

9320 地球温暖化対策としての複合的海洋水利用技術の提案と海洋混合モデルによる評価

助成研究者：上山 惟一(大阪大学 基礎工学部)

共同研究者：小島 紀徳(成蹊大学)

山形 俊男(東京大学)

要旨

過去100年間の季節風変動、降雨量分布、日照量分布から平均的な年間変動を定めて海洋表面の境界条件とし、地球規模海洋シミュレーションを行った結果に基づいてインド洋混合モデルを提唱した。この海洋シミュレーション法は、海洋表面における季節風や降雨量、日照量などの年間変動の観測値を境界条件として与えると、エル・ニーニョ現象の再現も出来、水深300m位浅の海洋流速分布の信頼性は高いとされている。インド洋の場合は、444,080個の格子点における流速の3方向成分および水温の時間変化が与えられる。その計算量は膨大である。もし、最適な施肥の場所や時期の探索にこのシミュレーションを用いるとすれば、施肥の場所や時間を変える毎に膨大な計算が必要となり、望ましくない。

本研究の主目的はインド洋の混合特性を出来るだけ少ないボックスによるモデルで表すことである。インド洋中の444,080個の格子点で与えられた数値から平均値を求めるに当たって、各ボックス毎の物質収支の信頼性を出来るだけ保つよう特別の工夫をした。シミュレーション結果から、水深50m位深では、たとえ表層での流れが季節風の影響によって向きや絶対値を激しく変えている場合であっても、流れの向きや大きさはそれほど大きく変動しないことが分かった。したがって、10m厚みの表層を独立して1つのボックスとし、10m位深の流れを年平均流速の分布から7つのボックスに分けた8ボックスモデルを提唱した。それぞれのボックスは固有の働きをもっている。例えばボックス1は10m位浅の表層から成っていて、施肥された肥料をボックス2から7までに分配する分配器である。ある時期に、表層のある場所に施肥された肥料は、その場所と時間に応じた時間遅れと分配率を持ってボックス2から7へと分配される。ボックス2は南緯30度付近のインド洋南端に壁のように存在するボックスであり、表層から3,000m近くの深層までの大きな循環流を擁している。ボックス3から7までは水深10mから142mまでの上層に分布する小ボックスであり、混合槽あるいはピストン流容器として隣接するボックスからの流入量を周囲へ再分配する。ボックス8は142m位深のよどみ槽である。

9320 地球温暖化対策としての複合的海洋水利用技術の提案と海洋混合モデルによる評価

助成研究者：上山 惟一（大阪大学 基礎工学部）

共同研究者：小島 紀徳（成蹊大学）

山形 俊男（東京大学）

1 研究目的

地球環境問題の一つである地球温暖化に対する対策技術として我々は海洋施肥法を提唱し、それが海洋の二酸化炭素吸収能力増大に大きく寄与することを示すと共に、海洋施肥法を実施するに当たり新たにエネルギーが消費されることによる二酸化炭素の発生は、施肥法により増大した海洋の二酸化炭素吸収能力で十分処理できることを示した¹⁾。しかしながら、これらの評価は海洋を表層部と底層部の2つの完全混合槽に分けて取り扱う 2 box model を用いているため水平方向の物質移動に要する時間を考慮することが出来ず、施肥を開始してから効果が現れるまでの時間遅れの正確な推算が出来なかった。本研究では、共同研究者の一人（山形）の行ったNavier-Stokes式に基づく地球規模の海洋シミュレーション結果に基づいて、水平方向および垂直方向の物質移動に要する時間遅れも考慮できる海洋混合モデルを構築することを主目的とする。

2 研究方法

2.1 地球規模海洋シミュレーションおよび対象とする大洋

ここで用いる海洋シミュレーションは、現在分かっている海底地形を考慮し、海洋表面での風速、降雨量、日照量および海水の蒸発量の過去の時間変動を考慮して地球上の全海洋域にわたって流速分布および水温分布を計算したものである。チリ沖のエルニーニョ現象も正確に再現され、特に水深300m程度までの信頼性は高いとされている。海流の流速および水温は、東西方向、南北方向および鉛直方向の3つの成分として各格子点で与えられるが、格子点は経度方向と緯度方向は0.5度おき、深さ方向は20点選ばれているために格子の総数が膨大になり、簡単で使いやすい海洋混合モデルへの簡略化が極めて困難となる。そこで本研究では、インド洋を最初のターゲットとして新しい海洋混合モデルを構築した。Fig.1に海洋シミュレーションによる年平均の水温分布と文献値との比較を示す。海面から水深600m程度までの水温が急激に低下する領域とそれ以深の水温が緩やかに降下する領域共に良く一致している。

2.2 インド洋の概要および格子点

インド洋は東経30度から120.5度、南緯30度から赤道をはさんで北緯30.5度までの範囲に広がる表面積 $74.9 \times 10^6 \text{km}^2$ 、容積 $110.4 \times 10^6 \text{km}^3$ 、平均水深3.0kmの大洋であり、代表的な表層循環として赤道近くを西向きに流れる北赤道海流、アフリカ大陸沖の南緯20度付近で反転して東向きに流れる赤道反流およびアフリカ大陸沖を南向きに流れるアグリアス海流を持つ。流速の値が与えられる格子点は、経度方向182点、緯度方向122点、深さ方向20点の計444,080点である。経度方向および緯度方向の格子間隔はそれぞれ0.5度ずつである。したがって、緯度方向の格子間距離は同一水深の水平面上では経度によらず一定となるが、水深が深くなるほど格子間距離は短くなる。経度方向の格子間距離は同一水深で同一緯度であれば等しいが、緯度が高くなるほど、また水深が深くなるほど短くなる。深さ方向の格子点位置は等間隔ではなく、水深0、10、20、30、40、50、63.5、82、107、142、190、255、343、464、629、854、1161、1580、2152、および2933mの20点である。水深100m付近までは陸地の輪郭はあまり変化しないが、水深が更に深くなると地形は大きく異なる。水深0、936および2933mにおける陸地の輪郭をそれぞれFig.2のa、bおよびcに示した。

ここで扱うインド洋シミュレーションのデータは、100年間の季節風変動のデータを基にした代表的な年間季節風変動を与えてシミュレーションを行い、年平均値および春（3月～5月）、夏（6月～8月）、秋（9月～11月）および冬（12月～2月）の季節平均値を求めたものである。

2.3 局所平均による簡略化

理論的には隣接する8個の格子点で囲まれた領域を1個の完全混合槽のボックスとすればインド洋をマルチボックスモデルで表すことができる。しかし、ボックスの数が何万個もあり、しかもそれらが三次元的につながったマルチボックスモデルをシミュレーションに用いるとすれば膨大な計算を要し、施肥の時期や場所を変える毎にそのような計算を繰り返すのは望ましくない。出来るだけ少ないボックス数で、しかもインド洋全体の流れの特徴を見落とさずに済む格子点として、まず経度方向に22.5度間隔、緯度方向に15度間隔で切り、深さ方向はそのまま20に分ける分割法でボックスを作り、その各面を垂直に横切る平均流速および各ボックス内の平均温度を求めた。このボックスを以後、第1次近似ボックスと呼ぶ（Fig.3参照）。最初にシミュレーション結果が与えられた444,080個の格子点の隣接した8個で構成されるボックスを基本ボックスと呼ぶと、第一次近似ボックスの一つの面を通過する流量はその面を構成する基本ボックスの面を通過する流量の総和として与えられる。これをその面の面積で割れば、面を通過する垂直方向の平均流速が得られる。しかし、地球は球形であるから基本ボックスは直方体ではない。しかも水深が増すほど基本ボックスの高さは高くなりその面を通過する流量も非常に大きな値となるので、マスキングを確保するためには液流量の計算をできるだけ正確に行う必要がある。このため、四角柱近似（Appendix参照）を用いた。

3 結果および考察

3.1 年平均値による流速分布

第1次近似ボックスに、経度方向にA、B、CおよびD、緯度方向に1、2、3、および4の符号を付ける（Fig.3参照）。個々の第1次近似ボックス内の平均流速および滞留時間を計算した。1例として、A1～D1の深さ方向断面における経度方向流速、鉛直方向流速および各ボックス内の滞留時間の計算結果をTable1に示した。深さ欄の数値はそのボックスが所在する深さ[m]である。表中、()内の1組の数字は左側が平均流速[ms⁻¹]、右側が滞留時間[year]を表す。個々の第1次近似ボックス内の上段は経度方向の流速および滞留時間であり流速の値は×10⁻³が、滞留時間は×10⁻²が省略されている。経度方向流速の符号は東向き流れを正としている。2組の()は、それぞれの第1次近似ボックスを経度方向にさらに2分割したものである。下段は鉛直方向の流速[ms⁻¹]および滞留時間[year]であり、流速の値は×10⁻⁷が、滞留時間は×10⁻²が省略されている。流速の符号は上向きを正としている。

経度方向の流速は1cm/sのオーダー、鉛直方向の流速は0.1μm/sのオーダーであることが分かる。水深10m以下の表層では東向き流れと西向き流れとが入り乱れているが、水深10～20mでは全て東向き流れであり、約10カ月かけてインド洋を西から東へ横切ることが分かる。また、D1では沈降流が良く発達しており、表層から深海まで約4カ月で沈み込んでしまう。一般に、容器内の混合の様子は流速分布が分かっていたら正しく考察することが出来るが、流速の向きが容器スケールで変動している場合は、向きが変わる前の十分に短い時での平均値を知る必要がある。したがって、少なくとも1年よりは短い時間長さにおける流速平均値の年間変動と年平均値との関係を知る必要がある。

3.2 季節変動

季節平均値の変動をFig.4a、bおよびcに示す。Fig.4aはB1における南北方向速度および上下方向速度の季節変動である。多少の変動はあるものの流れの向きは変わらず、大きさもさほど変化していない。インド洋のほとんど全ての場所で同様の傾向がみられた。しかし、特に季節変動の影響が大きいと思われるB4の水深10m以下の南北方向表層流れについては、Fig.4bに示すように季節変動が甚だ大きく、年平均値の10倍程度になっていることもある。施肥を行う場合は海洋の表面に散布するのであるから施肥の時期、場所が重要となることが分かる。同じB4においても、Fig.4bに示すように水深が40～50mになると季節変動がかなりおさまり、Fig.4aと同程度の変動になっている。

3.3 インド洋海洋混合モデル

3.1節で行った第1次近似ではボックスの数が4×4×20=320個であり、インド洋の混合モデルの全体像をつかむためには、まだ多すぎる。季節平均値に対する第1次近似ボックスの流速、滞留時間分布を基にして、Fig.5に示すような8個のボックスからなるマルチ

ボックスモデルを提唱する。矢印は流れの向き、付された数値は年平均流速に基づく流量 [m^3/s] を表す。ただし、流量の値は、図の上端に記入した値以外は、 $\times 10^5$ が省略されている。ボックス1は水深10m以下の表層だけで構成される薄い層であり、表層における水平方向の流速が大きいことから特に設けた。ボックス1の主な働きは施肥の場所および時期に応じて然るべき時間遅れ（数カ月）の後、ボックス2、3、4、5、7のいずれかに分配する分配器である。ボックス2は南緯30度付近で深さ方向に壁状に構成されるボックスであり、水深3000m付近の底層と水深数10mの表層との間で大きなスケールの循環がみられる。このような大規模の垂直方向の循環はインド洋の他の部分ではみられず、栄養分などの底層と表層との交換で重要な役割を果たしている海域といえる。ボックス2の主な働きは外洋およびボックス8との間の大量の交換、および表層（ボックス1）よりの沈降物の深海への移送である。ボックス8の中は循環があるので完全混合槽と考えて良い。ボックス3は主として深海（ボックス8）からの湧昇物をボックス4へ伝達している。中の流れはかなり複雑であり、完全混合槽近似が妥当と思われる。ボックス4は単にボックス3から流れ込んだものをボックス5へ運ぶのが主な働きであり、ピストン流を仮定した方が良いと思われる。ボックス5は主としてボックス4から流入したものをボックス2へ移送していると考えられるが、中の流れは複雑で完全混合槽近似が妥当である。ボックス6はボックス1、8以外から流れ込んだものをボックス2と5へ分配する働きを有する小さな完全混合槽と考えられる。ボックス7は表層よりの流入量をボックス6と外洋へ分配する小さな完全混合槽である。ボックス8はボックス2と大量の交換、外洋ともかなりの量の交換を行っているが、中の流れはさほど早くなく、また容積も圧倒的に大きいので、一種のよどみ槽の働きをしている。また、かなりの量の湧昇流をボックス3へ送り込んでいる。

3. 4 インド洋における最適施肥ポイントおよび時期

3. 2節で得られた各季節毎の流速分布をもとに施肥の時期および場所による違いを検討した。施肥は光合成で植物プランクトンが増殖することによって二酸化炭素を海洋中に吸収しようとするものであるから、肥料が光合成の可能な浅海に十分長くとどまる必要がある。したがって湧昇流の定在箇所がまず有力な施肥場所と考えられるが、インド洋の湧昇流ポイントは近くに沈降流が存在して深海へとすぐ運び込まれる場合が多かった。数カ月間の表層に滞在するポイントとしては、春期のA1と秋季のD1とがあった。春期のA1の場合は、春の間に40mほど沈み込みながら強い沈降流のあるD1に運ばれ、深海へと沈降する。秋のD1の場合は、冬の間（平均水温 27°C ）表層にとどまって光合成し、春に沈降する。いずれのポイントも外洋に接しているため外洋への流出分があるが、その割合はA1の場合30%、D1の場合15%であった。

4 今後の課題

インド洋については、3. 4節で得られた施肥の場所および時期に応じてボックス2、3、4、5、7および外洋への分配量と時間遅れを決定し、3. 3節で提唱したインド洋

混合モデルに従ったパーソナルコンピューターレベルのシミュレーションを行う必要がある。個々のボックス内でのシミュレーションの考え方は前年度の報告に述べた手法が適用可能である。ここでは、外洋に流れ出た肥料を遺失分と考えたが、地球規模での二酸化炭素の海洋吸収効果を考えるためには地球上の全ての海洋表面を施肥の適用可能ポイントと考え、本報告と同様手法で簡略化した海洋混合モデルを構築し、全ての海洋におけるシミュレーションを並列して実行検討する必要がある。

引用文献

- 1) 堀内都雄、小島紀徳、稲葉敦、上山惟一；化学工学論文集，19，753-761(1993)。

Appendix 四角柱近似

格子点A、B、CおよびDで構成される基本ボックスの面を通過する流量は、面A B C Dを底面とし縦軸に流速の垂直成分を取ったときに形作られる四角柱A B C D - E F G Hの体積で与えられる (Fig. A1a参照)。正確な流量は曲面E F G Hの形状が正しく与えられなければならないが、海洋シミュレーションからは4点E、F、G、Hの位置だけが与えられている。曲面E F G Hを、平面E F Hと平面F G H (Fig. A1b) および平面E F Gと平面G H E (Fig. A1c) を平均した形状 (Fig. A1d) として近似し、四角柱A B C D - E F G Hの体積、すなわち基本ボックスの面A B C Dを通過する流量、を求めた。

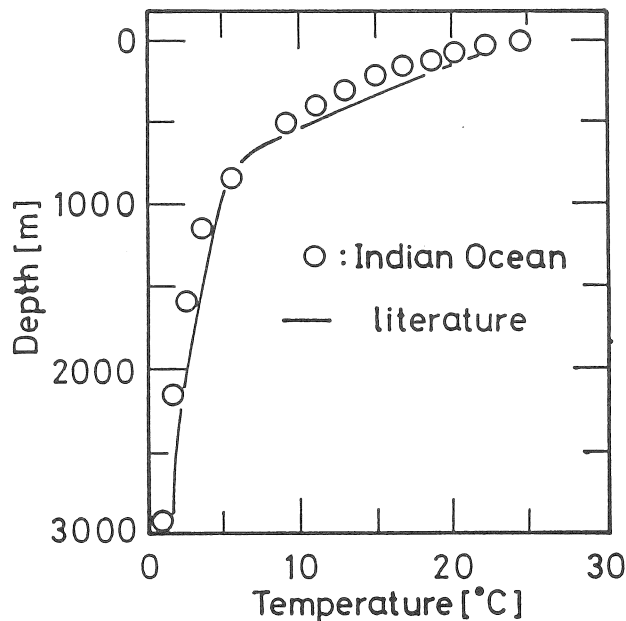


Figure 1 Temperature distribution

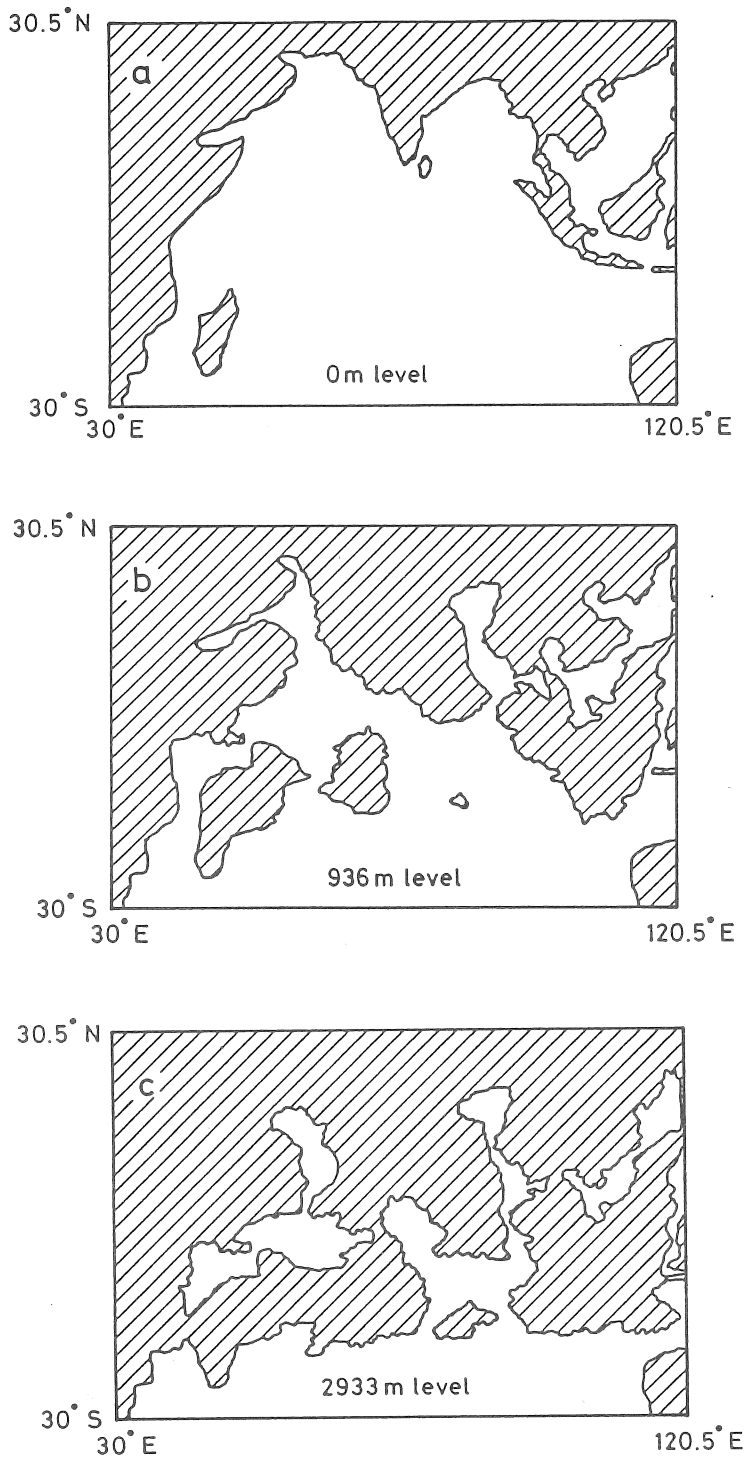


Figure 2 Land contour

Table 1 Velocity distribution

depth [m]	A1	B1	C1	D1
0~10	(-17.4, 2.8) (21.4, 6.7) (-0.9, 3.4)	(49.3, 0.7) (44.9, 0.0) (-3.0, 0.0)	(47.1, 0.8) (29.4, 1.3) (-3.1, 1.0)	(-4.5, 6.4) (-29.0, 0.7) (-0.7, 4.5)
10~20	(0.2, 70.5) (34.4, 1.7) (-1.6, 2.0)	(67.7, 0.5) (69.7, 0.5) (-9.2, 0.3)	(70.5, 0.5) (55.3, 0.7) (-0.7, 0.4)	(31.1, 1.5) (6.7, 2.3) (-4.0, 0.0)
20~30	(-0.03, 248) (34.0, 1.8) (-0.8, 4.1)	(66.7, 0.6) (69.8, 0.5) (-10.8, 0.3)	(70.0, 0.5) (55.0, 0.7) (-12.0, 0.3)	(33.6, 1.2) (11.3, 1.6) (-0.2, 0.4)
30~40	(-0.5, 22.7) (32.3, 1.0) (-0.2, 20.2)	(64.6, 0.6) (68.0, 0.5) (-10.2, 0.3)	(60.0, 0.5) (53.4, 0.7) (-12.7, 0.2)	(32.2, 1.3) (10.7, 1.7) (-10.8, 0.3)
40~50	(-0.6, 16.5) (32.2, 1.8) (1.0, 3.2)	(63.7, 0.6) (67.2, 0.5) (-9.4, 0.3)	(67.1, 0.5) (52.8, 0.7) (-12.4, 0.3)	(31.5, 1.3) (10.4, 1.6) (-12.6, 0.3)
50~63.5	(-0.9, 19.2) (31.7, 1.9) (1.9, 2.3)	(62.2, 0.6) (66.0, 0.6) (-8.4, 0.5)	(65.7, 0.6) (51.9, 0.7) (-11.9, 0.4)	(30.7, 1.4) (9.6, 2.0) (-14.4, 0.3)
63.5~82	(-1.8, 17.5) (29.7, 2.1) (3.0, 2.0)	(59.4, 0.6) (63.7, 0.6) (-7.1, 0.8)	(63.3, 0.6) (50.4, 0.72) (-11.3, 0.5)	(29.5, 1.4) (8.8, 1.4) (-16.6, 0.4)
82~107	(-3.3, 13.5) (25.7, 3.0) (4.5, 1.8)	(54.5, 0.7) (59.3, 0.6) (-5.5, 1.5)	(59.1, 0.6) (47.6, 0.8) (-10.4, 0.0)	(27.5, 1.6) (7.2, 1.7) (-19.0, 0.4)
107~142	(-5.1, 7.0) (10.6, 13.7) (6.2, 1.0)	(46.6, 0.0) (51.8, 0.7) (-3.3, 3.4)	(52.0, 0.7) (42.7, 0.9) (-9.2, 1.2)	(23.8, 1.9) (4.0, 3.3) (-21.0, 0.5)
142~190	(-6.3, 5.8) (11.8, 22.0) (6.3, 1.8)	(-64.9, 0.6) (41.3, 0.9) (-0.3, 55.6)	(41.6, 0.9) (35.3, 1.0) (-7.5, 2.0)	(10.5, 3.0) (0.2, 22.5) (-21.9, 0.7)
190~255	(-6.2, 7.0) (4.4, 13.7) (10.6, 1.9)	(24.9, 1.5) (29.6, 1.2) (3.7, 5.6)	(29.3, 1.2) (26.2, 1.4) (-5.3, 3.9)	(13.2, 6.2) (-0.8, 42.9) (-21.9, 0.9)
255~343	(-4.2, 26.1) (0.02, 4.9) (13.2, 2.1)	(15.3, 2.4) (19.0, 1.9) (8.5, 3.3)	(10.0, 2.0) (17.4, 2.1) (-2.6, 10.8)	(10.2, 4.3) (1.8, 6.4) (-22.2, 1.3)
343~464	(-0.9, 20.8) (0.4, 8.4) (16.4, 2.34)	(9.0, 3.8) (11.9, 3.1) (13.5, 2.9)	(10.2, 3.6) (11.5, 3.2) (0.4, 105)	(9.7, 3.8) (5.3, 3.5) (-24.6, 1.6)
464~629	(2.6, 11.1) (4.6, 10.5) (20.2, 2.6)	(8.7, 4.2) (9.2, 4.0) (18.2, 2.9)	(7.4, 5.0) (9.5, 3.9) (2.8, 18.5)	(11.1, 3.3) (7.3, 2.5) (-30.8, 1.7)
629~854	(5.0, 10.7) (9.1, 4.0) (24.2, 3.0)	(9.6, 3.8) (9.4, 3.9) (21.6, 3.3)	(7.4, 5.0) (8.9, 4.1) (3.5, 20.2)	(11.4, 3.2) (6.4, 2.5) (-41.4, 1.7)
854~1161	(4.6, 27.1) (9.0, 4.1) (27.2, 3.6)	(8.6, 4.2) (8.7, 4.2) (12.6, 4.5)	(6.0, 6.1) (5.8, 6.3) (1.2, 80.2)	(6.9, 5.3) (2.4, 5.4) (-53.8, 1.8)
1161~1580	(2.5, 233) (4.3, 8.0) (26.3, 5.0)	(5.0, 7.3) (5.2, 7.6) (18.2, 7.3)	(2.4, 19.3) (0.5, 237) (-4.1, 32.4)	(-0.2, 5.2) (-2.4, 3.7) (-59.1, 2.2)
1680~2152	(0.9, 52.9) (9.6, 191) (22.9, 7.9)	(1.7, 22.5) (1.3, 20.0) (13.4, 13.5)	(-1.2, 32.7) (-4.0, 11.4) (-10.3, 17.6)	(-5.1, 7.2) (-4.1, 2.2) (-51.3, 3.5)
2152~2033	(-0.1, 120) (-0.2, 46.6) (24.0, 10.3)	(-0.7, 224) (-1.9, 57.7) (4.6, 53.5)	(-3.5, 10.4) (-6.8, 6.9) (-12.9, 19.2)	(-6.7, 5.6) (-2.9, 3.4) (-33.0, 7.3)

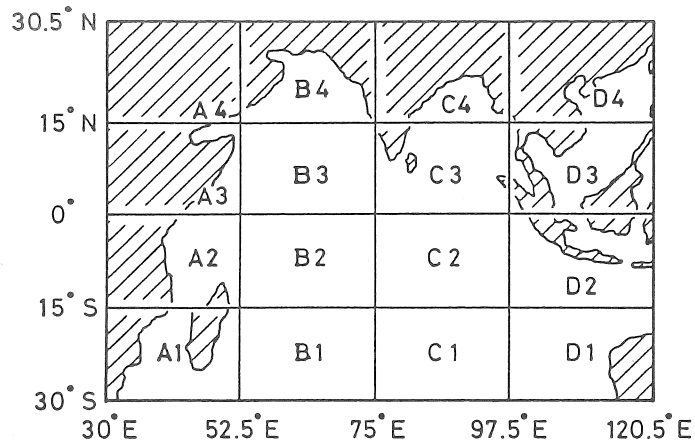


Figure 3 Box arrangement

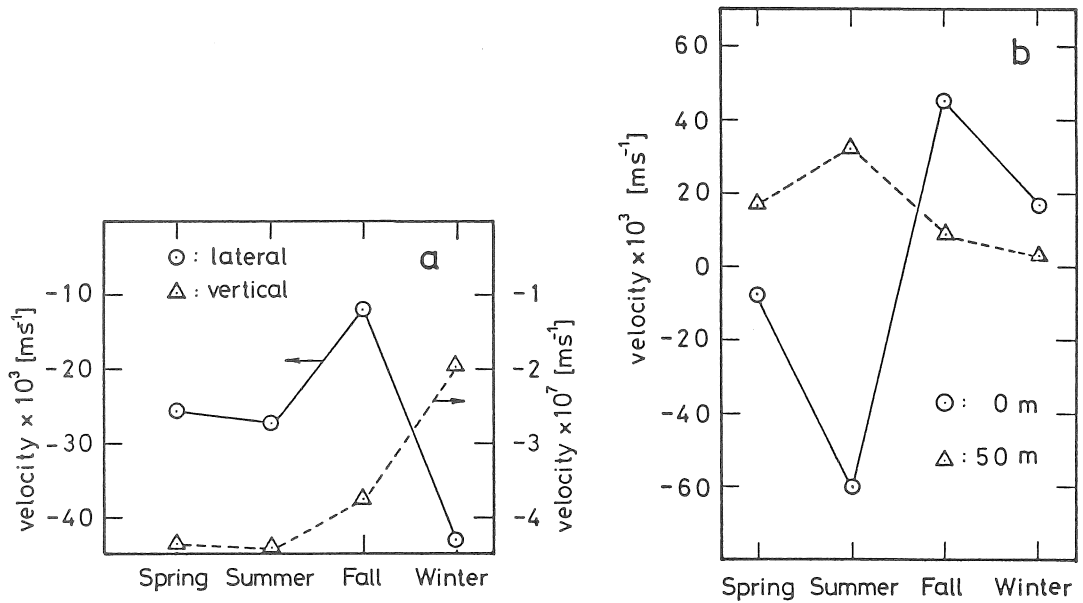


Figure 4 Velocity fluctuation

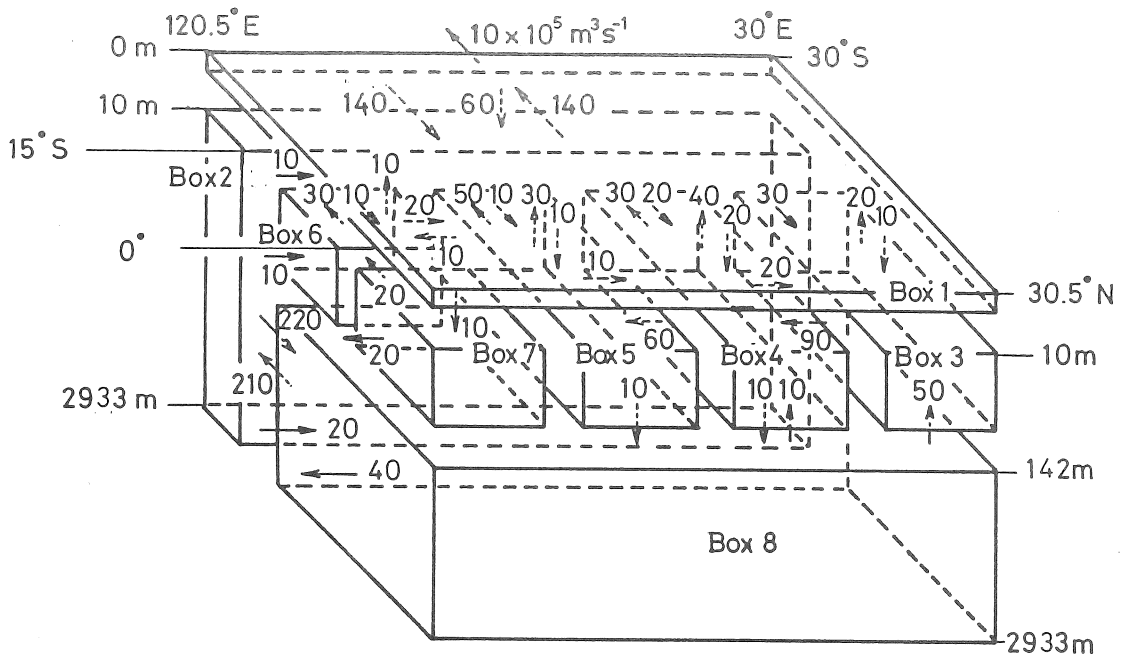


Figure 5 Multi box model of the Indian Ocean

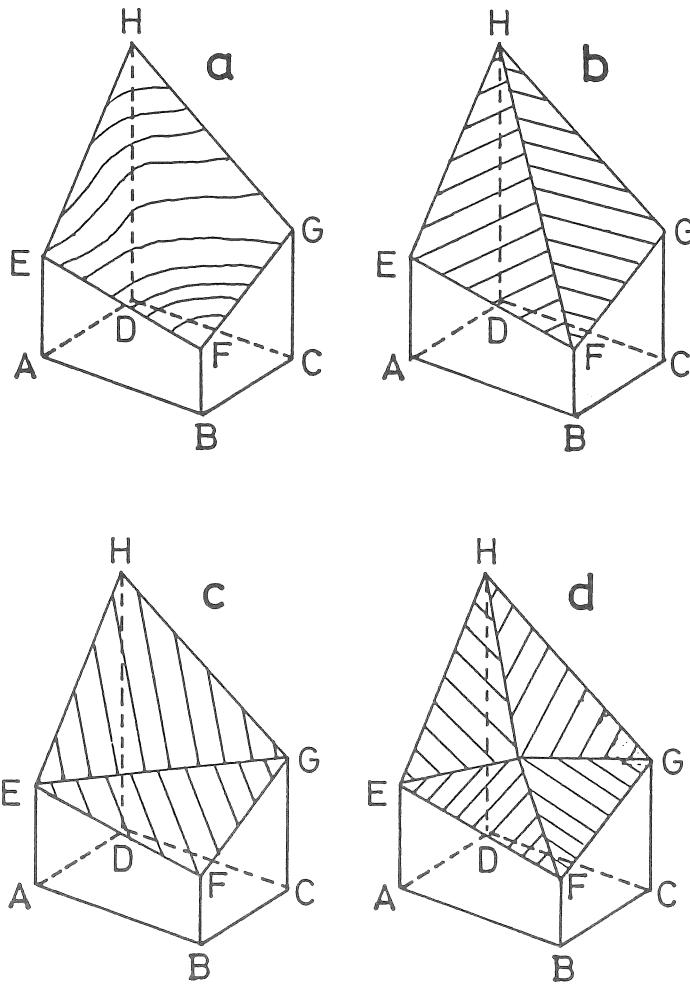


Figure A1 Approximation of the surface shape

Proposal of Comprehensive Sea Water Utilization and Its Evaluation for
Countermeasures against the Global Warming
- Oceanic Mixing Model Based on Global Simulation of Ocean Circulation -

Korekazu UYAMA

Department of Chemical Engineering, Faculty of Science Engineering,
Osaka University

Toshinori KOJIMA

Department of Industrial Chemistry, Faculty of Engineering,
Seikei University

Toshio YAMAGATA

Department of Earth and Planetary Physics, Faculty of Science,
University of Tokyo

Summary

An oceanic mixing model of the Indian Ocean was proposed based on the global simulation of ocean circulation, which is so reliable as to be able to reproduce El Nino. The main purpose of this work is to represent the mixing characteristics of the Indian Ocean with the smallest possible number of boxes. In simplifying huge number of numerical values given at 444,080 points in Indian Ocean, special attention was paid to obtain the average velocity with high accuracy, which assure the mass balance at each box.

It was revealed that time courses of ocean circulation was not so fluctuating at the point lower than 50m, even if a surface current drastically changed its direction and an absolute value due to the monsoon. The 8 boxes model was finally proposed, each of them has its speculated function. Box 1, for example, which is composed of a surface layer with 10 m thickness, is a distributor of fertilizer. Once the fertilizer is fed to a certain point at certain season, it is distributed to boxes 2 to 7 after some delay times. The distribution ratio and the delay time are functions of position and time of the fertilization.