radiation. (a);solar radiation (solid line with circles) and wind velocity (broken line); (b); surface temperature (SST); (c); heat content anomalies (HCA); (d); trapping depth D_T estimated from SST and HCA (solid line with open circles) and calculated by (7) with $C_i=0.087$ (black circles).

て、(7)式から計算した trapping depth を示す。両者の変化傾向は良く一致していることがわかる。このことは、Price らの diurnal cycle モデルが示すように、表層混合層の下方への heat flux が、風によるエクマン流とその変形としての慣性流の合成に基づく shear flow instability 及び夜層の放射冷却に基づく密度不安定の両者による混合によって支配されていることを示している。ただし、Price et al. (1986) のデータでは、正午すぎから徐々に trapping depth の増大が始まるのに対し、Fig. 5 の結果は 16 時頃まで顕著な trapping depth の変化が見られず、16 時から 17 時にかけて急激に trapping depth の深化が行われている。この違いが、海域の特徴であるのか、または季節的な違いであるのか、今後の検討課題である。

VI. む す び

本州南方定点の初冬期の混合層変動観測が毎正時の XBT 投入観測によって行われたが、この時期の海面からの熱のインプットは加熱期にくらべ著しく小さいために、diurnal cycle によって取り込まれる heating 効果による僅かな昇温は、XBT の生の記録をみただけではややもすると見逃しがちである。本論文では、こうした僅かな diurnal cycle に伴う混合層内の微弱な水温躍層に着目し、これが、Price らの diurnal cycle モデルで良く説明できることを示した。特に、diurnal cycle に於て支配的な trapping depth が、Price らの新しいスケージングにうまく合うことが明らかになり、このモデルが diurnal cycle モデルとして有効であるらしいことが示された。しかし、このモデルの重要な部分を占める diurnal jet の形成及び変遷過程が果してモデルの主張する形で終始するのかどうか、また、trapping depth の変化が、Price らの日変化過程と若干異なることの原因が何かについては今後の研究に待たねばならない。

謝辞 本研究で用いたデータは KH-87-5 の Leg 2 で行われた観測に基づくものである。データの取得にあたっては東京大学海洋研究所白鳳丸の乗組員及び本航海に乗船された多くの研究員、院生の方々にお世話になった。また、日射データは、海洋研究所の乙部氏の好意で使用させていただいたものであることを記し、ここに併せて謝意を表します。

文 献

- Halpern, D., and R. K. Reed, 1976. Heat budget of the upper ocean under light winds. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 972-975.
- Price, J. F., R. A. Wellar, and R. Pinkel, 1986. Diurnal Cycling : Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing. *J. Phys. Oceanogr.*, **91**, 8411-8427.
- Turner, J. S., 1973. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press, New York, 367pp.