

台風情報と台風予報

Typhoon Information and Typhoon Prediction

栗原 宜夫

Yoshio KURIHARA

1. はじめに

台風の経路と強度の正確な予報は、各方面から強く要求されつづけている。台風の研究や予報に携わる人たちは、この要請に応えるために永年にわたって努力を積み重ねてきた。それでも、台風については、まだ分かっていないことがたくさんある。このように、台風の力学は未完成の科学であるにもかかわらず、予報現業では予報をだすことが法的に義務付けられている。

この半世紀のあいだに、台風の振る舞いを理解する手法は著しく進歩した。これを強力に後押ししてきたのは、気象観測手段の充実であり、向上し続ける計算機の能力であった。それでは、台風について深まった理解をどのように予報に適用していけばよいか、現業上の制約にかかわる問題をいかにして克服すればよいだろうか。このことについても、近年いろいろな工夫がなされている。この講義では、昨今の台風予報の状況と予報改善に向けた活動を話題にする。

台風は、高潮や波浪の振舞いに直接関与する。したがって、高潮予報モデルなどは台風予報モデルと適切に結合しなければならない。このことについても、簡単にふれるつもりである。

2. 大気状態の観測

熱帯低気圧の予報の精度は年毎によくなっている。予報開始から 12、24... 時間後の予報位置の誤差は年とともに減って、大西洋のハリケーンについて言えば、近年の 48 時間後の予報位置誤差は、かつての 24 時間後の誤差に相当している。予報精度の向上は、西太平洋の台風予報についてもみられる。この成果は、大気の状態と台風予報モデルが巧みに組み合わせられるようになってもたらされた。では、大気状態はどのようにして観測されているのだろうか。

2.1 気象観測

気象観測をするプラットフォームは、地上、飛行機、および人工衛星の 3 つに分けられる。

a) 地上で行われる観測

地上気象観測：さまざまな気象要素を測定する。わが国で、各地の観測結果をあつめて大気の状態を解析し、天気図が描かれ始めたのは 1883 年。この地上天気図をもとにして、翌年 6 月 1 日には全国天気予報が始まり、暴風雨や波も予知されるようになる。

やがて、高度の大きい地点で直接観測をするために、山岳（富士山、1932 年から通年観測；そのほか筑波山など）に測候所が設置される。

アメダス：日本列島には地域気象観測システムが整備されている。約 1300 ヲ所で降水量観測、このうち 800 ヲ所では風向、風速、気温、日照時間も観測、冬季には 280 ヲ所では積雪も観測されている。

気象レーダー：気象レーダーによって、接置場所からある範囲内の雲や雨の細かい分布や、鉛直面内の雲の構造を知ることが出来る。富士山頂のレーダー（1964 年 10 月～1999 年）は、

数多くの台風の姿を鮮やかにとらえつづけた。最近では、ドップラーレーダーによって、風の動径方向成分をはかることが可能になっている。

気象ゾンデ：気象ゾンデによって、気温、気圧、相対湿度、風などの鉛直分布がわかる。風の観測には、パイロット バルーンも利用される。

ウィンド プロファイラー：全国 31 ヲ所で、地上から上向きに発射された電波が散乱してもどってくるのをうけている。そのときの周波数の差から、大気下層（～3km）、特に境界層内部の風の鉛直分布をもとめる。

海洋上での観測：海洋を航行する船からは、貴重な気象情報がおくられてくる。また、浮遊するブイにも気象観測装置がつけられているものがある。

b) 飛行機からの観測

現在、熱帯低気圧をターゲットにして飛行機観測が行われているのは大西洋海域においてのみである。台風の内部および周辺で、飛行機からドロップゾンデをおとして観測をする。また、ドップラー レーダーを利用して台風内の風の分布をもとめる。西太平洋海域では、戦後、グアム島にある米国台風警報センターが台風偵察機をとばして気象観測をおこなってデータを集めてきた。しかしながら、この観測は、1987 年に中止されてしまった。なお、近年、台湾で、ドットスターと呼ばれる飛行機観測プロジェクトが立ち上がり、台風予報に利用されていることに注目したい。そのほか、気象観測用の無人飛行機の開発がすすんで、観測テストがおこなわれる段階にいたっている。

c) 宇宙からの観測

気象衛星：宇宙には、アメリカやヨーロッパなどの人工衛星がいろいろな軌道をとびまわっていて、気象情報をおくってくる。おなじみの日本の静止衛星「ひまわり」は、1953 年以来観測センサーをふやしながら次々に更新されている。また、2005 年には、運輸多目的衛星がうちあげられた。

衛星の雲画像には台風や前線の存在と活動がうつしだされている。台風の場合には、雲が中心に向かって巻き込む形から、台風の発達段階や強さまでも推定する統計的な方法がひろくつかわれている。また、短時間差の雲画像の比較から、雲の高度における風ベクトルが推定される。気象衛星には大気からでていくいろいろな波長の放射量を測る計器が搭載されている。そのデータから、衛星通過地点における気温と水蒸気量の鉛直プロファイルを求めることができる。雲が無い領域では、気柱内の総水蒸気量がわかる。また、マイクロ波散乱放射計で海面の状態を計って、海上の風の状態を求める。

熱帯降雨観測衛星 (TRMM)：日米が共同で開発した衛星で、熱帯地域の降雨分布を観測する。

また、対流雲の鉛直面内分布や構造を推定することができる。

全地球測位衛星 (GPS)：この衛星からの信号の遅延は、気象および測地の両分野で注目された。

気象の分野では、信号遅延時間のデータから、水蒸気量分布を求めている。

2.2 台風に関する情報

台風の状況は次の情報で示される。

中心位置：地上気圧最低点の緯度、経度

強度：地上気圧の最低値、最大風速

大きさ：暴風域の範囲（4 象限について、暴風や強風の広がり）

移動：台風移動の方向と速度（過去と現在位置から決める）

3. 台風を予報するモデル

3.1 最も簡単な台風予報

台風の将来の位置を予想するのに、CLIPER (climatology and persistence) とよばれる簡便な方法が長い間つかわれていた。この方法は、台風の位置と移動の情報に過去の経路の統計を組み合わせたものである。その後、台風予報は数値力学モデルによって行われるようになった。これは、台風のふるまいが台風内部の構造と台風を取り巻く環境に左右されることを考えれば、自然のなりゆきであった。しかし、12時間後の位置予報で、数値モデルが CLIPER に勝る結果を出すには、時間がかかった。台風モデルを設計する場合、特に注意しなければならないことがある。

3.2 スケール間相互作用

発生、発達、移動、衰弱という台風の一生は、3つのスケールの間の相互作用に支配される。3つのスケールは、雲の大きさ（～数 km）、台風の渦の大きさ（～数 100km）、台風の背景および周辺の大規模な環境を特徴づけるもの（1,000km 以上）である。

台風の内部では、雲の集団のなかのひとつひとつの雲が熱を発生している。これらが有効に使われると、台風の運動エネルギーの源になる。また、台風の発達や衰弱が大規模な風に強く依存することはよく知られている。したがって、台風の予報モデルで、この3つのスケールを正確にあらわしていくことが必要である。

3.3 モデルの解像度

予報モデルでは、モデルの空間をいくつかの層に切り分け、それぞれの層について風、気温、気圧などの分布を表すことによって、大気の状態を表現する。この場合、情報量の分布をあらわすには、あらかじめ設定した格子点（grid）に変数の値を与える。あるいは、有限個の関数形（truncated spectrum）を重ね合わせてあらわしてもよい。写真をとるのに、デジタル画像にするか、フィルムでとるかの違いにたとえられようか。

多くの場合、台風の海面気圧は、台風中心についてほぼ同心円状の分布をしていて、特に中心付近で気圧が急に低くなる。この分布を数値モデルのなかに高い精度であらわすには、高い水平解像度が要求される。渦の構造が誤って表現されると、その移動に誤差を生じることになる。したがって、台風モデルで台風予報をするには、十分に高い解像度（たとえば、～10km）の数値モデルを用いなければならない。一方で、台風を取り巻く環境の状態を表すには、スケールの点から考えて、解像度のしきいをゆるくすることが許されるし、計算効率の面からみてもそうすることの利点は大きい。そこで考案されたのが、多重移動格子である。たとえば、モデル全領域に 100km 格子をかぶせる。次に、台風を囲むある範囲をその3倍の解像度（～30km）の格子におきかえる。さらに、解像度を倍増した格子を台風の主要部分にはめ込むと、3重格子モデルができる。内部の二つの格子系は、台風の動きにあわせて移動させていく。[図1]

大気全体を対象にした全球大気モデルの解像度は、格子間隔が数 100km の時代から、計算機の進歩に連れて急速にたかめられてきた。現在の地球シミュレータでは、水平方向が 10km、鉛直方向には 94 層という高解像度大気大循環モデルを時間積分して、実際の台風によく似た構造をもつ渦をつくりだしている。

従来の大気モデルは「PE モデル」とよばれるもので、大気の挙動について静力学平衡近似が成り立つことを仮定している。PE モデルでは、鉛直方向の加速度が非常に大きくなる現象をまともに

取りあつかうことは出来ない。このような状態は、水平方向のスケールが鉛直方向のスケールよりも小さい現象において起こりうるということがわかっている。すなわち、PE モデルの格子間隔は、対流圏の深さに相当する値よりも小さくすることができないのである。水平解像度 10km は PE モデルの適用限界にちかい。

3.4 台風をモデルに取り込む

台風モデルの難問の一つは、台風のかたちをどのように決めて予報モデルの初期状態にふくませるかという問題である。これは、個々の台風については、その 3 次元構造についての情報が十分には得られないからである。[図 2]は、台風の一般的構造を示すものである。

予報を始めるにあたって、モデル内の台風は次ぎのようにしてあらわされている。

- ・ 台風モデルを予報モードにして、台風に関する手持ちのデータに出来るだけ整合した渦を静かな環境内につくりだす。この渦を観測された台風の位置に置いて、あらかじめ解析されている環境の場に重ねあわせる。
- ・ 台風に関するデータから、あらかじめ経験的に決めた式で、渦の構造を決める。この渦を上記と同様のやり方で環境の場にかさねる。
- ・ 大気状態の全般的な解析をするときに、仮想的な観測値 (bogus data) を台風周辺に補充しておく。
- ・ 初期状態の設定に当たって、上に述べたような特別扱いはいっさい行わない。

3.5 雲の取り扱い

a) パラメタリゼーション

PE モデルの力学では、背の高い積雲をまともに取り扱うことができない。台風だけでなく、熱帯地方のその他の対流現象や、中緯度の前線上に発達するはげしい対流雲も同様である。台風では、対流性の雲の集まりが、PE モデルの中の台風渦のエネルギー源である。したがって、対流現象の効果を何らかの方法で PE モデルに取り入れる工夫が必要である。そのための方式が、「積雲パラメタリゼーション」とよばれるもので、積雲対流の効果を PE モデルの情報からみつもうというのである。そのために、いろいろな方式が提案されている。対流現象以外にも、大気内の物理量拡散、特に大気境界層や地表面における乱流の効果、大気内の短波放射および長波放射の収支見積もりなどもパラメタリゼーションのかたちで評価されている。

「パラメタリゼーション」の方式は、その基本的な考え方、仮想されている物理過程の妥当性、および適用結果の評価などの問題をかかえたまま、PE モデルで使われつづけるであろう。

b) 非静力学モデル

最近では、対流性積雲までも直接シミュレートすることを目指して、超高解像度非静力学モデルが構築され、その全球モデルや領域モデルから注目すべき成果が得られている。これは、数値モデルを PE 力学の束縛から解放す正攻法であるが、雲の中の微細構造やその変動をどう扱えばよいかという新たな問題にむきあうことになる。

4. 予報－解析サイクル

前の章では、台風予報の特殊性として、スケール間相互作用とそれに関連したモデル解像度の問題、モデルにとり入れる台風のつくりかた、および対流性の雲の取り扱いかたを述べた。

次に、モデル予報を始める時刻のモデルの状態、すなわちモデルの初期条件、について考える。

モデルの予知能力がいかに優れていても、初期条件が不正確では、高いスキルは期待できない。持ち合わせの気象情報を活用して大気の初期状態を決める作業が「気象解析」である。

4.1 定時気象観測データにもとづく解析

定時気象観測のデータが与えられて、大気の状態を記述せよといわれたとする。便宜上、この時刻を24時としよう。データは、

風、気温、気圧、水蒸気量、雲の状態、海面温度など

で、決められた高度ごとに与えられている。この場合、自分が持ちあわせている気象の知識を活用し、過去の事例を参考にして各高度について解析がなされる。解析には、いろいろな種類の内挿法が使われるであろう。当然、解析結果は人によって異なってくる。特にデータ分布が十分でないところについては、解析のばらつきが大きいと思われる。

4.2 予報された情報を解析に取り込む

あらかじめ定められた時間間隔で数値予報を行っている予報機関においては、新しく予報を始める時刻にたいして、前回の時刻からの予報結果がでてくる。例えば、前回の予報が12時に始まり、24時にたいする予報を記録して、さらに先へ進行していったとする。モデルが残した24時のデータは、この時刻の定時気象観測データとならんで、気象解析に利用することができる。予報モデルの情報は、二つの特徴をそなえている。第1に、モデルがつくったデータはモデル空間全体に分布したデータであるため、観測点密度が低い地域にたいしてとくに有用である。しかも、予報の進行につれて、データ密度が低い地域には、データ密度が比較的高いところの情報が流れこんでくることが期待される。

第2の特徴は、モデルの状態は、モデルの力学に支配された力学関係を保っていることである。このために、解析にモデル情報をとり入れる「3次元データ同化」の方法がかんがえられた。この手法では、モデルで予報された24時の状態を同時刻の観測データにつきあわせて、予報変数相互の間に整合性がある解析データセットをつくりあげる。[図3 参照] この解析には変分法が応用されている。

予報をはじめる二つの時刻の間に（例えば、12時と24時の間の18時）定時観測がおこなわれていたら、上述の三次元データ同化を定時観測時ごとに実行してつないでいけばよい。このように、「予報→解析→予報」のサイクルによって、24時を起点とする予報の初期条件が決まってくる。一言付け加えるが、この解析では、予報モデルを使用するので解析結果は一義的なものではない。なお、非定時観測データをなんとかして解析にとりこむために、定時観測時刻の前のある時間内（時間窓 などと呼ばれる）の観測を定時観測とみなすことがある。このような無理なやりかたをしないで非定時観測値をとりいれていくのが、次に解説する4次元データ同化の方法である。

4.3 4次元データ同化

前節で述べた解析方式では、気象衛星データなどの非定時観測データは役立てられていない。すでに述べたように、予報モデルは、12時から24時の全期間にわたって、モデル力学に支配された情報を与え続けている。そこで、このモデル情報を、すべての観測データに次々に照合させていくことが考えられた。つまり、三次元空間のみでなく、時間軸を加えた4次元空間で観測データとモデル予報を統合する解析手法で、「4次元データ同化」とよばれる。この手法によって、解析を行った全期間にわたって整合性があるデータセットが得られる。[図4 参照]

上記の解析によって予報モデルの初期条件を設定することが出来るので、「予報→4次元データ同

化の手法にもとづく解析→予報」という高いレベルのサイクルができあがる。解析の結果（すなわち設定された初期条件）が、予報モデルに依存することは、前節の場合と同様である。

5. アンサンブル予報

台風モデルによる台風予報の精度が、モデルの構造と初期条件の設定次第であることは言うまでもない。このことに関連した議論を進めよう。

5.1 アンサンブル予報

大気状態の解析でもとめられるモデル初期条件にはモデルによる違いがあることは、すでに述べた。実際の予報作業では、しばしば、予報の初期条件としてよその気象機関で解析されたものが利用される。いずれにせよ、どんな初期状態にも、ある程度のあいまいさが存在する。

ある初期条件を設定して台風経路を予報したとする。この場合、初期状態のあいまいさは、予報にどの程度の影響を及ぼすだろうか。これを調べるために初期条件をすこしだけ変えてみると、異なった台風経路が予報される。初期条件を系統的に変えてそれぞれの場合（メンバーと呼ばれる）にたいして台風予報をすると、ばらついた台風経路が得られる。メンバーの予報は、ある範囲内にかたまったり、二つのグループに分かれたり、いろいろなかたちの分布をしめす。これがアンサンブル予報で、予測の難易度とか予報の信頼度を表していると考えられる。[図5] 最近では、日々の天気予報に、アンサンブル予報がひろく使われている。なお、メンバーが予報したばらつきのパターンから、どの領域の気象観測を強化すれば予報精度が上がるのだろうかを推定する問題が議論されている。

5.2 スーパーモデル アンサンブル

次に、同じ初期条件をつかっても、予報モデル次第で台風の予報経路が変わる問題を取りあげる。このように、複数のモデルで複数の経路が予報された場合、これをどのように解釈したらよいだろうか。ひとつの考え方では、経路のばらつきは予報モデルの「くせ」のあらわれであるとする。予報モデルには、モデル構築上の違いがある。なかでも、地表面摩擦、エネルギー交換、境界層の構造、積雲対流、非断熱過程等の効果を見積もるための、いわゆるモデル物理過程の「パラメタリゼーション」方式の違いは、モデルの振る舞いに大きな影響を与える。このことが、あたえられた状況のもとで、モデルの「くせ」としてあらわれるのではないだろうか。そして、複数のモデルの「くせ」を適当にならしたものは実際の現象に近いと仮定して、複数モデルの予報結果を処理するのが、スーパーモデル アンサンブル予報である。これで、台風経路の予想をしてみると予報スキルの改善が認められ、注目されている。[図6]

6. 台風－海洋結合モデル

大気境界層と海洋混合層が接する海面では、大気と海水の間で、運動量、熱エネルギー（顕熱、および水蒸気の形をとった潜熱）の交換がおこなわれている。この相互作用によって、海洋上の台風の振舞いおよび海洋の構造に変化があらわれる。なかでも、高潮や大きな波浪は、台風の強風によってひきおこされる。

6.1 台風による海面温度降下

台風が海洋上を進むと、海水の湧昇や攪拌混合がひきおこされる。その影響で、進行する台風の右側に水面温度の降下、混合層の厚さの変化などが起きる。台風の進行速度次第では、海水面温度

は数度もさがって、台風の強度におおきな影響を及ぼす [図 7]。これを、気象衛星からみると、台風の経路を示すように水温が線状に低くなっているのがわかる。後続の台風がこれを横切る場合には、一時的に強さが弱まる傾向がある。

台風のような暴風雨の状態での海面における運動量交換、すなわち応力の大きさなどについては、わからないことが多かったが、近年、この基本的な事柄の解明が進んでいる。たとえば、大気境界層内に出来る水平ロール状構造、強風による波しぶきのはたらき、強風にもなう波浪生成などの台風への影響が議論されている。

6.2 高潮

海面は、潮汐やうねりによって上下に振動する。これに重なって潮位を異常にたかめる成分が高潮である。高潮を引き起こすのは、海水の収束をもたらす強風と海面の持ち上げをおこす海面気圧の低下である。したがって、高潮予報では、海域の詳細な形状および海底地形をあたえて、上にのべたような大気と海洋の結合過程を正確に見積もらなければならない。[図 8 参照]。高潮はいろいろな気象現象によって引き起こされるが、台風によるものが最もはげしい。したがって、台風による高潮の予報では、台風の経路と風速風向分布の正確な予報が要求される。

気象庁の高潮予報モデル (1998) では、日本列島を含む約 $2000\text{km} \times 2000\text{km}$ の領域を緯度、経度 1 分 (約 1.5km) の格子で覆う。これで、領域内にある $\sim 100\text{km}$ 以上のスケールの湾岸地形が解像される。このモデルは 2 次元順圧モデルで、格子点総数は 1,380,000 ; 予報時間ステップは 8 秒。このような高解像モデルには、台風の強風域の風速分布などの情報をあたえなければならないのであるが、台風モデルの格子間隔は数十 km 以上で、高潮予報モデルの要求との間に大きなギャップがある。そこで、台風モデルから台風外域と中心の気圧差および台風の移動に関する情報をとりだし、それを経験式に入れて台風内部の気圧および風の分布を推定することが行われている。台風の経路と高潮モデル全域に対する風の分布が分かると、海水表面に働く応力分布を時間を追って計算することができる。気象庁モデルでは、こうして、約 200 の港湾について、高潮の変動や最大値を計算している。

なお、高潮モデルで予報をはじめるにあたっては、予報開始時刻よりある時間 (たとえば 18 時間) さかのぼった時刻にモデルを起動させる。したがって、24 時間予報では、42 時間にわたってモデルが時間積分されている。また、台風経路予報の不確かさを考慮して、いわゆる予報円を参考にして 4 本の経路を追加想定する。そして、台風がこれらの経路をとった場合に起きる高潮も予報しておく。

6.3 波浪

海上のある場所における波の状態は、波の周波数と伝播方向の関数としてあらわされるエネルギー スペクトルの形状であらわされる。この 2 次元スペクトルの各成分の時間変化は、その成分の移流、風から供給されるエネルギー、非線形過程による他の成分との間のエネルギーやりとり、および、エネルギー散逸で決まる。このように、大気と波浪は、海面におけるエネルギー交換を通じてつながっている。この交換は、海面に働く応力で達成されるのである。

波浪予報モデルの格子間隔は、日本沿岸海域のモデルでは 10km 、地球全海洋については 130km である。波浪モデルには、風に関する情報が数値予報モデルから与えられる。各格子点では、波の周波数帯と伝播方位を適当な個数に分割して、それぞれの区分に対して波のエネルギーを配分する [図 9]。予報された波浪成分を統合して、波に関する情報がつくられる。

7. むすび

この講義では、台風予報の最近の技術について説明した。台風を予報モデルに取り入れることに関しては、台風の力学におけるスケール相互作用とモデル解像度の関係、台風をモデルに取り入れる問題などを考えた。台風予報作業については、「予報→気象観測データの解析→予報」をくりかえしていく予報のながれは、「予報→4次元データ同化の手法にもとづく解析→予報」の流れへと変わっていくだろう。また、アンサンブル予報とスーパー モデル アンサンブル予報について簡単に述べた。

大気と海洋の結合現象には、台風通過にともなう海面温度の降下、高潮、波浪などがある。これらは、いずれも海面において大気が海水に及ぼす応力、大気と海洋の間の熱エネルギー交換によって支配される。この過程が、台風の構造および強度の変化に決定的な影響を及ぼす。したがって、大気境界層および海洋混合層の力学に関する研究とその成果の実用開発によせる期待は極めて大きい。

なお、6.3 節の記述は、高野洋雄氏（気象研究所）のご教示に負うところが大きい。お礼を申しあげる。

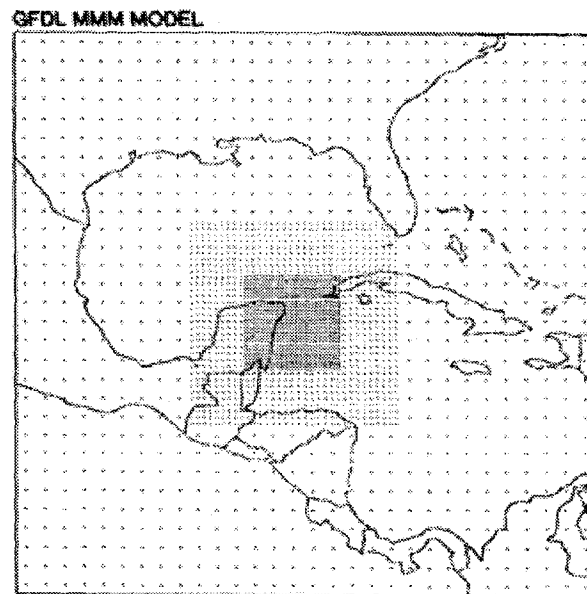


図-1 3重移動格子系。緯度経度1度間隔の格子の中に1/3度間隔の格子、さらにその中に1/6度間隔の格子が組み込まれている。

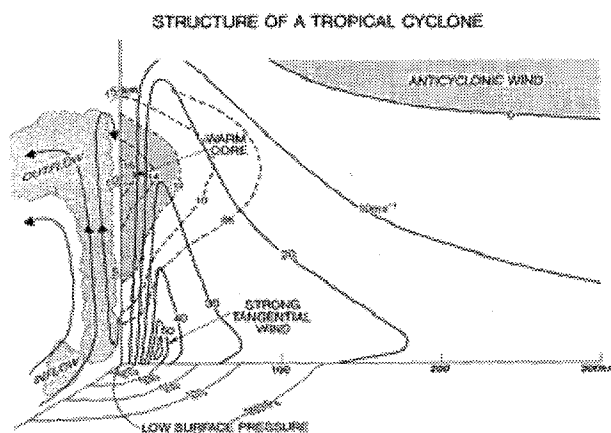


図-2 台風の構造。中心を通る鉛直断面の上に、風速分布、気温偏差（台風の外の温度からの差）分布などの概略が示されている。

大気状態の解析

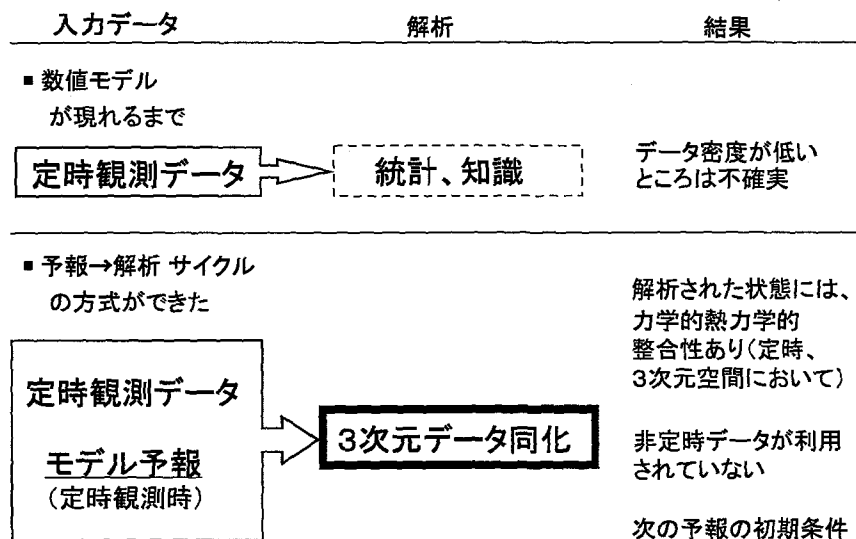


図-3 大気の状態を記述する解析手法。数値モデルの出現によって、データ同化の手法が用いられるようになった。その結果、空間的に整合性のある状態を記述できるようになった。

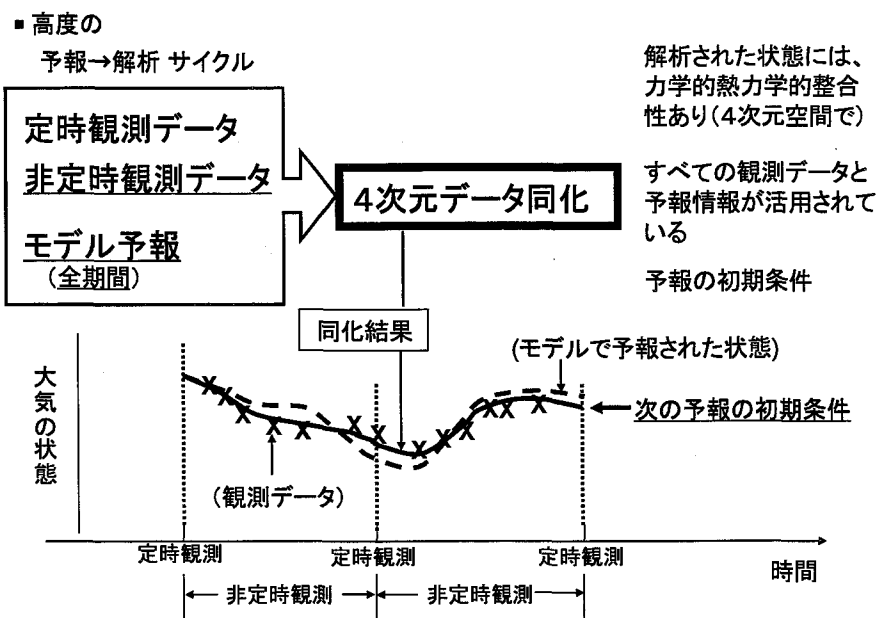


図-4 図-3 の続き。4次元データ同化法によって解析される状態は、空間的にも時間的にも整合性がある。

アンサンブル予報

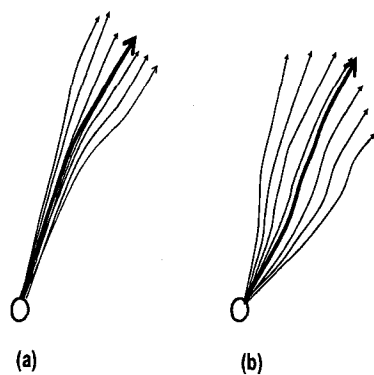


図-5 アンサンブル予報。 予報の信頼度が高い場合（左）と、低い場合（右）を示す。

スーパーモデル アンサンブル予報

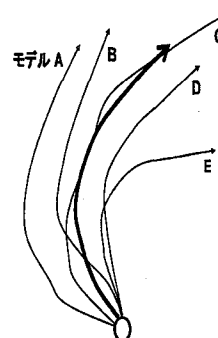


図-6 スーパー モデル アンサンブル予報。

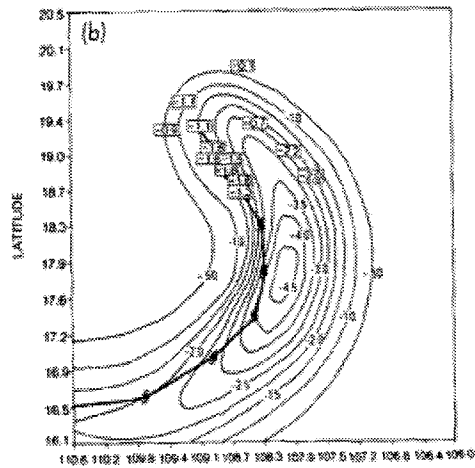


図-7 ハリケーン通過に伴う海面温度の低下。 数値シミュレーション (Bender et al. 1993)

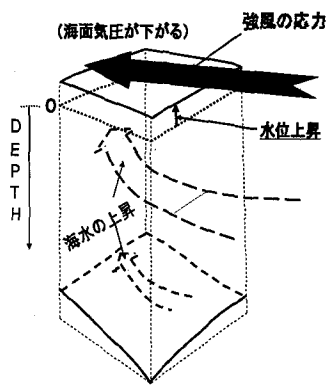


図-8 高潮。
一つの格子上的様子を示す模式図。

波浪モデル：各格子点のエネルギースペクトル

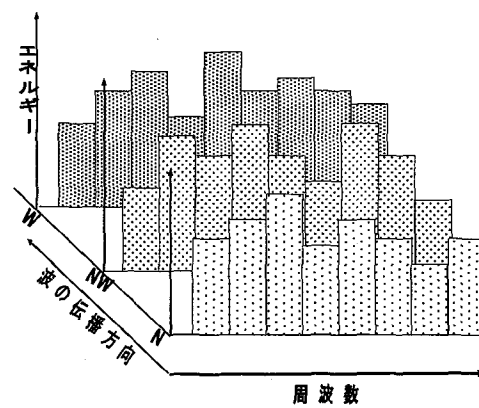


図-9 波浪。個々の格子点における波浪エネルギーは、周波数と伝播方向について分解したスペクトルで表される。