

D-3 衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究

(4) クロロフィル分布に係わる大洋規模の流動構造の研究

研究代表者

気象研究所海洋研究部第1研究室 遠藤昌宏

運輸省 気象庁 気象研究所

海洋研究部	第1研究室	遠藤昌宏・小畑淳・北村佳照・山中吾郎
気候研究部	第4研究室	本井達夫
地球化学研究部	第1研究室	野木義史

平成5-7年度合計予算額	6,319 千円
(平成7年度)	1,575 千円)

[要旨]

本サブテーマでは、海面クロロフィル分布に代表される海洋の一次生産性と海洋の物理環境との関連を明らかにするために、次の研究を行った。

(1) 海洋表層大循環および海洋表層(～300m深)混合層の水溫・塩分・密度構造の氣候値が表現できる全球流動モデル(2.5°x2°x21層)を開発した。

(2) 植物プランクトンの光合成に関わる生物活動域である海洋有光層の物理環境(湧昇流、混合層深度、短波放射透過深度)と、海面からの可視光強度の衛星観測データとの関係を全球で比較した。海上風データ(Hellerman & Rosenstein, 1983)と現場観測海面水溫・海面塩分データ(Levitus, 1982)を与えた流動モデルの計算結果、現場海洋(物理)観測データ(Levitus, 1982)および衛星海色データ(CZCS)の3者について、それぞれの、年平均値・各月平均値について比較検討を行った。

(3) その結果、①年平均値については、海上風による海面近くの湧昇流分布がクロロフィルの海盆スケールの分布によく対応すること、②月平均値については、Sverdrup(1953)の臨界深度で整理した混合層深度の変動が海盆スケールの植物プランクトンのブルームの時期・海域にとって重要であることが定量的に示された。

世界海盆スケールで整理された同質のデータセットによる植物プランクトン分布と海洋物理量の比較研究はこれが初めての試みである。また、流動モデルによる3次元物理環境データとの組み合わせによる比較研究もこれが初めてである。この比較研究により、43年も前に提案されたSverdrupの臨界深度理論の有効性が確かめられたことは予期しなかった成果であった。

本研究により、次の段階として、クロロフィルの生態数学モデルを海洋流動モデルに組み込んだ全球海洋クロロフィルモデルの可能性が示唆される。

[キーワード] 流動モデル、表層混合層、季節変動、プランクトン分布、ブルーム

1. 序

人間活動の影響は、近年、大陸棚などの広域海洋にまで拡大しており、このような海域の環境を評価する必要性が増大している。海域が広大でかつ時空間変動が顕著なため、従来の海洋観測では時間的空間的な頻度が不十分である。このため、人工衛星取得のデータを海洋環境の評価指

標として利用するための研究開発が必要となっている。クロロフィル量は、海域の一次生産力をあらわしているから、栄養塩等の海洋環境要素と相関をもっている。したがって、衛星可視域データの利用技術は、広域海洋環境の評価にとって必須の技術である。衛星取得量はある深度までの二次元的な光学的情報であるから、これを海洋環境の指標とするためには、衛星データ処理システム、大気補正手法、モデリング手法、海域グラウンドトルスサンプリング手法、鉛直分布の類型化手法等、いくつかの開発・研究プロセスが必要になる。

本サブテーマでは、衛星可視域データによる広域海洋のクロロフィル分布と地球規模海流モデルで求めた流動場とを比較し、植物プランクトン分布と表層混合層の構造の相互関連を明かにすることを目的とする。そのため、スーパーコンピュータを用いて、海洋の表層の流動に主眼をおいた海洋流動モデルを開発し、鉛直混合、下層からの湧昇などの現象を再現する。

2. 流動モデルの開発

クロロフィルなどのように、ほとんど海水の移動にともなって流動し、なおかつ、生物・化学物質固有の化学反応によってその濃度が変わる有機物・無機物の時間-3次元分布を定量的に理解することが最終の目的である。そのために、後者の生物化学・光学過程の定量的理解のほかに、海水の移動を支配する物理的要因、生物化学的環境を変化させる物理的要因をおさえることが重要である。

クロロフィルの流動モデルによる実証的な研究を行う前に、クロロフィルの分布に左右されない、物理環境の変動とクロロフィルの分布の相関を調べる。そこで、クロロフィルの分布に関係すると思われる物理環境とそのパラメータ（海洋表層流動、海洋表層混合層・冷却対流層、鉛直混合係数、鉛直流、湧昇流水の起源水深、直達日射量など）を調べることの出来る流動モデルを作る必要がある。今後、地球規模のデータが数年以上にわたり、日々モニター出来ることを考えると、流動モデルは全球が望ましい。

そこで、平成4年度は、その第1歩として、全球海洋流動モデルに海洋表層混合層モデルを埋め込んで、そのパフォーマンスを調べた。モデルは、東西 2.5° ・南北 2° の水平格子間隔で、鉛直21層（図1）の格子点を持ち、現実の海岸・海底地形（図2）を含んだ全球海洋を対象とする。混合層モデルは、その時点での鉛直密度勾配、水平流の鉛直勾配、海面での風の応力から診断的に推定される渦エネルギーの鉛直分布をもとにして、鉛直渦拡散係数と鉛直渦粘性係数を決定するものであり（メラー山田レヴェル2：Mellor & Yamada, 1982¹⁾）、この2つの係数から、新たな水温、塩分、流れを予測する。

3. 年平均外力による流動モデルの開発²⁾

平成4年度は、主に、海洋表層混合層モデルと海洋表層流動モデルのパフォーマンスを調べることを目的とした。そのため、モデルの駆動力として、すべて年平均の外力のデータセット、即ち、Hellerman and Rosenstein(1983)³⁾の海上風と現場海洋観測気候値(Levitus, 1982)⁴⁾の海面水温、海面塩分を使った。準定常になるまで積分を続け（1500年）、その後、データの解析を行った。

図3は、海面付近での鉛直流の分布である。この分布は、与えられた海上風の応力とコリオリの力によってほとんど決まる。熱帯、高緯度帯での湧昇流、中緯度帯での沈降流が表現されてい

る。湧昇域が人工衛星の海色データ（CZCSデータ：1978年11月～1986年6月計7.5年分⁵⁾⁶⁾、図4はその全平均）から見た海洋の一次生産性の高い海域によく対応している。

図5は、同様に、海面付近での鉛直混合係数の分布である。平均的に東西風の強い偏西風帯と偏東風帯に20～60cm²/sの大きい値が出ている。

その他、水平流動場、対流混合場、混合層深度の分布を見て、ほぼ合理的な物理量の分布を得た。ただ、上層部の鉛直分解能が約5mとやや粗いため混合層深度がやや浅めにでている。また、格子の水平分解能が悪いことと年平均の海面水温値を使ったため、亜熱帯循環の東向流（北太平洋では、黒潮続流）が高緯度まで広がり、高温水が高緯度まで運ばれ冷却される結果、活発な鉛直対流が生じる点は非現実的である。

4. 混合層深度の全球分布とその季節変動：季節変動外力による流動モデル⁷⁾

平成5年度には、年平均外力のかわりに、季節変動する1カ月毎の外力のデータセット、即ち、Hellerman and Rosenstein(1983)³⁾の風とLevitus(1982)⁴⁾の月平均・季節平均の海面水温、海面塩分を使った計算を引き続いて行った。平成4年度に求めた上記の年平均定常値から準定常になるまで11年間さらに積分を続け、その時点で、11年目の各月平均のデータを基本データセットとして解析した。本研究では表層での物理環境の季節変動が一次生産に及ぼす影響を見るため、各月平均の表層混合層の深さ分布のデータセットをとくに作成した。（ここで言う混合層の深さは、データセットの各格子点で海面からの水温変化（ふつう降下）が0.5℃以上になる深さ）

図6にモデルの各月の表層混合層の深さ分布を示す。冬の北半球中高緯度では、亜熱帯循環に属する黒潮や湾流の続流域（及び地中海北部も）で高塩分水が海面で冷却されるために、そこで最大の混合層深度を示す。その分布の海盆スケールでのパターンとしては、北太平洋では混合層の深い海域が西半分に偏っているのに対して、北大西洋では中高緯度全海域に広がっていることが大きな特徴の違いであることがわかる。この差は、海面での高塩分水の海盆スケールでの広がりによるものと考えられる。夏の北半球では、ほとんどの海域で風成エクマン混合層が形成され、50m以下の混合層の厚さとなっている。

冬の南極周極流では広範囲に混合層の深さが200mを超えているのがわかる。とくに、南半球亜熱帯循環の西岸強化流（アギュラス海流、東オーストラリア海流など）の続流域で混合層が最も深い。夏の南半球では、南極周極流の主流域を除き、50m以下の風成エクマン混合層になっている。

赤道太平洋の混合層深度のピークは、用いた風のデータセット（Hellerman and Rosenstein）の熱帯における東風の応力の見積もりが大き過ぎるために生じたと考えられる。

図7は、現場海洋観測気候値（Levitus, 1982）の各月平均水温データから、図6のモデルの場合とまったく同じ定義に従って、混合層の深さの分布を、各月について描いたものである。両者を比較すると、個々の格子点単位では、混合層深度にかなりの差があることがわかるが、上で述べた海盆スケールでの混合層深度の分布の特徴はよく似ていることがわかる。

5. 混合層の季節変動と海面クロロフィルの季節変動との比較解析

平成6年度は、上記の流動モデル結果および海洋観測気候値(Levitus, 1982)における混合層深度の月平均データセットを使って、人工衛星の海色データ（クロロフィル濃度の指標）の気候値

(CZCSデータ：1978年11月～1986年6月計7.5年分の各月平均)と比較解析を行い、クロロフィルの水平分布に対する表層混合層の季節変動の重要性を調べた。

混合層の深さの季節変動から見た植物プランクトンのブルームの推定については、Sverdrup(1953)⁸⁾の臨界深度理論を適用する。これは、冬季から春季にかけて日射の増加と共に混合層の深さが臨界深度(海面から積分した生産と消費が釣り合う深さのことで、混合層内を一様としたとき、おもに海面での日射(衛星雲量データの利用：図8a⁹⁾)と、海水による日射の減衰率(Jerlov, 1976)¹⁰⁾(図8b)から求まる。Sverdrup(1953)の式と係数を使って求めた各月の臨界深度の全球分布を図9に示す。)よりも浅くなった時に、混合層内での光合成の条件が整い、植物プランクトンが急激に増加するという仮説である。北大西洋高緯度での一観測点ではこの仮説が有効であることがSverdrup(1953)で確かめられているが、世界海盆スケールでの検証はまだ行われていないこともあり、本研究では仮説の全球的検証の意味も含めて混合層と衛星海色データの季節変動の比較解析を行う。

全球での比較解析の結果を示す前に、まず臨界深度理論適用のイメージとして、一格子点における比較解析を示す。図10はSverdrup(1953)の観測点(北緯66度、東経2度)に最も近い流動モデルの格子点での、臨界深度、Levitus海洋観測気候値の混合層深度(下図)、および衛星海色データ(上図)の季節変動である。これによると、4月から5月にかけて混合層深度が臨界深度よりも浅くなり、同時に海面クロロフィル濃度の指標となる色素濃度も急激に増加している。この特徴はSverdrup(1953)の結果と非常によく合っている。

次に、全球の比較解析の結果を示す。図11は季節変動外力流動モデルの混合層深度(図6)と臨界深度(図9)の月変化を比較したものである。図の見方は次の通りである。

各図は前月から今月にかけての混合層深度変化を示す。ここで、

白の海域：2ヶ月間にわたって混合層深度が臨界深度よりも浅い海域

(図10下では5～9月に当たる)

灰色の海域：混合層深度が臨界深度よりも深くなった海域、および、2ヶ月間にわたって混合層深度が臨界深度よりも深い海域(図10下では9～4月に当たる)

黒の海域：混合層深度が臨界深度よりも浅くなった海域(図10下では4～5月に当たる)

図11の黒く示した海域が、Sverdrup(1953)の仮説によれば、混合層内で光合成の光の条件が整い、春季ブルームが起これると期待される海域である。

これに対して、図12に衛星海色データの月変化を示す。図の見方は次の通りである。

各図は色素濃度の前月に対する今月の増減を示す。

青の海域：色素濃度が減った(図10上では3～4月、6～7月に当たる)。

緑の海域：色素濃度が0～50%増えた(図10上では5～6月、7～9月に当たる)。

黄の海域：色素濃度が50～100%増えた。

赤の海域：色素濃度が100%以上増えた(図10上では4～5月に当たる)。

白の海域：データなし。

ブルームのはっきりした定義はないが、図12の赤く示した海域がブルームの起これている海域であると本研究では見なす。次に図11と図12の比較を行う。

ここではとくに衛星海色データの比較的そろっている北半球の植物プランクトンのブルームについて解析する。図11の中高緯度では、春季に海面が加熱されて急速に浅い風成エクマン混合

層が発達することを反映して、混合層深度が臨界深度よりも浅くなって光合成の条件の整う現象が見られる。北太平洋では、光合成の条件は、東部に比べ、西部の海域でかなり遅れて整うが、北大西洋では、東西全域にわたってほぼ同時期に整い、その海域は時季を追って中緯度から高緯度へ移動する。この特徴は、流動モデルの北太平洋西部および、北大西洋で光合成の条件が実際のブルームに対して1~2ヶ月遅れて整うという差が存在するものの、図12のブルームの海域の空間分布パターンに海盆スケールでよく一致している。これらのブルームの空間分布の特徴は、北半球の亜熱帯循環系に属する黒潮や湾流の続流域で高塩分水が冬季に海面で冷却され、周囲の海域よりも深い混合層が発達し(図6)、春季に周囲よりも遅れて混合層が臨界深度より浅くなるために起こる現象であると解釈される。北太平洋では西部でブルームが遅れ、北大西洋では東西全域でほぼ同時期にブルームが起こっているが、この差は、海面での高塩分水の海盆スケールでの広がりによる差と考えられる。また、流動モデルにおける1~2ヶ月の遅れは、黒潮や湾流のモデルによる再現が時間変化も含めて完全ではなく、その高塩分水の影響を受けた深い冬季混合層が実際よりも遅れて発達するためである。

次に、参考として、流動モデルにおける混合層深度の月変化の場合と全く同じ手法で、海洋観測気候値(Levitus, 1982)における混合層深度の月変化から各月毎にブルームの海域を推定し(図13)、衛星海色データとの比較解析を行う。図12と図13の比較によると、流動モデルの場合(図11)に見られた、北太平洋と北大西洋の春季ブルームの空間分布の特徴が確認される。また、流動モデルでは1~2ヶ月遅れて推定されていた北太平洋西部及び、北大西洋でのブルームは、海洋観測気候値では3月から5月にかけて起こっており、実際のブルーム(図12)と時期がよく一致することがわかる。

北半球の秋季から冬季にかけては、モデル(図11)および観測気候値(図13)において、混合層が臨界深度よりも深くなる海域で秋季ブルームの終了(図12)がよく対応している。

南半球では、モデル(図11)、観測気候値(図13)共に、南極周極流の主流域で周囲に比べて光合成の条件の整う現象が遅れる。これは冬季に深く発達した南極周極流の混合層(図6、7)を反映する現象と思われる。衛星海色データ(図12)では南極環海のデータが少なく、混合層深度の月変化から示唆された南極周極流でのブルームの遅れを検証することは出来ない。

Sverdrup(1953)の臨界深度理論を全球に適用する場合、水温・塩分に影響された植物プランクトンの生理的条件や、栄養塩・鉄分の補給などの生物化学的条件、動物プランクトンによる捕食に影響される生態学的条件が海域毎に異なるため、臨界深度の計算に用いる生物的係数(補償照度、光飽和の照度など)は厳密には時空間的な補正が必要であるが、その全球的な研究がないことから、ここでは係数を全球で一定としてSverdrup(1953)の値を臨界深度計算に用いた。従来、現場観測から春季ブルームが顕著に見られないことを指摘されて来た北太平洋東部の沖合域や南極環海で、モデルや観測気候値の混合層深度変化によるブルームの推定が衛星海色データのブルームとあまりよく対応していないのは、この手法の欠点から生まれた誤差と考えられる。また、衛星海色データの不足した海域(特に南半球)が少なくないこと、中高緯度の冬季の衛星海色データは精度が悪いこと、用いたデータ間の時間的整合性に欠けることなどの要因により、厳密な比較解析は困難である。しかし、上記の様に北半球では、海盆スケールで、モデルや観測気候値の混合層深度の季節変動が植物プランクトンのブルームをよく説明しており、Sverdrup(1953)の臨界深度理論が海盆スケールでは有効であるとの結論を得た。

6. 気候変動外力による流動モデル計算

平成7年度は、上記の気候値を使った研究の成果を元にして、気候変動を与えてモデルで計算される各年の海洋混合層の変動と、①人工衛星のCZCSデータ(1978・11~1986・6)及び②現場海洋観測(例えばアラスカ湾の海洋観測定点PAPA)から推定されるクロロフィルの長期変動とを比較する。そのため、気候変動外力(1961~1990年)を与えた流動モデルの30年積分を計算し、その結果を解析中である。10年スケールの気候変動にともなう混合層の厚さの変化を通じて、各年のクロロフィルの生産量が長期変動していることが期待される。

7. まとめ

本サブテーマでは、海洋の一次生産性と物理環境との関連を明らかにするために、次の研究を行った。

(1) 海洋表層大循環および海洋表層(~300m深)混合層の水温・塩分・密度構造の気候値が表現できる全球流動モデル(2.5°x2°x21層)を開発した。

(2) 植物プランクトンの光合成に関わる生物活動域である海洋有光層の物理環境(湧昇流、混合層深度、短波放射透過深度)と海面からの可視光強度の衛星観測データとの関係を全球で比較した。すなわち、流動モデルの計算結果、現場海洋(物理)観測データ(Levitus, 1982)および衛星海色データ(CZCS)の3者について、それぞれの、年平均値・各月平均値について比較検討を行った。

(3) その結果、①年平均値については、海上風による海面近くの湧昇流分布がクロロフィルの海盆スケールの分布に、②月平均値については、Sverdrup(1953)の臨界深度が海盆スケールの植物プランクトンのブルームの時期・海域にとって重要であることが定量的に示された。

これらの結果をふまえて、気候変動についても物理環境と生物活動の比較解析を進めている途中である。気候変動に伴う海洋混合層深度の経年変動はクロロフィル分布に大きく影響すると考えられるが、10年スケールの変動に対しては、衛星海色データのデータ連続取得期間が7年程度しかなく詳細な比較は難しい。

これまで、植物プランクトンと海洋物理量の連続観測が維持されている海洋観測定点(例えば、アラスカ湾の定点PAPA)では、両者の比較研究がなされている。ここで挙げた物理環境の他に、生物化学的考察(栄養塩・鉄分の補給)や生態学的考察(動物プランクトンとの食物連鎖)を含めた複雑な要因分析が行われた。また、衛星海色データ分析の試みは、アラビア海、北大西洋、南極環海などで行われ、光合成の条件と植物プランクトンの季節的ブルームとの関係が議論されている。

しかし、世界海盆スケールで整理された同質のデータセットによる比較研究はこれが初めての試みである。また、流動モデルによる3次元物理環境データとの組み合わせによる比較研究も初めてであった。さらに、43年も前に提案されたSverdrupの臨界深度理論の有効性が確かめられたのは予期しなかった成果であった。

本研究により、次の段階として、クロロフィルの生態数学モデルを海洋流動モデルに組み込んだ全球海洋クロロフィルモデルの有効性が示唆されたと考えられる。

謝辞： 海洋流動モデルの計算は国立環境研究所地球環境研究センターのスーパーコンピュータ NEC SX-3を用いた。また、図3～13は GrADS: COLA/IGES 描図プログラムにより作製されたものである。

引用文献

- 1) Mellor, G. L. and T. Yamada(1982) Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- 2) Endoh, M. et al. (1994) CGER's Supercomputer Activity Report Vol. 1-1992, 31-33.
- 3) Hellerman, S. and M. Rosenstein(1983) J. Phys. Oceanogr., 13, 1093-1104.
- 4) Levitus, S. (1982) NOAA Professional Papers 13, 173pp.
- 5) Feldman, G. et al. (1989) Eos Trans. AGU, 70, 634-635, 640-641.
- 6) Ishizaka, J. (1993) Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment, 399-407.
- 7) Endoh, M. et al. (1994) CGER's Supercomputer Activity Report Vol. 2-1993, 23-24.
- 8) Sverdrup, H. U. (1953) J. Cons. Int. Explor. Mer., 18, 287-295.
- 9) Rossow, W. B. and R. A. Schiffer(1991) Bull. Amer. Meteor. Soc., 72, 2-20.
- 10) Jerlov, N. G. (1976) Marine Optics, 231pp.

国際協同研究等の状況

該当無し

研究発表の状況

発表者名	発表課題	発表誌名等	英文・和文
遠藤昌宏 (1993)	クロロフィル分布に係わる 大洋規模の流動構造の研究	第1回スーパーコンピュータによる 地球環境ワークショップ要旨集	日本語口頭
遠藤昌宏、小畑淳 (1994)	クロロフィル分布に係わる 大洋規模の流動構造の研究	第2回スーパーコンピュータによる 地球環境ワークショップ要旨集	日本語口頭
小畑淳、石坂丞二、 遠藤昌宏(1994)	グローバルな混合層の季節変動と 植物プランクトンのブルームとの 関係について	1994年度日本海洋学会 春季大会要旨集	日本語口頭
小畑淳、石坂丞二、 遠藤昌宏(1994)	グローバルな混合層の季節変動と 植物プランクトンのブルームとの 関係について(その2)	1994年度日本海洋学会 秋季大会要旨集	日本語口頭
遠藤昌宏、小畑淳 (1995)	クロロフィル分布に係わる 大洋規模の流動構造の研究	第3回スーパーコンピュータによる 地球環境ワークショップ要旨集	日本語口頭
小畑淳、石坂丞二、 遠藤昌宏(1995)	クロロフィル分布に係わる 大洋規模の流動構造の研究	第1回IGBP/GAIM科学会議	英文ポスター

原著論文

○Obata, A., J. Ishizaka and M. Endoh (1996) Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data : accepted by *JGR-Oceans*

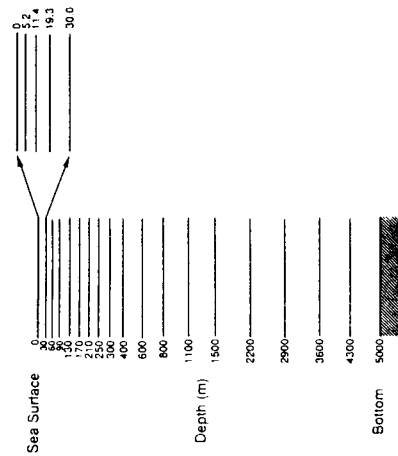


図1 全球流動モデルの鉛直格子配置(全21層)。

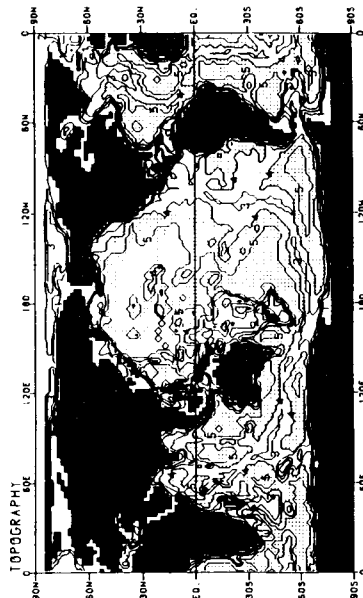


図2 全球流動モデルの海岸・海底地形。等深線間隔は1000 m。

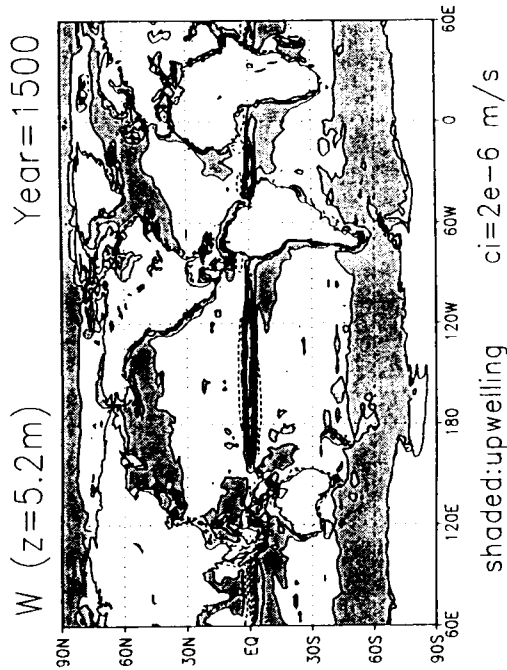


図3 年平均外力による全球流動モデルの準定常状態(1500年)での海面付近の鉛直流を表す。陰影部は湧昇流を表す。等値線の間隔は $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ 。中緯度では沈降流、低緯度・高緯度では湧昇流となっている。

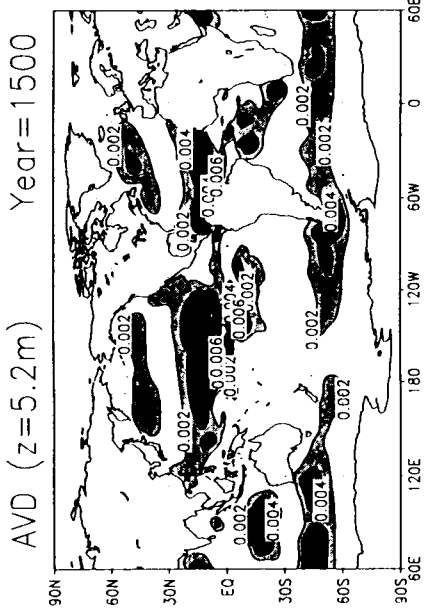


図5 年平均外力による全球流動モデルの準定常状態(1500年)での海面付近の海水の鉛直混合係数の分布。等値線の間隔は $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。各緯度帯で、偏西風・偏東風の強い海域での風による強制的な鉛直混合が大きいことが分かる。

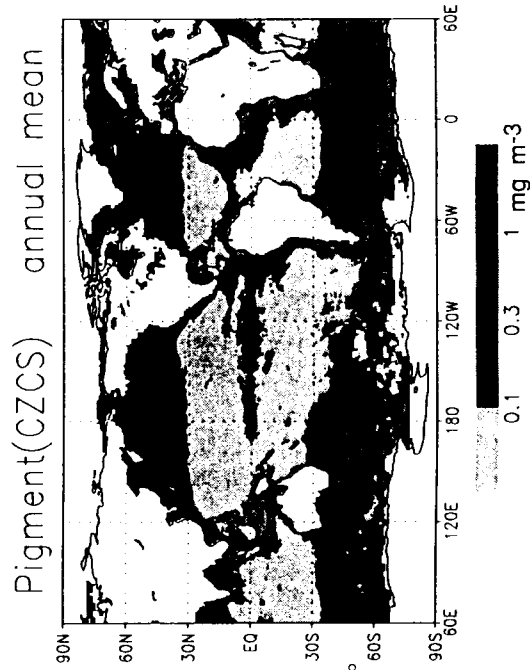


図4 衛星海色データ(CZCSデータ:1978・11~1986・6計7.5年分の年平均)による海面色素濃度分布。単位は mg m^{-3} 。白い海域はデータなし。

Mixed Layer Depth (OGCM)

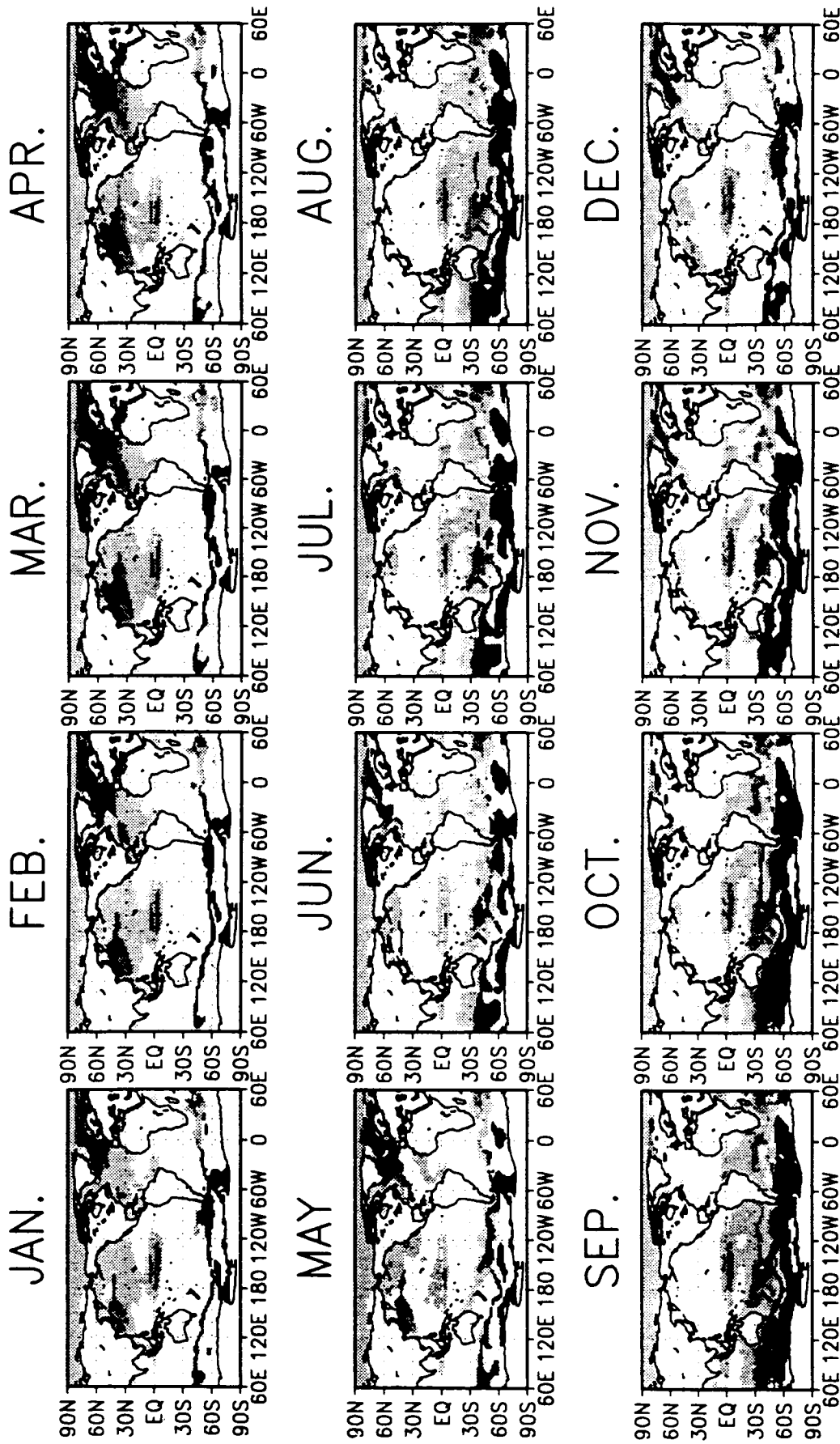


図6 季節変動外力による流動モデル(準定常、11年)における各月の表層混合層深度分布。

混合層の深さは、データセットの各格子点で、海面からの水温変化(ふつつう降下)が 0.5°C 以上になる深さで定義される。

Mixed Layer Depth (Levitus)

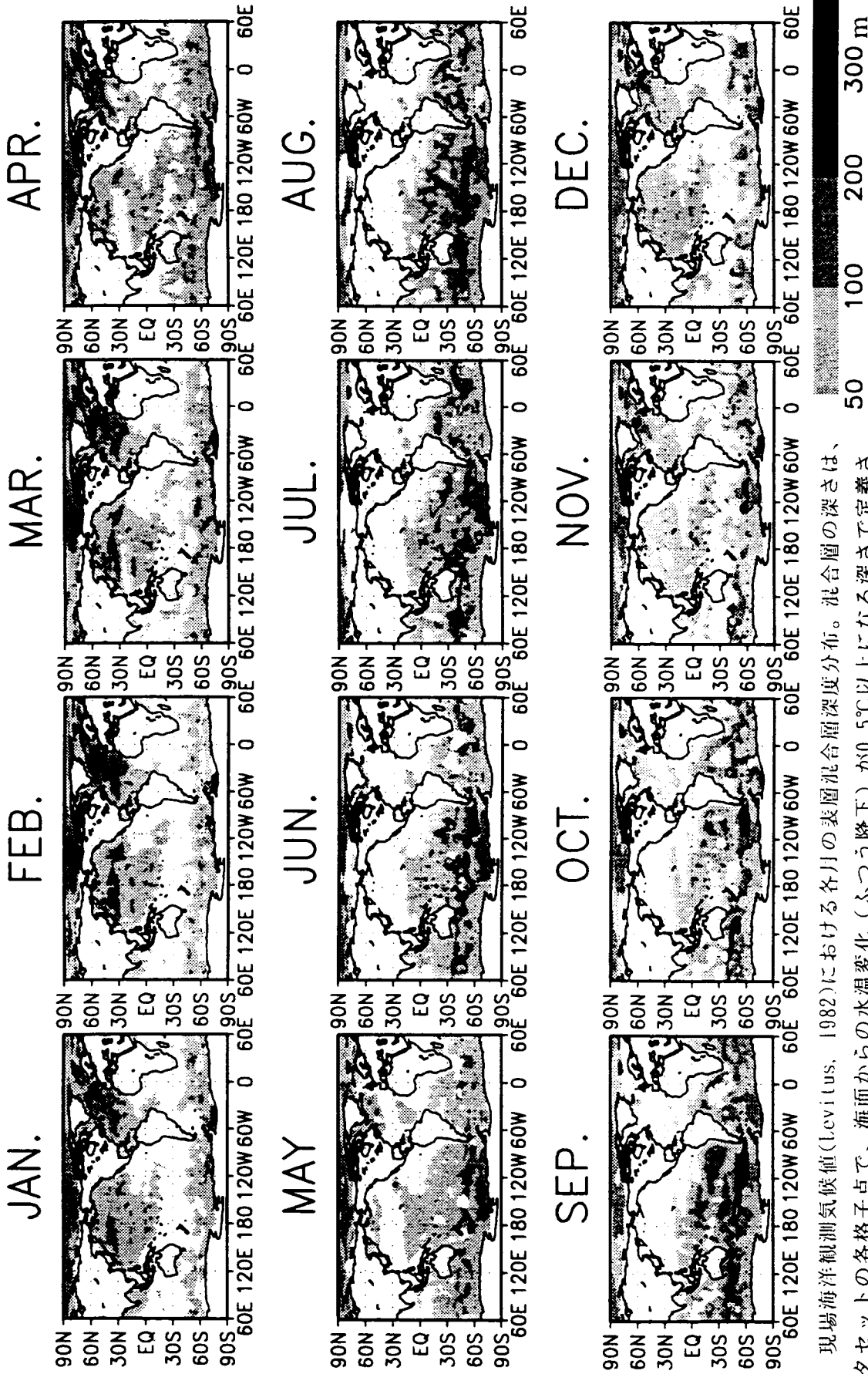


図7 現場海洋観測気候値(Levitus, 1982)における各月の表層混合層深度分布。混合層の深さは、データセットの各格子点で、海面からの水温変化(ふつつう降下)が 0.5°C 以上になる深さで定義される。

Cloud Amount (%) annual mean



図8 a 衛星雲量データ(Rossov and Schiffer, 1991)から求めた年平均の雲量分布。

Attenuation Coeff.

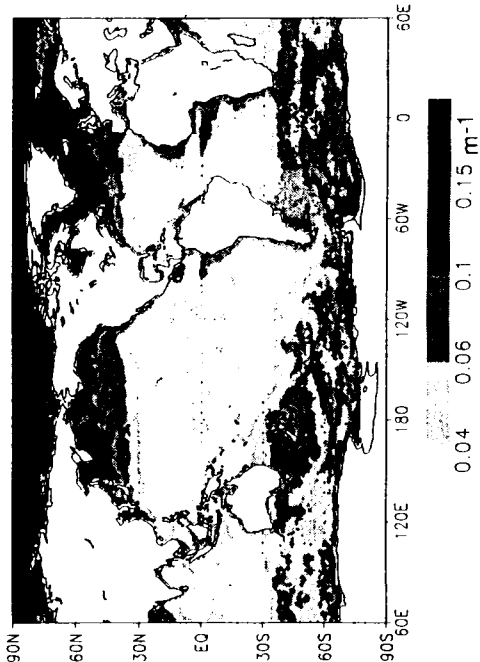
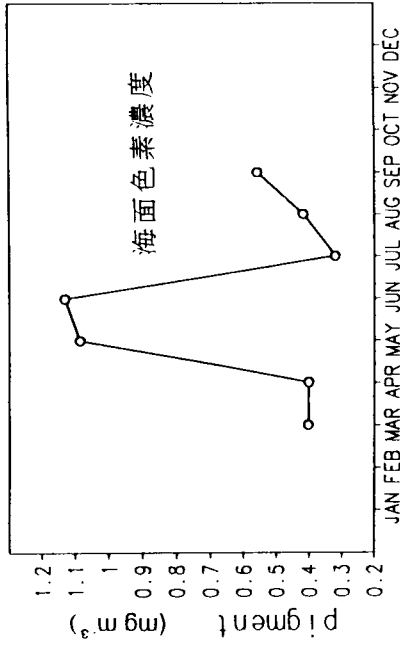


図8 b 海水による日射の減衰率の分布。単位 m^{-1} 。Jerlov(1976)の図を元にして、色素濃度と減衰率がよく対応するという仮定のもとに、衛星海色データ(CZCS)の年平均値を使って空白海域を埋めたもの。

Pigment (CZCS)



MLD and CRD

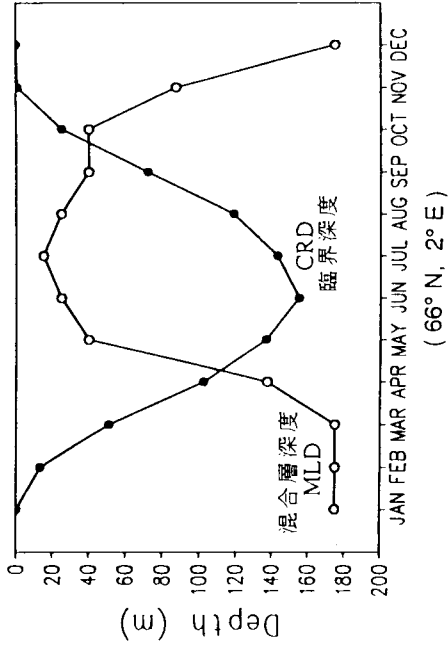


図10 北大西洋高緯度(66°N, 2°E)における、(下図) Levitus海洋観測気候値の混合層深度およびSverdrup臨界深度の月変化と、(上図)衛星海色データ(CZCS)による海面色素濃度(単位 $mg\ m^{-3}$)の月変化。

Critical Depth

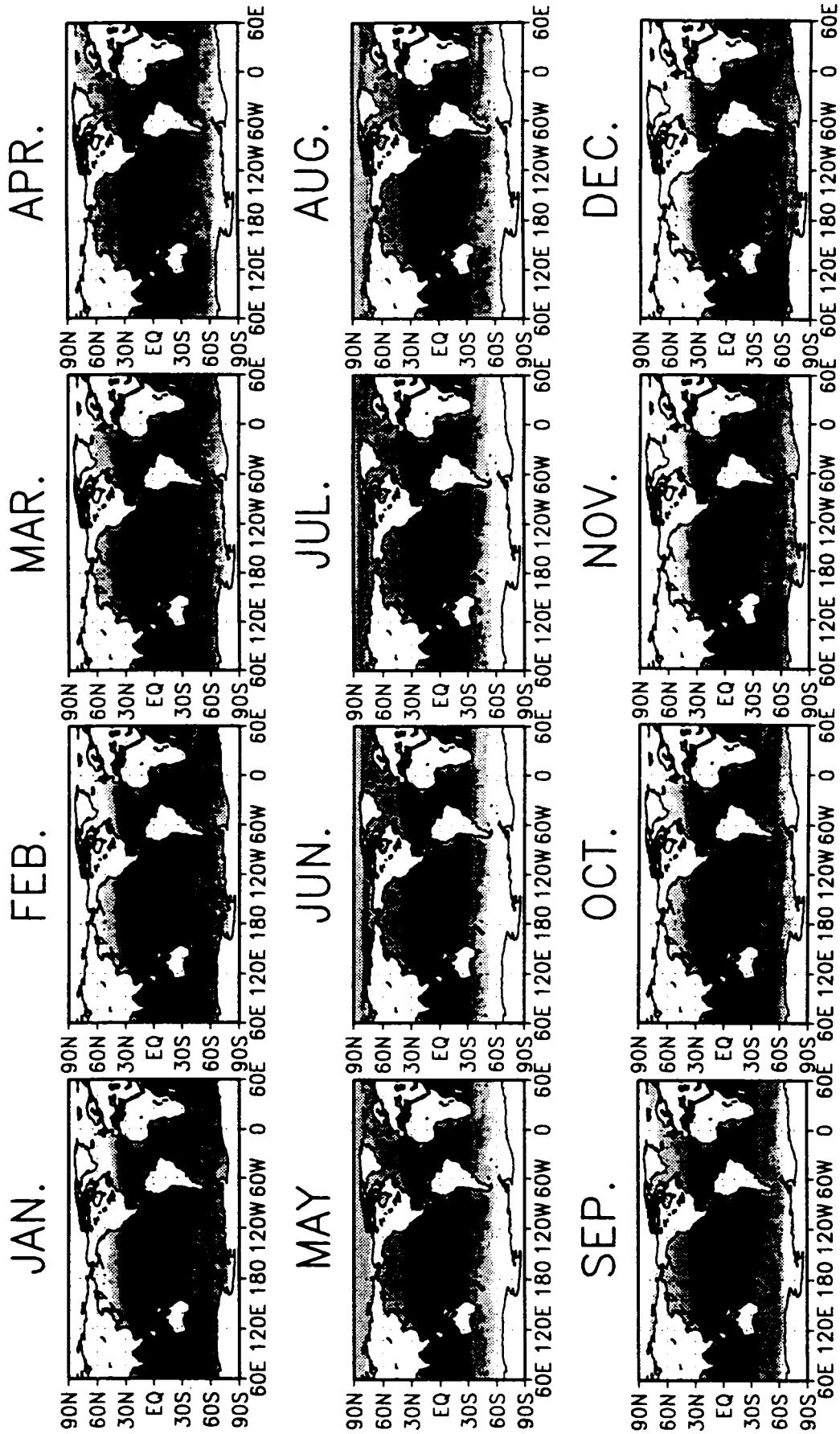


図9 Sverdrup(1953)の式と係数および、各月の衛星雲量データ(図8 aはその年平均)、海水の日射減衰率(図8 b)を使って求めた各月のSverdrup臨界深度分布。

MLD monthly change (OGCM)

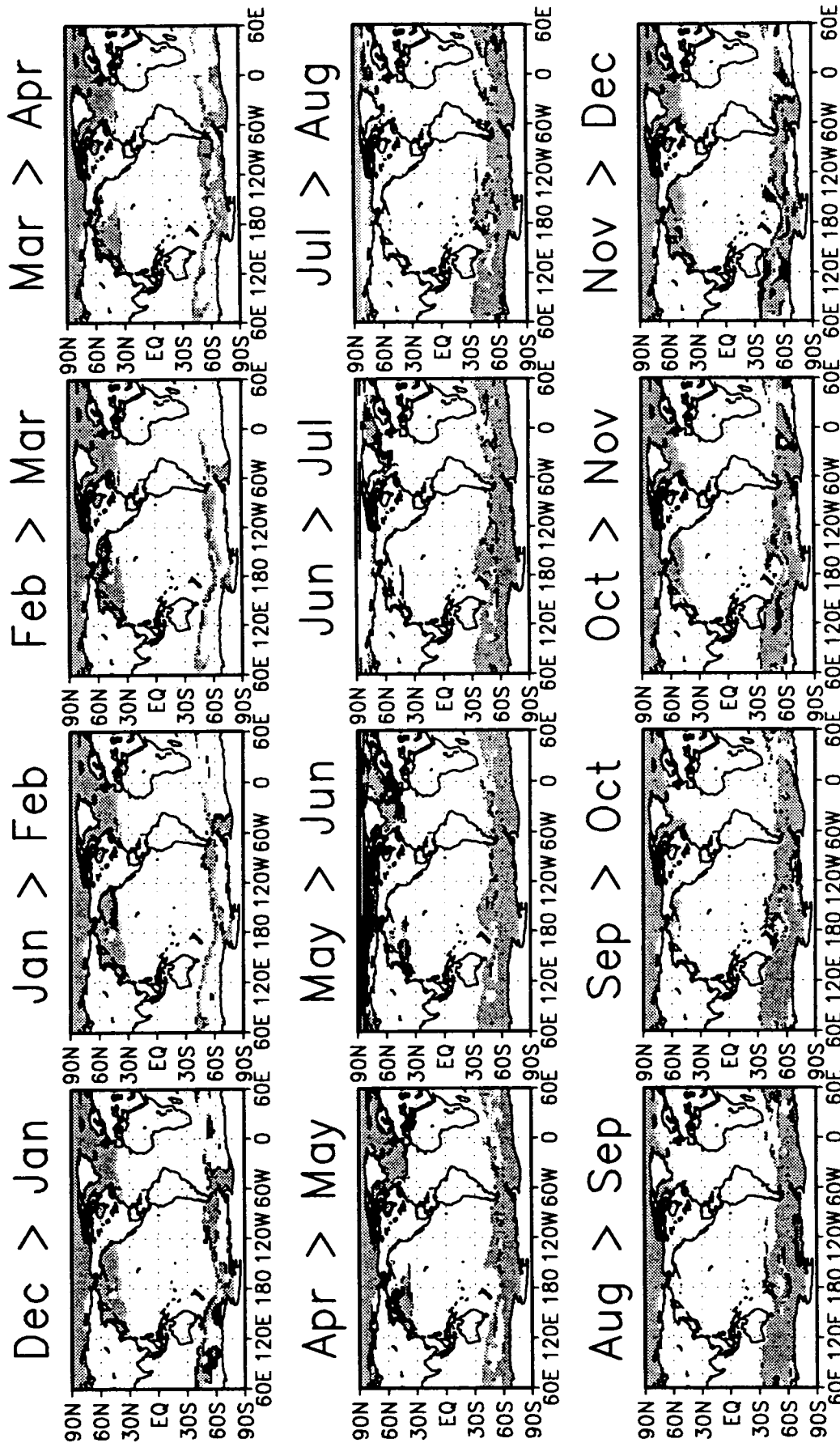


図11 季節変動外力流動モデルの混合層深度(図6)とSverdrup臨界深度(図9)の月変化を比較したものの。図の見方は次の通りである。

白の海域：2ヶ月間にかけての混合層深度変化を示す。
 灰色の海域：混合層深度が臨界深度より浅い海域
 (図10下では5~9月に当たると)

黒の海域：混合層深度が臨界深度より深くなる海域、および、2ヶ月間にわたって混合層深度が臨界深度より浅く示した海域が、Sverdrup(1953)の仮説によれば、混合層内で光合成の光の条件が整い、春季ブルームが起ると期待される海域である。

Phytoplankton pigment (CZCS) monthly change

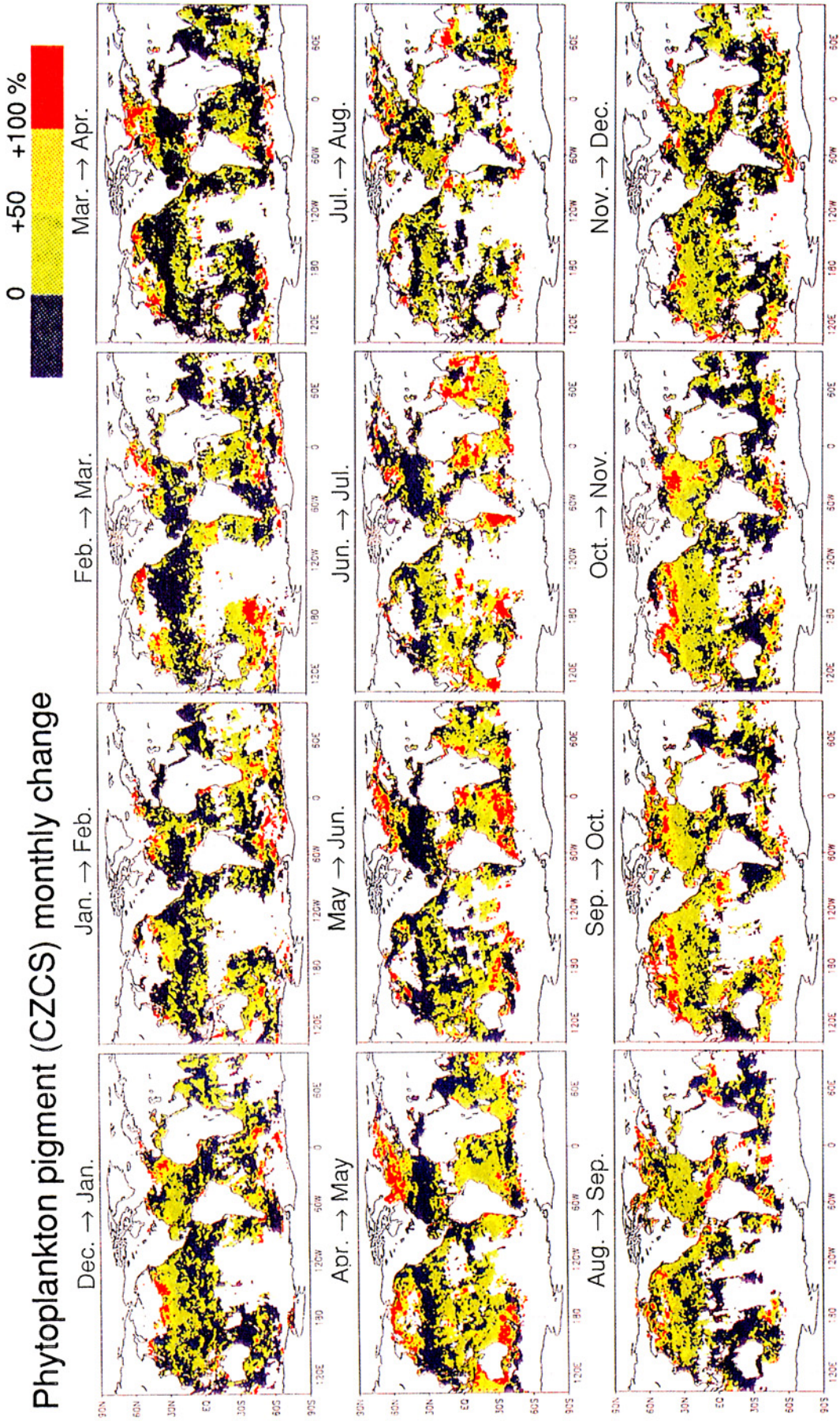


図 1 2 衛星海色データ (CZCS データ : 1978 年 11 月 ~ 1986 年 6 月 計 7.5 年 分 の 各 月 平 均) の 月 変 化 。 図 の 見 方 は 次 の

通りである。
 各図は色濃度の前月に対する今月の増減を示す。
 青の海域 : 色濃度が減った (図 1 0 上では 3 ~ 4 月、 6 ~ 7 月に当たる)
 緑の海域 : 色濃度が 0 ~ 5 0 % 増えた (図 1 0 上では 5 ~ 6 月、 7 ~ 9 月に当たる)
 黄の海域 : 色濃度が 5 0 ~ 1 0 0 % 増えた
 赤の海域 : 色濃度が 1 0 0 % 以上増えた (図 1 0 上では 4 ~ 5 月に当たる)
 白の海域 : データなし。
 赤く示した海域がブルームの起こっている海域であると本研究では見なす。

MLD monthly change (Levitus)

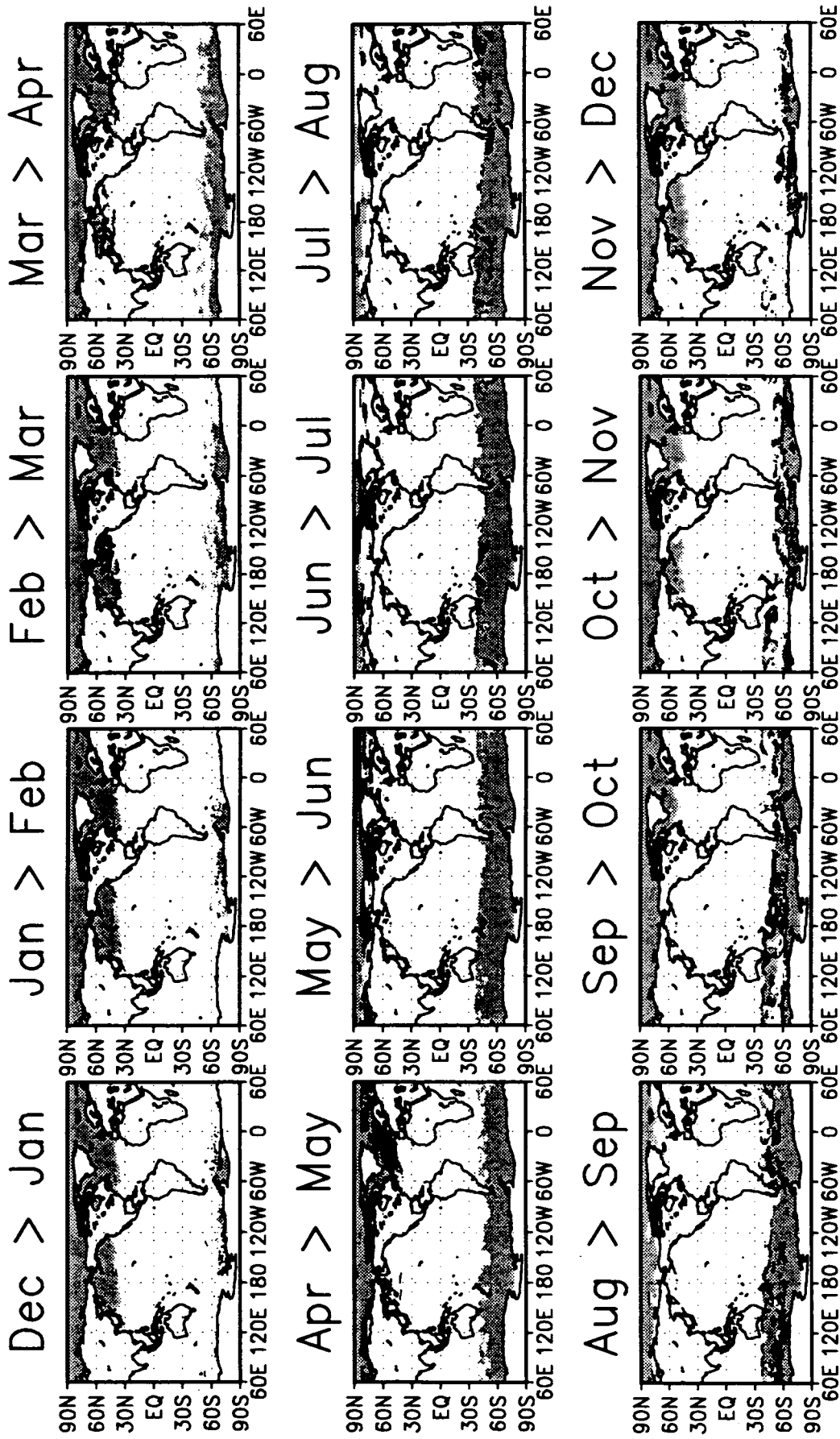


図13 Levitus海洋観測気候値の混合層深度(図7)とSverdrup臨界深度(図9)の月変化を比較したもの。図の見方は図11に同じ。