

# 論文 飛来塩分量の移流拡散解析

風間 洋\*<sup>1</sup>・山田 義智\*<sup>2</sup>

**要旨**：本研究は、海からの風により内陸部に運ばれてくる海塩粒子・海水滴中に含まれる塩化物イオン(以後、飛来塩分と称す)を移流拡散方程式を解く事により求めた。移流拡散方程式は有限要素法にて数値解析的に解いている。移流拡散方程式およびその解法については既に報告しているが、今回は、未検討であった高さ方向の飛来塩分量プロファイルや、比較的建物の密集した地域での適用性について検討した。また、建物周りで風速場が乱れ、海側面よりも内陸側面で飛来塩分量が多くなる場合があることを実測により確認し、その原因をHSMAC法により風速場を計算する事で定性的に示した。

**キーワード**：飛来塩分量，移流拡散方程式，有限要素法，HSMAC法

## 1. はじめに

海からの風により内陸部に運ばれてくる飛来塩分は、鉄筋コンクリート構造物中に浸透して蓄積し、塩害と呼ばれる鉄筋腐食に起因する劣化現象を生じさせる。塩害の原因となる鉄筋周りの塩化物イオン量を推定するためには、鉄筋コンクリート構造物が建設される場所の飛来塩分量を明らかにする必要があり、実験的研究<sup>1)</sup>あるいは解析的研究<sup>2),3),4)</sup>が行われている。

飛来塩分の発生量と海岸付近の陸上部での空間分布状況に関して、筆者の一人は、解析的に検討して文献2),3)にて報告している。しかし、文献2),3)においては、飛来塩分量の高さ方向のプロファイルを解析的に示したのみで、その妥当性の検討は行っていない。また、飛来塩分量を計算し、測定値と比較検討を行った地点は、建造物が比較的少ない環境下であった。

そこで本研究は、仲座・出口<sup>5),6)</sup>らが地上30m高さまで測定した飛来塩分量のプロファイルと文献3)で示した移流拡散解析手法による結果を比較検討し、その妥当性を確認する。また、比較的住宅の密集した沖縄県宜野湾市伊佐地区において飛来塩分量の実測と解析を行い、得られた両者の結果を比較して建物密集地での移流拡

散解析結果の有効性を確認した。

建物が密集する場合、建物周りでは風速場が複雑になる。そこで、本研究では、簡略化した2次元モデルにより建物周りの風速場を解析的に再現した。その風速場を基に、飛来塩分量の多い方位や建物部位を定性的に示し、実測結果を説明した。

## 2. 飛来塩分量の移流拡散方程式とその解法<sup>3)</sup>

今回の研究において、飛来塩分量を求める対象とした範囲は、鉄筋コンクリート構造物の塩害問題を想定し、地上0～50m、海岸からの距離0～800m程度の内陸部である。ここで、風速プロファイルは地表粗度を考慮した対数則で与えている。飛来塩分量は、移流拡散方程式を解く事で求めた。なお、移流拡散方程式は有限要素法にて離散化し、数値解析により求めた。

以下に移流拡散方程式および有限要素法の概要を記す。

### 2.1 移流拡散方程式の概要

地上からの高さ方向への乱流拡散と海塩粒子の沈降および樹木・構造物等による遮蔽効果を考慮した飛来塩分量の移流拡散方程式を式(1)に示す。

\*1 アール・アンド・エー 代表 (正会員)

\*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 博士(工学) (正会員)

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = w \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - Q \quad (1)$$

ここで、 $x$ は海岸からの距離、 $y$ は地上高さ、 $\bar{u}$ は高さ $y$ の水平方向平均風速で、対数則より式(2)で表される。 $\bar{c}$ は海塩粒子濃度の各位置における平均値である。また、 $k_y$ は垂直方向の乱流拡散係数で式(3)にて仮定した。式(2)、(3)の $u_*$ は摩擦速度を表し、式(4)で表せる。式(4)中の $U$ は、地上50mの風速で、観測風速を基に求めた。遮蔽量 $Q$ は式(5)で表される。なお、沈降速度 $w$ については次節で示す。

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{z_0} \quad (2)$$

$$k_y = \kappa u_* y \quad (3)$$

$$u_* = \frac{\kappa U}{\ln(50/z_0)} \quad (4)$$

$$Q = \gamma \bar{c} \bar{u} \quad (5)$$

ここで、式(2)、(3)、(4)に表れる $\kappa$ はカルマン定数(=0.40)である。また、式(5)の $\gamma$ は遮蔽係数であり、障害物の空間中に占める密度等で決まる値である。また、 $z_0$ は地表粗度である。

## 2.2 有限要素法と境界条件・初期条件の概要

式(1)の移流拡散方程式を有限要素法により離散化し、式(6)に示す。ここで、鉛直方向については、上流型有限要素法を用い離散化し、水平方向については、 $\theta$ 法(差分法)にて離散化した。

$$\left( \theta [K] + \frac{1}{\Delta x} [C] \right) \{ \Phi(x + \Delta x) \} = \left( -(1 - \theta) [K] + \frac{1}{\Delta x} [C] \right) \{ \Phi(x) \} + \{ F \} \quad (6)$$

ここで、 $[K]$ は海塩粒子の沈降項、乱流拡散項および障害物による塩分遮蔽項を加え合わせた行列、 $[C]$ は風速を考慮し、水平方向への海塩粒子濃度の変化を表す行列である。また、 $\{ \Phi \}$ は節点の海塩粒子濃度行列で、 $\{ F \}$ は既知のフラックス項である。

式(7)を解く際の境界条件は、地上50m位置でフラックスを0とし、地表面位置で海塩粒子濃度に沈降速度を乗じて得られるフラックスを与えた。また、海岸において海塩粒子濃度 $c$ の鉛直分

布を初期条件として与えた。ここで、海岸における海塩粒子濃度 $c$ の鉛直分布は、海岸の状況と風速により与えられ、これを式(7)に示す。式(7)における $q_0$ は海岸の海上4.5m位置で発生する飛来塩分量であり、式(8)で与えられる。式(8)中の $\alpha$ は海岸係数と称し、リーフ海岸で $\alpha = 0.196$ 、消波ブロック海岸で $\alpha = 0.795$ 、入り江砂浜海岸で $\alpha = 0.454$ の値である。 $\alpha$ の値は、海岸における実測値より与えており、その詳細は、文献3)に示されている。また、沈降速度 $w$ は式(9)で与え、初期沈降速度 $w_0$ は式(10)で与えた。

$$c = \frac{q_0}{\kappa} \exp \left( - \frac{w_0}{4.5 \kappa u_*} \ln \left( \frac{y + 4.5}{4.5} \right) \right) \quad (7)$$

$$q_0 = \alpha U^2 \quad (8)$$

$$w = w_0 e^{-\beta x} ; \beta = 0.0069 (\alpha U^2)^{0.868} \quad (9)$$

$$w_0 = 0.0642 q_0 \quad (10)$$

## 3. 飛来塩分観測地

飛来塩分の測定を行った沖縄県宜野湾市伊佐地区は、冬期に北寄りの季節風が卓越する東シナ海に面した場所である(図-1参照)。この地区の北西側を眺望した様子を写真-1に示す。この

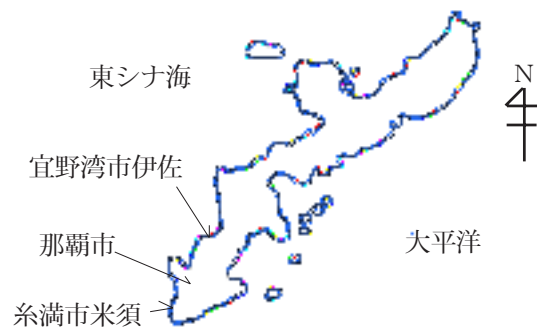


図-1 飛来塩分観測地の位置



写真-1 宜野湾市伊佐地区(北西側を望んで)



図-2 飛来塩分捕集器を設置した住宅位置



写真-2 住宅庭に設置した飛来塩分捕集器

地区では、2階建ての住宅や4～6階建てのアパート等が隣接している。また、海岸は消波ブロックが設置されている。

図-2には、飛来塩分の測定を行った住宅の位置を示す。ここでは、飛来塩分捕集器(土研式)を用いて、北西、北東、南東、南西の4方位の飛来塩分を捕集した。図中には北西側の海岸から住宅までの距離を示す。

写真-2には、住宅庭に設置した飛来塩分捕集器を示す。また、住宅屋上にも同様の捕集器を設置した(写真-3参照)。飛来塩分の測定期間は、2002年1月、2月の冬期に行った。この時期は、北よりの季節風が吹き、観測地に多くの飛来塩分をもたらす。

#### 4. 実測値と解析結果の比較

##### 4.1 飛来塩分量の高さ方向プロファイル

仲座らは、沖縄県糸満市米須(図-1参照)の海岸部と汀線から約800m内陸部の2カ所において、地表上30m高さまで飛来塩分の測定を行っ

ている。ここで、飛来塩分はガーゼ法にて捕捉し、風速は三杯式風速計を用いて測定している。

図-3では、仲座らが測定した飛来塩分量の高さ方向プロファイルと、提案する移流拡散解析による結果を比較する。図-3の縦軸は地上からの高さ(m)を示し、横軸は、プロファイルの極大値で無次元化した飛来塩分量である。ここで、図-3(a)は満潮時の汀線から20m離れた海岸部測定位置の測定結果と解析結果、図-3(b)は、干潮時の汀線から200m離れた(干潮時で潮が引き、海岸部測定位置が汀線より200m離れた)地点の測定結果と解析結果を示す。また、図-3(c)は、汀線から800m離れた地点の測定結果と解析結果を示す。

移流拡散解析において、図-3(a)(b)の海岸部では地表粗度 $z_0$ を0.001mとした。また、図-3(c)においては、海岸から測定地点までの状況を考慮して地表粗度を0.03mとし、地上4mの範囲で飛来塩分の遮蔽効果を考慮して遮蔽係数 $\gamma=0.03$ とした。風速は観測時間中の7m/sec(地

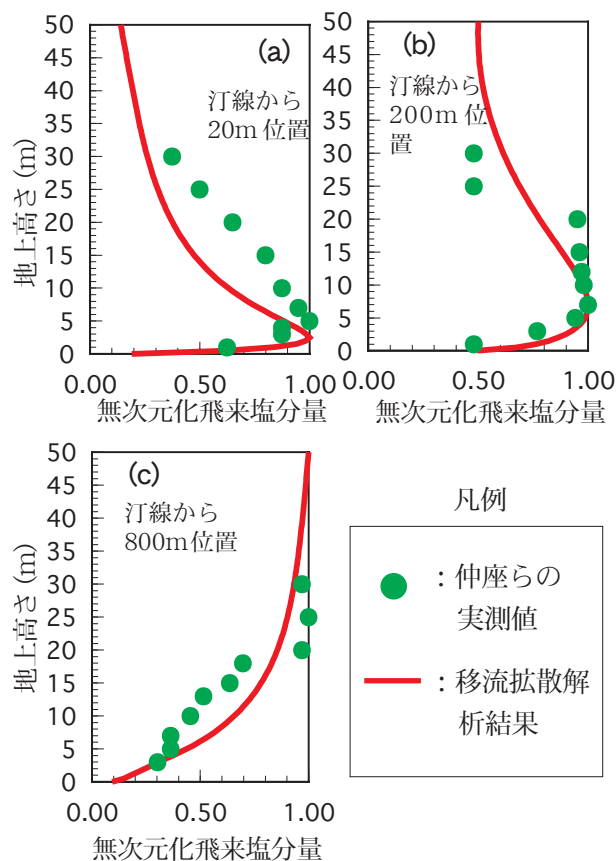


図-3 無次元化飛来塩分量プロファイル

上30m)を用い、海岸はリーフ海岸とした。なお、今回の解析においては汀線を海岸からの距離の基準とした。

図-3より、移流拡散解析結果は、実測値の高さ方向の飛来塩分量プロファイルを表現できている事がわかる。とくに、汀線から200m以内の範囲で出現しているプロファイルの極大値位置が一致している点や、800m離れた地点ではその極大値が地上30m以内で出現しない事など、実測結果を良く表している。従って、提案する移流拡散解析手法は有効であると言える。

#### 4.2 伊佐地区の実測結果と解析結果の比較

伊佐地区を対象に移流拡散解析を行い、図-4に海岸から距離別(50, 100, 300, 500m)の飛来塩分量解析結果を示す。解析条件は、消波ブロック海岸とし、伊佐地区の状況から、地表粗度0.5m、遮蔽範囲を地上6mとした。また、沖縄気象台の観測結果によれば、那覇の2002年1月の平均風速は5.8m/secである事から、この風速を用いて計算した。遮蔽係数は、この地区では建物が比較的密である事から遮蔽係数 $\gamma$ は0.06と仮定して計算した。

図-4より、海岸からの距離50mでは、地上高さ約12mの位置に飛来塩分量の極大値があるが、内陸部にいくに従ってその極大値は消滅する。また、地上15mより上空は、乱流拡散により飛来塩分量が増えている。なお、海岸から50~500m離れた位置の地上12m以内では、飛来塩分量は直線的に少なくなっている。以上の事より、この地区の3階建て以下の建物では、飛来

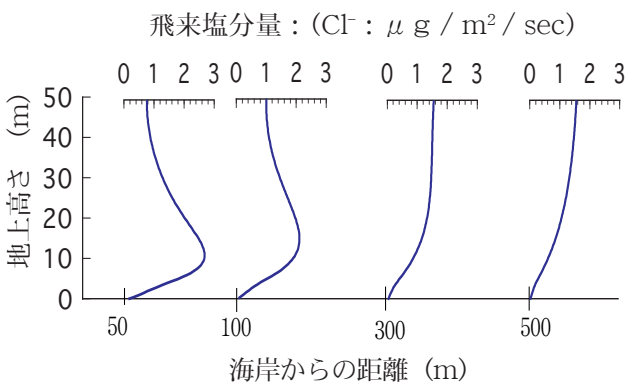


図-4 海岸からの距離別の飛来塩分量

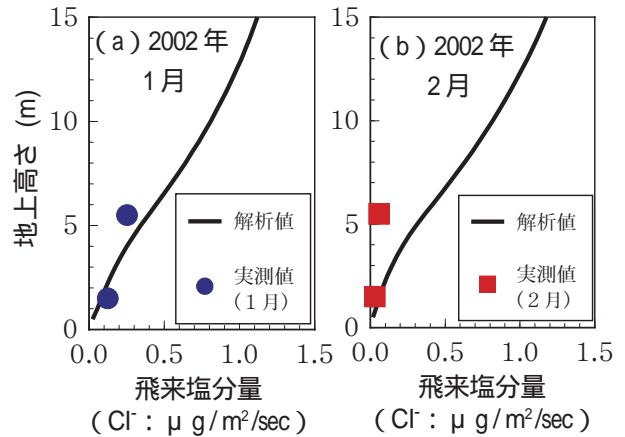


図-5 測定値と解析値の比較

塩分の影響は少ないと考えられる。

図-5には、図-4における距離300m(住宅地点)での解析結果と、2002年1月および2月の季節風が卓越した冬期における実測値とを比較して示す。実測値は住宅屋上部および庭の北西側の飛来塩分量である。ここで、1月の風速は、上述の5.8m/secを用いた。また、2月の風速は、沖縄気象台の観測結果が平均風速4.5m/secである事から、この風速を用いて計算した。図-5より、本移流拡散解析結果と実測値は、屋上部の2月分データを除いては良く一致しており、数例の比較検討ではあるが移流拡散解析手法の有効性の一端が確認される。しかし、今回は2ヶ月間の測定結果との比較のみである。従って、今後は実測データ数を増やし、信頼性を高める必要がある。

上述および4.1節の解析において、地表粗度の値は文献7)を参考として実測現場状況より仮定した。また、遮蔽係数 $\gamma$ は、文献3)で得られた値をもとに実測現場状況より仮定した。

#### 4.3 方位別飛来塩分量とHSMAC法で計算した風速場の関係

図-6に住宅2階屋上部および庭に設置した飛来塩分捕集器にて測定された、方位別の飛来塩分量データを示す。

図-6より、2階屋上部の飛来塩分量が多く、方位別では南東と南西側の飛来塩分量が多い。この地区では、北~北西側が海側であり、かつ、1月、2月の風向は北寄りの季節風が卓越する。

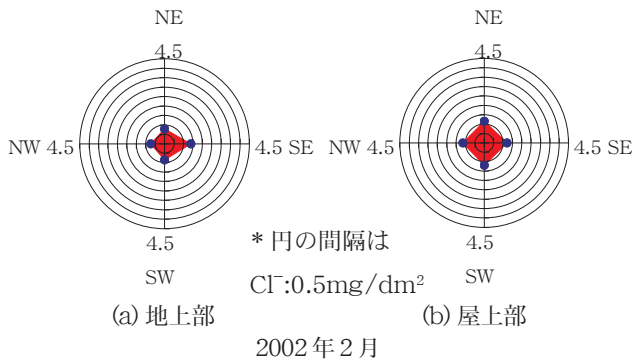
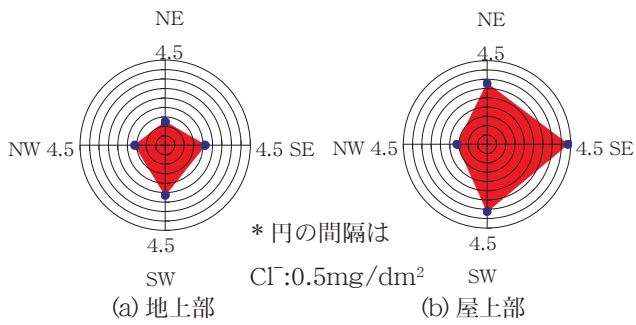


図-6 方位別の飛来塩分量



写真-3 屋上の飛来塩分捕集器（北西側を望んで）

従って、陸側に面する南東と南西側の飛来塩分量は少ないと考えられるが、実測値は逆の傾向を示している。この原因をHSMAC法を用いて建物周りの風速場を求めることで考察する。なお、HSMAC法の解析方法については文献8)に詳細に解説されており、ここでは省略する。

写真-3に住宅屋上部に設置した飛来塩分捕集器と北西側の状況を示す。写真-3で分かるように住宅の海側(北～北西側)には4階建ての建物があり、この建物により海からの風が乱される可能性がある。そこで、この4階建ての建物を考慮して、北西から南東にいたる海-陸断面を図-7に示すように簡単な2次元モデル化し、HSMAC法にて風速場を計算した。

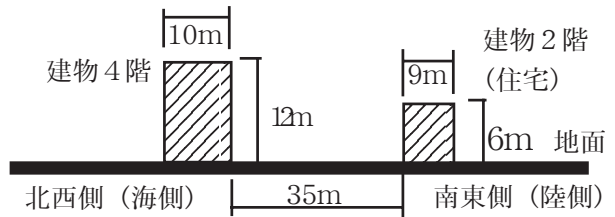


図-7 建物周りの2次元モデル

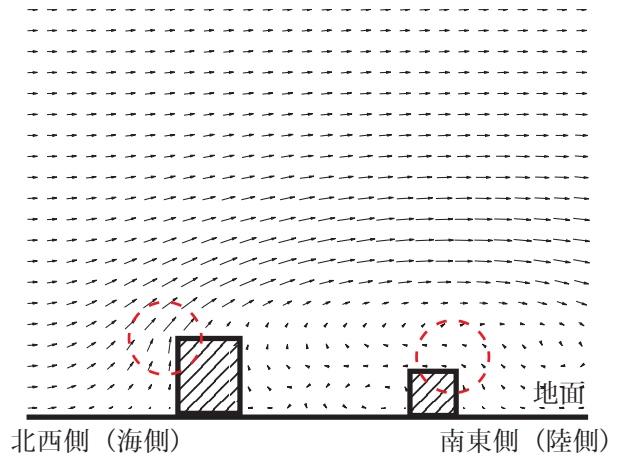


図-8 HSMAC法による風速場の計算結果

HSMAC法で得られた風速場の解析結果を図-8に示す。なお、風は図の北西側より風速5mで与え、上空および南東境界では自由流出条件とした。また、地面および建物は固着境界条件とした。図中の矢印は風速ベクトルを示している。

図-8より、前方に建物があるために住宅の屋上部および地上部では、風の渦が発生し、本来の風向と逆の風向になっている。この事が、実測値において北西側よりも南東と南西側の飛来塩分量が多くなる原因であると考えられる。

図-8より、建物屋上部の隅角部には吹き上げる風が発生する事が分かる(図中の破線丸囲み部分)。従って、その部位に張り出しスラブ等がある場合、スラブ底面には、風により飛来塩分が補給される。このスラブ底面は雨による洗い流し作用があまり期待できないと考えられるため、付着した塩分はそのほとんどがコンクリート中に浸透する可能性が高く、塩害をひき起こしやすい部位であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、移流拡散解析結果による飛来塩

分量の高さ方向プロファイルの妥当性を仲座らの実測結果と比較検討した。また、比較的建物が密集している沖縄県宜野湾市伊佐地区を対象に飛来塩分量の解析結果と実測結果を比較検討した。さらに、この地区における建物の方位別の飛来塩分量の傾向をHSMAC法により計算された風速場を用いて定性的に考察した。

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- 1) 飛来塩分量の高さ方向プロファイルについて、仲座らの実測結果と移流拡散解析結果を比較したところ、解析結果は実測値を良く表す事ができた。従って、移流拡散解析は有効である。
- 2) 宜野湾市伊佐地区の住宅を対象として、飛来塩分量の実測値と移流拡散解析結果を比較したところ、屋上部の2月分のデータを除いては、良く一致する結果を得た。但し、今回は数例の比較結果であるので、今後は比較検討例を増やし、信頼性を高める必要がある。
- 3) 宜野湾市伊佐地区の住宅においては、地上部に比べ2階屋上部の飛来塩分量が多い。また、方位別では、南東と南西側の飛来塩分量が多い。同地区は北～北西側が海側であり、かつ、1月、2月の風向は北寄りの季節風が卓越する。従って、通常は陸側に面する南東と南西側の飛来塩分量は少ないと考えられるが、実測値は逆の傾向を示した。
- 4) 宜野湾市伊佐地区の住宅周りを対象として簡単な2次元モデルを作成し、HSMAC法により建物回りの風速場を計算した。計算の結果、風速場は、住宅の屋上部および地上部で風の渦が発生し、外力として与えた風向と逆の風向になっている。この事が、実測値において北西側よりも南東と南西側の飛来塩分量が多くなった原因と考えられる。
- 5) HSMAC法により計算された風速場では、屋上部の隅角部には吹き上げる風が発生する。従って、その部位に張り出しスラブ等がある場合、スラブ底面には風によって飛来

塩分が補給される。その上、スラブ底面は雨による洗い流しがほとんど期待できないため、付着した塩分はそのほとんどがコンクリート中に浸透すると考えられ、この部位は塩害をひき起こしやすいと考えられる。

#### 謝辞：

本研究の一部は、平成13年度 科学研究補助金(基盤研究(C)(2): 課題番号 13650636, 研究代表者: 山田義智)による助成を受けた。また、琉球大学工学部助教授仲座栄三先生には、有益な御助言を頂いた。記して感謝の意を表します。

#### 参考文献：

- 1) 浜田純夫, 日野伸一, 兼行啓示, 長谷川博: 海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.85-88, 1986.
- 2) 山田義智, 大城武, 梶田佳寛, 伊部博: 海岸から飛来する塩分量の数値解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp. 945-950, 1996.
- 3) 山田義智, 大城武, 梶田佳寛: 海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 題514号, pp.21-26, 1998.12
- 4) 大城勝, 富山潤, 伊良波繁雄, 吉村忍: ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する基礎的研究, Vol.25, No.1, pp.665-669, 2003.
- 5) 仲座栄三, 津嘉山正光, 北村康司, 牧野敏明, 出口智則, 比嘉強: 台風時における大気中の海塩濃度分布に関する研究, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp.1251-1255, 1999.
- 6) 出口智則: 台風時及び海陸風時の大気中海塩粒子濃度分布特性, 琉球大学修士論文, 2001.
- 7) 竹内清秀, 近藤純正: 大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, pp.21, 1995.
- 8) 平野博之: 流れの数値計算と可視化, 丸善株式会社, 2001.