オホーツク海研究の展望

潮流によるクリル列島を通しての海水交換

淡路 敏之
あわじ としゆき
中村 知裕
なかむら ともひろ
畑山 隆紀
はたやま たかのり
秋友 和典
あきとも かずのり

編集部
受理：1996年6月29日
筆者：京都大学大学院理学研究科 助教授
京都大学大学院理学研究科
京都大学大学院理学研究科
京都大学大学院理学研究科 助手

北太平洋の水塊形成に重要な役割を果たしていると考えられるクリル列島（千島列島）を通してのオホーツク海と北太平洋間の海水交換について，潮流の効果に焦点を当て簡単に説明する．

1. はじめに

オホーツク海はアムール川からの多量の淡水の流入と冬季の強い海面冷却のために，北太平洋において最も低緯度で結氷する縁辺海である．これによって特徴づけられた低塩・低温・高酸素のオホーツク海水が北太平洋へ流出して，例えば親潮水や北太平洋中層水の形成に本質的な役割を果たしていることは多くの研究者が指摘しているところである（例えば，Kitani, 1973；大谷，1989；タリーと永田，1991；Talley, 1991；川崎と河野，1992）．その詳細はここでは述べないが，彼らの結果によればオホーツク海水は主にクリル列島中央部のBussol海峡（図1）から流出していると見なされている．一方，オホーツク海水そのものの主な起源は北太平洋である（これまでの水塊分析の結果では，Kruzenshterna海峡などの列島北東部から主に流入するらしい）．従って，北太平洋の水塊構造に大きなインパクトを与えるオホーツク海水の流出過程ならびにオホーツク海水そのものの形成過程を理解するためには，オホーツク海と北太平洋の海水交換がどのような物理過程によって生じているのかを明らかにすることが極めて重要な問題となる．

しかしながらこの問題に関しては，観測の困難性やクリル列島周辺の地形の複雑さなどから，上述したような水理学データに基づく主要な流出入ルートと力学計算に基づくその流量の推定がなされているだけで，ましてや海水交換の物理機構についてはほとんど何も分かっていない．しかしながら，最近実施された米露共同観測（JOINT US-RUSSIAN EXPEDITION）結果の解析から，Riser（1996）はクリル列島を通しての海水交換に，非地衡的なプロセス，とりわけ潮流が重要な役割を果たしていることを指摘した．実際，クリル列島周辺の卓越流は潮流であり，しかもその流速は場

List of Straits and Islands Name

No.	Straits
A:	Kunashiri St.
B:	Etrofu St.
C:	Urup St.
D:	Bussol' St.
E:	Kruzenshterna St.
F:	Chetvertyy St.

No.	Islands
1:	Kunashiri Isl.
2:	Etrofu Isl.
3:	Urup Isl.
4:	Simusir Isl.
5:	Shiashikotan Isl.
6:	Onekotan Isl.
7:	Paramusir Isl.

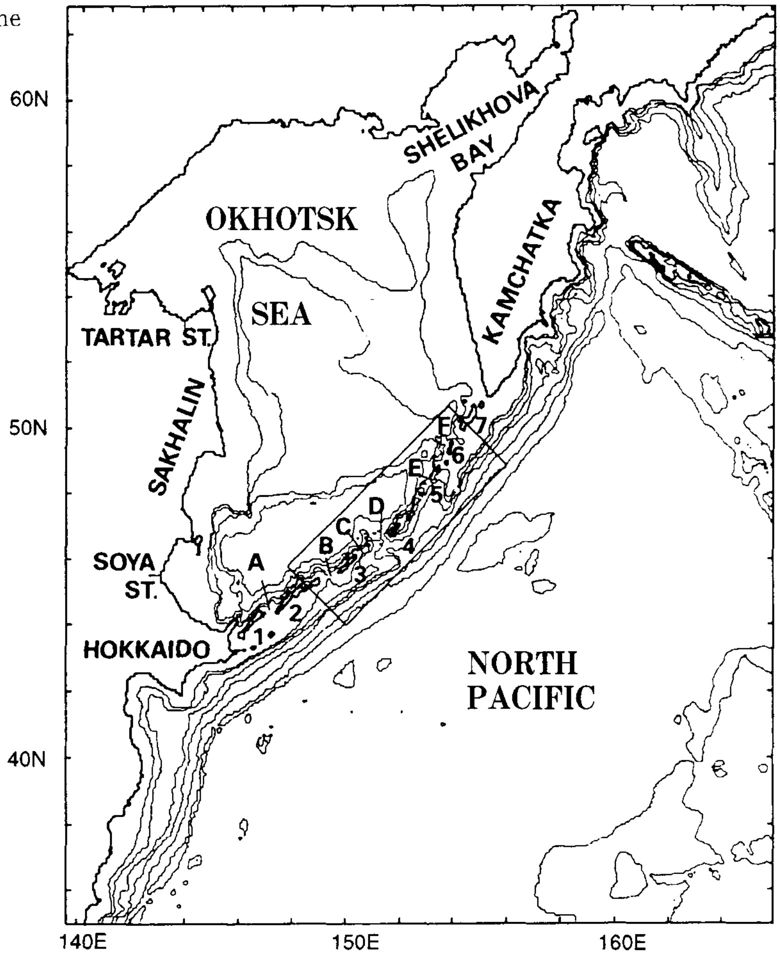

図1　モデル地形.

所によっては数ノットにも達する大きなものであること，そのような場合これまでの海水交換の知見からすると（例えば，Robinson, 1981），たとえ海峡内にシルが存在したとしてもsignificant tidal exchangeが生じ，しかもMoroshkin（1966）が報告した“bi-directionalな時間平均流”（流向が海峡内の両サイドで相反する流れ）による輸送の説明も可能であることから，オホーツク海水と北太平洋水の交換が主として潮流によって起こっている可能性が極めて高いと言える．

オホーツク海の潮汐場については小倉（1933）の先駆的研究以来かなりの知見が得られている状況にあるが，潮流場に関する研究は少なく，その全域の特徴に関して言うと，鈴木と金成（1986）の研究があるだけだといっても過言ではない．彼らの数値シミュレーション研究によって潮流場の基本的な特徴はかなり明らかにされたが，研究の主眼がどちらかといえば潮汐・潮流によるオホーツク海内でのエネルギー逸散に置かれていたため，開境界がクリル列島近傍に設定されており，潮流によるクリル列島を通しての海水交換を調べるのに必要な列島周辺の詳細な流動場の再現性という点からみると問題はなくもない．そこで，ここでは開境界をクリル列島から十分離れた所に設

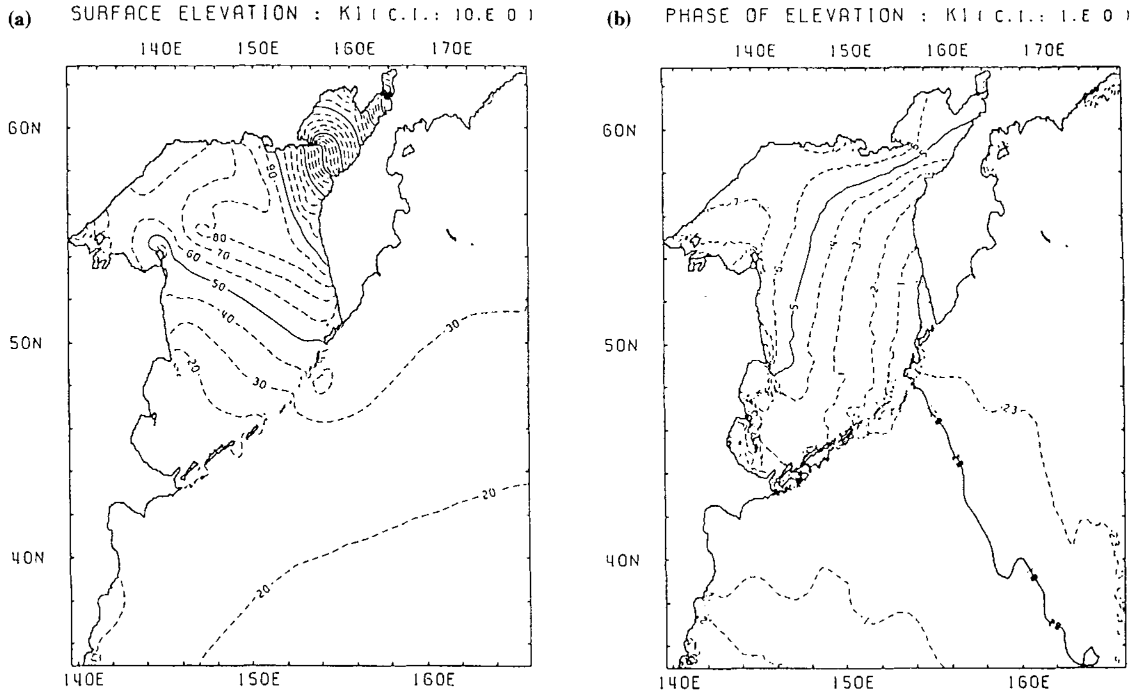

図2　K_1潮位場の (a) 等振幅線 (単位はcm) と (b) 等位相線 (単位は時間) の空間分布．

定（図1）して潮汐・潮流場の数値シミュレーションを行った．

2. モデルと結果

図1にモデル地形を示す．地形の再現にあたっては米国National Geophysical Data CenterのDBDB5地形データを用いた．使用した方程式は順圧非線形の浅水波方程式であるが（省略），固体地球との相互作用を考慮した起潮力ポテンシアルを与えるために，水平圧力勾配項は$-g\nabla(\alpha\eta-\beta\zeta)$とした．ここで，$\eta$は海面水位，$\zeta$は平衡潮汐，($\alpha$，$\beta$) は固体地球との相互作用を考慮した起潮力ポテンシアルを与えるためのパラメータである（詳細はHatayama *et al.*, 1996参照）．水平粘性係数はSchwiderski（1979）に従い格子間隔（本モデルでは5km）と水深の積に比例するようにした．例をあげると，水深2000mの海域でのそれは$7.5\times10^5 cm^2s^{-1}$である．底摩擦係数は0.0026を用いた．

境界条件は，陸岸では粘着，太平洋側の開境界ではSchwiderski（1979）の全球潮汐計算結果による潮位振動を，宗谷・間宮両海峡では隣接した検潮所の観測結果に基づく潮位振動をそれぞれ与えた．従って，本モデルでのオホーツク海の潮汐は起潮力と開境界での強制振動によって駆動される．なお，開境界周辺での波の反射による異常なノイズを防ぐために，Orlanski（1976）の放射条件を用いた．計算は主要4分潮（K_1, M_2, O_1, P_1）について行ったが，紙数の関係から，ここでは卓越潮であるK_1潮について簡単に述べることにする．

K_1潮の計算は定常振動に達するまで24周期行い，最後の周期のデータを用いて解析した．得られたK_1潮位場の等振幅線と等位相線の空間分布を図2に示した．これらの分布から，オホーツク海の潮位場は北太平洋からの進行波によって主に決定されていることが分かる．すなわち，それはクリル列島北東部の海峡から進入後，海岸に沿っ

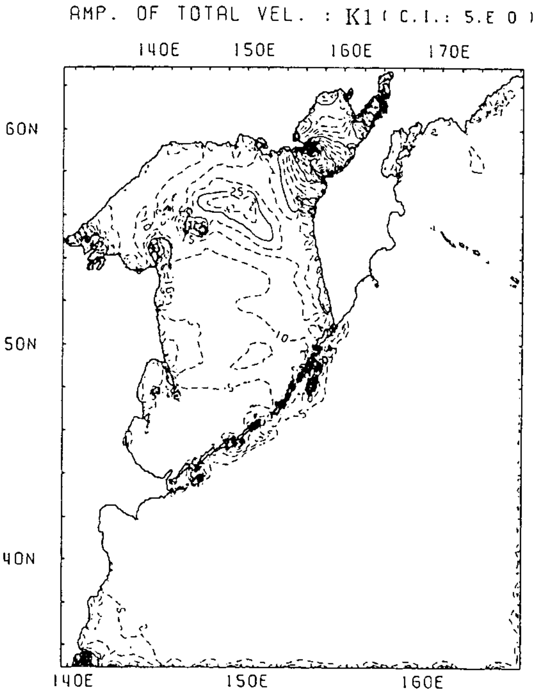

図3 K1潮流場の等振幅線（単位はcms^{-1}).

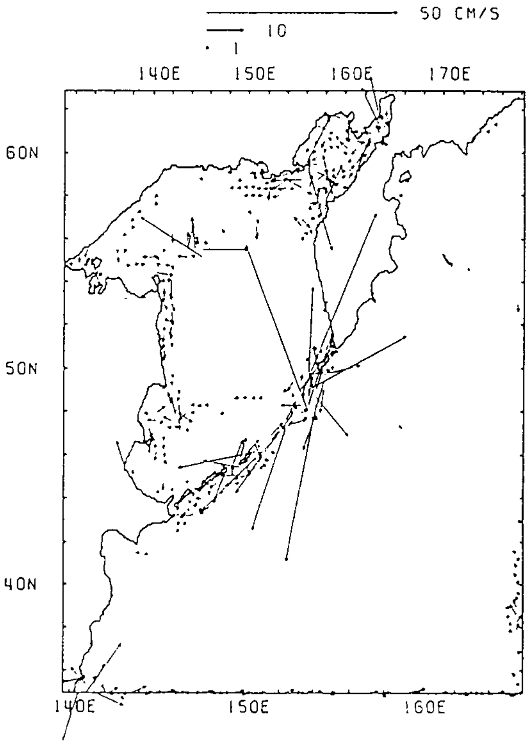

図4 時間平均した流速ベクトル.

てほぼ反時計回りにオホーツク海内を（陸棚波的に）進行する．これに伴い潮位の振幅は北部浅海域で大きくなっている．シェリコフ湾ではこのことに加えて共振が起こるために，潮位の振幅は最大で4.2mにも達する大きなものとなっている．これらの結果は潮汐に関するこれまでの研究結果（小倉, 1933 ; Mazzega and Berge, 1944）と類似しているが，より定量的に議論するためにIHO（International Hydrographic Office）の潮汐調和定数との比較を行った．その結果，相関係数は位相については0.904，振幅については0.976であり，また全域でのRMS誤差は8.06cm，クリル列島周辺では6.75 cmであることから，潮位場の再現性は大変良いと言えよう．従って，同時に得られた潮流場についてもかなり信頼性があると思われる．

図3は得られたK_1潮流場の等振幅線の分布を示している．一般に，潮流は海峡部や浅海域で大きく，中でもクリル列島北東部の海峡では最大流速が160cms^{-1}に達していることが注目される．従って，クリル列島海峡部を通しての潮流による海水交換はかなりなものであることが予想される．K_1潮流場の詳しい説明はここでは割愛するが，潮流場の時間変動は北太平洋からの潮汐波の進行に対する順圧応答を反映したものとなっている．

3. 潮流による海水交換

潮流による長周期輸送の効果を簡便に調べる方法の1つにオイラー的な時間平均流による評価がある．それを図4に示した．クリル列島周辺に話を絞ると，潮流場の結果から予想された通り，そこでの時間平均流はかなり大きく（南西部の海峡を除くと10cms^{-1}強の流速），北東部の海峡では70 cms^{-1}を越えている．さらにほとんどの海峡で"bi-directionalな流れ"となっており，Moroshkin（1963）の観測結果と一致している．その他注目されるこ

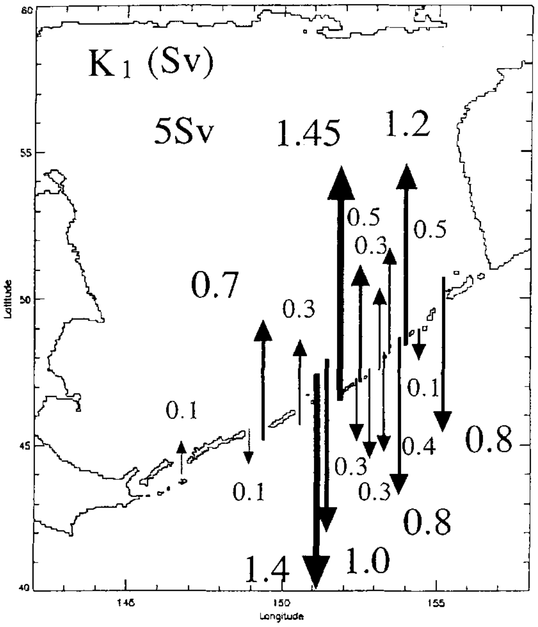

図5 オイラー的時間平均流から求めた海水交換量（単位はSv : $1Sv=10^6m^3s^{-1}$）.

ととして，シルや島に沿った時計回り循環流が見られるが，このような時間平均流がどのようにして形成されるのかを調べるために，Ridderinkhof（1989）と同様に渦度方程式の解析を行った．その結果，オイラー的時間平均流は主として海底地形の変化による水柱のstretchingと海底摩擦の相乗効果によって生じていることが分かった（詳細は省略）．なお，Imasato（1987）によれば，このような時間平均流が単なる平均操作の産物ではなく物理的な実体を持つためにはオイラー数が1より小さい弱非線形の場合に限られることを示しているが，その値を計算したところ10^{-1}のオーダーであったので，このような平均流を用いた輸送過程の議論にそれほど支障はないと考えられる．

そこで，この時間平均流からbi-directionalな構造を考慮して各海峡部での海水輸送量を算出し，その結果を図5に示した．一見して分かるように，K_1潮によるオホーツク海と北太平洋との海水交換は主にBussol海峡と北東部の海峡を通して生じていると言える．すなわち，オホーツク海からの正味の流出は約5.0Svであるが，そのうち2.4SvがBussol海峡から，0.8Svが北東部のKruzenshterna海峡から，また0.8SvがChetvertyy海峡から流出している．流入量の最大はBussol海峡の1.45Svで，次いでKruzenshterna海峡からの1.2Svが大きい．従って，Bussol海峡では流出が，Kruzenshterna海峡では流入がまさり，Riser（1996）らの従来の推定と矛盾しない結果となっている．

以上のオイラー的時間平均流に基づく輸送量の評価は海峡を通しての海水交換を理解する上で有益であることに間違いはないが，海峡を通過する個々の海水粒子の“顔”（例えばオホーツク海起源の水）を識別している訳ではないので，その結果は必ずしもオホーツク水及び北太平洋水そのものの交換量を表しているとは限らない．そこで，図6aのように粒子群を配置して10周期間追跡を行った（図6b）．その結果，初期にオホーツク海にあった海水粒子の北太平洋への流出量は1周期後では約10Sv，10周期後では約5Svとなった．このような相違はラグランジュ量が初期位置と時間の関数であることによるが，もし一旦外洋へ出たオホーツク水が親潮のような海流によって効果的に運び去られるならば，オイラー的な見積りよりも多くのオホーツク水が流出することになる．この問題はラグランジュ平均輸送量の定式化の問題とあわせて今後の課題である．図6に見られるもう1つ特徴は，とりわけ北東部の海峡周辺で大きな水平混合が発生していることである．実際，同様のことがKono and Kawasaki（1996）によって指摘されているので，東カムチャッカ海流水の流入と混合の問題と関連させて検討する必要があろう．

この研究は潮流がオホーツク海と北太平洋との海水交換にどの程度の役割を果たしているのかを順圧モデルを使って調べたに過ぎない．現実には傾圧効果が無視できなく，シル周辺では内部潮汐によって強い鉛直混合が起こっていることが観測から指摘されており，また，Bussol海峡の下層では太平洋水がオホーツク海に流入してそこでの深層水の形成に重要な役割を果たしているとも言わ

A

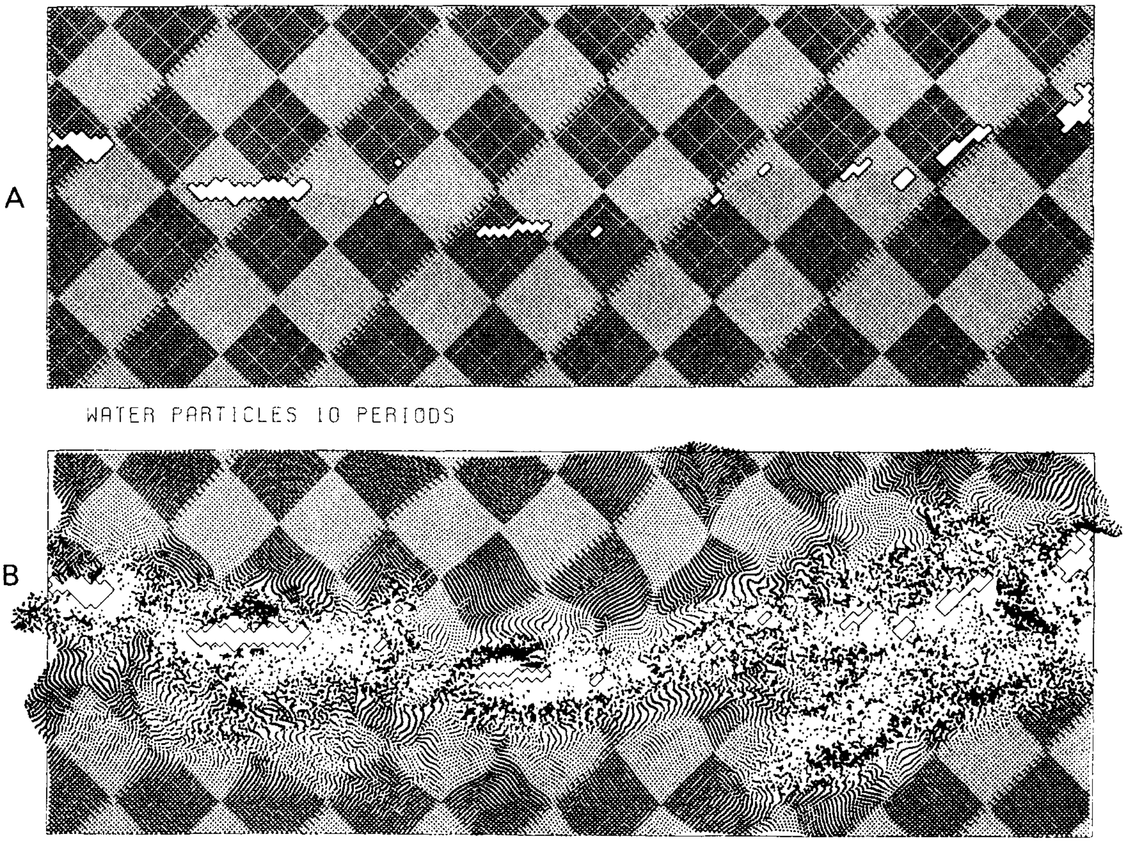

図6　図1の矩形域内に配置された海水粒子群の追跡：(a) 初期分布，(b) 10周期後の分布．

れている．最終的には外洋や大気との相互作用も考慮に入れ，北部陸棚域のventilationによって形成された水が，どのようにオホーツク海内を移動・変質して，どの程度北太平洋へ流出するのかをsophisticated modelを用いて調べることが重要である．

最後に，このような発表の機会を与えて下さいました北大低温科学研究所の若土先生を初めとする関係者の方々に記して感謝致します．

参考文献

[1] Hatayama, T, T. Awaji and K. Akitomo : J. Geophys. Res., **101**, 12353-12373 (1996).

[2] Imasato, N. : J. Oceanogr. Soc., Japan, **43**, 319-331 (1987).

[3] 川崎康寛・河野時廣：海と空, **68**, 41-53 (1992).

[4] Kitani, K. : Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab., **9**, 45-77 (1973).

[5] Kono, T. and Y. Kawasaki : Deep Sea Res. (in press) (1996).

[6] 倉品昭二・西田浩児・中林修二：日本海洋学会誌, **23**, 57-62 (1967).

[7] 小倉伸吉：水路雑, **10**, 71-88 (1923).

[8] Orlanski, I. : J. Compt. Phys., **21**, 251-269 (1976).

[9] Mazzega, P. and M. Berge : J. Geophys. Res., **99**, 24867-24881 (1994).

[10] Moroshkin, K. V. : U. S. Dept. of Commerce. Joint Pub. Res. Serv., **43**, 98pp. (1966).

[11] 大谷清隆：海と空, **65**, 63-84 (1989).

[12] Robinson, I. S. : Deep Sea Res., **28**, 195-212 (1981).

[13] Ridderinkhof, H : Neth. J. Sea Res., **24**, 9-16 (1989).

[14] Riser, S. C. : Proceedings of International Workshop on the Okhotsk Sea and Arctic, 46-53 (1996).

[15] Schwiderski, E. W. : Atlas of Tidal Charts and Maps, NSWC-TR. 81-142 (1979).

[16] 鈴木香緒里・金成誠一：月刊海洋, **18**, 455-463 (1986).

[17] Talley, L. D. : Deep Sea Res., **38**, 171-190 (1991).

[18] リン, D. タリー・永田 豊：海と空, **67**, 65-74 (1991).