



## 複雑地形上での拡散モデルの開発について\*

岡本 眞一\*\*・塩沢 清茂\*\*\*

山間地域などに建設される工場などの環境影響評価に関連して、複雑地形上での煙の移流と拡散を表現できる拡散モデルの開発が各方面で実施されている。このような研究は各国で行われているが、とくにアメリカにおいては最近に、いくつかの大規模な調査研究が行われたので、その概要をここに紹介し、この分野の研究動向についても述べる。

### 1. はじめに

複雑地形上のモデルは最近の拡散モデル開発に関する研究分野において、最も注目されている分野であり、1980年代以降、アメリカ気象学会等の拡散モデルに関する講演会において酸性雨に関連する長距離輸送モデルとともに、最も発表件数の多いテーマとなっている。とくにアメリカ EPA の CTMD 計画、エネルギー省 (DOE) の ASCOT 計画が開始された直後の 1980~82 年頃には全体の 1/6 程度を占めていた。

これらの複雑地形上の拡散モデルおよびそれに関連する現地調査についての総説は長沢, 他 (1986), 北林 (1986), 市川, 西宮 (1987) などに詳しく述べられているので、ここでは重複をさけて、それ以降の研究報告を中心に、若干のコメントを加えることにする。

Pickering and Koch (1980) は Clinch River 発電所周辺での測定データに基づくモデル評価について報告している。Hanna, *et al.* (1984) は Potmac 川の峡谷の中にある Westvaco Luke 工場周辺での 1 年以上にわたる SO<sub>2</sub> 濃度などの測定データに基づいて、拡散モデルの評価を行っている。Clinch River 発電所, Westvaco Luke 工場での観測は長期間のデータ収集に重点を置いたものであり、これらのデータに基づく解析および拡散モデルの評価も行われている。ASCOT 計画, CTMD 計画がともに短期間に集中的な観測および実験を行っているのとは対照的である。このうち, Westvaco でのデータは EPA による拡散モデル性能評価についての研究においても、データベースとして利用されている。

アメリカでは、1970年代の前半に南西部に建設が予定された大容量石炭火力発電所の環境影響調査のために複雑地形上の拡散モデルが使用されたが、それ以降、行政上の必要性が高まり、1976年にエネルギー研究開発局 (U.S. Energy Research and Development Administration; ERD) が「Research Needs for Atmospheric Transport and Diffusion in Complex Terrain」という討論会 (workshop) を開催した。この討論会で提唱された調査の総予算は 2000~3000 万ドル、期間は 3~5 年であった。この会議の提言は後の ASCOT 計画, CTMD 計画の基礎ともなっている。

### 2. 複雑地形地域での発電所排煙調査計画

アメリカ EPA ではエネルギー研究開発局 (ERD)

\* On the development of the diffusion model in complex terrain.

\*\* Shin'ichi Okamoto, 東京情報大学経営情報学部.

\*\*\* Kiyoshige Shiozawa, 早稲田大学理工学部.

第1表 Clinch River 発電所での拡散計算に用いられたモデルの諸元 (Pickering, *et al.*, 1980 より引用)

番号	モデル名称	特 徴
# 1	FLAT TERRAIN	平坦地として扱う (EPA の PTMTP モデルと同様)
# 2	CRSTER H	ブルーム主軸高度Hは地形に沿って変化する. (全時間について)
# 3	NOAA H	ブルーム主軸高度Hは地形に沿って変化する. (安定時のみ)
# 4	GEOMET H	Hは地形変化の60%の範囲で変化する. (安定時のみ) ただし, 初めのHの40%以下にはならないとする.
# 5	VALLEY H	Hは地形に沿って変化する. (安定時のみ) ただし, Hは10 m以下にはならない.
# 6	ERT-LAPPES H	Hは地形変化の50%で変化する. (中立不安定時) 安定時には, 地形変化の65~100%の範囲で変化する.
# 7	GEOMET $\sigma_y$ (# 6)	拡散幅 $\sigma_y$ を安定度によって PG 線図の値 ( $\sigma_{yPG}$ ) の1~3倍とする.
# 8	LAPPES $\sigma_y$ (# 6)	$\sigma_y = 1.43 \sigma_{yPG}$ (中立, 不安定時) $\sigma_y = 1.43 / (0.4 U^{0.3})$ (安定時)
# 9	LAPPES $\sigma_y$ (# 4)	—
# 10	GEOMET $\sigma_y$ (# 4)	—
# 11	SMITH $\sigma_z$ (#10)	$\sigma_z = 1.5 \sigma_{zPG}$
# 12	PASQUILL $\sigma_z$ (#10)	$\sigma_z = (\sigma_{zPG}^2 + 0.1 \Delta H^2)^{1/2}$
# 13	WIND EXT. (#10)	$U_P = U_{361} (H/361)^P$ ; P は安定度により変化
# 14	PASQUILL $\sigma_y$ (#13)	$\sigma_y = \sigma_A \cdot X \cdot f(x)$ $f(x) = (1 + 0.0308 x^{0.4548})^{-1}$ ; $x \leq 10 \text{ km}$ $f(x) = 0.333(10000/x)^{1/2}$ ; $x > 10 \text{ km}$

(注) U: 風速,  $\sigma_{yPG}$ : Pasquill-Gifford 図の拡散幅,  $\Delta H$ : 排煙上昇高度,  
 $\sigma_A$ : 風向の標準偏差, X: 風下距離

と共同で山間地域に建設される火力発電所の排煙の影響を調査するためのエネルギー/環境・研究開発計画を実施した。1970年代に入り超高压送電が可能となり、都市部から炭鉱に近い遠隔地に大容量石炭火力発電所の建設地域が移る傾向にあった。このような発電所の排煙に対する地形の起伏の影響を調査する研究を1975年に着手し、第1期の文献調査の結果は Koch, *et al.* (1978) によりまとめられている。

第2期調査では、バージニア州の Clinch River 火力発電所およびその周辺において現地調査を実施している。Clinch River 発電所は出力 712 MW であり、高さ 138 m の煙突 2 本を有している。測定は 1976 年 6 月 ~ 1977 年 9 月までの 16 か月間実施された。この調査では発電所の周囲 30 km の範囲内に 8 か所の常設測定局を設置して、 $SO_2$ ,  $NO_x$  などを測定した。この他に、移動測定車による測定、パイバル観測 (1日2回)、煙道中での  $SO_2$ ,  $NO$  濃度の連続測定、ヘリコプターによる煙流測定 (10日間程度) なども行っている。これらの測定

計画などは Koch, *et al.* (1979) が報告している。

第3期調査では、現地調査データの解析およびモデルについての検討を行っている。これらの解析結果は Pickering and Koch (1980) が報告しており、その要旨は以下のとおりである。

(i) 稜線上の測定点では、夜間に最高濃度が出現するが、明確な日周変化は見られない。

(ii) 谷の中の測定点では、フェミゲーションによると思われる午前中のやや遅い時間に高濃度汚染が生じている。

(iii) 正規型ブルームモデルでは、1時間ごとの濃度変化を予測することは不可能であるが、最高濃度の期待値を予測する上で有効な推定値を得ることは可能である。

この拡散モデルについての検討では、第1表に示すような14種のモデルを用いている (Pickering and Koch, 1980)。#1のPTMTPモデルは平坦地を対象とした正規型ブルームモデルである。#2~#14は地表面の起

伏によりブルーム主軸高度、拡散幅、輸送風速に修正を加えたモデルである。#2~#6はブルーム主軸高度に修正が加えられたモデルである。#7~#12、#14は拡散幅、#13は風速についての修正モデルである。

各測定点でのSO<sub>2</sub>濃度測定値とモデル計算値との比較を行っており、各測定点での有効データ数は約4,000である。また、ここでは、バックグラウンド濃度による補正も行われている。

地表面の起伏を考慮せずに、平坦地同様に計算する#1モデルに比較して、地表面の高低によりブルーム主軸高度を変化されるCRSTERモデル、VALLEYモデルなどの評価がかならずしも良いとはいえない場合もある。また、当該地域での風向変動幅を用いて拡散幅 $\sigma\theta$ を推定すれば、平均二乗誤差や相関係数で評価される予測性能は向上することが確かめられた。以上の結果より、すべての正規型ブルーム式のモデルでは1時間ごとのSO<sub>2</sub>濃度を十分な精度で予測することはできない。それは、当該地域における50%以上の時間について出現する複雑な風系のためであると述べられている。しかし、長期間において出現する可能性のある最高濃度の期待値を評価するためには、正規型ブルーム式は有効な情報を提供していることも示している。

### 3. DOE-ASCOT 計画

アメリカ・エネルギー省(DOE)はエネルギー開発においても環境保全についての責任を負っている。とくに、コロラド州、ワイオミング州に広がるオイルシェール(油母頁岩)地域の開発など未利用エネルギー資源の開発に関連して、地形の複雑な山間地域における環境アセスメント手法の開発は不可欠な問題となってきた。このため、1978年にDOEは複雑地形地域での大気研究(Atmospheric Studies in Complex Terrain-ASCOT)計画を開始した。このASCOT計画の目的は下記の2点である(Dickerson and Gudiksen, 1980)。

(i) 地形の複雑な地域における大気中での汚染物質の輸送と拡散についての基礎的な知識の集積をはかること。

(ii) この知識に基づいて、大気環境のアセスメント手法を確立すること。

このASCOT計画の詳細はGudiksen and Dickerson (1983), Dickerson and Gudiksen (1983)などに述べられている。ASCOT計画では、初期における重点課題を、夜間の斜面降下流(drainage flow)中での汚染物

質の移流・拡散とした。これは、エネルギー開発地域での住民や農作物への影響を考慮した場合、最も重要かつ緊急の課題であると考えられたからである。そして、現地調査対象地域として、地熱開発計画がすでに開始されていたカリフォルニア州北部のGeysers地域を選定した。Geysers地域では1979~1981年に3回にわたり現地調査が実施された。1979年7月のAnderson Creek峡谷での観測は予備的なものであり、1980年9月には同じ谷でさらに大規模な調査が実施された。Anderson Creek峡谷は浅く短い谷である。1981年8月には、V字型の谷であるBig Sulphur Creek峡谷でほぼ同規模の調査が実施された。この観測では、1980年には17、1981年には13の研究機関が参加している。なお、ASCOT計画では、Geysers地域以外にRattlesnake山、Corral Gulchなどにおいても若干の観測が行われている。

ASCOT計画のモデリング・グループに与えられた課題は下記の2項目である。

(i) 斜面降下流(drainage流)の発達、持続、消滅の過程を解析できるような研究用の数式モデルを開発すること。

(ii) 地形が複雑であり、夜間に斜面降下流が卓越する地域において、硫化水素などの汚染物質を排出した場合の影響を評価できるような実用的なモデルを開発すること。

このモデリング・グループには、7カ所の研究機関が参加し、10種以上のモデルが検討されている。ここに示されているモデルは、汚染物質の移流拡散を記述するものと、風系や乱れの分布を記述するものに分けることができる。そして、さらに後者のモデルは下記の5種類に分割される。

- (i) 解析的モデル
- (ii) 診断的モデル
- (iii) 流体力学的モデル
- (iv) 単層モデル
- (v) 統計的モデル

これらの各モデル及び1979~1981年の現地調査については、近藤(1985)、北林(1986)などにも紹介されているので、この程度の説明にとどめておく。

なお、1982、1984年にはBrush Creek峡谷において気象観測、エアートレーサー拡散実験を行っており、この地域での風の分布の計算などはYamada(1985)が報告している。

第2表 アメリカ EPA による複雑地形モデル開発 (CTMD) プロジェクトの概要

年度	1	2	3	4	5
現地実験	Cinder Cone Butte (CCB)	—	Hogback Ridge (HBR)	Tracy 発電所 (予備実験)	Tracy 発電所 (Full Scale Plume Study: FSP S)
データ解析	—	事例研究(CCB)	予備的解析 (HBR)	CCB, HBR データによる CTDM モデルの検討	高濃度時解析(CC B, HBR, FSPS) CCB,HBR データによる CTDM モデルの検討
モデル開発 モデル性能評価 (CTDM以外の 対象モデル)	(CTDM)* (Valley COMPLEX I, II Potential Flow)	(CTDM)**	CTDM(14083) (Valley COMPLEX I, II (CCB database))	CTDM (COMPLEX (C CBのみ), 1/2 高 度補正モデル(H BRのみ), 平坦地 モデル (CCB, H BR database))	CTDM(12185) (COMPLEX,I,II Valley RTDM (FSPS data base))

\* Impingment and Neutral model と呼んでいる。

\*\* Wrap and Lift model と呼んでいる。

#### 4. EPA-CTMD 計画

アメリカでは、西部山間地域におけるエネルギー開発が進み、大容量石炭火力発電所周辺での環境影響調査の必要性が生じてきた。このような場合に適用できる拡散モデルとして、EPA では、Valley モデル (Burt, 1977) CRSTER モデルなどを開発してきた。これらのモデルでは、安定大気時には、有効煙突高度と地表面高度の関係により、排煙が直接に地表に接触したり、著しくプルーム主軸高度 (地表面に対する相対高度) が低くなるように計算される。このような状況下における実測データが不足しているため、上記の仮定についての明確な判断が下せないまま、このプルームと地表との接触 (plume impaction) の問題が論争的となっていた。

このため、安定大気時における煙突よりも高い場所でのプルーム接触時の挙動を解明し、そのような状況を記述できるような拡散モデルの開発および改良を目的として、Complex Terrain Model Development (CTMD) 計画を1980年に開始した。当初計画は、5カ年計画で1985年春までに全作業を終了し、受託者は成果を発表するシンポジウムを開催し、報告書をEPAへ提出することになっていたが、最終報告書の提出は延期されていた\*\*\*。このCTMD計画に先だって、複雑地形上での拡散問題についての討論会 (workshop) が開催され、こ

のCTMD計画についての調査内容などが検討された (Hovind, *et al.*, 1979)。なお、この討論会でまとめられた内容は ERD 討論会の提言よりはかなり圧縮されたものとなっている。

このCTMD計画の主要目的は、上で述べたように、環境影響評価などの行政目的に利用できるモデルを開発することであり、このモデルは既知の予測性能を有し、限定された条件の範囲において1時間平均値を求めることが可能なものである。

この目的を達成するために、小規模な丘 (孤立丘と2次元的な横長の丘) 2地区と実際の山間地にある発電所1地区において現地実験を行っている。これらの計画の概要を第2表に示す。ここでは、1985年の第5年次報告書までの範囲を紹介した。

CTMD計画では、4回の現地調査 (エアートレーサー拡散実験、気象観測など) を行っている。その概要を第3表に示す。

Cinder Cone Butte (CCB) での観測では、150 m 気象観測塔の他、30 m 1本、10 m 4本の観測塔において、風向、風速、気温差、風の乱れなどを測定している。トレーサー拡散実験は延18日間行われ、SF<sub>6</sub> と CF<sub>3</sub> Br の2種のトレーサーについて合計14,000検体のサンプルが得られている。

Hogback Ridge (HBR) での観測においても、ほぼ同様に、150 m 観測塔などにより気象観測が実施され、この他に、SF<sub>6</sub> と CF<sub>3</sub> Br によるトレーサー拡散実験

\*\*\* 最終報告書が最近提出された。  
Strimaitis, D.G. *et al.*, 1987: EPA Complex terrain model development: final report PB 886-260

第3表 CTMD 計画での現地調査の概要

時期	場所	地形の特徴など
1980年10月	Cinder Cone Butte(CCB)	平坦地の中の孤立した円錐型の丘 (標高差 100 m 程度)
1982年10月	Hogback Ridge (HBR)	2次元的な丘 (標高差 85 m 程度)
1983年11月	Tracy 発電所	一予備調査一
1984年8月	同上	一本調査一 (Full Scale Plume Study: FSPS)

が行われた。拡散実験では15日間に延べ90時間程度のトレーサー噴霧が行われ、この実験により得られた総検体数は約19,000 (SF<sub>6</sub> と CF<sub>3</sub>Br の合計) であった。

Tracy 発電所での現地調査は電力研究所 (EPRI) の PMV & D 計画との協同調査となっており、CCB, HBR 地区での調査よりも大規模なものとなっている。

Tracy 発電所の3号機は出力 120 MW のガス燃焼発電プラントであり、排煙は 91.4 m の煙突から排出されている。アメリカ西部地域では、最近に建設された発電所の平均出力が 600 MW から 250 MW 程度に低くなっており、Tracy 発電所は著しく小規模であるとは考えられず、発電所側の協力度なども考慮の上で選定された。

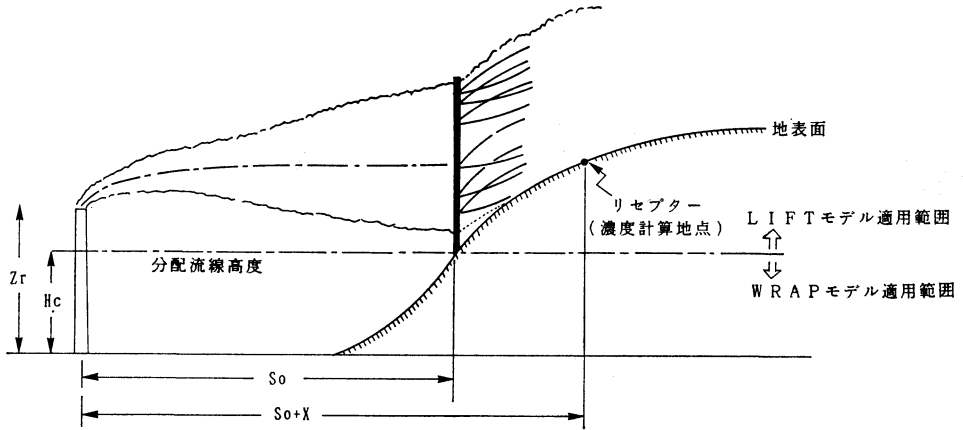
Tracy 発電所での Full Scale Plume Study (FSPS) 調査では、150 m 観測塔の他、10 m 観測塔4カ所、係留気球2カ所、ソーダー3カ所、レーダー追跡気球1カ所などの気象観測を実施している。また、PMV & D 研究機関による上空からのライダーによる煙流観測なども行われている。トレーサーは2種類使用され、煙道に SF<sub>6</sub> が注入され、観測塔から CF<sub>3</sub>Br が噴霧されている。トレーサーの捕集地点は110カ所であり、合計14日間に延べ128時間 (1日に10時間程度連続噴霧) の実験を行い、11600検体のデータが収集されている。

Tracy 発電所はガス燃焼のため、通常は排煙をみることができない。このため、トレーサー噴霧の時間帯 (延べ115時間) について、oil-fogによる煙の可視化を行い、合計11,700枚の写真とビデオテープによる撮影を行っている。

EPA の CTMD 計画の一環として、複雑地形地域への適用が可能な拡散モデルとして、Environmental Research and Technology(ERT)社は Complex Terrain Dispersion Model (CTDM) モデルを開発した。

この CTDM モデルは孤立丘 (isolated hill) の周囲における気流と拡散についての理論に基づく、点発生源を対象としたブルームモデルである。この CTDM モデルの主要構成要素は分配流線高度 (dividing-streamline height)  $H_c$  の概念である。この  $H_c$  よりも上にある気塊は、山に近づいた際に、その稜線を越えるのに必要なエネルギーを有しており、山の頂上を乗り越えて風下側へ流れてゆく。一方、 $H_c$  よりも下にある気塊は、山の頂上を越えることができず、山の側面を迂回して、風下側へ流れてゆく。したがって、大気が安定になるほど、 $H_c$  は高くなり、地形に沿った流れが支配的になる。この概念は Hunt *et al.* (1979) などの風洞実験に基づくものであるが、Ryan *et al.* (1984) は Steptoe Butte での拡散実験データを用いて、この理論の検証を行っている。

CTDM モデルでは、分配流線高度  $H_c$  より上の部分を扱うサブモデル (LIFT モデル) と  $H_c$  より下の部分を扱う WRAP モデルの2つの要素を含んでいる。この2つのサブモデルの概要は第1図のように示される。このモデルでは、風上側の山腹の地表面高度が  $H_c$  となる風下距離を  $S_o$  とし、 $S_o$  における風向と直角な鉛直断面内に、その場所における濃度に相当する多数の仮想上の発生源を置き、さらにその風下での濃度は、これらの仮想上の発生源についての全重合濃度であると仮定している。ただし、濃度計算地点 (リセプター) の標高が  $H_c$  よりも高い場合には、 $H_c$  よりも下にある仮想発生源の影響はないものとし、 $H_c$  よりも下にあるリセプターについては  $H_c$  よりも下にある仮想発生源のみが寄与すると仮定している。なお、WRAP モデルでは、山の風上側で2つに分岐する気流の片方のみが、リセプターに影響を及ぼすので、分岐点を通る流線 (Stagnation streamline) のどちらか一方のリセプター側の仮想発生源の影響のみを計算する。したがって、WRAP モデル



第1図 CTDM モデルの模式図

第4表 CTMD 計画での Tracy 発電所周辺における実験データに基づく各モデルの性能評価 (最高濃度での実測値  $C_{M,max}$  と予測値  $C_{P,max}$  の比率)  
(DiCristofaro, et al., 1985 のデータに基づいて作成)

モデル名称	$C_{M,max}/C_{P,max}$
VALLEY	0.11 ~ 0.42
COMPLEX- I	0.34 ~ 5.69
COMPLEX- II	0.12 ~ 3.35
RTDM	2.9 ~ 16.7
RTDM (Briggs 拡散幅)	0.23 ~ 5.84
TCDM	0.96 ~ 6.33

(予備的な14データに基づく評価)

モデルなどの性能評価についても検討を加えており, Cinder Cone Butte などでのデータによる評価結果も発表している. しかし, CTDM モデルについては第2年次報告から第5年次報告まで, 毎回, 改良, 修正が加えられており, この時点では最終的な推奨モデルは示されていない. また, EPA では, この CTMD 計画とは別に拡散モデルの性能評価についての研究も実施しており, この中に複雑地形地域の拡散モデルも含まれている. この結果は, Wachter and Londergan (1984) などが報告している.

ここでは, CTMD 計画の中で実施されたモデル評価の一例を紹介する. 第5年次報告においても, Tracy 発電所での拡散実験データベースは完成されていないので, 予備的な14例のデータを用いて, CTDM モデル, COMPLEX モデルなどの評価を行っている. この結果を第4表に示す.

では, リセプターの Y 座標 (風向に直角な水平方向) が正の場合

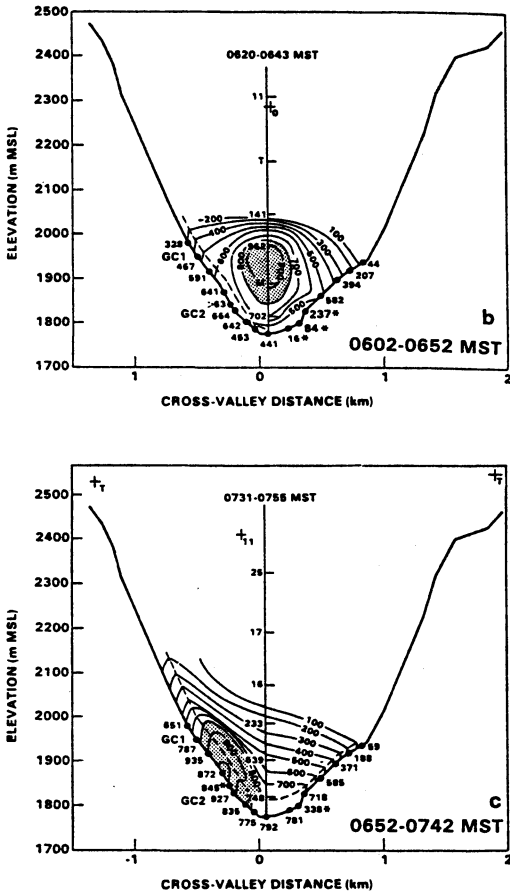
$$C = \int_0^{Hc} \int_{(0)}^{(\infty)} dc(s_0, s_y) = \int_0^{Hc} \int_{(0)}^{(\infty)} c(s_0) dydz \quad (1)$$

により濃度が計算される. ただし, リセプターの Y 座標が負の場合は, Y 方向積分区間は  $(-\infty)$  から  $(0)$  となる. また, 個々の点源 (仮想源を含む) からの濃度分布は正規型ブルーム式で記述されるものとしているので, 式 (1) などは誤差関数 (error function) を含む解析解で表現されている.

CTMD 計画では上記 CTDM モデルの他に, 以前に EPA が発表した VALLEY モデル, COMPLEX I, II

### 5. GRAMA 計画

ワイオミング州, ユタ州, コロラド州にまたがるロッキー山脈中部の Green River 流域には大量のオイルシェールが埋蔵されており, その開発が計画されている. このため, EPA では, この地域での開発プロジェクトに関する環境影響評価方法の確立を目的とした Green River Ambient Model Assessment (GRAMA) 計画に着手した. 現在, この計画は, エネルギー省 (DOE) との協同研究となっており, Pacific Northwest Laboratory (PNL) を中心として, 各研究機関が参加した大規模な調査となっている. さらに, この GRAMA 計画と DOE



第2図 Brush Creek 峡谷での拡散実験結果の一例 (Whiteman, et al., 1984 より引用)

の ASCOT 計画との間でも、研究計画の調整がはかられており、1982年には、PNL が開発したモデルの検証に適した Brush Creek 峡谷において、ASCOT 計画と協同で現地調査が行われている。Brush Creek 峡谷は第2図に示すような深いV字形の谷であり、両側からの大きな支流の流入はない。1982年の実験は3回行われ、早朝に3~6時間 SF<sub>6</sub> を約 100 m の高度から噴霧し、谷の中でのトレーサーの分布を地上サンプラー、係留気球、航空機を用いて、測定している。噴霧地点の下流約 8 km での測定結果の一例を第2図に示す。6:02~6:52の測定では、ブルームの中心は谷の中央部の地上 100~200 m の高度にあり、300 m 以上の上層部には拡散していない。6:52~7:42の測定では、太陽光線の届く谷の西側斜面上に対流混合層が発生し、西側斜面に沿って

トレーサーが上昇してゆく様子が明瞭に観察されている。なお、この峡谷では、1984年9月~10月に ASCOT 計画の一環としての大規模な気象観測、エアートレーサー拡散実験などが行われている (Yamada, 1985)。

この地域における大気環境の影響評価に用いるために、PNL では VALMET (VALley MET eorology) モデルと MELSAR (MEscale Location Specific Air Resources model) モデルの2つを開発した。MELSAR モデルは、500 km 四方程度の範囲内における3~24時間程度の平均化時間での濃度を求めるための流跡線パフモデルである。しかし、この MELSAR モデルは開発の途上であり、完成されていない。

VALMET モデルは下記の2つの部分から構成されている。

(i) 夜間の安定な drainage 流中での拡散を記述する部分

(ii) 日中に谷の側面で発達する対流混合層 (convective boundary layer; CBL) の挙動とその中における汚染物質の移流拡散を記述する部分

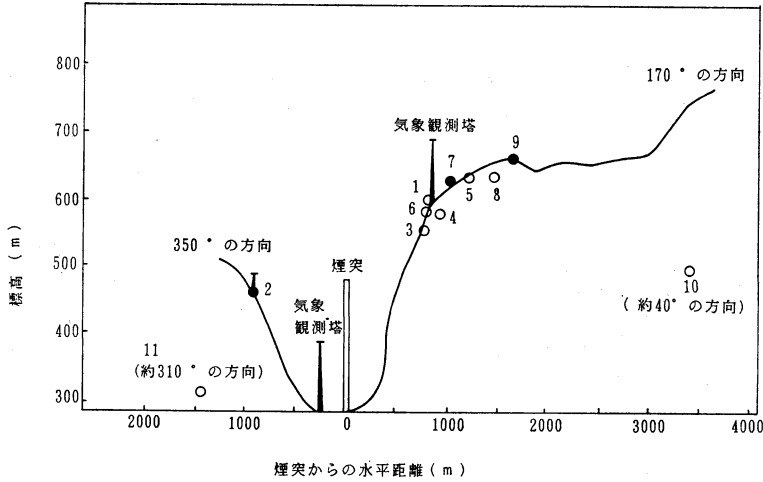
上記 (i) では正規型ブルーム式により濃度分布を計算し、ブルーム主軸の位置は谷の蛇行に沿って変化する。また、拡散幅  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は地形による影響を受けて、1~2階級不安定側に設定されている。

(ii) の日中(日午後)のフュミゲーションの状況は数値解モデルで表現される。谷の中央上部には、安定な斜面降下流 (drainage) があり、斜面上に CBL が発達する。この CBL の高さに等しい計算上のボックス (セル) を仮定し、このボックスの成長とともに、上層安定層中のブルーム (煙) が CBL 内に取り込まれて、一時的に高濃度となるが、CBL がさらに発達すれば、谷の外からの清浄な大気が流入して濃度が低下する (Schirmer, et al., 1983)。

6. Westvaco Luke 工場・環境影響調査

Westvaco 社の Luke 工場は Potomac 川に沿う峡谷にあり、183 m の煙突から SO<sub>2</sub> を含む煙を排出しており、谷の両側の山の標高は煙突頂部の標高よりも高い。このため、連邦政府 EPA とメリーランド州当局は、当該地域において SO<sub>2</sub> 環境基準を達成するために必要な SO<sub>2</sub> 排出量の削減量を算定するための調査を実施した。

工場周辺に、第3図に示すように11カ所の測定局を設置し、1979年12月~1981年11月までの2カ年間の現地調査を実施した。また、谷の中と工場から約 1 km 離れ



第3図 Westvaco Luke での測定局と煙突との位置関係  
 (1~11は測定局番号, 測定局2, 7, 9はほぼ煙突を中心に350°-170°の方向に位置する) (Wackter and Lonergan, 1984より引用, 修正して作成)

第5表 Westvaco Luke での SO<sub>2</sub> 3時間平均値での評価結果 (Hanna, et al., 1984より引用)

Monitor	2 nd High			50 th High			Average (nonmissing)		
	C <sub>0</sub>	C <sub>P</sub>	(C <sub>P</sub> -C <sub>0</sub> )/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>	C <sub>P</sub>	(C <sub>P</sub> -C <sub>0</sub> )/C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>	C <sub>P</sub>	(C <sub>P</sub> -C <sub>0</sub> )/C <sub>0</sub>
1	1350	910	-0.33	520	460	-0.12	54	81	+0.50
2	400	360	-0.10	110	100	-0.09	17	4	-0.76
3	1000	1710	+0.71	430	400	-0.07	39	43	+0.10
4	1190	2950	+1.48	510	420	-0.18	33	30	-0.09
5	1460	1900	+0.30	430	400	-0.07	31	22	-0.29
6	1600	1240	-0.23	560	510	-0.09	86	134	+0.56
7	1720	1600	-0.07	440	620	+0.41	27	22	-0.19
8	1210	1450	+0.17	320	430	+0.34	26	17	-0.35
9	1150	1070	-0.07	330	410	+0.24	24	17	-0.29
10	410	230	-0.44	130	110	-0.15	16	9	-0.44
11	370	150	-0.59	130	70	-0.46	15	5	-0.67
	R=0.65 (spatial)			R=0.89			R=0.99		
	Avg.+0.07			Avg.-0.02			Avg.=-0.17		

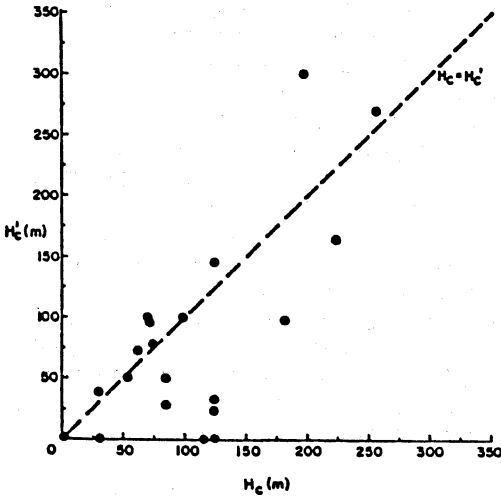
Co: 実測値, Cp: 予測値, R: 相関係数, Avg.: 平均値 単位 μg/m<sup>3</sup>

た陵線上の2地点に100m高度の気象観測塔を設置し, 風向風速, 風の乱れ, 気温差なども測定している。

また, この地域に適用できる拡散モデルの開発も行っている。このモデルは正規型ブルーム式に基づくものであり, LUMM (Luke Mill Model) と呼ばれている。

拡散幅  $\sigma_y, \sigma_z$  は乱流強度から推定する方法を採用しており, 排煙上昇時の初期拡散幅も考慮されている。ブルーム主軸高度は地表面の標高が変わるとともに, 変化するように設定している。地形の影響を受けない有効煙突高度(地上高度)を  $h_e$ , 陵線上のブルーム主軸高度(地





第4図 Steptoe Butte での分配流線高度を式(5)で求めた場合  $H_c$  と、式(7)で計算した場合  $H_c'$  の比較 (Ryan and Lamb, 1984 より引用)

上高度)を  $he'$  とすれば、地形調整係数 PPC は

$$PPC = he' / he \quad (2)$$

で与えられる。Egan (1975) の ERT モデルでは、中立時の PPC は 0.5 であったが、その後の調査研究により、中立時の PPC は 0.4 程度が妥当であり、 $PPC = 0.4$  と設定している。また、安定時には、フルード数  $Fr(uh/N)$  の関数としての分配流線高度  $H_c$  を式(3)により計算している。ここで、 $N$  は大気安定度を表わす Brunt-Vaisala 度数である。そして  $H_c$  と  $he'$  との関係でブルーム主軸高度を求めている。

$$H_c = h(1 - Fr) \quad (3)$$

ここで  $h$  は煙突から注目する方向へ 5 km 以内の最も高い山との標高差である。そして

$$\left. \begin{aligned} he < H_c \rightarrow he' = 0 \quad (PPC = 0) \\ he > H_c \rightarrow he' = 0.4 he \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

と設定している。また、急斜面では、平坦地上のように地表面での反射により地表濃度が 2 倍となる仮説には無理があり、平均的な地面の勾配が 20~30° であるとして、地面反射係数を 1.2 と設定している。なお、通常の平坦地上での地面反射係数は 2 である。このモデルの評価結果を Hanna *et al.* (1984) より引用して、第 5 表に示す。

### 7. Steptoe Butte 調査

ワシントン州立大学では、周囲の平坦地に対して、335 m の高さの円錐型に近い Steptoe Butte において、気象観測、エアートレーサー拡散実験などの現地調査を行っている。実験の方法などは EPA の Cinder Cone Butte での調査とほぼ同様である。気象観測などは Cinder Cone Butte の方が大規模であるが、Steptoe Butte 実験の方が広い大気安定度の範囲を含んでいる。トレーサーの噴霧高度は地表から 190 m までであり、合計 21 回実施されている。Ryan *et al.*, (1984) はこの実験データを解析し、最高濃度は丘の風上側斜面で生じているが、全体の約半数のケースについては丘の風下側斜面上でケース毎の最高濃度が出現していることを報告している。

Ryan *et al.* (1984) は Steptoe Butte での実験データに基づいて、EPA の CTDM モデルの主要な理論的背景となっている分配流線高度 (dividing streamline height) の理論についても検討を加えている。

Hunt *et al.* (1979) などの風洞実験により、丘を越える気流はフルード数  $Fr$  によって、その特徴を表現できることが報告されている。 $Fr < 1$  の場合には、丘の風上側の地表近くに位置する気塊は頂上を越えるのに必要な十分な運動エネルギーを持っていないので、丘の側面を迂回して流れる。一方、 $Fr > 1$  の場合には、十分な運動エネルギーを有しており、頂上を乗り越えてゆくことができる。この運動エネルギーとポテンシャル・エネルギーが等しくなる高度を分配流線高度  $H_c$  と呼んでおり、式(5)で求められる。

$$1/2 \rho u(z)^2 = g \int_{H_c}^h (h-z) \left(-\frac{\partial \rho}{\partial z}\right) dz \quad (5)$$

ただし、 $h$  は丘の高度、 $u(z)$  は  $z = H_c$  での風速である。

ここで、フルード数  $Fr$  は、式(3)の場合と同様に、 $Fr = u/hN$  で定義する。そして、風速  $u$  と密度勾配  $(-\partial \rho / \partial z)$  が高さによらず一定であるとすれば、式(5)を変形して、式(6)が導かれる。

$$H_c = h(1 - Fr) \quad (6)$$

さらに、接地逆転層の高度を  $hi$ 、煙源高度を  $hs$  とすれば、式(6)は

$$hs < hi; Fr(l) = \frac{u(hi)}{hi \left[ \frac{g}{T_{01}} \left( \frac{d\theta}{dz} \right)_1 \right]^{1/2}}; H_c = hi[1 - Fr(l)]$$

$$hs > hi; Fr(l) = \frac{u(h)}{(h-hi) \left[ \frac{g}{T_{02}} \left( \frac{d\theta}{dz} \right)_2 \right]^{1/2}}; H_c = hi + (h$$

$$-hi) [1 - Fr(l)] \quad (7)$$

のように書換えることができる。ここで、 $Fr(l)$  は局所フルード数であり、添字1は接地層、添字2は  $hi$  から  $h$  までの高度間を表わす。また  $T_0$  は絶対温度、 $d\theta/dz$  は温位勾配である。

式(5)により求められる分配流線高度を  $Hc$ 、式(7)で計算される分配流線高度を  $Hc'$  とすれば、Steptoe Butte 実験に基づく比較結果は第4図に示すように、よく一致していることがわかる。

しかし、さらに気象条件別に考察すれば、中立に近い条件下においては局所フルード数を用いても十分な近似が得られるが、安定時には局所フルード数を用いるのは不適當であり、式(5)を漸近計算(Iterative)により解く方がよいと述べられている。

## 8. まとめ

複雑地形上での大気拡散の調査、予測モデル開発は各方面で行われており、ここで紹介した事例はその一部であると思われるが、最近注目を集めている ASCOT 計画、CTMD 計画など主要な調査計画の概要について述べた。複雑地形上での拡散問題はそれぞれの場所に特有な条件が支配的であり、1地区での調査結果から汎用的なモデルを確立することは困難であると思われる。今後、種々の地形条件下での調査事例の集積が重要な課題であろうと考えられる。

## 参考文献

- Burt, E.W., 1977: Valley model user's guide, EPA-450/2-77-018.
- Dickerson, M.H., and Gudiksen, P.H., 1980: The Department of Energy's atmospheric studies in complex terrain (ASCOT) program, Second Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteor., 469-473.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1983: Atmospheric studies in complex terrain; technical progress report FY-1979 through FY-1983, UCID-19851, Lawrence Livermore National Laboratory.
- DiCristofaro, D., Strimaitis, D.G., Greene, B.R., Yamartino, R., Venkatram, A., Godden, D., Lavery, T.F. and Egan, B.A., 1985: EPA Complex terrain model development: fifth milestone report, EPA-600/3-85-069.
- Egan, B.A., 1975: Turbulent diffusion in complex terrain, Proc., Lectures Air Pollution and Environmental Impact Analyses, 224-267.
- Gudiksen, P.H. and Dickerson, M.H., 1983: Executive summary-atmospheric studies in complex terrain; technical progress report FY-1979 through FY-1983, UCID-18878, Lawrence Livermore National Laboratory.
- Hanna, S.R., Egan, B.A., Vaudo, C.J. and Currier, A.J., 1984: A complex terrain dispersion model for regulatory applications at the Westvaco Luke Mill, Atmos. Environ., 18, 685-699.
- Holzworth, G.C., 1980: The EPA program for dispersion model development for source in complex terrain, Second Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteor. 465-468.
- Hovind, E.L., Edelstein, M.W. and Sutherland, V.C., 1979: Workshop on atmospheric dispersion models in complex terrain, EPA-600/9-79-041.
- Hunt, J.C.R., Puttock, J.S. and Snyder, W.H., 1979: Turbulent diffusion from a point source in stratified and neutral flows around a three-dimensional hill; part I—Diffusion equation analysis. Atmos. Environ., 13, 1227-1239.
- Koch, R.C., Biggs, W.G., Hwang, P.H., Leichter, I., Pickering K.E., Sawley, E.R. and Swift, J.L., 1978: Power plant stack plumes in complex terrain, an appraisal of current research, EPA-600/7-77-020.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, Cover, D., Rector, H., Stenberg, P.F. and Pickering, K.E., 1979: Power plant stack plumes in complex terrain, description of an aerometric field study, EPA-600/7-79-010a.
- Lavery, T.F., Bass, A., Strimaitis, D.G., Venkatram, A., Greene, B.R., Drivas, P.J. and Egan, B.A., 1982: EPA complex terrain model development program: first milestone report, EPA-600/3-82-036.
- \_\_\_\_\_, Greene, B.R., Egan, B.A. and Schiermeier, F.A., 1983: The EPA Complex Terrain model development program, Sixth Symp. Turbulence and Diffusion, 126-130.
- \_\_\_\_\_, Strimaitis, D.G., Venkatram, A., Greene, B.R., DiCristofaro, D.C. and Egan, B.A., 1983: EPA complex terrain model development: third milestone report, EPA-600/3-83-101.
- Pickering, K.E. and Koch, R.C., 1980: Validation of alternative Gaussian plume parameters for an isolated source in complex terrain, Second Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteor., 593-599.
- \_\_\_\_\_, Woodward, R.H. and Koch, R.C., 1980: Power plant stack plumes in complex terrain, data analysis and characterization of plume behavior. EPA-600/7-80-008.
- Ryan, W., Lamb, B. and Robinson, E., 1984: An atmospheric tracer investigation of transport and diffusion around a large isolated hill,

- Amos. Environ., 18, 2003-2021.
- \_\_\_\_\_. and \_\_\_\_\_, 1984: Determination of dividing streamline heights and Froude numbers for predicting plume transport in complex terrain, J. Air Poll. Control Assoc., 34, 152-155.
- Schiermeier, F.A., Huber, A.H., Whiteman, C.D. and Allwine, K.J., 1983: The Green River ambient model assessment program Air Pollution Modeling and Its Application IV, 435-451.
- Strimaitis, D.G., Venkatram, A., Greene, B.R., Hanna, S., Heisler, S., Lavery, T.F., Bass, A. and Egan, B.A., 1983: EPA complex terrain model development program! Second milestone report, EPA-600/3-83-015.
- \_\_\_\_\_, Lavery, T.F., Venkatram, A., DiCristofaro, D.C., Greene, B.R. and Egan, B.A., 1984: EPA complex terrain model development: fourth milestone report, EPA-600/3-84-110.
- \_\_\_\_\_, DiCristofaro, D.C. and Lavery, T.F., 1986: The complex terrain dispersion model, 79th Annual Meeting Air Poll. Control Assoc., 86-8. 2.
- Wackter, D.J. and Londergan, R.J., 1984: Operational evaluation of eight complex terrain models for potential use in regulatory applications, Fourth Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteor., J 17-J 20.
- Whiteman, C.D., Huber, A.H., Fisher, R.W. and Zak, B.D., 1984: Atmospheric tracer experiments in a deep narrow valley, Fourth Joint Conf. Appl. Air Poll. Meteor., J 1-J 4.
- Yamada, T., 1985: Numerical simulations of valley ventilation and pollutant transport, Seventh Symp. Turbulence and Diffusion, 312-314.
- 市川陽一, 西宮 昌, 1987: 地形影響を考慮した大気拡散予測手法の開発(その1) —地形を考慮した大気拡散モデルの調査—, 電力中央研究所報告, 調査報告: T86073
- 北林興二, 1986: 複雑地形上の気流と拡散(野外観測データを主体として), 公害, 21, 6, 1-22.
- 近藤裕昭, 1985: 長距離輸送と複雑地形を対象とした大気拡散シミュレーションモデルについて—基本方程式を直接解くモデルを中心に—, 公害, 20, 2, 1-25.
- 長沢伸也, 岡本真一, 塩沢清茂, 1986: 起伏のある地形上における大気汚染予測について, 大気汚染学会誌, 21, 5, 349-371.

## 昭和63年度気象研究所研究発表会のお知らせ

日 時: 昭和63年11月21日(月)・22日(火)  
9:30~16:30

場 所: 気象研究所講堂

### 【21日】

- 内陸地震の予知—予知研究の現状—
- 内陸地震の予知—実験的研究—
- 内陸地震の予知—統計的予測—
- 海洋大循環モデルの開発
- オホーツク海の海水について
- 黄砂の鉛直構造と長距離輸送について
- オゾンライダーの開発
- オゾン全量に関する高層解析
- 大気中の放射性クリプトン(Kr-85)の分布と地球規模の輸送
- 南半球大気中のプラネタリー波・平均流相互作用と物質輸送に関する研究

中層大気モデリングと内部重力波

### 【22日】

- 網走・雄武地方の“乾燥フェーン”現象の数値的研究
- 船舶からの大気汚染物質の立体的挙動に関する研究
- ドップラーレーダーにおける大地クラッタの除去
- 衛星による地球表面温度測定用赤外波長帯
- 対流圏エロゾルの放射収支効果の航空機観測
- 雲と放射の研究活動について
- 有限雲場の短波長反射特性
- 対流雲の微細構造に関する観測的・理論的研究
- HYVIS によって観測された温暖前線雲の微物理構造

問い合わせ先: 気象研究所 企画室

〒305 つくば市長峰 1-1  
TEL. 0298-51-7111 (内線 204)  
FAX. 0298-51-1449