

航行中の船舶を用いた広域の 海面フラックスの測定法について*

藤谷徳之助**・萩野谷成徳****

要 旨

ENSO 現象や気候変動の研究において重要な大気-海洋相互作用の実態を解明するために、船舶を使用して広域の顕熱および潜熱フラックスを評価する方法を提案した。またこの方法を実際の観測に適用して良好な結果を得た。

今回提案した方法では、NNSS (Navy Navigation Satellite System) あるいは NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time And Ranging/Global Positioning System) によって得られる船位データを用いて船速と針路を求め、これと視風向・風速データを合わせて真風向・風速を求めている。

この方法では従来のような気候データを用いた解析とは異なって、ほぼ実時間で海面フラックスの値を広域でしかも連続的に評価することが出来る。

1. はじめに

最近一段と活発になりつつある気候変動に関する研究において、大気と地表面、特に地球表面の約7割を占める海洋との相互作用の研究は重要なテーマの1つである。太平洋熱帯海域における大気-海洋間の相互作用がENSO現象と密接に関係していることが明らかになるにつれ、この海域における大気-海洋間の熱収支を正確に評価することは、ENSO現象の研究のみならず気候変動研究全体の発展にとって重要な課題となっている。しかし海上、特に熱帯海域における観測データの不足から、これまでに行われている研究の多くは長期間の気候データ(例えばCOADSデータなど)を用いた、いわゆる気候学的な海面熱収支の実態を把握する研究である(例えばWeare *et al.*, 1981; Reed, 1985)。COADSの

ような気候資料を利用する研究では、長期間の平均的な海面熱収支の実態を把握することは出来るが、例えばエル・ニーニョが生じている期間の太平洋熱帯海域における海面熱収支の様相を、詳細に把握することは不可能である。このような研究を行うためには、熱帯海域において詳細な海上気象観測を実施する必要があるが、観測を広範囲にわたって、しかも繰り返し実施することは非常に困難であり、これまではあまり行われていないのが現状である。

しかし、最近熱帯海域の重要性に着目したTOGA計画(Tropical Ocean and Global Atmosphere program)が実施されるようになり(住, 1986)、この国際共同研究計画へのわが国の取り組みの一環として、太平洋熱帯海域において観測船を用いた観測計画(太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究: Japanese Pacific Climate Study (JAPACS))が立案・実行されている。さらにこの観測で得られた観測資料の一部を解析して得られた、熱帯海域における大気境界層の熱収支と混合層の構造についても報告されている(萩野谷・藤谷, 1990)。しかしこれもごく限られた期間における、特定の海域についての研究結果であり、これだけで十分と言えるものではない。太平洋熱帯海域にお

* Method of evaluating surface energy fluxes over open ocean by cruising ship of opportunities.

** Tokunosuke Fujitani, 気象研究所応用気象研究部.

*** Shigenori Haginoya, 気象研究所物理気象研究部.

——1990年11月19日受領——

——1991年4月1日受理——

海面熱収支の全体像を把握するためには、広域においてしかも時間的にも繰り返して海上気象観測を実施する必要がある。このような観測を実施するためには、特別の気象/海洋観測船のみによる観測だけに依存していたのでは、実行はほとんど不可能である。これを実行可能にするためには、一般の船舶を利用して簡便な方法で広域海面からのフラックスを評価する方法を開発する必要がある。

この論文では、一般の船舶を用いて広域の海面におけるフラックスを評価する方法について提案するとともに、その方法を JAPACS 観測航海に適用した結果について報告する。

2. 海面からのフラックスを評価する方法

海面からの運動量・顕熱・潜熱フラックスを評価する方法として、これまで最もよく用いられてきているものにいわゆるバルク法がある。この方法では、船上の一高度で測定された風速・気温・湿度の観測値（平均値）と海面水温のデータから、運動量および顕熱・潜熱フラックスを評価することが出来る。また、これらの海上気象データと気象衛星で得られる放射データを組み合わせ、全球的な大気-海洋系の熱収支を求める試みもなされている (Hastenrath, 1980)。最近、このような広域の海面からの気候的なフラックスを評価する目的に最適なデータとして、NOAA によって作成された COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, 総合海洋気象データセット) が注目を集めている。このデータは 100 年以上にわたる海上気象資料をまとめたものであり、気候的な統計値を求める場合には十分な威力を発揮する。このデータを用いて広域のフラックスを求めた結果も報告されている (Iwasaka and Hanawa, 1990)。

長期間の平均的な気候値ではなく、熱帯海域における現時点のフラックスの値を、短い時間間隔でかつ実時間で評価するためには、一般海上気象観測で得られる観測資料を利用する必要があるが、一般海上気象観測を行う船舶は限られており（特別の気象観測船だけである）、広域の海面からのフラックスを評価するには観測資料が不十分である。一方、一般船舶の気象通報を利用することも考えられるが、その場合湿度観測のデータが少ないため、熱帯海域で最も重要な潜熱フラックスを求めることが出来ない。また、船上で船体の影響の無い風速や気温などの気象要素を測ることは比較的難しく、特別の観測用マストを備えた気象観測船でないと精度の良いデータを得ることは出来ない。さらに、気象観測船で行う一

般海上気象観測も、特別の場合でない限り 3 時間ごとにししか行われないうため、観測時にたまたま観測船の近傍にある擾乱の影響を受けることがあり、後で述べるように代表性のあるフラックスの値を求めるに当たっては注意する必要がある。これらの観点から、バルク法の特徴である、比較的簡単な観測値だけからエネルギーフラックスが求められるという特徴を生かしながら、しかも上に述べた不十分な点を是正した方法を考える必要がある。

3. 新しい観測方法によるバルク法

広域海面からのエネルギーフラックスを短い時間間隔でかつ実時間的に求めるためには、多くの一般船舶で気象要素を連続的に観測し、これを処理する必要がある。このためには、一般船舶に委託できるような形で海上気象観測が行える自動観測装置を開発しなければならない。

船上の気象観測には先にも述べたように色々困難な点があるが、特に困難なものは風向・風速の観測である。船舶が移動している場合には見かけの風向・風速（視風向・風速）のデータを船速・針路のデータを用いて補正し、真風向・風速を求めなければならない。このために特別の機構を有する真風向風速計が開発され、気象観測船などには設置されているが、この機械は高価であり、一般の船舶に簡単に設置することは不可能である。計算盤あるいは電卓などを用いて計算することもできるが連続記録を得ることはできない。また、補正計算に用いる船速・針路を、一般の船舶に設置されている電磁ログなどから連続的に得ることも余り簡単ではなく、またその精度も余り高いものとは考えられない。

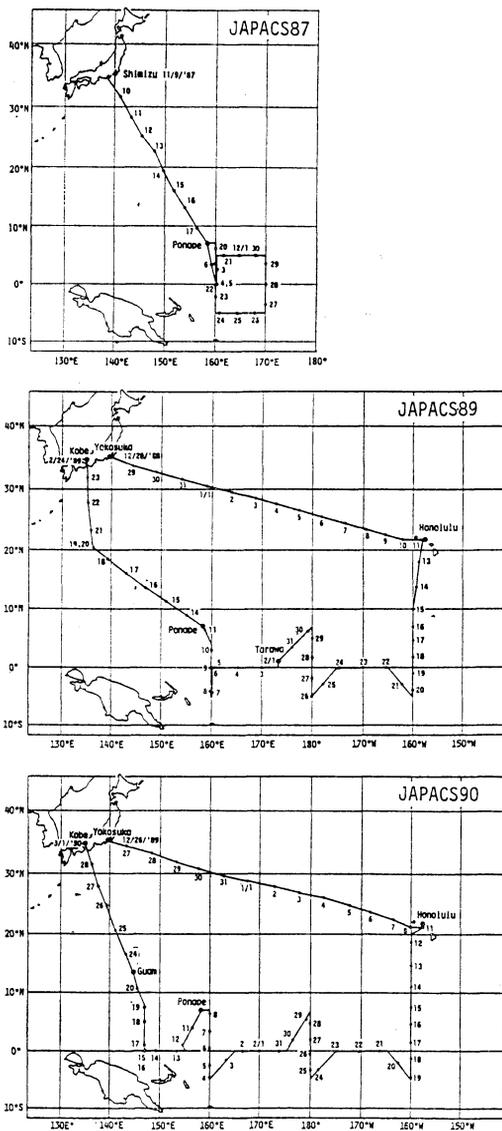
真風向風速計のない一般船舶の場合に、視風向・風速の平均値を得る観測方法として、船舶気象観測指針には以下のように定められている。「風向の観測：自記器を備えている場合には、自記紙上で、観測時の 10 分前から、観測時までの変動の大勢を見て判定する。自記紙上のインキの、最も濃く染まった部分の中央が、平均風向を示すものと見て良い。自記器を備えていない場合には、約 1 分間の指針の振れを見て、その平均的な値を読み取る。風向の変化が激しいときには、読み取りが困難であるが、習熟することによって、正しく読み取れるよう努めていただきたい。風速の観測：自記器を備えている場合には観測時の 10 分前から、観測時までの記録を見て、風速変動の中央付近を読み取る。自記器を備えていない場合は、約 1 分間、指針の振れを見て、最大、最小を捨て、振れのほぼ一定したところを読み取る。風の息

が大きく、風速の変化が激しいときについては、風向と同じである。」

このように指針に定められているが、実際の観測においてこれを実行することは、特に一般の乗組員の場合には非常に困難である。いずれにしても船舶気象観測指針に準拠した風の観測ではあまり精度の高い視風向・風速を得ることはできない。われわれは視風向・風速の測定には風向風速計を使用し、平均値の演算には後で述べるアナログ演算装置を使用することとした。また、真風向・風速の計算に必要な船速と針路の情報については、最近の船舶の測位システムが高精度になり、また比較的短い時間間隔で測位データが更新されることに注目し、得られた測位データを用いて平均的な針路と船速を求めることにした。このようにして得られた船速と針路と、先に述べた方法で観測されている視風向・風速とから真風向・真風速を求めることができる。

例えば、測位システムとして比較的よく用いられているNNSS (Navy Navigation Satellite System) の場合、現在は6個の衛星で運用されているため、赤道地方では1時間に1回程度の測位が可能であるが、衛星の高度角の関係から、精度の良い測位は2時間に1回程度可能である。さらに中緯度地方では多少時間間隔が短縮される。NNSSの測位精度は30~500 m程度であると言われており、これを考慮すると10数cm/secという比較的良い精度で船速が求められるものと考えられる。また、測位間隔の間の位置については、ドップラーログ(あるいは電磁ログ)とジャイロコンパスのデータを組み合わせて推算している。したがって、推算値を使用すればもっと短い時間間隔、例えば30分ごとに船速と針路を求めることができる。一方、最近よく用いられるようになってきているNAVSTAR/GPS (Navigation System with Time And Ranging/Global Positioning System) の場合には、NNSSと異なって連続的な測位が可能である。現在はシステムが完成していないが、1991年1月現在16個の衛星が軌道上にあり、2次元の測位であればほぼ24時間の測位が可能である。NAVSTAR/GPSの測位精度はNNSSに比較して1桁程度良いと考えられており、このことから短い時間間隔で精度よく船速と針路を求めることが可能となる。

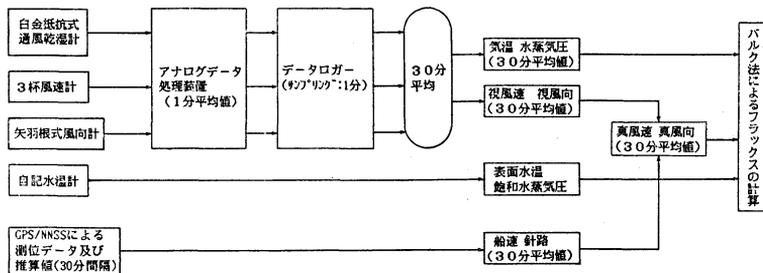
われわれは上に述べたような考え方に従って、海上気象観測を自動的に行うシステムを構築しようと考えているが、その第一段階として、1987年11月から12月にかけて実施したJAPACS 87、1989年1月から2月にかけて実施したJAPACS 89および1990年1月から2月にかけて



第1図 JAPACS 観測航海の経路。

て実施したJAPACS 90の熱帯域での観測に際して、このような方法を試験的に試みた。第1図に観測航海の経路を示す。またJAPACSの全体計画については科学技術庁による報告書(科学技術庁研究開発局編、太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究年度成果報告書)を参照されたい。

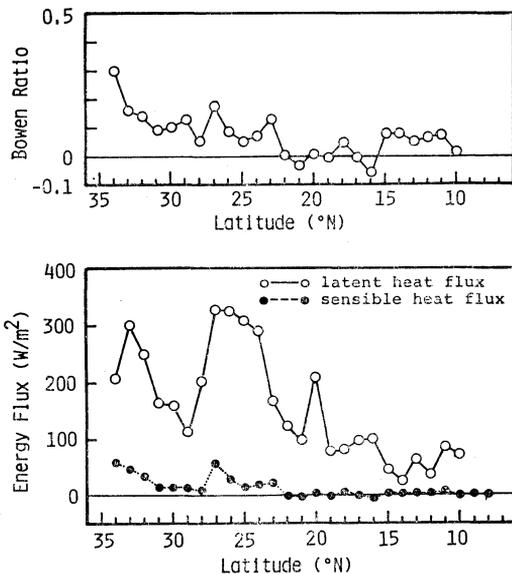
今回の観測に用いた船舶は、JAPACS 87の場合は東海大学海洋学部所属の海洋調査実習船「望星丸二世」(1,218トン)、JAPACS 89・90の場合は海洋科学技術



第2図 観測および解析のブロックダイアグラム。

センター所属の深海潜水調査船支援母船「なつしま」(1,553トン)である。観測海域は、JAPACS 87 の場合は西部太平洋熱帯海域、JAPACS 89・90 の場合は中西部太平洋熱帯海域である。航海経路に沿って、風向・風速・気温・湿度などの気象要素の連続観測を実施した。また日射と大気放射について JAPACS 89・90 においては一部実測を行ったが、精度に多少問題が生じたため、解析に当たってはいずれの場合も実験式を用いて推定している。今回の観測に用いた測器は、小型3杯風速計(光電式)・小型矢羽根式風向計(ポテンシヨ式)・通風乾湿計(白金抵抗温度計を使用)である。いずれの測器も小型・軽量であり、取扱および設置などは簡単に行える。これらの測器を、船体の影響のほとんどないと考えられる船の前部マストの頂部(望星丸二世の場合は海面上約15m、なつしまの場合は海面上約18m)に設置した。これらの測器からの信号はケーブルによって船室に導き、アクティブローパスフィルターを使用したアナログ処理装置を用いて、それぞれの信号の1分間移動平均値を連続的に求め、得られた平均値はA/D変換し、1分ごとにカセット式デジタル磁気テープに記録した。今回用いた計測および解析のブロックを第2図に示す。1分ごとに得られている平均風速・風向・気温・湿度などのデータについては30分平均値を求め、これを解析の基本単位とした。一方、測位データについても30分ごとに船の位置が求められている。これらはNNSSあるいはNAVSTAR/GPSによる実測値、あるいは先に述べたような推算値である。この測位データを用いて30分間の平均的な船速と針路を求める。この値と先に求めた船に相対的な見かけの風向・風速の値とを組み合わせ、真風向・真風速を求めた。海面水温については船のエンジン冷却水の温度を用いているが、バケツ採水による水温測定を適宜実施して両者の比較を行い、エンジン冷却水温度の補正を行っている。

JAPACS87



第3図 JAPACS 87 の清水～ポナベ間で得られた顕熱・潜熱フラックスとボーエン比の緯度変化。

バルク公式に使用されるバルク係数も研究者によって異なるが、ここでは Kondo (1975) のバルク係数に海面粗度の風速依存性を考慮した Yasuda (1981) の方法を用いた。この方法では、先ず中立を仮定してフラックスを求め、その後安定度を考慮して iteration でフラックスを求めている。このようにして30分ごとに各フラックスを求めた。

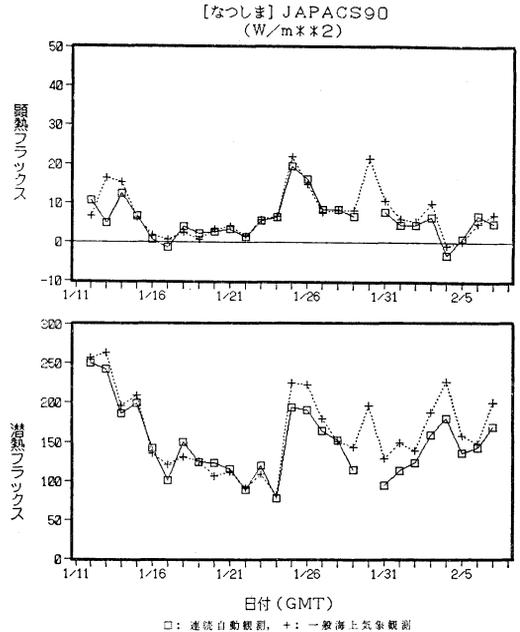
4. 解析結果および考察

解析結果の一例を第3図に示す。これは、JAPACS 87 において静岡県清水港からポナベ (7°N, 158°E) まで

の測線について、緯度 1° ごとに求めた顕熱と潜熱フラックスの値を示している。符号は上向きを+としている。ここでは緯度 1° ごとの値は、その緯度付近での値(30分平均値)と前後1.5時間、計3時間(データ数6個)の平均値を示している。観測船は約10ktで施行しているので、3時間平均値は水平スケールにして約55km(緯度 0.5°)に相当する。また、この2種類のフラックスの3時間平均値から求めたポーエン比についても同時に緯度変化を示してある。顕熱フラックスは 22°N 以北では $10\sim$ 数 $10\text{W}/\text{m}^2$ 程度の値を示すが、それ以南では値は非常に小さくなっている。一方、潜熱フラックスは、 20°N 以北では $100\text{W}/\text{m}^2$ 以上、以南では $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下となっている。 $24^\circ\text{N}\sim 28^\circ\text{N}$ でいずれのフラックスの値も大きくなっているのは、この付近で風速が $10\sim 13\text{m}/\text{s}$ と大きくなっているためであると考えられる。ポーエン比の緯度変化もはっきり現れており、北の海域では $0.1\sim 0.2$ 程度、一方南の海域では 0.1 以下となっている。今回得られた結果は、これまで得られている気候学的な値と大差はない(Perry and Walker, 1977)。またこのような方法で得られたフラックスの値と、従来3時間ごとの一般海上気象観測による方法で得られた観測値を用いて求めたフラックスの値とを比較した結果(藤谷・萩野谷, 1989)を見ると、今回の観測ではボナビ出港後通風乾湿計の湿球が故障したため潜熱フラックスを求めることができず、値の小さい顕熱フラックスのみで比較せざるを得なかったが、両者は概ね一致している。

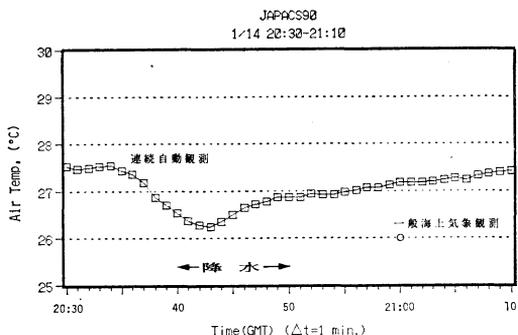
上記のように比較的短期間であるが試験観測が順調に実施できたので、JAPACS 89・90においてはより長期間の観測を実施した。観測はいずれも横須賀出港から神戸帰港までの約2カ月間にわたって実施された。観測は概ね順調に行われたが、通風乾湿計の湿球温度について点検したところ多少問題があることが明らかとなったので、湿度のデータについては、海洋科学技術センターによって収集された自動気象ステーション(アーンデラーAWS・2700)の湿度計による相対湿度のデータを使用した。解析方法はほぼJAPACS 87と同様である。フラックスは30分を基本単位として求め、これらの値から3時間平均値・日平均値を求めた。

第4図は、JAPACS 90における連続観測の資料と3時間ごとの一般海上気象観測の資料から得られた顕熱および潜熱フラックスの日平均値を比較した結果である。この場合観測船は約10ktで航行しているので、ここで求めたフラックスは、水平スケールにして約400kmの平均値に相当する。顕熱・潜熱フラックスのいずれにつ

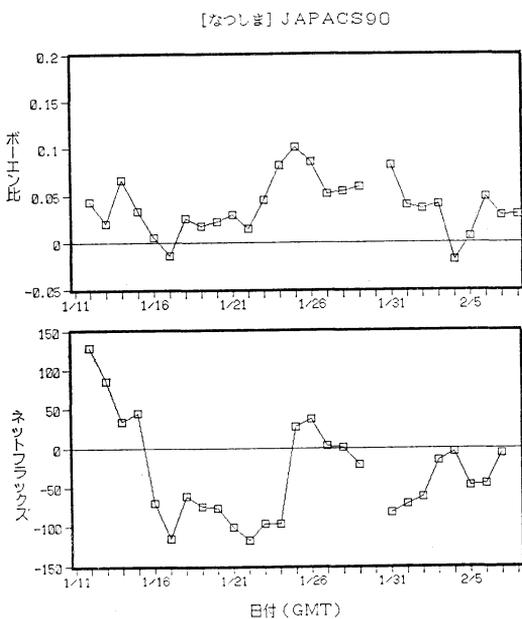


第4図 JAPACS 90 の熱帯海域で得られた日平均フラックスの比較。

いても概ね両者の値は一致しており、その平均偏差は顕熱フラックスについては $1.9\text{W}/\text{m}^2$ 、潜熱フラックスについては $17.8\text{W}/\text{m}^2$ となる。この期間の連続観測によるフラックスの平均値は、顕熱フラックスで $5.8\text{W}/\text{m}^2$ 、潜熱フラックスで $147.8\text{W}/\text{m}^2$ となっている。顕熱フラックスの場合に平均偏差の値が平均値に比較して多少大きくなっているが、顕熱フラックスの場合値そのものが小さいので、最終的に海面における熱収支などを求める場合にはあまり問題とならない。図からも明らかなように、1月13日の顕熱フラックスの値が両者で大きくずれている。この原因は、1日8回の一般海上気象観測のうち2回について、連続観測による気温と一般海上気象による気温の差がそれぞれ 2.8°C と 1.9°C もあるため(他の6回については $0.1\sim 0.9^\circ\text{C}$ 程度)、結果的に顕熱フラックスに大きな相違が生じたためである。このように気温に大きな差が生じる原因としては、一般海上気象が3時間ごとの離散的な観測値であるのに対し、連続観測は3時間の平均値であるため、例えば観測時刻の近傍においてごく短時間に遭遇する小さな擾乱によって生じる気温の降下が考えられる。例として第5図に1月14日の21時前後の連続観測による気温の変化(1分平均値)を示すが、一般海上気象観測の記事によれば20時40分から50分

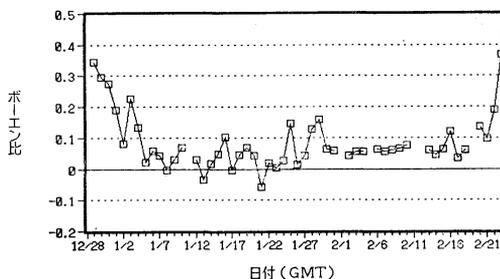
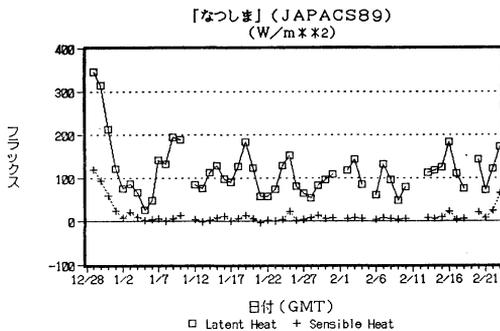


第5図 降水(擾乱)による気温降下の例。



第6図 JAPACS 90 の熱帯海域で得られたボーン比とネットフラックス(日平均値, 単位 W/m^2) の変化。

の間にしゅう雨が認められており、気温は10分間で $1^{\circ}C$ 以上降下し、その後緩やかに回復している。この連続観測値による3時間平均値(21時の前後1.5時間)は $27.6^{\circ}C$ となっている。一方、一般海上気象の観測値は $26.0^{\circ}C$ となっており、前後の値より明らかに低下している。この資料に基づいて顕熱フラックスを求めると、連続観測の場合は $10.4 W/m^2$ 、一般海上気象観測の場合は $28.9 W/m^2$ と、ほぼ3倍近く値が異なり、このような降雨による影響が顕著であることが分かる。このような降雨が熱帯海域でどのように分布しているかについて、例えば



第7図 JAPACS 89 の全航海期間で得られたフラックスとボーン比。

GATE の結果を見ると (Hudlow, 1979), B-SCALE (1辺165 km の六角形) における約20日間の平均的降雨パターンでは、 $0.6 mm/h$ 以上の降雨域が全体の1/3程度の面積を占めている。また空間的な gradient も非常に大きく、観測期間の積算では16 km で200mmの降雨量の差となっている場合も認められる。しかし先に述べた1月13日の場合には降雨も認められず、また短期間の気温の降下も認められないので、この場合に顕熱フラックスに差が生じた原因の詳細については不明である。

このようにして連続観測から得られたフラックスの値を用いて求めたボーン比と、海面における熱収支解析の結果を第6図に示す。ただし、第6図において海面における熱収支を算定する場合に必要な放射フラックスについては、Kondo and Miura (1983) の実験式を用いている。ボーン比の値は0.05前後の値を示している。一方海面におけるネットフラックスは概ね海洋混合層を温める向きに輸送されている。しかしその大きさは、中部熱帯太平洋海域の方が西部熱帯太平洋海域より大きい。

第7図はJAPACS 89において横須賀から神戸までの全観測期間について得られた顕熱・潜熱フラックスの日平均値とこれから求めたボーン比の変化を示してあ

る。横須賀出港直後は気温と海面水温の差が大きく、これにもなって顕熱・潜熱フラックスの値も大きくなっている。またボーエン比の値も 0.3 前後の値を示している。熱帯海域（1月12日～2月10日）では顕熱フラックスの値は非常に小さく、一方潜熱フラックスは概ね 100 W/m² 前後の値を示している。またボーエン比の値も 0.05 程度の値をとっている。

4. おわりに

広域海面からの顕熱・潜熱フラックスをバルク法を用いて連続的に求める方法について一つの提案を行い、これを実際の観測に適用した結果について述べた。得られた結果は一応満足のいくものであるが、今後解決しなければならないいくつかの問題点がある。その一つは、海面での熱収支を明らかにするためには放射フラックスを明らかにする必要がある。船上では上方からの放射の直接測定は可能であるが、海面からの放射フラックスの直接測定は困難である。したがって船上で短波および長波の正味フラックスを測定することには困難が伴う。特に一般船舶委託を前提にした無人自動化観測を考える場合には、測器が精密で耐久性に問題がある長波フラックスの測定は難しい。これまでは他の比較的観測が容易な気象要素から、間接的に放射フラックスを求めることが多い場合行われており、今回の海面熱収支の解析においてもこの方法を用いたが、COARE 計画で要求されているフラックスの観測精度を達成するためには放射フラックスの直接測定についても実施する必要がある。また、現在の観測システムでは測位データは観測航海終了後に手作業で別に入力しているが、いずれは NNSS あるいは NAVSTAR/GPS による測位データを船上で実時間でパソコンに取り込んで処理し、別に求めてある相対風速・風向のデータを用いることによって実時間で真風速・真風向を求めることができるようにする必要がある（これについては気象庁の海洋気象観測船啓風丸において実用化されている）。さらにこのようにして求められた気象要素の資料やフラックスの値を DCP (Data Collection Platform) を用いて静止気象衛星「ひまわり」を経由して伝送し、L-ADESS (国内気象資料伝送網) 経由で即時に結果を得ることができるようになる必要がある。今後はここで述べたような測器とデータ収録処理装置を一体化した簡単な観測用パッケージを開発し、これを一般船舶に展開する計画が必要とされる。これによって気候変動の研究にとって重要な広域の海面からのエネルギーフラックスの値を比較的簡単に、しかも実時間

で得ることが可能となる。

謝 辞

本研究は昭和62年度～平成元年度の科学技術庁科学技術振興調整費「太平洋における大気・海洋変動と気候変動に関する国際共同研究」によって行われた。研究の実施に当たり、色々とご指導頂いた研究推進委員会（委員長、松野東大教授）に対して感謝致します。

また、解析を行うに当たって、相対湿度の資料を提供して頂いた、海洋科学技術センターの宗山 敬博士と安藤健太郎氏に感謝致します。

参考文献

- Hastenrath, S., 1980: Heat Budget of Tropical Ocean and Atmosphere, *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 159-170.
- Hudlow, M.D., 1979: Mean Rainfall Patterns for the Three Phase of GATE, *J. Appl. Met.*, 18, 1656-1669.
- Iwasaka, N. and K. Hanawa, 1990: Climatologies of Marine Meteorological Variables and Surface Fluxes in the North Pacific Computed from COADS, *Tohoku Geophys. J.*, 33, 185-239.
- Kondo, J., 1975: Air-Sea Bulk Transfer Coefficients in Diabatic Conditions, *Boundary-Layer Met.*, 9, 91-112.
- and A. Miura, 1985: Surface Heat Budget of the Western Pacific for May 1979, *J. Met. Soc. Japan*, 63, 633-646.
- Perry A. H. and J.M. Walker, 1977: *The Ocean-Atmosphere System*, Longman Inc., New York, 160 pp.
- Reed, R.K., 1985: An Estimation of the Climatological Heat Fluxes over the Tropical Pacific Ocean, *J. Climate and Appl. Met.*, 24, 833-840.
- Weare, B.C., P.T, Strub and M.D. Samuel, 1981: Annual Mean Surface Heat Fluxes in the Tropical Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 705-717.
- Yasuda, N., 1981: Modification of Kondo's Formulas on the Bulk Transfer Coefficients of Turbulent Fluxes over the Ocean, *Tohoku Geophys. J.*, 28, 131-142.
- 住 明正, 1986: TOGA 計画の現状と今後の計画について, *天気*, 33, 233-235.
- 藤谷徳之助, 萩野谷成徳, 1989: 船舶を用いた広域海面からのエネルギーフラックス測定法, *月刊海洋*, 21, 434-439.
- 萩野谷成徳, 藤谷徳之助, 1990: 太平洋熱帯海域における大気境界層の熱収支, *天気*, 37, 397-408.