

成層圏プラットフォームによる地球環境観測構想 (第1報) —成層圏の気象条件—

佐々木保徳^{*1} 小山 登^{*1} 山本 浩文^{*1}

科学技術庁と郵政省との省庁間共同として、成層圏プラットフォームの研究開発により、成層圏からの通信・放送、及び地球環境観測が計画されている。本報告は、地上から10～50kmの高度にわたり存在する成層圏のうち、成層圏プラットフォームを運用するのに適するとされている下半層の気象について、赤道域から中緯度域で議論したものである。最も重要な気象パラメーターは風速であるが、25m/s以上の風速の年間出現頻度は低緯度ほど低く、打ち上げは低緯度が望ましい。滞留観測も低緯度ほど有望である。ただし、滞留観測ではなく、気流に載せて移動観測を行う場合はこの限りではない。

キーワード：成層圏プラットフォーム，グローバル観測，成層圏の気象

Global Environmental Observation Initiative from Stratospheric platform (1st report) — Meteorological condition of Stratosphere —

Yasunori SASAKI^{*2} Noboru KOYAMA^{*2}
Hirofumi YAMAMOTO^{*2}

A Multi-purpose Stratospheric platform initiative is being undertaken in an interministerial collaboration between the Science and Technology Agency and the Ministry of Posts and Telecommunications in Japan. Communications, broadcasting and global environmental observations are expected to be the main application fields. This report discusses meteorological conditions over the region from the equator up to mid-latitude areas in the lower part of the Stratosphere, which exists between altitudes of 10 and 50 Km, since this part is expected to yield good results for operation of the platform. As for wind velocity, which is the most important meteorological parameter, an annual occurring 25 m/s or higher wind velocity increases with latitude, therefore, it is thought that launching of the Stratospheric platform in the lower latitude area as well as stationary observation would prove more successful. Accordingly, running observation with atmospheric current is excluded from this discussion.

Key Words : Stratospheric platform, Global observation, Stratospheric meteorology

*1 海洋観測研究部

*2 Ocean Research Department

1 はじめに

人間活動や社会経済システムの急速な進歩と複雑化に伴い、国民生活、企業活動、行政等のための迅速で正確な情報の伝達は今後ますます必要不可欠な社会的基盤となることは明らかである。そのためには、大容量の高速通信網の構築が必要不可欠となる。

一方、地球温暖化に代表される地球環境の崩壊は、人間活動の活発化に比例して進み、人間活動と表裏一体の関係にあり、この全人類的課題に対応するための地球環境科学研究は、今や革新的観測技術の登場を待望している。

このような背景の下、郵政省と科学技術庁は、省庁間共同プロジェクトとして、高度約20Kmの成層圏に滞留、あるいは必要に応じて適当に移動させることが可能な成層圏プラットフォームの開発、及びこのプラットフォームを利用したミリ波通信を始めとする通信・放送や、地球環境観測等のための技術の開発を共同で進めている。このプロジェクトにおいて、科学技術庁は主として成層圏プラットフォームの船体や制御技術の開発、及び地球環境観測技術の開発を分担している。これを受けて、海洋科学技術センターでは、海洋環境を中心に成層圏プラットフォームの特長を生かした地球環境の効率的観測法を検討するとともに、そのための観測用センサーの開発を宇宙開発事業団とともに進めている。

そこで、本報では、地球環境観測の上で最も効果的と考えられる成層圏プラットフォームの活用法や、成層圏プラットフォームによらなければ実現しない観測等につき構想を順次議論する予定であるが、第1報では、まず成層圏の気象学的特徴について議論する。

2 成層圏プラットフォームによる地球科学的観測の目的

2.1 成層圏から観測することの意義

通信・放送や地球観測のためのプラットフォームは、安定であることが基本的条件である。成層圏は、対流圏と比べて鉛直対流がほとんどない上に、風も比較的弱いと言われている。また、成層圏の上の層である中間圏以上の層では、さらに気圧が低い。成層圏プラットフォームの打ち上げが予定されている20~22Kmの高度でさえ、気圧が地表気圧の約15分の1であり、通信・放送や地球観測のための機器類を十分に搭載できるほどのペイロードを確保することはさらに困難となる。

一方、地球環境の観測で用いられているプラットフォームの代表的なものは、人工衛星、航空機、船舶、ブイ

等である。しかし、特に人工衛星と航空機との間の高度差は著しいものであり、両者における地表の解像度やカバレッジには大きな開きがあって、両者による観測結果を直ちに比較することにやや困難を伴う場合も少なくない。また、人工衛星の観測データを解析するためのアルゴリズムの開発に必要な放射伝達モデルの開発等においても、人工衛星と航空機との間に大きな高度差があることや、両者が定点滞留による長時間観測が困難であることなどの理由から、人工衛星と航空機の間成層圏プラットフォームが入ることになればその意義は大きい。

Fig. 1 は、人工衛星、成層圏プラットフォーム、及び航空機の間で、観測規模と観測精度を定性的に比較したものである。ただし、観測規模や観測精度はセンサーにもよるため、これにあてはまらないものもある。Fig. 1 に示すように、成層圏プラットフォームは人工衛星と航空機の間であって、規模と精度の上から人工衛星と航空機を補完するとともに、新しいリモートセンシング分野及び地球科学的観測分野を開くことが期待される。例えば、最も期待される分野の一つである大気～海洋間相

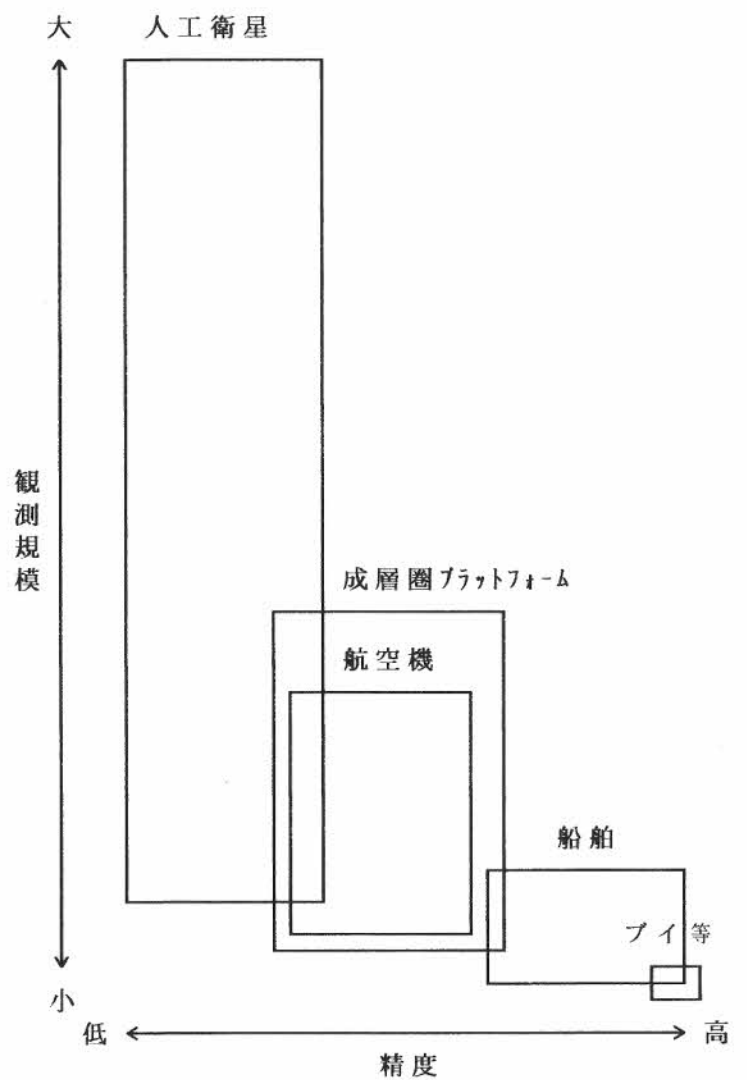


図1 種々のプラットフォーム間での精度とカバレッジエリアの相対的比較

Fig. 1 Relative comparison of accuracy and coverage area among various platforms

相互作用過程の観測では、大気～海表面間での水蒸気などの水、潜顕熱、放射熱、運動量等の交換過程の観測が中心となる。これには、これまでに主として人工衛星搭載のマイクロ波放射計等が利用されてきたが、大気～海表面間の相互作用が最も活発な西部熱帯赤道域では島嶼が多く、ビーム幅が広いマイクロ波放射計では島嶼の影響が避けられないし、また特定地域の連続観測も難しい。しかし、成層圏プラットフォームの利用により、これらの問題の解決が期待される。

また、定点滞留観測や、頻度の高い反復観測、観測対象により近接した位置からの観測等が可能であると期待されることから、衛星データ解析の基本となる正確な放射伝達モデルの開発にも大きく貢献することが期待されることは再度述べておきたい。

さらに、成層圏プラットフォームを利用すれば、成層圏や成層圏での直接観測や試料サンプリング（現在検討中のオンボード分析も含めて）も可能となることが期待

表 1 人工衛星、航空機、及び成層圏プラットフォームの長短所の比較

Table 1 Comparison of merits and demerits among satellite, aircraft and stratospheric platform

プラットフォームの種類	長 所	短 所
人工衛星	①広域を瞬時にカバーできる ②長期にわたり反復観測が可能である ③プラットフォームが気象条件に左右されない。	①連続観測が困難で、変化の早い現象や、特定の現象の追跡観測が困難である（ただし、気象衛星「ひまわり」等による連続観測は行われている） ②大規模な打上げ施設、地上支援施設、用地、要員、広域安全地域等が必要である。 ③一部のセンサーを除き、地表解像度が低い。 ④故障が発生した場合や寿命が尽きた場合も回収が不可能である。
航空機	①特定地域、特定現象の反復観測が可能である ②高精度で、地表解像度の高い観測が可能である ③突発的現象に対する機動的対応が可能である	①準広域をカバーすることが可能である ②プラットフォームの姿勢が不安定であり、特に精密干渉型センサーには不向きである。 ③移動現象の同期追跡観測がやや困難である（例えば、熱帯性低気圧等）
成層圏プラットフォーム	①特定地域、特定現象の反復長期連続観測が可能である ②移動現象の長期追跡観測が可能である（例えば熱帯性低気圧の変質過程等）。 ③定点滞留観測が可能である ④高精度で、地表解像度の高い観測が可能である。 ⑤姿勢が安定である ⑥突発的現象に対する機動的対応が可能である ⑦機体、センサーともに回収修理、反復利用が可能である ⑧観測中のプラットフォームが気象条件の影響を受け難い。	①船体が大型でしかも脆弱であり、取り扱いが面倒である。 ②地上での大型格納庫、大型整備場、広い浮揚収納場所等が必要である。 ③船体封入用低密度の特殊ガスが大量に必要である。 ④ペイロードを大きくするため船体や電源の軽量化が必要である。

される。

Tab. 1 は人工衛星、航空機、及び成層圏プラットフォームの長所と短所を比較したものである。Tab. 1 に示した成層圏プラットフォームの特徴の中で最も重要なものは、やはり長時間にわたる特定地域の連続観測で、地球環境現象の発生から発達、衰退までの一連の過程の追跡観測に対する可能性であろう。なお、地球環境観測への成層圏プラットフォームの応用の可能性については、大規模過程から小規模局所過程まで第 2 報以降において詳細に議論する。

2.2 成層圏の気象条件

2.2.1 成層圏の概要

Fig. 2 は、大気の構成を示したものである。地表から高度約10Kmまでは対流圏（Troposphere）と呼ばれ、大気の鉛直対流が盛んでこの名がある。降雨や熱帯性低気圧などの現象が現れるのもこの圏の特徴である。高度約10Kmから約50Kmの圏が成層圏（Stratosphere）である。

対流圏と成層圏の境界面は対流圏界面と呼ばれる。対流圏界面高度は緯度によっても変わり、赤道域で平均約10Kmで、極域では約 8 Kmである。また、対流活動が季節によって強弱変動を示すため、圏界面高度も季節によって変動し、冬期の日本周辺では 8 Km程度まで低下する場合がある。このように、対流圏海面高度は変化しやすく、18Km程度に達することも珍しくない。

成層圏では、気温は対流圏界面から中間圏界面に向か

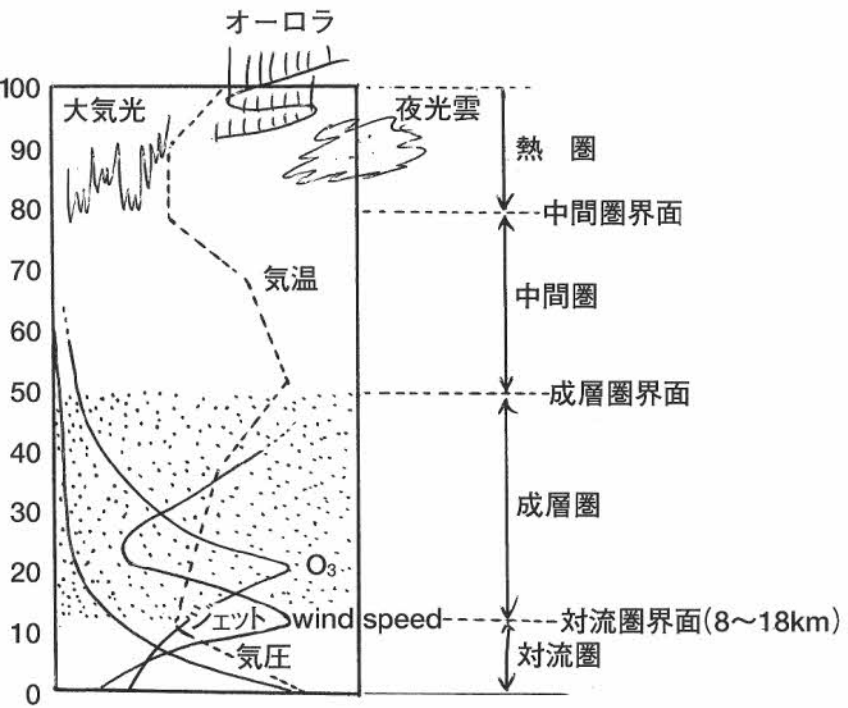


図 2 標準的大気の構造
Fig. 2 Model atmosphere

って少しずつ上昇するが、基本的には230～300K程度である。成層圏には鉛直対流がほとんどなく、成層しているためにこの名がある。成層圏には、Fig. 2 に示すようにオゾンが分布し、その極大層は高度約25Km程度にある。近年、大気中に放出されたフロンガス等によるオゾン層の破壊が進行しており、地表に到達する太陽放射中の紫外線量の増大が社会問題となっているが、オゾン量を標準状態(0℃, 1気圧)に換算するとせいぜい数mm程度の厚さである。鉛直対流が存在しない、あるいは弱いいため、成層圏下部に到達したフロンガスやエアロゾル等の成層圏内での拡散は主として分子拡散によっている。したがって成層圏全体に拡散するには時間を要する。

鉛直方向の対流は弱い、水平方向には風が吹いている。秋から春は西風、夏は東風が吹き、風向の転向時期は初夏や初秋であることがわかっている。また風速は、初夏から初秋にかけては比較的小さいが、秋から春にかけては強く、平均して15～20m/s程度である。また、緯度が高いほど夏期の風が弱い反面、秋から春の風は強いこと、年間を通しては、35m/sを越える風速も観測され、緯度が高いほど発生頻度も高くなることが知られている。

さらに、成層圏の上には中間圏(Mesosphere)が存在し、成層圏との圏界面は成層圏界面と呼ばれ、高度は約50Kmである。成層圏海面高度にもやはり変動があり、50Kmから55Km程度の範囲で変動している。その上には、熱圏が存在し、同様に中間圏と熱圏との境界面は中間圏海面と呼ばれている。

以下においては、熱帯域から中緯度域における高度25Km以下の下層成層圏の気象条件について議論する。したがって、以下の議論においては、全層とは成層圏の下半分の層の全体を指し、上層や下層はそれぞれ下半分の層のさらに上半分と下半分を指す。議論のためのデータは、1996年に気象庁が観測したものと、海洋科学技術センターが1997年と1998年にかけて観測したものをを用いた。気象庁のデータは札幌、館野、鹿児島、那覇、及び南鳥島で観測したものであり、海洋科学技術センターが海洋地球観測船「みらい」で、赤道域から沖縄沖にかけて観測したものである。Fig. 3 はこれらの観測点をまとめて示したものであり、Fig. 3 の中の赤道域から沖縄沖の海域における観測点はFig. 4 (a)～(f)に示してある。

2.2.2 成層圏の風向

Fig. 5 (a)～(e)は、1996年1月1日から12月31日までの風向で、それぞれ札幌、館野、鹿児島、那覇、南鳥島のものである。また、Fig. 5 (f)～(k)は、Fig. 4 に示す海域

においてFig. 4 に掲げた時期に観測したものである。

Fig. 5 (a)～(e)に示すように、札幌と館野での成層圏風は、年間を通じて全層にわたりほとんど西風で、1月から夏期にかけて時々北風が現れる。これに対して、鹿児島、那覇、南鳥島では、年間を通じて西風が卓越するが、夏から秋にかけては東風が現れる。この東風が現れる日数は鹿児島、那覇、南鳥島の順に高くなる。

一方、沖縄沖から赤道にかけての風向は、成層圏全層にかけて一定ではない。沖縄沖では、成層圏の下層で年間を通じてほぼ北から西の風であるが、上層ではほとんど東風である。ところが、赤道域であるFig. 5 (i)～(k)では、年間を通じて下層でほとんど東風で、上層では西風や北風が現れて複雑である。これらの中間域といえるFig. 5 (g)では、初夏から晩秋にかけて西風が全層にわたって吹くが、それ以外の時期の風向は複雑である。Fig. 5 (h)でも全層にわたって複雑である。ただし、Fig. 5 (f)～(k)では観測時期が異なることに注意する必要がある。

2.2.3 成層圏の風速

Fig. 6 (a)～(k)は、風速を示したもので、観測地点や観測時期はFig. 5 (a)～(f)と同じである。Fig. 6 (a)～(e)における成層圏の白色部分は、風速が30m/s以上の層である。Fig. 6 (a)～(e)から明らかなように、札幌、館野、鹿児島、那覇、南鳥島のいずれの地点でも、秋から夏にかけて、成層圏界面である高度10Kmから(ただし、鹿児島では対流圏の上部から)高度18～22Kmまでの間では25m/s以上の強風が吹いている。この風が吹く期間は緯度が高いほど長く、札幌ではほぼ年間を通じて吹いているのに対して、緯度が最も低い南鳥島では4ヶ月程度である。また、館野を除けば、約22Km以上の高度では、風速が20m/s以下になり、特に鹿児島では年間を通じて大部分が5 m/sとなる。

一方、Fig. 6 (f)～(k)を組み合わせると3月から8月の間の観測ということになるが、この間の沖縄沖から赤道域にかけての成層圏風速は、Fig. 6 (a)～(e)に示した中緯度帯に比べて25m/s以上の風速の出現頻度はかなり低くなる。特に5～6月の沖縄沖では、成層圏のほぼ全層にわたって15m/s以下の風速が卓越する。

これらの観測から、緯度が低いほど成層圏における強風の出現頻度が小さくなることがわかる。

2.2.4 成層圏における風向と風速の関係

Fig. 7 (a)～(f)は、Fig. 5 (a)～(k)とFig. 6 (a)～(k)とを組合わせたもので、各図の観測地点と時期はFig. 3 に同じ

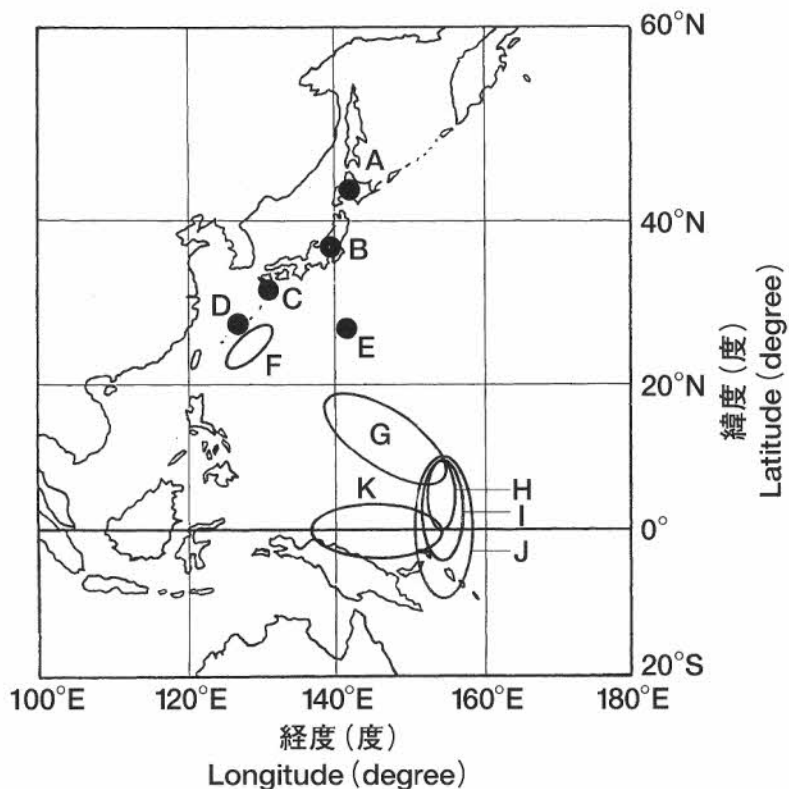


図3 解析に用いたデータの観測地点

Fig. 3 Observation sites of Atmospheric data

A : 札幌 (Sapporo) Jan. 1~Dec. 31, 1996

B : 館野 (Tateno) ibid.

C : 鹿児島 (Kagoshima) ibid.

D : 那覇 (Naha) ibid.

E : 南鳥島 (Minamitorishima) ibid.

F : 沖縄沖 (off Okinawa) May. 24~Jun. 3, 1998→Fig.4(a)

G : 亜熱帯域 I (Subtropical Area-I) Jun. 9~Jun. 13, 1998→Fig.4(b)

H : 熱帯域 I (Tropical Area-I) Jun. 13~Jun. 23, 1998→Fig.4(c)

I : 熱帯域 II (Tropical Area-II) Aug. 6~Aug. 11, 1997→Fig.4(d)

K : 熱帯域 III (Tropical Area-III) Mar. 8~Mar. 22, 1998→Fig.4(e)

L : 熱帯域 IV (Tropical Area-IV) Aug. 8~Aug. 23, 1997→Fig.4(f)

気象庁観測JMA

海洋科学技術センター「みらい」による観測JAMSTEC

である。

Fig. 7 (a)~(e)から明らかなように、成層圏の風速は札幌から南鳥島まで、0 m/sから30m/sの風まですべての風速の風が観測されるが、緯度が高いほど西風や北風が卓越し、緯度が低いほど南風や東風が卓越することがわかる。

また、Fig. 7 (f)~(g)では、沖縄沖から赤道帯にかけての3月から8月の成層圏風は、上層と下層で向きが異なる場合が多いことがわかる。沖縄沖から赤道帯の北部 (Fig. 4 の(a)~(c) ; 5~6月) では上層部で東風、下層部で西風や北風であるのに対して、赤道帯 (Fig. 4 (d)~(f) ; 3月と8月) ではこれと全く逆の関係になっている。

2.2.5 気温

Fig. 8 (a)~(f)は、気温の鉛直プロファイルと比較したものである。観測地点と時期は、やはりFig. 3に同じである。

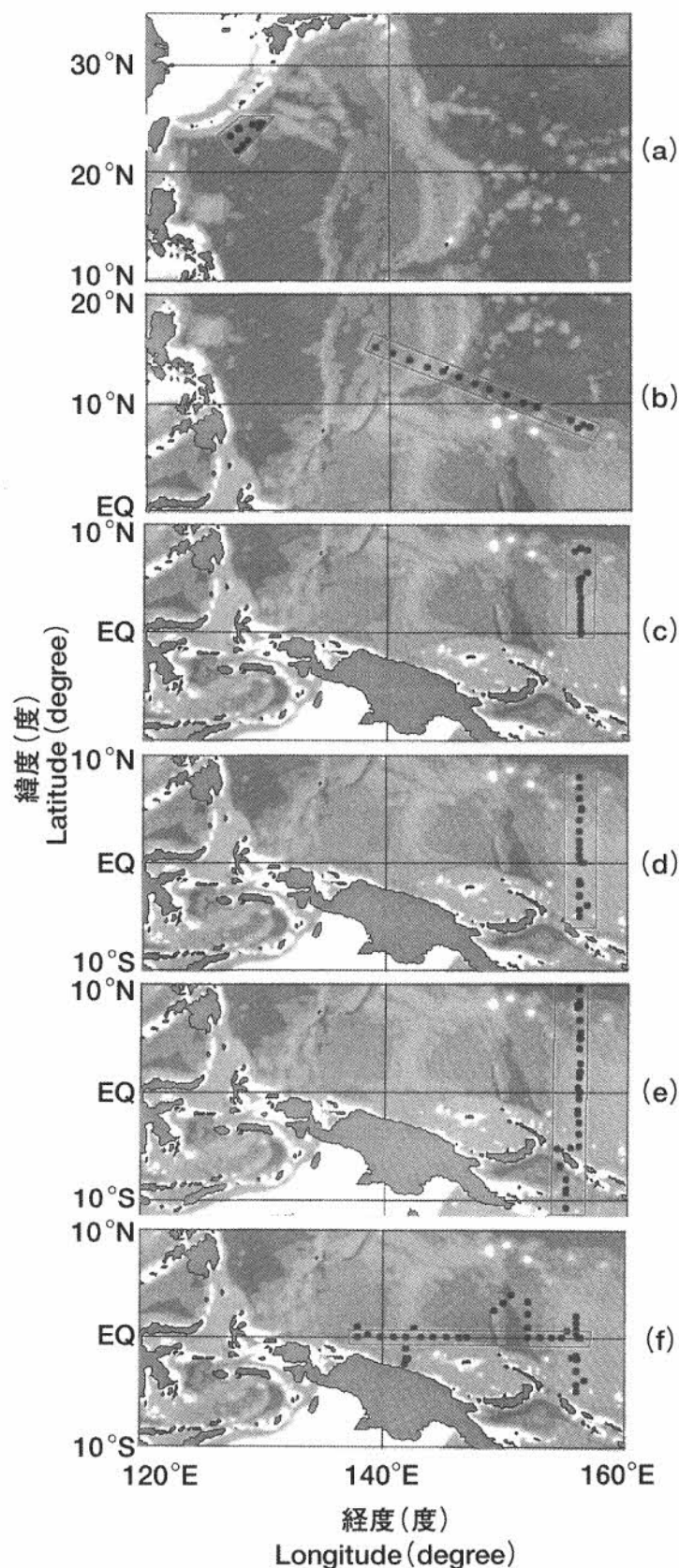


図4 赤道太平洋域における船舶観測点

Fig. 4 Ship Observation site in equatorial Pacific area

Fig. 8 (a)~(e)から明らかなように、気温から、札幌と館野では圏界面が夏期に上昇し、冬期に低下しているのがわかる。年間の成層圏温度はいずれの地点とも、全層を通じてほぼ-40~-80℃である。また、Fig. 8 (a)~(k)では、観測期間が短いため、長期的変動を観察することはできないが、成層圏は温度的には不規則変動は小さく、気温はやはり-40~-80℃である。このことから、中緯度帯から熱帯では、成層圏の気温は緯度や時期によらず-40~-80℃であることがわかる。

Fig. 9 (a)~(k)は、高度ごとの温度の幅を示したもので、Fig. 9 (f)~(k)では併せて露点温度も示してある。Fig. 9

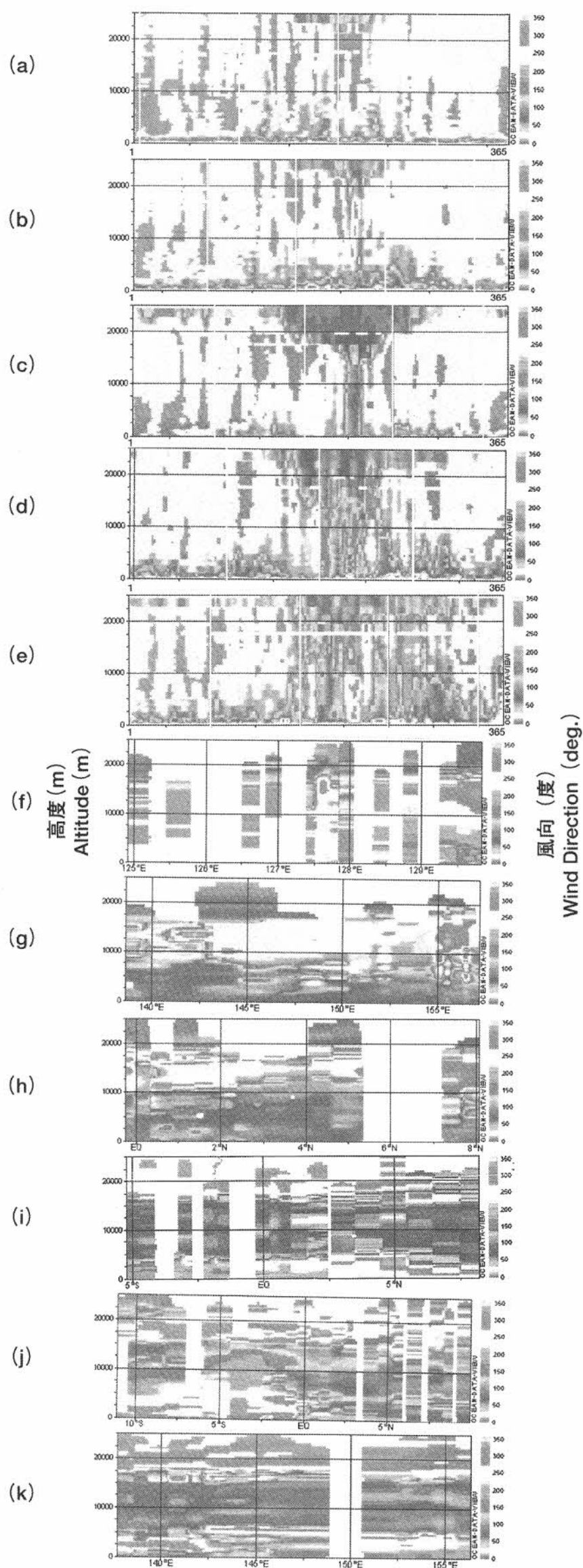


図5 赤道域から中緯度域における風向の比較

Fig. 5 Comparison of variability in wind direction over the area from equatorial Pacific Ocean up to mid-latitudes

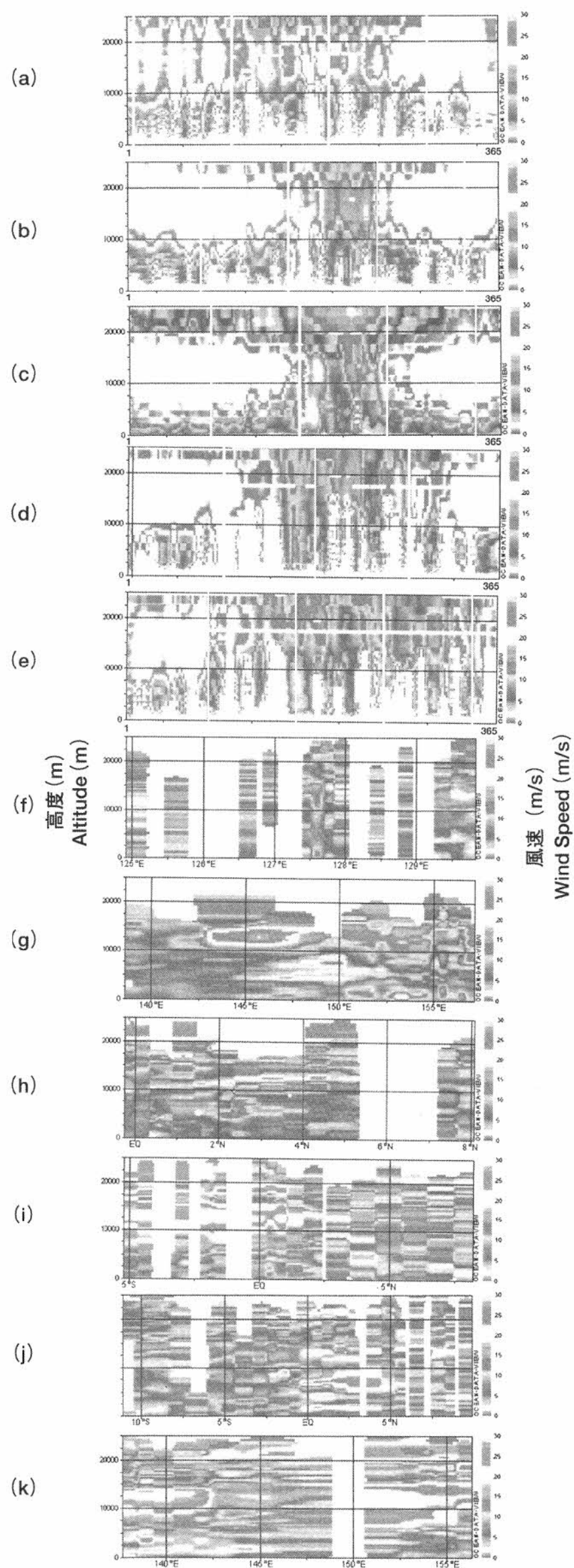


図6 赤道域から中緯度域における風速の比較

Fig. 6 Comparison of variability in wind speed over the area from equatorial Pacific Ocean up to mid-latitude areas.

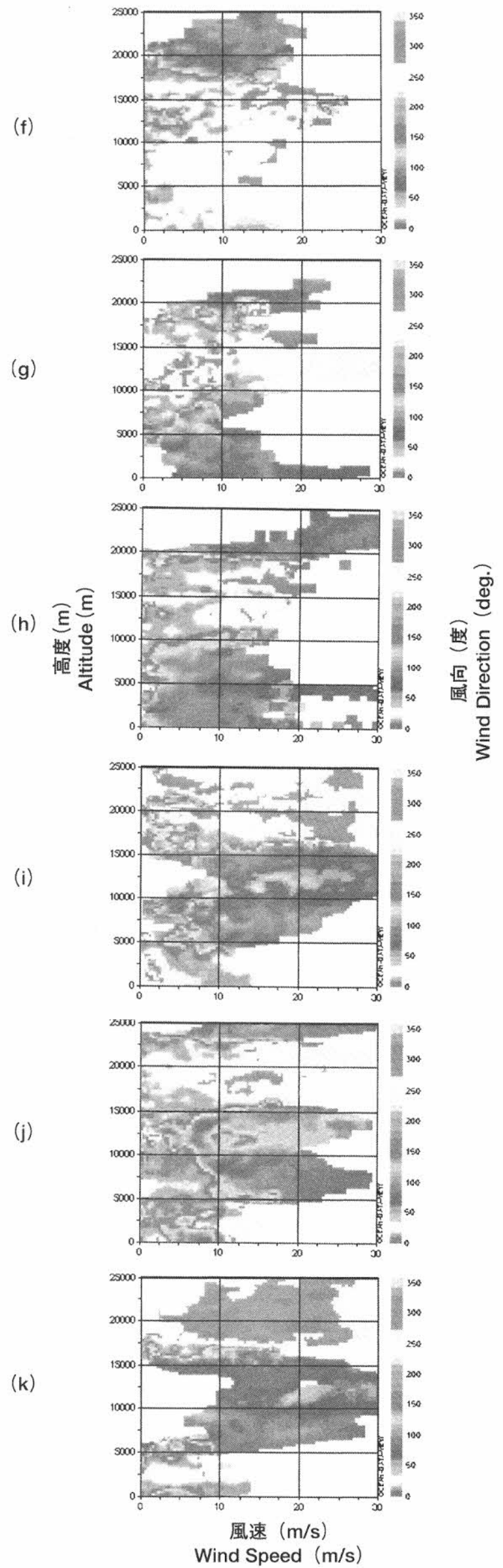
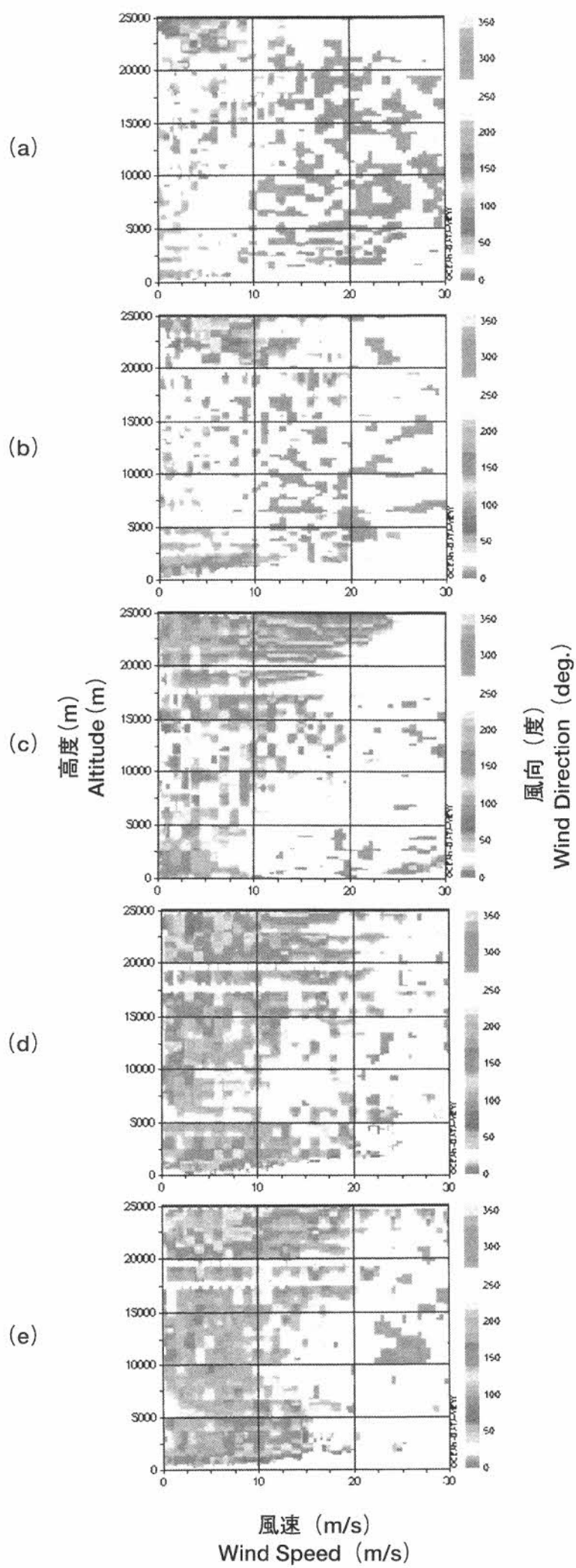


図7 風速と風向の同時比較

Fig. 7 Combination of wind speed and direction from Figs. 5 and 6 for comparison

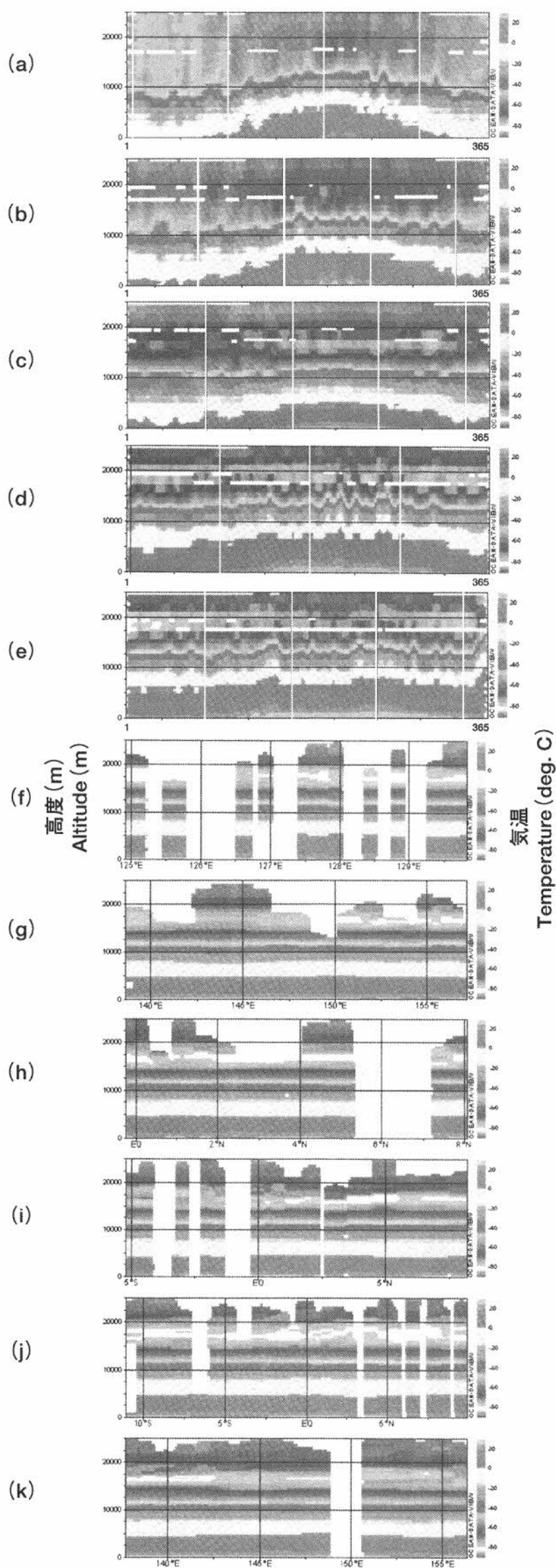


図8 赤道域から中緯度域にかけての気温の鉛直分布変動の比較
Fig. 8 Comparison of variability in atmospheric temperature over the area from equatorial Pacific up to mid-latitude areas

(a)～(e)では、緯度が高くなると成層圏温度も高くなる傾向にあるが、Fig. 9 (f)～(k)ではほとんど明らかな差異はなく、Fig. 9 (a)～(k)は全体的に上で述べた成層圏の気温変動の幅を裏付けている。

2.2.6 オゾン分布

Fig.10(a)～(d)は、オゾン分圧の鉛直分布の観測結果で、それぞれ札幌、館野、鹿児島、那覇において観測したものである。Fig.10(a)～(d)から明らかなように、分圧のピークの高度は緯度によらないが、変動の幅は緯度が高いほど大きいことがわかる。

また、Fig.11(a)～(d)はFig.10(a)～(d)をもとに地表からのオゾンの累積分布を示したものである。Fig.11(a)～(d)から明らかなように、累積分布の変動幅は緯度とともにやや大きくなることがわかる。また、全オゾンの80%が高度約25Km以下に存在することがわかる。

現在予定されている成層圏内の20～22Kmの高度に成層圏にプラットフォームを打ち上げる時と滞留させる場合、上で議論した気象パラメーターの中で最も重要となるのは、風速である。2.2.3で議論したように、25m/s以上の風速が現れる割合は緯度が高いほど大きい。札幌では、ほぼ年間を通じて25m/s以上の風速が現れるが、那覇や南鳥島では、年間の半分程度である、したがって、打ち上げ、滞留観測では緯度の低い地域よりも高い地域が問題となる。これに対しては、打ち上げは緯度の低い所で行い、必要により高緯度帯へ回航するのが得策であろう。

風速以外の成層圏における気象条件は上に述べたとおりであるが、限られた時期のデータを用いて議論しているので、必ずしも平年的な特徴を把握しているとはいえないものもある。今後さらに多年にわたるデータを収集し、さらに一般的な成層圏の気象条件を明らかにする必要がある。これらは、成層圏プラットフォームの打ち上げ、滞留観測というよりもむしろ地球観測の上で重要な問題である。

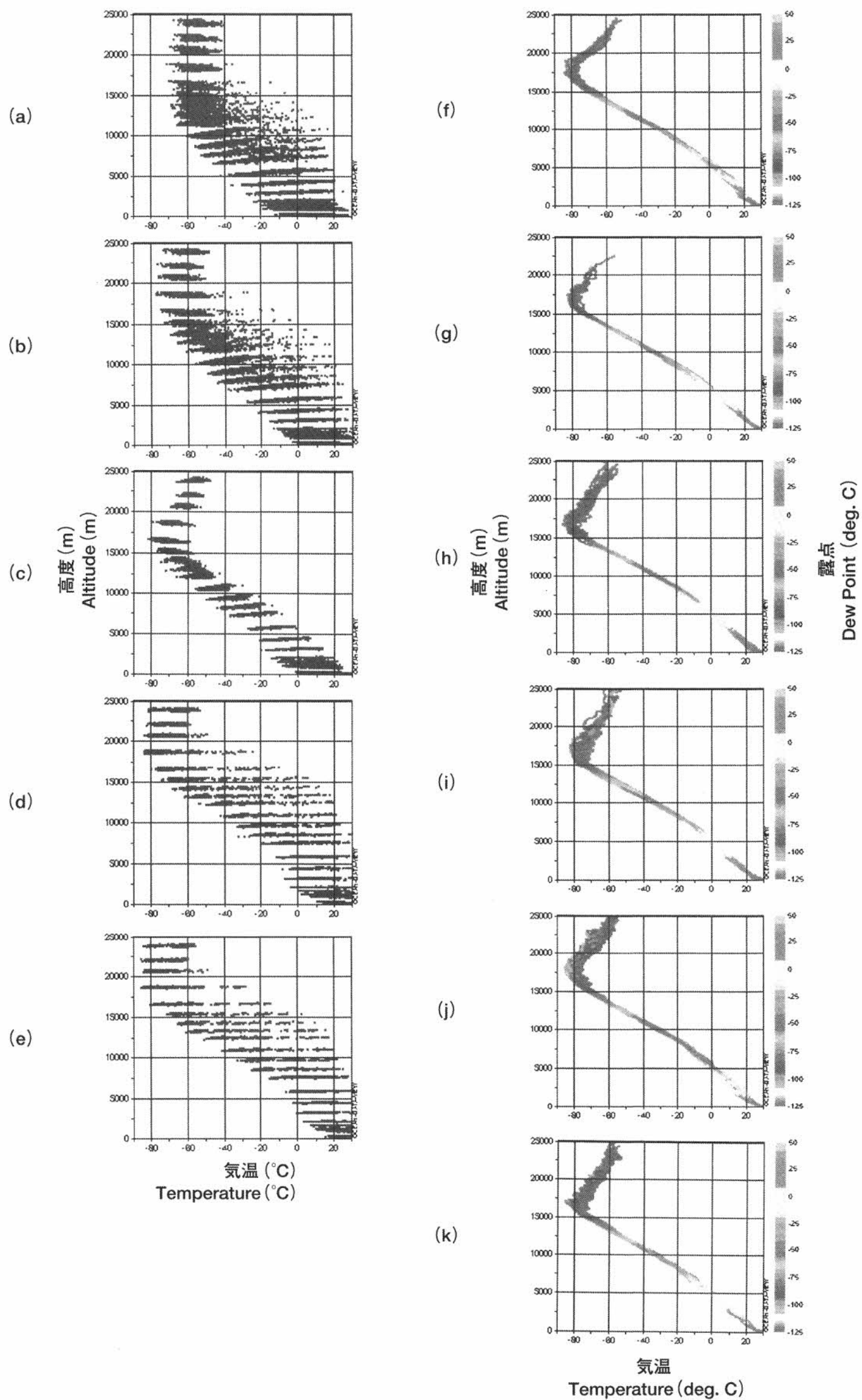


図9 赤道域から中緯度域にかけての気温の鉛直分布変動，及び赤道域における露点変動の比較

Fig. 9 Comparison of variability in atmospheric temperature with altitude in mid-latitude area, and in dew point with altitude in equatorial Pacific Ocean

3 おわりに

今回は、成層圏プラットフォームの打ち上げ、滞留観測という点から成層圏の気象条件を議論したが、見方を変えて観測という立場からの議論も必要である。その場合、地表面観測や対流圏観測ならば成層圏プラットフォームがどの高度にあらうともさして問題ではない。高度が問題となるとすれば、やはり成層圏自身の観測の場合であろう。折しも、最近のオゾンの減少は、単に紫外線の遮蔽効果の低下だけでなく、成層圏での太陽放射吸収の低下からくる成層圏温度の低下に引き続き、成層圏の放射減少による対流圏上層の気温低下、気象や気候の変化という一連の変動が危惧され、シミュレーション等でも予測を行っているところであり、現象第2報以降では、大気や地表面の観測構想と併せて成層圏も観測対象の一つとして考えてみたい。

参考文献

- 1) 高層気象観測年報，気象庁．(1996)
- 2) オゾン層観測年報，気象庁．(1996)
- 3) 田中俊逸・竹内浩士：地球の大気と環境，三共出版．(1997)
- 4) 岩坂泰信：オゾンホール ―南極から眺めた地球の大気環境―，裳華房．(1997)

(原稿受理：1999年2月19日)