

5. トラジェクトリ計算例

本章ではトラジェクトリの計算例を紹介する。紹介例には等圧面法と等温位法で類似の結果が得られる場合と得られない場合、経度・緯度で数度離れた地点から計算した場合など、ユーザーが遭遇するであろうケースについて羅列してあり、統計的な解析は行っていない。本システムの利用者は、このようなケースがあり得ることを常に念頭において、いくつか条件を変えて計算を行わせるべきと思われる。

なお、以下の紹介例は殆どが高度 800m ~ 1500m 程度の比較的地表面に近い場合である。当所で行っている温室効果ガスのモニタリングデータの解析への応用をはじめとし、従来のユーザーの多くは観測地点が地表付近にあるデータの解析への利用を希望するケースが多く、従って地表に近いところでの気塊の動きを知りたいケースが多いため、上記の範囲での計算例を提示する。

なお、着地判定は採用していないので、計算が途中で終わっているものは計算に必要な気象値を補間する時に 1000hPa より高圧領域のデータが必要となり、自動的に計算が中止されたことを意味している。なお、下記の紹介例は 5.5 の例をのぞいて全て 2.5 度メッシュデータを用いている。

5.1 等圧面法

等圧面法は気塊を同じ圧力面に沿って風の水平成分だけを考慮して移動させるものである。本システムでは ECMWF のデータセットに含まれる指定気圧面でのみ計算が出来る。トラジェクトリ解析手法は、観測データの解析において、どの方向から大気が流れてきていたか、などの推定に用いられることが多いが、その場合計算の開始地点の高さ、或いは指定気圧面をどこにとるかが問題になることがある。本章では計算を行う区域の隣接した上下 2 層の指定気圧面で風の水平成分が類似である場合と異なる場合について、即ち、隣接した 2 つの気圧面でトラジェクトリが一致する場合と異なる場合について紹介する。

Figure 5.1 に 1999 年 7 月 30 日 0 UTC に波照間上空に到達した気塊のバックトラジェクトリを等圧面法により 850hPa 面(約 1500m、図中(a)と 925hPa 面(約 800m、図中(b))で算出した例を示す。上から順に 4 次 Runge-Kutta 法、Petterssen 法及び Euler 法で算出した結果である。図中のトラジェクトリ上の丸印は 1 日前、2 日前および 3 日前の位置を表している。それぞれの圧力面で 3 日間のバックトラジェクトリは、積分解法によらず殆ど同じである。また 850hPa 面と 925hPa 面でみても気塊が移動する経路は同じである。

一方 1998 年 2 月 8 日 0 UTC に波照間上空に到達した気塊について、Figure 5.1 と同様 3 日間のバックトラジェクトリを等圧面法により 850hPa 面と 925hPa 面で算出した結果を Figure 5.2 に示す。それぞれの面でみれば、トラジェクトリは積分解法によらず同じであるが、850hPa 面と 925hPa 面とを比較すると 1 日前すなわち 2 月 7 日 0 UTC 以前では方向が異なっており 850hPa 面では西北方向から移動してきたと計算されるが 925hPa 面では西方から移動してきたと計算されている。

計算開始時刻から 1 日前、1998 年 2 月 7 日 0 UTC のそれぞれの指定気圧面での風系ベクトル図を Figure 5.3 に示す。Figure. 5.2 b1) ~ b3) に示した 925hPa 面のトラジェクトリの計算結果では、気塊が 2 月 7 日 0 UTC に 31N-121E 付近に存在している。この場合、次の計算ステップでは Figure 5.3 (b) の破線で四角に囲んだ 4 つの風ベクトルにより方向が決定される。4 つとも西北西の風であり 925hPa 面上を移動しているとして計算する等圧面法では、気塊はこの時点で西北西から東南東へ向かっている。一方 Figure 5.2 a1) ~ a3) に示した 850hPa 面上の計算では気塊は 2 月 7 日 0 UTC に 30N-120E 近傍にあり次の計算ステップでは Figure 5.3 (a) の破線で四角に囲った 4 つの風ベクトルを用いて方向が決まるとはいえ、最も近い破線で丸く囲った 30N-120E のグリッドの角のデータの影響を強く受けるはずである。この方向は西北であり、850hPa 面上の計算ではこの影響を受け

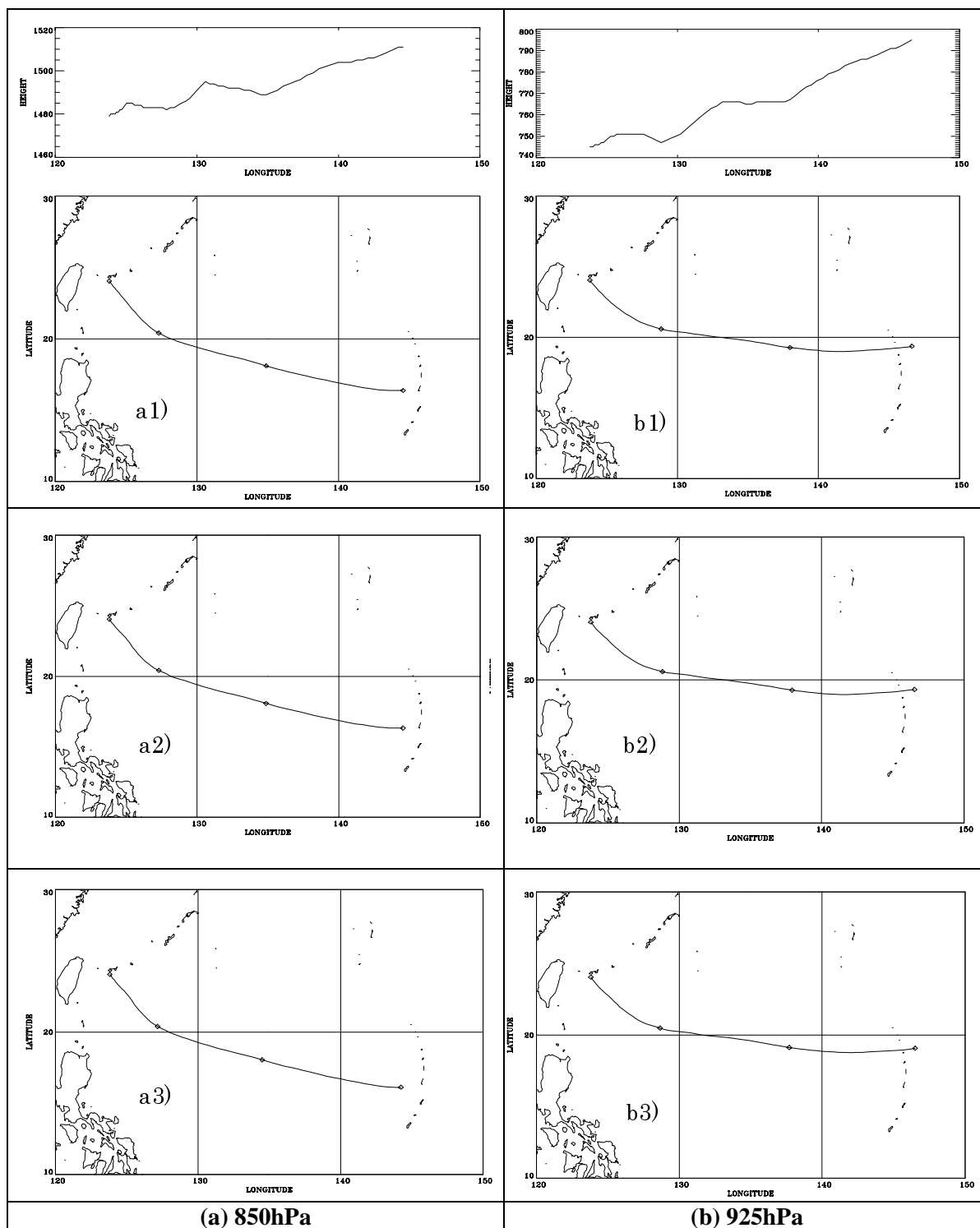


Figure 5.1 Back trajectories of air mass attained over Hateruma at 0 UTC on July 30, 1999. Calculated by isobaric method on (a) 850hPa and (b) 925hPa pressure surfaces, using 4th order Runge-Kutta (a1) and b1)), Petterssen (a2) and b2)), and Euler (a3) and b3)). Only the projections on the surface are shown.

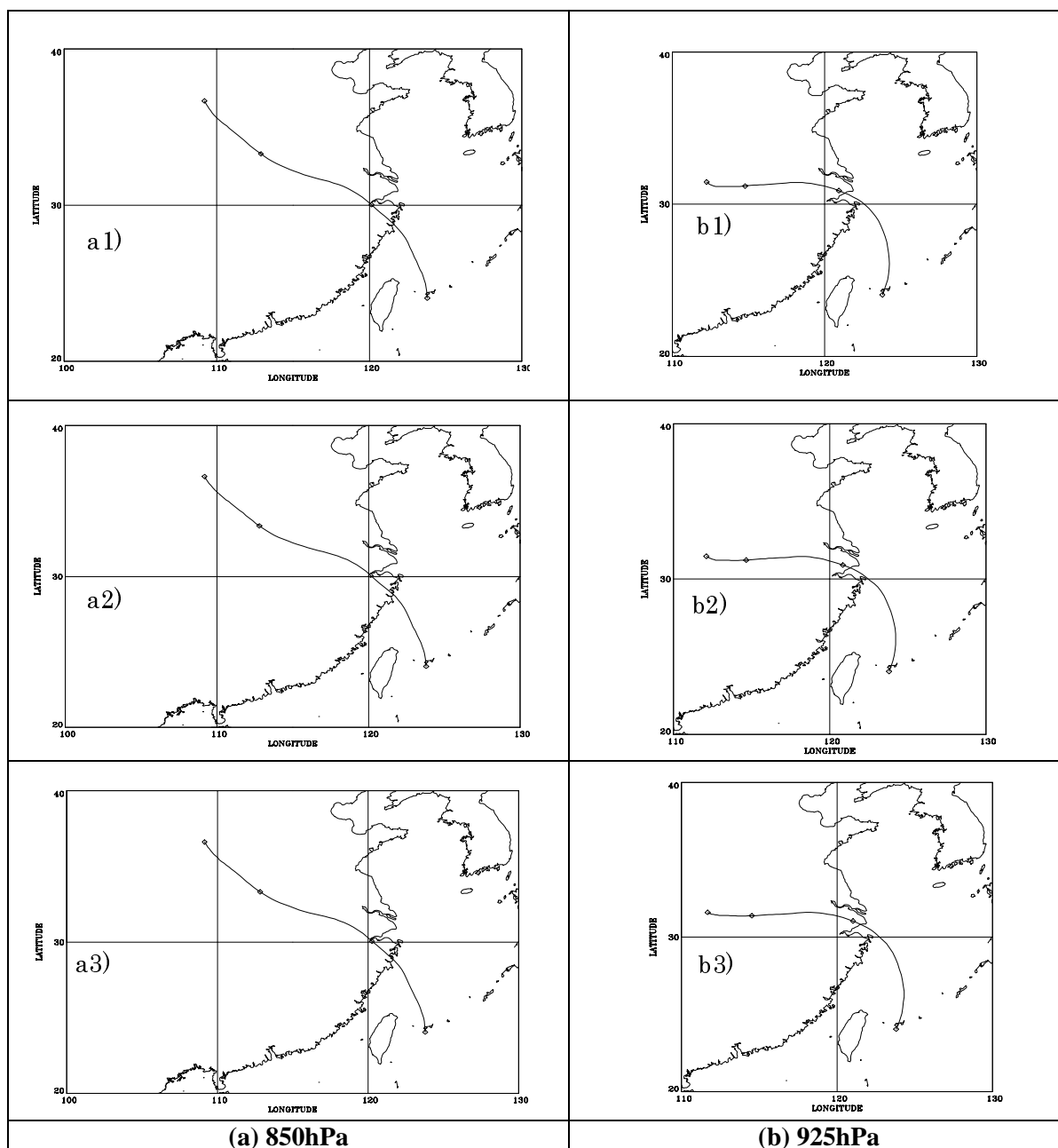


Figure 5.2 Back trajectories of air mass attained over Hateruma at 0 UTC on February 8, 1998. Calculated by isobaric method on (a) 850hPa and (b) 925hPa pressure surfaces, using 4th order Runge-Kutta (a1) and b1)), Petterssen (a2) and b2)), and Euler (a3) and b3)). Only the projection on the surface are shown.

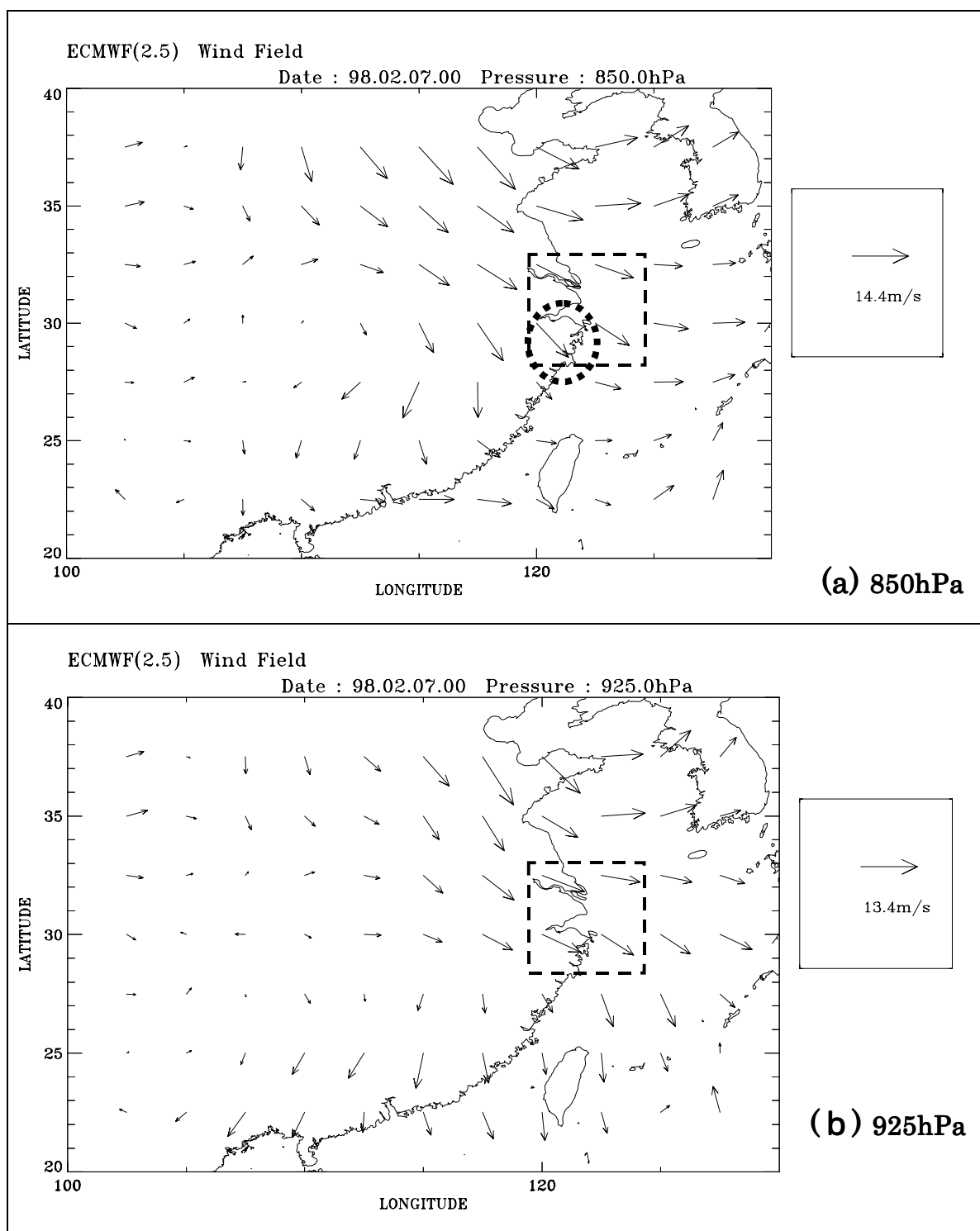


Figure 5.3 Wind field on (a) 850hPa and (b) 925hPa pressure surfaces at 0 UTC on February 7, 1998.

て 925hPa 面の計算より経路が北にずれて計算されたと考えられる。このように圧力面により風系ベクトル分布が異なれば当然算出するトラジェクトリにも違いが生ずるので、どの圧力面を用いて算出するか事前によく検討する必要がある。

5.2 等温位法

等温位法は気塊が温位、すなわちある気塊を乾燥断熱的に 1000hPa 面まで移動させた時に示す温度、を保って移動すると仮定している。この温位が同じになる面、すなわち等温位面は気象条件により、或いは緯度により等圧面に対して一般的に傾きをもつ。温位面が等圧面に対する傾きが小であれば、ある指定圧力面でトラジェクトリを等圧面法により算出した結果と、計算開始地点の高度或いは温位を、当該指定圧力面の近傍に指定して等温位法で算出したトラジェクトリは類似の軌跡を与えるものと期待される。一方、前線等があり温位が保存されないと考えられる場合や温位面が等圧面に対して大きく傾いているような気象条件の場合、等圧面法と等温位法とで計算開始地点を類似の高度にとっても計算開始地点から離れるに従って、計算に使用する気象値が異なり、計算の結果得られるトラジェクトリは異なったものになると予想される。以下、等圧面法と等温位法で類似の結果が得られた場合、即ち温位面の等圧面に対する傾きが小さい場合について 5.2.1 項に、両者で異なる結果が得られた場合、即ち温位面の等圧面に対する傾きが大きいと考えられる場合について 5.2.2 項に、それぞれ計算結果を紹介する。

5.2.1 温位面の等圧面に対する傾きが小な場合

Figure 5.4 に 1999 年 7 月 30 日の 0 UTC に波照間上空に到達した気塊のバックトラジェクトリを等温位法により算出した結果を示す。a1) ~ a3) は計算開始地点の高さを 1500m に b1) ~ b3) は計算出発地点の高さを 800m にとった場合であり、上から 4 次 Runge-Kutta 法、Petterssen 法および Euler 法の計算結果である。これらを Figure 5.1 に示した等圧面法による計算結果と比較すると両者による差は殆ど無いことがわかる。Figure 5.4 の a1) と b1) には経度-高度面への投影図も示しているが、計算開始高さが 1500m でも 800m でも、気塊が経度方向に 20 度移動する間、高さ方向には約 200m しか移動していない。Figure 5.1 の a1) でみると 850hPa の等圧面を動いた場合でも高さの変化が 200m で、このことは、1999 年 7 月 30 日からさかのぼる 3 日間は、気塊の移動方向に沿って温位面は等圧面に対して傾いていなかったことを意味している。本システムでの計算では等圧面法、等温位法とも風の水平成分のみを用いて気塊を移動させるので温位面が気圧面に対して傾いていなければ計算結果は類似のものとなる。

5.2.2 温位面の等圧面に対する傾きが大な場合

一方 Figure 5.5 には 1998 年 2 月 8 日の 0 UTC に波照間上空 1500m と 800m に到達した気塊のトラジェクトリを等温位法により算出した結果を示す。同じ日の同じ時刻に波照間上空の 850hPa 面と 925hPa 面上で、到達した気塊がどこから来たかを等圧面法により算出した結果 (Figure 5.2) と比較すると 850hPa 面で、4 次 Runge-Kutta 法により求めた結果 (Figure 5.2 a1)) と計算開始高さを 1500m にとり等温位法で 4 次 Runge-Kutta 法により求めた結果 (Figure 5.5 a1)) はほぼ類似の傾向を示しているが、それ以外は初期の移動方向が異なっていたり、3 日前に気塊が存在した位置の、波照間からみた方向が異なったりしている。

Figure 5.5 a1) および b1) の上部に示した経度-高度面への投影図から等温位位置の高度変化を見ると、計算開始時刻、即ち 2 月 8 日 0 UTC から時間をさかのぼるとただちに気塊の高さが上昇しており、1 日で 1000m 以上、3 日間では 2 ~ 3000m に達している。気塊は温位を保ちながら移動するとして計算しているので、この高さ方向の軌跡は、そのまま気塊が計算開始時刻で持っていた温位と同じ温位の時空間変化の一つの切り口を示している。これに対して等圧面の高さ方向の変化はこの領域では高々 1 ~ 200m 程度であった。従って、当該時期、当該領域では温位面が気圧面に対して大きく傾いていたといえる。温位面が等圧面に対して傾いている場合は、Figure 5.2 と

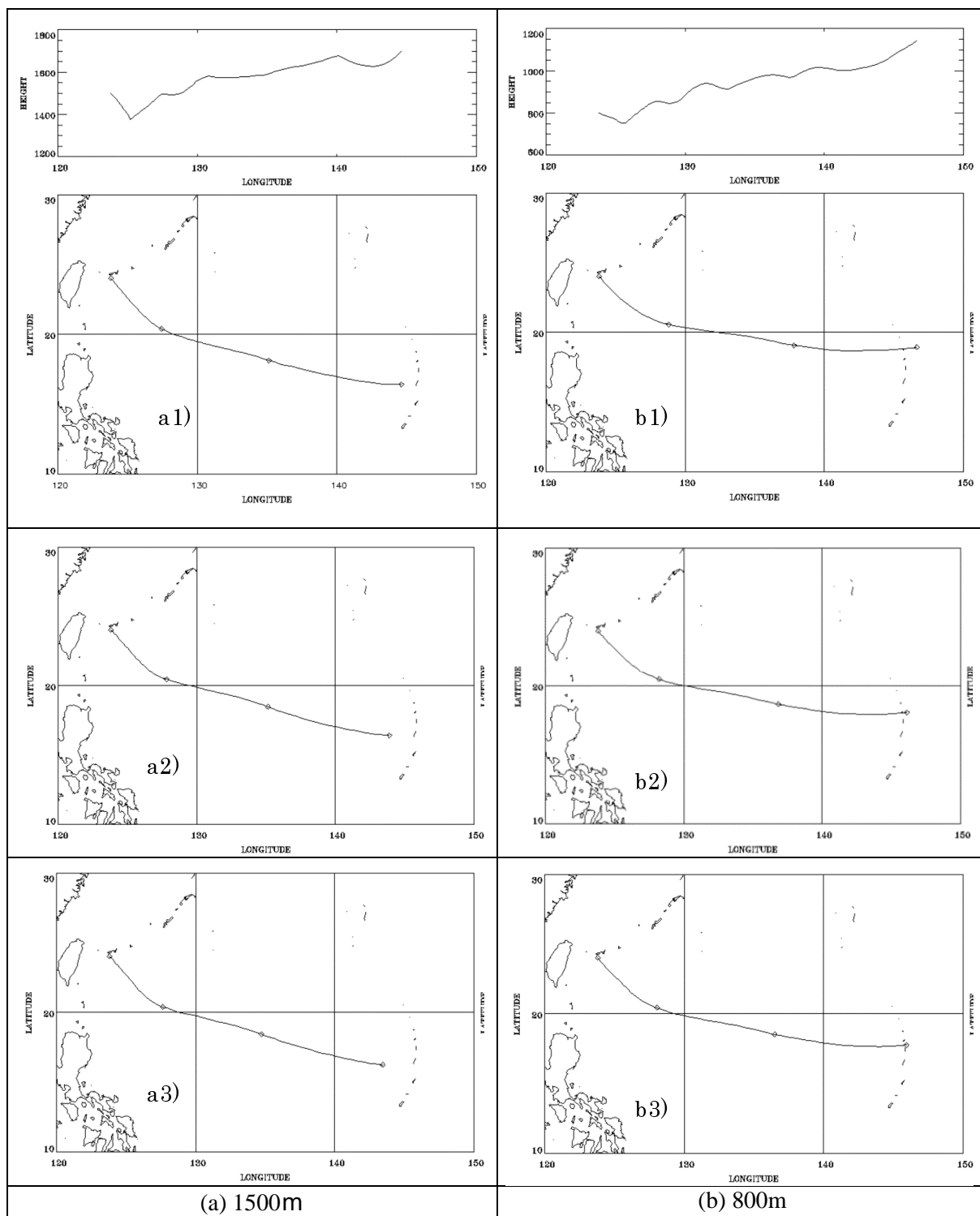


Figure 5.4 Back trajectories of air mass attained over Hateruma at 0 UTC on July 30, 1999, calculated by isentropic method. Calculations are started at (a) 1500m and (b) 800m, using 4th order Runge-Kutta (a1) and b1)), Petterssen (a2) and b2)), and Euler (a3) and b3)). Only the projections on the surface are shown.

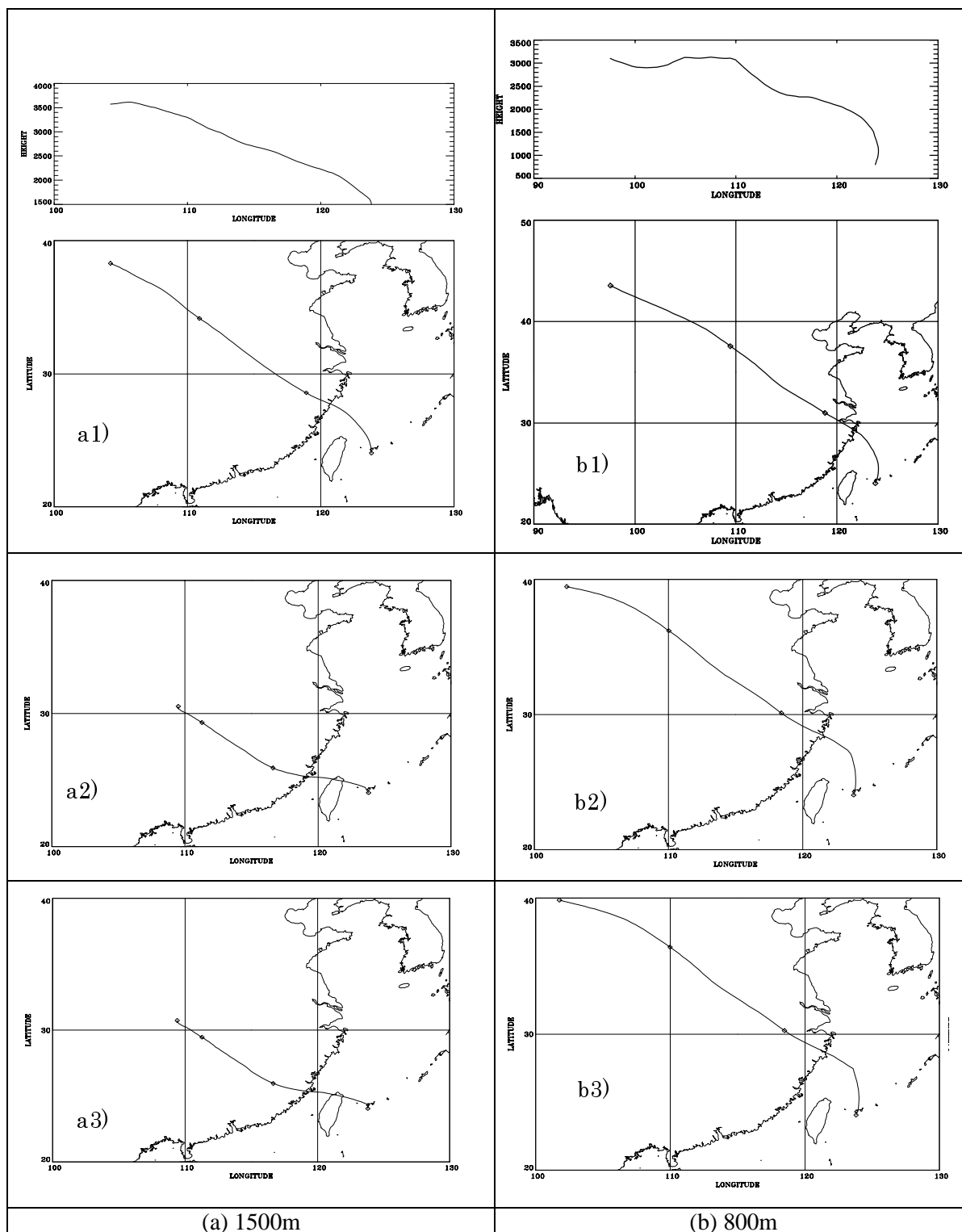


Figure 5.5 Back trajectories of air mass attained over Hateruma at 0 UTC on February 8, 1999, calculated by isentropic method. Calculations are started at (a) 1500m and (b) 800m, using 4th order Runge-Kutta (a1) and b1)), Petterssen (a2) and b2)), and Euler (a3) and b3)). Only the projections on the surface are shown.

Figure 5.5 のように等圧面法の計算結果と等温位法の計算結果とは異ってくるので注意が必要である。

ところで Figure 5.5 a2)および a3)は計算開始高さを 1500m とし等温位法で、積分解法はそれぞれ Petterssen 法および Euler 法によりトラジェクトリを求めた結果であり、計算開始直後からトラジェクトリは西へ向かっている。一方、計算開始高さを同じ 1500m とし等温位法で積分解法を 4 次 Runge-Kutta 法で計算した結果では、トラジェクトリは最初北に向かい、それから西に転じている。一方、計算開始高さを 800m とした場合はいずれの積分解法でも最初北に向かいそれから西に転じている。これが 3.3.4 で述べた線形補間と距離の逆二乗の重み付け補間の差として説明できることを示そう。

Figure 5.2 a2)の等圧面法の計算結果から 850hPa(ECMWF のデータ面)の計算開始地点での高度は 1537m であることがわかっている。等温位法により Petterssen 法で 1500m から計算を開始した場合、最初は 850hPa 面のデータとそれより高度の低い 925hPa 面のデータから風の水平成分を求めるが 2~3 タイムステップ後、即ち 1 タイムステップが 1 時間であるので 2~3 時間遡ると 1550m 以上となり 850hPa 面と、その上の指定気圧面 700hPa のデータを使用することになる。そこで 2 月 8 日 0 UTC の波照間(24.05N-123.8E)を含む 20N-30N と 120E-130E の区域の 1000hPa、925hPa、850hPa および 700hPa の風系ベクトル図をみると、Figure 5.6 に示すように 1000~850hPa では大略北風であるが 700hPa では西風になっている。本計算で用いているデータは 12 時間おきのデータであり、計算開始時刻は ECMWF のデータが存在する時刻であるので、そこから 2~3 タイムステップ、即ち 2~3 時間遡った場合の風ベクトルを時間の線形補間で求めても状況は類似と考えられる。

さて Figure 5.6 の 850hPa 面と 700hPa 面のように風向が急激に変化している場合、線形補間と距離の逆二乗補間で高さを変えて風速の水平成分と風向を算出するとそれぞれの値が指定気圧面の前後で高さ方向どう変化するかを Figure 5.7 に示す。風速・風向データは 1000~400hPa 面の 25N-122.5E と 22.5N-125.0E で決まる平面格子の四頂点を用い、23.25N-123.25E の地点について高度 100m から 7200m まで求めている。風向は北を 0-360 度にとり時計回りにあらわしている。高度は便宜的に 1000hPa-100m、925hPa-800m、850hPa-1500m、700hPa-3000m、500hPa-5600m、400hPa-7200m とした。図中の縦の点線は 1000、925、850、700、500、400hPa の指定気圧面を示す。線形補間の場合 Figure 5.7(a)に示すように風速の水平成分、風向とも連続的に変化している。Figure 5.6 で風向が南向きから東向きにかわる 850hPa 面と 700hPa 面との間も連続的に変化している。

一方、距離の逆二乗の重み付け補間の場合、Figure 5.7(b)に示したように指定気圧面と指定気圧面の間は風速・風向とも高さ方向の変化は殆どなく、指定気圧面を越えて次の格子に入ると値は不連続的に変化することがわかる。例えば風向の場合、925hPa 面から 850hPa 面までは 17 度で北北東の風であるが 850hPa 面を越えた途端に 281 度の西風と計算される。

Figure 5.5 の a2)、a3)の計算の場合、当日の 850hPa 面は 1537m にあり、等温位法で 1500m を計算開始高度と指定すると、最初は 925hPa 面と 850hPa 面のデータから距離の逆二乗の重み付け補間で計算するので北風をうけて気塊が移動してきた経路を遡る。しかし、温位面が指定気圧面に対して傾いているため気塊の高度は計算ステップごとに上昇し計算開始後 2~3 タイムステップで 850hPa 面を越えてしまう。その次のタイムステップでの計算では西風を受けて気塊が移動してきたとして移動経路を遡って算出するので、結果としてトラジェクトリは西に向かう。Figure 5.5 a1)の場合には線形補間であり、気塊が移動してきた経路が 850hPa 面を越えると気塊が受ける風向は大きく変わるとはいえ、距離の逆二乗の重み付け補間で求めた 850hPa 面と 700hPa 面の間の風向の補間値 281 度に達するのは高度が 2250m 程度に到達してからであり(Figure 5.7 a)、これは計算開始から 22~23 タイムステップ後、即ち 22~23 時間遡った後である。従って、北から西へとゆるやかに方向が変わるものと考えられる。

このように温位面が気圧面に対して傾いており、また風向・風速が上下の気圧方向で急激に変化している場合、等圧面法と等温位法で計算結果が異なるのみならず補間方法によっても計算結果がずれてくるので注意が必要である。

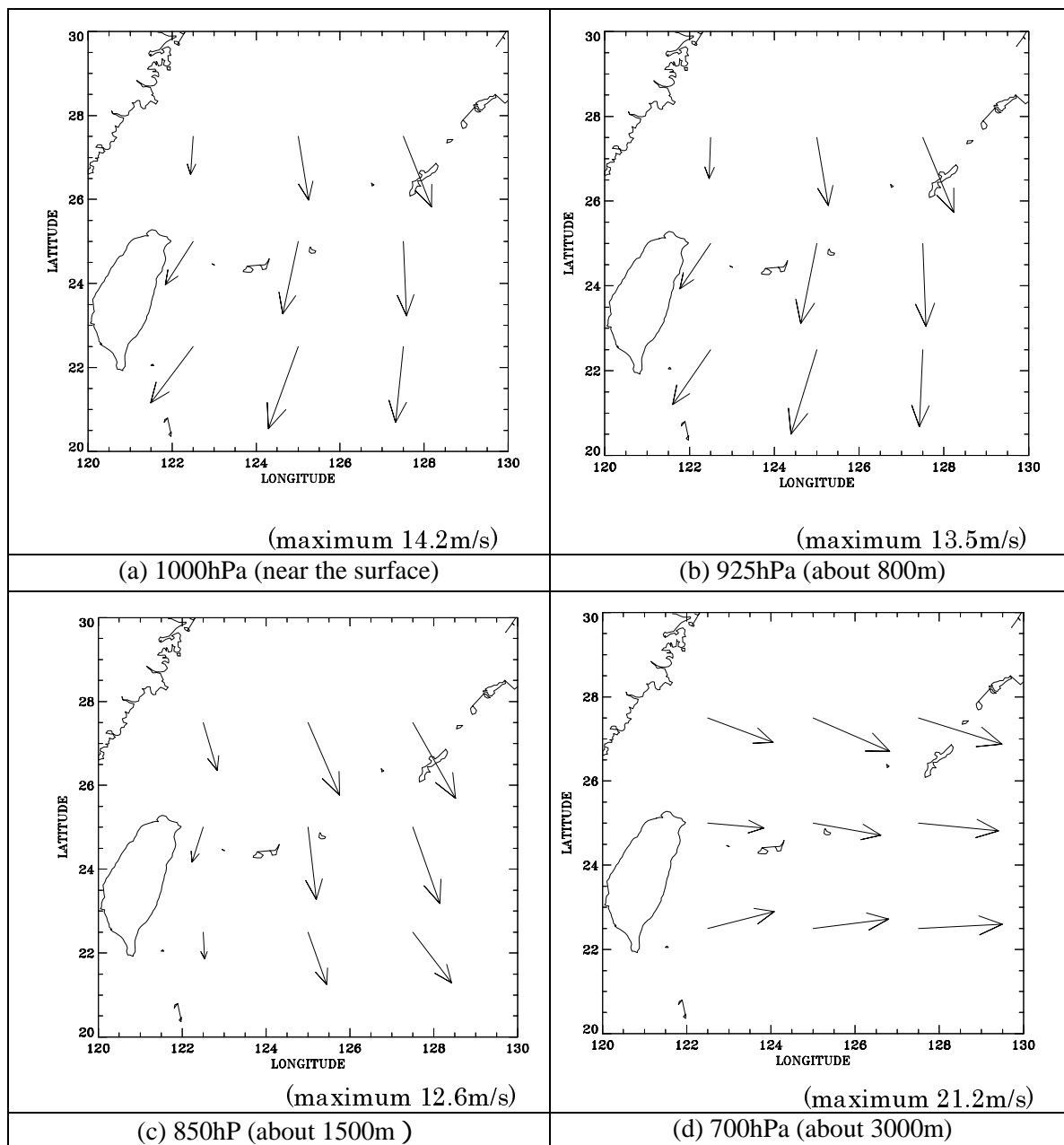


Figure 5.6 Wind field around Hateruma Island ($123^{\circ}48'E$, $24^{\circ}3'N$) at 0 UTC on February 8, 1998, on (a) 1000hPa, (b) 925hPa, (c) 850hPa, and (d) 700hPa pressure surfaces. Maximum wind vector size corresponds to the maximum wind speed value in the area, shown at every pressure surface.

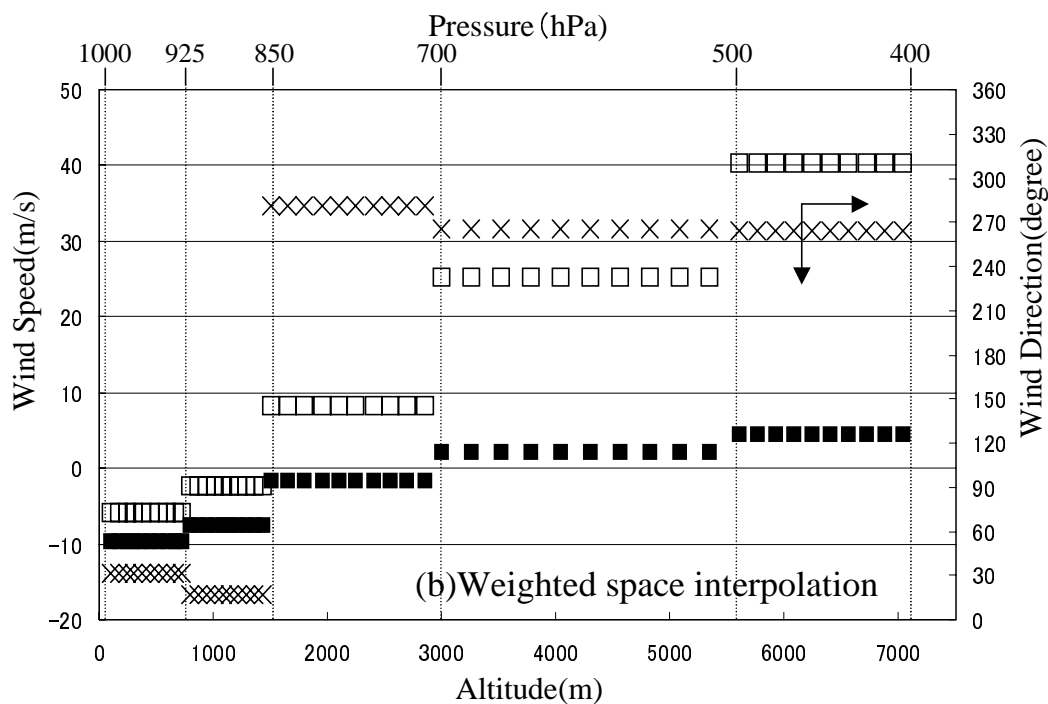
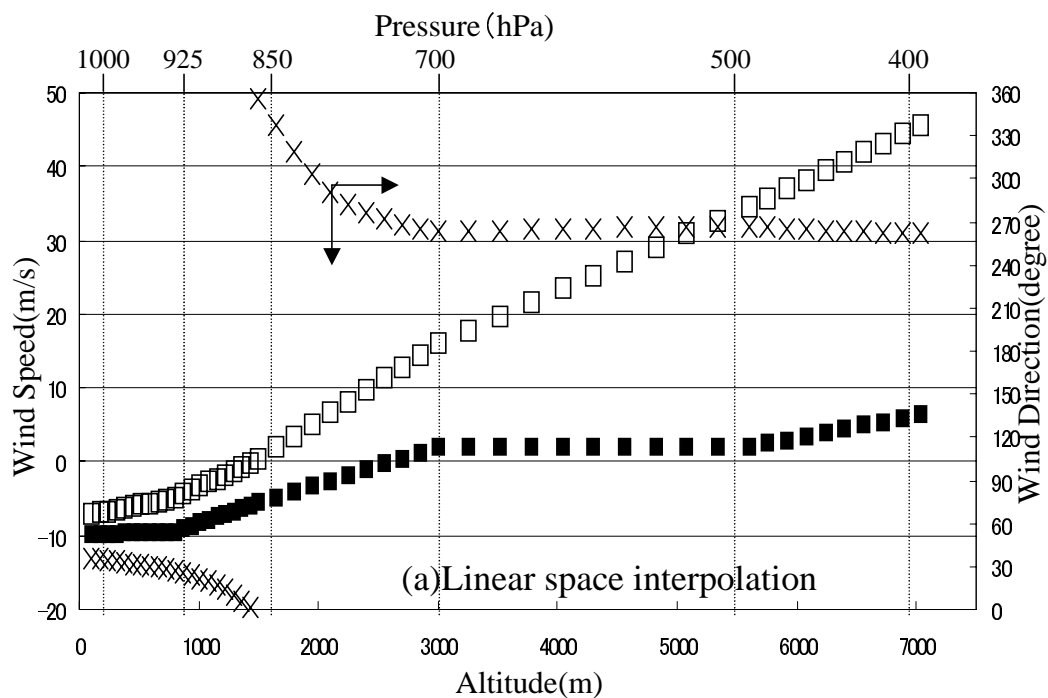


Figure 5.7 Altitudinal change of lateral component of wind speed u (east-west) and v (north-south) and direction values are estimated by (a) linear space interpolation and (b) weighted space interpolation at 23.25N-123.25E at 0 UTC on February 8, 1998.

5.3 近接する複数点からのトラジェクトリの比較

以上の例では計算を開始する地点を 1 箇所選び等圧面法と等温位法で計算結果に違いが生ずる場合や補間方法が計算結果に及ぼす影響を説明してきたが、本節では近接する複数点に到達する気塊の移動経路を比較する。これには ECMWF のデータセットの指定気圧面で、平面格子の 4 つの頂点の風向風速、特に風向が互いに大きく異なっているところを選び出し、その格子の内部に隣接した 4 つの計算開始点を設定して計算を行った。

Figure 5.8(a)に 1998 年 2 月 17 日 12UTC の 925hPa 面の風系ベクトル図とジオポテンシャルハイトのコンター図を示す。35N-150E 付近にジオポテンシャルハイトの等高線で囲まれた小さな低気圧部分がある。この低気圧部分の 4 つの風ベクトルとそのすぐ西側の二つの風ベクトルが含まれる、西北端を 37.5N-150E、東南端を 35N-155E とする東西に隣接する二つの平面格子を選び、その中の Figure 5.8(d)に示した A ~ D と E ~ H を計算開始地点とした。1998 年 2 月 17 日 12 UTC の 850hPa 面および 925hPa 面の 6 つの風ベクトルは Figure 5.8 (b)および(c)で破線で囲んで示したように大きさと向きが異なり、西北端を 37.5N-150E、東南端を 35N-152.5E とする平面格子の中の A ~ D を計算開始地点とした場合、また、西北端を 37.5N-152.5E、東南端を 35N-155E とする平面格子の中の E ~ H を計算開始地点とした場合も、各計算開始地点の風速の水平成分と風向は互いに異なるものと期待できる。格子点の風向風速値は Table 5.1 に示した。計算は等温位法で 4 次 Runge-Kutta 法によった。計算開始地点の高度は 800m とし、前 3 日の移動経路を算出した。

Table 5.1 Longitudinal and latitudinal wind velocity (m/s) at 6 points in 37.5N-150E 35N-155E grid at 12 UTC on February 17, 1998.

		37.5N-150E	37.5N-152.5E	37.5N-155E	35N-150E	35N-152.5E	35N-155E
850hPa	Lon.	0.392563	-7.757828	-10.875992	7.157211	5.963852	3.558578
	Lat.	-10.24852	-4.209457	-0.828598	-7.902817	1.392105	8.722183
925hPa	Lon.	0.451172	-9.326172	-13.161133	4.697266	2.136719	0.483398
	Lat.	-13.36824	-6.635818	-2.764725	-12.848709	-2.225662	6.894455

Positive values denote that the wind direction points east or north.

結果を Figure 5.9, Figure 5.10 に示す。Figure 5.9 は地図面への投影図、Figure 5.10 は経度-高度面への投影図である。計算開始直後の水平方向の移動経路を見ると、A ~ D の気塊はそれぞれ北、北北西、北東および北北西へ、またその東側にある E ~ H の流体粒子はそれぞれ東北東、西、東、南へと、925hPa 面の平面格子の頂点の風向を反映して様々な方向へ向かっている。一方、高さ方向の経路を Figure 5.10 にタイムステップごとに印で示したが、全ての気塊が十数タイムステップで、すなわち計算開始時刻から遡ること十数時間で千数百 m まで上昇している。等温位法の計算でこのような結果が得られるのは、この日、この区域では温位面が気圧面に対して大きく傾いていることを示唆している。計算開始時刻から十数タイムステップ後、A ~ H の気塊はいずれも西へ向かっている。計算開始時刻から 24 タイムステップ後、即ち 1998 年 2 月 16 日 12 UTC の 850hPa 面の風系ベクトル図は Figure 5.11 に示すように、これらの気塊が存在している 30N-40N と 140E-150E の区域では殆ど西風となっており、高度 1500m 以上に上昇した気塊はいずれもこの西風で動いてきたものと計算される。計算終了時刻、すなわち開始時刻から 3 日前の気塊の位置は初期の移動方向に無関係に全て朝鮮半島北部領域にあると計算されていることが注目される。

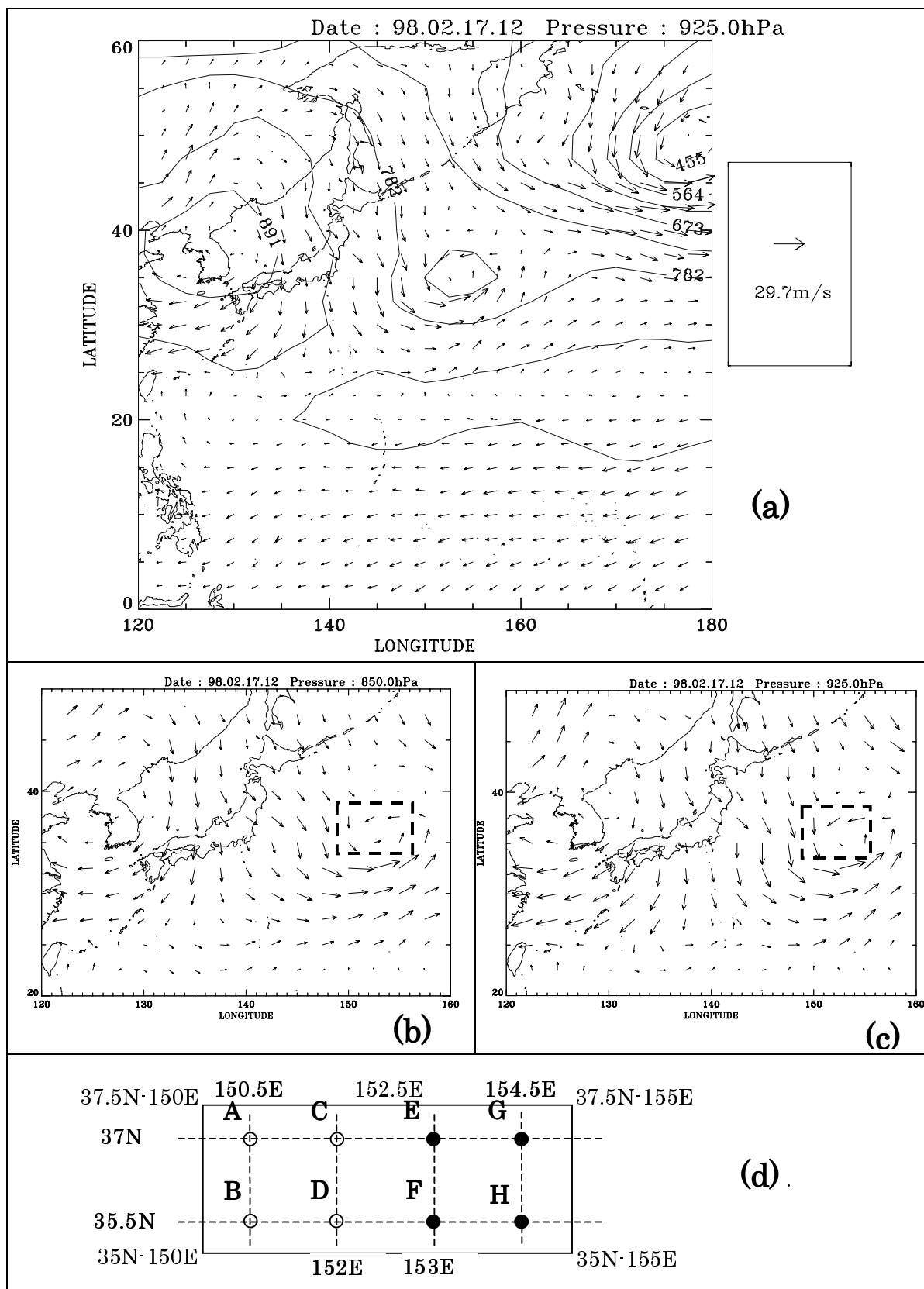


Figure 5.8 Wind field at 12 UTC February 17, 1998 and eight calculation start points. (a) Wind field and contour of geopotential height on 925hPa pressure surface, (b) Wind field on 850hPa, and (c) 925hPa Pressure surface. (d) Two sets of four calculation start points: A-D and E-H.

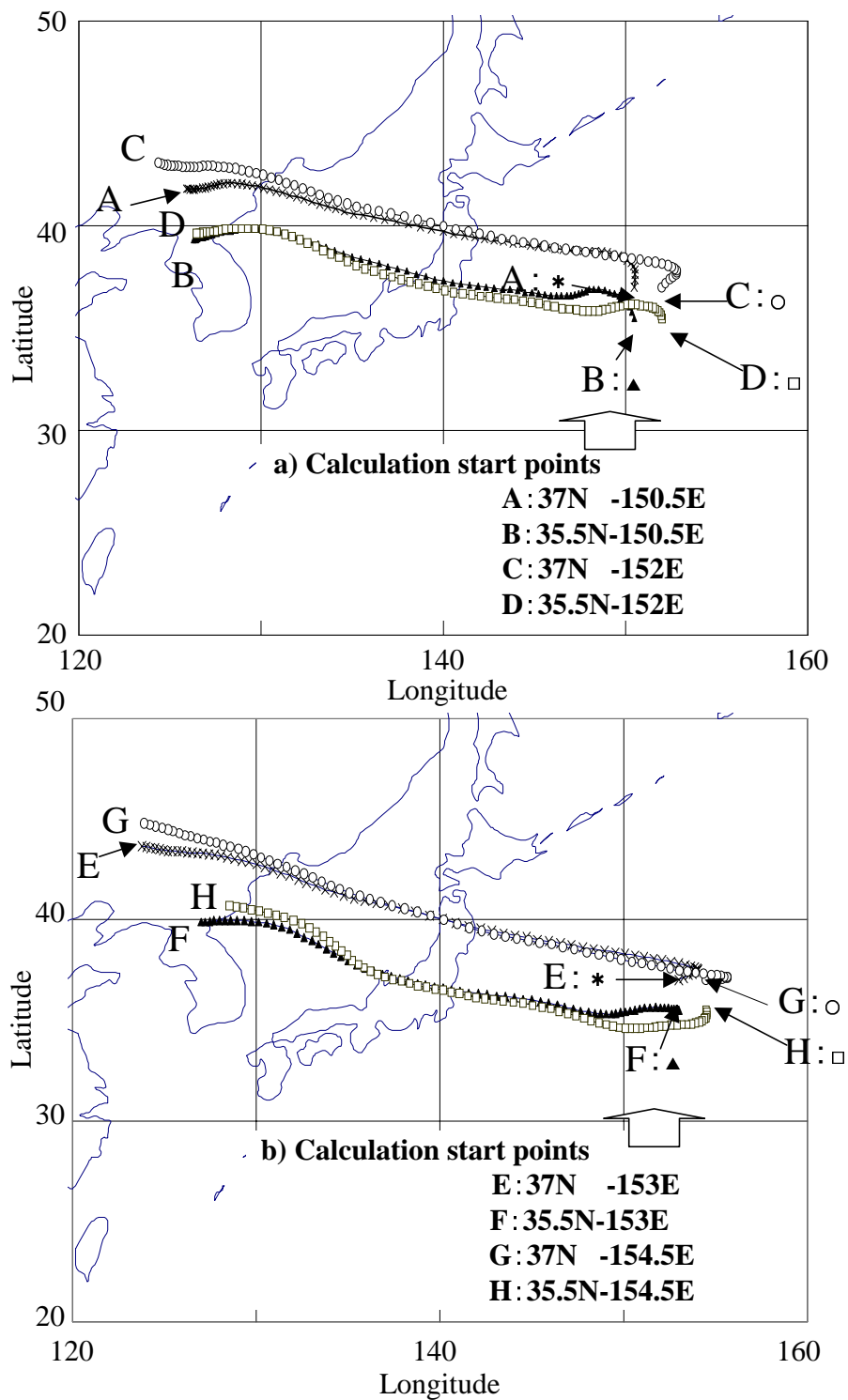


Figure 5.9 Four trajectories of which the calculation start points are nearby. Every trajectory is calculated by isentropic method and 4th Runge-Kutta numerical integration scheme, from 12 UTC on February 17, 1998 and height of 800m. Only the projections on the surface are shown.

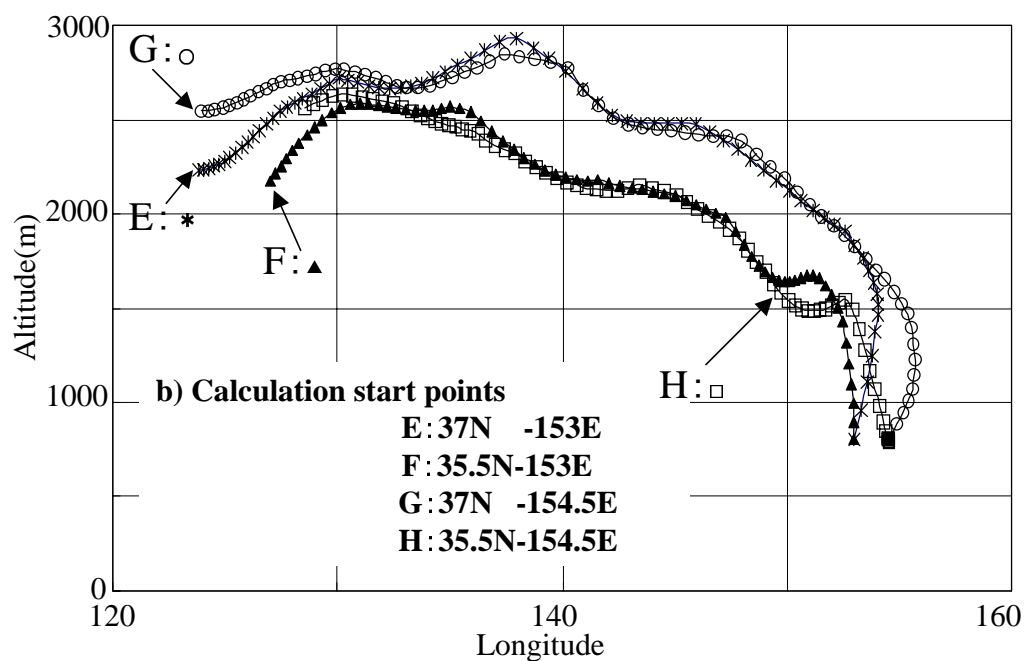
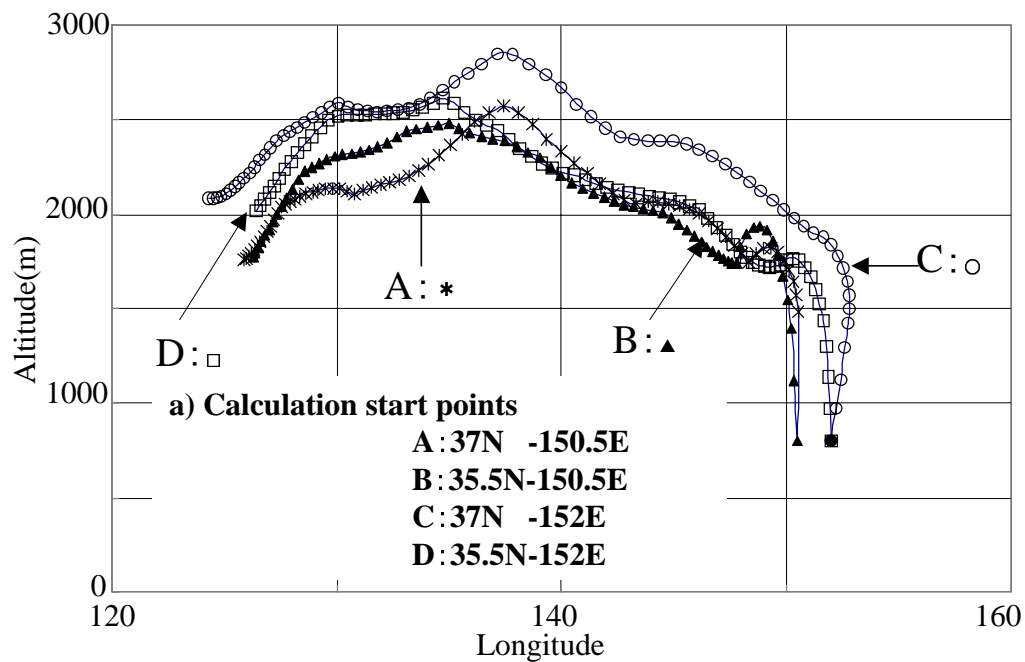


Figure 5.10 Projections on the altitude-longitude plane of two sets of trajectories shown in Figure 5.9.

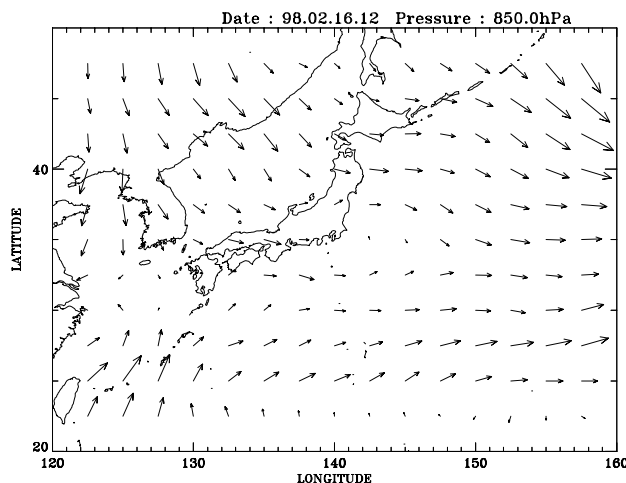


Figure 5.11 Wind field of 850hPa pressure surface at 12 UTC on February 16, 1998. The time corresponds to twenty four time steps after the calculation start time for Figure 5.9 and Figure 5.10.

次にこれらの ABCD、EFGH の気塊について、計算開始時刻からタイムステップを経るごとに相互の距離がどう変化するかを Figure 5.12 に示す。計算開始時点では緯度方向に約 170km、経度方向に約 140km、対角線位置で 210km の距離にある気塊は、48 タイムステップの計算後は相互の距離が最大で 800km 程度に、72 タイムステップ後は最大 600km 程度に広がっている。このことは、これだけの広がりの中から気塊が集まってきたと解釈するのではなく、本システムを用いた計算での「不確かさ」の程度を示すものと考えられる。計算開始直後の方向が前述のように様々な方位をむいていても、72 タイムステップの計算後の気塊の相互の距離が計算開始時の数倍でおさまることは、このように温位が傾いた地点での計算に意味があるかどうかの議論は差し置いて、本システムによりバックトラジェクトリを計算した場合の 3 日前の気塊の位置の精度は数百 km 程度といえよう。

一般に低気圧や前線の近傍では、気塊は温位を保たずに移動する、といわれており、上記の等温位法の計算を適用して得られた結果から、計算を開始した当該緯度経度上空 800m に到達した気塊が 3 日前に朝鮮半島北部の上空 2000m に存在していたものとは言えないが、計算を開始した当該緯度経度の 1500m 以上上空の気塊の挙動についての移動経路は信頼できるものと考えられる。ここでは小低気圧の内部或いは周辺という極端な場所を意図的に計算開始位置に選んだが、バッチ処理のような大量のデータを機械的に得るような計算を行う場合、得られた結果の詳細な議論では計算結果の取り扱いに十分注意する必要がある。

5.4 タイムステップ

積分解法においては積分時間を細かく取るほど計算の精度は上がるはずである。一方当センタで本システム用に揃えている ECMWF データは Table 2.1 に示したように、2.5 度メッシュの場合 2000 年以前は 12 時間おき、2001 年以降が 6 時間おきのデータである。計算に使用する任意時刻のデータは格子点データを時間の線形補間で求めたのち、位置の線形補間ないしは距離の逆二乗の重み付け補間で求める。そこで積分解法のタイムステップ幅を変え、トラジェクトリ計算に及ぼす影響を検討した。計算方法としては、同じ圧力面内のデータだけを計算に用いる等圧面法を用い、タイムステップ幅の影響が強調されるようにした。

Figure 5.13 は 925hPa 面で 1998 年 2 月 20 日 12UTC に太平洋上の 14N-139E 地点に到達する気塊のバックトラジェクトリを積分解法として 4 次 Runge-Kutta 法を用い、タイムステップ幅を 10 分、

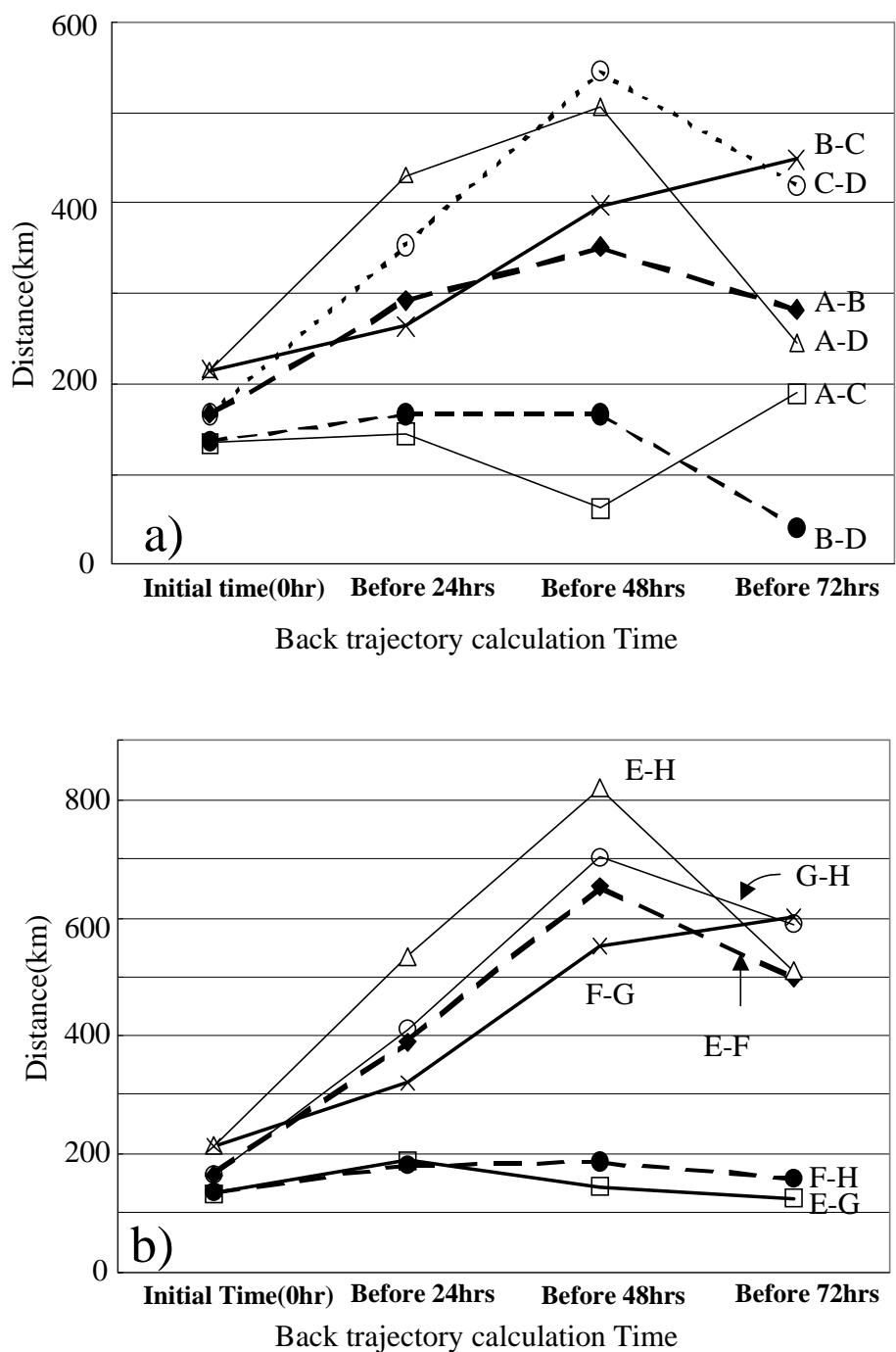


Figure 5.12 Distance between two air masses which were nearby at calculation start time. Characters A to H denote the calculation start point indicated in Figure 5.8 (d).

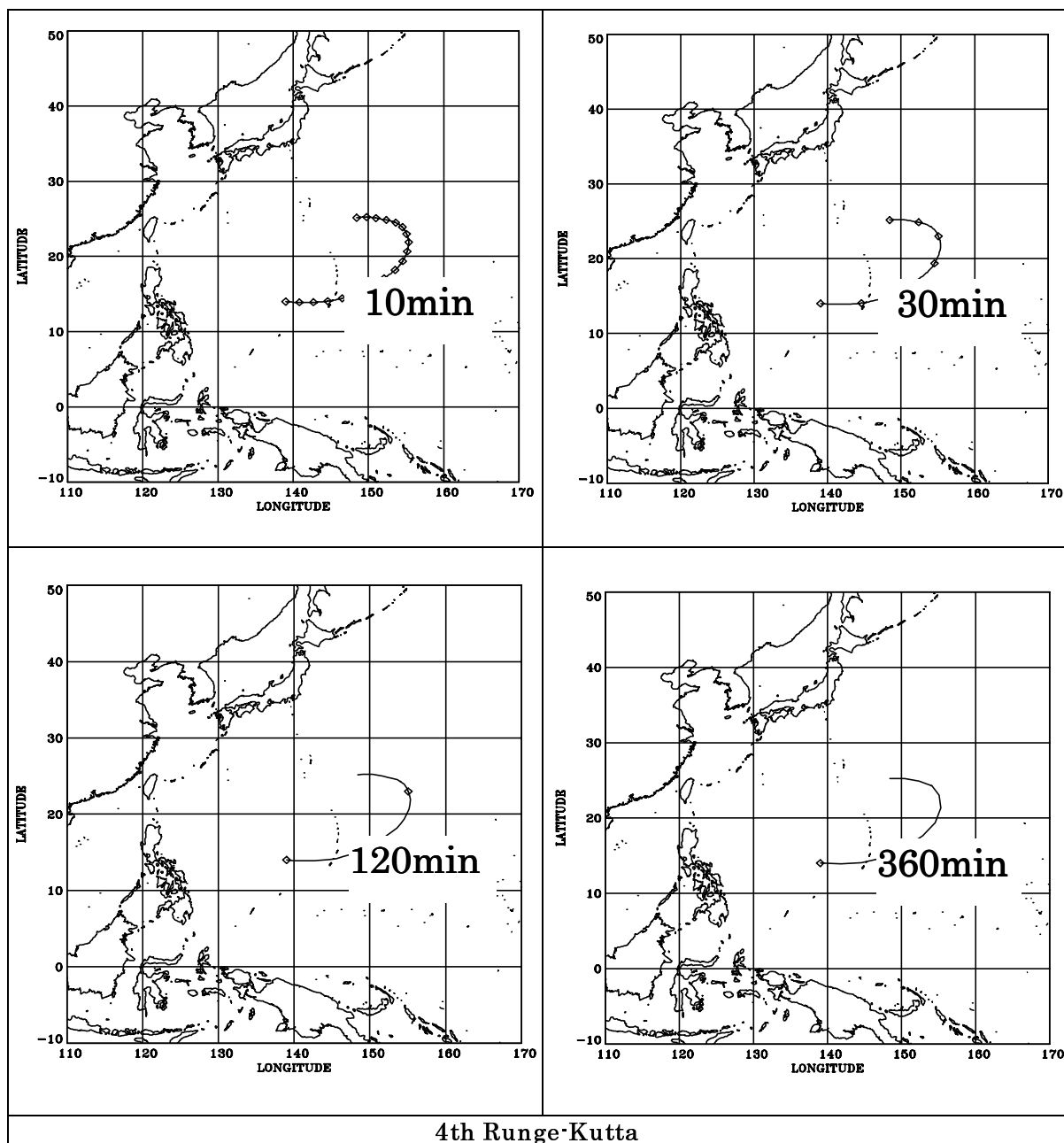


Figure 5.13 Trajectories calculated by isobaric method and 4th Runge-Kutta time integration numerical scheme with various time step intervals. Calculation Start point: 14N-139E on 925hPa pressure surface.

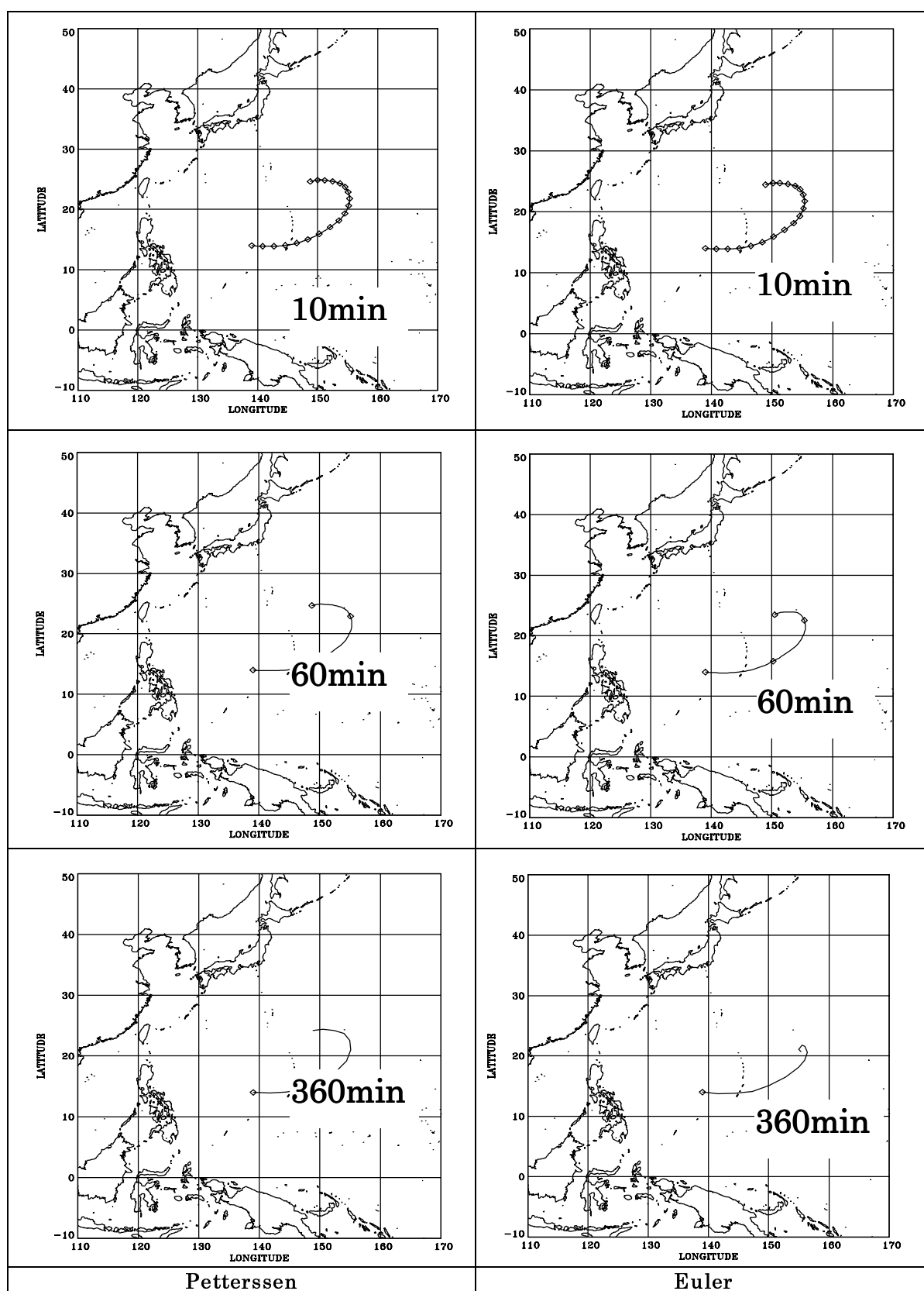


Figure 5.14 Trajectories calculated by isobaric method, Petterssen (left) and Euler (right) time integration numerical scheme, with various time step intervals. Calculation start point is indicated in Figure 5.13.

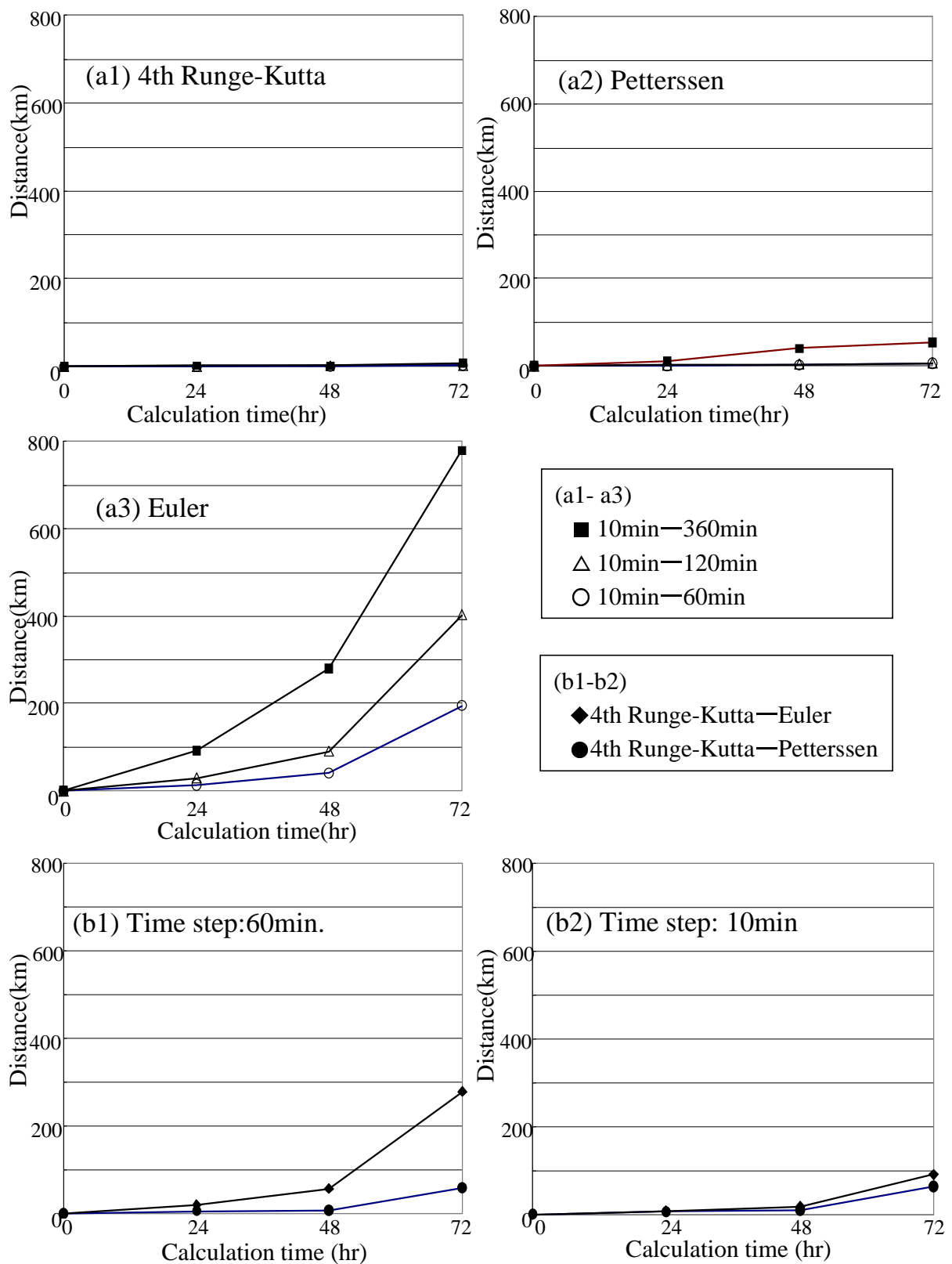


Figure 5.15 Effect of time step interval on the air mass positions. Differences between air mass positions calculated with (a1) 4th Runge-Kutta, (a2) Petterssen, and (a3) Euler with different time step intervals. Difference on air mass positions calculated by different numerical integration scheme using same time step interval are also shown: (b1) 60 min. and (b2) 10 min..

30 分、120 分、360 分と変えて計算させた場合であり、Figure 5.14 は Euler 法と Petterssen 法を用い、10 分、60 分、360 分と変えて計算させた場合を示している。4 次 Runge-Kutta 法の場合、タイムステップ幅を 10 分から 360 分まで変えても計算結果は殆どかわっていない。一方、Petterssen 法と Euler 法についてみると、Petterssen 法では 4 次 Runge-Kutta 法の場合とほぼ同様の軌跡がタイムステップ幅 10~360 分で得られており、このタイムステップ幅の範囲では計算結果への影響が少ないといえる。しかしながら Euler 法の場合タイムステップ幅が 360 分では計算結果が他と大きく異なり、60 分にした場合、他の方法とほぼ類似の結果が得られ、タイムステップ幅が 10 分なら Petterssen 法や 4 次 Runge-Kutta 法と同様の結果が得られる。

これをさらに詳細にみるため、それぞれの積分解法でタイムステップ幅 10 分で計算して得られる気塊の位置と、タイムステップ幅 60 分、120 分および 360 分で計算して得られた位置の差を 24 時間前、48 時間前及び 72 時間前について比較した。結果を Figure 5.15(a1)~(a3)に示す。4 次 Runge-Kutta 法ではタイムステップ幅を 360 分にとっても 10 分の場合との差は、72 時間前で 10km 以内である(a1)。Petterssen 法ではタイムステップ幅 120 分までは 10 分との差が 72 時間前で 10km 以内であるが、タイムステップ幅を 360 分にとると 60km 程度の差が生じる(a2)。

しかしながら Euler 法の場合はタイムステップ幅の影響が非常に大きく、360 分と 10 分では 72 時間前の位置に 800km 近い差を生ずることになる(a3)。

一方これを積分解法と補間方法の組み合わせによる差という観点からみると、タイムステップ幅 10 分の場合、線形補間と組み合わせている 4 次 Runge-Kutta 法と、距離の逆二乗の重み付け補間と組み合わせている Petterssen 法および Euler 法とのそれぞれの差をみると 48 時間前では 10km および 20km 以内であったのが、72 時間前になると 60km と 90km の差となる。タイムステップ幅を 60 分にとっても 4 次 Runge-Kutta 法と Petterssen 法との差はタイムステップ幅を 10 分にとった場合と変わらない。一般的にタイムステップ幅を十分に小さく取れば積分解法としての 4 次の Runge-Kutta 法と Petterssen 法とは同じ結果を与えるはずであり、タイムステップ幅に拠らず 48 時間前で 10km、72 時間前で 60km という差を生じることが積分解法に起因するのではなく、線形補間距離の逆二乗の重み付け補間とに差があることを示唆している。

先に 5.2.2 で距離の逆二乗補間により風向風速を求めた場合、1 つの格子の中のある経度緯度について高さ方向には風向風速が変化せず、高さ方向に指定気圧面を越えた場合、階段状に風向風速が変化することを示したが、ここでは、一つの指定気圧面について、2 つの平面格子の風向風速の分布を、距離の線形補間と距離の逆二乗補間で求めた場合の差を示しておく。Figure 5.16 は Figure 5.8(d)の西北端 37.5N-150E、東南端 35N-155E の区域で 850hPa 面の 1998 年 2 月 17 日 12 UTC における 36.25N の緯度線上の風向風速分布を距離の線形補間と距離の逆二乗の重みづけ補間で求めた例である。36.25N は平面格子の緯度軸の midpoint 位置である。また Figure 5.17 は同様に 35.75N の緯度線、すなわち平面格子の緯度軸を南から 3:7 に内分する位置の緯度線上の風向風速分布を比較したものである。計算には Table 5.1 の数値を用いた。図中の点線は隣接する 2 つの平面格子の境目である。

Figure 5.16 と Figure 5.17 を Figure 5.7 と比べれば明らかなように水平方向の風速・風向分布を線形補間と距離の逆二乗の重み付け補間で求めても、高さ方向の場合にみられた擬連続的な変化が階段状の変化になるような大きな差はない。従って補間方法の差、つまり水平方向の風の場の算出に関して距離の逆二乗の重み付け補間と線形補間は補間値の差は余り顕著ではなく、結果として、Figure 5.15(b1)および(b2)で示したように 72 時間で数十 km の差でおさまる程度になると考えられる。

以上まとめるとタイムステップ幅は 4 次 Runge-Kutta 法の場合も Petterssen 法でも 60 分程度で十分と思われる。Euler 法の場合はタイムステップ幅により計算結果が大きく変わるので注意が必要である。

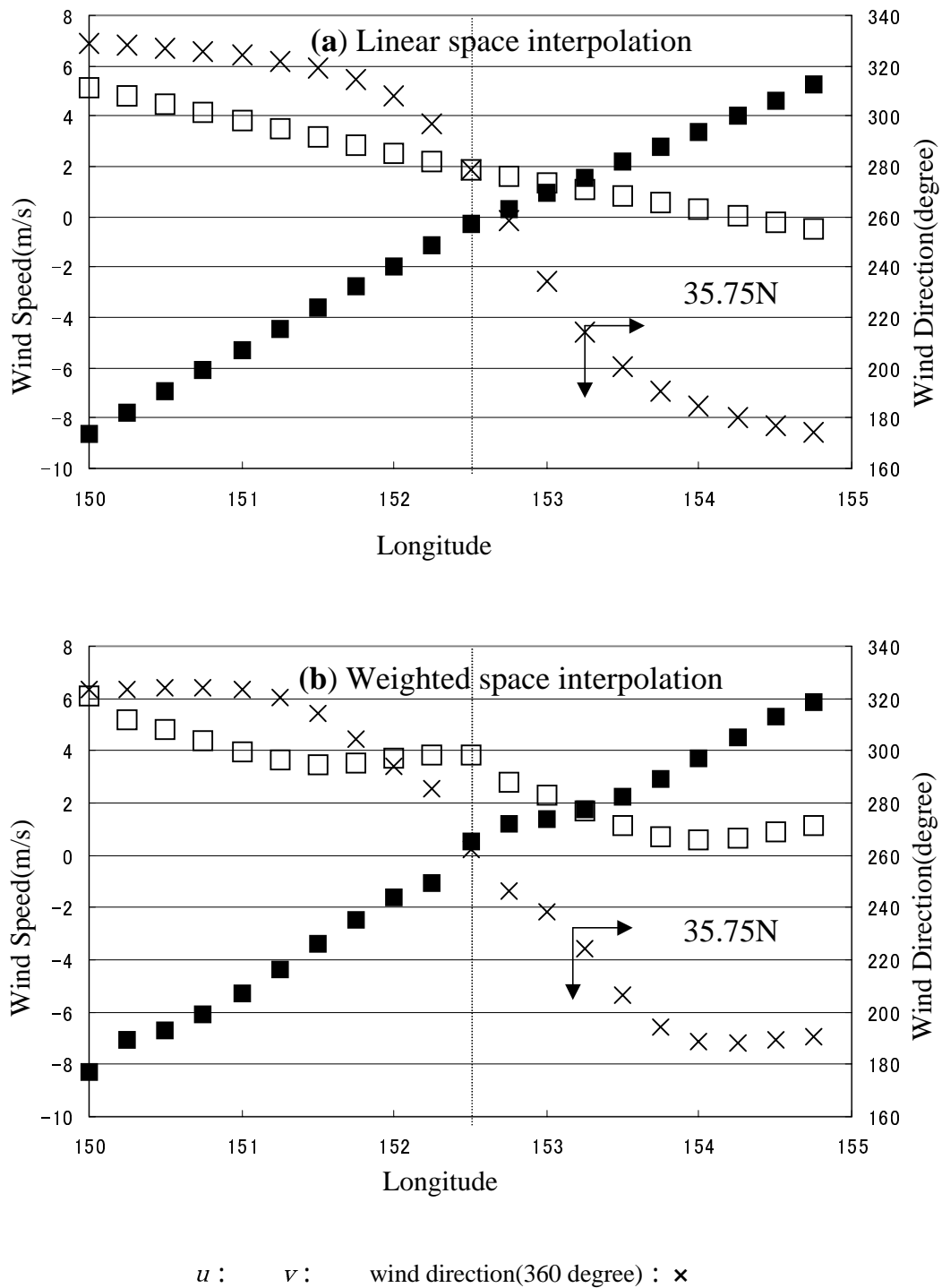


Figure 5.16 Distribution of lateral components of wind speed u (east-west) and v (north-south) and direction along 36.25N at 0 UTC on February 8, 1998. Values estimated using (a) linear space interpolation and (b) weighted space interpolation .

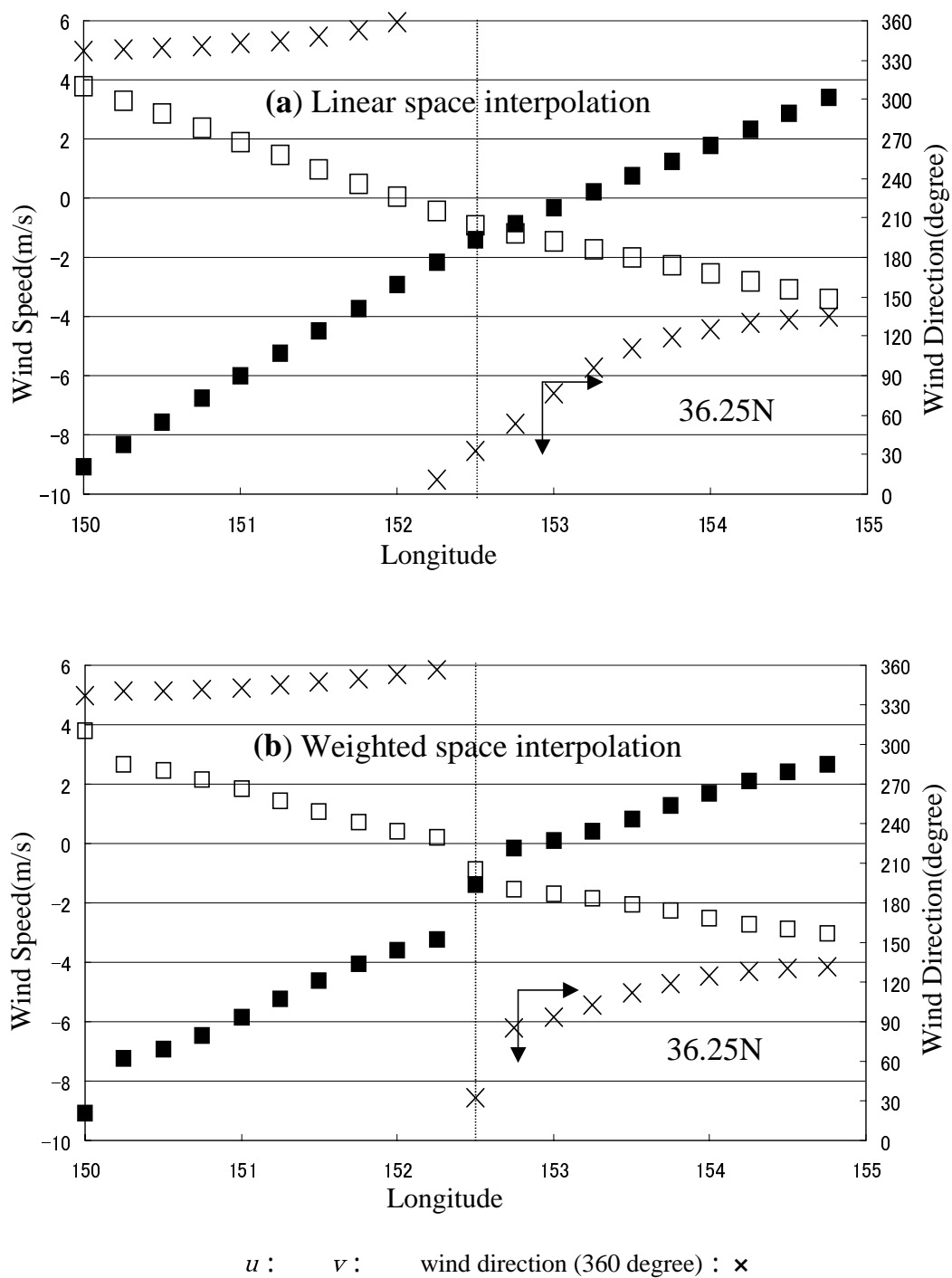



Figure 5.17 Distribution of lateral components of wind speed u (east-west) and v (north-south) and direction along 35.75N at 0 UTC on February 8, 1998. Values estimated using (a) linear space interpolation and (b) weighted space interpolation .

5.5 0.5 度データと 2.5 度データ

本システムではECMWFの全球 2.5 度メッシュデータと日本付近の 0.5 度メッシュデータが使用出来る。そこでこの 2 種類のデータセットが同時にカバーしている個所で等圧面法 4 次 Runge-Kutta 法により比較を行った。計算開始地点には Figure 5.9(a)および Figure 5.10(a)に示した 37N-150.5E を西北端、35N-152E を東南端とする正方形の 4 頂点を選び、計算開始時刻も 1998 年 2 月 17 日 12UTC と同じにした。結果を Figure 5.18 に示す。

計算開始直後の気塊が移動する方向をみると 2.5 度メッシュデータを用いた場合、B および D は北へ向かっているのに対し、0.5 度メッシュデータを用いた場合 B は北北東、D は東北東に移動している。Figure 5.19 の上段左側には計算開始時刻の風ベクトルを 2.5 度データで表示した場合を、右側には 0.5 度データで表示した場合を示す。図中の  はそれぞれ Figure 5.18 の ABCD に対応した計算開始地点である。2.5 度メッシュデータの場合 B 及び D の風向風速は周囲 4 点、37.5N-150E、35N-150E、37.5N-152.5E、35N-152.5E の風向風速から線形補間で算出され、B、D 両点では北風になる。これに対し 0.5 度メッシュの場合特に D 点では東北東の風となっており、これらの違いが計算開始直後の B、D 点の移動方向の違いに反映されている。しかし計算開始後 12 タイムステップ経過後、即ち、12 時間前の風ベクトル(Figure 5.19 下段)分布図を表示し、それぞれのデータを用いて計算して求めた 12 時間前の位置をみると、ABCD の位置自体は異なるものの、それぞれの地点での風ベクトルを推定すれば A では西北西、B, C, D では北西であり、気塊はこれらの風により移動してきたと計算されるから全て西北ないし西北西から来たと計算されることになる。

気塊が数日前どの方角にいたのかという程度の議論ならば 2.5 度メッシュデータでも 0.5 メッシュデータでも類似の結果を与えるが、計算開始地点に到達する直前の通過地域、といった細かい議論をしたい場合には 0.5 度メッシュデータを使用した場合 2.5 度メッシュデータを用いた結果とは異なる経路となる場合があるのでやはり目的に合わせて使い分ける必要がある。

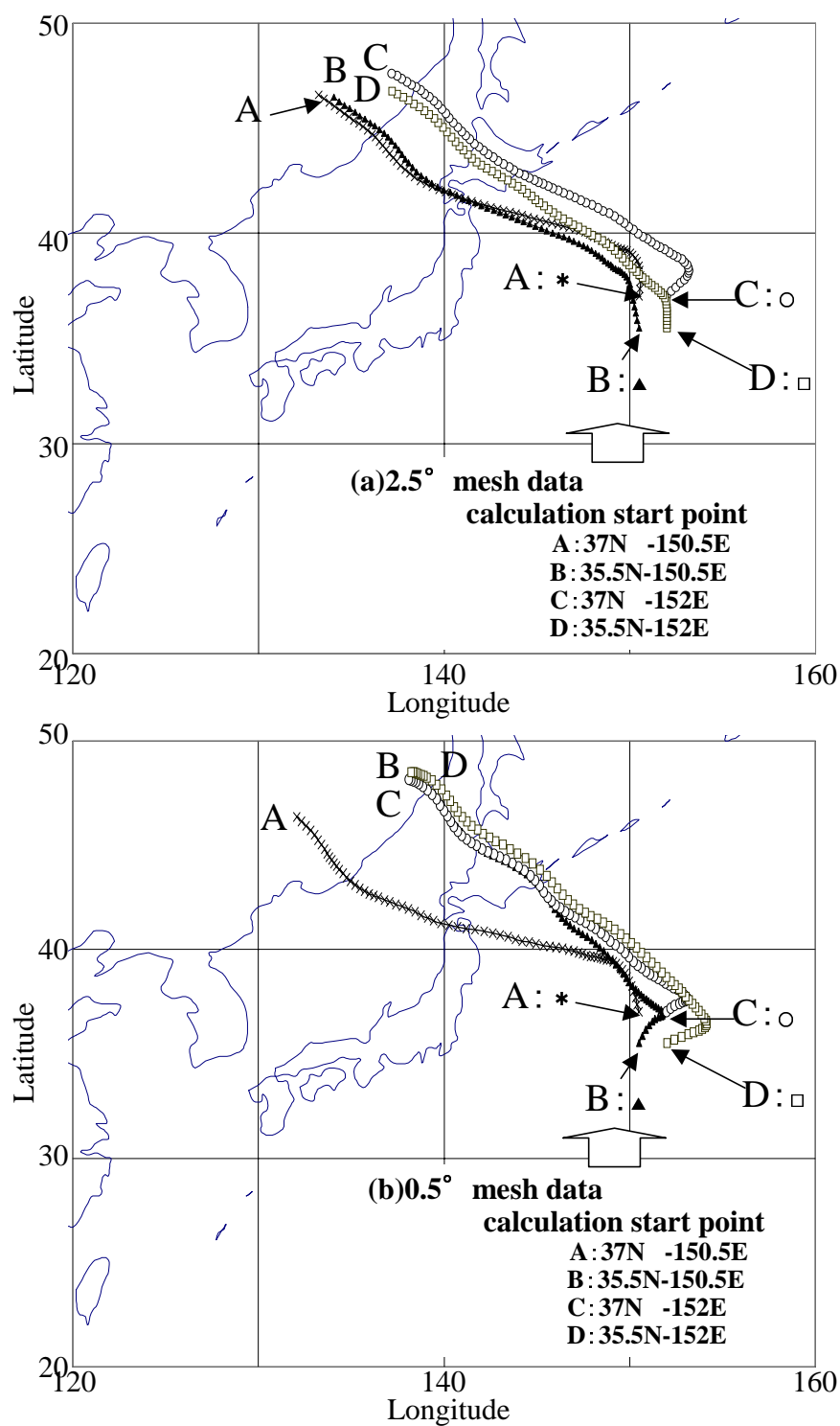


Figure 5.18 Comparison of the back trajectories calculated with (a) ECMWF 2.5 degree and (b) 0.5 degree mesh dataset. Trajectories are calculated by isobaric on 925hPa pressure surface and 4th Runge-Kutta from 12 UTC on February 17, 1998.

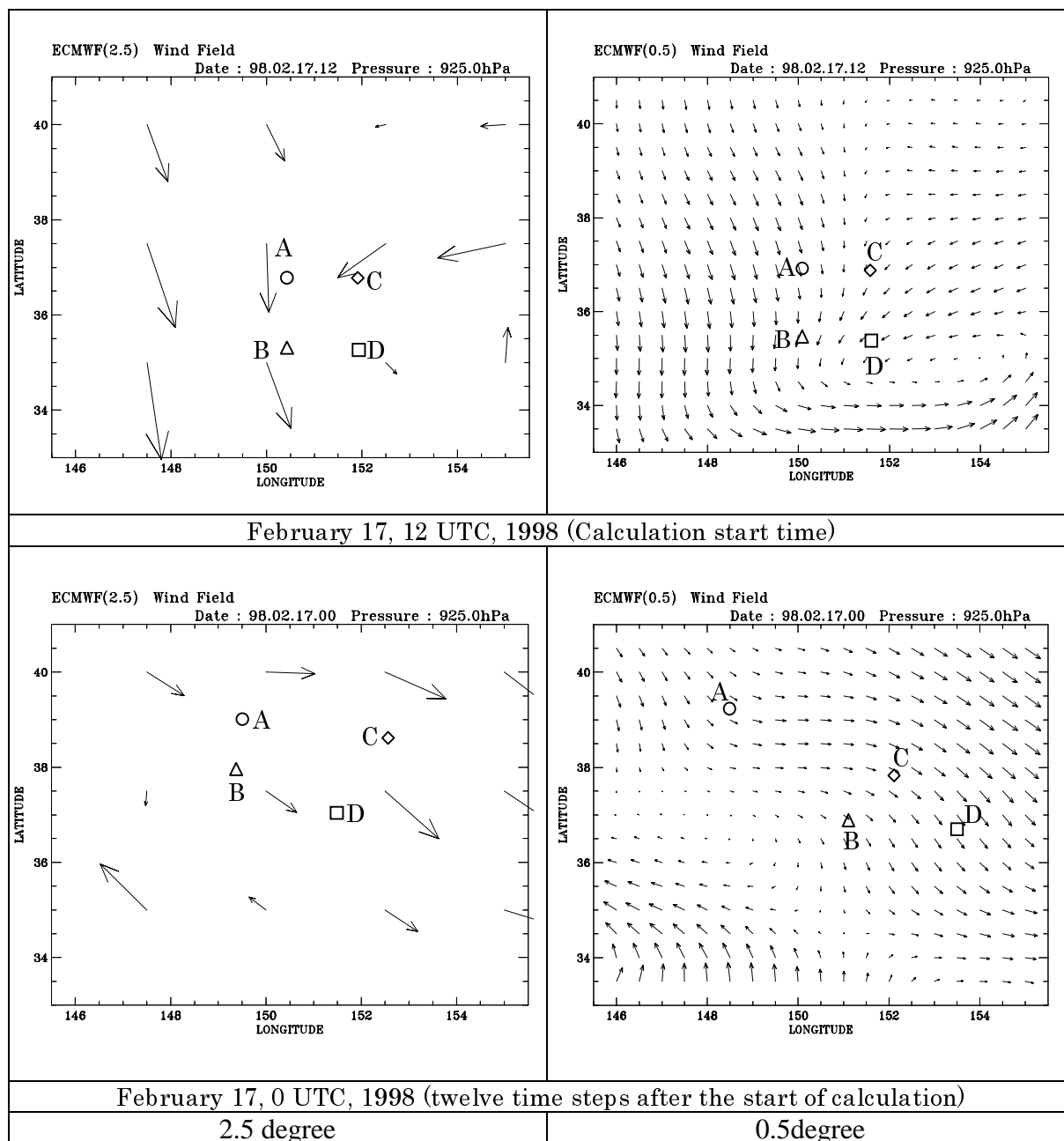


Figure 5.19 Wind fields at the calculation start time of trajectories shown in Figure 5.18, 12 UTC on February 17, 1998 (top) and after twelve time steps from the start of calculation, 0 UTC on February 17, 1998 (bottom). Air mass positions are indicated by open circle for trajectory A, open triangle for B, open diamond for C and open square for D.

5.6 応用例 波照間と落石岬に飛来する気塊の移動経路

当センターでは沖縄県八重山諸島の波照間島と北海道根室市の落石岬において温室効果ガスモニタリングを実施している。波照間島は日本最南端の有人島で台湾の東方 220km、北回歸線の北方 60km に位置し、気候的には亜熱帯に属している。夏は太平洋高気圧の支配下でありしばしばフィリピン海域で発生する台風の影響を受ける。冬は中国大陆からはりだした高気圧の支配下に入る。一方落石岬は北海道の東端根室市の西の郊外の海に南に向かって突き出した高さ 50m で東西 2.5km 南北 1～2km の台地であり、気候的には温帯の北限に近い。冬季はシベリヤ気団が支配的で夏季には太平洋気団やオホーツク気団の支配下に入る。

この両ステーション上空 800m に到達する気塊のバックトラジェクトリを数年分計算させ、そこから気団の経路の季節的な特徴を解析した。

Figure 5.20 は波照間上空に 1997-2000 年の毎日 0 UTC と 12 UTC に到達した気塊が 3 日前に存在した緯度(a))および経度(b))の経時変動を示したものである。着地判定を用いているので 3 日前の位置が求まったのは全期間の 94%であった。気塊が 3 日前に存在した緯度については明瞭な季節変化があり、冬季は北緯 3-40 度から時には 5-60 度まで、夏季には 10-20 度の低緯度帯に存在していたことがわかる。経度についてみた場合、3 日前の気塊の位置は東西両方向に分散しており、冬季には東側にいることがやや少ないようにみえるが、緯度の場合ほど明瞭な季節変化はみられない。

落石岬についても同様にまとめて Figure 5.21 に示す。3 日前の位置が求まったのは全期間中の 77%にとどまった。3 日前の緯度については波照間と類似の傾向が得られるが、分布幅は波照間の場合が赤道から 60N まで分布するのに対し、25N から 70N とより狭くなっている。また、波照間の場合全期間通して波照間より北側から 60%、南側 40%の分布であるが落石岬の場合落石岬より北側が 70%になっている。一方、経度で見た場合も年間を通じて西側からの気塊が多く、夏季の 1-2 ヶ月東側からの気塊が到達するにすぎない。

Figure 5.22 には落石岬に 1999 年の 1 年間、毎日 0 UTC と 12 UTC に到達した気塊がどの地域の上空を通過してきたかを棒グラフで示した。これは毎回求めたトラジェクトリごとに、3 日間を 1 として、グラフに示した地域の上空通過に要した時間の割合を求め、月ごとに集計したものである。海上にいた割合は日本海・太平洋を問わずまとめてある。冬季にはモンゴル・ロシア(シベリヤ)から中国東北部と朝鮮半島上空を通過後、北海道を横切って落石岬上空に到達する気塊が多いが、4 月から 8 月にかけての夏季は、陸地の上を通過した時間は約 40%まで低下し、かつ、アジア大陸上空からは殆ど来ない。年間を通じて北海道上空を通過する割合には余り変化がないが、これは、オホーツク海方面からの気塊でも樺太・北海道北上空を経て落石岬上空に到達したり、太平洋方面から北海道の東部をまわりこんで落石岬上空に到達する気塊などがあるためである。

このような気塊の挙動は観測結果を解析する上で有用な情報と考えられる。

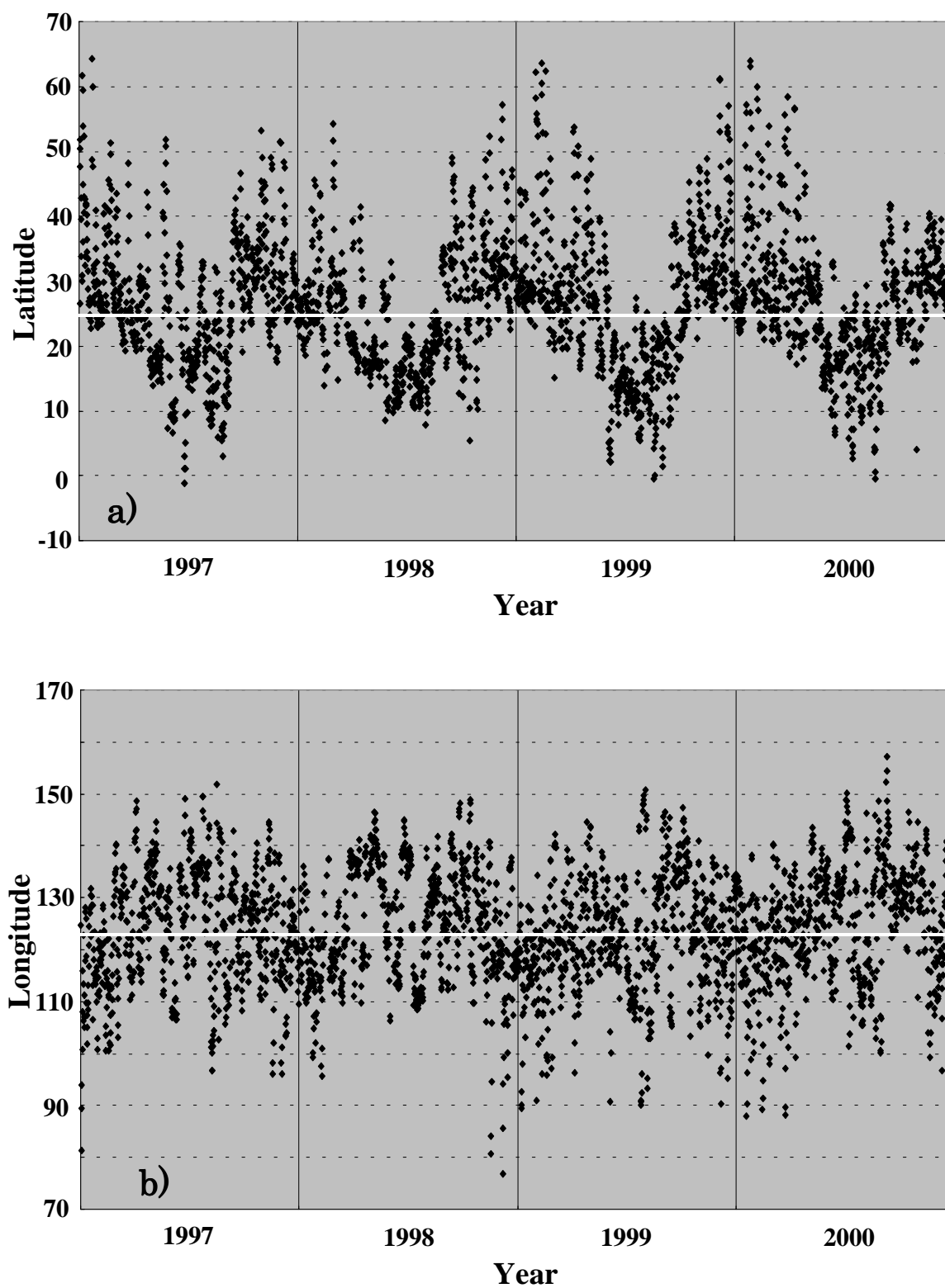


Figure 5.20 (a) Latitudinal and (b) longitudinal distribution of the points where air masses had passed three days before arriving at Hateruma. White line indicates the position of Hateruma.

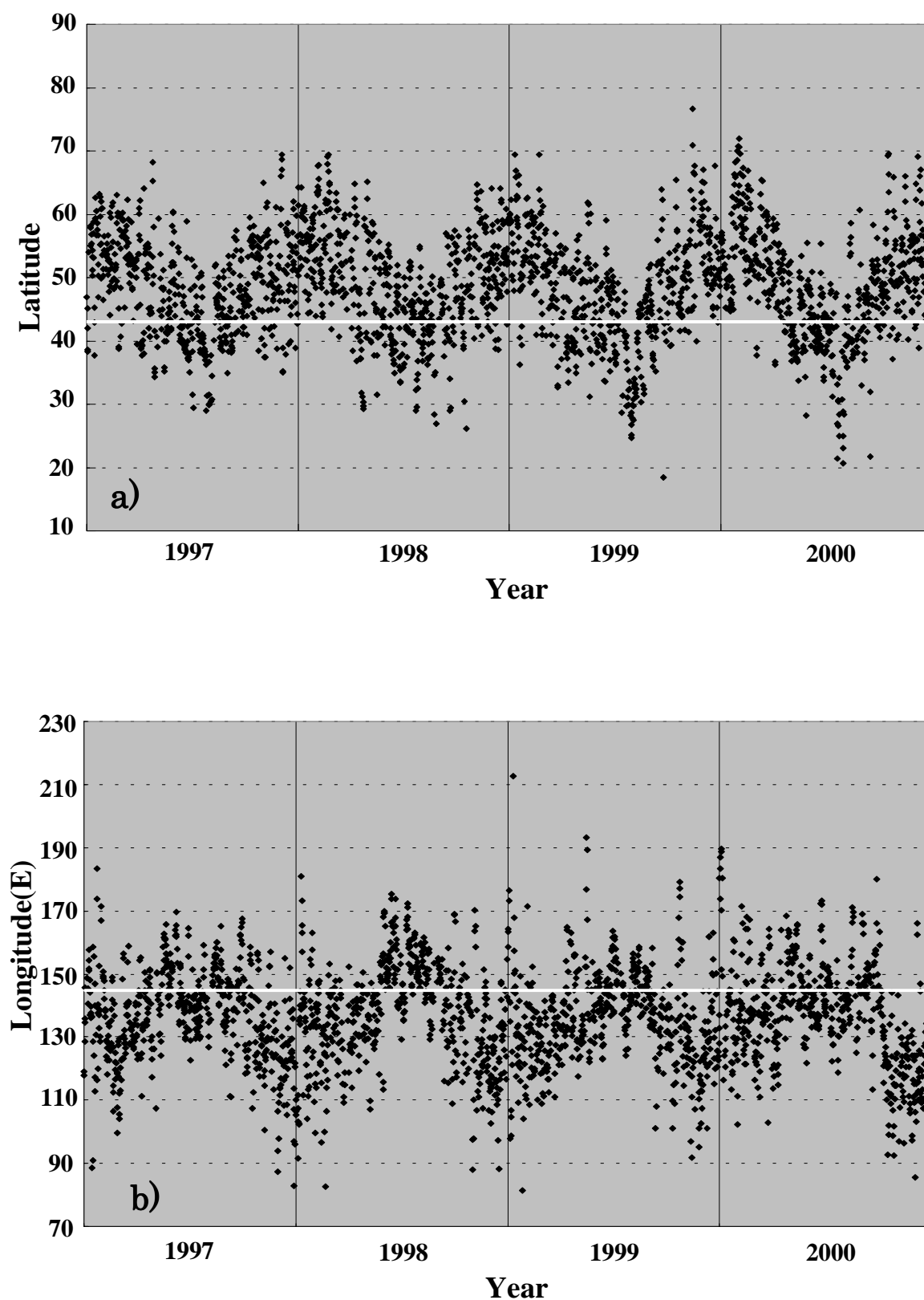


Figure 5.21 (a) Latitudinal and (b) longitudinal distribution of the points where air masses had passed three days before arriving at Cape Ochi-ishi. White line indicates the position of Cape Ochi-ishi.

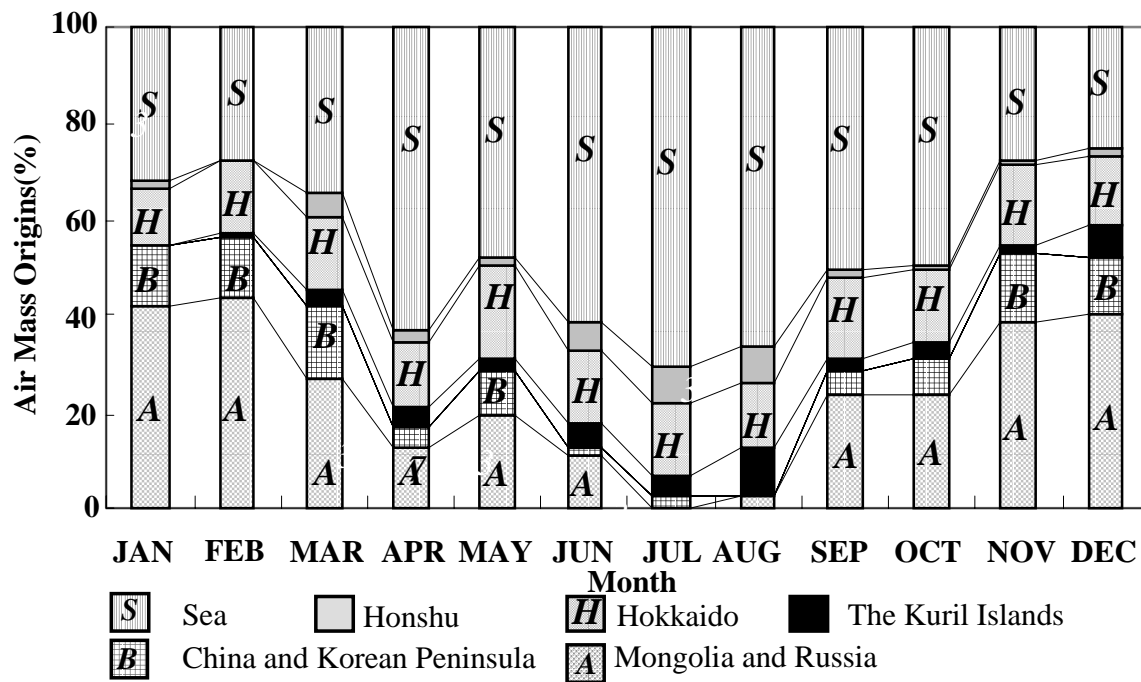


Figure 5.22 Geographical distribution of air mass origins of Cape Ochi-ishi within three days before arrival in 1999.