

「1987年4月～5月に中ソ国境付近で発生した 山林火災の煙の分布とその移動」

Distribution and Movement of Smokes from Forest Fires that occurred along the Boundary of the People's Republic of China and the USSR on April-May 1987

麻生 正*、木川誠一郎*
Tadashi Aso and Seichiro Kigawa

Abstract

Big forest fires occurred along the boundary of the People's Republic of China and the USSR on April-May 1987. Distribution and movement of smokes from the forest fires can be detected in GMS visible imagery, but hardly in the infrared imagery. Smokes spread over the Sea of Japan and moreover the northwestern Pacific Ocean. They moved several thousand Kilometers from the source and yet had a considerable particle density to be detected in the visible imagery.

A numerical simulation by the Global Tracer Model was carried out to confirm that the observed grey area can be regarded as the smoke from the forest fires. A simulated horizontal distribution agrees quite well with the observed area over the continent, the Sea of Japan and the Pacific Ocean.

An increment of albedo due to the existence of smoke particles is 0.01~0.09 over the sea.

Movement of smoke particles is greatly influenced by a synoptical disturbance. Height of smoke advection is high in front of a front, and low behind a front. This height difference indicates that the advection height of smoke particles is determined not by the updraft over the forest fires, but by the ascending and descending current of synoptical disturbance.

1. はじめに

静止気象衛星「ひまわり」(GMS)では雲の他にも火山の噴煙、黄砂が観測される(石坂、1979;長谷川、1980;八十科など、1982;舟田・芝井、1983;桜田、1988)。今回、4月下旬から5月中旬にかけて黄砂などと同じく可視画像でのみ確認でき、赤外画像ではほとんど観測されない浮遊物質が観測された。この物質は中ソ国境付近のアムール川上流域から発生して風下へ輸送され、日本海、日本の東海上、更にはカムチャッカ半島南方まで広がっていった。同時期、中ソ国境付近で発生した山林火災は広範囲に及んでおり、GMSの観測したこの浮遊物質は山林火災から生じた煙粒子

と考えられた。今回の事例は地球規模の物質輸送過程という観点(木田、松野、1986)からみるとvisualなトレーサーを提供した非常に稀な例である。この浮遊物質の観測とその移動、移流拡散モデルによる計算結果との比較を行ったので報告する。2章ではGMSによる観測、3章では地上気象実況と移流拡散モデルによる計算結果との比較によりこの浮遊物質が煙粒子と同定できること、4章では煙の移動について述べた。

2. 観測

2.1 GMSによる「煙」域の観測

最初に黄砂と見間違ったこの浮遊物質に気づいたの

*気象衛星センター解析課
Meteorological Satellite Center

は1987年5月6日 OOUTC の GMS 可視画像であった。確認が最も容易なのは浮遊物質の反射強度が高い5月5日から5月10日頃までであったが、4月下旬にも薄く広がっているのが観測される。以下にこの浮遊物質が明瞭に確認できる GMS 観測例を示す。この浮遊物質が山林火災から発生した煙であることの同定は3章で行うが、便宜上ここでも「煙」と呼ぶことにする。

Fig. 1 は1987年5月6日 OOUTC のバイカル湖からソ連沿海州付近までの可視画像で、バイカル湖すぐ南東の52°N、111°Eから東側に灰色がかかった「煙」域が南東方向へ広がっているのが分かる。また、別な「煙」域が54.5°N、122°E付近から細長い帯として東へ流れている。赤外画像 (Fig. 2) では120°E付近から西側でのみ周囲よりやや温度が低く、下層雲らしく見えている。「煙」域の南側の輝度の高い領域は発達した対流雲と巻雲で、北側の55°N以北は下層雲である。

Fig. 3はやはり6日 OOUTC の日本海付近の可視画像である。「煙」が中国東北から細長く伸びて日本海に達して、日本海中部のやや幅広い「煙」の領域とつながり、更に朝鮮半島のすぐ東海上の反射強度の強い部分にも伸びている。また、本州のすぐ東から海上へ伸びる「煙」の帯が見える。これとは別に、オホーツク海南部から日本海北部にかけても雲より薄い灰色の領域が広がっているのが分かる。

Fig. 4 は5月7日 OOUTC の可視画像でアムール川流域から日本付近までを示した。52°N、120°E付近から南東へウラジオストック付近まで伸びる幅広い「煙」域と、53~4°N、123°E付近から東へ伸びる細長い帯状の「煙」域とが観測されている。南東へ伸びる幅広い「煙」域は1日前の「煙」域の持続したものである。また、東へ伸びる「煙」域は Fig. 1 のほぼ同じ場所に丸い点と東へたなびく薄い灰色の帯があるので、6日頃に発生した「煙」が東へ流れたものであると考えられる。

Fig. 5 は5月10日 OOUTC の可視画像で日本から160°E付近までの範囲を示した。日本の東海上にばやっとものかかったような「煙」域が見えている。日本の東海上の「煙」の領域は非常に広く、南は140~150°E、30°N付近から霧・層雲域上をおおってカムチャッカ半島東まで分布しているのが分かる。図の右上の47°N、165°E付近の霧・層雲上で、「煙」の境界が反射強度の明瞭な違いとして見えている。また、東海上の「煙」域の南東縁には反射強度の強い、細長い帯のあるのが

分かる。可視画像の1時間毎のアニメーションからはこの「煙」は関東南東の積雲や日本の東海上の霧・層雲の上を移動していることが確かめられる。

Fig. 6 は同時刻の赤外画像で、可視画像で見られた「煙」は全く確認できず海面水温の温度分布が見えている。また、カムチャッカ半島南海上にある霧・層雲域は海面水温とあまり温度差がないため赤外画像では判然としない。

「煙」域を見やすくするために可視画像においてアルベド値 (ここではアルベドとして対象領域から GMS が受けた放射量を太陽から GMS が直接受け取った放射量で割った値で定義する。) のある範囲に対して色をつけたのが Fig. 7、8 で、それぞれ5月6日 OOUTC の日本海付近 (Fig. 1)、5月10日 OOUTC の日本の東海上 (Fig. 5) に対応している。アルベドのほぼ一様な海上では「煙」域に色を付けることが可能で、Fig. 7 ではアルベド値が0.06~0.11に対して、Fig. 8 では0.06から0.12の範囲に色を付けた。海面は0.03~0.05の範囲である。従って、「煙」粒子によるアルベドへの寄与は0.01~0.09程度である。この2枚の擬似カラー写真から「煙」域を明瞭に把握することができる。

2.2 「煙」の分布域

GMS の観測から「煙」の領域を拾い出しスケッチ図にした (Fig. 9)。「煙」域の抽出を可視画像のアルベド値だけから自動的に求めることは難しい。それは「煙」域が薄く周囲との輝度変化が小さい、下面が陸地の場合日変化、地質・植生等で晴天の場合の輝度が一定していない、境界があいまいで次第に「煙」域であることの確認ができなくなってくるためである。Fig. 9 a)~f) に5月5日から10日までの「煙」域の分布を図中に陰影を施して示した。実線で囲んだ境界は可視画像上で「煙」域の境界が明瞭な場合、点線はやや不明瞭な境界、陰影を施しただけの場合は薄い「煙」が分布している可能性がある。この分布から特徴的なことは、「煙」発生域と思われる中ソ国境付近から次第に東~南東へ移動して、4~5000km程も離れたカムチャッカ半島の東海上まで観測できることである。また、日本海や太平洋上では「煙」の領域が広範囲にわたっており、数ヶ所から発生した「煙」が存在している。

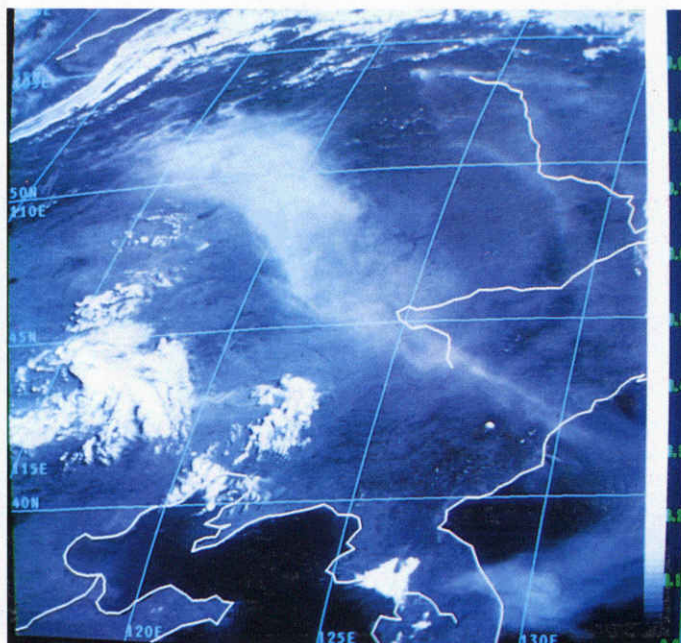


Fig. 1 Visible image at OOUTC on 6 MAY 1987. Grey scale for albedo is shown on the right.

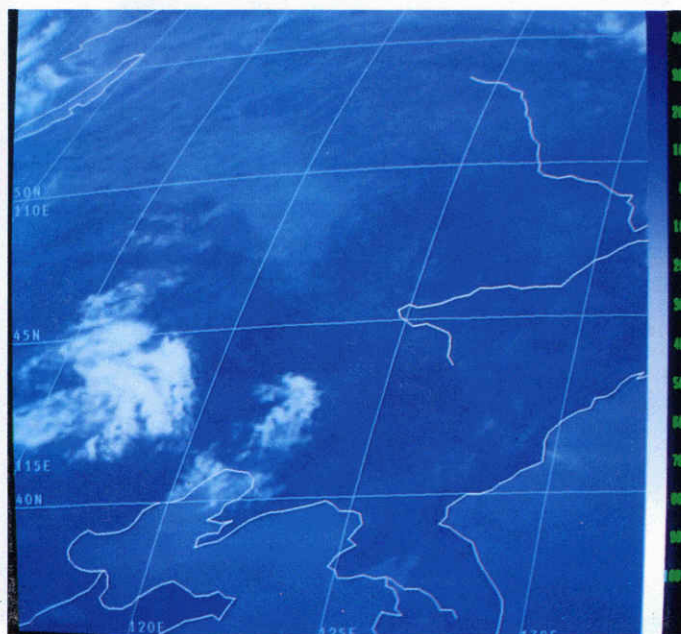


Fig. 2 Infrared image at OOUTC on 6 MAY 1987. Grey scale for blackbody temperature($^{\circ}$ C) is shown on the right.

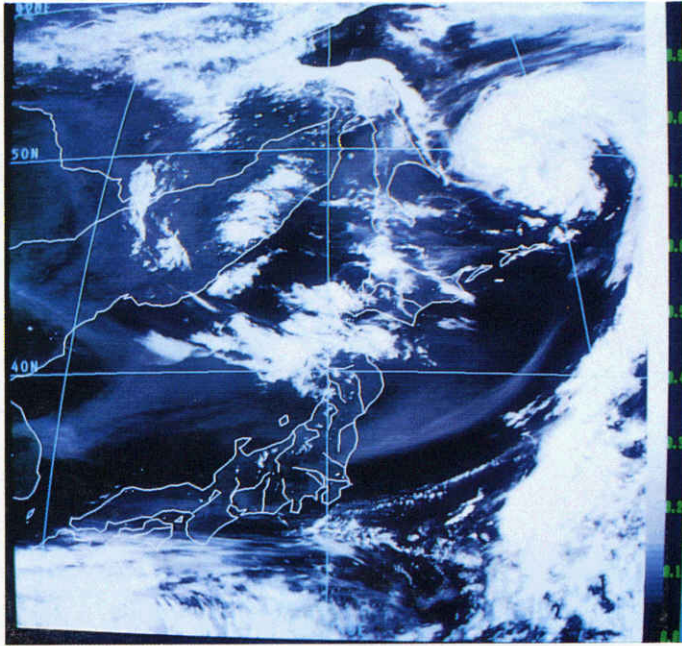


Fig. 3 Same as in Fig.1, but around Japan.

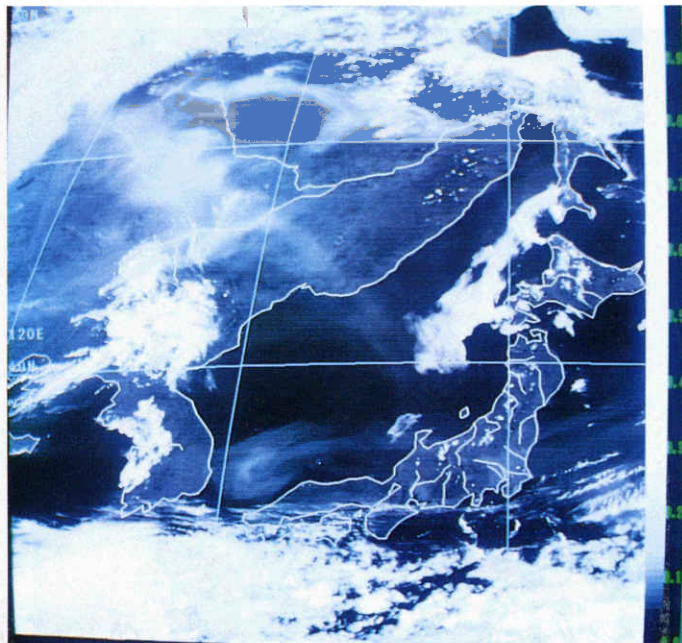


Fig. 4 Same as in Fig.1 except for OOUTC on 7 MAY 1987.

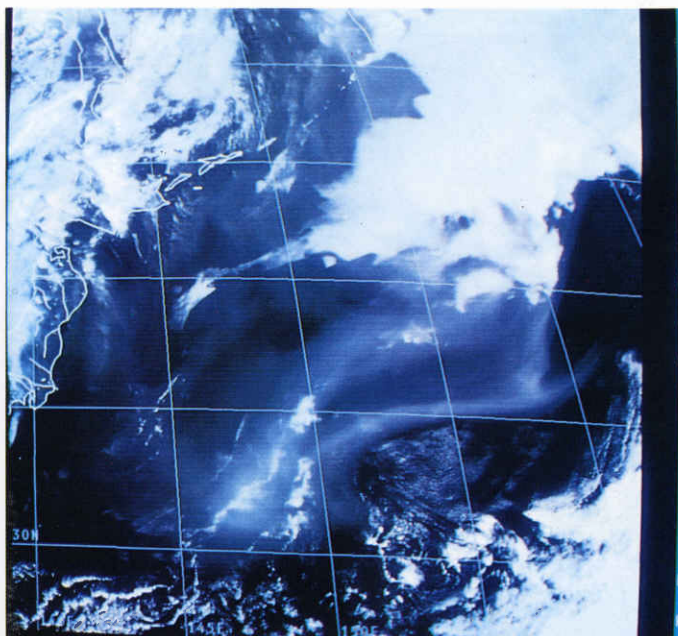


Fig. 5 Same as in Fig.1 except for OOUTC on 10 MAY 1987.

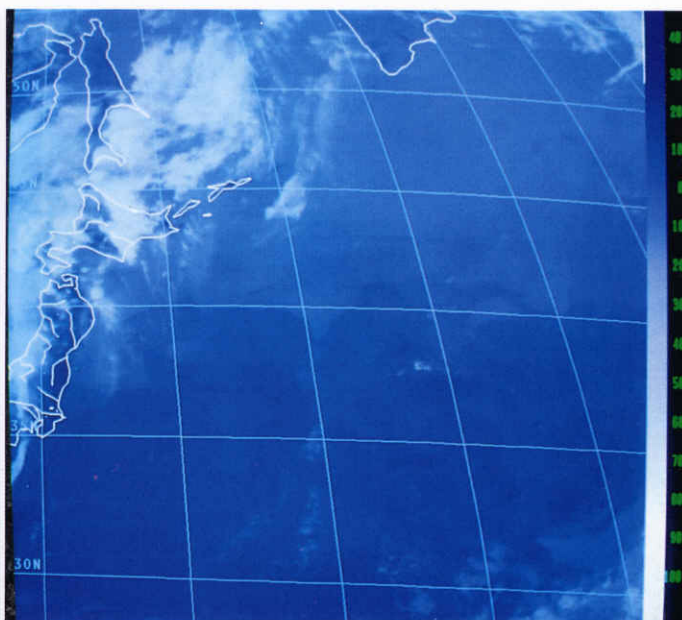


Fig. 6 Same as in Fig.2 except for OOUTC on 10 MAY 1987.

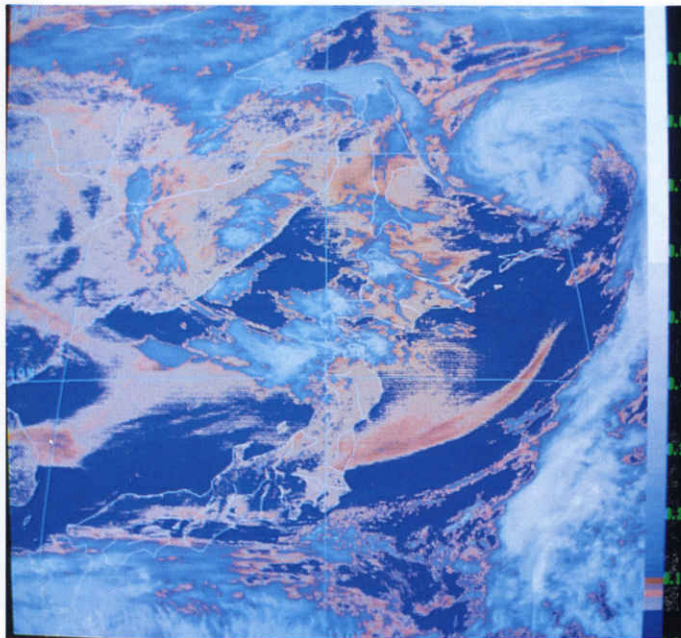


Fig. 7 Colored visible image at OOUTC on 6 MAY 1987. Grey scale for albedo is shown on the right and only small range of albedo (0.06~0.11) is colored.

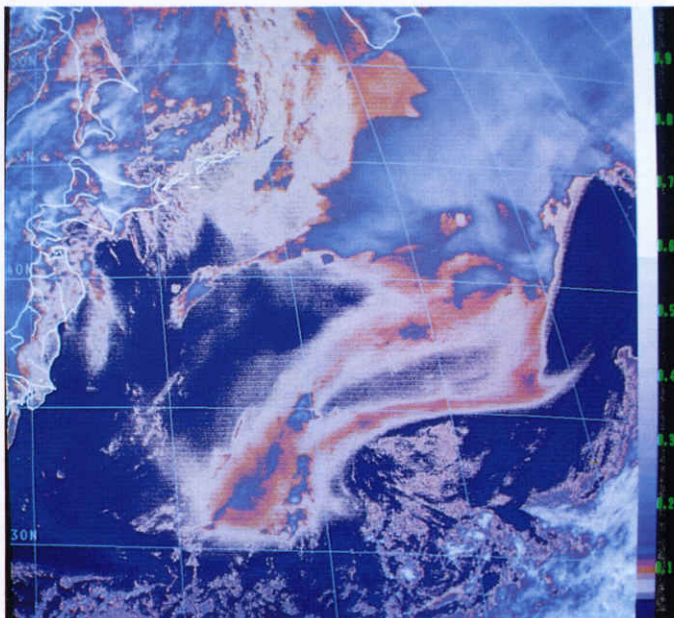


Fig. 8 Colored visible image at OOUTC on 10 MAY 1987. Grey scale for albedo is shown on the right and only small range of albedo (0.06~0.12) is colored.

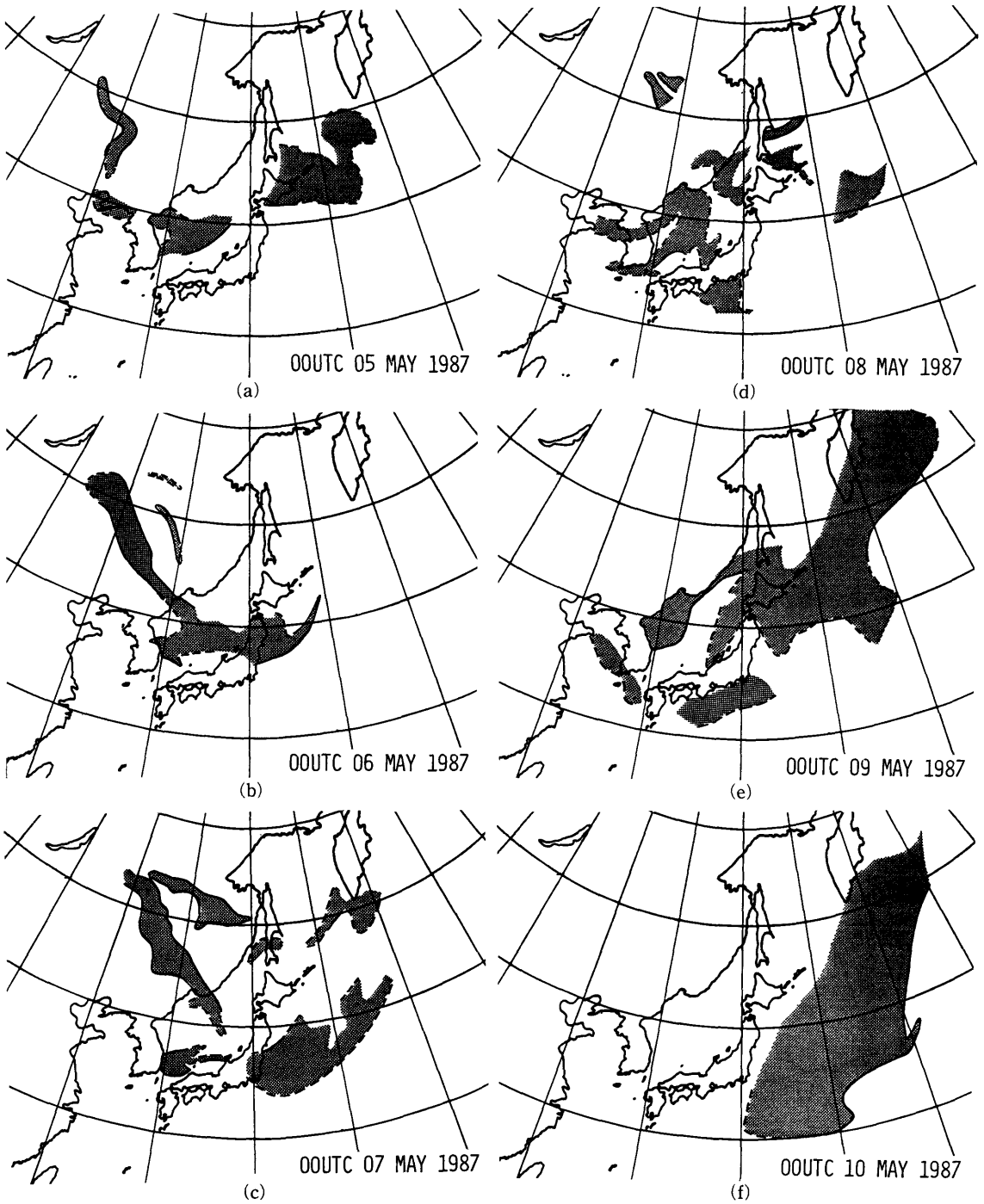


Fig. 9 Observed horizontal distributions of "smokes".
Solid line indicates somewhat clear boundary of "smokes" and dotted line indicates less clear boundary.

3. 煙の同定

GMSの可視画像で観測された物質は、黄砂と同じく赤外画像で確認が殆どできないこと、風上の物質の発生地点と思われる場所で大規模な山林火災が発生していたこと、また、この時の地上から700mbまでの風向が北西で細長い「煙」の帯の方向に一致していたことなどから、火災によって生じた煙粒子を観測したと考えられる。しかし、この物質は日本のはるか東海上まで追うことができ、果たして単純に「煙」粒子と考えていいかどうかは疑問が残る。

ここではまず、中ソ国境付近で発生した山林火災について述べる。次に中ソ両国からの地上気象実況通報を調べてGMSの観測した「煙」域と一致するかどうか比較する。最後にGMSで観測される発生地点から煙粒子を流して「煙」の分布が再現できるかどうか粒子移流拡散モデルによって数値シミュレーションを行った結果について述べる。

3.1 中ソ国境付近の山林火災域

Fig.10に火災域の広がりを見網目域で示した。この火災域はGMS、NOAA、地上実況、新聞報道などから推測したおおよそのもので、斜線内の全域が消失したことを意味しないとともに、山林火災の性質からある日時の火災域はこれより非常に狭い。火災の発生日時は新聞報道によれば5月上旬であるが、火災域が中ソ両国にまたがって広い範囲で発生しており、正確な日時は

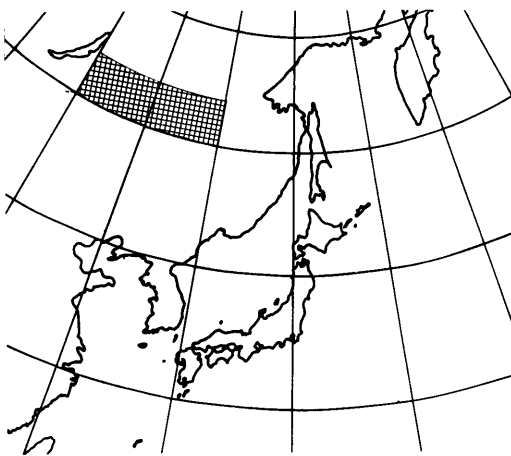


Fig. 10 Area of forest fires

分からないと考えた方が良いでしょう。

3.2 地上気象実況（煙通報域）との比較

地上気象観測では気圧や気温、風などの他に大気諸現象として大気中の塵や煙も観測された場合は通報している。火災からの煙を観測した場合には天気現象コードに05、火元が観測場所では分からず遠くから煙が流されてきた場合には04を報ずる。そこで地上気象実況通報の04と05を観測地点から「煙」が見える領域として拾い出し、GMSの観測と比較した。比較の日時として選んだのは雲が少なく、大陸上で「煙」域が濃く、まとまっている5月6日03UTC (Fig.11)と5月7日03UTC (Fig.12)である。図中の実線と点線で囲んだ領域がGMSによる「煙」域で(実点線の意味はFig.9と同じ)、○印(コード04)、▽印(コード05)が地上観測で「煙有り」を通報している地点である。この2つの図を見ると両者の対応は非常に良く、GMSで観測された浮遊物質は山林火災から生じた煙粒子を見ていると結論してよさそうである。

3.3 粒子移流拡散モデルによる計算結果との比較

気象庁数値予報課の全球スペクトルモデルに結合した粒子移流拡散モデルを用いてGMSで観測される煙発生地点と思われる場所から煙粒子を流して、観測される煙の分布が再現できるかどうかを調べた。このモデルは粒子を計算された風、上昇流により水平、鉛直に輸送し、乱流により上下に拡散する。この際、重力落下・雲の内部でのレインアウト・雨によるウォッシュアウトなどの大気からの除去過程は考慮していない。粒子移流拡散モデルの詳細については中村(1987)、高杉・中村(1988)を参照されたい。

可視画像で観測された煙の発生地点と思われる場所は数ヶ所あるが、ここでは次の2ヶ所を選んだ。

P: (52.1N, 112.8E)

Q: (52.8N, 123.5E)

計算の際にはこれらの地点で毎時250個ずつ連続的に粒子を放出し、これらの粒子は大気下層1kmまでの層に一樣に放出されると仮定した。

計算結果を以下に示そう。Fig.13 a)~f)はP地点で5月3日より放出を開始した場合である。総観場の特徴を見るためにFig.14 a), b), c)にそれぞれ5月5日、7日、9日の00UTCの地上天気図を示した。P地点で5月3、4日頃放出した粒子は低気圧後面の北西風にのり南東進し5月6日には日本海に達し、6日

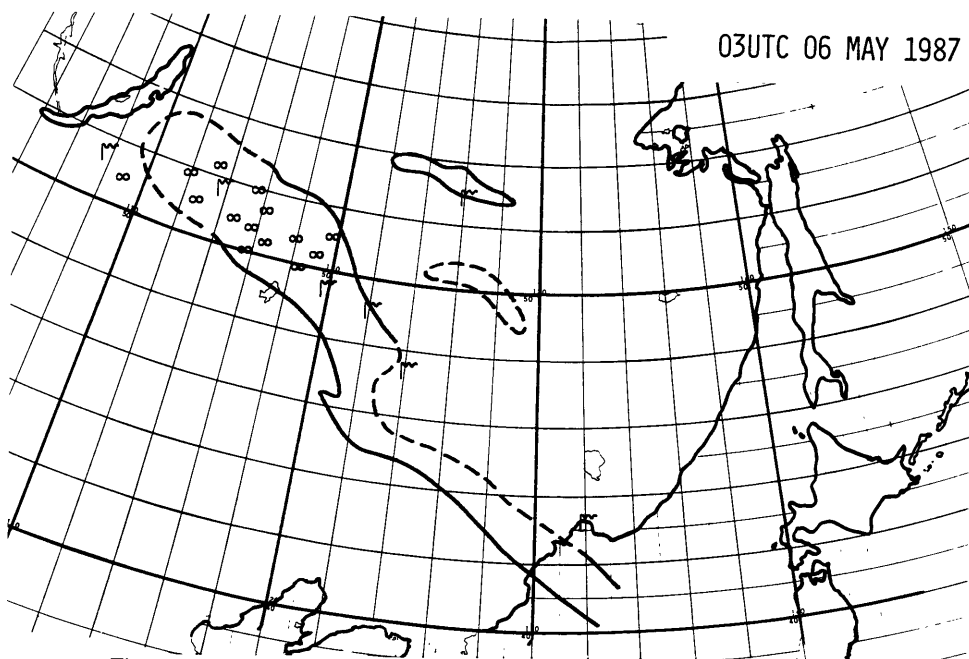


Fig. 11 Comparison between the observed horizontal distribution of "smokes" by GMS and surface observations at 03UTC on 6 MAY 1987. Meanings of solid line and dotted line are the same as in Fig. 9. Symbol ∞ means that smokes are observed in that station and symbol ∩ means that smokes are also observed, but the source of smokes are not identified.

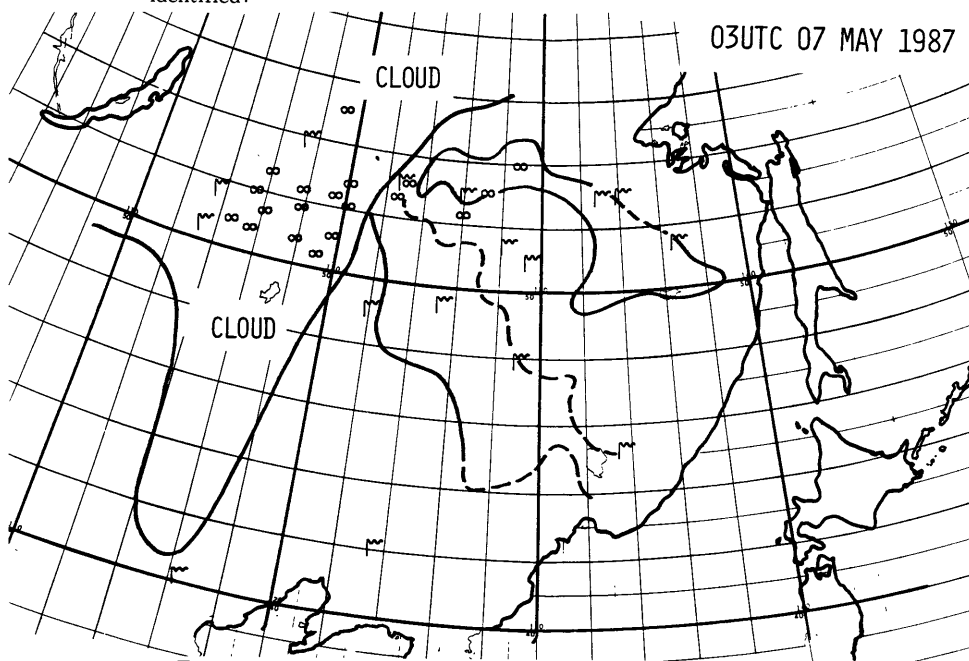


Fig. 12 Same as in Fig. 11 except for 03UTC on 7 MAY 1987.

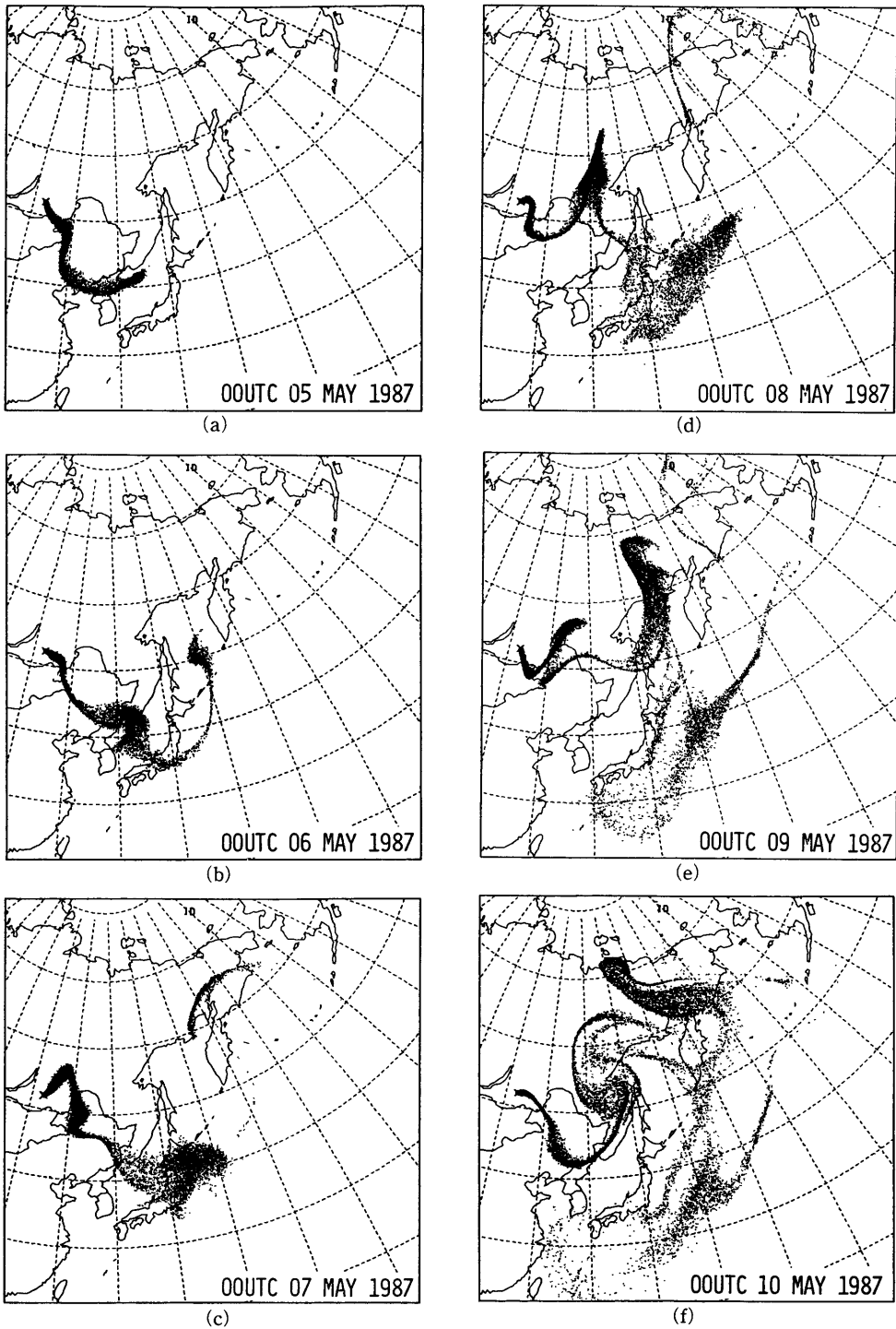


Fig. 13 Predicted horizontal distributions of the tracers from point P.

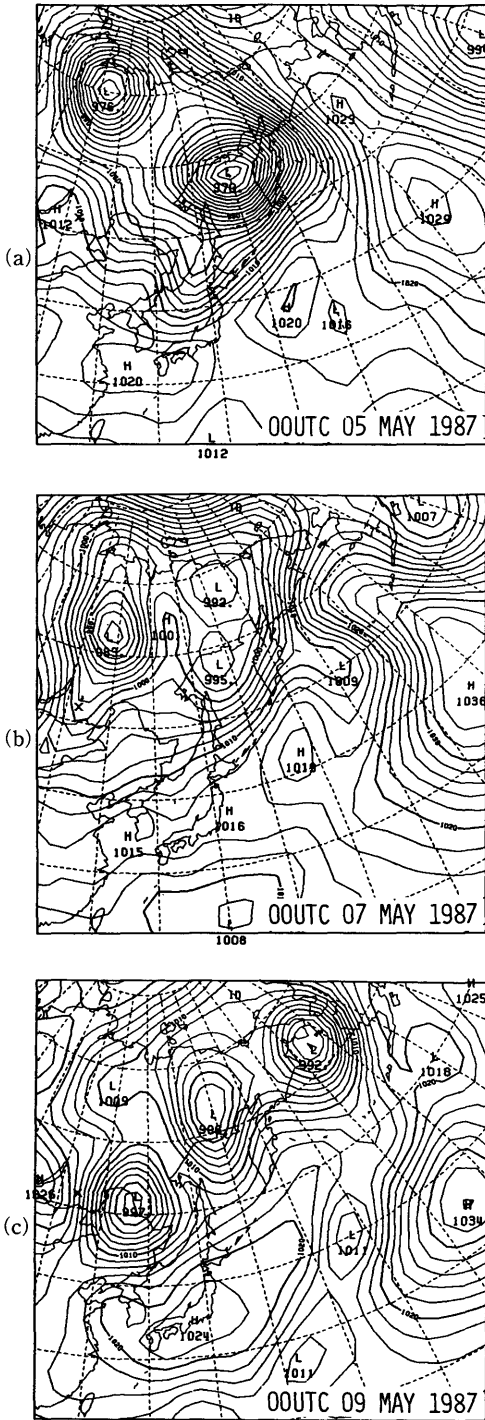


Fig. 14 Sea level pressure distribution.

OOUTCには日本海北部に粒子が滞留しているのが見られる。この粒子はその後東北地方を横切り本州東方海上に出て広がった(5月10日 OOUTC)。この粒子分布は Fig. 1~8 の GMS 可視画像、Fig. 9 のスケッチ図と比較すると良く一致していることが分かる。特に5日の煙発生地点から南東側の大陸上や日本海西部付近、6日の日本海から朝鮮半島にかかる部分と本州から東海上へ伸びる細い帯、10日の日本の東海上での滞留とそこから分岐して細長く北東へ伸びる帯は観測を非常に良く再現している。本州東海上へ広がった煙粒子は南下しそれから拡散して観測と一致した結果となっている。

ここでの計算では、3日から10日まで粒子の放出を連続して行っているが、実際の山林火災では場所が移動したり、火勢が衰えたりしてモデル計算のように1地点から1週間も継続して放出されることはないと考えられる。計算された図のなかで8日以後に放出された粒子分布が観測されないのは、このためであると考えられる。また、GMSの観測では同時に複数の煙発生が認められるので、計算結果の図 (Fig.13) に全く表現されない GMS 観測による煙域は異なる場所から発生して流されたものではないかと考えられる。5月7日 (Fig. 4) に見られる朝鮮半島付近の煙の滞留は良く再現されておらず、他の地点からの放出か或いは地形効果によって滞留を生じたのかもしれない。また、日本海中西部の煙域 (8日、Fig. 9-d) は他の地点からのものと考えられる。

Fig. 15 a)~d) に Q 地点で5月6日より放出を開始した場合を示した。Q 地点は6日の GMS 画像 (Fig. 1) に見られるバイカル湖東の煙発生点を対象にしたものである。計算結果をみると始めはやや南下するが、その後低気圧の前面の風で北へ流され日本付近へは全く南下しないことが分かる。7日の GMS 観測 (Fig. 4) と比較するとアムール川流域での分布は比較的良く観測を再現している。しかし、この後はオホーツク海西部は雲が多くて煙の把握が難しく計算との比較はできなかった。日本海、日本の東海上の煙は Q 地点から発生して流されたものではないことが分かる。

以上の地上気象実況との比較、数値シミュレーション結果との比較から GMS が観測した浮遊物質は煙粒子と考えられること、また、5月6日の日本海域、10日の本州東方海上に観測される煙域は P 地点から5月4日頃放出されたものであることが推定される。

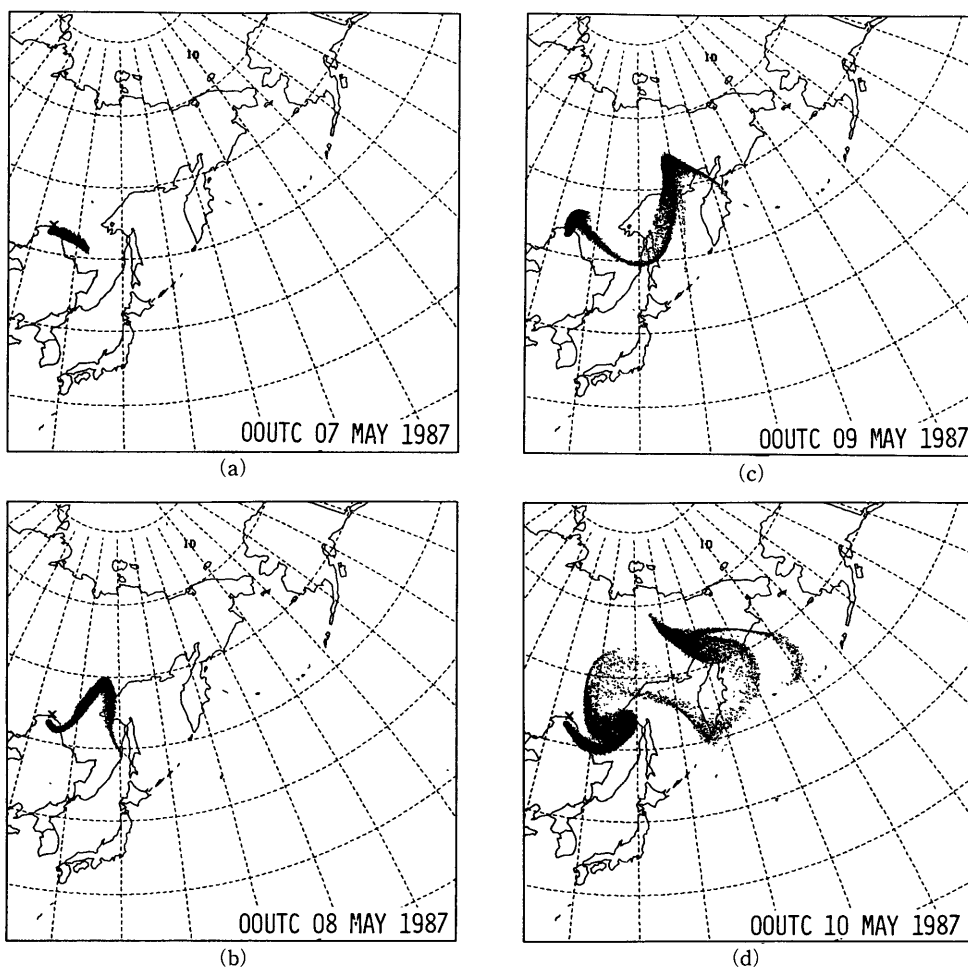


Fig. 15 Predicted horizontal distributions of the tracers from point Q.

4. 煙の移動

GMSで観測される煙域のなかで、境界が明瞭で形状があまり変化していない事例を選んで煙の移動を調べた。5月5日の00UTCと06UTCの比較から中国東北区の煙の先端の移動を追うと南東約30Ktで、実況の風観測と比較すると移流高度は850~500mbに相当する。次に、日本海の寒冷前線に対応する煙の南縁の動きから、移動は東南東へ約25Ktで、日本海周辺の風観測と比較すると移流高度は地上~850mbに相当する。5月10日の00UTC (Fig. 5)、06UTCの比較から日本の東海上の煙の南縁付近は南約25Ktで移流高

度は700mb以下と考えられる。この観測結果は前章で行った数値計算結果をみることで確認される。

Fig. 16 a)~c)に上の3例と同じ時刻のP地点から粒子を放出した場合の緯度-高度分布図を示した。右側に対応する水平分布図を示した。a)ではP地点から800mb以下で南東に移流され40°N付近から上昇して600mbに達している。b)では朝鮮半島から日本海を南東進して本州にかかった粒子は高度が低く800mb以下であるが、北海道を横切ってオホーツク海へと北東進した先端の粒子は低気圧前面に入ったため高度が上昇して500mbまで達している。c)をみると日本の東海上を南下している粒子は移流高度が非常に低く地上から800mb以下に分布している。これらは観測で求めた

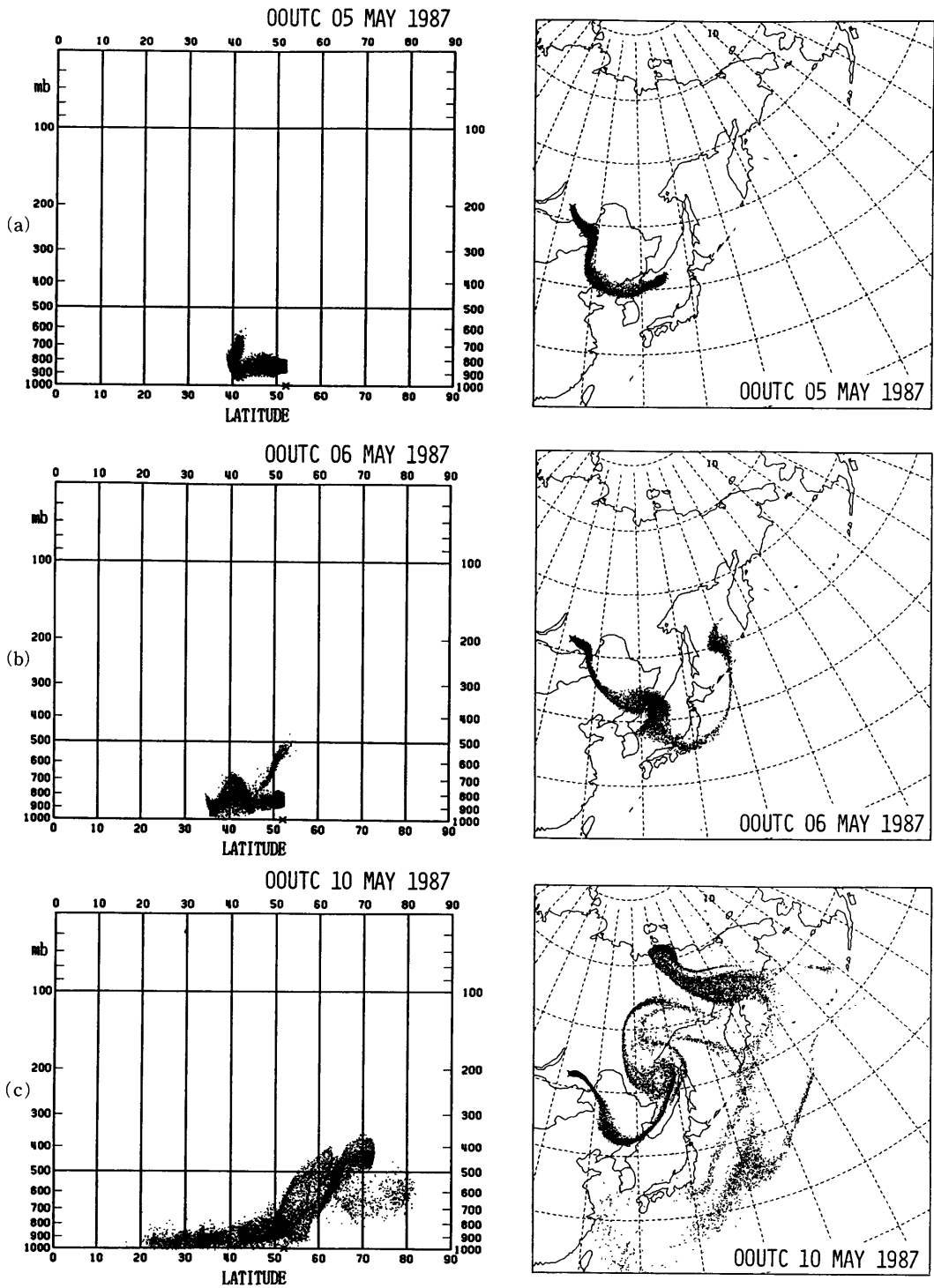


Fig. 16 Predicted vertical (left) and horizontal (right) distributions of the tracers from point P.

煙の移流高度に良く一致している。この3例は同じ場所から発生した煙でも、発生日時が異なればその方向だけでなく移流される高度も一般にかなり異なってくるということを示している。

5. 考察

大規模な山林火災の発生、地上気象実況との比較、粒子移流拡散モデルによる計算結果との比較から観測された浮遊物質は煙粒子と考えられる。しかし、今回は黄砂の場合のように上空を通過したときの吸収率の観測や、実際に捕獲などを行っていない間接証拠ばかりである。また、数値シミュレーションでは大気中からの重力落下・雲内部でのレイアウト・雨滴によるウォッシュアウトなどの除去過程を考慮していない。

山林火災の場合都市火災と異なり、煙の到達高度は通常2~300mで大規模なものでも7~800mで1kmを越えることはない(山下1987)。これがモデル計算の際、粒子を大気下層1kmまでに一様に放出させた理由である。小野(1986)によると山林火災では0.1~1ミクロンの粒径にピークを持つ油煙粒子が多く放出されるが、1ミクロン以上の「巨大粒子」の運動を支配するのは重力による沈降で10ミクロン程度の大きな粒子は重力落下のタイムスケールが数時間である。従ってこのような大きな粒子は風速を考慮しても1000km以上は移動しない。赤外画像で観測される煙域が火災近傍だけであるのは煙濃度の他に1ミクロンより大きな粒子が速やかに落下してしまうためであると考えられる。また、小野(1986)によると0.1~1ミクロンの直径の粒子は雲内部でのレイアウト以外に大気からの有効な除去過程が無く、対流圏での浮遊のタイムスケールは少なくとも5日以上ある。数値計算によると煙発生地点からカムチャッカ半島付近まで一週間以内で輸送されているので、粒子移流拡散モデルにおいて粒子の除去過程を考慮しなくても差し支えないと結論できる。

日本海・太平洋上での可視画像(Fig. 3、5)から、煙域と周囲との反射強度の差異は0.01~0.09程度で黄砂の場合とほぼ同じである。また、赤外画像(Fig. 6)で下の海面水温が観測されることなどから吸収率は非常に低い。

これらのことから煙粒子との確実な同定はできないが、光学的性質(散乱、吸収)と輸送のライフタイムなどから山林火災によって生じた油状の0.1~1ミクロン程度の「大粒子」が観測された「煙」域の構成物

質と考えられる。

煙粒子の移動は総観規模擾乱に大きく影響されている。擾乱前面では移流高度が高く、寒冷前線後面では移流高度は低い。こうした移流高度の違いは山林火災の場合、煙粒子の到達高度が火災による上昇流ではなく、総観規模擾乱の上昇流・下降流によって決定されているためと考えられる。

6. まとめ

GMSによる観測、粒子移流拡散モデルによる計算結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 1987年4月下旬~5月にかけて可視画像でのみ確認できる浮遊物質が観測された。赤外画像ではバイカル湖東側の一部の領域を除いて確認できない。
- 2) 中ソ国境付近で山林火災が発生していたこと、大陸上では煙通報の地上気象実況と良い対応を示すこと、モデル計算で煙分布を良く再現できることから、観測された浮遊物質は山林火災から生じた煙粒子であると結論された。
- 3) 煙域は4月下旬から5月上旬にかけて広範囲に分布し、日本の東海上からカムチャッカ半島付近まで存在する。少なくとも発生源から4~5000km以上、滞留時間にして5日以上はいることが衛星画像から確認できる。
- 4) 海洋上での煙による反射強度の増加は0.01~0.09程度である。
- 5) 煙粒子の移動は総観規模擾乱に大きく影響されている。擾乱前面では移流高度が高く、寒冷前線後面では移流高度は低い。こうした移流高度の違いは山林火災の場合、煙粒子の到達高度が火災による上昇流ではなく、総観規模擾乱の上昇流・下降流によって決定されているためと考えられる。
- 6) 煙域の境界の明瞭な場合が何例も見られた。これは天気図、モデル計算から寒冷前線など気団の境界、水平シアの場所に対応している。

謝辞

気象庁数値予報課中村一予報官には全球移流拡散モデルを用いて4章で示した数値計算のデータを提供して頂きました。また、衛星センター解析課の萩原武士課長、鈴木和史調査官には内容に関する貴重な意見を頂きました。解析課の原田知幸技術専門官には写真作

成・カラー撮影の際、画像表示・色割り当ての計算機プログラムを使用させて頂きました。深く感謝する次第です。

参考文献

- 石坂重次、1979：1979年4月中旬の黄砂、天気、26、725～729。
- 小野晃、1986：「大気汚染物質の動態」、第4章エアロゾル、磯野謙治編、山本義一監修、「大気環境の科学2」、東京大学出版会。
- 木田秀次、松野太郎、1986：「大気汚染物質の動態」、第6章地球規模の輸送過程、磯野謙治編、山本義一監修、「大気環境の科学2」、東京大学出版会。
- 桜田正美、1988：中国大陸上の黄砂、気象、32、9776。
- 高杉年且、中村一、1988：A Tracer Diffusion Model Coupled with The JMA Global Spectral Model, JMA/NPD Technical Report, No. 24
- 中村一、1987：粒子移流拡散モデルについて、数値予報課 NWP ニュース, No.8.
- 長谷川隆司、1980：「ひまわり」から見た黄砂、気象、24、5982～5983。
- 舟田久元、荒井浄、1983：メキシコ・エルチチョン山噴火による火山灰の静止気象衛星 GMS-2 による観測、気象衛星センター技術報告第7号、13～27。
- 八十科洋、矢田チエ子、神林孝司、村山信彦、1982：GMS による1981年の西太平洋の火山噴火観測、気象衛星センター技術報告第5号、47～64。
- 山下邦博（消防研究所）、1987：私信。