

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05554

研究課題名(和文) 自転効果の緯度依存性と加熱の日周変動に注目した潮流海底境界層の乱流特性の研究

研究課題名(英文) A study of turbulence in the tidally-induced bottom boundary layer focusing on the horizontal component of Earth rotation and diurnal sea-surface heating

研究代表者

秋友 和典 (Akitomo, Kazunori)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10222530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：DNSモデル実験を行い、潮流海底境界層の周期平均で見た乱流特性量(厚さ $H_{mix}$ 、拡散係数 $\kappa_{ap}$ )は自転の水平成分 $f_c$ の影響を受け、特に低緯度海域では混合層は厚くなり( $f_c$ がない場合の1.3～2.0倍)、その内部では強い混合が引き起こされる(1.7～2.8倍)ことを明らかにした。このような混合強化は乱流運動エネルギーや摩擦速度には現れない特徴であり、特筆すべき成果である。加熱の日周変化は熱の下向き輸送を効率化し、海底境界層の発達を抑制する。潮流の混合効果をパラメタライズするためにはその振幅、周期、コリオリパラメータ $f_s$ だけでなく、 $f_c$ や加熱の日周変化の効果を考慮した慎重な検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

潮流は人の社会活動に深く関わる沿岸海域の主要な流れであり、漁業、環境問題を考える上で最も重要な物理過程の一つである。潮流によって海底付近に形成される乱流境界層は海水を鉛直に混合する重要な役割を果たすが、これまで十分に検討されていない地球自転の水平成分と加熱の日周変化の効果に注目して、その特性を数値モデル実験により初めて明らかにした。本研究の成果は、沿岸海況を正確に予測するためのシミュレーションモデルの開発と精度向上に向けた基盤的知見として重要である。

研究成果の概要(英文)：Turbulent properties of the tidally-induced bottom boundary layer are largely affected by the horizontal component of Earth rotation,  $f_c$ . At low latitudes, specially, the boundary layer is thickened by a factor of 1.3-2.0 on the tidal average, and the apparent diffusivity is enhanced by a factor of 1.7-2.8. It should be noted that such enhancement never appears in the turbulent kinetic energy and friction velocity. Diurnal heating, on the other hand, tends to suppress development of the boundary layer probably because it can cause effective downward heat transport above the boundary layer. These results indicate that  $f_c$  and diurnal heating are taken into account as well as a tidal amplitude and period, and the traditional Coriolis parameter for a more sophisticated parameterization of tidal mixings.

研究分野：海洋物理学

キーワード：潮流 海底境界層 自転ベクトル DNSモデル 加熱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

潮流は沿岸海域の主要な流れであり、その物理環境場を決定づけていることから、これまで多くの研究が行われている (e.g. Simpson and Sharples, 2012)。潮流が本質的な役割を果たす現象として潮汐前線がある。この前線は、海面加熱の下、潮汐混合に起因する海底境界層が海面まで達する混合域と達しない成層域の境に形成される水温(密度、塩分)前線であり(Simpson, 1981)、それを挟む海域では生物生産活動に大きな違いが生じることが知られている。

潮汐前線を含む沿岸海洋モデリングは、近年の計算機資源の増大とネスティングを初めとする計算手法の進歩に伴い、外洋域から沿岸海域までを包括し(坂本ほか, 2013)、また、潮流をその他の駆動源(風や熱塩)と同等に取り扱うことが可能になった(Sakamoto et al., 2013)。その意味で、我々は沿岸物理環境場のより深い理解へ向けた新たな段階を迎えている。しかし、これらの最先端モデルでも乱流混合過程は何らかのパラメタリゼーションに依らざるを得ず、加熱成層期の海面水温の再現性に問題が指摘されるなど(e.g. Holt and James, 2001)、そこには改善すべき点が残っている。なかでも、内海・内湾域で卓越する潮流による乱流混合過程については、その特性を十分理解した上で、乱流パラメタリゼーションの高精度化・最適化が強く望まれるところである。

### 2. 研究の目的

本課題では、乱流を解像する直接数値シミュレーション(DNS)モデルを用いて数値実験を行い、以下の観点からこれまでの研究をさらに発展させる。(a) 水平成分を含めた地球自転効果の緯度変化、および(b)加熱の日周変化に焦点をあて、それらが潮流海底境界層の乱流特性と混合過程に与える影響を明らかにする。また、DNS 実験結果をベンチマークとし、(c)沿岸海洋モデルで用いられている乱流クロージャーマodelの高精度化・最適化をめざす。

(a) と  $f$  の大小関係(緯度)に応じて、潮流海底境界層の性質はストークス層( $|f| \ll \omega$ )とエクマン層( $|f| \gg \omega$ )の間で変化する。また、コリオリ力の水平成分は潮汐周期内の流向変化に伴い乱流強度を変化させることが指摘されている(Salon et al., 2009; Wakata, 2013)。これらの要因は境界層の乱流特性に緯度依存性を生むと考えられる。

(b)加熱の日周変化により、混合と成層の相反する作用が異なる時間周期で働く。このことが境界層の乱流特性や混合過程を変化させると考えられる。

(c)沿岸海洋モデルでは多くの乱流クロージャーマodelが用いられているが(e.g. Umlauf and Burchard, 2005)、経験的に決定すべき幾つかの係数がある。DNS 実験結果を踏まえて潮流海底境界層に対する乱流クロージャーマodelの検証を行うとともに、経験的係数の最適値を推定する。また、クロージャーマodelが適正に機能する鉛直解像度(格子幅)についても検討を加える。

### 3. 研究の方法

(1)Sakamoto and Akitomo (2008, 2009)に倣い、図 1 に示すモデル海において、以下に示す支配方程式を用いた DNS 実験を行った。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}_{\text{tide}} \cdot \nabla) \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{\text{tide}} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p - \frac{\rho}{\rho_0} g \mathbf{k} + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} + \mathbf{u}_{\text{tide}}) \cdot \nabla \rho = \kappa \Delta \rho \quad (3)$$

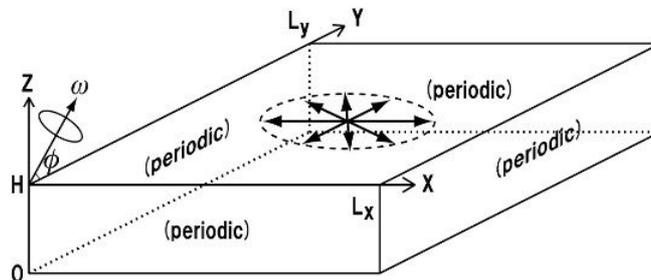


図 1 : モデル海と座標系

式(1)、(2)、(3)はそれぞれ流体の運動方程式、連続の式、密度の移流拡散式である。 $\mathbf{u}_{\text{tide}}$ 、 $\mathbf{u}$  はそれぞれ基本潮流場とそれからのずれ、また  $\rho_0$ 、 $\rho$  は基準海水密度( $10^3 \text{ kgm}^{-3}$ )とそれからのずれ、 $p$  は圧力である。 $(0, \cos, \sin)$  は緯度  $\phi$  における地球の自転ベクトル、 $g$  は重力加速度( $9.8 \text{ ms}^{-2}$ )、 $\nu$ 、 $\kappa$  はそれぞれ粘性、拡散係数である(いずれも  $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ )。  $\mathbf{k}$  はそれぞれ

れ3次元の勾配演算子とラプラシアン演算子をあらわす。実験領域は大きさ  $L_x \times L_y \times H$  の矩形領域であり、層流状態での海底境界層厚  $H_{\text{tide}} = (\nu / |f|)^{1/2}$  を基準として、 $L_x = L_y = 32H_{\text{tide}}$ 、 $H = 256H_{\text{tide}}$  とした。

(2)海面は非粘性のリジッド・リッド、海底は平坦で断熱の粘性壁とした。水平境界は  $x, y$  方向ともに周期境界である。基本潮流場  $u_{\text{tide}}$  は 12 時間周期で変動する圧力勾配力  $-\partial p / \partial x$  によって駆動される振動流であり、潮流楕円の長軸はいずれのケースでも東西方向とした。

(3)  $\phi = 0, 5, 15, 30, 45, 75^\circ \text{N}$  の 6 つの緯度に対して、自転ベクトルの水平成分がある場合と無い場合のそれぞれについて実験を行った(表 1)。ただし、表中の  $U_{\text{tide}}$  は基本潮流の振幅である。実験では、まず自転ベクトルの水平成分の有無が境界層乱流に与える影響を調べたのち、初期成層 ( $N = 2.909 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) を与えた実験を通して海底境界層の厚さの違いを検討する。さらに、日変化する海面加熱を与えた場合の実験を行った。ここでは初期成層を与えた場合を中心として、自転ベクトルの水平成分の有無が境界層乱流に与える影響について記述する。なお、以下では自転ベクトルの水平成分がある場合をケース FC、ない場合をケース NFC と呼ぶ。

表 1：実験パラメータ

	case00	case05	case15	case30	case45	case75
$\phi$ ( $^\circ \text{N}$ )	0	5.21591	14.4775	30	45	75
$f_s$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )	0	0.13222	0.36361	0.72722	1.02845	1.40488
$f_c$ ( $\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )	1.45444	1.44842	1.40825	1.25958	1.02845	0.37644
$\text{Rot} =  \sigma / f_s $	$\infty$	11	4	2	1.4142	1.0352
$\text{Re} = U_{\text{tide}} H_{\text{tide}} / \nu$	2000	2000	2000	2000	2000	6000
$H_{\text{tide}}$ ( $\times 10^{-2} \text{ m}$ )	117.3	123.0	135.4	165.8	216.7	635.3
$U_{\text{tide}}$ ( $\times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ )	17.1	16.3	14.8	12.1	9.2	9.4

$$g = 9.8 \text{ ms}^{-2}, \quad \nu = \kappa = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}, \quad \rho_0 = 10^3 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\sigma = 1.45444 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ (周期12時間)}, \quad N = 2.90888 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \text{ (周期6時間)}$$

解析対象期間：成層を加えてから 30 周期分の最後の 5 周期 (30-35 周期)

#### 4. 研究成果

(1) 図 2 (左) は、北緯 5 度における実験で得られた乱流運動エネルギー TKE の深さ - 時間分布である。ケース FC では Wakata(2013) が指摘するとおり、潮流が西向きときに TKE の大きい領域がケース NFC より高くまで発達し、逆に東向きときはケース NFC より低くなった。このため、周期・領域平均した摩擦速度  $u^*$  は両ケースでほぼ同じであり、乱流運動エネルギー TKE もケース FC で 1 割ほど増加しているにすぎない(表 2)。しかし、興味深いことにケース FC の海底境界層厚  $H_{\text{exp}}$  は 62.3m と、理論値  $H_{\text{turb}}(u^*/f = 39.9\text{m})$  やケース NFC での  $H_{\text{exp}}$  (41.8m) のおよそ 1.5 倍に達している(表 2)。

(2) 同様の違いは

$$\kappa_{\text{ap}} \frac{\partial \bar{p}^{x,y}}{\partial z} = \overline{\rho w}^{x,y} \quad (4)$$

で見積もった見かけの拡散係数  $\kappa_{\text{ap}}$  にも現れている(図 2 右)。ただし、上式で  $(\bar{A}^{x,y})$  は水平平均を表す。ケース FC の西向流時に見られる高い  $\kappa_{\text{ap}}$  の領域は高い TKE の領域が上方に延びることによって生じていることがわかる。この領域はその継続時間も長くなり、潮汐周期の 2 倍の周期をもつ変化が顕著である(Wakata, 2013)。  $H_{\text{exp}}$  内で平均した  $\kappa_{\text{ap}}$  の潮汐周期平均値はケース FC で  $403 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  に達し、ケース NFC の  $144 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  の 2.8 倍に達する。この結果は周期平均的な乱流特性がほぼ同じであっても、自転効果の水平成分に起因する乱流強度の周期内変動が混合過程に大きな影響を及ぼすことを示しており、浅海域での潮汐混合過程を考える上で非常に興味深く重要な結果である。

(3) 他の緯度でも、TKE や  $u^*$  の値はケース FC と NFC でほとんど変わらないが、やはり境界層厚  $H_{\text{exp}}$  はケース FC の方が NFC より大きい。ただし、緯度とともに自転ベクトルの水平成分が小さくなると層厚比(FC/NFC)は徐々に 1 に近づく。一方、 $\kappa_{\text{ap}}$  の緯度に対する依存性は  $H_{\text{exp}}$  と幾分異なる。低緯度では(北緯 15 度まで)、 $\kappa_{\text{ap}}$  の比(FC/NFC)は 1.7~2.8 と比較的大きい値をとるが、北緯 30 度では 1.2 まで下がる。しかし、さらに緯度が上がるとその比は再び 1.7 程度にまで大きくなる。高緯度では  $H_{\text{exp}}$  の FC/NFC 比が減少していることを考えると、この結果は高

緯度での混合強化メカニズムが低緯度とは異なる可能性を示唆している。図3は3つの緯度における TKE と  $\kappa_{ap}$  の 5 周期平均した鉛直分布を示している。北緯 15 度では海底境界層全域にわたって、ケース FC の  $\kappa_{ap}$  が NFC より大きくなっているのに対し、北緯 30 度では両ケースでほぼ同じである。一方、北緯 45 度では再び  $\kappa_{ap}$  の強化がほぼ境界層全域で見られる。北緯 30 度の TKE はケース FC と NFC でほぼ同じ値を取っているのに対し(差は 3% : 表 2)、北緯 45 度ではケース FC で高くなっている(18%)。

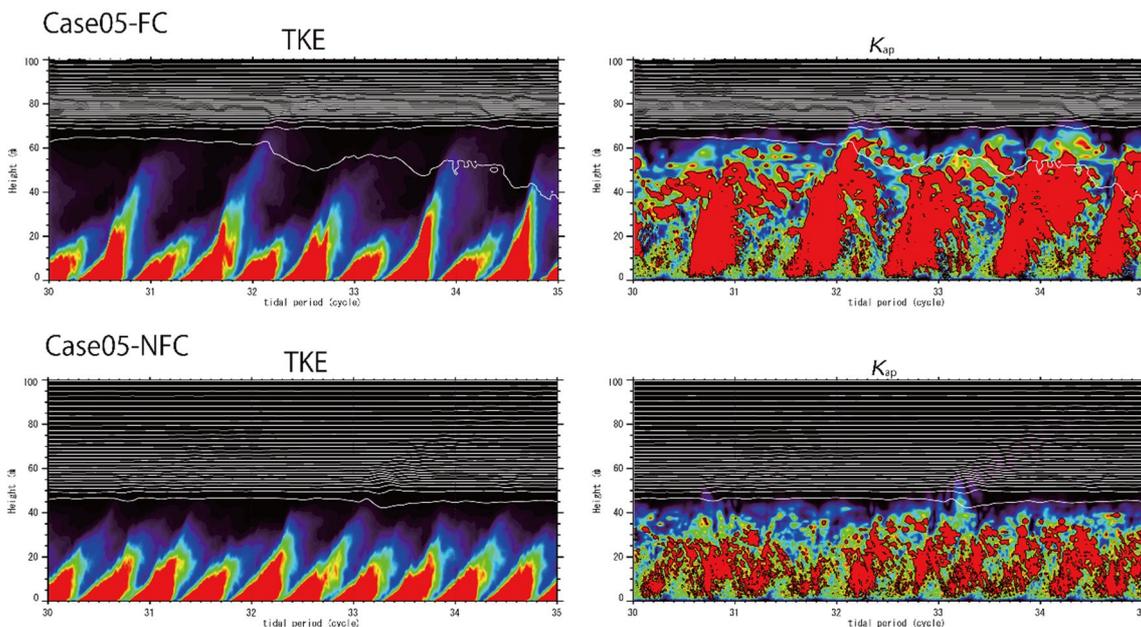


図 2 : 北緯 5 度でのケース FC と NFC の比較  
(左)乱流運動エネルギー-TKE、(右)見かけの拡散係数 $\kappa_{ap}$ の鉛直分布の時間変動。いずれも暖色領域で高く、寒色領域で低い。白線は等密度線。

表 2 : 乱流特性量のケース間比較

		case00	case05	case15	case30	case45	case75	
TKE ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ )	FC	4.786	5.089	3.941	2.577	1.908	2.633	*全域平均
	NFC	5.268	4.551	3.38	2.496	1.693	2.24	
	比率	0.91	1.12	1.17	1.03	1.13	1.18	
$u^*$ ( $\times 10^{-2} \text{ m/s}$ )	FC	0.515	0.528	0.511	0.461	0.38	0.319	
	NFC	0.545	0.532	0.511	0.46	0.381	0.316	
	比率	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	
$H_{\text{turb}}$ (m)	FC	35.4	39.9	46.8	63.4	89.2	643.7	* $u^*/ \sigma - fs $
	NFC	37.5	40.2	46.8	63.3	89.4	637.6	
	比率	0.94	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	
$H_{\text{exp}}$ (m)	FC	86.4	62.3	53.2	52.4	56.9	114.3	* $\overline{\rho w^{x,y,t}}$ が最大となる高さ
	NFC	44.4	41.8	41.2	46.9	52.9	110	
	比率	1.95	1.49	1.29	1.12	1.08	1.04	
$\kappa_{ap}$ ( $\times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )	FC	228	403	332	125	190	338	* $H_{\text{exp}}$ 内平均
	NFC	131	144	127	109	110	198	
	比率	1.74	2.80	2.61	1.15	1.73	1.71	

(4)中立な初期状態から一様加熱を加える実験を行ったところ、以下のことが明らかになった。基本潮流の流向(位相)に依存してケース FC に現れる乱流特性(強度)の非対称性は加熱下でより強化された。すなわち、基本潮流が西向きの場合の乱流強度はより強まるのに対し、東向きの場合は乱流の発生が転流直前まで遅れる(図4)。乱流が一旦発生すると、その強度は継続的に発生する場合より強まり、またより高くまで及ぶようになった。東向流時に乱流の継続的発生(不安定の解消過程)が抑えられることで、再不安定化時に出現する乱流が強化されるためと考えられる。もともと基本潮流が東向きの場合は乱流が抑えられる傾向にあるが、加熱が加わることで流れが安定化する一方で、その後発生する不安定がより強化されるという非常に興味深

い結果であり、今後その詳細なメカニズムと現実海洋での実在性を検証する必要がある。なお、このような非対称性の強化は低緯度ほど顕著であり、北緯 45 度より高緯度では実験期間内に生じなかった(35 潮汐周期)。

(5)海面加熱に日周変動を入れると、潮流海底境界層は一定加熱の場合以上に海底付近に限定された。加熱の日周変動によって海面付近では強い成層(昼間)と鉛直一様な対流混合層(夜間)が交替して現れ、昼間に表層に蓄えられた熱が夜間の対流混合によって深くまで輸送されることで海底境界層上部の成層が強化されることがその原因と考えられる。ただし、加熱開始から十分に時間が経過すると(1ヶ月程度)、日周変動が持つこの効果は薄れる。海面付近に蓄積される熱が時間とともに増加し、夜間の対流混合層が発達しにくくなるからである。また、対流混合層や潮流海底境界層の厚さが水深に比べて小さい場合にもこの効果は現れにくい。

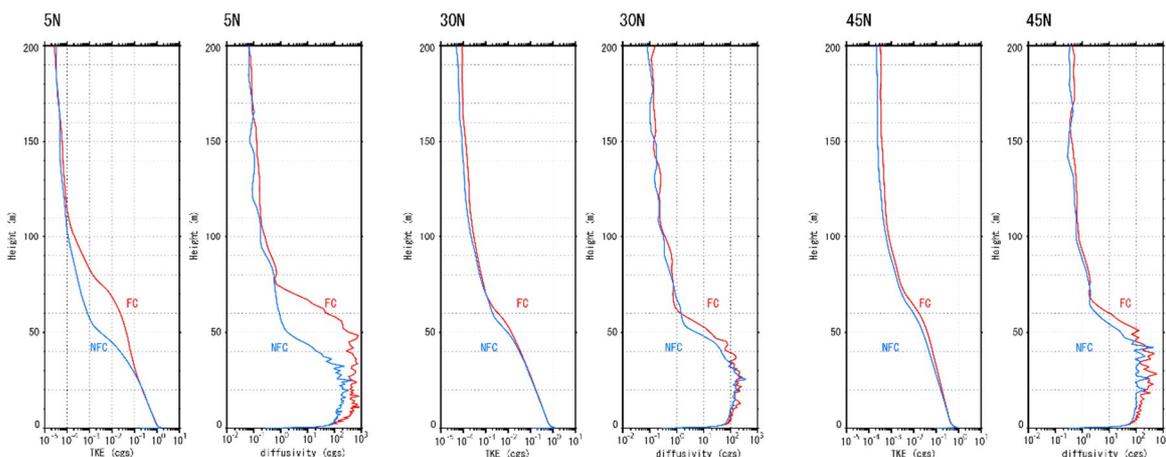


図 3 : TKE と  $\kappa_{ap}$  の鉛直分布の緯度による違い

北緯 5, 30, 45 度での(左)乱流運動エネルギーTKE、(右)見かけの拡散係数  $\kappa_{ap}$  の鉛直分布(5 周期平均)を示している。赤線、青線がそれぞれケース FC、NFC をあらわす。

(6)以上のように、潮流海底境界層の特性量(厚さ  $H_{exp}$ 、拡散係数  $\kappa_{ap}$ )は自転ベクトルの水平成分の影響を大きく受け、特に低緯度海域では混合層は厚くなり(1.3~2.0 倍)、その内部では強い混合が引き起こされる(1.7~2.8 倍)。このことは周期平均量としての乱流運動エネルギーや摩擦速度には現れない特徴である。このため、潮流の混合効果をパラメタライズするためには、その振幅、周期、コリオリパラメータ  $f_s$  だけでなく(これらは地球自転の水平成分を考えない場合に潮汐周期平均での乱流海底境界層の特性を決めるもの)、地球自転の水平成分  $fc$  の効果を含めて考える必要がある。その本質は潮流の位相(流向)によって大きく変化する TKE であり、特に低緯度では自転の水平成分を考慮する場合と考えない場合とで、周期平均で見たときの乱流特性量(境界層厚、拡散係数)に無視できない差が生じることを確認した。同様に周期平均値を変化させることが示唆された加熱の日周変化を含めて、本研究の成果は沿岸海域における潮汐による混合過程のパラメタライゼーションの高精度化へ向けた重要な方向性を示すものと言える。実験結果が自転の水平成分、加熱の日周変化に対して想定以上に多様な様相を呈したこともあり、混合層モデルの高精度化に対する具体的な検討は十分には行えなかったが、系統的かつ稠密な観測が必ずしも容易ではない沿岸海域をとりまく現状において、本研究の成果は重要な基礎データとしても意義深いものである。

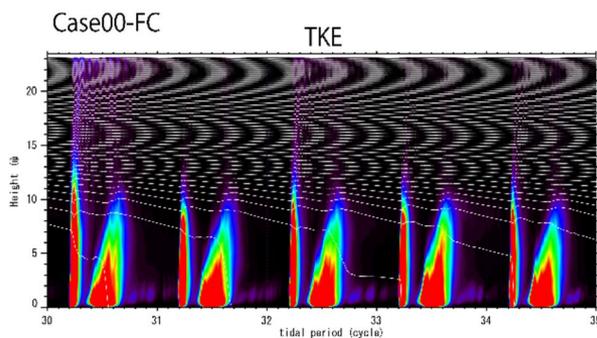


図 4 : ケース FC の乱流運動エネルギーTKE 赤道上で海面加熱率  $25Wm^{-2}$  の場合。他は図 2 と同じ

(引用文献)

Holt and James, JGR, 14015-14034, 2001 Sakamoto et al., Ocean Sci., 9, 1089-1108, 2013 坂本ほか, 測候時報, 80, 特別号,S99-S109, 2013 Sakamoto and Akitomo, JFM 615,1-25, 2008 Salon et al., Environ. Fluid Mech. 9, 525-547, 2009 Simpson,PTRSL Series A, 302, 531-546, 1981 Simpson and Sharples, Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shlef Seas, pp.424, 2012 Umlauf and Burchard, Cont. Shelf Res., 795-827, 2005 Wakata, J Oceanogr., 69, 737-751, 2013.

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 1 件)

秋友和典、田中潔、坂本圭：成層下における潮流海底境界層の特性：自転ベクトルの水平成分の影響. 日本海洋学会秋季大会, 2018年9月250-29日, 東京海洋大学(東京都港区).

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。