

亜熱帯赤道域における N_2O の分布特性と海象気象条件の関係

森 信人*・今村正裕**・下島公紀***

1. 緒 言

全地球レベルでの環境問題は、ここ数年で急速に注目を浴びており、その中でも地球温暖化ガスの問題は、解決しなければならない急務な課題の一つである。COP3 京都会議では、主要な温暖化ガス(CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC, SF_6 : 以下ガスと略記)の削減目標が発表されたが、地球上における温暖化ガスの絶対量や循環のサイクル等については、未解明な点が多い。海洋はガス吸収・放出源としての大きな役割を果たしており、それゆえ、海洋における温暖化ガスの時空間分布特性の調査・解明は、大気・海洋間における温暖化ガスの循環サイクルを知る上でも重要である。

大気と海洋のガス交換は、海面粗度の変化・海洋の物性・対象とするガスの物性の変化で大きく変化し、実験・現地観測結果から、風速 10 m/s 以上でガス交換係数が大きく増加することが明らかにされている(例えば Liss *et al.*, 1977)。Liss and Merlivant (1986), Wanninkhof (1992) らは、風速とガス交換係数に関する計測を行い、両者の関係を求めた。このモデルが現在の大気・海洋間におけるガス輸送の予測計算のほとんどで用いられている。しかしながら、全球における CO_2 循環の予測はモデルにより数倍異なる結果が得られており(Peng, 1990)、現地観測結果による検証が必要となっている。

近年の観測技術等の進歩に伴い、より正確かつ広域的な観測が行われ、観測船および貨物船による採水および海象状況等からそのガス交換ポテンシャルが測定されている。しかし観測の多くは、海水面近傍についてのみ行われており、ガスの循環サイクル機構の現象解明に必要な下層における物質の状態を把握するまでにはいたっていない。さらに、ほとんどが CO_2 を対象にしたものであり、これ以外の温暖化ガスに関する広域的な観測は少ない。

温暖化ガスの中でも N_2O ガスは森林や陸においてバイオマスの燃焼や、汚水処理場から大気へと放出されて

いることが知られている。さらに、沿岸域では栄養塩(硝酸・亜硝酸)の流入に伴い、微生物による酸化還元により水中に高濃度で N_2O が存在しているため、その循環サイクルの解明が急がれている。ところが現地観測では北太平洋における観測が多く、栄養塩濃度が低い赤道域における観測データはあまりない。

そこで本研究では、 CO_2 や CH_4 につづく温暖化ガスとして注目される N_2O に着目し、1998 年 1~2 月および 1998 年 12 月~1999 年 1 月に 2 度に渡り実施した、太平洋亜熱帯赤道域における水質・気象・海象観測結果をもとに、太平洋亜熱帯域における N_2O の分布および変動特性について明らかにし、さらに N_2O の変動特性と気象・海象条件との関係を検討する。

2. 観測の概要と分析方法

観測は海洋科学技術センター観測船「みらい」を用いて行われ、1998 年 1 月から 2 月(航海コード MR 98-01)および 1998 年 12 月~翌年 1 月(同じく MR 98-K 02)にわたり 2 度行われた(Mirai cruise report, 1999)。観測は赤道域を東進する航路上で行われ、観測された物理量としては、1 時間毎の気温・湿度・大気圧・時間雨量・日射量・表層水温・風向・風速および 3 時間毎の有義波高・有義周期が計測された。風向・風速は 1 時間毎に 10 分間の平均値、有義波高・有義周期は 3 時間毎に 20 分のデータから計算されている。上記の観測は、全航海日程中にわたり計測された。鉛直方向の計測は、図-1 中の○に示す採水場所において、MR 98-01 で 3 点(St. 1-3)、MR 98-K 02 で 12 点(St. 1-12)のサンプリングを実施した。採水は表層で 10 m 毎、中層以下で 100 m 毎に最大 5800 m まで行った。採水の所要時間は約 1 時間であった。採取された海水は、 N_2O , SF_6 , CO_2 (NH_4-N , NO_2-N , NO_3-N , PO_4-P , Si)・溶存酸素について船上で分析がなされた。海水中の N_2O は、海水を 125 ml ガラスバイアルビンに採取し、さらに $HgCl_2$ (50%飽和)を 50 μ l 添加した後、ただちにゴムセプタム及びアルミキャップにより密栓した。これらを、船上備え付けの ECD-GC 14 B (島津製作所)を使い、ヘッドスペース法により分析した。

* 正会員 工 博 (財)電力中央研究所 水理部
** 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 環境科学部
*** 学術博 (財)電力中央研究所 環境科学部

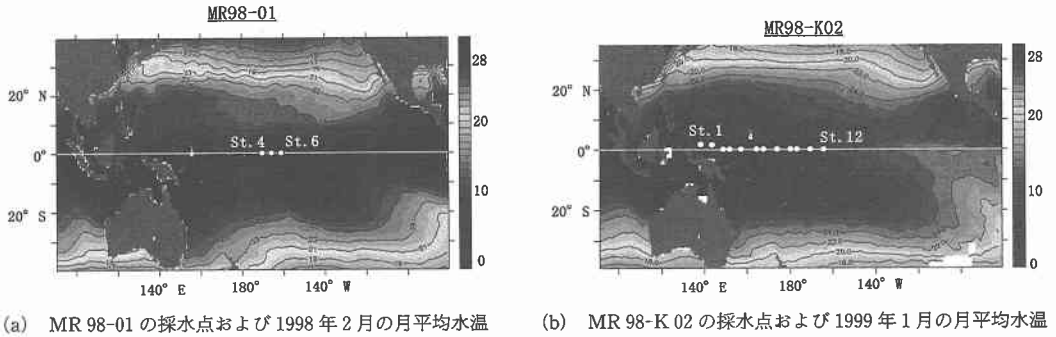
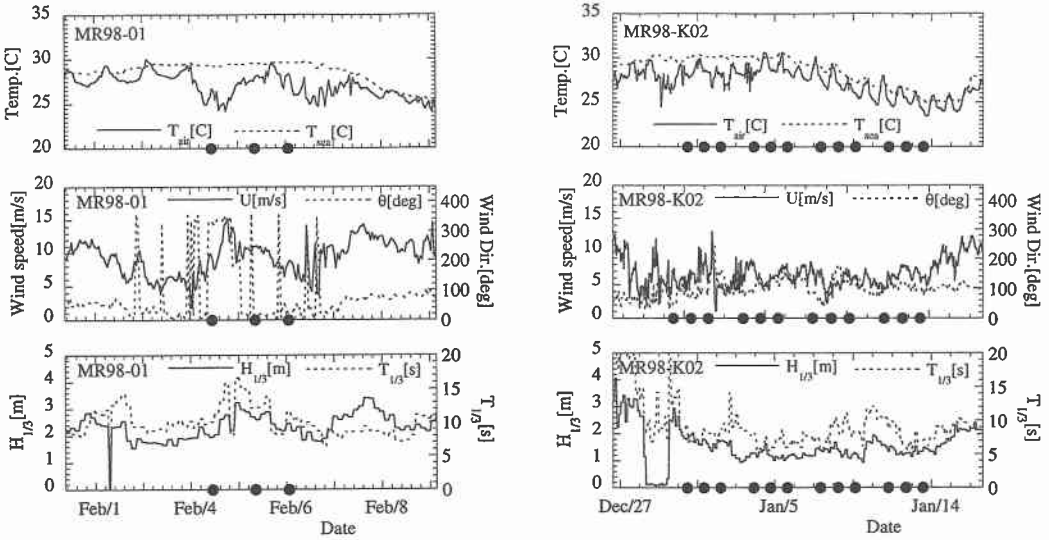


図-1 採水点および太平洋亜熱帯赤道域の月平均海面温度分布 (海面温度分布は NOAA より提供)



(a) MR 98-01 (b) MR 98-K 02

図-2 気温・水温・風速・風向・波高・周期の時間変化

3. 観測結果

(1) 観測時の気象・海象条件

図-1 に示すのは、各観測における海水採取場所および観測時の月平均の海面水温分布である。MR 98-01 は 1997 年に始まったエルニーニョの終盤に相当し、MR 98-K 02 はラニーニャの始まりに相当期間であった。そのため全体的に赤道付近の平均的な海面水温は MR 98-01 の方が高いことがわかる。海面水温から見る限り、経度変化の影響はそれほど大きくないように見受けられる。

図-2 に示すのは、気温 T_{air} 、水温 T_{sea} 、風向 θ 、風速 \bar{U} 、波高 $H_{1/3}$ ・周期 $T_{1/3}$ の時間変化である。図中の●は採水時間を表している。気温は、MR 98-01 の St. 4 での採取時に 1 日で 3°C の急な低下が見られ、MR 98-K 02

では St. 1 から 12 にかけて 2 週間間に 3 度のゆっくりとした変化が観測された。水温は両年において大きな違いが見られた。NOAA の表面水温と同様に MR 98-01 では 29°C 前後であるが、MR 98-K 02 では東経 180 度までかなり高く約 30°C 前後であり、東経 180 度以東は最低で 25°C まで低下していた。この 4~5°C の水温の差はガスの溶解度にはかなりの影響を与えることが予想される。 \bar{U} は、MR 98-01 では 5-15 m/s の間で大きく変動しているのに対し、MR 98-K 02 では 5-7 m/s 前後と比較的安定していた。 θ は両者とも北西~南西方向で安定していた。 $H_{1/3}$ は、 \bar{U} と類似の傾向を持ち、その大きさは 1-3 m 程度であり、 $T_{1/3}$ は 8-10 秒前後であった。

(2) 赤道上における N₂O の鉛直分布

海水中の N₂O 濃度を図-3 に示す。MR 98-01 では、表層で 10~30 nM/l 存在し、下層に行くにしたがい徐々に

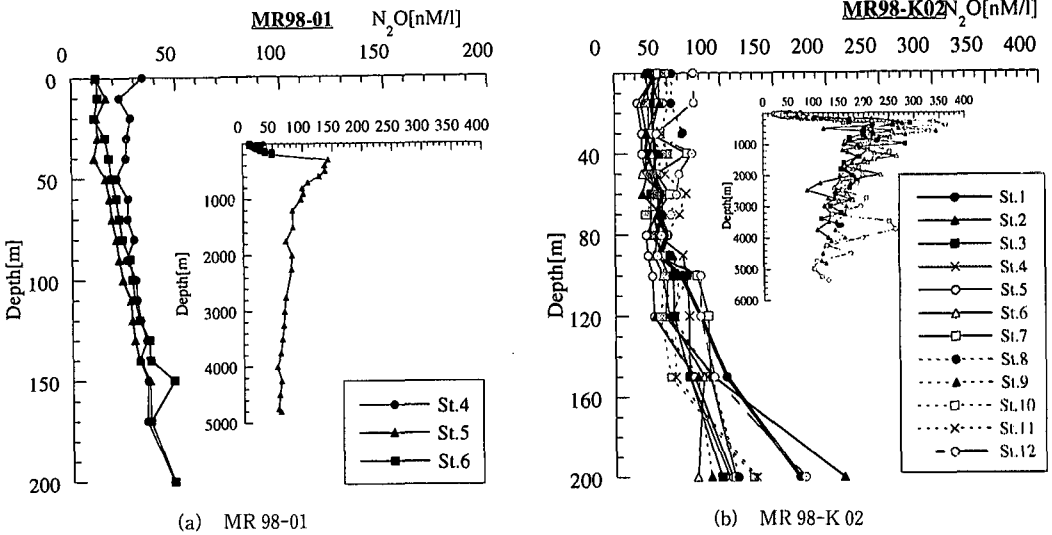


図-3 N₂Oの濃度の鉛直分布

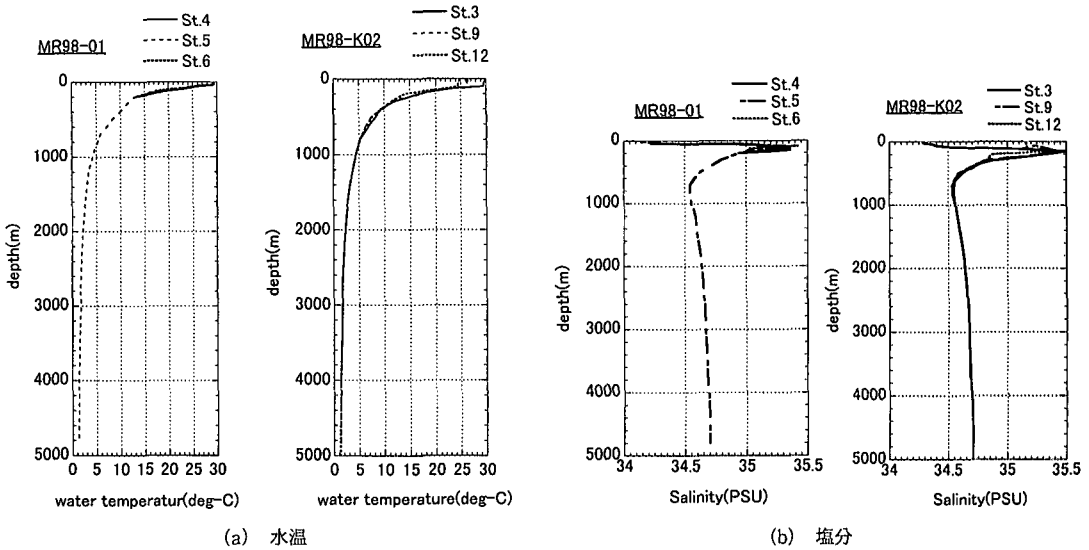
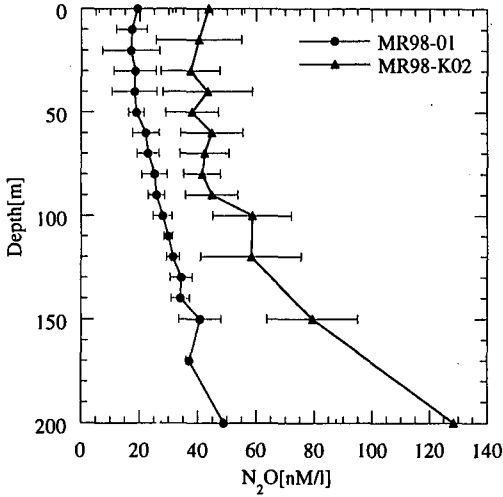


図-4 水温・塩分濃度の鉛直分布

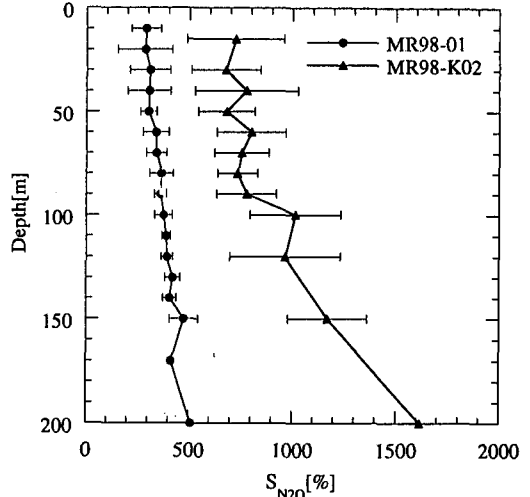
増加し、300~400 m 付近で極大層(150 nM)が存在する。400 m 以深において N₂O 濃度は徐々に低下し、50 nM/l 前後で安定している。St. 4 で表層の濃度が高くなるものの、緯度の違いによる変化はそれほど大きくはなかった。一方、M 98-K 02 では太平洋西側 St. 1-3(東経 140~150 度)において、表層の N₂O 濃度は 30~50 nM/l で MR 98-01 時とほぼ同じであり、水深 100 m 付近まで殆ど濃度には変化がないのが特徴であった。しかし、100 m 以深から急激に増加する傾向にあり、MR 98-01 同様に 300~500 m 付近に極大層を持っている。さらに、表層の N₂O 濃度は東に進むにつれ増加し St. 12 (西経 165 度付近)では 80 nM/l 前後とかなり高濃度で存在している。

観測を行った全地点で、約 600 m 以深から N₂O 濃度は低下するものの、深層でも 100 nM/l 近く存在していた。中層における N₂O 濃度極大は表層・下層への拡散を生み出し、大気中への N₂O 放出の可能性を秘めている。

中層の N₂O 濃度極大層について考えると、N₂O の増加は生物学的な反応で発生することが知られている。溶存酸素濃度から判断すると、溶存酸素濃度が低下するに従い硝化反応活性は徐々に低下し、中間生成物である N₂O が生成すると考えられる。さらに溶存酸素がほとんどなくなると、今度は脱窒反応が進むが、溶存酸素が少しでも存在する状況では活性が低く、中間生成物である N₂O が発生する。このように、酸素が低下する 400 m 付

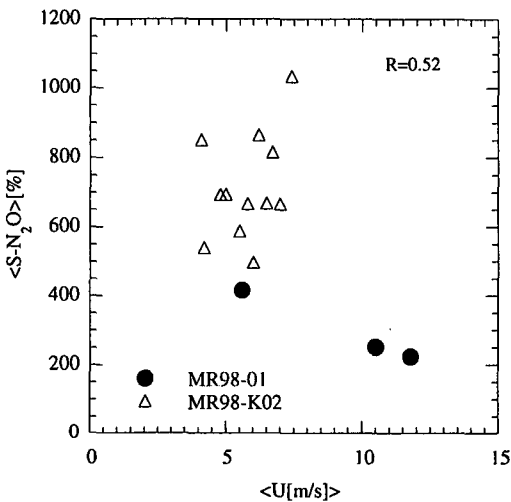


(a) N₂Oの平均濃度

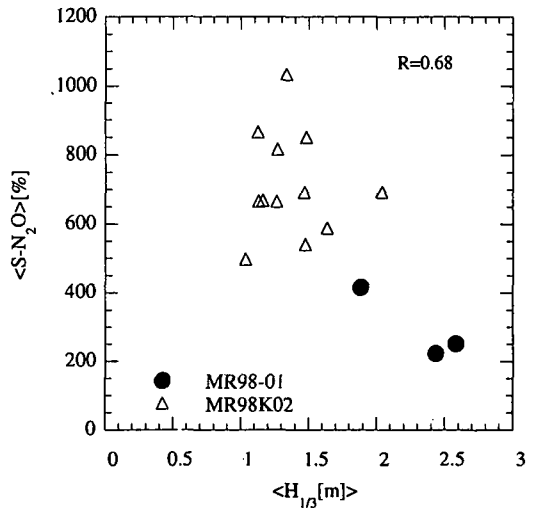


(b) N₂Oの飽和度 S_{N₂O}

図-5 観測期間毎の N₂O の平均濃度および飽和度 S_{N₂O} の鉛直分布



(a) N₂Oの飽和度 S_{N₂O}と平均風速 \bar{U} の関係



(b) N₂Oの飽和度 S_{N₂O}と有義波高 H_{1/3} の関係

図-6 N₂Oの飽和度 S_{N₂O}と平均飽和度および有義波高の関係

近では、両者の反応が重なり合う状況下で N₂O 極大層が発生していると考えられる。MR 98-K 02 では、全観測点においてかなり高濃度で N₂O が計測されており、今後の観測データの蓄積が必要であると考えられる。

N₂O の濃度分布だけを見ると水中から大気へと放出する状況であるが、これを定量的に評価するために、N₂O の飽和値を算出した。水温・塩分による濃度変化の影響を除去するため、各採水深度における水温・塩分(図-4)より計算された N₂O の飽和 S_{N₂O}(%) を算出した。図-5 に示すのは、観測期間毎にまとめた N₂O の濃度および飽和度 S_{N₂O} の平均値の鉛直分布である。図中の横棒は分岐

を示す。図より、S_{N₂O} は表層で最小値を取り、50 m 以浅ではほぼ一定、50 m 以深で単調増加となっていることがわかる。さらに最も値の小さい表層においても S_{N₂O} は 100% を超えており、鉛直方向全体に過飽和であった。これらの勾配からこの水域では水中から大気へ放出される状況であることが推測される。また、一般的に MR 98-K 02 は MR 98-01 の約 2 倍の値を示しているが、これは 1997-98 年に起こったエルニーニョからラニーニャへの移行に関連していると思われる。同時期に行われた NOAA の観測によると、海面水温が低い海域は南米ペルー沖からはほぼ赤道に沿って中部太平洋まで広

がっていることが指摘されており、スクリップス海洋研究所でも1998年12月から1999年2月にかけて低温傾向がはっきりすることを予測されていた。表層での低水温さらには、それに伴う N_2O 生成に関わる栄養塩の増加によってMR 98-01より大きな値を示したものと考えられる。

(3) N_2O 飽和度と海象条件との関係

Liss and L. Merlivant (1986) や Jähne (1990) は、ガス交換速度の風速依存性について詳細な検討を行っている。ここでは定点観測ではないため、 N_2O のガス交換速度を推定することは出来ないが、採水時の平均風速および有義波高と N_2O の関係について検討を行う。

深海域において、Drennan *et al.* (1992) は、砕波等の海面の乱れは、鉛直方向に波高の数倍まで達するとの報告を行っている。そこで、 S_{N_2O} の飽和度の0-50 mまでの平均値 $\langle S_{N_2O} \rangle$ を表層における代表飽和度とし、これと採水の前9時間の平均風速 $\langle \bar{U} \rangle$ および有義波高 $\langle H_{1/3} \rangle$ と比較したのが図-6である。 $\langle S_{N_2O} \rangle$ と $\langle \bar{U} \rangle$ 間の相関係数は0.52であり、 $\langle S_{N_2O} \rangle$ と $\langle H_{1/3} \rangle$ 間の相関係数は0.68であった。風速が増すとガス交換が進むため、海水が過飽和であるこの状態では N_2O の飽和度が下がるはずであり、 $\langle S_{N_2O} \rangle$ と $\langle \bar{U} \rangle$ の負の弱相関の関係はこれを定性的に裏付けている。 $\langle H_{1/3} \rangle$ が風速に強く依存するため、 $\langle S_{N_2O} \rangle$ および $\langle H_{1/3} \rangle$ の間にも弱い相関関係が存在することは不思議ではないが、 $\langle S_{N_2O} \rangle$ および $\langle H_{1/3} \rangle$ の相関が $\langle \bar{U} \rangle$ よりも若干相関が強い点については不明である。Monahan and Torgersen (1990) により白波によりガス交換が促進されるとの報告があるが、今回の観測では、波浪については有義波高・有義周期に限り観測が行われたため、次回以降の詳細な波浪観測の必要性が望まれる。

上記の結果から、この海域では海洋 \rightarrow 大気へ N_2O が放出されており、 $\langle S_{N_2O} \rangle$ の値は $\langle \bar{U} \rangle$ と弱い負の相関を持つ。また $H_{1/3}$ の方が \bar{U} より若干強い相関関係にあることがわかる。

4. 結 論

観測結果より、太平洋赤道における N_2O の水平・鉛直方向の空間分布特性と気象・海象条件の関係について検討を行った。その結果、 N_2O は赤道において表層で

すで飽和値300であり、中層付近(300 m~500 m)に極大層をもっていることがわかった。さらに、栄養塩や水温といったなんらかの影響によって N_2O の濃度・飽和度が時空間的に大きく変動していることを示し、少なくとも、太平洋域では N_2O は放出する領域であることを明らかにした。ついで、表層から50 mまでの飽和度平均値 $\langle S_{N_2O} \rangle$ は風速および \bar{U} ・波高 $H_{1/3}$ と弱相関の関係にあり、 $H_{1/3}$ の方が \bar{U} より若干強い相関関係にあることがわかった。

本観測時期ではエルニーニョからラニーニャに移行している遷移時期と重なっていた。ラニーニャにおける深層からの栄養塩の供給等、気象的な要素も含めて今後の継続的な観測、さらに表層での白波の面積・波浪スペクトル等、界面状態のより詳細な情報の取得が今後必要である。

謝辞：本研究は、海洋科学技術センター「みらい」の観測航海の一部である「赤道域における基礎生産力観測研究」で行われたものである。各データの提供にあたり、はみらい乗組員諸氏及び海洋科学技術センター・海洋観測研究部の河野 健氏にご協力いただいた。深甚なる謝意を表わす。

参 考 文 献

- Drennan, W. M. *et al.* (1992): Observations of the enhancement of kinetic energy dissipation beneath breaking wind waves, In *Breaking waves*, IUTAM Sympo., ed. M. L. Banner and R. H. J. Grimshaw, pp. 95-102.
- Jähne, B. (1990): New experimental results on the parameters influencing air-sea gas exchange, In *The sea surface and global change*, ed. P. S. Liss and R. A. Duce pp. 582-591.
- Liss, P. S. and L. Merlivant (1986): Air-sea gas exchange rates, In *The role of air-sea exchange in geochemical cycling*, ed. P. Buat-Menard, Reidel, pp. 114-127.
- Liss, P. S. *et al.* (1997): Physical processes in the microlayer and the air-sea exchange of trace gases, In *The sea surface and global change*, ed. P. S. Liss and R. A. Duce pp. 1-34.
- Mirai Preliminary cruise report (1999): JAMSTEC.
- Peng, T. H. (1990): Oceanic CO_2 uptake and future atmospheric CO_2 concentrations, In *Air-water mass transfer*, ed. S. C. Wilhelms and J. S. Gulliver, ASCE, pp. 618-635.
- Wanninkhof, R. (1992): Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 7373-7382.