



狭域野外拡散試験データを用いた
大気拡散モデルの妥当性の検討

Verification of Atmospheric Diffusion Models with Data
of Atmospheric Diffusion Experiments

波戸 真治 本間 俊充

Shinji HATO and Toshimitsu HOMMA

安全研究センター

リスク評価・防災研究グループ

Risk Analysis and Applications Research Group
Nuclear Safety Research Center

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

狭域野外拡散試験データを用いた大気拡散モデルの妥当性の検討

日本原子力研究開発機構 安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
波戸 真治^{*}・本間 俊充

(2008年12月8日受理)

1989・1990年に筑波山周辺において狭域野外拡散試験が日本原子力研究所によって実施され、トレーサーガスの濃度分布が測定された。本研究では、この濃度分布の実測値と簡易なガウスプルームモデル、及び詳細な物理法則が考慮されている気象予報／大気拡散コードである RAMS/HYPACT による評価値を比較し、モデルの妥当性を検討した。その結果、ガウスプルームモデルの方が放出点から十数 km 程度で、気象が一定と考えられるような短時間の評価であるならば、複雑な地形であったとしても RAMS/HYPACT に比べて、実測値の濃度分布をよく再現していた。この差異は、RAMS による風速場の評価が実際の風速と異なっていることが原因だった。

Verification of Atmospheric Diffusion Models with Data of Atmospheric Diffusion
Experiments

Shinji HATO* and Toshimitsu HOMMA

Nuclear Facility Safety Research Unit,
Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 8, 2008)

The atmospheric diffusion experiments were implemented by Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) around Mount Tsukuba in 1989 and 1990, and the tracer gas concentration were monitored. In this study, the Gauss Plume Model and RAMS/HYPACT that are meteorological forecast code and atmospheric diffusion code with detailed physical law are made a comparison between monitored concentration. In conclusion, the Gauss Plume Model is better than RAM/HYPACT even complex topography if the estimation is around tens of kilometer from release point and the change in weather is constant for short time. This reason is difference of wind between RAMS and observation.

Keywords : Atmospheric Diffusion Experiments, Gauss Plume Model, RAMS/HYPACT,
Model Validation

*Research Staff on Loan

目次

1. はじめに.....	1
2. 狭域野外拡散試験の概要.....	2
2.1. 拡散試験.....	2
2.2. 特別気象観測.....	2
3. 評価モデルの概要.....	11
3.1. RAMS/HYPACT.....	11
3.1.1. RAMS.....	11
3.1.2. HYPACT.....	13
3.2. ガウスプルームモデル.....	14
4. 評価モデルによる再現計算.....	16
4.1. RAMS/HYPACT.....	16
4.1.1. 格子点上の結果に対する補間計算.....	16
4.1.2. 計算条件.....	17
4.1.3. 気象の比較.....	18
4.1.4. 濃度分布の比較.....	19
4.2. ガウスプルームモデル.....	21
4.2.1. 計算条件.....	21
4.2.2. 濃度分布の比較.....	21
5. 評価モデルの妥当性.....	79
5.1. Model Validation Kitの概要.....	79
5.2. 妥当性評価.....	81
6. まとめ.....	92
謝辞.....	93
参考文献.....	94

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of atmospheric diffusion experiments	2
2.1 Diffusion experiments	2
2.2 Meteorological observations	2
3. Overview of models	11
3.1 RAMS/HYPACT	11
3.1.1 RAMS	11
3.1.2 HYPACT	13
3.2 Gauss plume model	14
4. Reconstruct by diffusion calculation	16
4.1 RAMS/HYPACT	16
4.1.1 Interpolation of calculation results	16
4.1.2 Calculation conditions	17
4.1.3 Comparison with meteorological observations and calculations	18
4.1.4 Comparison with monitored and calculated concentration	19
4.2 Gauss plume model	21
4.2.1 Calculation conditions	21
4.2.2 Comparison with monitored and calculated concentration	21
5. Model Validation	79
5.1 Overview of Model Validation Kit	79
5.2 Validation	81
6. Conclusion	92
Acknowledgement	93
References	94

表目次

表 2-1	第 1 回 (1989) 拡散試験の放出条件	3
表 2-2	第 2 回 (1990) 拡散試験の放出条件	3
表 2-3	特別気象観測の概要	4
表 3-1	y、z方向の拡がりパラメータの係数値	15
表 4-1	RAMSの入力気象データの気象要素及び作成に利用した引用データの概要	22
表 4-2	RAMSの評価領域と評価時間	22
表 4-3	HYPACTの入力条件の概要	23
表 4-4	トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (1/16)	24
表 4-5	プルームモデルの入力条件	40
表 5-1	各拡散試験における濃度観測データ数及び 3pptより大きいデータ数	83
表 5-2	1989 年、1990 年の拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果	83
表 5-3	1989 年の各拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果	84
表 5-4	1990 年の各拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果	85

図目次

図 2-1	第 1 回 (1989) 拡散試験における筑波山付近の放出地点と全捕集地点	5
図 2-2	第 2 回 (1990) 拡散試験における筑波山付近の放出地点と全捕集地点	7
図 2-3	特別気象観測地点	9
図 4-1	点Pを含む格子空間上の要素	40
図 4-2	RAMSの 3 重格子による水平方向解析領域の設定	41
図 4-3	NCEP-DOEの再解析値とRAMSの気象場の比較	43
図 4-4	筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (1/8)	45
図 4-5	筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度とトレーサーガス放出時の気象の観測値 (1/8)	61
図 4-6	1990 年 11/12 (放出高 120m、風速 0.2m/s) の放出に対するガウスプルームモデルによる風下距離の地表面濃度	77
図 5-1	FB-NMSE曲線	86
図 5-2	MG-VG曲線	86
図 5-3	1989 年、1990 年の拡散試験の合計サンプルによるFB-NMSE図	87
図 5-4	1989 年の拡散試験の各サンプルによるFB-NMSE図 (1/2)	88
図 5-5	1990 年の拡散試験の各サンプルによるFB-NMSE図 (1/2)	90

This is a blank page.

1. はじめに

原子力発電所等の事故による周辺環境への放射性物質の放出に伴う環境影響評価には、原子力安全委員会指針集（2003）の「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」で与えられているガウスプルームモデルや日本原子力研究開発機構（以後、原子力機構と呼ぶ）で開発された OSCAAR コード（Homma et al., 2005）等がある。前者のガウスプルームモデルは、煙が風下に直線的に流されながら、ガウス分布に従って広がることを仮定したモデルであり、原子炉の安全審査（立地審査）の中で平常時及び事故時における放出放射能の大気拡散評価に使用され、世界各国の立地審査にも多く適用されている。後者の OSCAAR コードは、確率論的安全性評価（PSA : Probabilistic Safety Assessment）のレベル 3PSA 評価を目的としたもので、大気拡散モデルとして、ガウス分布型の丸い煙（パフ）が時間とともに広がりながら、時々刻々変化する風によって流されていくパフモデルを採用している。両モデルともに移流・拡散方程式のある条件下における解析解であり、濃度分布計算が容易に行える利点があるが、複雑な地形における評価が困難となっている。

これに対し、複雑地形にも対応できるような大気拡散モデルの開発が計算機・計算技術の発達や複雑な地形への評価の必要性から近年進展してきている。この場合の大気拡散モデルでは、気流の地形による変化や非定常性を考慮した計算を事前に行い、これら気流を入力として移流・拡散方程式を数値的に解くこととなる。このときの気流計算には、大別して 2 種類あり、①対象領域内にある気象観測データを取り入れ現況を解析する診断型モデルと、②観測値を初期条件として流体を支配する運動方程式、熱力学方程式等の物理方程式を数値計算により解く予報型モデルがある。診断型モデルを採用しているシステムとして、原子力事故時対応のための緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI（Imai et al., 1985）がある。予報型モデルによる評価が行えるシステムとして、米国コロラド州立大学で開発された RAMS/HYPACT (<http://www.atmet.com/>) がある。これらは複雑な地形や詳細な物理法則を考慮できる利点があるが、解析解に比べて計算時間や記憶容量等、いわゆる計算資源を多く必要とする。

以上のようなモデル評価の妥当性検証を目的とした狭域野外拡散試験（以後、拡散試験と呼ぶ）を、1989 年及び 1990 年に日本原子力研究所が実施している（林 et al., 1999a; 1999b）。本拡散試験は、筑波山周辺のおよそ 20km 四方の山谷を対象に 3 地点のいずれかからトレーサーガスを放出し、そのときの気象条件によって捕集地点を定めて濃度測定を行っている。また、山谷風を含む局地風系の日変化等拡散評価に必要な気象データを入手するために特別気象観測も実施されている。

本研究では、簡易な大気拡散評価モデルであるガウスプルームモデルと詳細な物理法則及び地形の影響が考慮できる RAMS/HYPACT による拡散試験の再現計算をそれぞれ行い、濃度分布の実測値と比較検討し、2 つのモデルの妥当性評価を行った。

2. 狭域野外拡散試験の概要

狭域野外拡散試験（林 et al., 1999a; 1999b）は、昭和 63 年度から平成 5 年度までの 6 年計画で実施された環境放射能拡散評価安全性実証試験（狭域野外拡散試験、風洞試験、及び長期放出拡散試験）の一部である。この狭域野外拡散試験は、筑波山周辺において平成元年度に第 1 回、平成 2 年度に第 2 回目が実施され、それぞれ大気拡散評価手法の安全性・妥当性を実証するのに必要な気象及び濃度分布に関するデータが取得された。

2.1. 拡散試験

第 1 回（平成元年（1989）11 月 13 日から 20 日まで）は、筑波山南方の尾根を中心に約 15km 四方の範囲を対象に、約 120m 高度の係留気球からトレーサーガス SF₆ を筑波山の東側（A 地点）及び南側（B 地点）の 2 地点から放出を行い、捕集点 173 地点の中から 62 地点を風向などから選定し捕集し濃度測定を行っている。試験回数は合計 8 回（RUN0～RUN7）実施され、この内 RAN0 は捕集地点の選定が悪かったためか検出下限値以下の測定値が大部分となっており、実質的に使用できる試験結果は RUN1 から RUN7 の 7 回となっている。各試験におけるトレーサーガスの放出は 90 分間行われ、最後の 30 分間でトレーサーガス捕集が行われている。各放出条件を表 2-1 に示し、放出地点及び全捕集地点を図 2-1 に示す。

第 2 回（平成 2 年（1990）11 月 8 日から 15 日まで）は、筑波山南方の尾根を中心に約 20km 四方の範囲を対象に、第 1 回と同様に約 120m の係留気球からトレーサーガス SF₆ を A 地点と B 地点から放出している。ただし、全 8 回のうち 1 回だけ CC 地点の高度 5m（移動車）から放出を行っている。トレーサーガスの捕集は 197 地点を設定し、そのときの風向により 72 地点が測定地点として選ばれ濃度測定が行われている。放出時間及び捕集時間は第 1 回と同様である。各放出条件を表 2-2、放出地点及び全捕集地点を図 2-2 に示す。

2.2. 特別気象観測

拡散試験と平行して、地形の起伏が気流に及ぼす影響、山谷風を含む局地風系の日変化など拡散評価に必要な気象データを入手するために特別気象観測が実施されている。特別気象観測として、以下のような項目が観測されている。

- ・ 地上気象観測
- ・ 2 地点でのレーウィンゾンテ観測による上層気温湿度と上層風向風速
- ・ 小型係留ゾンテによる放出口付近の気象観測
- ・ 風車型風向風速計による 5 地点での地上風観測
- ・ 上層気象自動観測装置（ドップラーソーダー）による 2 地点での上層風観測
- ・ 大気安定度詳細測定装置による大気安定度観測
- ・ 3 次元の超音波風向風速計による 2 地点での乱流観測（第 2 回のみ）

これら観測データの概要を表 2-3 に観測地点を図 2-3 に示す。また、その他にアメダス観測点の風向風速、館野高層気象台のデータ及び天気図が与えられている。

表 2-1 第1回(1989)拡散試験の放出条件

RUN	月日	放出時間*1)	放出方法*2)	放出地点	放出時間[分]	放出率[kg/h]
0	11/13	14:30-16:00	係留気球	B	90	30.7
1	11/14	13:00-14:30	係留気球	A	90	24.9
2	11/15	10:00-11:30	係留気球	A	90	26.7
3	11/15	14:30-16:00	係留気球	A	90	21.6
4	11/16	13:00-14:30	係留気球	A	90	26.1
5	11/17	11:00-12:30	係留気球	A	90	26.9
6	11/18	14:30-16:00	係留気球	B	90	26.8
7	11/20	14:30-16:00	係留気球	B	90	26.3

*1) 日本時間

*2) 放出高度約 120m

表 2-2 第2回(1990)拡散試験の放出条件

RUN	月日	放出時間*1)	放出方法*2)	放出地点	放出時間[分]	放出率[kg/h]
1	11/8	15:30-17:00	係留気球	B	90	16.6
2	11/9	10:30-12:00	係留気球	A	90	16.8
3	11/10	12:30-13:30	移動車	CC	60	11.1
4	11/11	20:00-21:30	係留気球	B	90	17.8
5	11/12	19:30-21:00	係留気球	B	90	17.8
6	11/13	13:30-15:00	係留気球	A	90	17.9
7	11/13	19:00-20:30	係留気球	A	90	18.0
8	11/15	11:00-12:30	係留気球	A	90	17.9

*1) 日本時間

*2) 係留気球の放出高度約 120m、移動車の放出高度 5m

表 2-3 特別気象観測の概要

観測項目	観測場所	収録気象要素
地上気象観測	小幡 (A 地点) 館 (B 地点)	天気、雲量、雲形 気温、湿度、気圧
レーウィンゾンテ観測	小幡 (A 地点) 館 (B 地点)	気圧 (第 2 回)、気温、湿度 (第 2 回)、風向、風速
小型係留ゾンテによる放出口付近の気象観測	小幡 (A 地点) 館 (B 地点) 移動車 (CC 地点)	気圧、気温、湿度、風向、風速
風車型風向風速計による地上風観測	小幡 (A、第 1 回) 吉生 (W1、第 2 回) 十三塚 (W2) 媯ヶ峰 (W2) 京成ホテル (W3) 上大島 (W5)	気温、風向、風速
ドップラーソーダーによる上層風観測	小幡 (AA 地点) 館 (BB 地点)	風向、風速、鉛直流
大気安定度詳細測定装置による大気安定度観測	館 (BB 地点)	気温、湿度、日射量、収支量、熱流量、風向、風速
3次元の超音波風向風速計による乱流観測	観測本部 (U1 地点) 筑波国際ゴルフ場 (U2 地点)	風向、風速、鉛直流

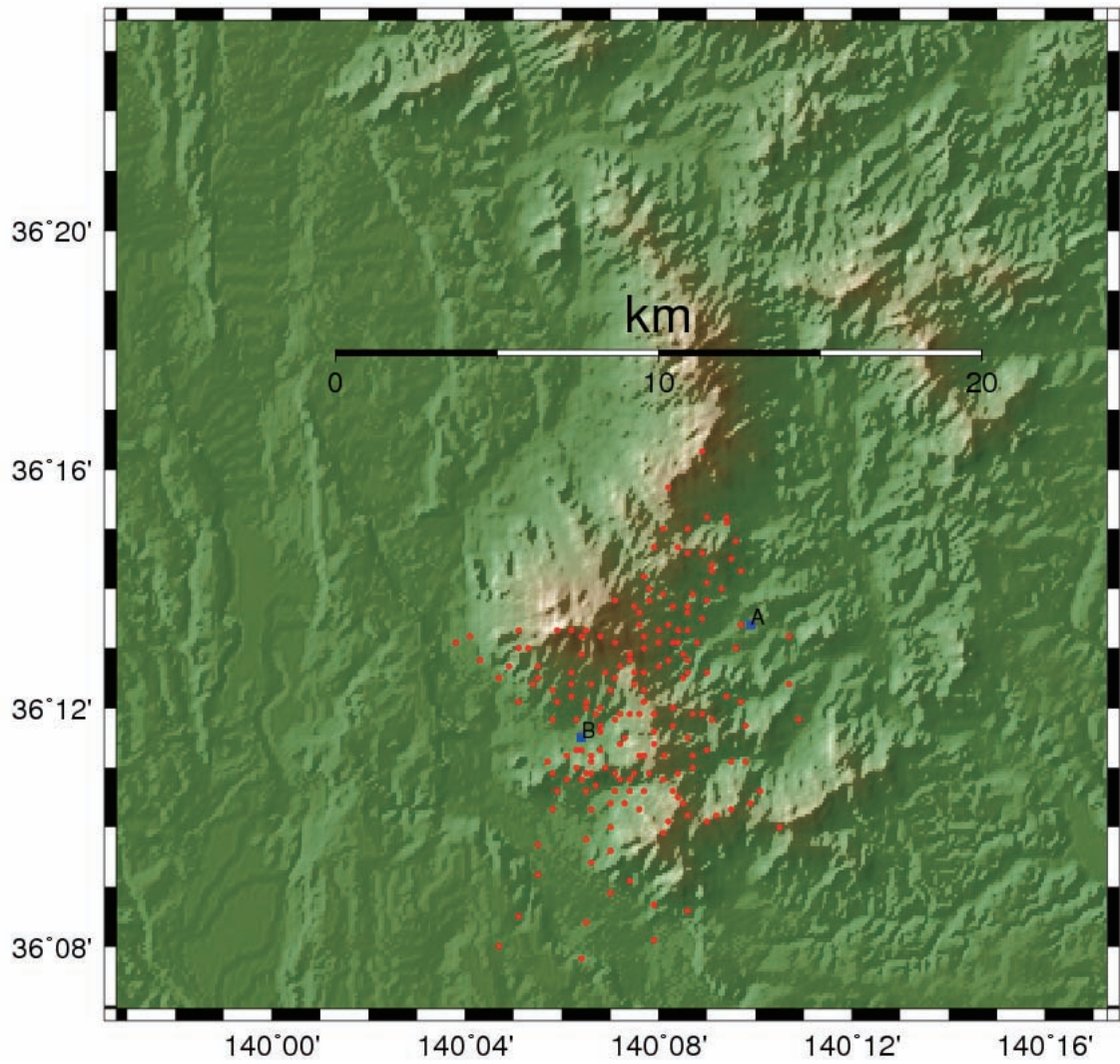


図 2-1 第 1 回 (1989) 拡散試験における筑波山付近の放出地点と全捕集地点

- : 放出地点
- : 捕集地点

This is a blank page.

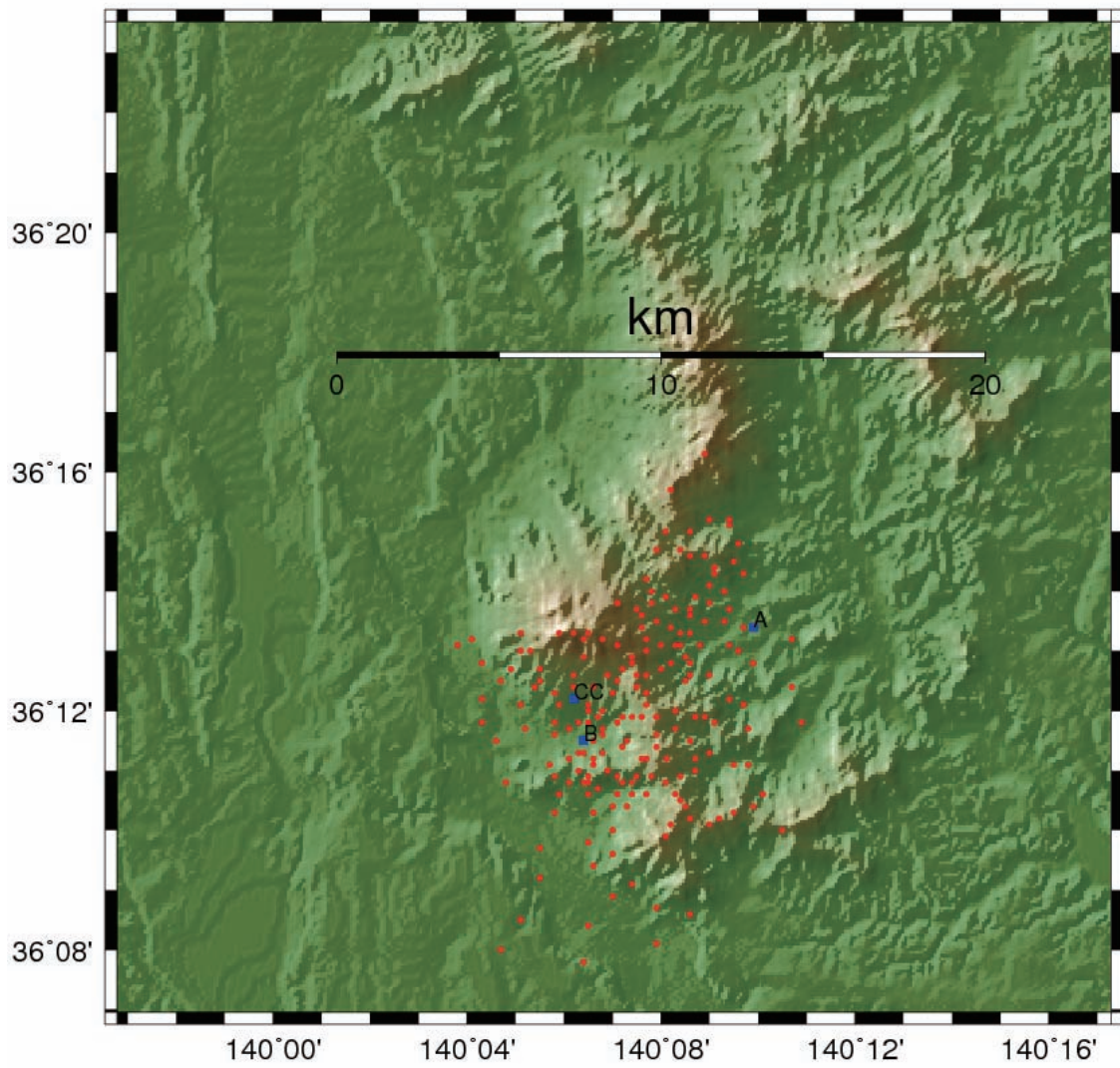


図 2-2 第 2 回 (1990) 拡散試験における筑波山付近の放出地点と全捕集地点

- : 放出地点
- : 捕集地点

This is a blank page.

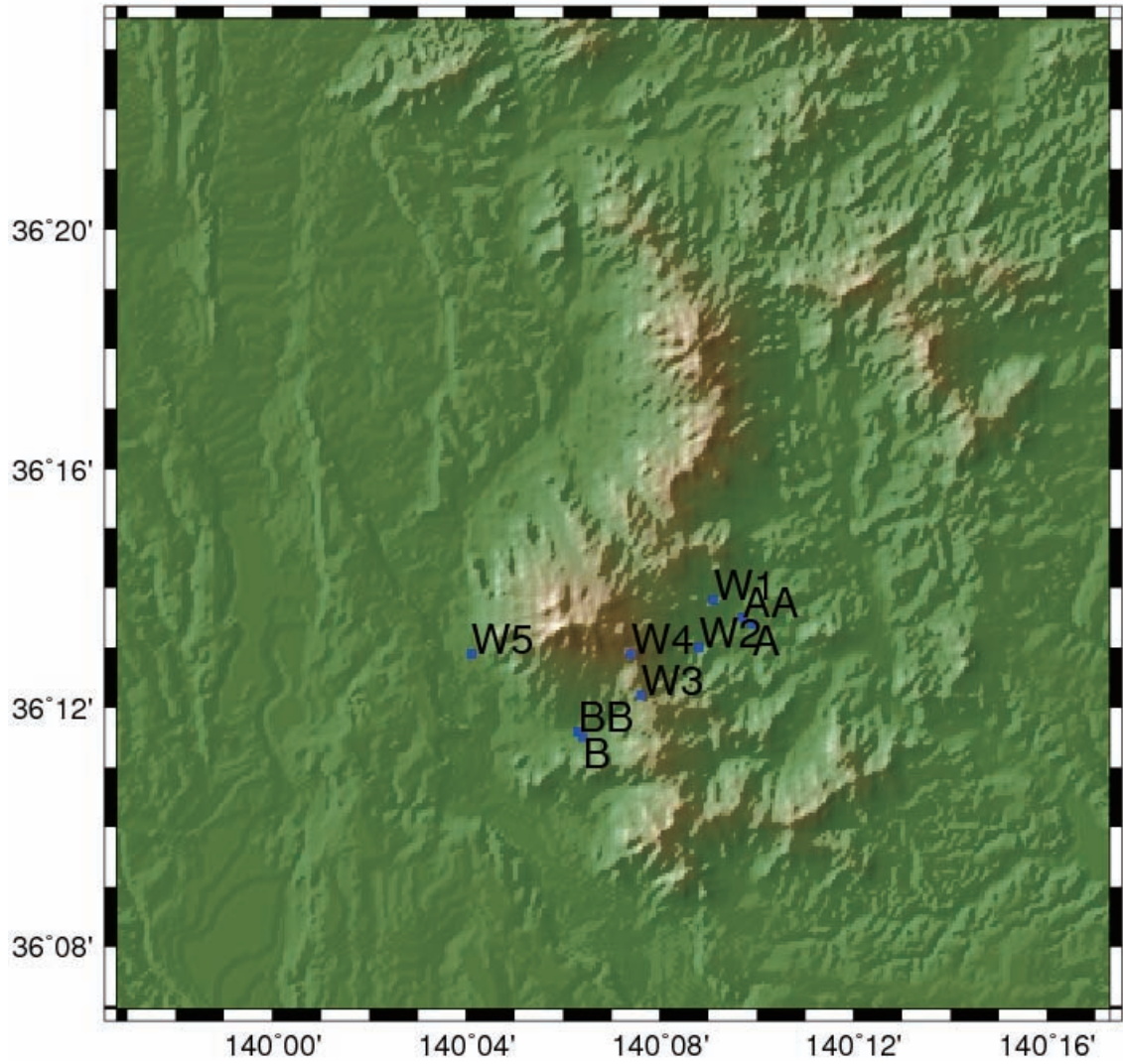


図 2-3 特別気象観測地点

This is a blank page.

3. 評価モデルの概要

評価に用いたのは、米国コロラド州立大学で開発された詳細な気象モデル及び大気拡散モデルが組み込まれている RAMS/HYPACT、及び原子力安全委員会指針集のガウスプルームモデルである。以下にそれぞれのモデルの概要を述べる。

3.1. RAMS/HYPACT

3.1.1. RAMS

RAMS はメソスケール（水平スケール 2km～2000km）の範囲を対象とした気象予報コードであり、レイノルズ平均化したプリミティブ方程式に基づいている。プリミティブ方程式は運動方程式、熱力学方程式、水混合比の連続方程式、及び質量の連続方程式から構成され、それぞれ時間と空間の偏微分方程式で記述されている。

運動方程式

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g\theta'_v}{\theta_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)\end{aligned}$$

熱力学的方程式

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad} + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{con}$$

水混合比の連続方程式

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial r_n}{\partial t} \right)_{con}$$

質量の連続方程式

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R\pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left(\frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right)$$

ここで、

u	: 東-西方向の風速成分
v	: 北-南方向の風速成分
w	: 鉛直方向の風速成分
θ	: 温位
θ_{il}	: 氷-水温位
θ_v, θ'_v	: 仮想温位
c_v	: 定積比熱
π, π'	: エクスナー関数
ρ, ρ_0	: 密度
K_m	: 運動量の渦粘性係数
K_h	: 熱と水蒸気の渦粘性係数
r_n	: 水種 n (全水、雨、雪など) の水混合比
f	: コリオリパラメータ
g	: 重力加速度
R	: 理想気体の気体定数
rad	: 放射パラメタリゼーションを示す添え字
con	: 対流パラメタリゼーションを示す添え字

なお、右下添え字「0」は大気の標準状態、右上添え字「'」は大気の標準状態からのずれを表す。

空間分解能の制限に伴うサブグリッドスケールの現象を大きな規模の現象から評価するパラメタリゼーションが RAMS では行われている。RAMS で考慮されているパラメタリゼーションは乱流混合パラメタリゼーション、地表面層パラメタリゼーション、土壌と植生パラメタリゼーション、対流パラメタリゼーション、及び放射パラメタリゼーションである。乱流混合パラメタリゼーションは、変形に基づくパラメタリゼーションと乱流運動エネルギーパラメタリゼーション (Mellor and Yamada, 1974 スキームと Deardorff, 1980 スキーム) がある。地表面層パラメタリゼーションは、大気中への熱量、運動量及び水蒸気量の地表面フラックスに対するパラメタリゼーションで、Louis (1979)のスキームが用いられている。対流パラメタリゼーションでは、簡単化された Kuo のパラメタリゼーション (Kuo, 1974; Molinari, 1985) が用いられている。放射パラメタリゼーションでは、雲の影響を考慮しないスキーム (Mahrer and Pielke, 1977) と雲の影響を考慮したスキーム (Chen and Cotton, 1983) がある。

RAMS のような気象を扱うコードでは、初期値から出発して以後の予測値が観測値等とずれていく場合があり得る。このずれを修正するために 4 次元データ同化が行われる。RAMS では 4 次元データ同化の 1 つであるナッジング (nudging) の手法 (Fast et al., 1995) が用いられている。

時間及び空間は差分法により離散化されている。空間は直方体で格子化され、スカラー

量とベクトル量の格子配置は半格子分ずらすスタカード格子 (Mesinger and Arakawa, 1976) が採用されている。また、解析領域内の格子の中にさらに格子設定ができる入れ子格子が可能である。水平方向の座標に対する地図投影法はポーラステレオ座標が使用され、鉛直方向の座標は地形に沿った座標系 (σ 座標系) が採用されている。

3.1.2. HYPACT

HYPACT は RAMS で評価された気象場を使って、オイラー法、粒子法またはそれら両方を用いたハイブリッド法により放出物質の大気中濃度を評価する。オイラー法による評価は広範囲の拡散計算に有利であるが、設定格子よりも小さな現象を評価することができない。一方、粒子法は放出点近傍の複雑な形状における拡散が評価可能であるが、放出点よりも遠方においては粒子密度が低くなり評価が困難となる。ハイブリッド法はオイラー法と粒子法の両方の利点を併せ持ち、放出近傍では粒子法で評価し、遠方の粒子密度が低いところではオイラー法で評価を行う。

HYPACT の粒子法による時刻 t における粒子位置 ($X(t), Y(t), Z(t)$) の時間変化は、次のように計算される。

$$X(t + \Delta t) = X(t) + (u + u')\Delta t$$

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + (v + v')\Delta t$$

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + (w + w' + w_p)\Delta t$$

ここで、 u , v , w は格子スケールの風速成分、 u' , v' , w' は乱流の風速成分、 w_p は外力により生じる鉛直方向の風速である。それぞれの風速成分は RAMS で評価された風速が使用される。

3.2. ガウスプルームモデル

ガウスプルームモデルは、物質が定常的に放出され、平坦な地形及び x 方向に一定な風が吹いていると仮定したとき、 y 方向（風に直角な方向）及び z 方向（鉛直方向）の濃度分布がガウス分布のように広がる定常的な濃度分布である。原点を排気塔直下とし、地表面での反射を考慮すると、濃度分布は次のように表される。

$$\chi = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot U} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad (3-1)$$

$$= Q \cdot (\chi/Q)$$

ここで、

- χ : 放出物質の空气中濃度 [g/m³]
- Q : 物質の放出率 [g/s]
- U : 放出源高さを代表する風速 [m/s]
- H : 放出源の高さ [m]
- σ_y : 濃度分布の y 方向の拡がりのパラメータ [m]
- σ_z : 濃度分布の z 方向の拡がりのパラメータ [m]
- (χ/Q) : 空气中相対濃度 [s/m³]

y 、 z 方向の拡がりパラメータは、原子力安全委員会指針集（2003）の発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針では、風下距離（ x ）と大気安定度の関数として次式のように与えられている。

$$\sigma_y = 0.67775 \cdot \theta_{0,1} \cdot (5 - \log_{10} x) \cdot x \quad (x \text{ の単位は km}) \quad (3-2)$$

$$\sigma_z = \sigma_1 \cdot x^{a_1 + a_2 \log_{10} x + a_3 (\log_{10} x)^2} \quad (x \text{ の単位は km}) \quad (3-3)$$

なお、実用上、1000m をこえる σ_z については、1000m として扱う。

表 3-1 y、z 方向の拡がりパラメータの係数値

大気 安定度	σ_y	σ_z							
		風下距離が0.2 km以遠				風下距離が0.2 km未満			
	$\theta_{0,1}$	σ_1	a1	a2	a3	σ_1	a1	a2	a3
A	50	768.1	3.9077	3.898	1.733	165	1.07	0	0
B	40	122	1.4132	0.49523	0.12772	83.7	0.894	0	0
C	30	58.1	0.8916	-0.001649	0	58	0.891	0	0
D	20	31.7	0.7626	-0.095108	0	33	0.854	0	0
E	15	22.2	0.7117	-0.12697	0	24.4	0.854	0	0
F	10	13.8	0.6582	-0.1227	0	15.5	0.822	0	0

出典：原子力安全委員会指針集（2003）

4. 評価モデルによる再現計算

狭域野外拡散試験は筑波山周辺の複雑な地形において、地形効果による気象の影響及び放出された物質の濃度分布の影響を評価するために行われた。気象観測は特別気象観測として実施され、地上気象、上層気象及び放出時の気象等が測定されている。また、トレーサーガス (SF_6) を高所から 90 分間放出して、最後の 30 分間で周辺部に配置した捕集装置で捕集し濃度測定を行っている。

本章では 2 種類の大気拡散モデルによる狭域野外拡散試験の再現計算を行う。1 つは乱流等の効果を反映したモデルが組み込まれている気象予報コード RAMS と大気拡散コード HYPACT である。RAMS では筑波山周辺における 25km 四方 (拡散試験の範囲よりも少し大きめの範囲に設定) の気象場を解析し、気象の実測値と比較を行った。HYPACT では計算した気象場に基づいてトレーサーガスの大気拡散を解析した。もう一方のモデルは大気拡散の簡易的評価に使用されるガウスプルームモデルである。入力として必要な気象条件は放出地点の風向風速及び大気安定度であり、放出時の気象の実測値を使用し拡散計算を行った。それぞれのモデルの統計的な解析による妥当性評価は 5 章に示した。

4.1. RAMS/HYPACT

4.1.1. 格子点上の結果に対する補間計算

RAMS の計算結果である気象値は、入力で設定した格子空間点上で求められる。さらに HYPACT においても RAMS で設定した格子点上に対して濃度が求められる。以降で行う実測値との比較では測定地点における値を求める必要があり、解析領域内の任意の位置における値は、以下のようにして線形補間して求めることとした。

求めたい位置 P の経度、緯度、高度を $P(\lambda, \phi, z)$ とすると、点 P を含む格子空間上の要素 (図 4-1 参照) において、各軸 i, j, k に対して次のような比率を計算する。

$$\alpha_1 = \frac{\lambda - \lambda_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_{i+1} - \lambda}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} = 1 - \alpha_1$$

$$\beta_1 = \frac{\phi - \phi_j}{\phi_{j+1} - \phi_j} \quad \beta_2 = \frac{\phi_{j+1} - \phi}{\phi_{j+1} - \phi_j} = 1 - \beta_1$$

$$\gamma_1 = \frac{z - z_k}{z_{k+1} - z_k} \quad \gamma_2 = \frac{z_{k+1} - z}{z_{k+1} - z_k} = 1 - \gamma_1$$

そうすると、これら比率から 8 つの格子点上の重みは次のようになる。

格子点	重み
i, j, k	$\alpha_2 \times \beta_2 \times \gamma_2$
i+1, j, k	$\alpha_1 \times \beta_2 \times \gamma_2$
i, j+1, k	$\alpha_2 \times \beta_1 \times \gamma_2$
i+1, j+1, k	$\alpha_1 \times \beta_1 \times \gamma_2$
i, j, k+1	$\alpha_2 \times \beta_2 \times \gamma_1$
i+1, j, k+1	$\alpha_1 \times \beta_2 \times \gamma_1$
i, j+1, k+1	$\alpha_2 \times \beta_1 \times \gamma_1$
i+1, j+1, k+1	$\alpha_1 \times \beta_1 \times \gamma_1$
合計	1.0

このとき、8 つの格子点上の値 ψ に対する点 P 上の線形補間値は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \psi(P) = & \alpha_2 \beta_2 \gamma_2 \psi_{i,j,k} + \alpha_1 \beta_2 \gamma_2 \psi_{i+1,j,k} + \alpha_2 \beta_1 \gamma_2 \psi_{i,j+1,k} + \alpha_1 \beta_1 \gamma_2 \psi_{i+1,j+1,k} \\ & + \alpha_2 \beta_2 \gamma_1 \psi_{i,j,k+1} + \alpha_1 \beta_2 \gamma_1 \psi_{i+1,j,k+1} + \alpha_2 \beta_1 \gamma_1 \psi_{i,j+1,k+1} + \alpha_1 \beta_1 \gamma_1 \psi_{i+1,j+1,k+1} \end{aligned} \quad (4-1)$$

4.1.2. 計算条件

(1) RAMS

RAMSの入力気象条件として必要となるのは、①等気圧面格子データ、②上層の観測データ、及び③地表面の観測データである。この中で②と③は無くてもよいが、①は必ず必要なデータである。等気圧面格子データは、米国環境予測センター (NCEP) の長期再解析データを使用した。この再解析データは、予報値に観測値を同化させた解析値で全球に対して作成されており、NCEP/NCAR¹版 (解析開始 1948 年～、Kalnay et al., 1996) と NCEP/DOE²版 (解析開始 1979 年～、Kanamitsu et al., 2002) の 2 種類がある。なお、NCEP/DOEはNCEP/NCARの更新版である。本再現計算では評価年月日に対応するNCEP/DOEのGRIB形式のファイルで配布されているpgb.198911 及びpgb.199011 を使用した。解像度は水平方向 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (144×73)、鉛直レベル 17 で、時間間隔は 6 時間である。また、上層の観測データは拡散試験のデータから作成し、地表面の観測データは拡散試験のデータ及び気象庁の地上気象観測原簿過去データを基に作成した。上記 3 種類の入力気象データの気象要素及び作成に利用したデータの概要を表 4-1 に示す。

水平方向の座標系は、RAMSで地図投影法として指定されているポーラステレオ座標系である。水平方向の格子は、入力気象として全球の再解析データを使用するため、解析対象の筑波山周辺部よりも広くし、3 重格子により対象範囲を絞ることとした (図 4-2 参照)。鉛直方向の格子は、地表面付近の気象変化が大きいため、地表面付近で狭く上層に行くにしたがって広がるようにした。また再現計算の開始時間は、拡散試験の最初の放出時よりも 3 日前から開始するようにした。評価領域と時間の概要を表 4-2 に示す。

¹ NCAR : 米国大気研究センター

² DOE : 米国エネルギー省

RAMS の地形データの標高は、一番外側の格子 1 及びその内部の格子 2 それぞれに関して、RAMS 開発元で公開されている解像度約 20km 及び約 1km の全球のデータを使用した。最も内側にある格子 3 に関しては、財団法人 日本地図センターから発売されている数値地図 50m メッシュの対象領域のデータから作成した。

その他必要となるデータは、海水面温度データ、土地利用データ、及び微物理データである。それぞれ RAMS 開発元で公開されているデータを使用した。なお、海水面温度データの解像度は約 100km で、土地利用データの解像度は約 1km である。

(2) HYPACT

HYPACT の大気拡散計算を行うのに必要な気象場は RAMS の結果が使用され、HYPACT での乱流拡散は RAMS で計算された水平方向と鉛直方向の乱流混合係数を用いて行われる。HYPACT の大気拡散評価は、オイラー法、粒子法またはハイブリッド法のいずれかが選択できる。本再現計算では、複雑な地形における比較的狭い範囲（約 25km 四方）内の評価を目的とするため、粒子法による評価とした。

評価領域は RAMS で設定した格子 3（約 25km 四方）とし、トレーサーガス SF₆（分子量 146.05）を 15 秒毎に 2000 個放出するようにした。15 秒は HYPACT の粒子位置更新の時間間隔でもある。放出地点、放出条件等を表 4-3 に示す。HYPACT では世界標準時で入力する必要があるため、放出開始日時を日本標準時から世界標準時に変換した時刻も表に示した。結果出力時間間隔の 2 分は計算された濃度分布等をファイルに出力する時間間隔であり、後で 30 分間の平均濃度を計算するのに使用した。

4.1.3. 気象の比較

RAMS で計算された気象場に対して、NCEP/DOE の再解析値及び拡散試験の実測値と比較し、RAMS はどの程度気象場を再現できるのかを確かめた。

(1) 再解析値と RAMS の計算値

RAMS の入力である等気圧面格子データは再解析値を基に作成した。この等気圧面格子データ及びその他の気象データから RAMS の一部の ISAN (ISentropic ANalysis) パッケージによって、varfile (variable initialization files) が等気圧面格子データの時間（つまり、再解析の時間）毎に作成される。このファイルは初期条件及び境界条件に使用され、データ同化にも使用される。

これらのことから計算開始後、RAMS の結果が再解析値とどの程度違いが現れるのかを確認するために、1989 年 11 月 14 日の気象値の比較を行った（RAMS の計算開始は 1989/11/10 00:00UTC である）。格子 1 の気圧 1000mb における風速と気温の比較を図 4-3 に示す。00:00 の南東部の南風、06:00 の南東部の北東風が再現されており、気温については北西部が低く、南東部が高い傾向が一致している。風速及び気温共に RAMS の解像度の方が高いために木曾山脈による影響が現れている。

(2) 放出地点の気象観測値と RAMS の計算値

拡散試験の特別気象観測ではいくつかの地点で地上気象や高層気象が観測されており、放出地点におけるトレーサーガス放出時の気象も観測されている。トレーサーガスの風に乗った輸送では、放出地点における風向風速が大きく影響すると考えられる。このためト

レーザーガス放出時の気象と RAMS で評価した同地点の気象を比較した。

第 1 回 (1989) 及び第 2 回 (1990) の合計 16 回の拡散試験に対する比較を表 4-4 に示す。同表中の $\cos(\theta)$ は、観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦で、風向の一致度を表す。風向風速の平均は東西成分及び南北成分を平均し、それを風向風速に変換した値である。なす角の余弦に着目すると 1989 年 11 月 14 日、18 日、20 日、1990 年 11 月では 8 日、11 日、13 日 (13:30 放出)、15 日の余弦はおおよそゼロまたはゼロより小さくなっており、風向の一致度が悪い。また平均風速がファクタ 2 以上の違っているのは 1989 年 11 月 13 日、16 日、1990 年 11 月 10 日、12 日、13 日 (19:00 放出) である。

4.1.4. 濃度分布の比較

拡散試験におけるトレーサーガスの濃度観測は、3 地点の中の 1 ヶ所から 90 分間 (1990/11/10 だけ 60 分間) 放出し、そのときの気象条件から観測地点を決めて、終わりの 30 分間で捕集し濃度を求めている。RAMS/HYPACT では同じ期間放出し、2 分間隔で格子点上の濃度を出力し、放出終了前の 30 分間の出力結果を平均して濃度を求めた。また、RAMS/HYPACT の濃度単位は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であるが、観測値の単位は ppt である。このため次のようにして濃度の単位変換を行った。

$$[\text{ppt}] = [\mu\text{g}/\text{m}^3] \times \frac{22.4}{M} \times 10^3 \quad (4-2)$$

ここで、

22.4	: 標準状態 (0°C、1 気圧) における 1 モル当りの理想気体の体積 [l/mol]
M	: 分子量 [g/mol] (SF ₆ の場合の分子量 146.05)
10 ³	: 単位変換係数

各拡散試験の観測地点の濃度分布、及び RAMS/HYPACT による地上における捕集期間内の平均濃度の等値線を図 4-4 に地形図と共に示した。同図の中央部分の山が筑波山 (標高 867m) である。それぞれの記号は○が検出下限値の 3ppt 以下、■が 3ppt より大きく 10ppt 以下、▲が 10ppt より大きく 100ppt 以下、◆が 100ppt より大きく 1000ppt 以下、★が 1000ppt より大きい観測地点を表す。等値線は内側から 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt を表す。さらにそのときの風向きを知るために、濃度分布図の下に地上 100m における放出期間内の平均風速をベクトルで示した。

図 4-4 から RAMS/HYPACT の濃度分布は、ほぼ平均風速の方向に流れているのがわかる。例えば 1989/11/14 の結果は、RAMS/HYPACT の風向は北風であるが、トレーサー放出時の気象は東風 (表 4-4 (2/16) 参照) である。RAMS/HYPACT の濃度分布は放出地点から南側、観測の濃度分布では西側に現れている。このことから放出地点における風向が濃度分布に大きく影響すると考えられる。また RAMS/HYPACT の評価では、RAMS による風速場の予測が現実とかけ離れている場合には HYPACT による濃度予測がうまくいかないことが示唆される。

なお、観測地点の測定濃度と RAMS/HYPACT による同地点の濃度の統計的な評価は、5 章に示した。

This is a blank page.

4.2. ガウスプルームモデル

4.2.1. 計算条件

ガウスプルームモデルの入力として必要な気象条件は、放出地点の風向、風速及び大気安定度である。風向及び風速は、実測値であるトレーサー放出時の気象（表 4-4 参照）の平均値を使用した。大気安定度は林 et al. (1999a; 1999b) の図 3-1-1 試験実施状況で与えられている値を使用した。なお、1990 年 11/11 20:00、11/12 19:30、11/13 19:00 に関しては、大気安定度が与えられていない。このため原子力安全委員会指針集（2003）の発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針の第 3 表 大気安定度分類表を使用し、平均風速と林 et al. (1999b) の表 3-11-19 大気安定度測定装置観測結果表に与えられている放射収支量から判断した。放出期間内の気象条件及び放出高さを表 4-5 に示す。

4.2.2. 濃度分布の比較

ガウスプルームモデルは、気象条件及び放出率が定常かつ地形が平坦な場合の大気拡散を評価するモデルである。今の場合、気象条件は時間的及び空間的に変動し、また筑波山周辺の複雑な地形を対象にしているが、近似的にガウスプルームモデルによる評価を行っていることに注意する。

拡散試験で実測されたトレーサーガスの濃度分布及びガウスプルームモデルによる濃度の等値線を筑波山周辺の地形と共に描いた図を 図 4-5 に示す。またガウスプルームモデルを評価するときに使用した平均風向風速と大気安定度、トレーサーガス放出時の気象も濃度分布図の下部に表で示した。

図 4-5 から高濃度となっている観測地点の分布とプルームの流れていく方向は、ほぼ一致している。ただし、1989 年 11/13、1990 年 11/08、11/11、11/12、11/13 (19:00) を除く。1989 年 11/13、1990 年 11/08 及び 11/13 (19:00) は、観測値の大部分が検出下限値の 3ppt 以下であり、観測地点の配置が適切でなかった拡散試験である。1990 年 11/11、11/12、11/13 (19:00) はトレーサーガス放出時の気象を見ると、ほとんど静穏風となっている。静穏風はほとんど風がない状態で、放出された物質は放出地点近傍で拡がる。ガウスプルームモデルは一方向に風が定常に流れている状態を仮定しているため、静穏風では適用できない。また、この 1990 年における 3 期間の大気安定度は F であり、大気が安定となっている。この場合ガウスプルームモデルでは、排気塔から放出された物質が地表面に到達するのは他の大気安定度に比べて遠方になる。例えば、1990 年 11/12 の放出に対する各大気安定度の風下距離の地表面濃度を 図 4-6 に示す。大気安定度 F で 3ppt 以上になるのは、放出地点から約 2.5km 以上からである。この距離では、その他の大気安定度はすでに 1000ppt を越えている。このことが 1990 年 11/12 の等値線図で放出地点近傍の高濃度観測地点がガウスプルームモデルで捕らえられていない原因である。

放出地点から十数 km 程度で気象が一定となっているような短時間の評価の場合、放出物質の流れる方向は放出地点の風向風速に支配されるため、複雑な地形であったとしてもガウスプルームモデルによる評価がよい近似を与えると考えられる。次の 5 章では統計的な解析を行い、定量的にモデルの妥当性評価を行う。

表 4-1 RAMS の入力気象データの気象要素及び作成に利用した引用データの概要

RAMS 入力 気象データ	気象要素	作成に利用したデータ
等気圧面の格子データ	水平等間隔格子、鉛直気圧[mb]レベルに対する各時間の ・ 東西風速成分[m/s] ・ 南北風速成分[m/s] ・ 気温[K] ・ ジオポテンシャル高度[m] ・ 相対湿度[fraction]	米国環境予測センター（NCEP）の長期再解析データ（NCEP/DOE版）の1989年11月及び1990年11月
上層の観測データ	各観測地点における各時間の気圧[Pa]に対するデータ ・ ジオポテンシャル高度[m] ・ 気温[°C] ・ 相対湿度[fraction] 高度[m]に対するデータ ・ 風速[m/s] ・ 風向[deg]	狭域野外拡散試験のデータ ・ 上層風（レーボール）観測表 ・ トレーサーガス放出時の気象 ・ 高層気象観測表
地表面の観測データ	各観測地点における各時間の ・ 風速[m/s] ・ 風向[deg] ・ 気温[°C] ・ 露点温度[°C] ・ 気圧[Pa]	気象庁の地上気象観測原簿過去データ 及び 狭域野外拡散試験のデータ ・ 地上気象観測表 ・ 地上風向風速及び地表面温度観測表 ・ アメダス風向風速観測表

表 4-2 RAMS の評価領域と評価時間

項目	条件
地図投影	ポールーステレオ座標 (極：北緯 36.2009 度、東経 140.1225 度)
格子空間	格子 1 21×21×30 (水平解像度 60km)
	格子 2 22×22×30 (水平解像度 6km)
	格子 3 50×50×30 (水平解像度 0.5km)
格子中心	北緯 36.2009 度、東経 140.1225 度 (3 格子共通)
鉛直方向	最下層の間隔を 100m、これより上層の間隔 100×1.15 ⁿ (n=1…)、間隔が 1200m を超えると以後間隔を 1200m とする。 地上から最上面の幅 19583.6[m]
評価時間	第 1 回 1989/11/10 00:00(UTC)～1989/11/21 00:00(UTC) (11 日間)
	第 2 回 1990/11/05 00:00(UTC)～1990/11/16 00:00(UTC) (11 日間)
気象場出力時間間隔	10 分

表 4-3 HYPACT の入力条件の概要

項目	内容			
放出地点	地点 A : (140.1650° E, 36.2233° N) 放出高 120m			
	地点 B : (140.1067° E, 36.1917° N) 放出高 120m			
	地点 CC : (140.1033° E, 36.2033° N) 放出高 5m			
放出物質	SF ₆ (分子量 146.05)			
放出条件	地点	開始日時	率[kg/h]	放出[h]
	B	89/11/13 14:30(JST)05:30(UTC)	30.7	90
	A	89/11/14 13:00(JST)04:00(UTC)	24.9	90
	A	89/11/15 10:00(JST)01:00(UTC)	26.7	90
	A	89/11/15 14:30(JST)05:30(UTC)	21.6	90
	A	89/11/16 13:00(JST)04:00(UTC)	26.1	90
	A	89/11/17 11:00(JST)02:00(UTC)	26.9	90
	B	89/11/18 14:30(JST)05:30(UTC)	26.8	90
	B	89/11/20 14:30(JST)05:30(UTC)	26.3	90
	B	90/11/08 15:30(JST)06:30(UTC)	16.6	90
	A	90/11/09 10:30(JST)01:30(UTC)	16.8	90
	CC	90/11/10 12:30(JST)03:30(UTC)	11.1	60
	B	90/11/11 20:00(JST)11:00(UTC)	17.8	90
	B	90/11/12 19:30(JST)10:30(UTC)	17.8	90
	A	90/11/13 13:30(JST)04:30(UTC)	17.9	90
	A	90/11/13 19:00(JST)10:00(UTC)	18.0	90
A	90/11/15 11:00(JST)02:00(UTC)	17.9	90	
拡散計算更新時間	15 秒			
評価法	粒子法 (15 秒毎に 2000 個放出)			
結果出力時間間隔	2 分			

(注意) JST : 日本標準時、UTC 世界標準時。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象と RAMS 計算値の比較 (1/16)

1989/11/13 放出 : B 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
14:40	103	1000.4	18.4	78	ESE	106	2.1
14:50	96	1001.1	18.3	79	ESE	103	3.6
15:00	94	1001.3	18.3	79	E	100	4.1
15:10	95	1001.2	18.2	80	ESE	111	2.2
15:20	92	1001.4	18.2	81	ESE	103	2.1
15:30	93	1001.2	18.4	80	ESE	103	2.1
15:40	89	1001.4	18.6	79	ESE	108	2.3
15:50	90	1001.4	18.6	79	ESE	106	2.0
16:00	92	1001.1	18.7	78	E	98	1.7
平均	—	1001.2	18.4	79	ESE	104	2.5

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
14:40	103	1001.1	16.3	77	E	97	4.7	0.987
14:50	96	1001.8	16.4	77	E	94	5.0	0.987
15:00	94	1001.9	16.5	77	E	95	5.1	0.996
15:10	95	1001.6	16.5	78	E	97	5.2	0.971
15:20	92	1001.7	16.6	78	E	97	5.3	0.995
15:30	93	1001.5	16.6	78	E	99	5.4	0.997
15:40	89	1001.8	16.6	78	E	98	5.4	0.985
15:50	90	1001.5	16.7	79	E	100	5.6	0.994
16:00	92	1001.1	16.7	79	ESE	102	5.7	0.997
平均	—	1001.5	16.5	78	E	98	5.3	0.994

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (2/16)

1989/11/14 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
13:10	112	1001.3	13.3	57	E	84	4.3
13:20	110	1001.6	13.2	57	E	92	4.4
13:30	114	1001.5	13.1	57	E	98	4.0
13:40	114	1001.5	13.1	57	E	101	4.2
13:50	115	1001.6	13.1	56	E	101	3.8
14:00	117	1001.5	13.1	56	ESE	103	4.1
14:10	119	1001.4	13.0	57	E	101	4.3
14:20	114	1002.0	13.0	55	E	97	5.2
14:30	114	1002.1	13.0	53	E	88	5.8
平均	—	1001.6	13.1	56	E	96	4.4

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
13:10	112	1001.1	15.9	42	N	360	7.7	0.099
13:20	110	1001.5	15.9	42	N	360	7.7	-0.039
13:30	114	1001.1	15.7	42	N	360	7.8	-0.143
13:40	114	1001.1	15.6	42	N	360	7.9	-0.192
13:50	115	1001.1	15.5	42	N	0	8.0	-0.189
14:00	117	1000.9	15.3	42	N	0	8.1	-0.219
14:10	119	1000.8	15.2	42	N	1	8.3	-0.179
14:20	114	1001.4	15.1	42	N	1	8.3	-0.102
14:30	114	1001.5	14.9	42	N	2	8.4	0.063
平均	—	1001.2	15.5	42	N	0	8.0	-0.093

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (3/16)

1989/11/15 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
10:10	88	1013.9	8.6	54	NE	54	5.0
10:20	92	1013.7	8.7	55	NE	55	5.0
10:30	90	1013.8	9.0	55	NE	54	5.0
10:40	91	1013.7	8.9	55	ENE	67	5.6
10:50	92	1013.6	9.0	54	ENE	77	5.1
11:00	91	1013.6	9.0	54	ENE	68	5.2
11:10	87	1013.9	9.2	55	E	81	5.8
11:20	88	1013.8	9.0	54	ENE	61	5.3
11:30	85	1013.9	9.0	53	NE	56	4.9
平均	—	1013.8	8.9	54	ENE	64	5.1

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
10:10	88	1012.3	8.4	58	NNE	27	6.4	0.888
10:20	92	1011.8	8.6	58	NNE	30	6.4	0.903
10:30	90	1012.0	8.8	57	NNE	32	6.4	0.927
10:40	91	1011.9	9.0	56	NE	34	6.5	0.840
10:50	92	1011.7	9.2	56	NE	36	6.5	0.752
11:00	91	1011.7	9.4	55	NE	37	6.5	0.857
11:10	87	1012.2	9.6	54	NE	38	6.5	0.735
11:20	88	1012.0	9.8	54	NE	40	6.5	0.931
11:30	85	1012.3	10.0	53	NE	41	6.5	0.966
平均	—	1012.0	9.2	56	NE	35	6.5	0.874

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (4/16)

1989/11/15 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
14:40	89	1012.2	9.4	58	NE	56	4.8
14:50	93	1011.8	9.3	59	ENE	70	5.1
15:00	90	1012.1	9.1	60	ENE	65	5.8
15:10	88	1012.3	9.0	62	ENE	67	5.1
15:20	94	1011.7	8.9	63	E	84	5.1
15:30	106	1010.4	8.9	64	E	83	5.0
15:40	107	1010.2	8.9	64	ENE	76	3.7
15:50	110	1009.9	8.9	65	ENE	73	3.4
16:00	108	1010.1	8.8	65	ENE	74	4.8
平均	—	1011.2	9.0	62	ENE	72	4.7

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
14:40	89	1010.9	11.6	49	ENE	58	6.1	0.999
14:50	93	1010.4	11.6	50	ENE	59	6.1	0.980
15:00	90	1010.7	11.6	50	ENE	59	6.1	0.994
15:10	88	1010.9	11.6	50	ENE	59	6.0	0.990
15:20	94	1010.1	11.5	50	ENE	59	6.1	0.906
15:30	106	1008.7	11.4	51	ENE	59	6.1	0.914
15:40	107	1008.5	11.3	51	ENE	59	6.1	0.956
15:50	110	1008.1	11.2	52	ENE	59	6.1	0.970
16:00	108	1008.4	11.2	52	ENE	59	6.0	0.964
平均	—	1009.6	11.5	51	ENE	59	6.1	0.974

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (5/16)

1989/11/16 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
13:10	119	1005.7	11.8	75	NE	47	2.1
13:20	112	1006.5	11.8	77	NE	36	1.5
13:30	111	1006.6	11.7	76	NE	40	1.3
13:40	110	1006.6	11.7	77	NNE	28	1.3
13:50	108	1006.7	11.9	79	NNE	12	0.8
14:00	110	1006.7	11.9	77	N	352	0.9
14:10	109	1006.7	11.9	77	N	355	1.1
14:20	111	1006.6	12.0	77	N	353	1.5
14:30	109	1006.7	12.1	77	N	354	2.4
平均	—	1006.5	11.9	77	NNE	16	1.3

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
13:10	119	1006.7	10.2	73	N	8	6.8	0.772
13:20	112	1007.5	10.4	73	N	8	6.2	0.883
13:30	111	1007.5	10.5	73	N	9	5.9	0.857
13:40	110	1007.5	10.7	73	N	10	5.5	0.950
13:50	108	1007.7	10.9	73	N	10	5.3	0.999
14:00	110	1007.4	11.0	73	N	10	5.3	0.950
14:10	109	1007.4	11.1	73	N	10	5.3	0.964
14:20	111	1007.0	11.2	73	NNE	12	5.6	0.948
14:30	109	1007.1	11.3	73	NNE	12	5.6	0.950
平均	—	1007.3	10.8	73	N	10	5.7	0.993

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (6/16)

1989/11/17 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
11:10	94	1004.4	12.3	87	NE	55	3.5
11:20	91	1004.6	12.3	86	NE	53	3.7
11:30	96	1004.2	12.4	86	NE	53	3.1
11:40	92	1004.5	12.5	86	NE	50	3.9
11:50	90	1004.5	12.4	87	NE	56	3.6
12:00	91	1004.3	12.3	88	NNE	33	2.3
12:10	86	1004.5	12.3	88	NE	39	3.1
12:20	87	1004.3	12.3	88	NE	45	2.3
12:30	86	1004.5	12.4	88	NE	50	2.8
平均	—	1004.4	12.4	87	NE	49	3.1

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
11:10	94	1006.0	8.9	87	N	359	5.5	0.555
11:20	91	1006.2	9.1	86	N	359	5.5	0.594
11:30	96	1005.5	9.1	87	N	2	5.7	0.627
11:40	92	1005.8	9.4	85	N	2	5.6	0.670
11:50	90	1006.0	9.7	84	N	3	5.5	0.600
12:00	91	1005.7	9.9	84	N	5	5.5	0.879
12:10	86	1006.2	10.2	82	N	4	5.3	0.817
12:20	87	1005.9	10.5	81	N	5	5.3	0.762
12:30	86	1005.9	10.7	81	N	5	5.3	0.709
平均	—	1005.9	9.7	84	N	3	5.5	0.687

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (7/16)

1989/11/18 放出：B地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
14:40	105	994.7	15.4	68	SE	143	1.7
14:50	104	994.7	15.4	69	SE	137	1.4
15:00	106	994.6	15.3	68	SSE	152	1.8
15:10	105	994.6	15.3	68	SE	145	2.2
15:20	104	994.6	15.3	67	SSE	151	2.4
15:30	103	994.7	15.3	67	SSE	153	2.6
15:40	101	994.8	15.1	69	SE	133	2.8
15:50	99	994.9	15.0	70	SE	126	3.5
16:00	98	994.9	14.7	71	SE	126	4.3
平均	—	994.7	15.2	69	SE	138	2.5

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
14:40	105	990.6	14.1	82	SW	220	1.8	0.223
14:50	104	990.6	14.2	81	SW	218	1.9	0.154
15:00	106	990.3	14.2	80	SW	216	1.9	0.433
15:10	105	990.3	14.3	79	SW	220	1.7	0.257
15:20	104	990.3	14.4	78	SW	224	1.5	0.297
15:30	103	990.3	14.5	77	SW	221	1.5	0.369
15:40	101	990.4	14.6	77	SW	219	1.6	0.075
15:50	99	990.6	14.7	76	SW	217	1.7	-0.011
16:00	98	990.6	14.7	76	SW	214	1.6	0.027
平均	—	990.4	14.4	78	SW	219	1.7	0.168

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (8/16)

1989/11/20 放出：B地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
14:40	117	1001.3	12.5	38	NW	322	2.3
14:50	116	1001.5	12.6	38	NNW	333	3.4
15:00	117	1001.5	12.5	38	N	355	3.5
15:10	117	1001.6	12.6	39	NNW	329	3.9
15:20	119	1001.6	12.5	38	NNW	336	4.1
15:30	121	1001.5	12.4	38	NNW	340	2.9
15:40	121	1001.5	12.5	39	NNW	339	3.2
15:50	118	1001.7	12.3	39	WNW	298	4.6
16:00	119	1001.7	12.2	40	NW	306	3.9
平均	—	1001.5	12.5	39	NNW	328	3.4

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
14:40	117	996.1	12.2	34	SW	234	3.8	0.029
14:50	116	996.2	12.3	34	SW	232	3.6	-0.194
15:00	117	996.1	12.3	33	SW	230	3.5	-0.571
15:10	117	996.1	12.4	33	SW	229	3.4	-0.176
15:20	119	995.9	12.4	33	SW	228	3.4	-0.308
15:30	121	995.7	12.4	33	SW	228	3.3	-0.380
15:40	121	995.7	12.4	33	SW	227	3.2	-0.372
15:50	118	996.1	12.5	33	SW	226	3.1	0.315
16:00	119	996.0	12.5	33	SW	226	3.0	0.176
平均	—	996.0	12.4	33	SW	229	3.4	-0.147

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (9/16)

1990/11/08 放出：B地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
15:40	113	1001.9	19.1	40	SW	227	0.6
15:50	113	1002.0	18.9	44	ESE	106	1.2
16:00	115	1001.9	18.3	52	E	83	3.0
16:10	114	1002.1	17.7	56	E	86	3.7
16:20	114	1002.2	17.5	57	E	97	3.9
16:30	116	1002.2	17.8	56	E	100	4.6
16:40	116	1002.3	17.7	57	E	93	6.0
16:50	114	1002.6	17.6	57	E	94	6.6
17:00	116	1002.5	17.5	59	E	97	7.5
平均	—	1002.2	18.0	53	E	95	4.0

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
15:40	113	997.7	19.1	27	SW	229	2.4	0.999
15:50	113	997.7	19.1	27	SW	224	2.3	-0.468
16:00	115	997.4	19.1	27	SW	219	2.3	-0.720
16:10	114	997.6	19.1	27	SW	215	2.3	-0.634
16:20	114	997.6	19.1	27	SSW	212	2.3	-0.425
16:30	116	997.4	19.1	27	SSW	209	2.4	-0.322
16:40	116	997.4	19.1	27	SSW	205	2.5	-0.372
16:50	114	997.8	19.1	27	SSW	202	2.5	-0.301
17:00	116	997.6	19.0	27	SSW	200	2.5	-0.222
平均	—	997.6	19.1	27	SSW	212	2.4	-0.463

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (10/16)

1990/11/09 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
10:40	111	1004.7	13.8	69	NE	34	2.0
10:50	96	1005.5	13.8	69	NE	52	2.3
11:00	100	1005.1	13.9	69	ENE	62	2.8
11:10	98	1005.1	13.8	71	ENE	58	2.1
11:20	99	1004.9	13.7	73	ENE	66	1.8
11:30	95	1004.9	13.6	74	NE	53	1.5
11:40	90	1005.0	13.9	72	NE	47	2.2
11:50	86	1005.3	13.8	73	NNE	30	2.0
12:00	86	1005.2	13.8	74	N	354	1.7
平均	—	1005.1	13.8	72	NE	46	1.9

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
10:40	111	1005.4	12.0	63	NE	38	2.7	0.998
10:50	96	1007.1	12.0	63	NE	44	2.6	0.991
11:00	100	1006.4	12.2	63	NE	50	2.1	0.977
11:10	98	1006.4	12.4	62	ENE	61	1.5	0.999
11:20	99	1006.1	12.6	61	ENE	73	1.2	0.993
11:30	95	1006.3	12.9	60	E	80	1.1	0.893
11:40	90	1006.7	13.1	59	E	85	0.9	0.792
11:50	86	1006.9	13.4	58	E	95	0.8	0.422
12:00	86	1006.7	13.7	57	ESE	112	0.7	-0.472
平均	—	1006.4	12.7	60	ENE	60	1.4	0.971

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (11/16)

1990/11/10 放出：CC 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
12:30	5	978.5	19.2	—	N	0	1.2
12:40	5	978.6	19.7	—	NW	315	1.3
12:50	5	978.8	20.3	—	SE	135	0.6
13:00	5	978.6	19.5	—	WNW	292.5	1.1
13:10	5	978.6	19.3	—	SW	225	1.6
13:20	5	978.6	19.3	—	NW	315	1.2
13:30	5	978.6	19.5	—	SW	225	1.1
平均	—	978.6	19.5	—	WNW	284	0.6

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
12:30	5	982.5	19.7	55	W	263	8.3	-0.119
12:40	5	982.5	19.7	53	W	264	8.3	0.624
12:50	5	982.5	19.6	52	W	264	8.3	-0.628
13:00	5	982.5	19.5	51	W	264	8.3	0.879
13:10	5	982.5	19.5	50	W	264	8.3	0.776
13:20	5	982.5	19.4	49	W	264	8.3	0.634
13:30	5	982.5	19.3	48	W	265	8.3	0.769
平均	—	982.5	19.5	51	W	264	8.3	0.940

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (12/16)

1990/11/11 放出：B地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
20:10	94	1002.5	13.0	65	CLM	30	0.4
20:20	103	1001.5	13.0	67	CLM	70	0.1
20:30	100	1002.2	13.0	68	CLM	78	0.4
20:40	100	1002.1	13.0	69	CLM	92	0.3
20:50	101	1002.1	13.0	69	CLM	65	0.4
21:00	102	1002.1	13.0	70	NNW	333	0.5
21:10	103	1002.0	12.9	70	NW	319	1.1
21:20	105	1001.9	12.9	70	NW	325	1.6
21:30	106	1001.8	12.8	70	NNW	328	1.8
平均	—	1002.0	13.0	69	NNW	343	0.6

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
20:10	94	996.9	12.0	49	WSW	242	1.4	-0.849
20:20	103	996.0	11.9	49	WSW	238	1.5	-0.979
20:30	100	996.5	11.7	50	SW	224	1.5	-0.831
20:40	100	996.7	11.6	50	SW	228	1.2	-0.718
20:50	101	996.7	11.5	50	WSW	248	0.9	-0.998
21:00	102	996.8	11.5	49	W	276	0.8	0.548
21:10	103	996.8	11.5	48	WNW	296	1.0	0.923
21:20	105	996.7	11.4	48	WNW	300	1.3	0.907
21:30	106	996.8	11.4	47	WNW	296	1.6	0.844
平均	—	996.7	11.6	49	W	259	1.1	0.114

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値とRAMS計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1のとき風向きが同方向、0のとき風向きが90度、-1のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (13/16)

1990/11/12 放出：B地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
19:40	127	1003.1	16.3	85	CLM	234	0.2
19:50	128	1003.0	16.1	85	CLM	47	0.0
20:00	129	1003.0	16.2	85	CLM	252	0.1
20:10	130	1002.9	15.9	86	CLM	195	0.2
20:20	131	1002.8	15.9	86	CLM	227	0.4
20:30	131	1002.8	15.8	87	WSW	256	0.7
20:40	132	1002.8	15.6	87	CLM	207	0.1
20:50	132	1002.8	15.6	88	CLM	261	0.2
21:00	132	1002.8	15.7	86	CLM	75	0.0
平均	—	1002.9	15.9	86	WSW	239	0.2

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
19:40	127	999.6	12.7	61	NNW	329	1.2	-0.087
19:50	128	999.6	12.7	61	NNW	329	1.2	—
20:00	129	999.6	12.6	62	NNW	326	1.2	0.271
20:10	130	999.6	12.6	62	NW	321	1.3	-0.584
20:20	131	999.6	12.6	62	NW	312	1.4	0.089
20:30	131	999.7	12.6	63	WNW	290	1.4	0.827
20:40	132	999.7	12.5	64	WSW	258	1.8	0.630
20:50	132	999.8	12.3	66	W	260	1.9	1.000
21:00	132	999.9	12.2	66	W	273	1.7	—
平均	—	999.7	12.5	63	WNW	295	1.3	0.569

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (14/16)

1990/11/13 放出：A地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
13:40	113	1009.2	18.0	85	SSE	151	2.4
13:50	111	1009.3	18.1	84	SE	145	2.9
14:00	108	1009.6	18.1	83	SE	141	2.8
14:10	108	1009.6	18.1	85	SSE	159	2.4
14:20	107	1009.6	18.1	86	SE	145	2.4
14:30	106	1009.7	18.2	86	SE	142	2.0
14:40	107	1009.7	18.2	87	SSE	153	2.7
14:50	106	1009.8	18.2	87	SSE	148	2.1
15:00	108	1009.7	18.2	87	SSE	158	2.2
平均	—	1009.6	18.1	86	SSE	149	2.4

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
13:40	113	1010.3	11.9	52	NE	55	1.7	-0.103
13:50	111	1010.5	12.2	52	NE	53	1.9	-0.039
14:00	108	1010.8	12.4	52	NE	54	2.0	0.049
14:10	108	1010.7	12.6	52	ENE	57	2.0	-0.205
14:20	107	1010.8	12.8	52	ENE	62	1.9	0.118
14:30	106	1010.9	13.0	52	ENE	68	1.7	0.269
14:40	107	1010.7	13.2	51	ENE	75	1.6	0.212
14:50	106	1010.8	13.4	51	E	84	1.4	0.440
15:00	108	1010.6	13.5	50	E	95	1.4	0.450
平均	—	1010.7	12.8	52	ENE	65	1.7	0.108

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (15/16)

1990/11/13 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
19:10	123	1008.9	15.8	89	CLM	18	0.3
19:20	123	1008.9	15.9	89	CLM	15	0.0
19:30	123	1008.9	15.9	89	CLM	357	0.0
19:40	123	1008.8	16.0	89	CLM	358	0.0
19:50	123	1008.8	16.0	89	CLM	338	0.0
20:00	120	1008.9	16.1	89	N	350	0.8
20:10	119	1008.9	16.1	89	N	354	1.0
20:20	119	1008.9	16.2	88	NNW	340	1.0
20:30	119	1008.9	16.3	88	N	4	0.7
平均	—	1008.9	16.0	89	N	353	0.4

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
19:10	123	1009.1	11.0	77	SSW	201	1.0	-0.999
19:20	123	1009.1	10.9	78	SSW	207	1.3	—
19:30	123	1009.2	10.8	79	SSW	211	1.5	—
19:40	123	1009.2	10.7	80	SW	217	1.5	—
19:50	123	1009.2	10.6	80	SW	218	1.5	—
20:00	120	1009.6	10.6	81	SSW	212	1.4	-0.737
20:10	119	1009.8	10.5	82	SSW	206	1.4	-0.849
20:20	119	1009.8	10.6	82	SSW	201	1.4	-0.751
20:30	119	1009.9	10.6	83	SSW	200	1.4	-0.959
平均	—	1009.4	10.7	80	SSW	209	1.4	-0.815

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-4 トレーサーガス放出時の気象とRAMS計算値の比較 (16/16)

1990/11/15 放出：A 地点

観測値	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]
11:10	115	1000.4	16.8	87	SE	141	1.3
11:20	114	1000.5	16.9	88	SE	141	1.9
11:30	112	1000.6	17.0	88	SE	128	2.0
11:40	112	1000.5	17.1	88	SE	126	2.0
11:50	109	1000.6	17.1	88	ESE	121	1.9
12:00	106	1000.8	17.2	88	SE	136	2.0
12:10	107	1000.7	17.3	88	SE	135	2.1
12:20	104	1000.9	17.4	88	SE	139	2.1
12:30	104	1000.9	17.5	88	SSE	148	1.8
平均	—	1000.7	17.1	88	SE	135	1.9

RAMS	高度	気圧	気温	湿度	風向	風向	風速	COS(θ)
時分	[m]	[mb]	[°C]	[%]	(方位)	[deg]	[m/s]	[-]
11:10	115	1000.9	10.3	62	NNE	22	4.3	-0.490
11:20	114	1001.0	10.8	60	NNE	27	3.8	-0.405
11:30	112	1001.2	11.4	58	NNE	33	3.4	-0.081
11:40	112	1001.1	11.9	57	NNE	25	3.6	-0.183
11:50	109	1001.4	11.8	56	N	6	3.8	-0.430
12:00	106	1001.7	12.0	55	N	5	2.9	-0.657
12:10	107	1001.6	12.1	54	NNE	15	2.6	-0.506
12:20	104	1001.9	12.4	53	NNE	15	2.5	-0.554
12:30	104	1001.9	12.7	53	NNE	15	2.3	-0.676
平均	—	1001.4	11.7	57	NNE	19	3.2	-0.437

(注意 1) 時間は日本標準時である。

(注意 2) COS(θ)は観測値と RAMS 計算値の水平風ベクトルのなす角の余弦である。

1 のとき風向きが同方向、0 のとき風向きが 90 度、-1 のとき風向きが反対方向。

表 4-5 プルームモデルの入力条件

放出地点	評価期間	平均風向	平均風速	安定度	放出高
		[deg]	[m/s]	[-]	[m]
B	1989/11/13 14:30-16:00(JST)	104	2.5	B	120
A	1989/11/14 13:00-14:30(JST)	96	4.4	D	120
A	1989/11/15 10:00-11:30(JST)	64	5.1	B	120
A	1989/11/15 14:30-16:00(JST)	72	4.7	D	120
A	1989/11/16 13:00-14:30(JST)	16	1.3	B	120
A	1989/11/17 11:00-12:30(JST)	49	3.1	D	120
B	1989/11/18 14:30-16:00(JST)	138	2.5	B	120
B	1989/11/20 14:30-16:00(JST)	328	3.4	B	120
B	1990/11/08 15:30-17:00(JST)	95	4.0	B	120
A	1990/11/09 10:30-12:00(JST)	46	1.9	D	120
CC	1990/11/10 12:30-13:30(JST)	284	0.6	D	5
B	1990/11/11 20:00-21:30(JST)	343	0.6	F	120
B	1990/11/12 19:30-21:00(JST)	239	0.2	F	120
A	1990/11/13 13:30-15:00(JST)	149	2.4	B	120
A	1990/11/13 19:00-20:30(JST)	353	0.4	F	120
A	1990/11/15 11:00-12:30(JST)	135	1.9	A	120

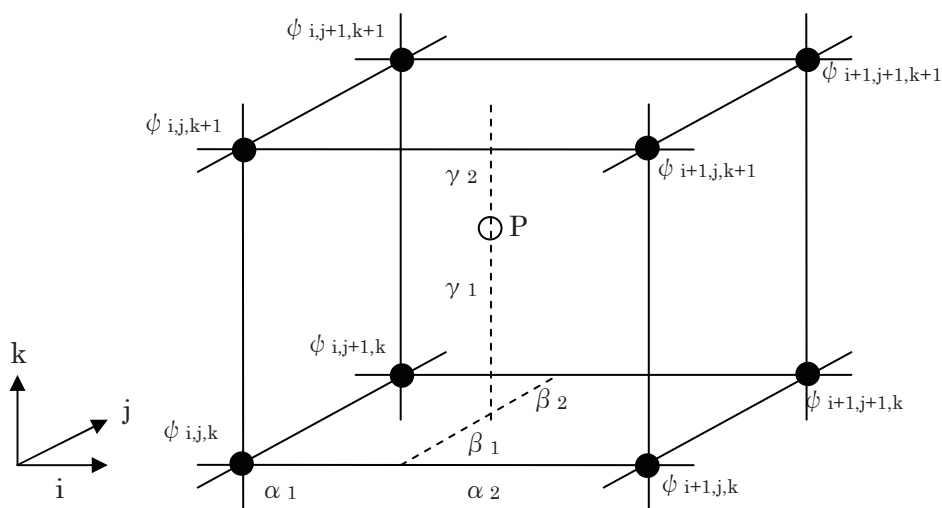


図 4-1 点 P を含む格子空間上の要素

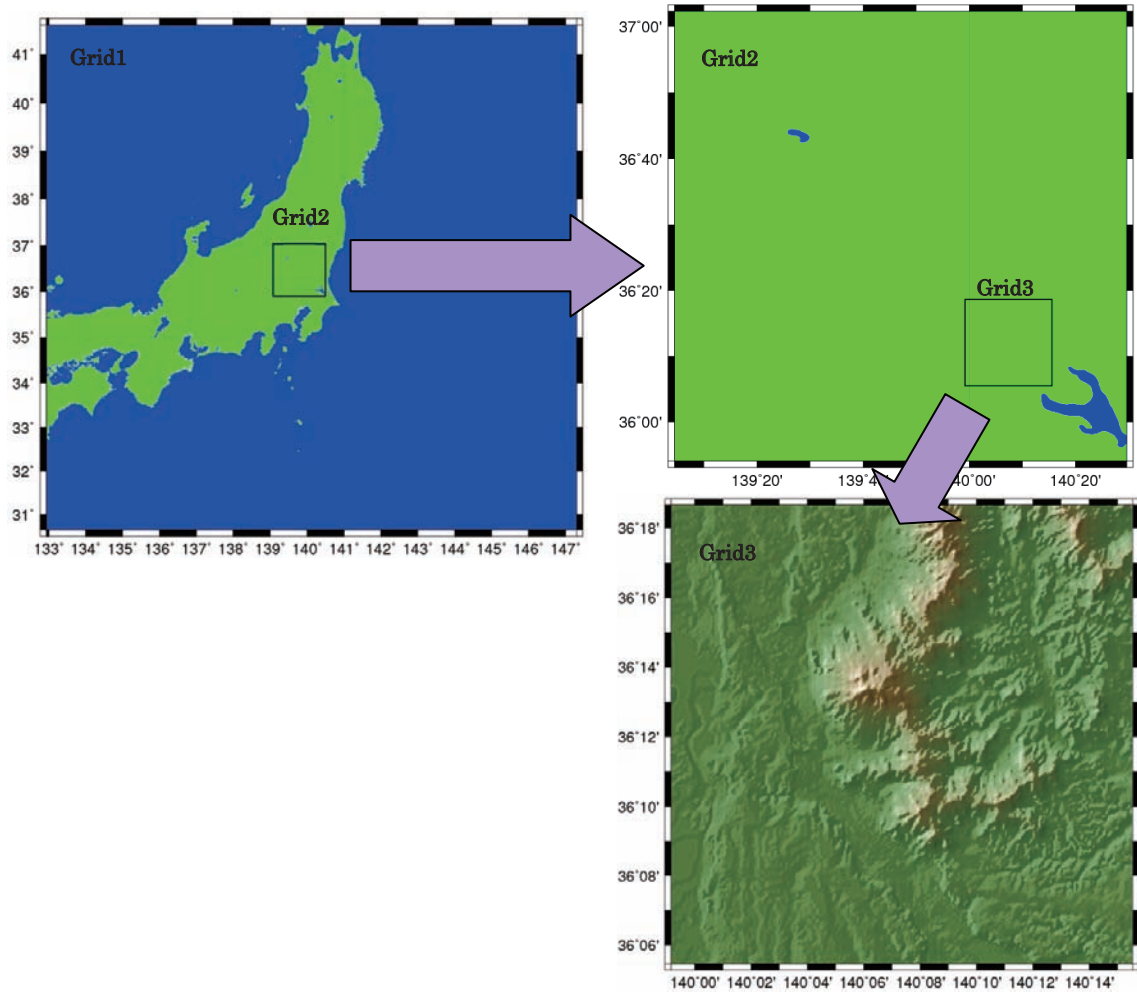
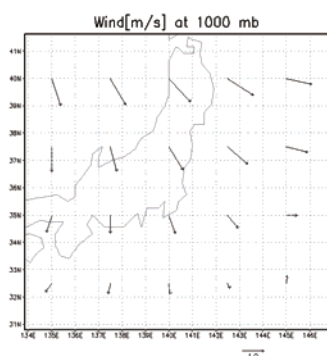
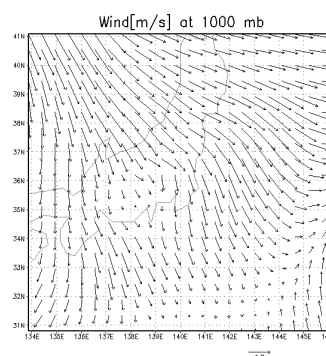


図 4-2 RAMS の 3 重格子による水平方向解析領域の設定

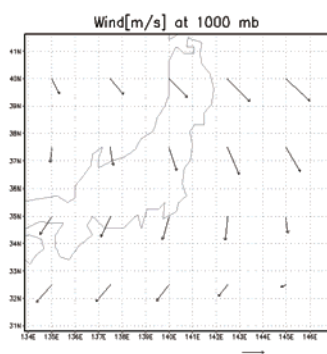
This is a blank page.



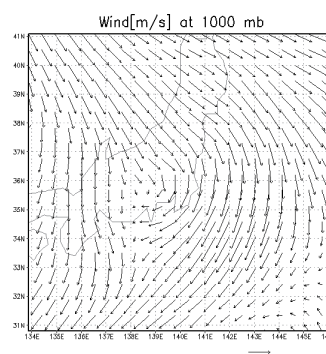
再解析 (風速、1989/11/14 00:00UTC)



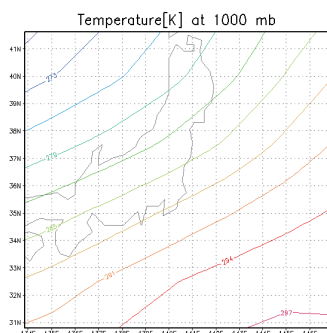
RAMS (風速、1989/11/14 00:00UTC)



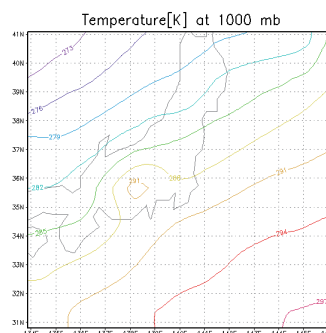
再解析 (風速、1989/11/14 06:00UTC)



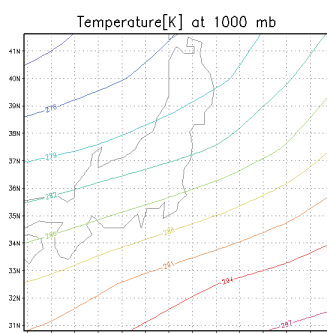
RAMS (風速、1989/11/14 06:00UTC)



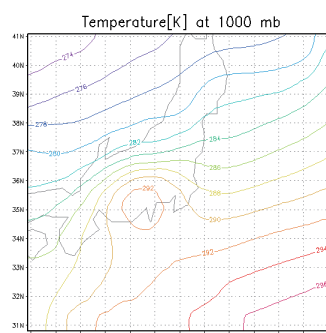
再解析 (気温、1989/11/14 00:00UTC)



RAMS (気温、1989/11/14 00:00UTC)



再解析 (気温、1989/11/14 06:00UTC)



RAMS (気温、1989/11/14 06:00UTC)

図 4-3 NCEP-DOE の再解析値と RAMS の気象場の比較
(RAMS の計算開始は 1989/11/10 00:00UTC である。)

This is a blank page.

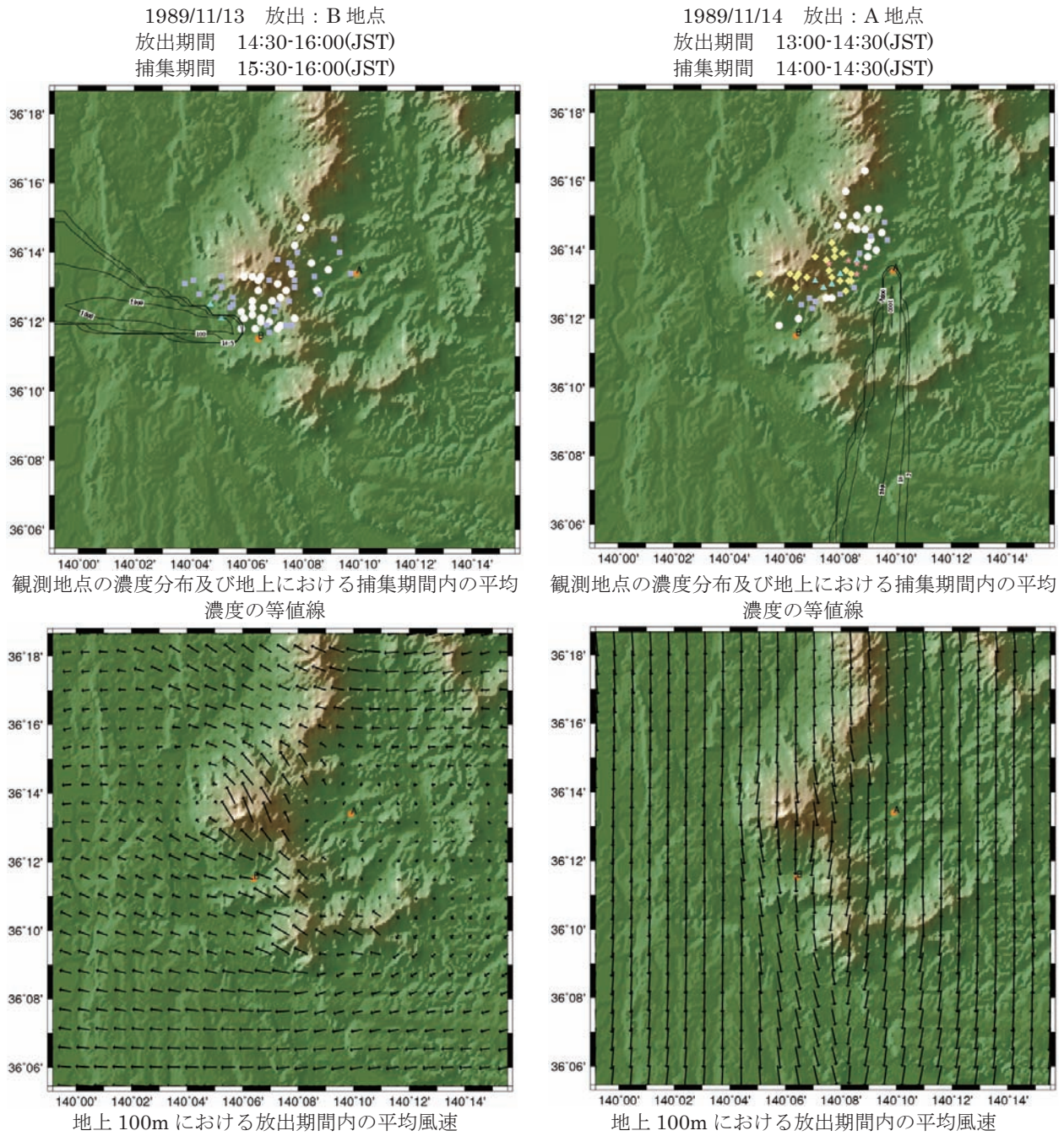


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上100mにおける放出期間内の平均風速 (1/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

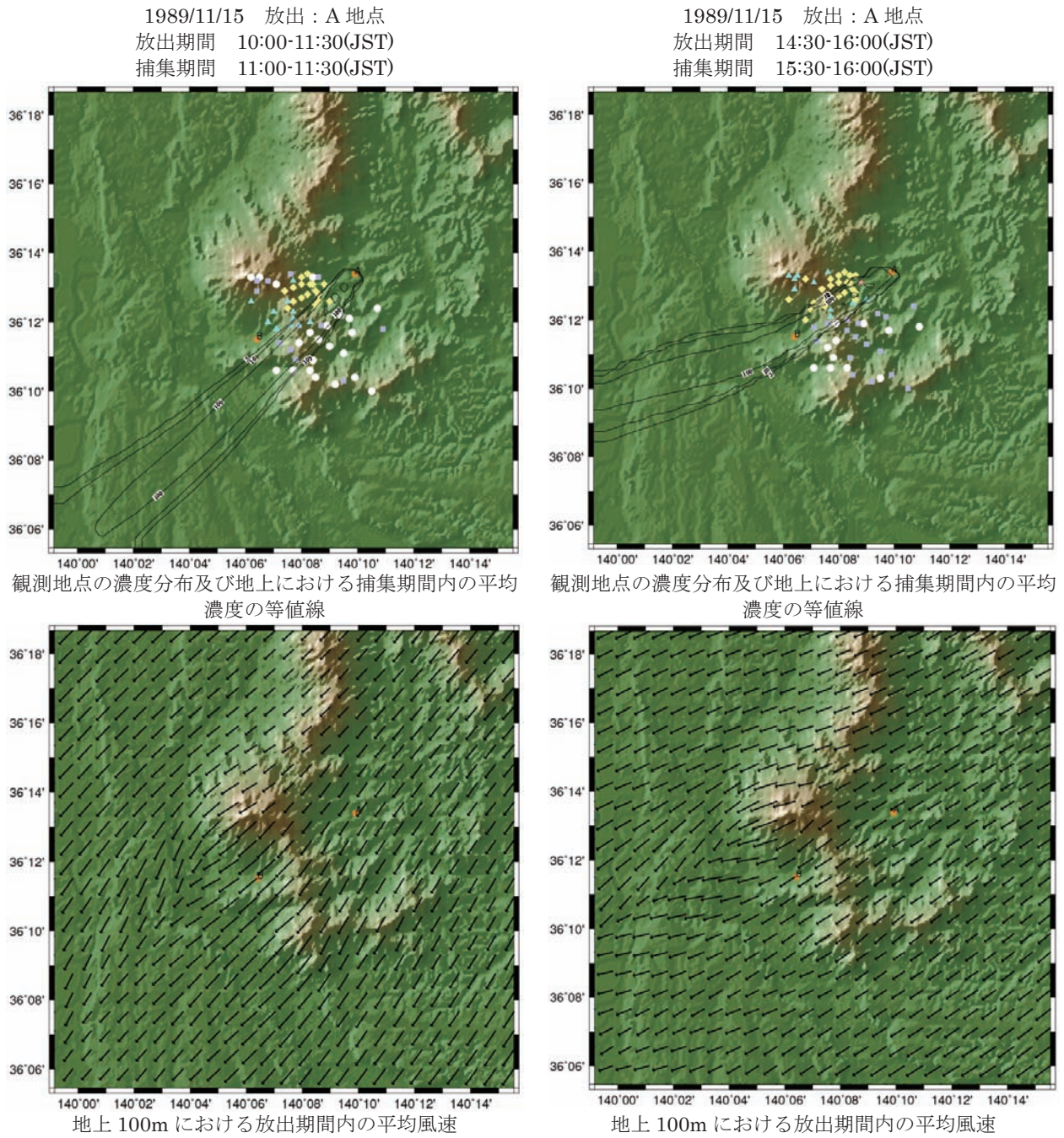


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (2/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

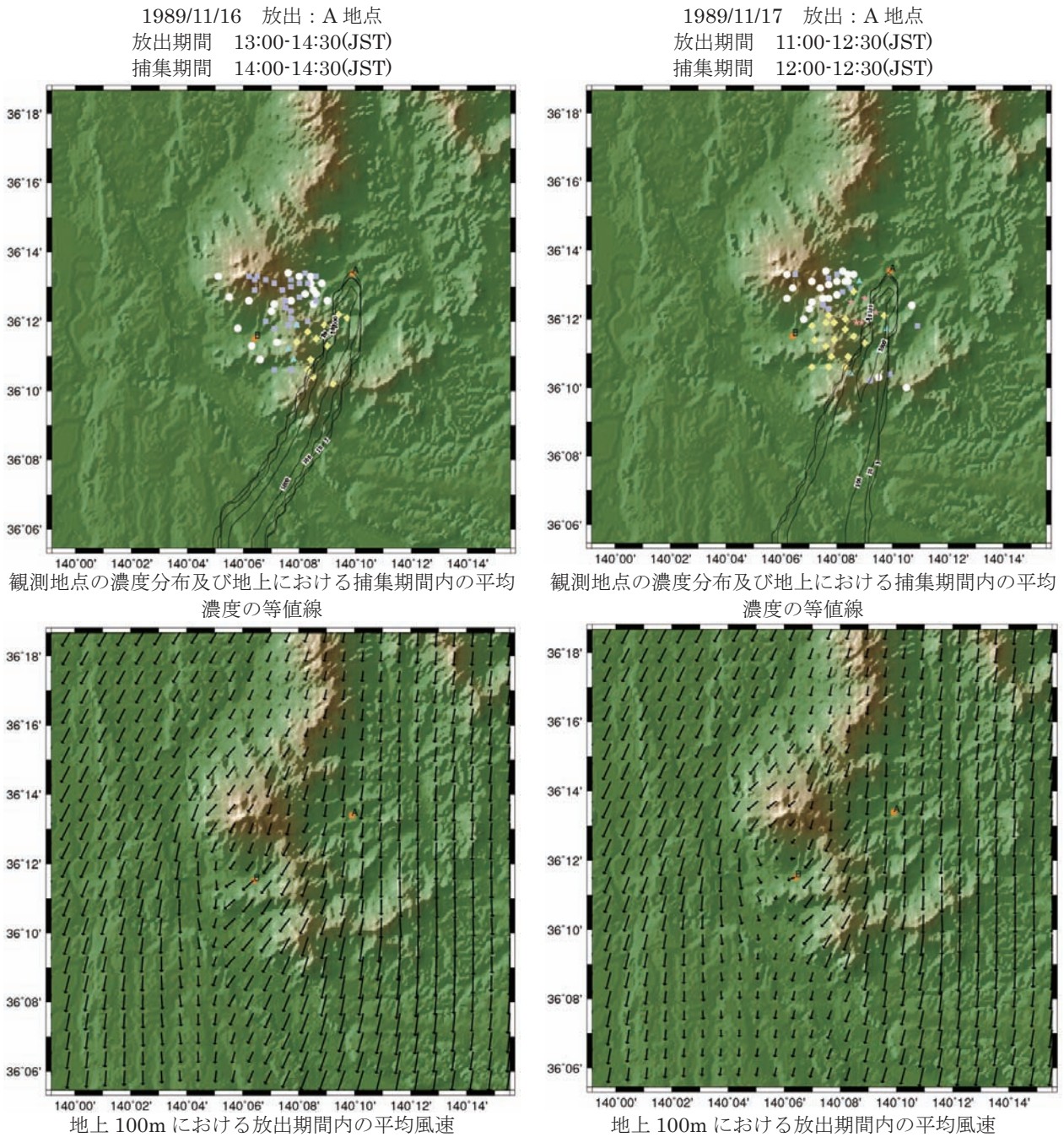


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (3/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

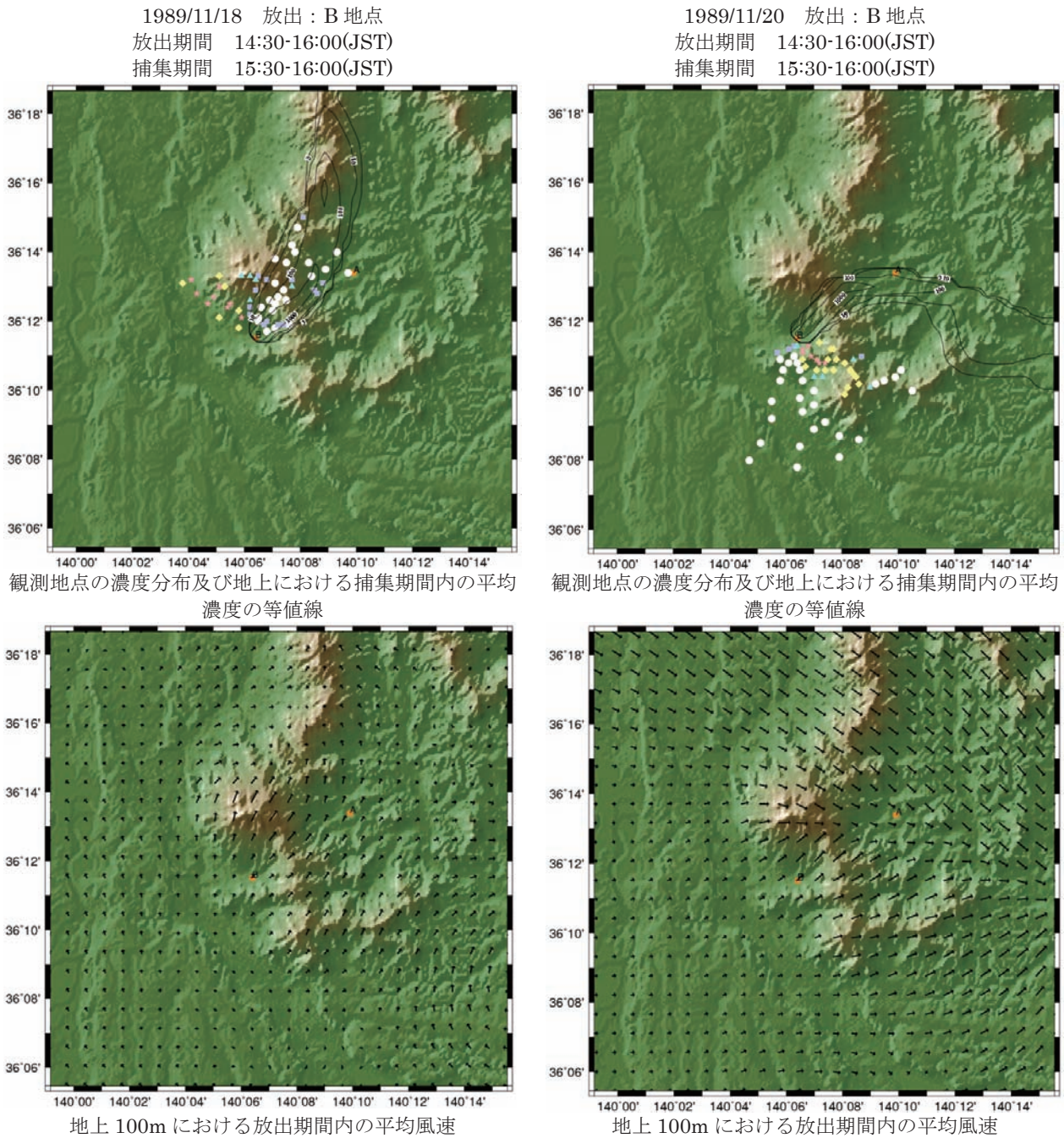


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (4/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

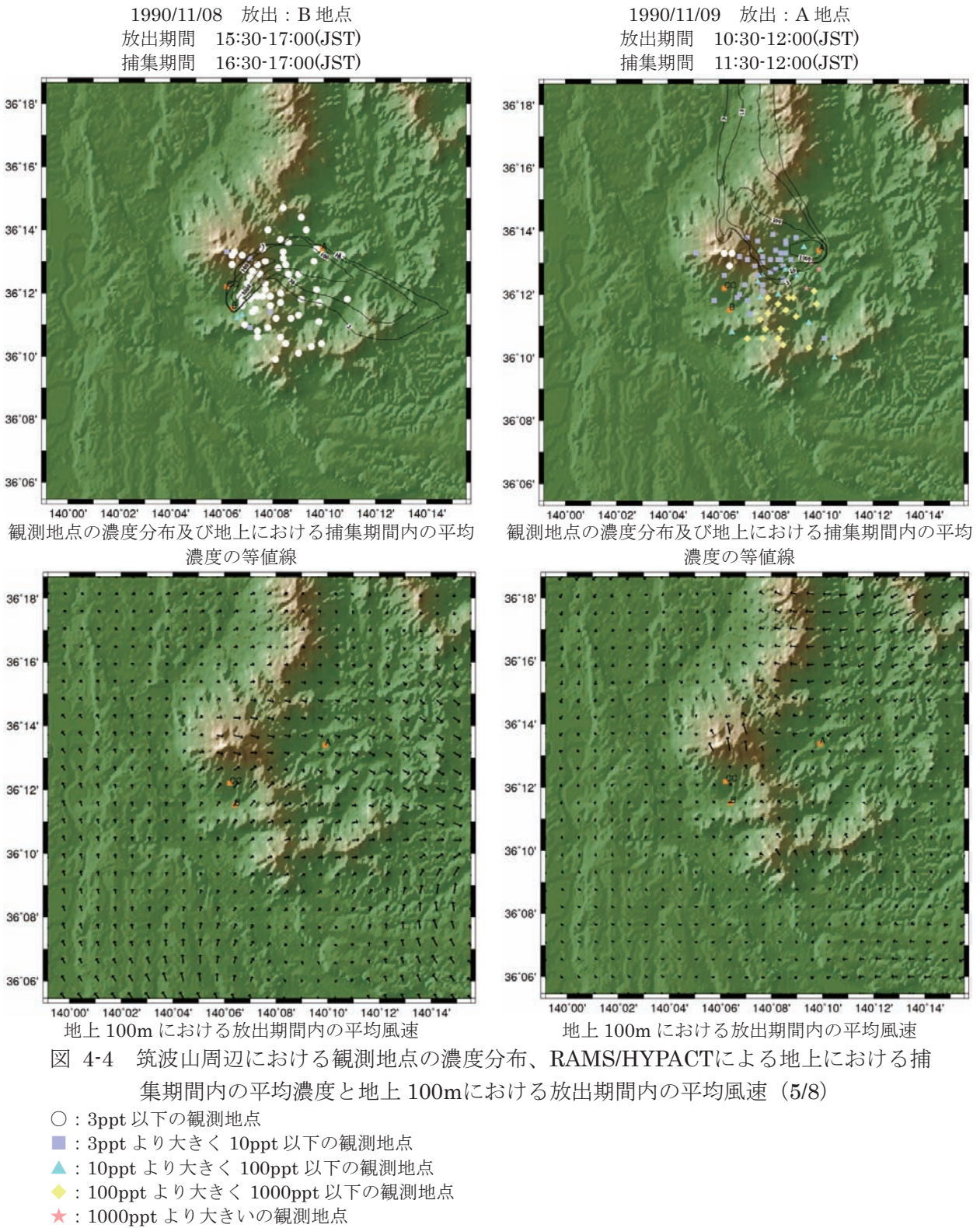


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (5/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

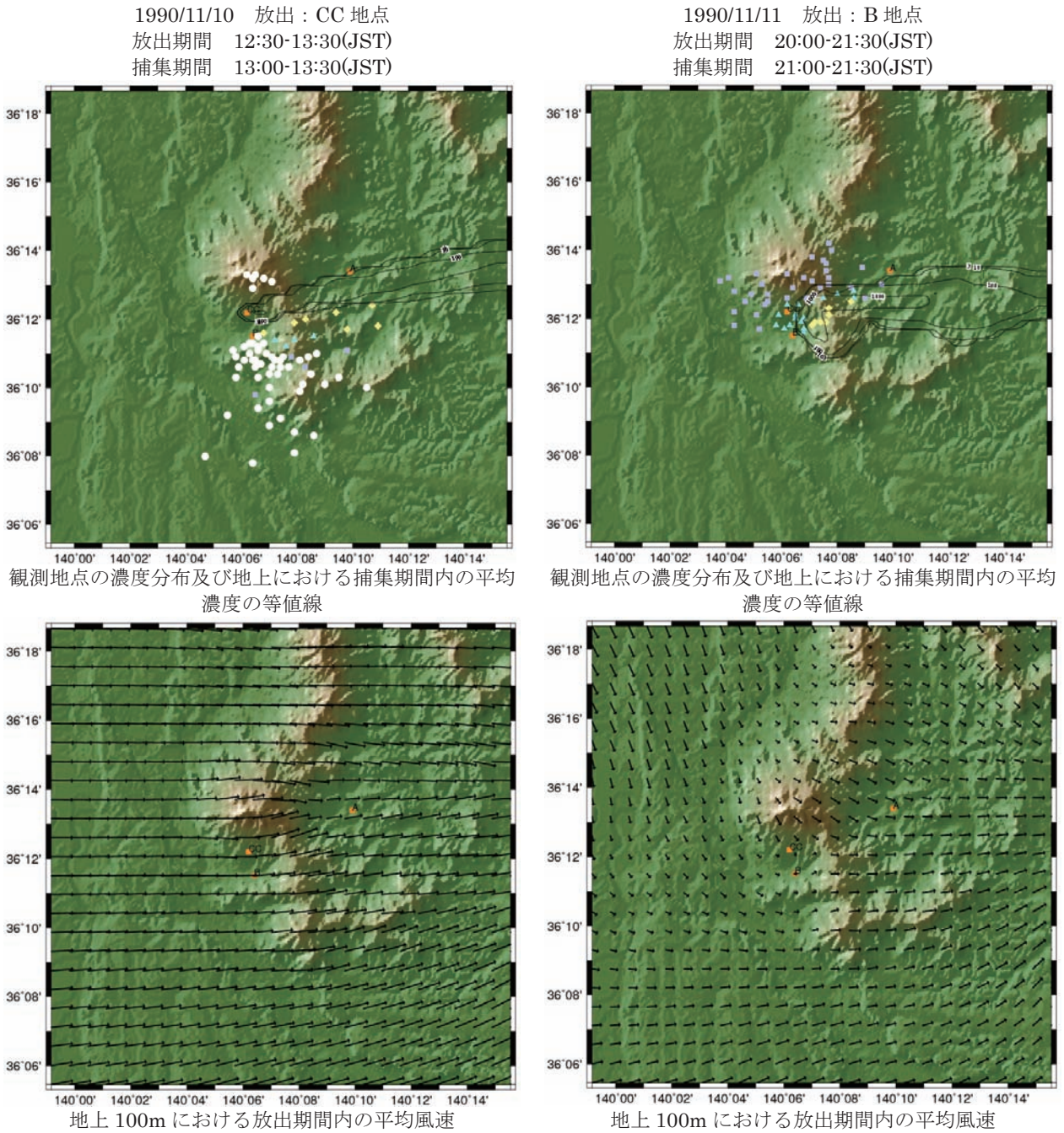


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (6/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

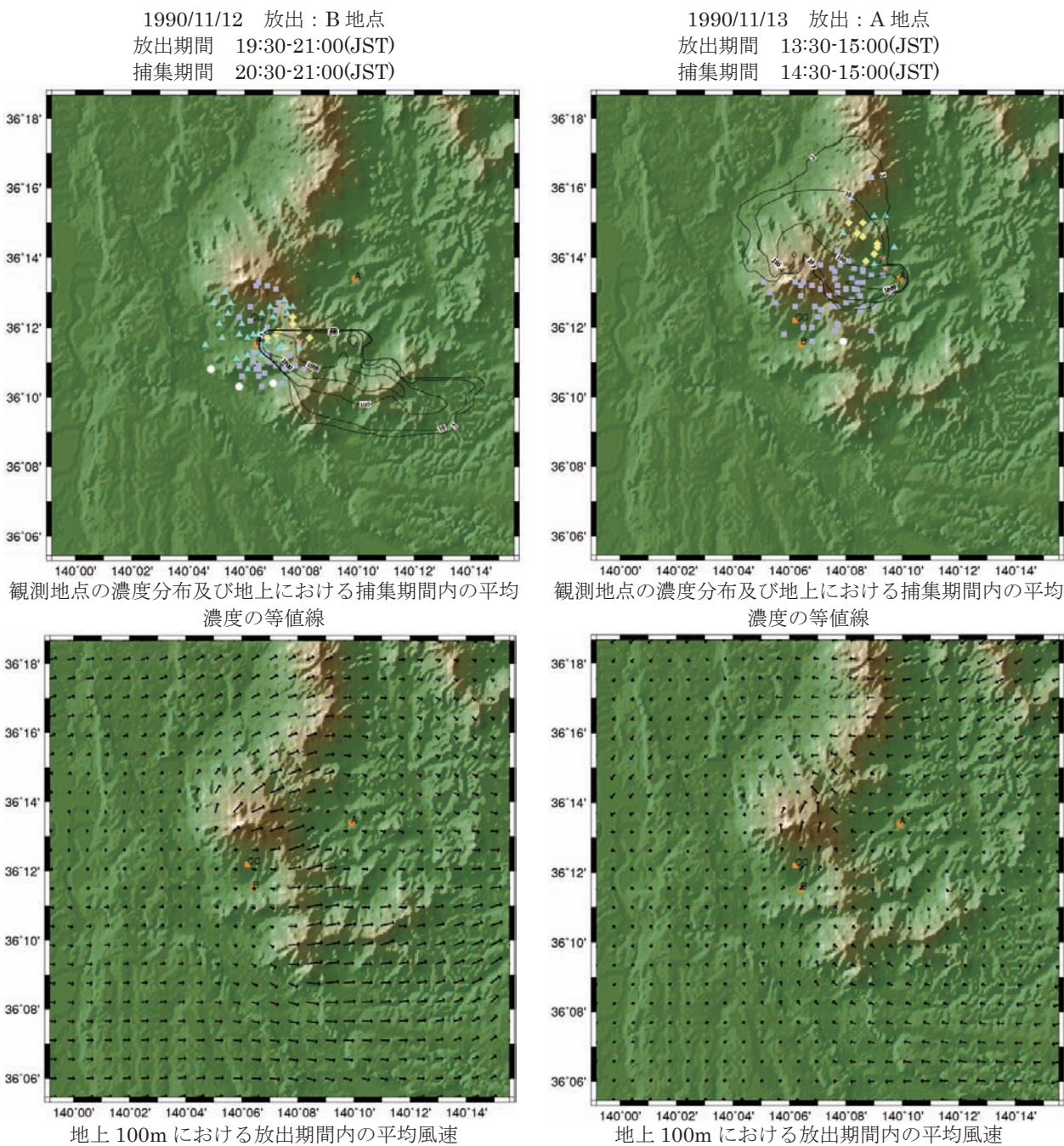


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上100mにおける放出期間内の平均風速 (7/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

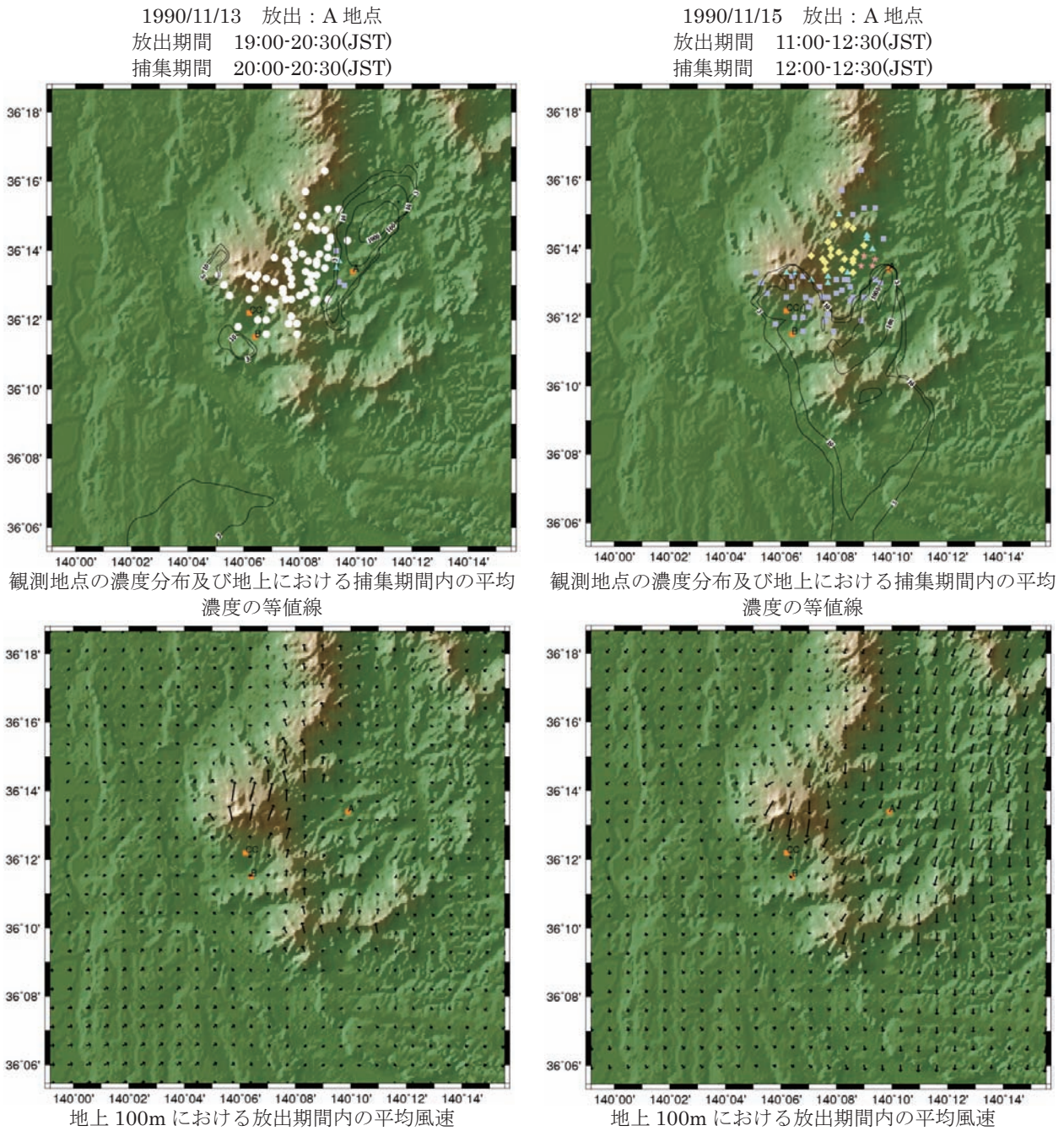
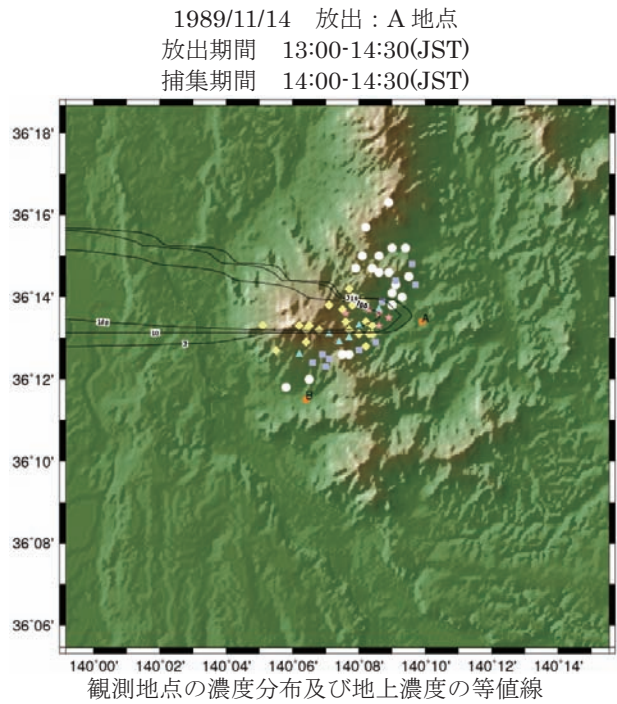
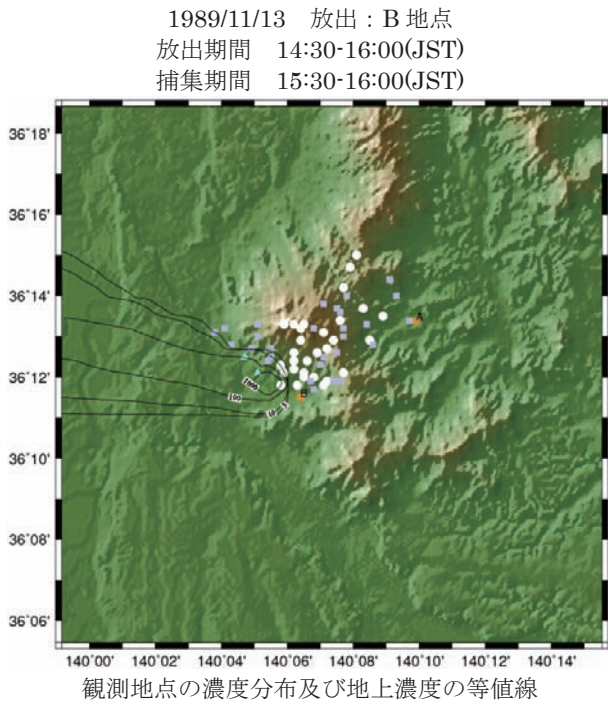


図 4-4 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、RAMS/HYPACTによる地上における捕集期間内の平均濃度と地上 100mにおける放出期間内の平均風速 (8/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.



トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
14:40	103	1000.4	18.4	78	ESE	106	2.1
14:50	96	1001.1	18.3	79	ESE	103	3.6
15:00	94	1001.3	18.3	79	E	100	4.1
15:10	95	1001.2	18.2	80	ESE	111	2.2
15:20	92	1001.4	18.2	81	ESE	103	2.1
15:30	93	1001.2	18.4	80	ESE	103	2.1
15:40	89	1001.4	18.6	79	ESE	108	2.3
15:50	90	1001.4	18.6	79	ESE	106	2.0
16:00	92	1001.1	18.7	78	E	98	1.7
平均	—	1001.2	18.4	79	ESE	104	2.5

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：D

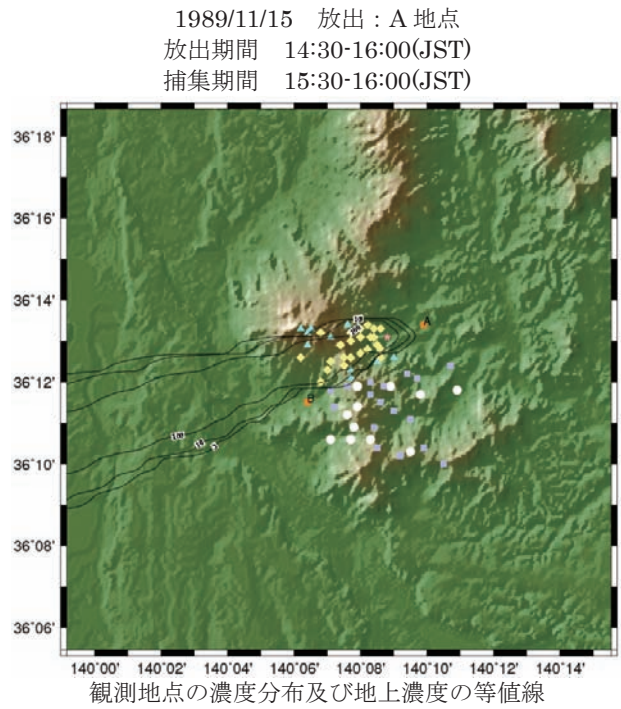
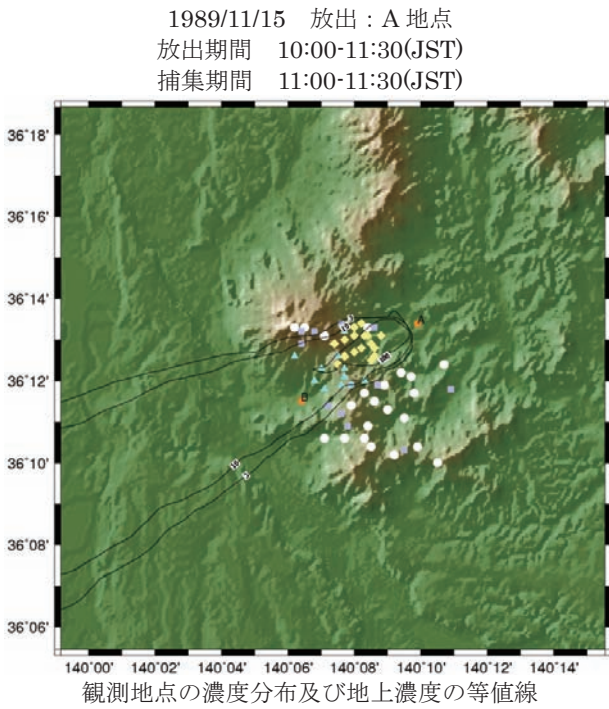
観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
13:10	112	1001.3	13.3	57	E	84	4.3
13:20	110	1001.6	13.2	57	E	92	4.4
13:30	114	1001.5	13.1	57	E	98	4.0
13:40	114	1001.5	13.1	57	E	101	4.2
13:50	115	1001.6	13.1	56	E	101	3.8
14:00	117	1001.5	13.1	56	ESE	103	4.1
14:10	119	1001.4	13.0	57	E	101	4.3
14:20	114	1002.0	13.0	55	E	97	5.2
14:30	114	1002.1	13.0	53	E	88	5.8
平均	—	1001.6	13.1	56	E	96	4.4

図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度と
 トレーサーガス放出時の気象の観測値 (1/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.



トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
10:10	88	1013.9	8.6	54	NE	54	5.0
10:20	92	1013.7	8.7	55	NE	55	5.0
10:30	90	1013.8	9.0	55	NE	54	5.0
10:40	91	1013.7	8.9	55	ENE	67	5.6
10:50	92	1013.6	9.0	54	ENE	77	5.1
11:00	91	1013.6	9.0	54	ENE	68	5.2
11:10	87	1013.9	9.2	55	E	81	5.8
11:20	88	1013.8	9.0	54	ENE	61	5.3
11:30	85	1013.9	9.0	53	NE	56	4.9
平均	—	1013.8	8.9	54	ENE	64	5.1

トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：D

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
14:40	89	1012.2	9.4	58	NE	56	4.8
14:50	93	1011.8	9.3	59	ENE	70	5.1
15:00	90	1012.1	9.1	60	ENE	65	5.8
15:10	88	1012.3	9.0	62	ENE	67	5.1
15:20	94	1011.7	8.9	63	E	84	5.1
15:30	106	1010.4	8.9	64	E	83	5.0
15:40	107	1010.2	8.9	64	ENE	76	3.7
15:50	110	1009.9	8.9	65	ENE	73	3.4
16:00	108	1010.1	8.8	65	ENE	74	4.8
平均	—	1011.2	9.0	62	ENE	72	4.7

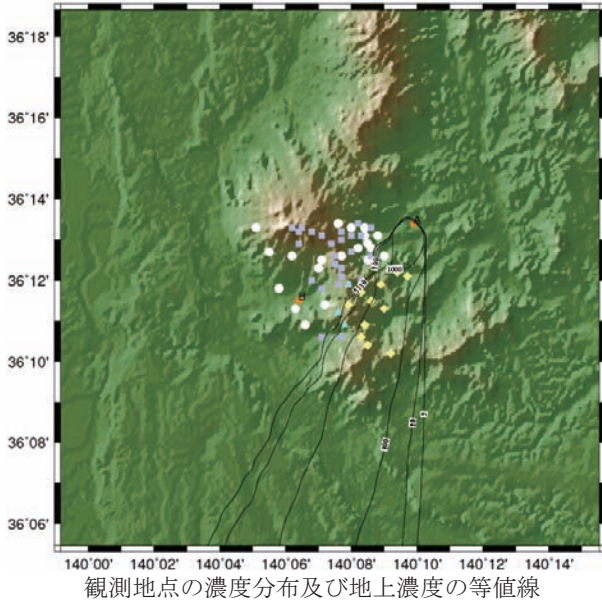
図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度とトレーサーガス放出時の気象の観測値 (2/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

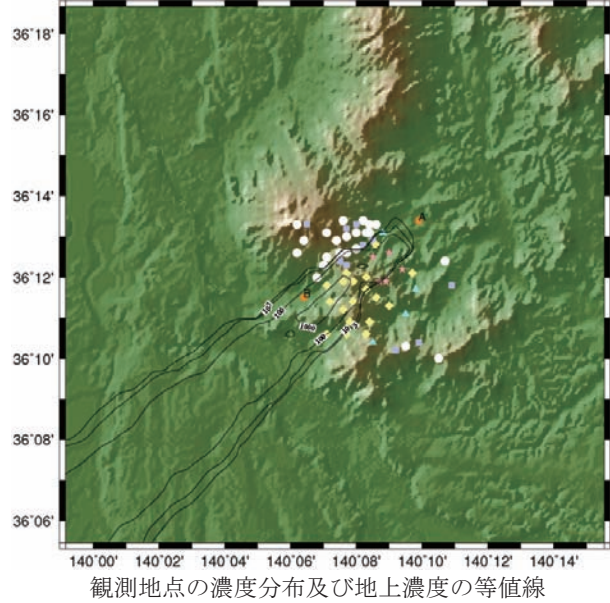
等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

1989/11/16 放出：A 地点
 放出期間 13:00-14:30(JST)
 捕集期間 14:00-14:30(JST)



1989/11/17 放出：A 地点
 放出期間 11:00-12:30(JST)
 捕集期間 12:00-12:30(JST)



トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
13:10	119	1005.7	11.8	75	NE	47	2.1
13:20	112	1006.5	11.8	77	NE	36	1.5
13:30	111	1006.6	11.7	76	NE	40	1.3
13:40	110	1006.6	11.7	77	NNE	28	1.3
13:50	108	1006.7	11.9	79	NNE	12	0.8
14:00	110	1006.7	11.9	77	N	352	0.9
14:10	109	1006.7	11.9	77	N	355	1.1
14:20	111	1006.6	12.0	77	N	353	1.5
14:30	109	1006.7	12.1	77	N	354	2.4
平均	—	1006.5	11.9	77	NNE	16	1.3

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：D

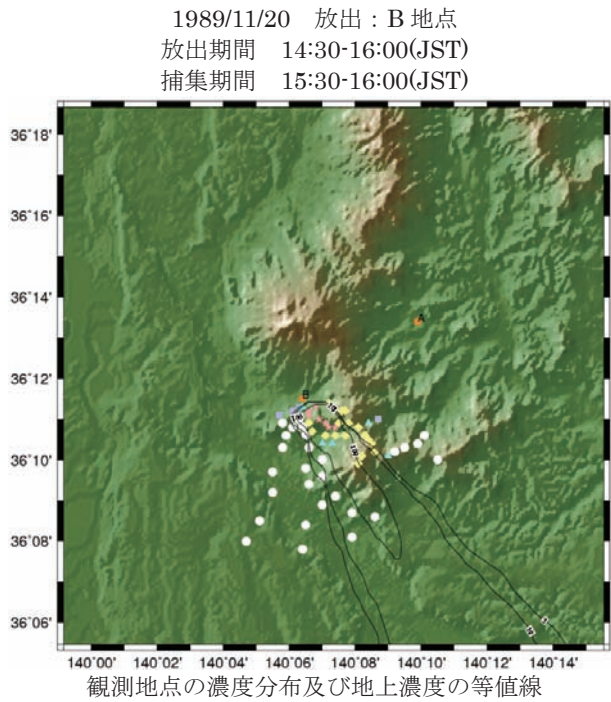
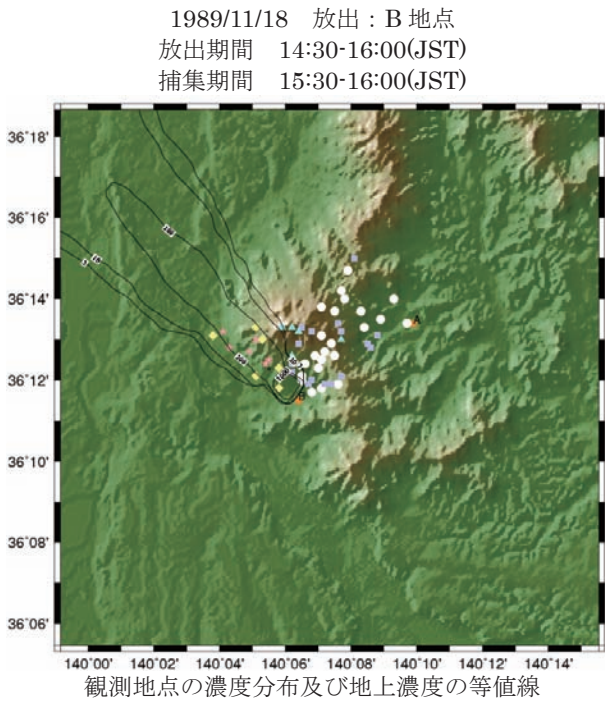
観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
11:10	94	1004.4	12.3	87	NE	55	3.5
11:20	91	1004.6	12.3	86	NE	53	3.7
11:30	96	1004.2	12.4	86	NE	53	3.1
11:40	92	1004.5	12.5	86	NE	50	3.9
11:50	90	1004.5	12.4	87	NE	56	3.6
12:00	91	1004.3	12.3	88	NNE	33	2.3
12:10	86	1004.5	12.3	88	NE	39	3.1
12:20	87	1004.3	12.3	88	NE	45	2.3
12:30	86	1004.5	12.4	88	NE	50	2.8
平均	—	1004.4	12.4	87	NE	49	3.1

図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度と
 トレーサーガス放出時の気象の観測値 (3/8)

- ：3ppt 以下の観測地点
- ：3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲：10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆：100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★：1000ppt より大きい観測地点

等値線：3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.



トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
14:40	105	994.7	15.4	68	SE	143	1.7
14:50	104	994.7	15.4	69	SE	137	1.4
15:00	106	994.6	15.3	68	SSE	152	1.8
15:10	105	994.6	15.3	68	SE	145	2.2
15:20	104	994.6	15.3	67	SSE	151	2.4
15:30	103	994.7	15.3	67	SSE	153	2.6
15:40	101	994.8	15.1	69	SE	133	2.8
15:50	99	994.9	15.0	70	SE	126	3.5
16:00	98	994.9	14.7	71	SE	126	4.3
平均	—	994.7	15.2	69	SE	138	2.5

トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
14:40	117	1001.3	12.5	38	NW	322	2.3
14:50	116	1001.5	12.6	38	NNW	333	3.4
15:00	117	1001.5	12.5	38	N	355	3.5
15:10	117	1001.6	12.6	39	NNW	329	3.9
15:20	119	1001.6	12.5	38	NNW	336	4.1
15:30	121	1001.5	12.4	38	NNW	340	2.9
15:40	121	1001.5	12.5	39	NNW	339	3.2
15:50	118	1001.7	12.3	39	WNW	298	4.6
16:00	119	1001.7	12.2	40	NW	306	3.9
平均	—	1001.5	12.5	39	NNW	328	3.4

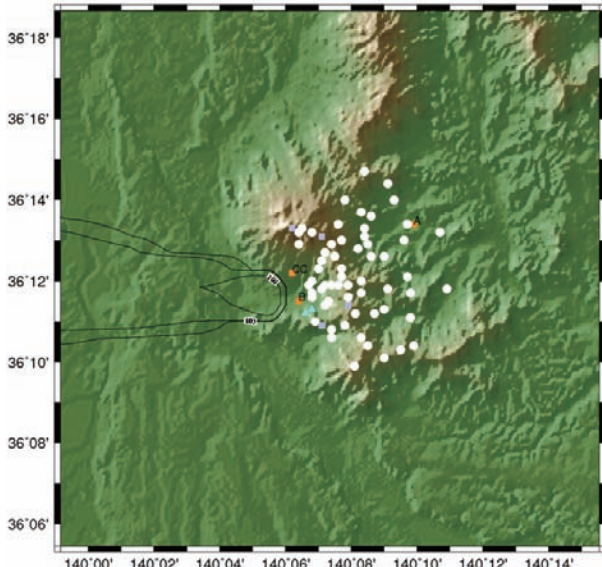
図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度と
トレーサーガス放出時の気象の観測値 (4/8)

- ：3ppt 以下の観測地点
- ：3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲：10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆：100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★：1000ppt より大きい観測地点

等値線：3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

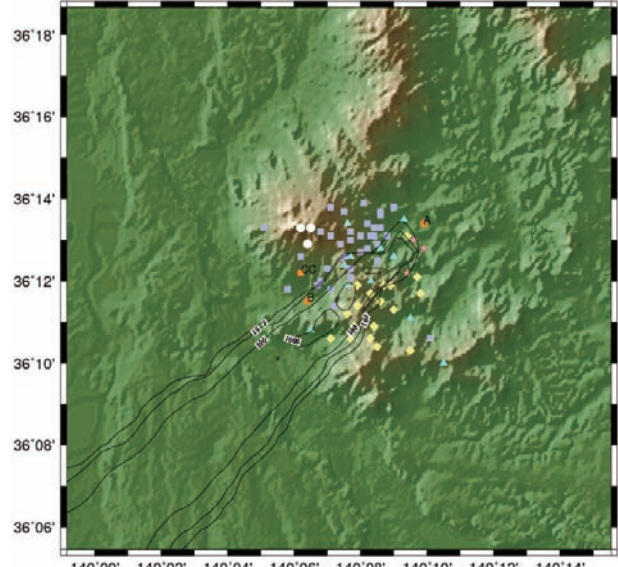
This is a blank page.

1990/11/08 放出：B地点
 放出期間 15:30-17:00(JST)
 捕集期間 16:30-17:00(JST)



観測地点の濃度分布及び地上濃度の等値線

1990/11/09 放出：A地点
 放出期間 10:30-12:00(JST)
 捕集期間 11:30-12:00(JST)



観測地点の濃度分布及び地上濃度の等値線

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：B

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
15:40	113	1001.9	19.1	40	SW	227	0.6
15:50	113	1002.0	18.9	44	ESE	106	1.2
16:00	115	1001.9	18.3	52	E	83	3.0
16:10	114	1002.1	17.7	56	E	86	3.7
16:20	114	1002.2	17.5	57	E	97	3.9
16:30	116	1002.2	17.8	56	E	100	4.6
16:40	116	1002.3	17.7	57	E	93	6.0
16:50	114	1002.6	17.6	57	E	94	6.6
17:00	116	1002.5	17.5	59	E	97	7.5
平均	—	1002.2	18.0	53	E	95	4.0

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：D

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
10:40	111	1004.7	13.8	69	NE	34	2.0
10:50	96	1005.5	13.8	69	NE	52	2.3
11:00	100	1005.1	13.9	69	ENE	62	2.8
11:10	98	1005.1	13.8	71	ENE	58	2.1
11:20	99	1004.9	13.7	73	ENE	66	1.8
11:30	95	1004.9	13.6	74	NE	53	1.5
11:40	90	1005.0	13.9	72	NE	47	2.2
11:50	86	1005.3	13.8	73	NNE	30	2.0
12:00	86	1005.2	13.8	74	N	354	1.7
平均	—	1005.1	13.8	72	NE	46	1.9

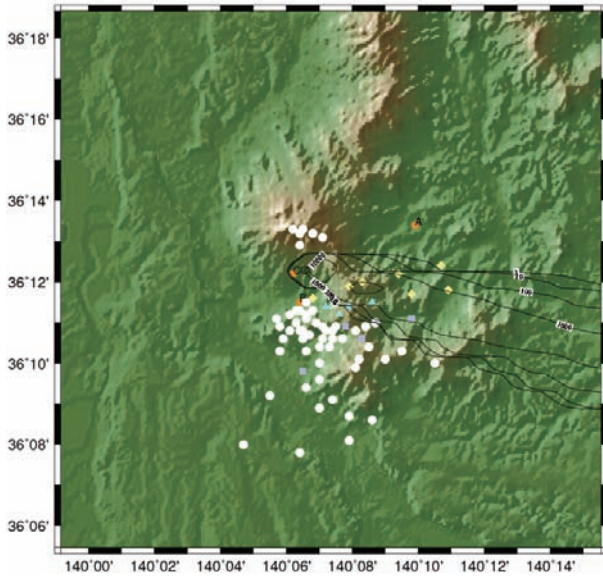
図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度とトレーサーガス放出時の気象の観測値 (5/8)

- ：3ppt以下の観測地点
- ：3pptより大きく10ppt以下の観測地点
- ▲：10pptより大きく100ppt以下の観測地点
- ◆：100pptより大きく1000ppt以下の観測地点
- ★：1000pptより大きい観測地点

等値線：3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

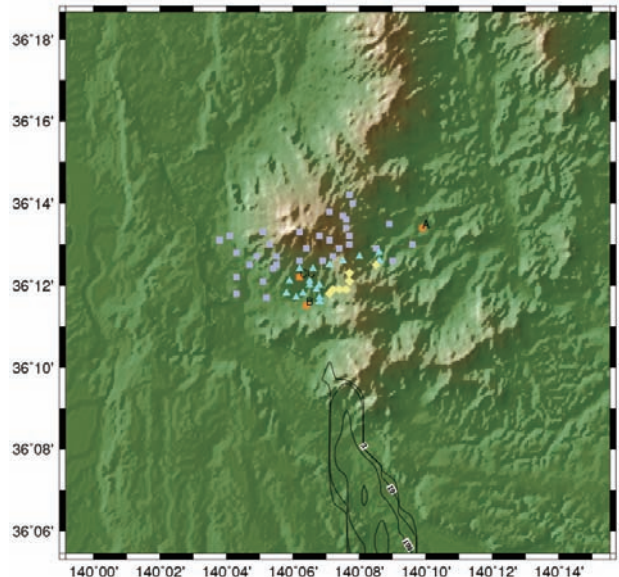
This is a blank page.

1990/11/10 放出：CC 地点
 放出期間 12:30-13:30(JST)
 捕集期間 13:00-13:30(JST)



観測地点の濃度分布及び地上濃度の等値線

1990/11/11 放出：B 地点
 放出期間 20:00-21:30(JST)
 捕集期間 21:00-21:30(JST)



観測地点の濃度分布及び地上濃度の等値線

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：D

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
12:30	5	978.5	19.2	—	N	0	1.2
12:40	5	978.6	19.7	—	NW	315	1.3
12:50	5	978.8	20.3	—	SE	135	0.6
13:00	5	978.6	19.5	—	WNW	292.5	1.1
13:10	5	978.6	19.3	—	SW	225	1.6
13:20	5	978.6	19.3	—	NW	315	1.2
13:30	5	978.6	19.5	—	SW	225	1.1
平均	—	978.6	19.5	—	WNW	284	0.6

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：F

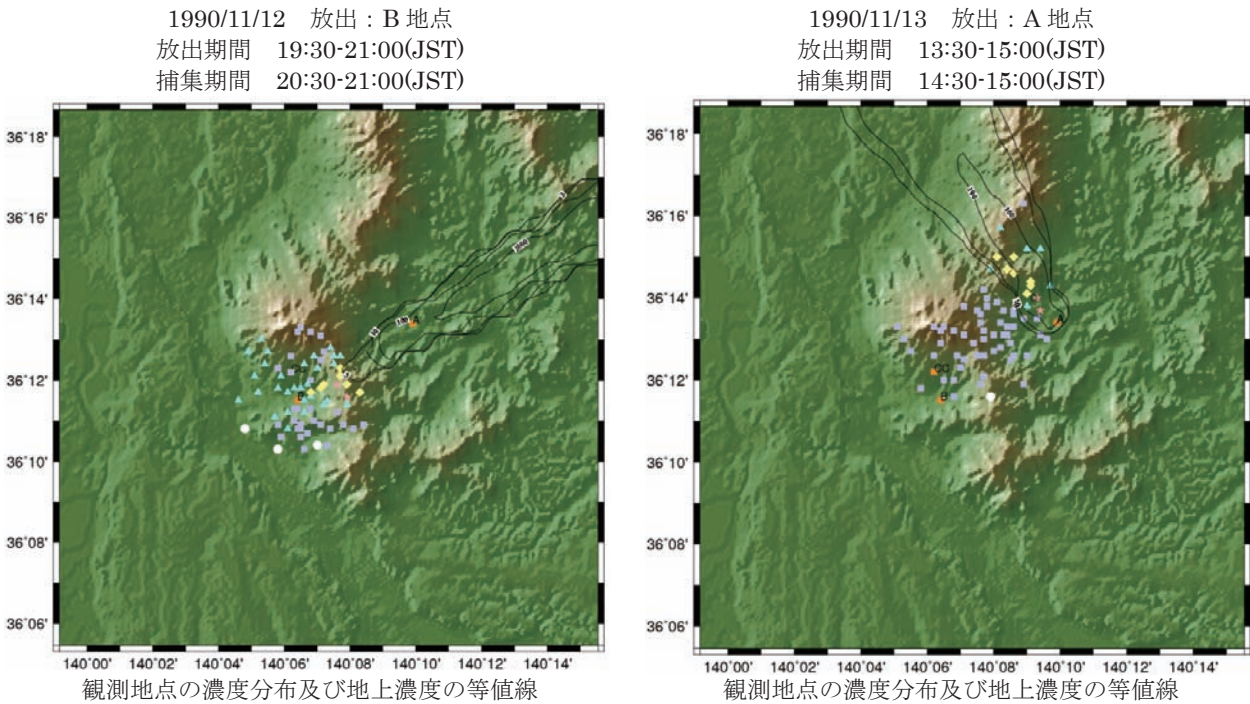
観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
20:10	94	1002.5	13.0	65	CLM	30	0.4
20:20	103	1001.5	13.0	67	CLM	70	0.1
20:30	100	1002.2	13.0	68	CLM	78	0.4
20:40	100	1002.1	13.0	69	CLM	92	0.3
20:50	101	1002.1	13.0	69	CLM	65	0.4
21:00	102	1002.1	13.0	70	NNW	333	0.5
21:10	103	1002.0	12.9	70	NW	319	1.1
21:20	105	1001.9	12.9	70	NW	325	1.6
21:30	106	1001.8	12.8	70	NNW	328	1.8
平均	—	1002.0	13.0	69	NNW	343	0.6

図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度とトレーサーガス放出時の気象の観測値 (6/8)

- : 3ppt 以下の観測地点
- : 3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲ : 10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆ : 100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★ : 1000ppt より大きい観測地点

等値線 : 3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.



トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：F

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
19:40	127	1003.1	16.3	85	CLM	234	0.2
19:50	128	1003.0	16.1	85	CLM	47	0.0
20:00	129	1003.0	16.2	85	CLM	252	0.1
20:10	130	1002.9	15.9	86	CLM	195	0.2
20:20	131	1002.8	15.9	86	CLM	227	0.4
20:30	131	1002.8	15.8	87	WSW	256	0.7
20:40	132	1002.8	15.6	87	CLM	207	0.1
20:50	132	1002.8	15.6	88	CLM	261	0.2
21:00	132	1002.8	15.7	86	CLM	75	0.0
平均	—	1002.9	15.9	86	WSW	239	0.2

トレーサーガス放出時の気象の観測値
大気安定度：B

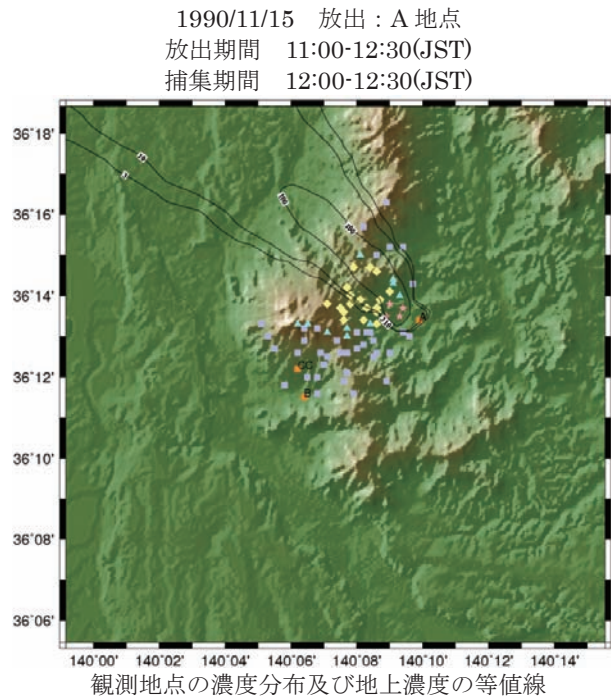
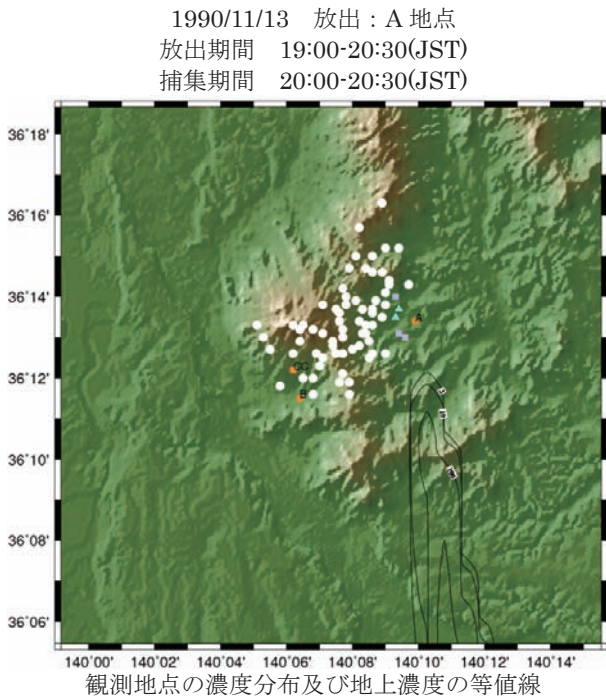
観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
13:40	113	1009.2	18.0	85	SSE	151	2.4
13:50	111	1009.3	18.1	84	SE	145	2.9
14:00	108	1009.6	18.1	83	SE	141	2.8
14:10	108	1009.6	18.1	85	SSE	159	2.4
14:20	107	1009.6	18.1	86	SE	145	2.4
14:30	106	1009.7	18.2	86	SE	142	2.0
14:40	107	1009.7	18.2	87	SSE	153	2.7
14:50	106	1009.8	18.2	87	SSE	148	2.1
15:00	108	1009.7	18.2	87	SSE	158	2.2
平均	—	1009.6	18.1	86	SSE	149	2.4

図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度と
トレーサーガス放出時の気象の観測値 (7/8)

- ：3ppt 以下の観測地点
- ：3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲：10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆：100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★：1000ppt より大きい観測地点

等値線：3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.



トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：F

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
19:10	123	1008.9	15.8	89	CLM	18	0.3
19:20	123	1008.9	15.9	89	CLM	15	0.0
19:30	123	1008.9	15.9	89	CLM	357	0.0
19:40	123	1008.8	16.0	89	CLM	358	0.0
19:50	123	1008.8	16.0	89	CLM	338	0.0
20:00	120	1008.9	16.1	89	N	350	0.8
20:10	119	1008.9	16.1	89	N	354	1.0
20:20	119	1008.9	16.2	88	NNW	340	1.0
20:30	119	1008.9	16.3	88	N	4	0.7
平均	—	1008.9	16.0	89	N	353	0.4

トレーサーガス放出時の気象の観測値
 大気安定度：A

観測値 時分	高度 [m]	気圧 [mb]	気温 [°C]	湿度 [%]	風向 (方位)	風向 [deg]	風速 [m/s]
11:10	115	1000.4	16.8	87	SE	141	1.3
11:20	114	1000.5	16.9	88	SE	141	1.9
11:30	112	1000.6	17.0	88	SE	128	2.0
11:40	112	1000.5	17.1	88	SE	126	2.0
11:50	109	1000.6	17.1	88	ESE	121	1.9
12:00	106	1000.8	17.2	88	SE	136	2.0
12:10	107	1000.7	17.3	88	SE	135	2.1
12:20	104	1000.9	17.4	88	SE	139	2.1
12:30	104	1000.9	17.5	88	SSE	148	1.8
平均	—	1000.7	17.1	88	SE	135	1.9

図 4-5 筑波山周辺における観測地点の濃度分布、ガウスプルームモデルによる地上濃度と
 トレーサーガス放出時の気象の観測値 (8/8)

- ：3ppt 以下の観測地点
- ：3ppt より大きく 10ppt 以下の観測地点
- ▲：10ppt より大きく 100ppt 以下の観測地点
- ◆：100ppt より大きく 1000ppt 以下の観測地点
- ★：1000ppt より大きい観測地点

等値線：3ppt、10ppt、100ppt、1000ppt、10000ppt

This is a blank page.

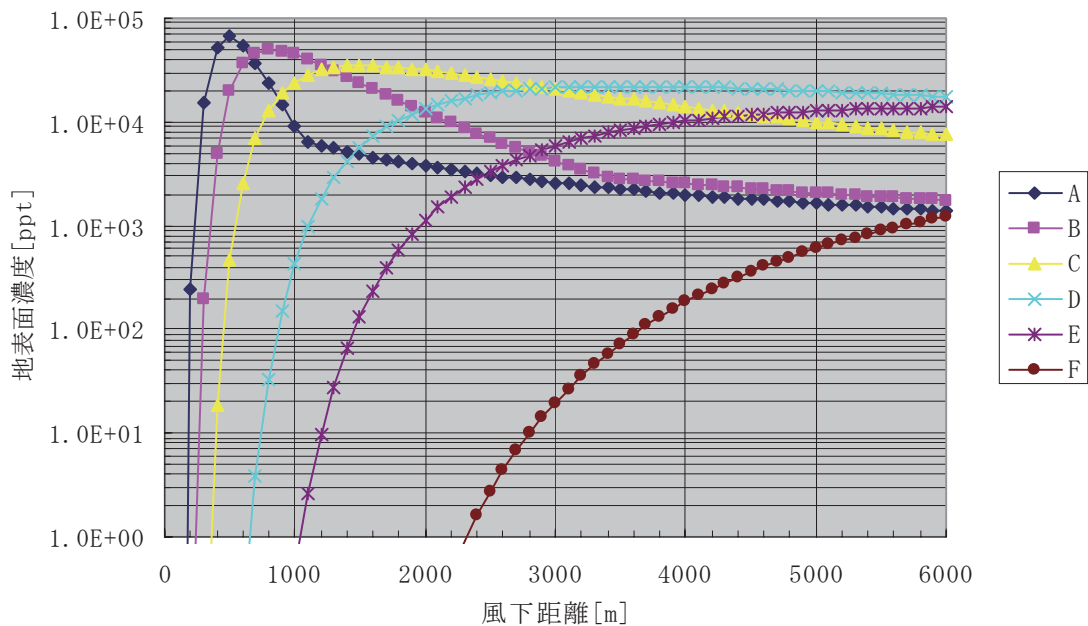


図 4-6 1990年11/12 (放出高 120m、風速 0.2m/s) の放出に対するガウスプルームモデルによる風下距離の地表面濃度

This is a blank page.

5. 評価モデルの妥当性

観測や実験により得られた実測値に対して、モデルによる評価値の妥当性を統計的な手法により定量的に評価した。統計的なモデルの妥当性評価のためのソフトウェアとして、Model Validation Kit (Hanna et. al., 1991) を使用した。

はじめに Model Validation Kit の概要を説明し、拡散試験の濃度実測値に対する 2 つの評価モデルの妥当性評価結果を示す。

5.1. Model Validation Kit の概要

Model Validation Kit は、米空軍と米国石油協会が協賛した“Hazard Response Modeling Uncertainty (A Quantitative Method)”という 2 年間のプロジェクトで開発されたモデルの妥当性評価のためのソフトウェア群である。これらソフトウェアは、プログラミング言語として Fortran77 で開発され、コマンドラインから実行するようになっている。Model Validation Kit は 3 つのソフトウェア、①統計的なモデル評価ソフトウェア (BOOT)、②科学的なモデル評価ソフトウェア (RESIDUAL)、及び③2 次元プロットパッケージ (SIGPLOT) から構成されている。BOOT は実測値とモデル評価値から妥当性評価のための統計量を計算する。さらにブートストラップリサンプリング法を使用して、求めた統計量の信頼区間が推定できる。RESIDUAL は、原始変数 (primary variable、例えば風速や大気安定度) に対して、実測値とモデル評価値との残差 (モデル評価値/実測値のように比で表す) の変動をボックスプロットで表す。SIGPLOT は、BOOT で計算された Fractional Bias (FB) と Normalized Mean Square Error (NMSE) の FB-NMSE 図、及び RESIDUAL で評価されたボックスプロットをポストスクリプト形式で描画する (ただし、ポストスクリプトにするには SIGPLOT の出力を PS.EXE で処理する必要がある)。

BOOT で計算可能なモデル妥当性評価のための統計量は、Fractional Bias (FB)、Geometric Mean Bias (MG)、Normalized Mean Square Error (NMSE)、Geometric Mean Variance (VG)、Correlation Coefficient (R)、Fractional Variance (FS)、Fraction within a factor of two (FAC2) である。それぞれ次のように定義されている。

- Fractional Bias (FB)

$$FB = \frac{\overline{C_0} - \overline{C_p}}{0.5(\overline{C_0} + \overline{C_p})} \quad (5-1)$$

- Geometric Mean Bias (MG)

$$MG = \exp(\overline{\ln C_0} - \overline{\ln C_p}) \quad (5-2)$$

- Normalized Mean Square Error (NMSE)

$$NMSE = \frac{\overline{(C_0 - C_p)^2}}{C_0 C_p} \quad (5-3)$$

- Geometric Mean Variance (VG)

$$VG = \exp\left\{\overline{(\ln C_0 - \ln C_p)^2}\right\} \quad (5-4)$$

- Correlation Coefficient (R)

$$COR = \frac{\overline{(C_0 - \overline{C_0})(C_p - \overline{C_p})}}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_0}} \quad (5-5)$$

- Fractional Variance (FS)

$$FS = \frac{\sigma_{C_0} - \sigma_{C_p}}{0.5(\sigma_{C_0} + \sigma_{C_p})} \quad (5-6)$$

- Fraction within a factor of two (FAC2)

FAC2 = 0.5 ≤ C_p/C₀ ≤ 2 となるデータの割合

ここで、C₀は観測値で、C_pはモデル評価値である。上付きのバーは平均値を表し、σは標準偏差を表す。MG及びVGは対象とする値が指数的な変化をするときに使用する。なお、本検討ではMG及びVGではなく、FG及びNMSEによる評価を行った。

FBは0より大きいとき過小評価、0より小さいとき過大評価であることを示し、-2から+2の間の範囲をとる。一方、MGは0と1の間のとき過小評価、1より大きいとき過大評価を表す。完全なモデルのときFBとNMSEは共に0で、MGとVGは共に1となる。

また、FBとNMSE及びMGとVGには次のような関係がある。

$$NMSE \geq \frac{4FB^2}{4 - FB^2} \quad (5-7)$$

$$VG \geq \exp\{(\ln MG)^2\} \quad (5-8)$$

なぜならば、

$$\overline{(C_0 - C_p)^2} \geq (\overline{C_0} - \overline{C_p})^2$$

$$\overline{(\ln C_0 - \ln C_p)^2} \geq (\overline{\ln C_0} - \overline{\ln C_p})^2$$

式(5-7)及び(5-8)の関係式はFBやMGが与えられたとき、最小のNMSEやVGがこの関係式から評価できることを示している。FB-NMSE曲線及びMG-VG曲線は、それぞれ図5-1及び図5-2に示すように下に凸な関数である。

5.2. 妥当性評価

拡散試験におけるトレーサーガスの濃度測定値とRAMS/HYPACT及びガウスプルームモデルによる濃度評価値に対して、Model Validation KitのBOOT及びSIGPLOTを用いて、2つのモデルの妥当性評価を行った。拡散試験データは1989年(放出8回)及び1990年(放出8回)の2回実施されており、合計16回分ある。それぞれの拡散試験における捕集地点の濃度測定値には、検出下限値以下(3ppt以下)のデータも含まれている。これらは不定なデータであるため、妥当性評価では考慮しないこととした。各拡散試験におけるデータ数及び3pptより大きいデータ数を表5-1に示す。

1989年及び1990年の全拡散試験データを使用した統計解析結果を表5-2に示す。また、各年の傾向を見るために各年だけを使用した統計解析結果も同表に示した。観測値とモデル評価値との間の差異、及び過大過小評価の程度はFB-NMSE図から知ることができる。全データ及び各年のデータに対するFB-NMSE図を図5-3に示す。図5-3から全データを用いた評価では、RAMS/HYPACT及びガウスプルームモデル共に過小評価の傾向にあり、RAMS/HYPACTの評価の方が観測値との差異が小さい。しかし、1989年のFB-NMSE図を見るとガウスプルームモデルの方が観測値との差異が小さくなっているが、1990年ではガウスプルームモデルの方が大きく観測値と異なっている。全データを使用したガウスプルームの結果は、この1990年の結果に大きく影響されたと考えられる。

そこで、1989年及び1990年の各拡散試験データに対する統計解析を行った。それらの統計解析結果を表5-3及び表5-4に示す。また各年の各拡散試験データに対するFB-NMSE図を図5-4及び図5-5に示す。1989年の統計解析からNMSEはすべてガウスプルームモデルの方が小さく、相関RもRAMS/HYPACTよりも良い結果となっている。なお、1989/11/14と11/20のRAMS/HYPACTの観測地点の濃度は、前者がすべてゼロ、後者が2地点のみの評価となっており、異常な統計解析結果となっている。一方、1990年では11/08、11/11、11/12、11/13(20:00)でガウスプルームモデルの統計解析が異常な結果となっている。観測地点におけるガウスプルームモデルの濃度が11/08、11/11、11/13(20:00)ではすべてゼロ、11/12では1pptよりも小さな値が4地点となっている。これらの拡散試験は、11/08がほとんど検出下限値以下で観測地点の配置が不適切な場合で、11/11、11/12、11/13(20:00)は静穏風で大気安定度Fの場合である。静穏風のときは、濃度が風速の逆数に比例するガウスプルームモデルでは評価が困難になる。しかも大気安定度がFのため拡がり小さく、高所から放出された物質は放出点近くでは、地面に到達しないために地表面濃度がゼロとなった。

全体の拡散試験データからの統計解析によれば、モデルの性能はRAMS/HYPACTの方

が優れていることになる。しかし、個別の拡散試験データの解析をみるとガウスプルームモデルの方が優れている場合が多く、静穏風のときの大きな差異が原因となって、性能を低下させている。

表 5-1 各拡散試験における濃度観測データ数及び 3ppt より大きいデータ数

拡散試験の実施日時	観測データ数	3ppt より大きいデータ数
1989年		
11/13 14:30-16:00	60	30
11/14 13:00-14:30	61	42
11/15 10:00-11:30	62	40
11/15 14:30-16:00	63	51
11/16 13:00-14:30	60	40
11/17 11:00-12:30	60	38
11/18 14:30-16:00	58	35
11/20 14:30-16:00	61	33
合計	485	309
1990年		
11/08 15:30-17:00	67	6
11/09 10:30-12:00	69	66
11/10 12:30-13:30	69	15
11/11 20:00-21:30	58	58
11/12 19:30-21:00	71	68
11/13 13:30-15:00	70	69
11/13 19:00-20:30	71	5
11/15 11:00-12:30	70	70
合計	545	357
1989・1990年の合計	1030	714

(注意) 時刻は日本標準時 (JST) を表す。

表 5-2 1989年、1990年の拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果

モデル	平均	標準偏差	バイアス	NMSE	R	FAC2	FB	FS
1989年及び1990年の合計サンプル(666個)								
観測値	253	726	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	160	449	92.7	18.91	-0.042	0.051	0.449	0.470
プルーム	141	880	112	32.83	0.113	0.089	0.567	-0.193
1989年の合計サンプル(309個)								
観測値	368	862	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	118	420	250	23.09	-0.035	0.042	1.028	0.688
プルーム	152	393	217	12.14	0.393	0.159	0.834	0.747
1990年の合計サンプル(357個)								
観測値	152	564	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	196	470	-43.6	18.56	-0.026	0.059	-0.250	0.182
プルーム	132	1150	20.6	79.37	0.027	0.028	0.145	-0.680

表 5-3 1989 年の各拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果

モデル	平均	標準偏差	バイアス	NMSE	R	FAC2	FB	FS
1989/11/13 15:30-16:00 のサンプル(30 個)								
観測値	6.93	10.1	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	35	188	-28.1	135.04	0.956	0.0	-1.339	-1.796
プルーム	4.07	21.2	2.87	5.19	0.963	0.033	0.521	-0.707
1989/11/14 14:00-14:30 のサンプル(42 個)								
観測値	513	1020	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	—	—	—	—	—	—	—	—
プルーム	117	273	396	17.66	0.382	0.119	1.256	1.156
1989/11/15 11:00-11:30 のサンプル(40 個)								
観測値	154	212	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	73.7	178	80.5	8.36	-0.158	0.025	0.706	0.172
プルーム	89.3	145	64.9	2.01	0.692	0.4	0.533	0.376
1989/11/15 15:30-16:00 のサンプル(51 個)								
観測値	266	316	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	129	222	137	4.21	0.171	0.118	0.694	0.348
プルーム	103	183	162	3.41	0.573	0.157	0.88	0.533
1989/11/16 14:00-14:30 のサンプル(40 個)								
観測値	92.2	159	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	125	442	-33.1	9.75	0.775	0.075	-0.304	-0.941
プルーム	107	310	-14.9	4.82	0.75	0.2	-0.149	-0.643
1989/11/17 12:00-12:30 のサンプル(38 個)								
観測値	426	530	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	189	505	237	6.59	0.117	0.053	0.771	0.05
プルーム	276	577	149	4.77	0.123	0.053	0.425	-0.084
1989/11/18 15:30-16:00 のサンプル(35 個)								
観測値	601	1040	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	395	895	206	10.11	-0.252	0.029	0.414	0.15
プルーム	192	440	409	8.37	0.525	0.057	1.033	0.811
1989/11/20 15:30-16:00 のサンプル(33 個)								
観測値	955	1790	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	1.00E-03	5.66E-03	955	4301678	-0.065	0.0	2.0	2.0
プルーム	347	691	608	9.33	0.385	0.212	0.934	0.885

表 5-4 1990 年の各拡散試験の観測値とモデル評価値との統計解析結果

モデル	平均	標準偏差	バイアス	NMSE	R	FAC2	FB	FS
1990/11/08 16:30-17:00 のサンプル(6 個)								
観測値	7.83	4.56	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	10.6	23.6	-2.72	8.05	-0.376	0.0	-0.296	-1.352
プルーム	—	—	—	—	—	—	—	—
1990/11/09 11:30-12:00 のサンプル(66 個)								
観測値	269	932	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	158	317	111	24.37	-0.098	0.045	0.52	0.984
プルーム	146	410	123	28.03	-0.071	0.045	0.591	0.777
1990/11/10 13:00-13:30 のサンプル(15 個)								
観測値	97.4	99.1	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	0.0871	0.263	97.3	2273.3	0.194	0.0	1.996	1.989
プルーム	2010	5140	-1910	151.63	0.417	0.0	-1.815	-1.924
1990/11/11 21:00-21:30 のサンプル(58 個)								
観測値	32.6	59.1	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	389	704	-356	44.82	0.686	0.034	-1.69	-1.69
プルーム	—	—	—	—	—	—	—	—
1990/11/12 20:30-21:00 のサンプル(68 個)								
観測値	109	268	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	313	657	-204	15.18	0.07	0.044	-0.966	-0.841
プルーム	0.0077	0.0627	109	99497.6	0.363	0.0	2.0	1.999
1990/11/13 14:30-15:00 のサンプル(69 個)								
観測値	141	633	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	195	321	-53.5	18.64	-0.014	0.087	-0.319	0.655
プルーム	54.9	199	86.2	50.06	0.238	0.058	0.88	1.044
1990/11/13 20:00-20:30 のサンプル(5 個)								
観測値	8.8	5.19	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	10.9	5.8	-2.07	0.92	-0.391	0.4	-0.211	-0.11
プルーム	—	—	—	—	—	—	—	—
1990/11/15 12:00-12:30 のサンプル(70 個)								
観測値	229	545	—	—	—	—	—	—
RAMS/HYPACT	30.3	119	199	52.48	-0.102	0.071	1.533	1.285
プルーム	49.5	147	180	23.24	0.546	0.043	1.289	1.148

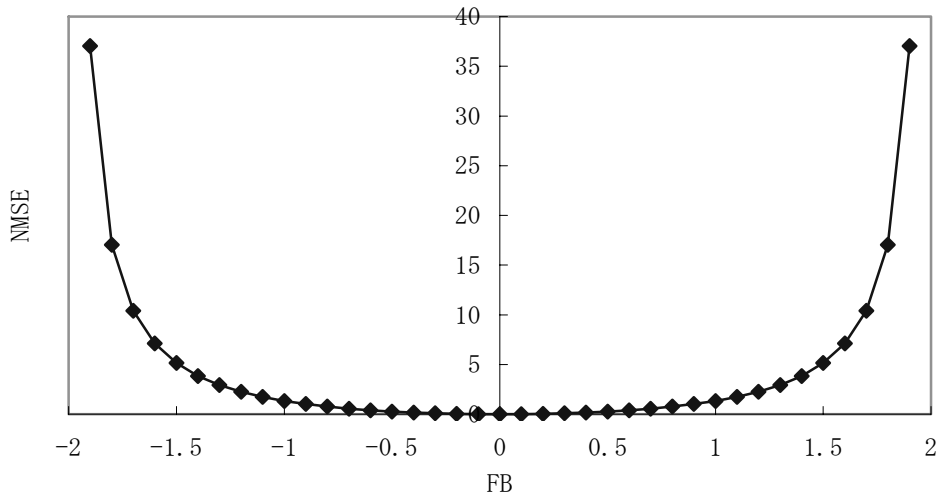


図 5-1 FB-NMSE 曲線

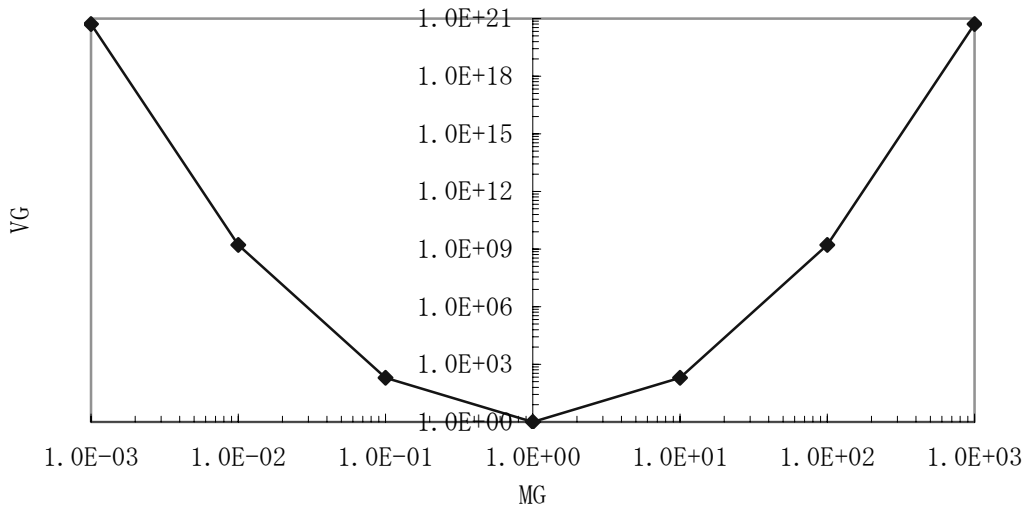
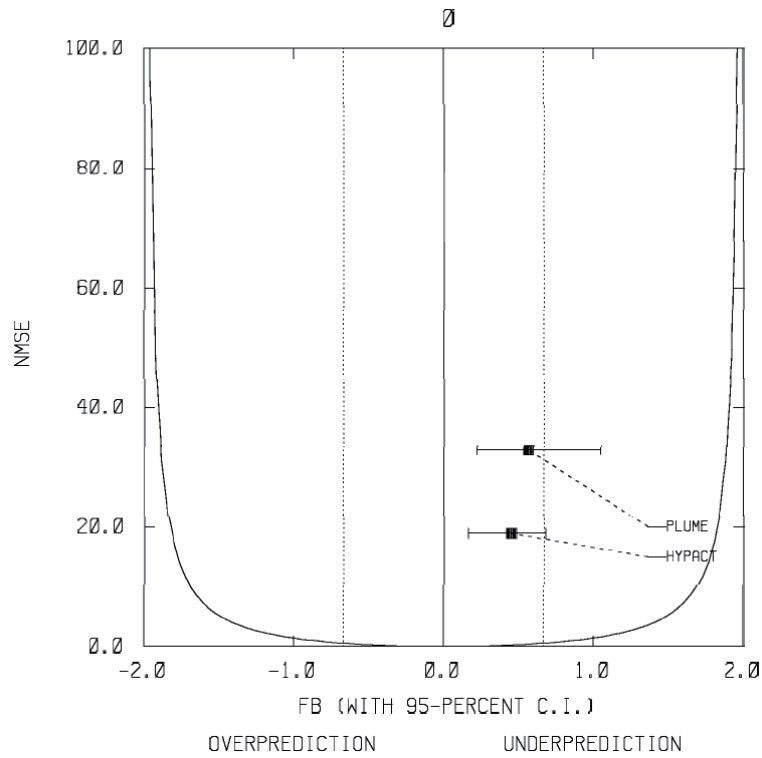
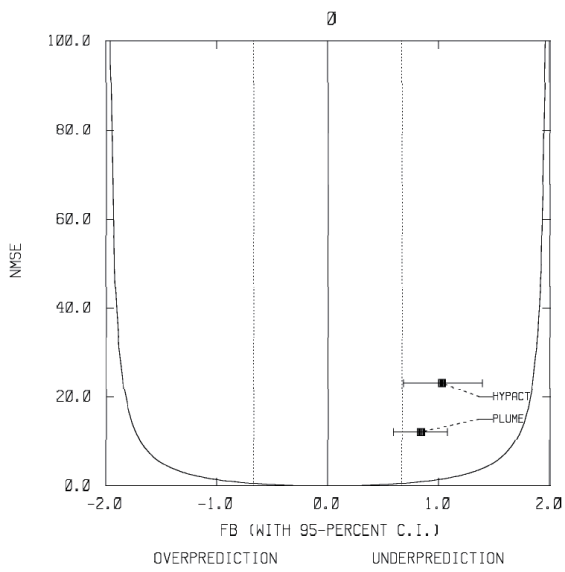


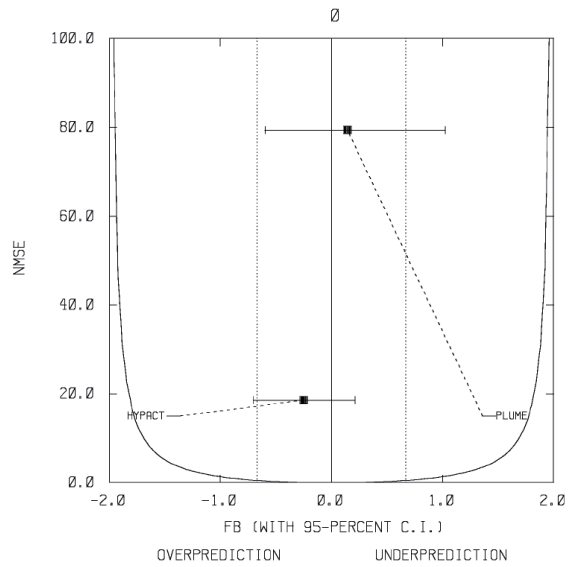
図 5-2 MG-VG 曲線



1989年及び1990年の合計サンプル



1989年の合計サンプル



1990年の合計サンプル

図 5-3 1989年、1990年の拡散試験の合計サンプルによる FB-NMSE 図

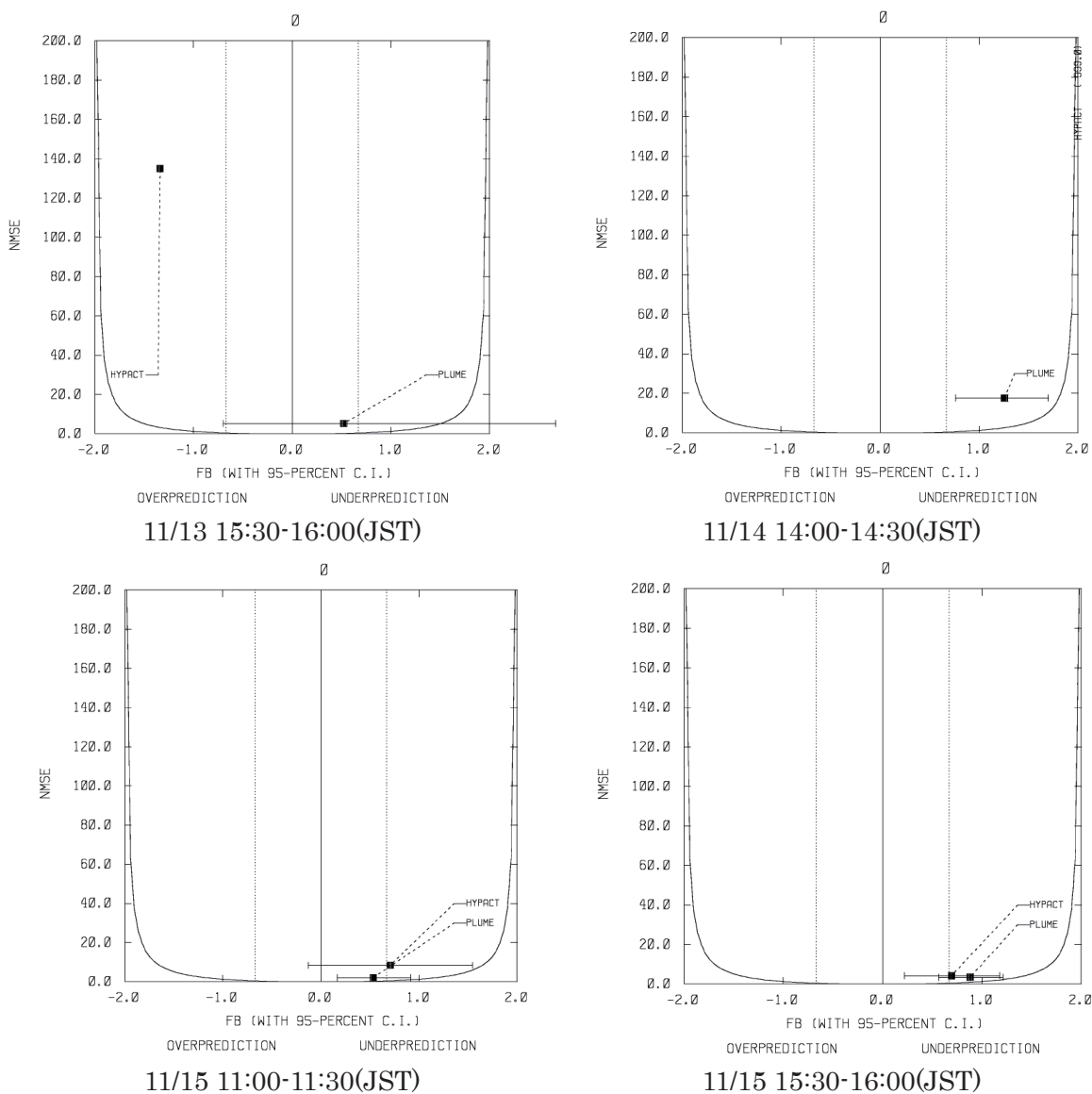


図 5-4 1989年の拡散試験の各サンプルによる FB-NMSE 図 (1/2)

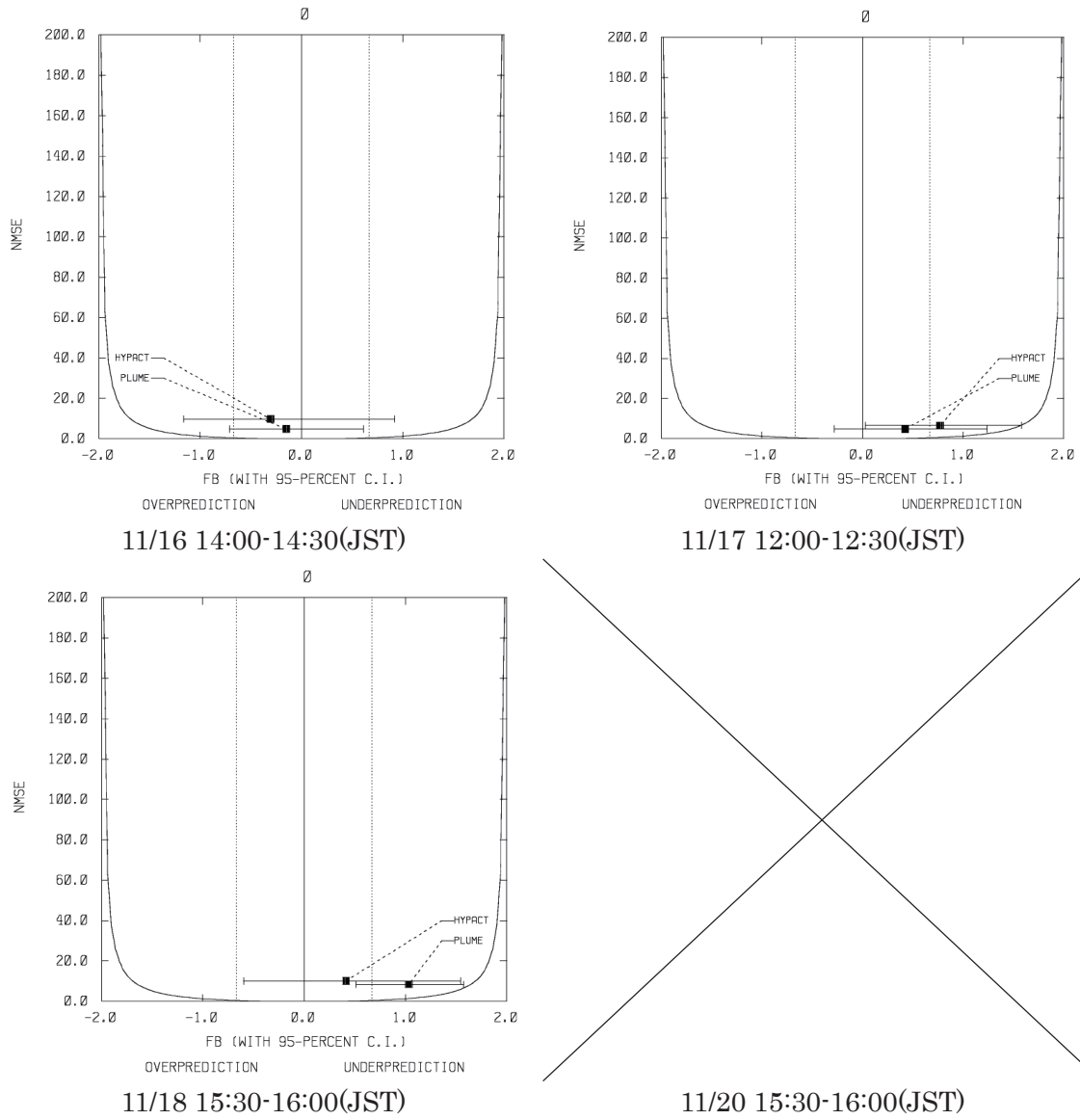


図 5-4 1989 年の拡散試験の各サンプルによるFB-NMSE図 (2/2)

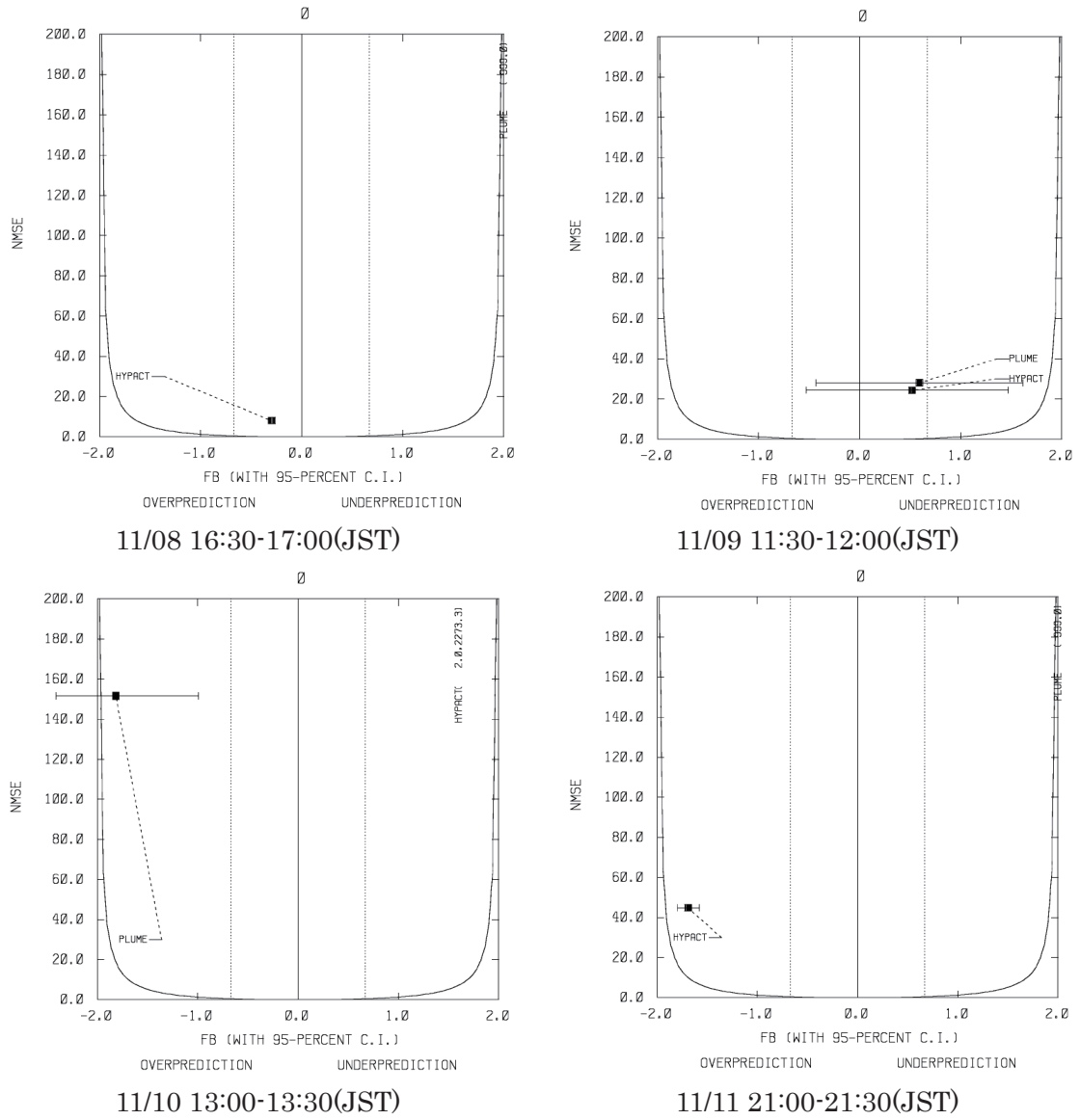


図 5-5 1990年の拡散試験の各サンプルによる FB-NMSE 図 (1/2)

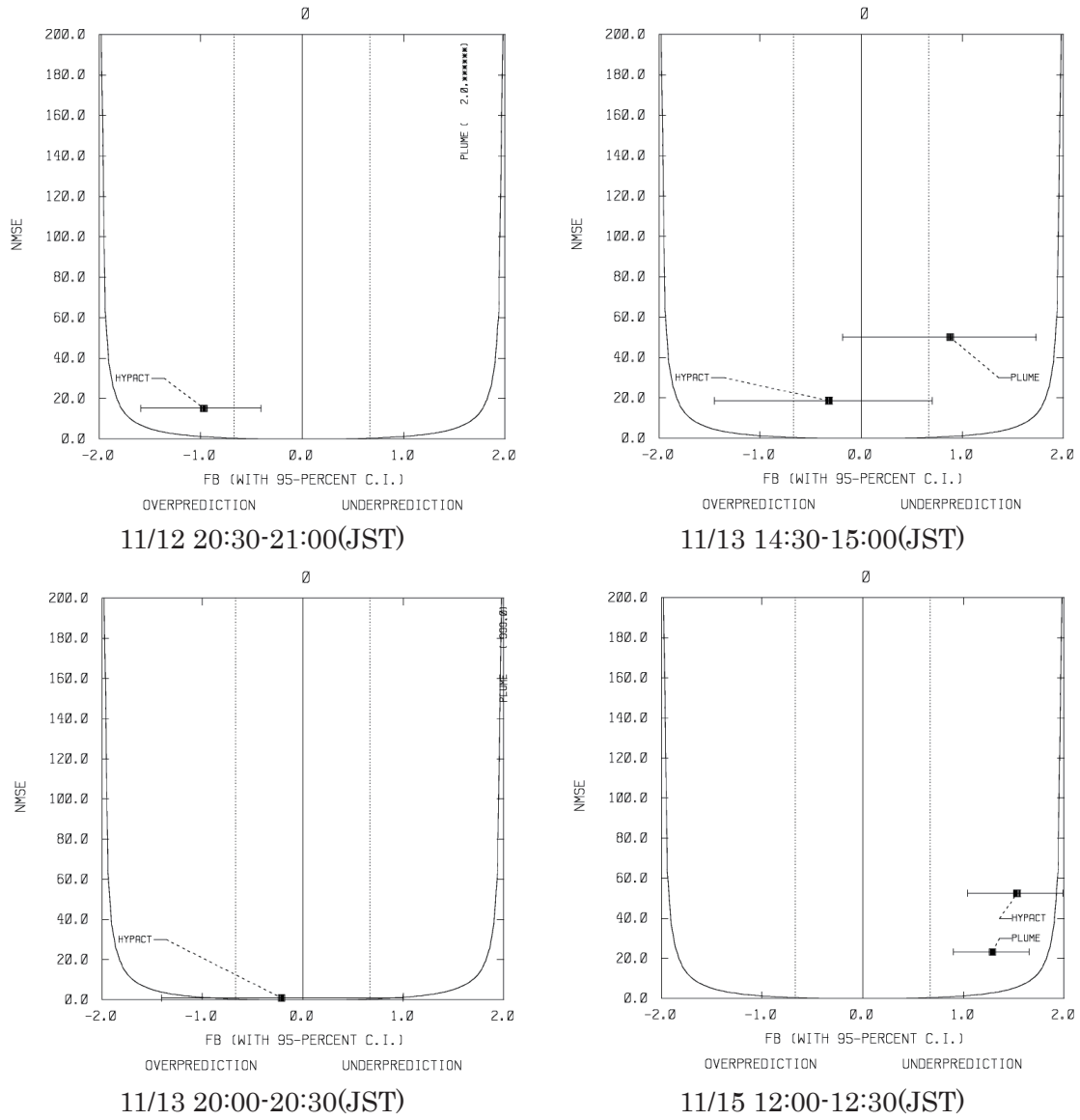


図 5-5 1990 年の拡散試験の各サンプルによるFB-NMSE図 (2/2)

6. まとめ

1989年、1990年に日本原子力研究所が大気拡散評価手法の安全性・妥当性を実証するために、筑波山周辺部で狭域野外拡散試験を実施した。本試験は、トレーサーガスを16回放出し濃度分布の実測を行い、同時に気象観測も行っている。本研究では、これら実測値に対して、詳細な気象予報コード RAMS と大気拡散評価コード HYPACT、及び簡易な大気拡散評価モデルのガウスプルームモデルとの評価結果を比較検討し、Model Validation Kit を用いた統計解析によってモデルの妥当性評価を行った。これらの評価から得られた結果について以下にまとめた。

- RAMS/HYPACT 評価における濃度等値線及び平均風速ベクトルからトレーサーガスが流れていく方向は、平均風速の方向となっている。RAMS による風速場の予測が実際の風速場と異なっていると、HYPACT による濃度分布の予測はずれることとなる。すなわち、RAMS による風速場の予測が濃度分布の予測には重要である。
- ガウスプルームモデルによる高濃度分布の方向と観測の高濃度分布の方向は、ほぼ一致している。このことから濃度分布は、複雑な地形であったとしても放出地点の風向に依存すると考えられる。ただし静穏風の場合、ガウスプルームモデルによる評価は、実際の濃度分布と大きく異なる。
- 全拡散試験データによる妥当性評価では、RAMS/HYPACT による評価の方がガウスプルームモデルよりも優れた性能を有している結果であったが、1989年の拡散試験データだけの評価では、ガウスプルームモデルの方が優れた性能を示した。1990年の拡散試験では3つの静穏風条件があり、これらがガウスプルームモデルの性能を悪くしている1つの原因だった。

RAMS/HYPACT は、乱流モデルや様々なパラメタリゼーションを考慮した詳細な気象予報及び大気拡散コードであるが、気象庁から発表されている天気予報からも明らかなように気象予測は一般的に難しい。RAMS で予測された風速場が実際の風速場と異なっていたならば、いくら詳細な大気拡散モデルを使用している HYPACT で濃度分布を予測しても実際の分布と異なってしまふ。

放出点近傍では放出物質の流れていく方向は、周辺部が複雑な地形であっても放出地点の風向風速に支配されている。このため放出地点から十数キロ範囲内で気象が一定と考えられるような短時間の濃度分布に対しては、複雑な地形であったとしてもガウスプルームモデルによる評価の方が優れている。ただし、静穏風の場合は、ガウスプルームモデルによる評価は困難で、静穏風の場合のモデル (McGuire et al., 2007) で評価するとより一致していくと考えられる。このことは今後検討していきたい。

謝辞

株式会社 ヴィジブル インフォメーション センター 黒澤直弘氏、城戸寛子氏には、RAMS/HYPACT 関連で多くの助言を頂いた。深く感謝致します。

参考文献

林隆, 茅野政道, 山澤弘実, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 小島啓美 (1999a). 狭域野外拡散試験データ (筑波 89) . JAERI-Data/Code 99-036

林隆, 茅野政道, 山澤弘実, 森内茂, 石川裕彦, 安達隆史, 小島啓美 (1999b). 狭域野外拡散試験データ (筑波 90) . JAERI-Data/Code 99-037

内閣府原子力安全委員会事務局 (2003). 原子力安全委員会指針集 大成出版社

Chen, C. and W.R. Cotton (1983). A one-dimensional Simulation of the Stratocumulus-capped Mixed Layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 25, pp.289-321.

Deardorff, J.W. (1980). Stratocumulus-capped Mixed Layers Derived from a Three-dimensional Model. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, pp.495-527.

Fast, Jerome D., B. Lance O'Steen and Robert P. Addis (1995). Advanced Atmospheric Modelling for Emergency Response. *Journal of Applied Meteorology*, 34, pp.626-649.

Hanna, S.R., D.G. Strimaitis and J.C. Chang (1991). Hazard Response Modeling Uncertainty (A Quantitative Method) Volume I , User's Guide for Software for Evaluating Hazardous Gas Dispersion Models.

Homma, T., K. Tomita and S.Hato (2005). Uncertainty and Sensitivity Studies with the Probabilistic Accident Consequence Assessment Code OSCAAR. Korean Nuclear Society.

Imai, K., M. Chino, H. Ishikawa, M. Kai, K. Asai, T. Homma, A. Hidaka, Y. Nakamura, T. Iijima and S. Moriuchi (1985). SPEEDI: A Computer Code System for the Real-Time Prediction of Radiation Dose to the Public due to an Accidental Release. JAERI 1297

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne and Dennis Joseph (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, pp.437-472.

Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S-K. Yang, J.J. Hnilo, M. Fiorino and G.L. Potter (2002). NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 83, pp.1631-1643.

Kuo, H.L. (1974). Further Studies of the Parametrization of the Influence of Cumulus Convection on Large-scale Flow. *J. Atmos. Sci.*, 31, pp.1232-1240.

Louis, J.F. (1979). A Parametric Model of Vertical Eddy Fluxes in the Atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.*, 17, pp.187-202.

Mahrer, Y. and R.A. Pielke (1977). A Numerical Study of the Airflow over Irregular Terrain. *Beitrage zur Physik der Atmosphere*, 50, pp.98-113.

McGuire, S.A., J.V. Ramsdell, Jr. and G.F. Athey (2007). RASCAL 3.0.5:Description of Models and Methods, NUREG-1887

Mellor, G.L. and T. Yamada (1974). A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *J. Atmos. Sci.*, 31, pp.1791-1806.

Mesinger, F. and A. Arakawa (1976). Numerical Methods used in Atmospheric Models. GARP Publication Series, No.17, WMO/ICSU Joint Organizing Committee.

Molinari, J. (1985). A General form of Kuo's Cumulus Parameterization, *Mon. Wea. Rev.*, 113, pp.1411-1416

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量であるが次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m kg s ⁻²	m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C	s A	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V s	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K	K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー当量, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat	s ⁻¹ mol	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。
 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェモト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	エクソ	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _H =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「=」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

