

3. トラジェクトリの計算方法

本章ではシステムの主要な機能であるトラジェクトリの計算方法について、基本的な考え方と計算方法についてのべる。

3.1 基本的な考え方

トラジェクトリの計算は気象のデータセットに含まれている気象要素を用い、任意の地点および任意の時刻を基点として、その時刻にその位置にいる気塊がどこを通過してきたか、すなわちバックトラジェクトリと、どこへ行くか、すなわちフォアトラジェクトリを気塊を流体粒子とみなして計算させるものである。

ある位置の気塊がどのような原理で移動しているのかを仮定することにより、計算方法は 3 つにわけられる。

(1) 等圧面法

「気塊は周囲の風の水平成分により同じ圧力の面、即ち等圧面を移動する」と仮定する。データセットの指定気圧面ごとの風速の水平成分のみを用いるので計算は比較的容易であり、計算機への負荷も小さい。

本システムの場合データセットに含まれている指定気圧面上でのみ計算が可能である。

(2) 等温位法

「気塊は同じ温位を保持しながら移動する」と仮定する。温位とは「大気中の温度 T 、気圧 p の気塊を、乾燥断熱的に 1000hPa 面まで熱力学的に可逆的に移動させたときに、気塊がとる温度」(吉野 他, 1985)をいう。この場合温位は気象データセットに含まれる圧力・温度データから算出する必要がある。本システムは、後述するように温位を計算ステップごとに、ある経度・緯度の指定気圧面ごとにまず算出し、そのあと後段の計算を行う方法をとっている。一つの計算ステップは、「予め定められた温位をもつ気塊を流体粒子とみなして、その流体粒子の存在位置から風速の水平成分のみを用いて水平方向へまず移動させ、移動後の経度・緯度で当該温位に該当する個所を地表から上層へと探し、同じ温位を示す位置を流体粒子の移動後の位置とする」ことからなる。

国環研にあるもう一つのトラジェクトリ計算システム STRAS(古橋 他, 1997)では、ある温位を持つ気塊の移動を計算する際、当該温位をもつ面即ち等温位面を、その気塊が存在する 3 次元格子の中で求め、風の水平成分を用いてこの温位面に沿って気塊を移動させるという本システムとは異なる計算手法を用いている。

(3) 3 次元法

「気塊は周囲の風によってのみ移動する」と仮定する。ECMWF のような気象のデータセットには風速の水平成分とともに垂直成分も含まれているので、経度・緯度方向の水平成分と垂直成分全てを用い、これだけでエアーマスを移動させていく。

本システムでは上記の方法のうち(1)および(2)のみ可能である。

なお以上の計算においては任意の場所及び任意の時間での気象値が必要となる。ECMWF 等のデータセットは前節で述べたように経度・緯度・指定気圧面で定められる 3 次元格子の一定時間間隔ごとのデータであり、任意時間・任意位置の気象データは時間的及び空間的に補間して求める必要がある。補間方法については 3.3 で詳しく述べる。

3.2 計算手法

3.2.1 概要

本システムの基本モデルは、気塊を流体粒子とみなしその位置に吹いている風の水平成分によって順次移動させていく、2次元のラグランジュ型モデルである。気象データセットの風速の水平成分、すなわち東西成分 u (m/s) および南北成分 v (m/s) を用いて気塊のトラジェクトリを数値解法により算出していく。高さ方向の気塊の動きは、(2)の等温位法でのみ考慮されるが、その場合も気象データセットに含まれる風の垂直方向の成分は使用せず、気塊が持つ温位が保存されるという仮定で気塊を水平方向に移動させた後、移動前と同じ温位の場所をその経度・緯度で地表から上空へ向かって探す、という方法をとる。これらの計算では、任意の時間・位置における気象値が必要になる。本システムではこの補間方法と、風による移動経路を算出する積分解法とがセットになっているため、個別の計算方法の記述に先立ち、全体の計算の流れをまず示す。

(1) 等圧面法

- 1) 最初に計算を行いたい指定気圧面と、気塊が存在する経度・緯度位置および時刻を指定する。
- 2) 当該指定気圧面で、指定した経度・緯度を含む平面格子の4つの頂点での指定した時刻における風速成分を、データセットに含まれているその前後の時刻のデータから時間の線形補間により求める。
- 3) 指定した経度・緯度での風速の水平成分を周囲の4つの頂点のデータから距離の線形補間または逆二乗の重み付け補間により算出する。
- 4) 積分解法により一定時間(積分のタイムステップ、以下タイムステップ)後の気塊の位置を求める。
- 5) 2)～4)を指定された期間繰り返す。

(2) 等温位法

- 1) 気塊が存在する経度・緯度位置およびジオポテンシャルハイトと時刻を指定する。
- 2) 当該経度・緯度・ジオポテンシャルハイトを含む3次元格子について上下の指定気圧面の温位を、時間及び距離の線形補間で求め、当該位置での温位をジオポテンシャルハイトの線形補間で算出する。
- 3) 当該経度・緯度・ジオポテンシャルハイトを含む3次元格子の8つの頂点の風速水平成分を時間の線形補間により求めた後、距離の線形または逆二乗補間により当該位置の風速の水平成分を算出する。
- 4) 積分解法により水平方向にタイムステップ経過後の気塊の経度・緯度位置を求める。
- 5) 4)で求めた気塊を水平に移動させた位置の経度・緯度における各指定気圧面の温位を時間及び距離の線形補間で求め、温位の線形補間により2)で求めた温位と同じ位置を地表面から上空へ向かって探し一番地表に近い位置で当該温位となる位置を気塊の移動後の位置とする。
- 6) 3)～5)を指定された期間繰り返す。

なお、等温位法では1)で高度を指定するかわりに直接温位を指定することも出来る。この場合5)と同様な方法で指定された経度・緯度における各指定気圧面での温位を求め、温位の線形補間で指定された温位の位置を求める。すなわち、ある時刻に、ある経度・緯度の地点の上空の指定した温位となる位置を探し、そこから気塊を移動させていくことになる。等圧面法(Isobaric)および等温位法(Isentropic)の計算ステップをまとめて Figure 3.1 に示す。

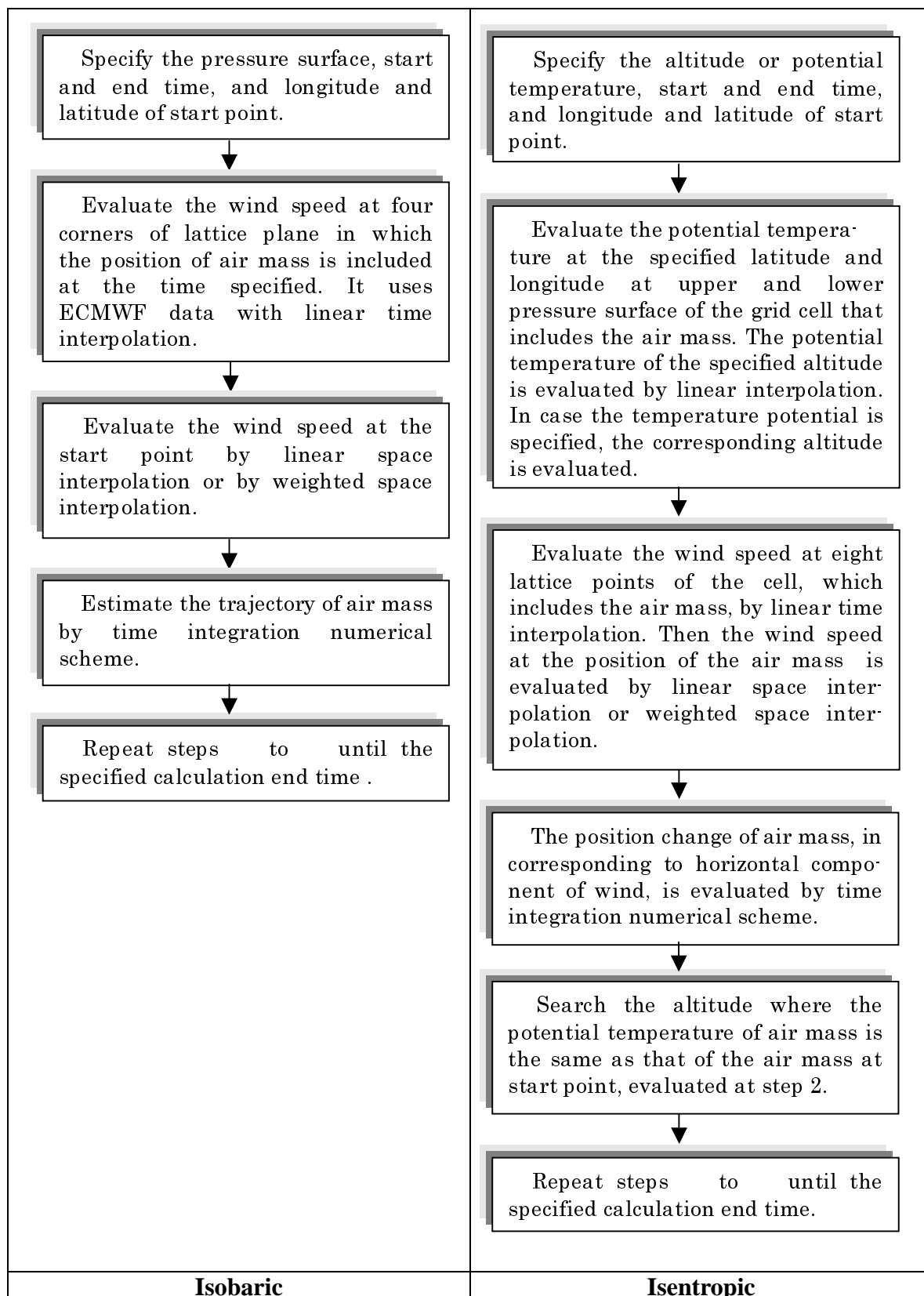


Figure 3.1 Calculation procedure of air mass trajectory.

3.2.2 数値解法

本システムでは数値解法として Euler 法、Petterssen 法および 4 次の Runge-Kutta (4th Runge Kutta) 法を用いている。ここで本項で使用する記号と次節で述べる補間方法で用いる記号をまとめておく。なお()内に単位を付記するが、それぞれの数値解法の式では単位を合致させるための係数や、距離を算出した後の経度・緯度への換算などは省略して、考え方がわかるようにのみ表していることに留意されたい。

- 1) 風速の東西成分 u (m/s)
- 2) 風速の南北成分 v (m/s)
ある地点における風速をあらわす場合は下付きの添え字を加える。例えば地点 A に於ける風速の東西成分は u_A 、南北成分は v_A
- 3) 数値積分の時間幅(タイムステップ) h (h)
- 4) 時刻 t (世界標準時 UTC)
データセットに記載されている気象値データの時刻は下付の添え字 $n, n+1, n-1$ をつけ t_n, t_{n+1}, t_{n-1} のように表す。6 時間ごとのデータセットの場合を例にとると、ある日の 12 時を t_n とすれば t_{n-1} は 6 時を t_{n+1} は 18 時を意味する。
- 5) 経度
- 6) 緯度
- 7) 圧力 p
5)~7)について気象データセットの経度・緯度・指定圧力面を表す場合は下付きの添え字 i, j, k を用い、ある 3 次元格子について、西端の気象値が記載されている経度を i 、東端の経度を $i+1$ 、南端と北端の気象値が記載されている緯度をそれぞれ j 、 $j+1$ 、上下の指定圧力面の気圧が高い方、すなわち地表面に近い方を p_k 、気圧が低い方を p_{k+1} で表す。

(1) Euler 法

Figure 3.2 に示すように時刻 t に地点 A にいた気塊が時刻 $t+h$ にいる地点 B は、地点 A における風速の東西成分 u_A 、南北成分 v_A にタイムステップ h を乗じて求める。

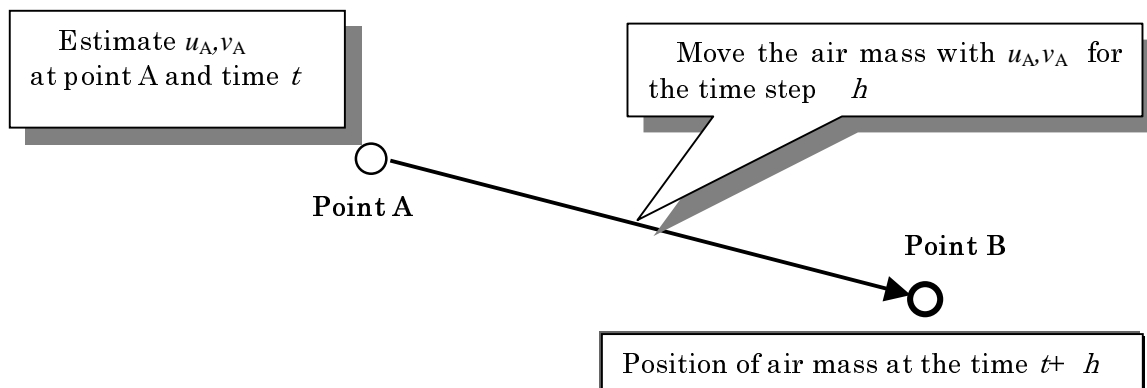


Figure 3.2 Time integration numerical scheme 1: Euler method.

(2) Petterssen 法

Petterssen 法では、Figure 3.3 に示すように、

- 1) 地点 A における時刻 t の風速の水平成分 u_A 、 v_A を求め、これを用いてタイムステップ h 経過後に気塊が到達する地点 B を算出する。
- 2) 地点 B の時刻 $t+h$ における風速の水平成分 u_B 、 v_B とを求める。

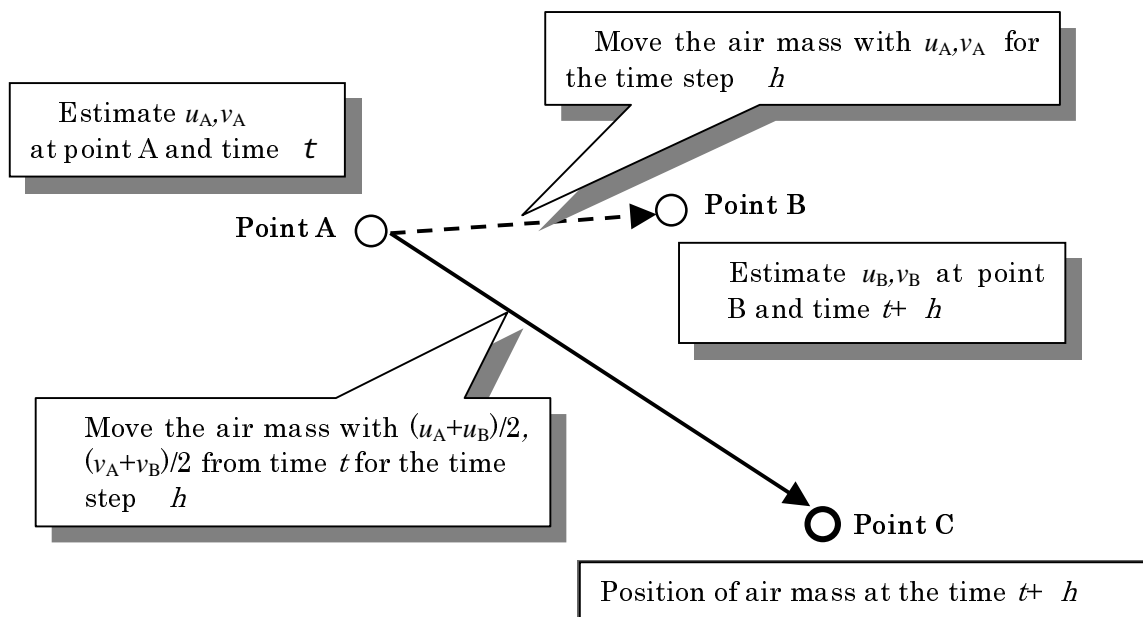


Figure 3.3 Time integration numerical scheme 2: Petterssen method.

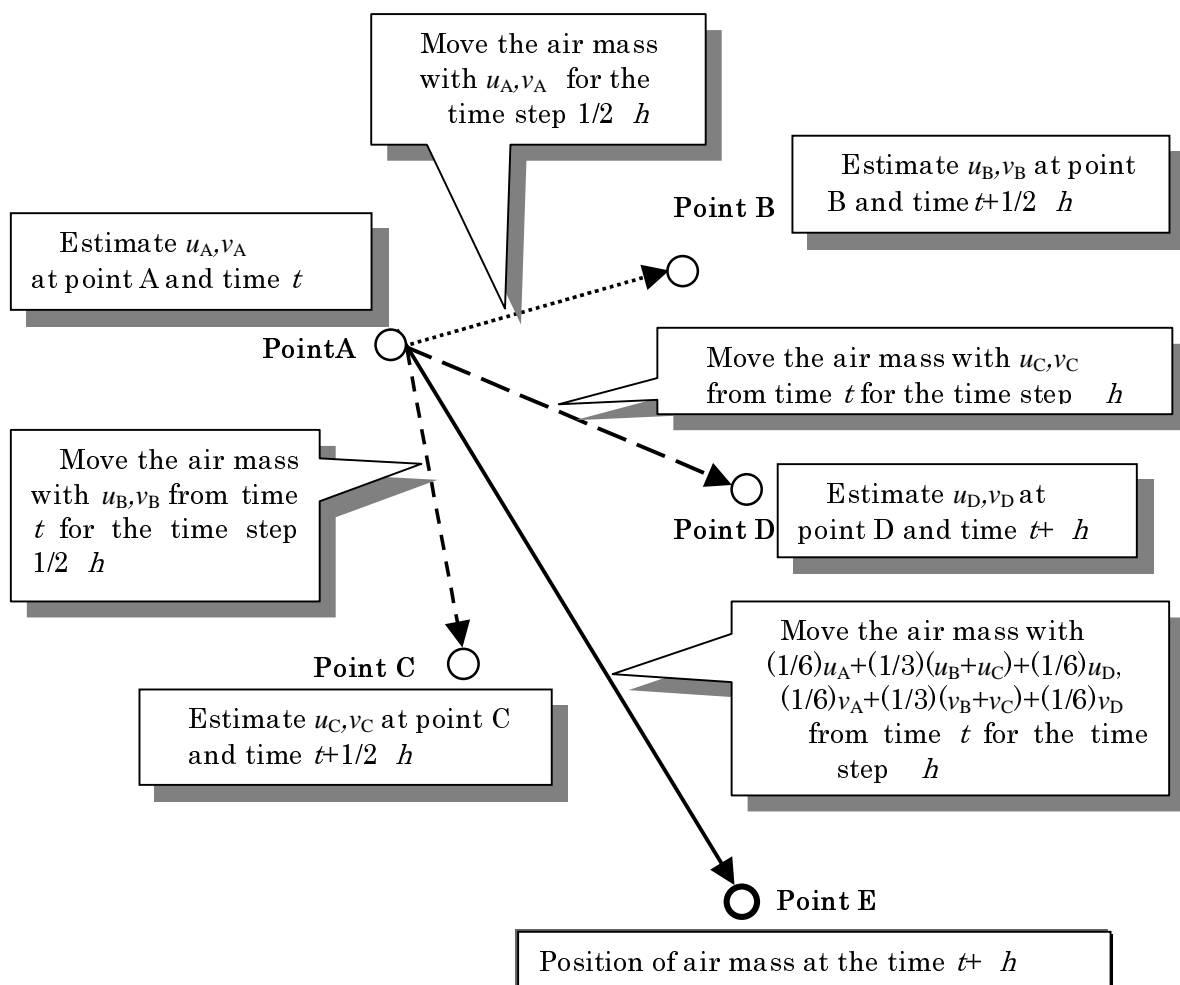


Figure 3.4 Time integration numerical scheme 3: 4th Runge-Kutta.

u_A, v_A と u_B, v_B の平均値 $(u_A+u_B)/2$ および $(v_A+v_B)/2$ を使って A 地点を時刻 t に出発しタイムステップ h の間移動した地点 C を求め、これを流体粒子の移動後の位置とする。

(3) 4 次の Runge-Kutta 法

4 次の Runge-Kutta 法の計算スキームを Figure 3.4 に示す。

- 1) 時刻 t における地点 A での風の水平成分 u_A, v_A を求め、これを用いてタイムステップ h の半分、 $1/2 h$ 経過後に気塊が到達する地点 B を算出する。
- 2) 地点 B における時間 $t+1/2 h$ での風の水平成分 u_B, v_B を求める。
- 3) 地点 A から時間 t に u_B, v_B で出発しタイムステップ h の半分、 $1/2 h$ 経過後に気塊が到達する地点 C を求める。
- 4) 地点 C における時間 $t+1/2 h$ での風の水平成分 u_C, v_C を求める。
- 5) 地点 A から時間 t に u_C, v_C で出発しタイムステップ h 経過後、気塊が到達する地点 D を求める。
- 6) 地点 D における時間 $t+h$ での風の水平成分 u_D, v_D を求める。
- 7) 地点 A から時間 t に $(1/6)u_A+(1/3)(u_B+u_C)+(1/6)u_D$ および $(1/6)v_A+(1/3)(v_B+v_C)+(1/6)v_D$ で出発しタイムステップ h 経過後、気塊が到達する地点 E を求めこれを流体粒子の移動後の位置とする。

3.3 補間方法

前節で述べたトラジェクトリの数値解法による算出では、任意の時刻・経度・緯度・高さでの気象値を ECMWF のデータセットから補間により求める必要がある。本節ではこの補間方法について述べる。なお、高さについてはジオポテンシャルハイトをそのまま使用する。

また、等温位法の計算で必要となる温位の算出については 3.4 にまとめて記している。

任意の経度・緯度の任意の時間の気象値を気象データセットから求める手順は、

- (1) 気象値を求めようとする経度・緯度位置が含まれる格子を選び、格子の各頂点の、求めたい時刻の気象値を、収録されているその時刻の直前直後の気象値から、時間の線形補間により算出する。
- (2) 距離の線形ないし距離の逆二乗の重み付け補間により求めたい位置の、求めたい時刻における気象値を算出する。

これを Figure 3.5 にまとめる。

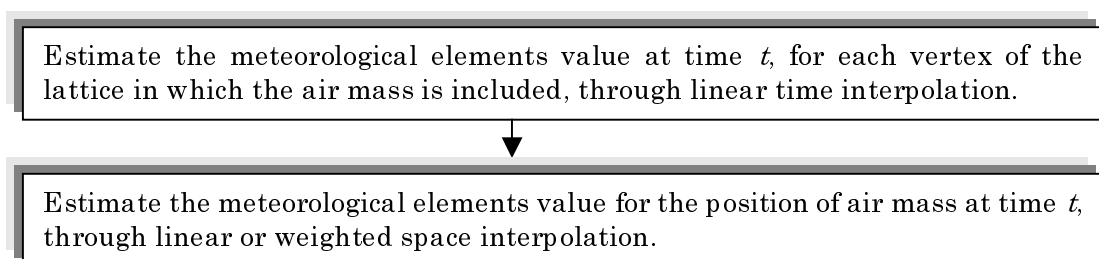


Figure 3.5 Estimation scheme of meteorological elements value at any point and time.

3.3.1 数式の表記

ECMWF のデータセットでは 1.2.1 で述べたように、2.5 度ないし 0.5 度間隔の経度・緯度軸と 21 層の指定気圧面で定められる 3 次元格子の各格子点に、一定時間間隔で Table 2.1 に示した気温、ジオポテンシャル、風速、湿度等の気象データが入っている。以下の補間式では ECMWF のデー

タセットに含まれる気象値を $f = (\lambda_i, \phi_j, p_k, t_n)$ 、その気象値を用いて求めた任意の位置・時刻の補間値を $f = (\lambda, \phi, p, t)$ のように表す。記号および添え字は 3.2.2 で述べた通りである。

ただし距離の逆二乗の重み付け補間に関する格子点データの表記は、対象としている平面格子ないし 3 次元格子の頂点の格子点を m とし $f = (\lambda_m, \phi_m, p_m, t_m)$ のようにあらわす。ここで m は平面格子では 1～4、3 次元格子では 1～8 の整数値である。

なお等温位法における補間では、指定気圧面ごとに経度、緯度の温位を求め、任意の温位の気象値を温位の線形補間で求めるが、この場合温位における気象値は $f(\text{温位}, p, t)$ のようにあらわす。温位値については、トラジェクトリ計算の開始時点で求める温位を θ_0 であらわし、指定気圧面 p_k での温位値は θ_k であらわす。

3.3.2 時間補間

任意の時刻 t の気象データは、 t より前のデータが収録されている時間 t_n および t より後のデータが収録されている時間 t_{n+1} とから式(1)により時間の線形補間で求める (Figure 3.6)。

$$f(\lambda_i, \phi_j, p_k, t) = \{f(\lambda_i, \phi_j, p_k, t_{n+1}) \times (t - t_n) + f(\lambda_i, \phi_j, p_k, t_n) \times (t_{n+1} - t)\} / (t_{n+1} - t_n) \quad (1)$$

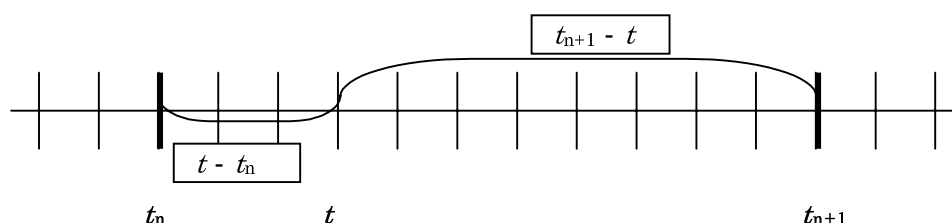


Figure 3.6 Linear time interpolation.

3.3.3 空間補間

空間補間は線形補間と距離の逆二乗の重み付け補間の二種類を 3.2 の計算方法により使い分けられている。

(1) 線形補間 組み合わせる数値解法は 4 次の Runge-Kutta 法

1a) 等圧面法の場合

等圧面法の場合、計算は全て本システムに収録している 15 の指定気圧面のうちの一つの面でのみ行われる。対象としている気圧面 p_k で、気象データを算出したい地点の経度・緯度(,)を含む平面格子の 4 つの頂点について時間 t の気象値を式(1)でまず算出し、その後これらの値から式(2)の距離の線形補間により当該地点の気象値を算出する。なお式(2)は一つの指定気圧面でのみ行い、時刻も予め決まっているので p と t は省略してある。概略を Figure 3.7 に示す。

$$f(\lambda, \phi) = (1 - \beta) \{ \alpha \times f(\lambda_{i+1}, \phi_j) + (1 - \alpha) \times f(\lambda_i, \phi_j) \} + \beta \{ \alpha \times f(\lambda_{i+1}, \phi_{j+1}) + (1 - \alpha) \times f(\lambda_i, \phi_{j+1}) \} \quad (2)$$

ここで

$$\alpha = (\lambda - \lambda_i) / (\lambda_{i+1} - \lambda_i)$$

$$\beta = (\phi - \phi_i) / (\phi_{i+1} - \phi_i)$$

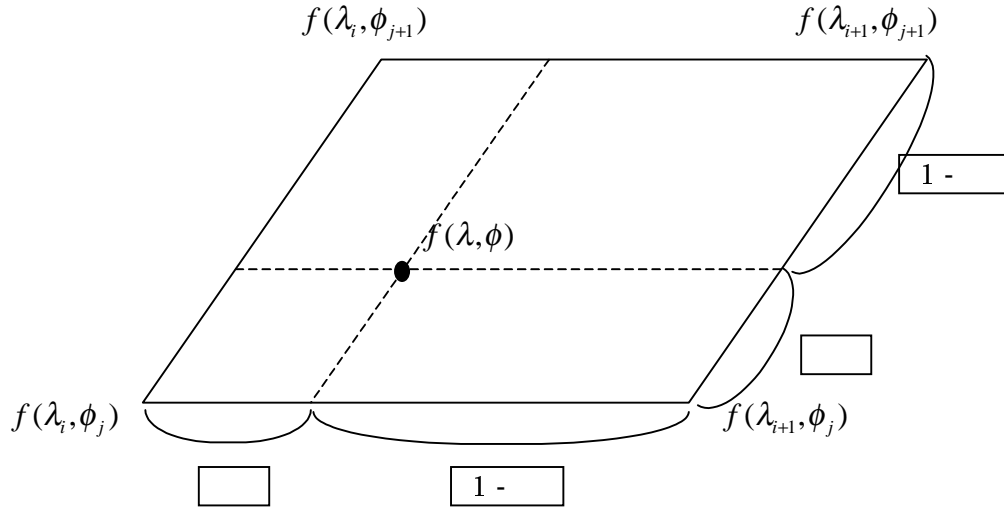


Figure 3.7 Linear space interpolation on isobaric surface.

1b) 等温位法の場合

等温位法の場合、気象値を求めようとする経度・緯度位置(,)およびジオポテンシャルハイト、または温位値が含まれる 3 次元格子を選び出し、その上と下の指定気圧面 p_{k+1} と p_k それぞれにおいて、(,)での風速と温度を式(3)で求める。この場合も先に格子点の時刻 t の気象値は時間の線形補間であらかじめ求めてある。式(3)でも t と p を省略してある。

$$f(\lambda, \phi) = (1 - \beta) \{ \alpha \times f(\lambda_{i+1}, \phi_j) + (1 - \alpha) \times f(\lambda_i, \phi_j) \} + \beta \{ \alpha \times f(\lambda_{i+1}, \phi_{j+1}) + (1 - \alpha) \times f(\lambda_i, \phi_{j+1}) \} \quad (3)$$

次に 3 次元格子の上側と下側の指定気圧面 p_{k+1}, p_k における、気象値を求めようとする位置(,)での温位値 θ_{k+1}, θ_k を算出する。

計算の開始時に求められている、或いは指定されている温位値 θ_0 を用い、 $\theta_{k+1}, \theta_k, \theta_0$ を用いて温位の線形補間により θ_0 における気象値を式(4)により求める。 p_{k+1} における気象値、この場合風速は以下の式では温位値 θ_{k+1} の関数として $f(\lambda, \phi, \theta_{k+1})$ であらわしておく。 p_k における風速も同様である。なお、式(4)では t を省略してある。概略を Figure 3.8 に示す。

$$f(\lambda, \phi, \theta_0) = f(\lambda, \phi, \theta_{k+1}) \times \gamma + f(\lambda, \phi, \theta_k) (1 - \gamma) \quad (4)$$

$$\text{ここで} \quad \gamma = (\theta_0 - \theta_k) / (\theta_{k+1} - \theta_k)$$

なお、 γ がマイナス値になる場合、すなわち温位が高さ方向で逆転している場合はその逆転部分はスキップして、 γ が次に正となる一番下の格子で計算を行う。

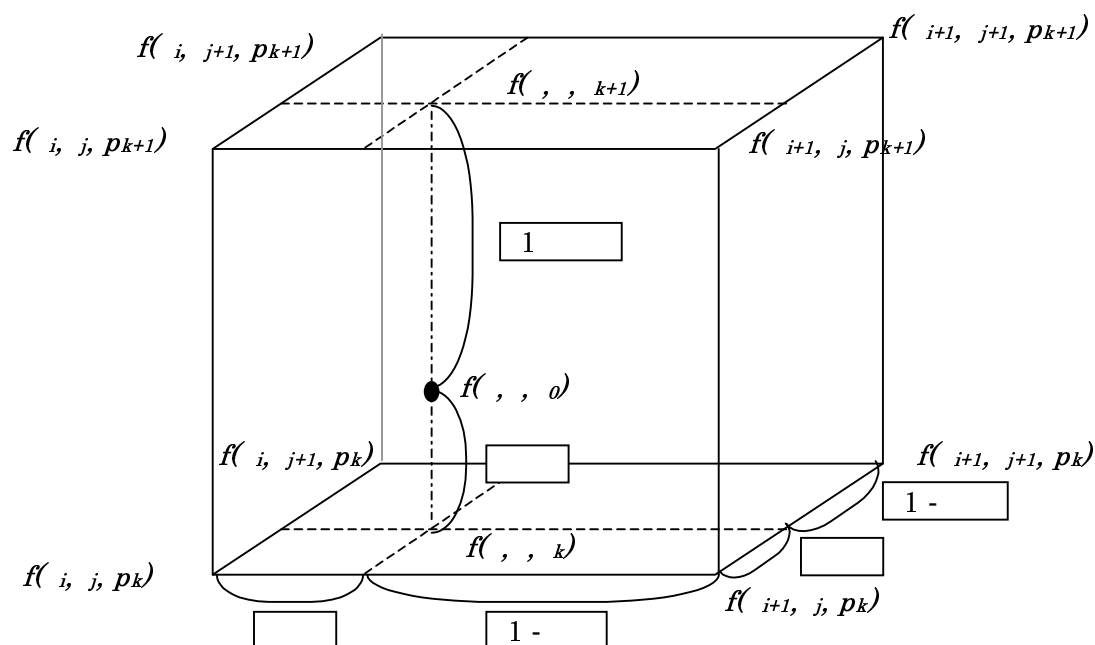


Figure 3.8 Linear space interpolation on isobaric surface and linear potential temperature interpolation in vertical direction.

(2) 距離の逆二乗の重み付け補間 組み合わせる数値解法は Euler 法と Petterssen 法

2a) 等圧面法

対象としている指定気圧面 p_k で、気象データを算出したい地点(,)を含む平面格子の 4 つの頂点の気象値から式(5)により距離の逆二乗の重み付け補間により当該地点の気象値を算出する。式(5)において $m=1 \sim 4$ は 4 つの格子点をあらわし r_m はそれぞれの格子点から気象値を算出したい地点までの距離である (Figure 3.9 参照)。

$$f(\lambda, \phi) = \frac{\sum_{m=1}^4 (1/r_m^2) f_m(\lambda_m, \phi_m)}{\sum_{m=1}^4 1/r_m^2} \quad (5)$$

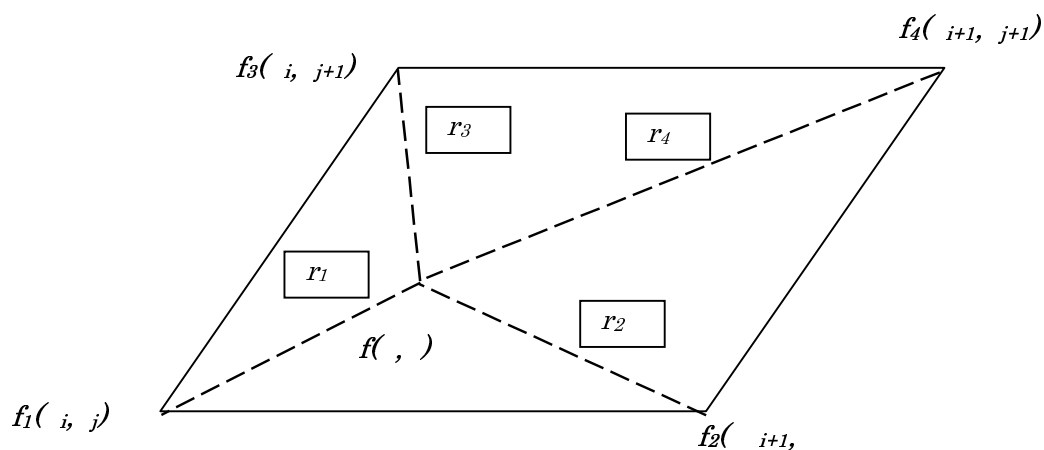


Figure 3.9 Weighted interpolation on isobaric surface.

2b) 等温位法

等温位法の場合、気象値を求めようとする位置を含む 3 次元空間格子の 8 つの頂点 $m=1 \sim 8$ の気象値から、 $(\ , \ , \ 0)$ の位置までの距離の逆二乗の重み付け補間を行って算出する (式(6))。

$$f(\ , \ , \theta_0) = \sum_{m=1}^8 (1/r_m^2) f_m(\ , \ , \) \Big/ \sum_{m=1}^8 1/r_m^2 \quad (6)$$

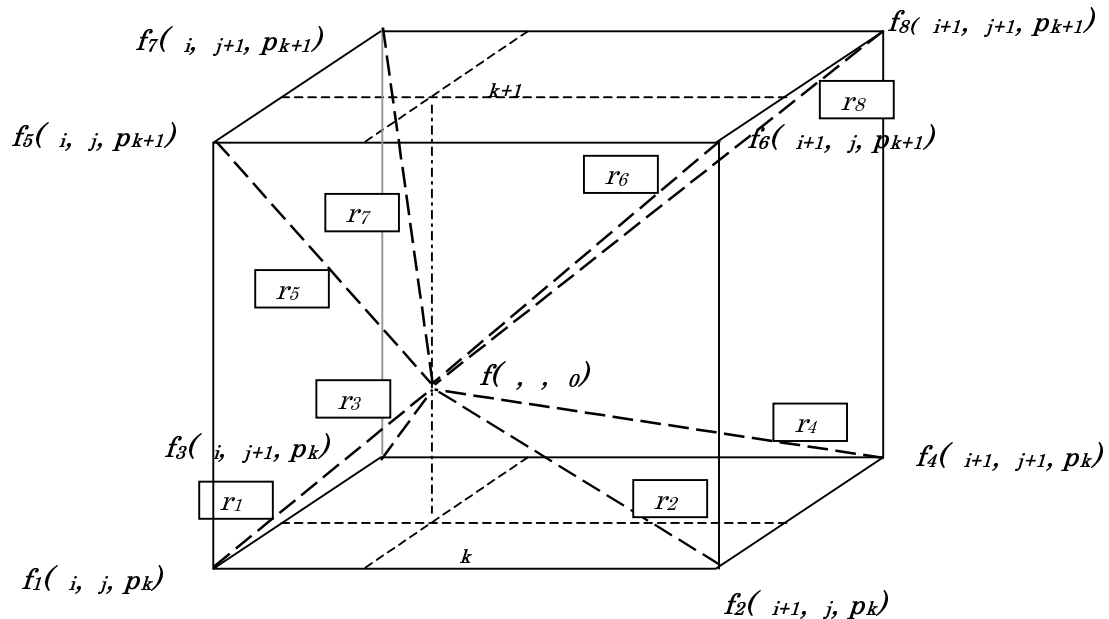


Figure 3.10 Weighted interpolation in a grid cell. The meteorological elements' value at 8 corners are obtained by the linear time interpolation.

この場合高さ方向の距離はジオポテンシャルハイトを用いる。このジオポテンシャルハイトの算出は式(2)～(4)と同一の手順で行う。Figure 3.10 に概要を示す。

以上述べた補間において、一つの格子の経度、緯度については数値の小さな方、高度は低い方すなわち圧力の高い方を計算における基準の境界線或いは基準の境界面とする。つまり ECMWF のメッシュデータのある経度・緯度線上、或いは指定気圧面上での補間計算においては、それより数値の大きな、経度・緯度の頂点のデータと、より低圧側の指定気圧面にある頂点のデータを使用する。ただし、等圧面法の距離の逆二乗の重み付け補間の場合、経度境界線上の位置ではその東西の格子点データのみから、緯度境界線上ではその南北の格子点のデータのみから補間する。

本システムにおける積分解法と補間方法の組み合わせを Table 3.1 にまとめて示す。

Table 3.1 Time numerical integration scheme and interpolation.

Time numerical integration scheme	Estimation of meteorological elements
Euler	Weighted interpolation
Petterssen	Weighted interpolation
4th Runge-Kutta	Linear interpolation

The potential temperature is always estimated by linear interpolation

3.3.4 線形補間と距離の逆二乗の重み付け補間の特徴 3次元格子の各頂点データの補間値への寄与

前節で述べたように本システムでは任意の位置における気象値を求めるのに距離の線形補間と逆二乗の重み付け補間の2種類を用いている。距離の逆二乗の重み付け補間では、補間値に対する距離の異なる位置にある気象値の影響は、線形補間に比べ近距離のものほど大きい。

ところで、ECMWFの2.5度メッシュデータセットの場合、北緯30度近傍を例にとれば、3次元格子の一边は経度方向に240km、緯度方向に270kmであるが、高さ方向はどの指定気圧面の間でも数km以下で925hPa面と850hPaの間に至っては数百mにすぎず、極めて扁平な形をしている。従って、式(6)の3次元格子の8個の頂点の気象値から距離の逆二乗の重み付け補間を行う場合、一つの3次元格子の中では高さ方向に補間値が殆ど変化しないものと考えられる。そこで指定気圧面925hPaと850hPaの間にある北緯30度付近の1つの3次元格子を例に距離の逆二乗の重み付け補間で、各頂点の気象値が補間値に及ぼす寄与の、高さ方向の変化を見積もり、線形補間の場合と比較した。結果をFigure 3.11に示す。

3次元格子の経度方向の2.5度の長さは241km、緯度方向の2.5度の長さは277kmとし、高さは両指定気圧面の平均的な高度差700mとした。頂点は、925hPa面の西南を1、東南を2、西北を3、東北を4とし、850hPa面についても同じ順に5~8まで番号付けしてある(Figure 3.11 (a1))。3次元格子内の流体粒子の位置は格子の経度・緯度・高さ方向の稜を全て1に規格化し、分率で示した。つまり経度・緯度方向では二百数十kmを1に、高さ方向は数百mを1にとったことになる。補間値へ頂点のデータが及ぼす寄与率は、経度方向に西南の頂点から東および北へ0.3の位置で流体粒子を高さ方向に0から0.5まで移動した場合について求めた。規格化した座標を使い寄与率で示しているの、それぞれの軸で0から0.5までの変化を見れば全ての傾向は把握できる。

まず距離の逆二乗の重み付け補間における1~8の頂点の補間に対する寄与率の高さ方向の変化をFigure 3.11 (b)に示す。頂点1と5、2と6、3と7および4と8という上下の面の対応する頂点の寄与率は殆ど同じで、しかも高さ方向にも殆ど変化しないことが注目される。Figure 3.11 (c)には頂点1と5について縦軸を拡大して示す。高さ0での両者の差は0.004%しかなく実質的に同じである。すなわち距離の逆二乗重み付け補間ではこの3次元格子の中での高さ方向の値の変化は無視される。また上下方向で格子をまたいで移動した場合、補間値は高さ方向に不連続になる。後で5.2.2に詳述するように、距離の逆二乗の重み付け補間で1000hPaから400hPa面まで高さ方向に風向・風速を算出して高度依存をみると、隣接する指定気圧面で挟まれた格子ごとに事実上一定の値を持ち階段状に変化する。つまり、等温位法における距離の逆二乗の重み付け補間は、空間を指定気圧面で区切り、隣接する2つの指定気圧面の間は水平方向の風向・風速の分布が高さによって変化しない、としてトラジェクトリを計算させるものである。2つの気圧面データの数値を使用し、かつ高さ方向には2つの指定気圧面内は一定値、指定気圧面を越えると階段状に変化する風で気塊、流体粒子を移動させるわけで、高さ方向に移動して指定気圧面を越えた場合、方向の突然変化、例えばキंक状にトラジェクトリが折れ曲がる、という結果が得られる場合もでてくる。自然界の気塊の動き、という観点から見ればキंकのように、気塊の経路が鋭角に折れ曲がったり、逆方向に進むのは不自然であるが、本来、トラジェクトリの算出とは気塊がどこから来たか、どこへ行くかを推定するためであり、高さ方向に階段状に変化する風の場合を仮定して計算すれば不自然さはいわば当然の帰結で、不自然だから棄却するのではなく、むしろ距離の逆二乗の重み付けを使用することにより、気象場が急激に変化している情報が鮮明にあらわれる、というプラスの面があることを指摘しておきたい。

これに対して距離の線形補間の場合の補間値への各頂点の寄与率が、高さによりどう変化するかをFigure 3.11 (d)に示す。線形補間の場合、式(3)で計算されるため指定気圧面上では上下の指定

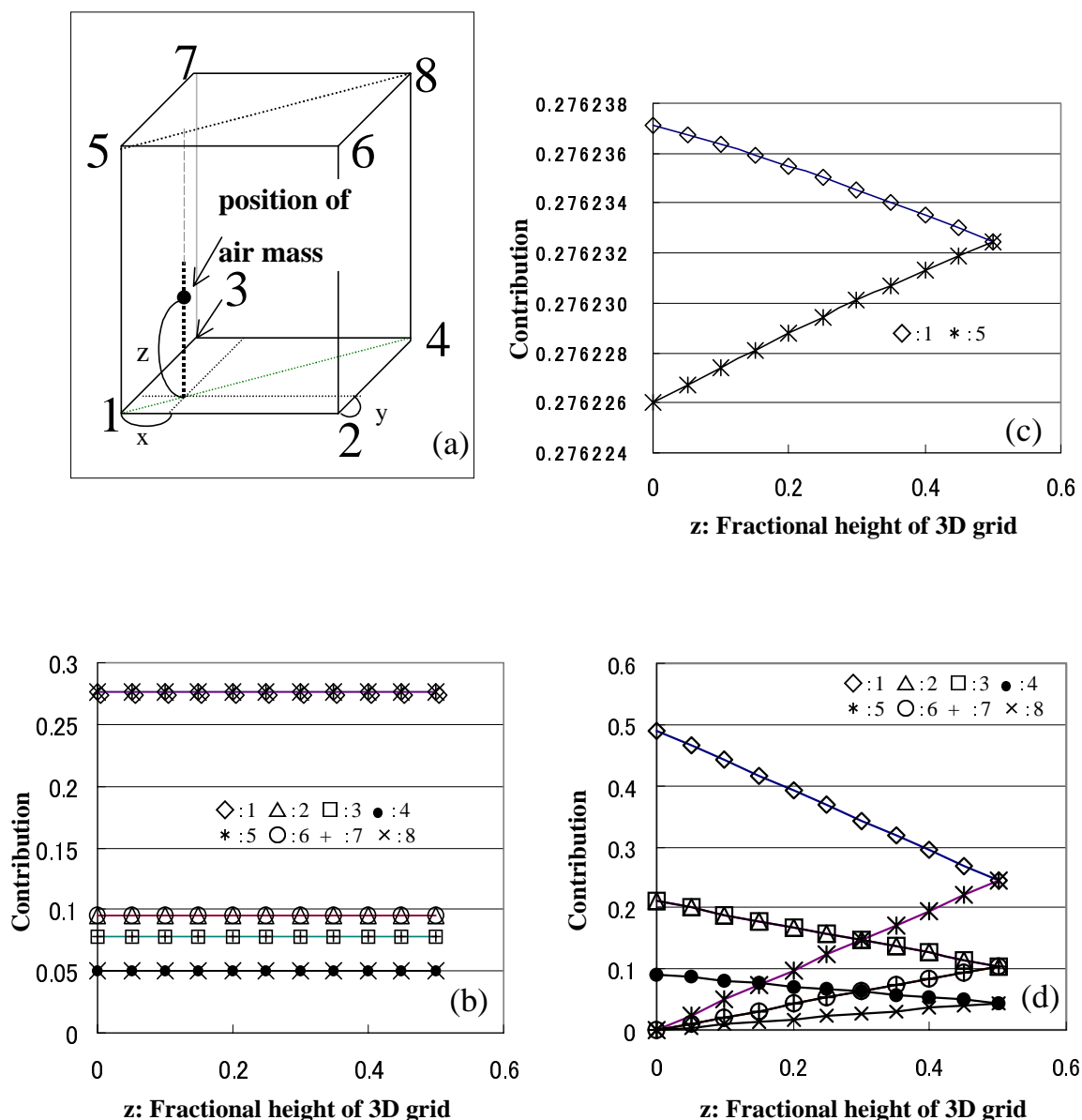


Figure 3.11 Height dependence of the contribution of lattice corner datum to the interpolated value. Contribution of each corner datum is calculated for the 3D lattice between 925hPa and 850hPa near 30 degree north. The values of 241km east-west, 277km north-south, and 700m height are used for the estimation of contribution. The position of air mass in (b) and (d) is expressed by fractional distance, normalizing the each edge length as one. (a) Number of the 8 corners and position of air mass. (b) Contribution of each corner datum to interpolated value in the weighted interpolation at $x=y=0.3$. (c) Partial expansion of (b) from 0.276224 to 0.276238 of the perpendicular axis. (d) Contribution of each corner datum to interpolated value in case of linear interpolation.

気圧面のデータの影響は受けないので補間値は必ず連続となる。なお、指定気圧面上の位置が東西に 0.3 南北に 0.3 の、西南の頂点と東北の頂点を結ぶ対角線上にあるため、頂点 2 と 3、および 6 と 7 とは対称の位置にあり、補間値に対する寄与率は当然同一になっている。線形補間は格子の内部で気象場は距離の線形に変化しているという仮定に基づき、計算の結果得られるトラジェ

クトリは距離の逆二乗の補間に比べれば滑らかで自然に見える場合が多い。しかしながら、自然界で 2.5 度の間、距離の線形で気象場が変化する保証は全く無い。

本システムの場合、積分解法と補間方法とが Table 3.1 のように固定化されており、Euler 法と Petterssen 法では距離の逆二乗の重み付け補間、4 次の Runge-Kutta 法では線形補間となっている。従ってどの方法を選ぶか、目的により検討する必要があると共に、得られた結果の解釈でも上述の補間方法の特性をよく考慮する必要がある。

3.4 温位の算出方法

気塊が温位を保存して移動すると仮定する等温位法では計算開始時或いは計算の途中で、ある位置のある時刻における温位を算出する必要が生ずる。本システムでは、温位を求めるにあたり 3.3 に述べた補間方法ではなく以下に述べる方法をとっている。また、3.1 (2)で述べたように本システムの等温位法は温位面を算出して、その温位面上を気塊が移動するという計算手順ではなく、気塊を水平に移動させてから、当該緯度・経度で、計算を開始した時点で指定した温位を示す場所を地表から上空へと探す、という方法で逐次計算を進める。そこで計算の開始時の温位算出と気塊の水平移動後の等温位位置の検索とをわけて以下に説明する。

3.4.1 計算の開始時

本システムの等温位法の計算では、出発点を経度・緯度に加えて(1)ジオポテンシャルハイトで指定する方法と、(2)温位で指定する方法の 2 つを選択できる。

(1) ジオポテンシャルハイトで指定した場合

ジオポテンシャルハイトで指定した場合、当該位置での温位は以下のように求める。

- 1) 当該経度・緯度・ジオポテンシャルハイトを含む 3 次元格子を選択する。
- 2) 上の指定気圧面と下の指定気圧面それぞれの平面格子の 4 つの頂点の温度とジオポテンシャルハイトを前後の時間の気温およびジオポテンシャルから時間の線形補間で算出する。
- 3) それぞれの指定気圧面の当該経度・緯度の温度とジオポテンシャルハイトを距離の線形補間で算出する。
- 4) それぞれの指定気圧面の当該経度・緯度の温位値を温度と圧力から式(7)により算出し、指定したジオポテンシャルハイトでの温位値をジオポテンシャルハイトの線形補間で算出する。

$$\theta_k = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{0.28} \quad (7)$$

ここに T は温度(K)、 P は圧力(Pa)である。

(2) 温位で指定した場合

温位で指定した場合、当該温位をもつ気塊の高さは以下のように求める。

- 1) 当該経度・緯度を含む各指定圧力面について平面格子の 4 つの頂点の温度とジオポテンシャルハイトを求める。
- 2) 各指定圧力面の当該経度・緯度の位置で、温度とジオポテンシャルハイトを、当該格子面の 4 つの頂点の温度とジオポテンシャルハイトから距離の線形補間により求める。
- 3) 各指定圧力面の当該経度・緯度の位置で、式(7)より温位値を算出する。
- 4) 指定した温位が含まれる格子を地表から上空へ検索する。この場合、隣接した上下の指定気圧面で、上の指定気圧面の温位値が下の指定気圧面の温位値より低い場合には、たとえその両温位値の間に指定した温位値があってもスキップする。
- 5) 上下の指定気圧面の温位値とジオポテンシャルハイトから温位の線形補間で指定した位

値のジオポテンシャルハイトを求める。

3.4.2 気塊を水平移動させた後の等温位位置の算出

前節(2)の 2)～5)と同様にして算出する。同じ温位が当該位置に見つからない場合、計算はその時点で終了する。

3.5 計算の開始と終了

トラジェクトリの計算ではデータセットに使用できるデータが存在することが前提である。

2.5 度メッシュデータと 0.5 度メッシュデータをハイブリッドして使うことは出来ない。従って 0.5 度データを用いている場合、計算はデータのある領域に限られる。このことは高さ方向、すなわち圧力方向も同じで、1000hPa 面より高圧側は計算できない。計算の開始時・中間を問わず、当該位置の気象データを求めるプロセスで 1000hPa より高圧側データが必要となる場合には計算は自動的に停止される。例えばある地点である時刻の計算開始高さとして 100m を指定した場合、もし、1000hPa が 100m 以上の高さにあれば、補間そのものがないため計算は開始されない。

このことは次節で述べる着地判定による計算停止とは異なるので留意されたい。

3.6 着地判定

ECMWF のような気象データセットでは Table 2.1 に示した全ての指定気圧面にデータがあり、地球の実際の表面とは無関係である。例えば低気圧の地域では 1000hPa のジオポテンシャルハイトはマイナスで表示され、これは、山も海もない仮想的な平均海面高さが地表面位置にあるような球として地球をとらえているといってもよい。このことはトラジェクトリの計算結果において、気塊が山脈を貫通していたり地表面から地下に潜ったりすることがありえることを意味する。

そこで本システムでは別途 ETOPO5 の 5 分メッシュの地図データを用い、計算中のトラジェクトリが接地した場合計算を停止させる機能を設けている。計算を続けるか、中止させるかは計算に先立ちユーザーが指定する。着地判定の有無は出力ファイルに記録されるので、結果の検討に際しては着地判定の採否を常に留意する必要がある。

3.7 距離

本システムの経度・緯度方向の距離は地球の半径を R とし緯度方向は式(8)で、経度方向は式(9)で求めている。経度方向・緯度方向の長さを求めたら、平面とみなして、高さ方向はジオポテンシャルハイトを用い、ピタゴラスの定理から距離を算出する。

- (1) 緯度方向の距離

$$d = 2\pi R \times \frac{|\text{緯度}A \sim \text{緯度}B|}{360} \quad (8)$$

- (2) ある緯度における経度方向の距離

$$d = 2\pi R \times \cos(|\text{緯度}|) \times \frac{|\text{経度}A \sim \text{経度}B|}{360} \quad (9)$$

緯度は北半球はプラス、南半球はマイナスでとるので絶対値記号をつけてある。

3.8 まとめ

本システムの計算の流れを Figure 3.12 にまとめる。なお、補間方法と積分解法は不可分であり、組み合わせを変えて比較することは出来ない。後述する 5 章の計算例でそれぞれの方法を逐一並べているのは、補間方法と積分解法の切り分けが出来ないため、事例として紹介せざるを得ないことにもよる。本システムのユーザーにおかれては本事情についても留意されたい。

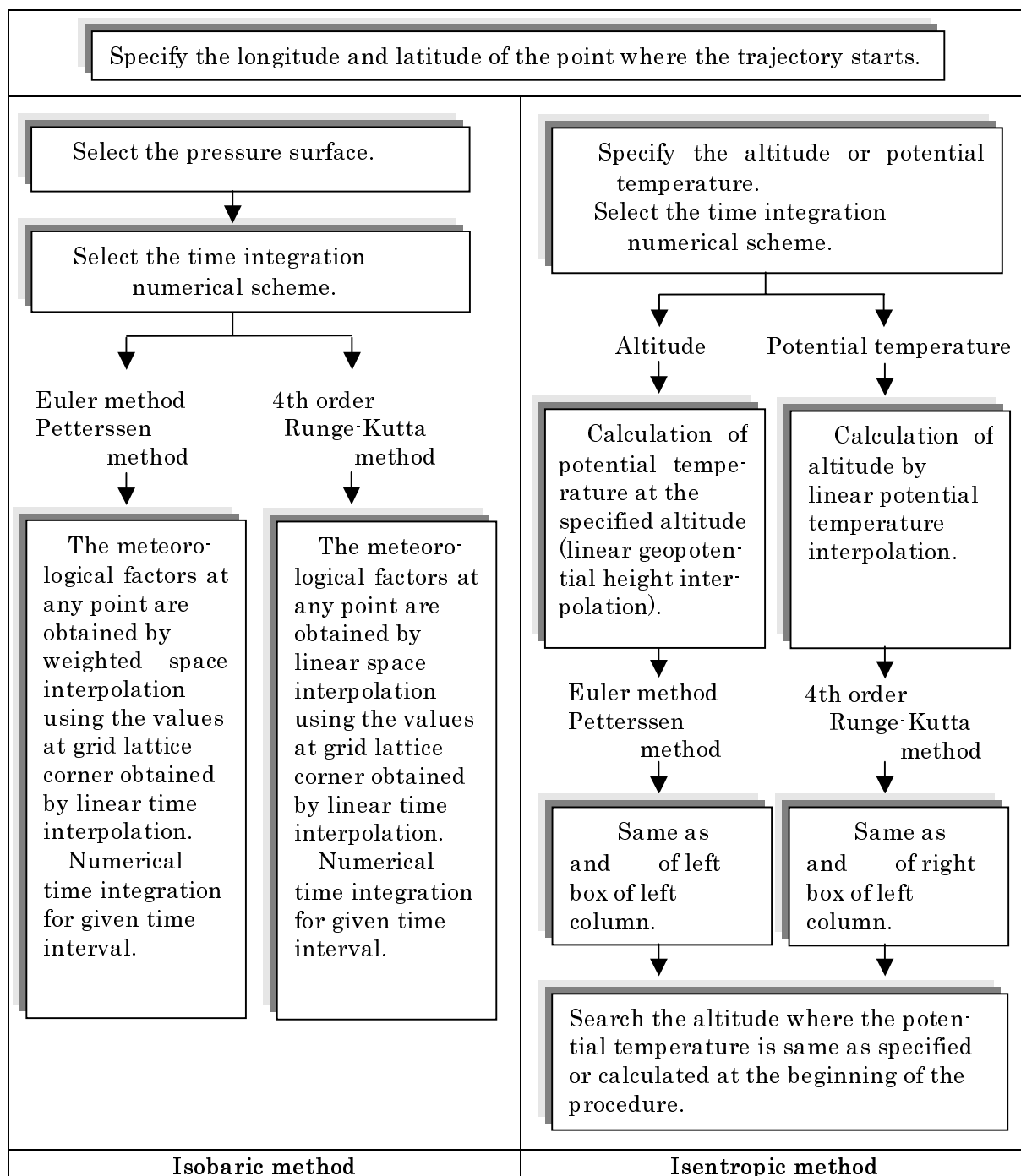


Figure 3.12 Calculation procedure for isobaric and isentropic method.