

ウェーク島水路を通過する深層循環流の変動

川辺 正樹^{*1} 柳本 大吾^{*1} 北川 庄司^{*1} 黒田 芳史^{*2}

深層循環流は、サモア水路を北向きに通過した後、二本に分岐する。その東側分枝流の構造と変動を調べるため、ウェーク島水路 (18° 20' N) のWK1 (169° 30' E) とWK2 (168° 30' E) に流速計を係留し、1999年2月～2000年2月の流速データを取得した。ウェーク島水路を流れる深層循環流は、北から時計回りに35°の流向をもち、流速は海底直上と5000m深で大きい。流れの厚さは1000mを越えるが、流速の非常に強い部分は海底から数百mに留まる。WK1での流速はWK2よりはるかに大きく、西岸境界流が西側で弱いという特異な分布を示している。これは、WK2の南側にある海山群のせいと考えられる。WK1での深層循環流の平均流速は、海底直上で約10 cm s⁻¹であり、5000m深より3割以上も大きい。また、水路全体で3.7か月周期の変動が卓越し、4000m深ではWK1とWK2でほぼ逆位相である。

キーワード：深層循環流、ウェーク島水路、係留流速計

Variations of the deep circulation current in the Wake Island Passage

Masaki KAWABE^{*3} Daigo YANAGIMOTO^{*3} Shoji KITAGAWA^{*3} Yoshifumi KURODA^{*4}

The deep circulation current (DCC) bifurcates just after passing the Samoan Passage. To examine structure and variations of the eastern branch current, moored current-meter data were obtained from Feb. 1999 to Feb. 2000 at WK1 (169° 30' E) and WK2 (168° 30' E) in the Wake Island Passage (18° 20' N). The DCC in this passage directs to 35° clockwise from the north and has large velocity at near-bottom and 5000-m depth. Thickness of DCC exceeds 1000m, but strong current part is limited to a few or several hundred meters from sea bottom. Velocity at WK1 is much larger than that at WK2, which is curious since the western boundary current is weak on a western side. This is probably due to seamounts just south of WK2. Mean velocity at WK1 is nearly 10 cm s⁻¹ just over sea bottom, which is more than that at 5000-m depth by more than 30%. Variations with 3.7-month periods are dominant in the whole passage and almost out of phase between WK1 and WK2 at 4000-m depth.

Keywords : Deep circulation current, Wake Island Passage, Moored current meters

*1 東京大学海洋研究所

*2 海洋科学技術センター海洋観測研究部

*3 Ocean Research Institute, The University of Tokyo

*4 JAMSTEC, Ocean Research and Observation Department

1. はじめに

海洋深層循環の調査・研究は、これまでに得られた循環像の精密化と定量化を目指して行われており、我々は太平洋の深層循環流について調べている。大西洋北端のグリーンランド周辺海域で形成される北大西洋深層水と主に大西洋南端のウェッデル海でできる南極底層水は、周極流によって南極大陸の周囲を回りながら南極周極水を形成し、その下部の水が南太平洋の深層に流入する。下部南極周極水を運ぶ深層循環流は、ニュージーランド東方、さらにはトンガ・ケルマディック海嶺に沿って北上し、サモア水路(10°S , 170°W)を通過する(Mantyla and Reid, 1983¹⁾; Reid, 1986²⁾)。地衡流計算と水塊分析の結果によると、サモア水路を通過した深層循環流は、深さ4500mほどを境にして2本の流れに分岐する(Johnson and Toole, 1993³⁾; Kawabe and Taira, 1995⁴⁾)。浅い部分はメラネシア海盆に流入して西側分枝流を形成し、深い部分は4500~5000m等深線に沿って北上して東側分枝流を形成し、ウェーク島水路を通過する(Kawabe et al., 2002⁵⁾)。この東側分枝流の流速を測定するために、ウェーク島水路に係留流速計を設置して1年間の測流を行った。ここでは、得られた流速データの解析結果を報告する。

この係留観測は、東京大学海洋研究所海洋物理学部門と海洋科学技術センター海洋観測研究部との共同研究「熱帯太平洋域の中層及び深層循環の構造と変動特性の観測研究」の一部として実施され、係留系の設置は白鳳丸KH-99-1次研究航海で、回収はみらいMR-00-K02次研究航海で行われた。

2. 観測とデータ処理

係留流速計による測流を、ウェーク島水路の2点WK1($18^{\circ}19.9'\text{N}$, $169^{\circ}30.2'\text{E}$; 水深5334m)とWK2($18^{\circ}20.1'\text{N}$, $168^{\circ}29.6'\text{E}$; 水深5158m)で行った(図1)。WK1では2000m, 3000m, 4000m, 5000m, 5300mの深さに、WK2では2020m, 3020m, 4020m, 5020m, 5120mの深さに流速計を設置し、2000m深から5000m深の1000mごとの深さと海底直上の5300m深(WK1)と5120m深(WK2)で流速を測定した。WK1では、流向しか記録できなかった3000m深を除く4つの深度での、1999年2月9日0時~2000年2月19日1時の毎時流速・流向データを取得し、WK2では、作動しなかった2020m深を除く4つの深度での、1999年2月9日5(or 6)時~2000年2月18日18時の毎時データを得た。

これらのデータから明らかなノイズを除去し、磁極と地理極のずれ(磁針偏差)を補正し、潮汐を除去した後、日平均値を計算して解析に用いた。なお、磁針偏差は、米国大気海洋庁 NOAAのNational Geophysical Data Centerが作成した計算システムに緯度・経度・年月日を入力して求めた。潮汐の除去には、主要8分潮を除去するデジタル・フィルターを使い、計測の初めと終わりの期間については25時間移動平均を使ってデータを補足した。ウェーク島水路では、慣性周期は1.6日であり、慣性振動は潮汐除去フィルターでほとんど除かれている。

3. 流速変動特性

ウェーク島水路の東側測点WK1と西側測点WK2での流速変動を図2に示す。両点とも、海底直上と5000m深で流速が大きく、北北東向きの流向が卓越している。4000m深になると流速は大きく減少する。1年間にほぼ3つの山谷をもつ時間変動が4000m以深に共通してみられ、振幅は小さいもののWK2の3000m深にも同様の変動がみられる。流速変動の谷部では、流速はほとんどゼロか、時には南向流に転じている。時間変動の振幅と位相は両点で異なり、振幅はWK1の方がWK2よりも大きい。

流向 10° ごとの頻度と平均流速を図3と図4に示す。両点の海底直上と5000m深では、北から時計回りに測った角度で $25^{\circ}\sim45^{\circ}$ の流向が卓越しており、平均流速もこの流向で大きい。流速は特にWK1で大きく、5000m深で 10cm s^{-1} に近く、海底直上では 10cm s^{-1} を越えている。WK2では、平均流速は 4cm s^{-1} 程度に留まるが、 $25^{\circ}\sim45^{\circ}$ の流向の占める割合はWK1よりも大きい。流向の範囲を $15^{\circ}\sim55^{\circ}$ に広げると、この流向の割合はWK1の2000m深を除いて2割を越え、5000m深と海底直上ではWK1で4割弱、WK2では5割前後に達する。また、全期間の流速ベクトルの平均は、5000m深と海底直上で 35° 前後であり(図5a)、 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$ の中間の角度になっている。

そこで、流向 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$ の流れを深層循環流とみなして特徴を調べる。図6は、この流向をもつ流れの日平均流速のヒストグラムである。WK1では流速の範囲が広く、分布は大略2つのグループで形成され、各グループの広がりは深いほど大きい。すなわち、海底直上では、流速範囲は 21cm s^{-1} まで広がり、 10cm s^{-1} を境にして2つのグループに分かれ、 $14\sim15\text{cm s}^{-1}$ に第一ピーク、 $5\sim6\text{cm s}^{-1}$ に第二ピークが存在する。5000m深では 16cm s^{-1} 以下に範囲が狭まり、第一ピークが $10\sim11\text{cm s}^{-1}$ 、第二ピークが $3\sim4\text{cm s}^{-1}$ になり、さらに4000m深では 9cm s^{-1} 以下に狭まって、第一ピークは $4\sim5\text{cm s}^{-1}$ 、第二ピークは $1\sim2\text{cm s}^{-1}$ と低流速側にずれる。これとは対照的に、WK2ではピークが一つで広がりの小さい流速分布を示す。特に3000m深と4000m深では、 $1\sim2\text{cm s}^{-1}$ をピークに 3cm s^{-1} 以下の低流速に集中しているが、5000m深と海底直上では分布が高流速側に広がり、 $3\sim4\text{cm s}^{-1}$ をピークとする 7cm s^{-1} 以下の分布になっている。これは、深層循環流が両地点の5000m以深を流れ、各地点の海底直上と5000m深でほぼ同じ特徴をもつことを示している。4000m深になると、WK1には深層循環流の特徴をもつ流速の頻度分布が見られるが、WK2には見られない。

4000m深での流速の減少は、全期間および流向 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$ の期間の平均流速ベクトルでも明らかである(図5)。WK1では、海底直上と5000m深での 3.5 , 2.9cm s^{-1} が 0.9cm s^{-1} (全期間), 9.8 , 7.4cm s^{-1} が 3.9cm s^{-1} (流向 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$)に減少し、WK2では 1.9 , 2.0cm s^{-1} が 0.4cm s^{-1} (全期間), 3.1 , 3.3cm s^{-1} が 1.6cm s^{-1} (流向 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$)に減少している。両地点の流向 $15^{\circ}\sim55^{\circ}$ の結果によると、深層循環流の流速は、5000m深から4000m深の間で半減する。また、東側測点WK1の方が流速は大きく、5000m深の流速はWK2の倍以上である。さらに、海底近くの流速は、WK1では海底直上の方

が5000m深より3割以上も大きい、WK2ではほぼ一様で、むしろ5000m深の方が海底直上よりもわずかに大きい。

このように、最も大きな平均流速はWK1の海底直上、次いでWK1の5000m深で測定された。最も低温で高塩、高酸素の水がウエーク島水路の中央部に存在することを考え合わせると(Kawabe et al., 2002⁵⁾)、ウエーク島水路を通る深層循環流がスムーズに流れるのは、中央から東側のようなものである。この特徴は、西側に大きな流速をもつ西岸境界流の性質に反している。おそらく、WK2南方に存在する5000m以浅の海山群が深層の流動を妨げ、その影響でWK2では流れは弱く、5000m以深の流速はほぼ一様で、海底直上の方がむしろ流速小になっているのであろう。海山群の影響を受けないWK1の流速の方が、深層循環流の本来の特徴を表していると思われる。

深層循環流の時間変動を調べるために、流向35°の流速成分の時系列を図7に、パワー・スペクトルとコヒーレンスを図8に示す。流速の時間変動は、流速の大きさと同様の特徴をもっている。すなわち、時間変動もWK1の方が大きく、パワー・スペクトル密度は40日以上長の周期帯ではWK2よりも1オーダーほど大きい。また、WK1での時間変動は、ほとんど全ての周期帯で海底直上の方が5000m深よりも大きい、WK2ではほぼ同じである。4000m深の流速変動は、5000m以深に比べて振幅は小さく、パワー・スペクトルはすべての周期帯で1オーダー近く小さい。また、変動の仕方は正弦曲線に近く、WK1とWK2の相関は3.7か月周期で99%の有意性を持ち、位相はほぼ逆である。つまり、ウエーク島水路の深層循環流は東西に振動し、東側と西側を交互に流れている。この3.7か月周期の変動が、1年間に3つの山谷をとる変動であり、データが1年間しかない、パワー・スペクトルのピークとしては有意でないが、WK1とWK2のコヒーレンスの有意なピークとして表れている。

5000m以深になると、流速の増加が短期間に急激に起こり、正弦曲線からのずれが大きくなる。これは、WK1で明瞭であり、特に海底直上で顕著である。WK2では、4000m深に先駆けて流速が増加し、1999年4月から5月、9月から10月、12月から2000年1月にかけて、4000m深にはない深層循環流が顕著に存在している。3.7か月周期でのWK1とWK2の相関が、5000m以深で4000m深よりも低いのは、このせいと思われる。また、このような流速変動は、流速自体の変動とともに、深層循環流が東側部分では海底から4000m深まで続くが、西側部分では流厚が薄くて4000mまで達しないという構造をとりながら、3.7か月周期で東西に位置を変えることで生じる変動によると考えられる。

流速のピークの間には弱いながらも反流の期間が必ずあり、反流の強さは深さによって大きくは変わらない。1999年11月や2000年2月には、WK1とWK2の両方で反流になっており、深層循環流がウエーク島水路にほとんど存在しないことを示している。これは、深層循環流が一時的に動きを止めたか、ウエーク島水路より西方の通路のみを通ったかのどちらかである。

4. まとめ

1999年2月から2000年2月までの1年間、ウエーク島水路のWK1(東側)とWK2(西側)に係留した流速計のデータを解析し、深層循環流の構造と変動について調べた。ウエーク島水路を流れる深層循環流は、北から時計回りに35°の流向をもち、流速は海底直上と5000m深で大きく、4000m深では減少して平均で5000m深の半分になる。流れの厚さは1000mを越えるが、流速の非常に強い部分は海底から数百mに留まる。

ウエーク島水路の東側測点WK1を流れる深層循環流は、西側測点WK2の流れよりもはるかに強い。ニュージーランド北東域やサモア水路での測流によると、これらの海域の深層循環流は海盆の西端部で最も強くなっており(Whitworth et al., 1999⁶⁾; Rudnick, 1997⁷⁾)、西岸境界流の流速が西側で小さいという特異な例は他にない。これは、WK2の南側にある5000mより浅い一連の海山群が深層の流れを妨げているせいだと考えられる。WK2では5000m深と海底直上で流速がほとんど等しく、むしろ5000m深の方が強いが、これも南側の海山群の影響と思われる。海底地形の影響を受けないWK1では、海底直上の方が5000m深よりも3割以上流速が大きく、これが深層循環流の典型的な構造と考えられる。

ウエーク島水路全体で3.7か月周期の変動が卓越している。周期3.7か月は、ニュージーランド北東域を通過する下部南極周極水の流量変動の約50日周期(Whitworth et al., 1999⁶⁾)やサモア水路を通過する流量変動の30日周期(Rudnick, 1997⁷⁾)に比べて長い。ウエーク島水路では、4000m深の流速がWK1とWK2ではほぼ逆位相であり、WK2の5000m以深では4000m深の流速増大にひと月ほど先駆けて強流が存在している。このことから、ウエーク島水路での3.7か月周期変動の原因の一つは、海底からの厚さが西側で薄く、東側で厚いという構造をもつ深層循環流が3.7か月周期で東西に位置を変えることであると推測できる。

ウエーク島水路の深層流は、WK1とWK2の両方で南向きになることがあり、短期間ではあるが、深層循環流がウエーク島水路を流れないことがある。ニュージーランド北東域での下部南極周極水の流量が、ほとんど無くなることや南向きになることがあり(Whitworth et al., 1999⁶⁾)、サモア水路を通過する流量も大きく減少する期間があるので(Rudnick, 1997⁷⁾)、深層循環流が短期的にほとんど流れなくなることはあるのかも知れない。また、Kawabe et al. (2002)⁵⁾の水塊解析によると、深層循環流はウエーク島水路だけでなく、その西方の東経164度付近の通路も流れている。従って、深層循環流がウエーク島水路をほとんど流れない時でも、東経164度付近の通路を流れている可能性もある。

謝辞

本研究は、東京大学海洋研究所と海洋科学技術センターとの共同研究「熱帯太平洋域の中層及び深層循環の構造と変動特性の観測研究」の一部として実施した。海洋科学技術センター海洋観測研究部の瀧澤隆俊部長、遠藤昌宏前

部長、柏野祐二氏には、共同研究の推進でお世話になった。ここに謝意を表す。

係留系の設置では、白鳳丸KH-99-1次研究航海での田中裕船長はじめ乗組員および乗船研究者の皆様、係留系の回収では、みらいMR-00-K02次研究航海での赤嶺正治船長はじめ乗組員、乗船研究者、(株)マリン・ワーク・ジャパンと(株)グローバル・オーシャン・ディベロプメントの技術者の皆様にたいへんお世話になった。心から感謝申し上げる。

引用文献

- 1) A. W. Mantyla, J. L. Reid, "Abyssal characteristics of the World Ocean waters," *Deep-Sea Res.*, 30, 805-833 (1983).
- 2) J. L. Reid, "On the total geostrophic circulation of the South Pacific Ocean: Flow patterns, tracers and transports," *Progress in Oceanogr.*, 16, 1-61 (1986).
- 3) G. C. Johnson, J. M. Toole, "Flow of deep and bottom waters in the Pacific at 10°N," *Deep-Sea Res.*, 40, 371-394 (1993).

- 4) M. Kawabe, K. Taira, "Flow distribution at 165°E in the Pacific Ocean," in *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific*, H. Sakai and Y. Nozaki, Eds. (Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1995), pp. 629-649.
- 5) M. Kawabe, S. Fujio, D. Yanagimoto, "Deep-water circulation at low latitudes in the western North Pacific," Submitted to *Deep-Sea Res.*, (2002).
- 6) T. Whitworth, B. A. Warren, W. D. Nowlin, S. B. Rutz, R. D. Pillsbury, M. I. Moore, "On the deep western-boundary current in the Southwest Pacific Basin," *Progress in Oceanogr.*, 43, 1-54 (1999).
- 7) D. Rudnick, "Direct velocity measurements in the Samoan Passage," *J. Geophys. Res.*, 102, 3293-3302 (1997).

(原稿受理:2002年7月10日)

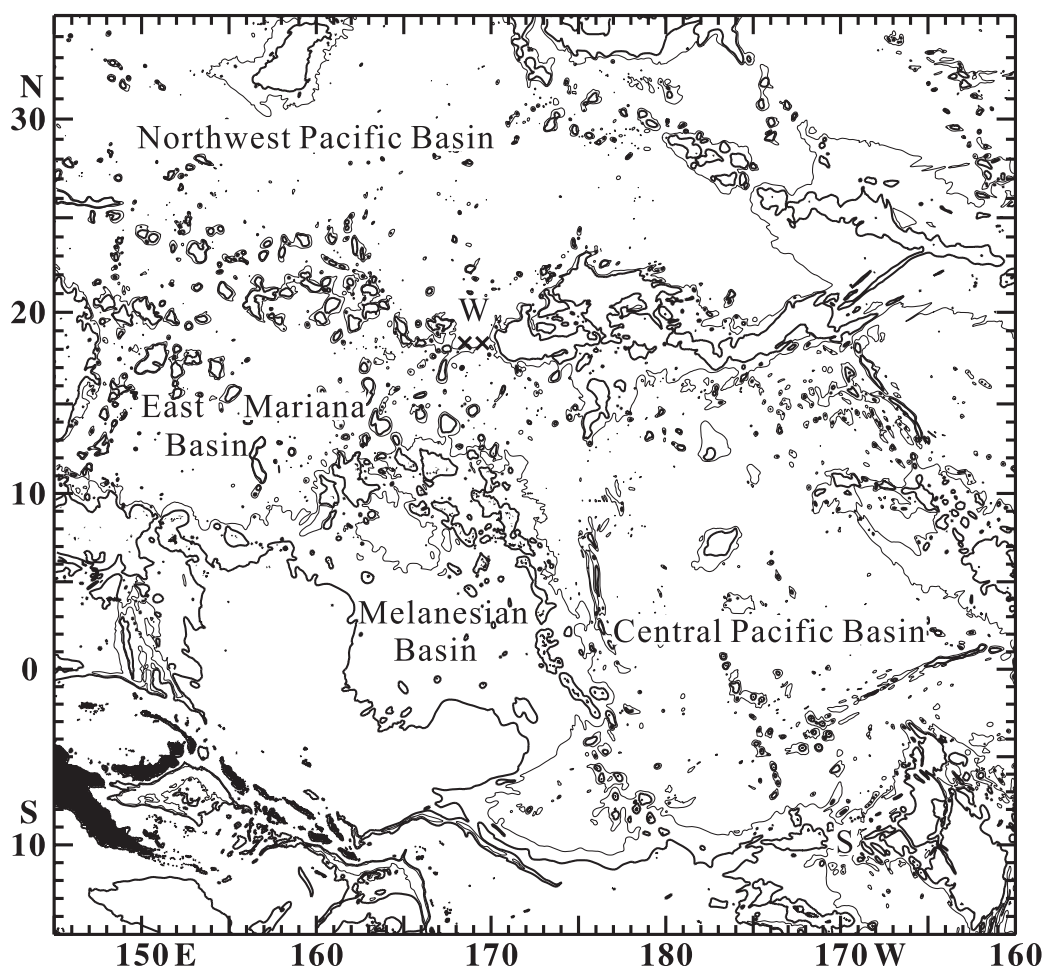


図1 ウェーク島水路の係留系設置点(×)。東側がWK1, 西側がWK2である。図中の"W"はウェーク島水路, "S"はサモア水路, 太線は4000m等深線, 細線は5000m等深線を示す。

Fig. 1 Mooring stations in the Wake Island Passage (×). The eastern mooring is named WK1, and the western one is WK2. The symbol "W" in the figure shows the Wake Island Passage, and "S" is the Samoan Passage. Thick and thin lines show 4000-m and 5000-m isobaths, respectively.

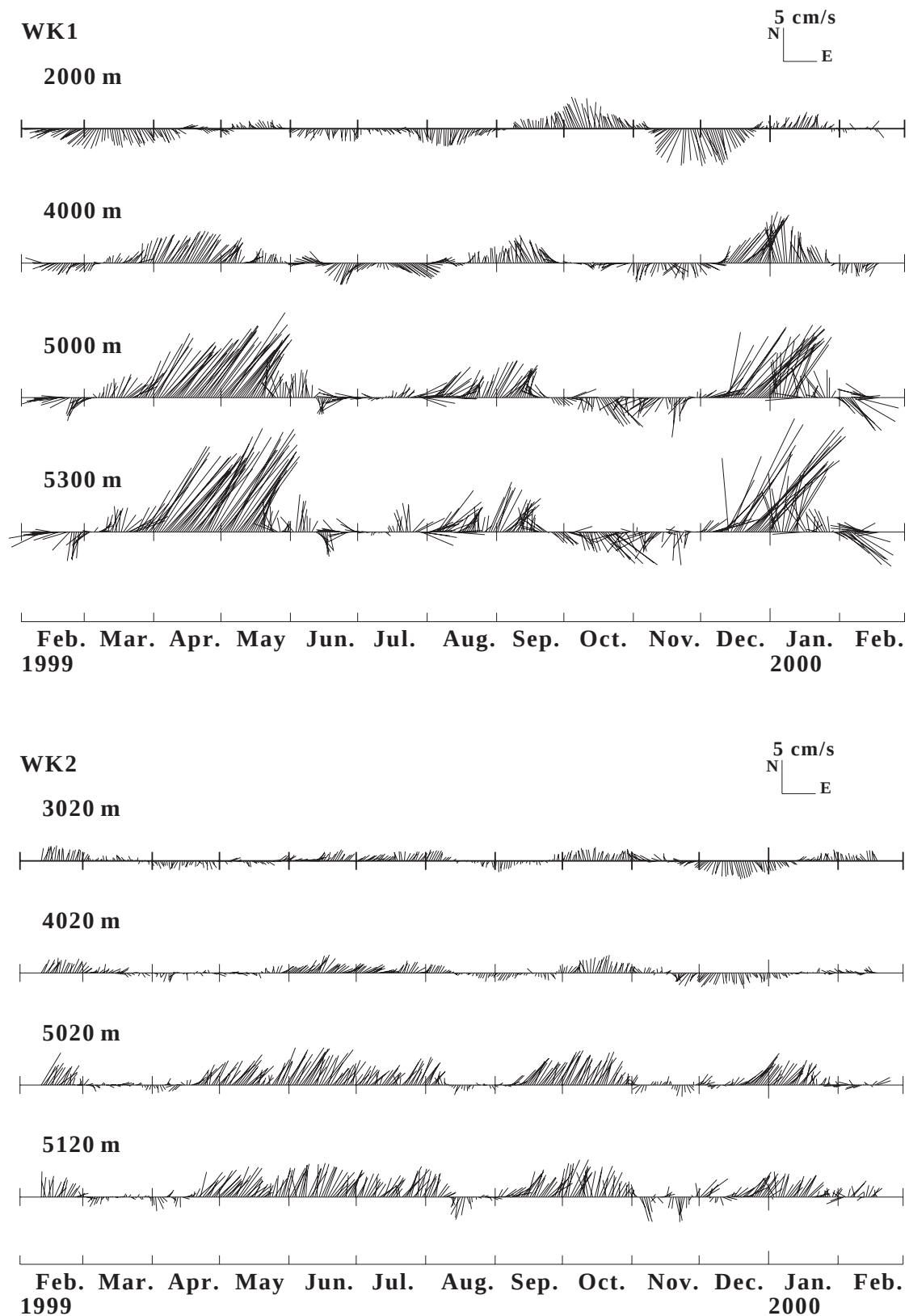


図2 ウェーク島水路の2測点WK1とWK2における1999年2月～2000年2月の日平均流速のスティック・ダイアグラム。

Fig. 2 Stick diagrams of daily mean current vectors from February 1999 to February 2000 at WK1 and WK2 in the Wake Island Passage.

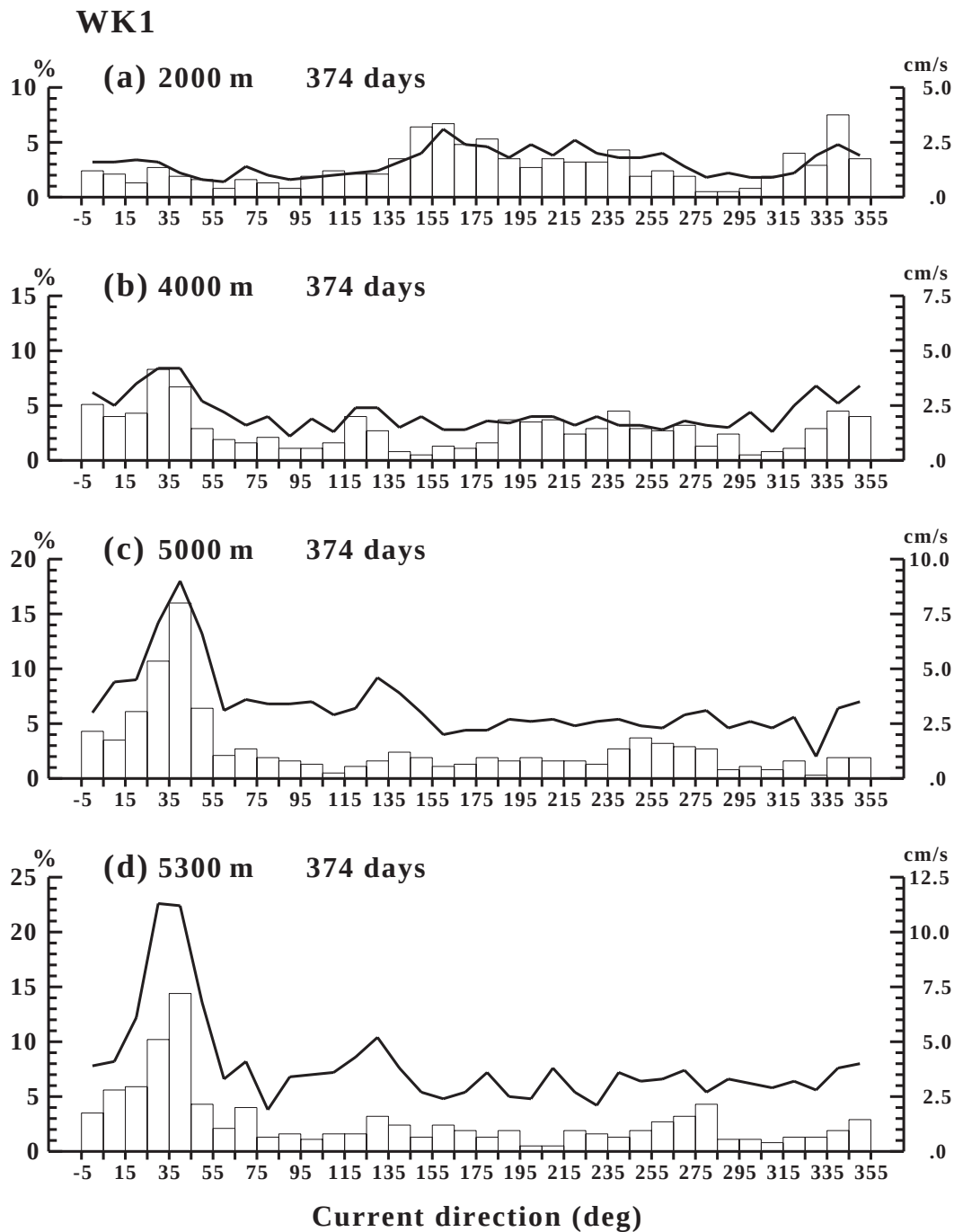


図3 WK1での日平均流速ベクトルの流向のヒストグラムと各流向での平均流速(太線)；
a. 2000m深, b. 4000m深, c. 5000m深, d. 海底直上(5300m深)。

Fig. 3 Histograms of current direction of daily mean current vector at WK1, together with mean velocity in each band of current direction (thick line), at a depth of 2000m (a), 4000m (b), 5000m (c), and 5300m just over sea bottom (d).

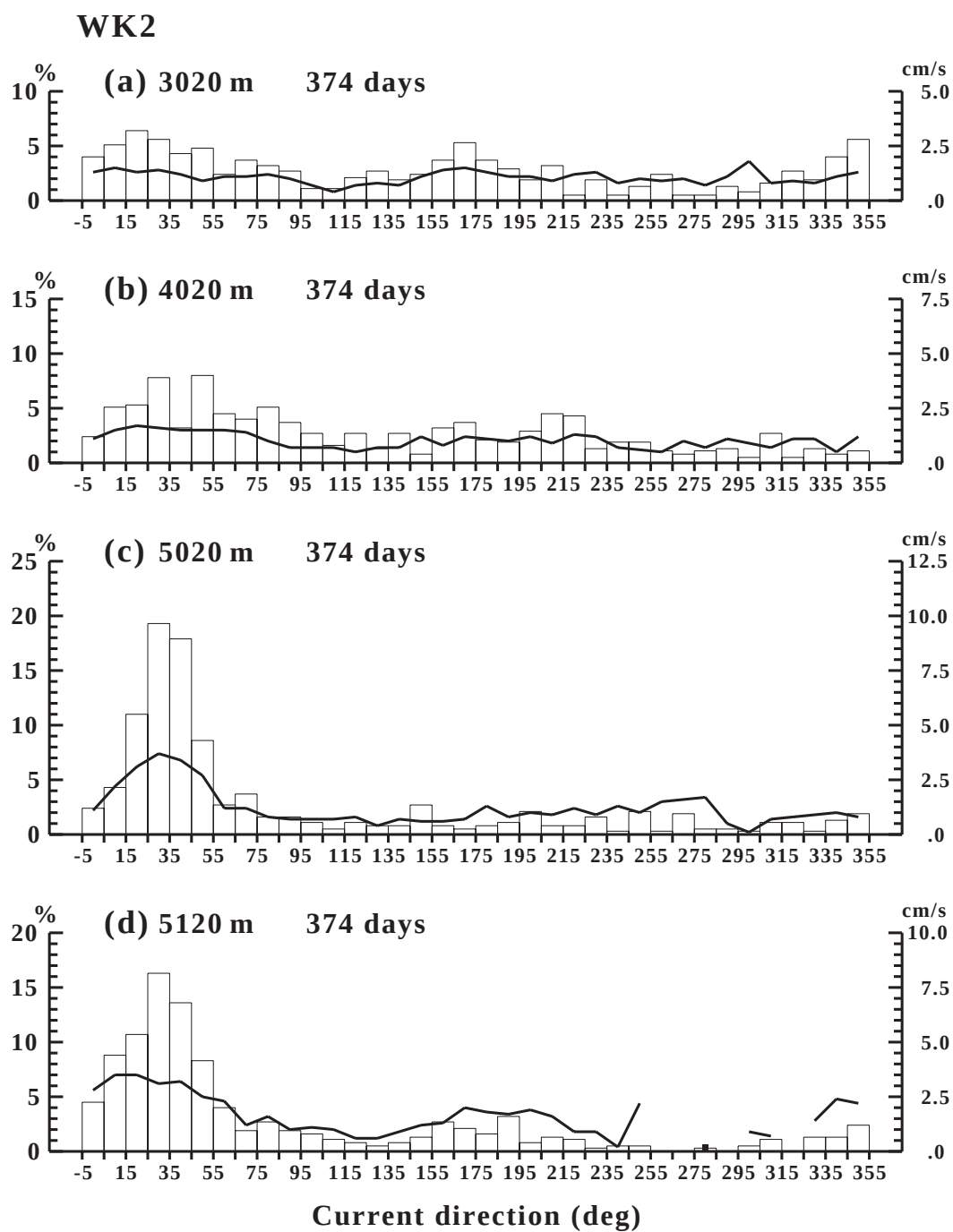


図4 WK2での日平均流速ベクトルの流向のヒストグラムと各流向での平均流速(太線)；
a. 3020m深, b. 4020m深, c. 5020m深, d. 海底直上(5120m深)。

Fig. 4 Histograms of current direction of daily mean current vector at WK2, together with mean velocity in each band of current direction (thick line), at a depth of 3020m (a), 4020m (b), 5020m (c), and 5120m just over sea bottom (d).

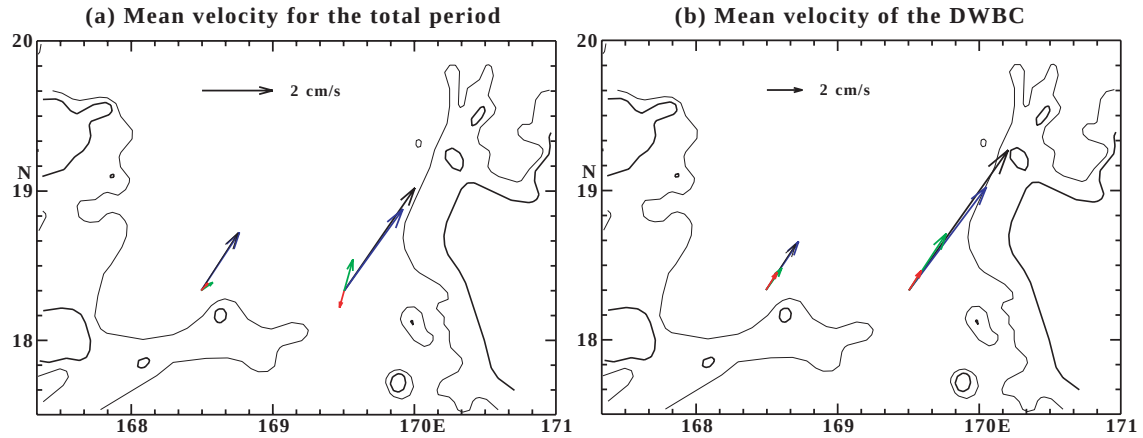


図5 全期間(a)と流向が北から時計回りに測った角度で $15^{\circ} \sim 55^{\circ}$ の期間(b)での平均流速ベクトル; 黒. 海底直上, 青. 5000m深, 緑. 4000m深, 赤. 2000m深(WK1)と3000m深(WK2)。太線は4000m等深線, 細線は5000m等深線を示す。

Fig. 5 Mean current vectors during the total mooring period (a) and the periods of current direction $15^{\circ} \sim 55^{\circ}$ clockwise from the north (b): black, just over sea bottom; blue, 5000-m depth; green, 4000-m depth; red, 2000-m (WK1) and 3000-m (WK2) depths. Thick and thin lines show 4000-m and 5000-m isobaths, respectively.

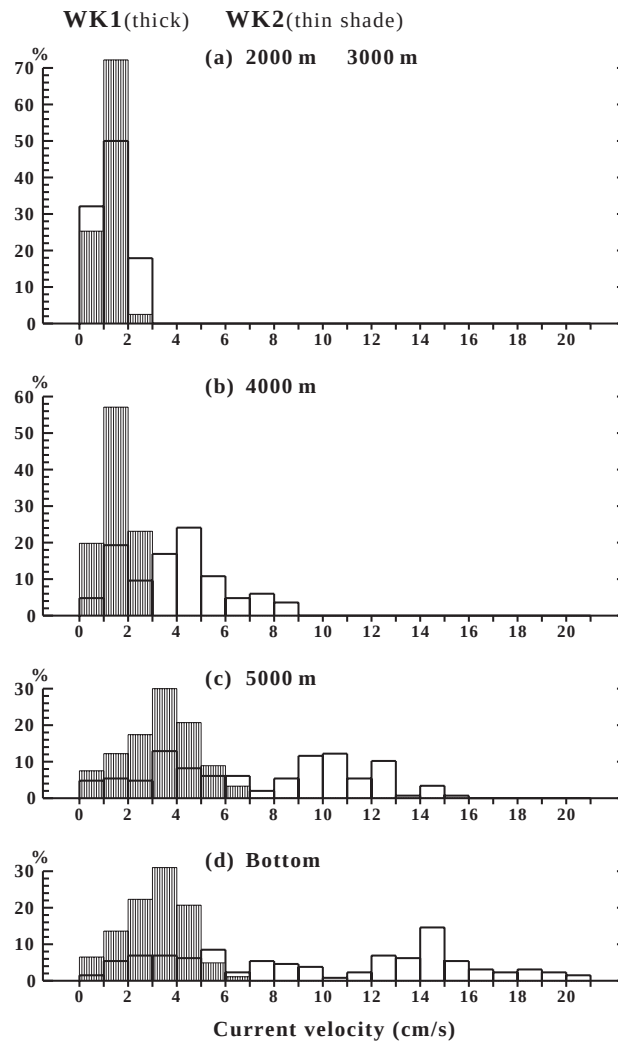


図6 流向が $15^{\circ} \sim 55^{\circ}$ の流速のヒストグラム; a. 2000m深(WK1)と3000m深(WK2), b. 4000m深, c. 5000m深, d. 海底直上。太線がWK1, 陰影付き細線がWK2を表す。

Fig. 6 Histograms of current velocity with current direction $15^{\circ} \sim 55^{\circ}$ clockwise from the north: a. 2000-m (WK1) and 3000-m (WK2) depths, b. 4000-m depth, c. 5000-m depth, d. just over sea bottom. Thick lines are for WK1, and thin lines with shade are for WK2.

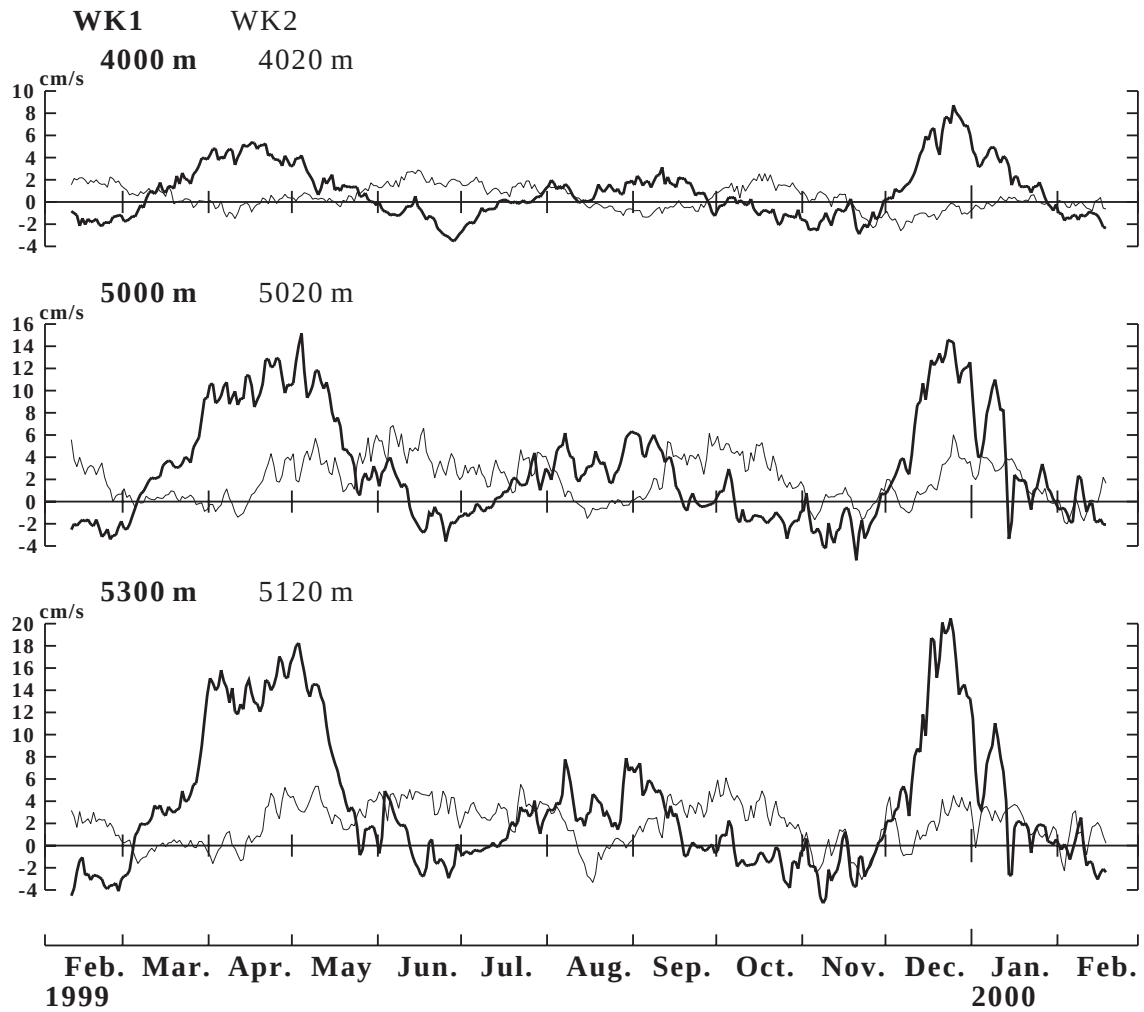


図7 ウェーク島水路のWK1(太線)とWK2(細線)における日平均流速の35°成分(北から時計回りに35°の向きの成分)の時系列。

Fig. 7 Time series of daily mean current velocity with current direction of 35° clockwise from the north (35° component) at WK1 (thick lines) and WK2 (thin lines) in the Wake Island Passage.

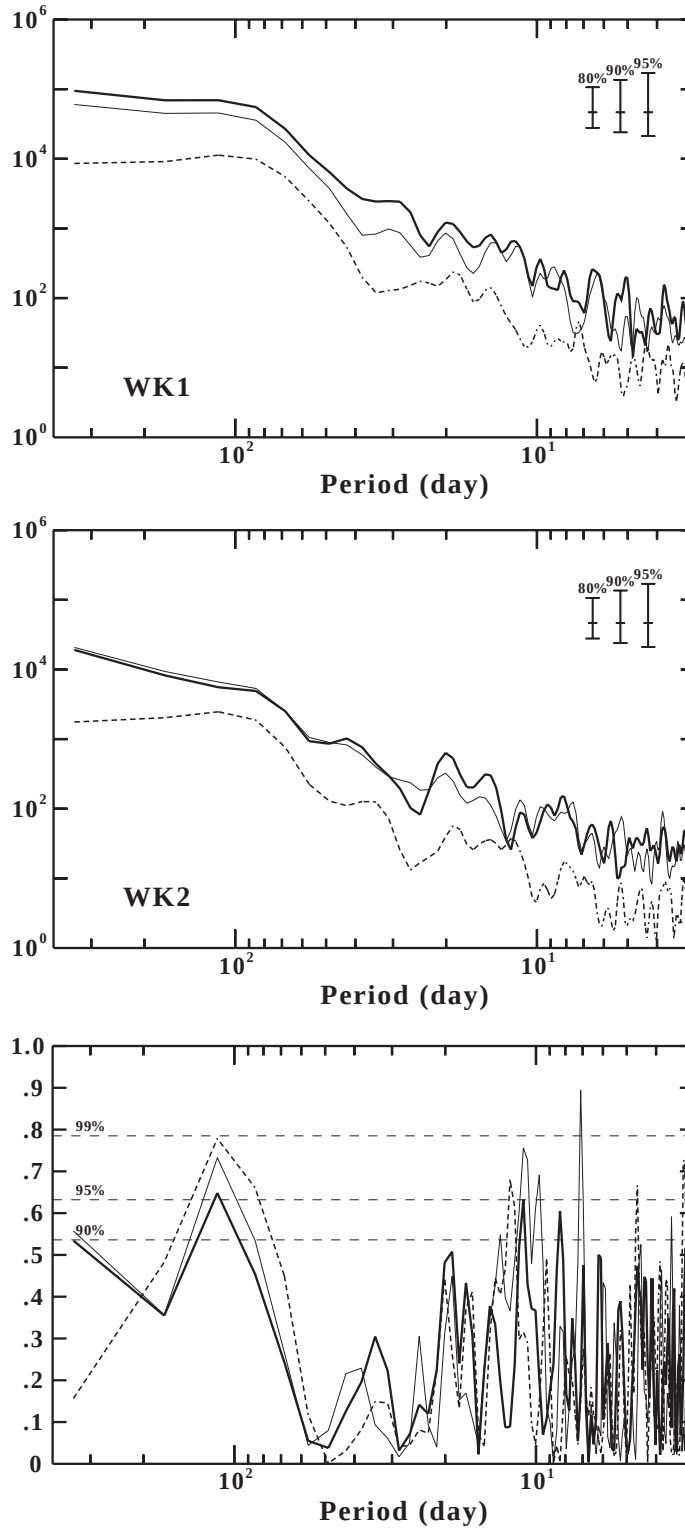


図8 35° 流速成分のパワー・スペクトル ($\text{cm}^2/\text{s}^2/\text{cph}$ (cycle per hour)) とコヒーレンスの2乗。
太線, 細線, 破線は, それぞれ海底直上, 5000m深, 4000m深を表す。
上段: WK1での流速のパワー・スペクトル。中段: WK2での流速のパワー・スペクトル。
下段: WK1とWK2のコヒーレンスの2乗。

Fig. 8 Power spectra ($\text{cm}^2/\text{s}^2/\text{cph}$ (cycle per hour)) and squared coherences of the 35° velocity component just over sea bottom (thick line) and at a depth of 5000 m (thin line) and 4000 m (broken line). Upper: Power spectra at WK1. Middle: Power spectra at WK2. Lower: Squared coherences between WK1 and WK2.