

航空機搭載光散乱式粒子計数器による  
エアロゾル粒子数混合比の観測渡辺 征春<sup>1\*</sup>・岩坂 泰信<sup>2†</sup>・長谷 正博<sup>1</sup>・中田 滉<sup>1</sup>・  
山形 定<sup>3</sup>・猪股 弥生<sup>1†</sup>・酒井 哲<sup>1‡</sup>Measurements of particle number mixing ratio with  
aircraft-borne Optical Particle CounterMasaharu Watanabe<sup>1\*</sup>, Yasunobu Iwasaka<sup>2†</sup>, Masahiro Nagatani<sup>1</sup>, Hiroshi Nakata<sup>1</sup>,  
Sadamu Yamagata<sup>3</sup>, Yayoi Inomata<sup>1†</sup> and Tetsu Sakai<sup>1‡</sup>

**Abstract:** Particle number mixing ratios of tropospheric and stratospheric aerosols were observed in the Arctic Airborne Measurement Program 1998 (AAMP 98) using an Optical Particle Counter onboard a sub-sonic aircraft, the Gulfstream II (G-II) in March 1998. The observational results showed horizontally homogeneous distributions of particle number mixing ratio at the cruise altitude (about 12 km). On the other hand, distinct size-number distributions were found at some points on the flight paths, which suggest that effects of the warm conveyor belts appeared eastward of trough of atmospheric pressure. The characteristics of observed particle size-number distributions are discussed with isentropic backward trajectory analyses and geopotential maps.

**要旨:** 98年3月に名古屋を起点として北極点を横断する北極航空機観測計画 AAMP 98 が実施された。ガルフストリーム II 型双発ジェット機の胴体下部に光散乱式粒子計数器 (Optical Particle Counter, OPC) が搭載され、中緯度～極域の対流圏、成層圏エアロゾル粒子数混合比が計測された。観測結果は成層圏 (高度 12 km 巡航) では水平方向には非常に粒子数の変化が少ない、安定した数濃度分布の状態を示したが、数カ所で粒子数に大きな変化が見られた。客観解析、および流跡線解析データと比較した結果、極ジェット外縁部、特に

<sup>1</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所, Solar-Terrestrial Environment Laboratory (STEL), Nagoya University, Toyokawa 442-8507.

<sup>2</sup>名古屋大学太陽地球環境研究所, Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.

<sup>3</sup>北海道大学大学院工学研究科環境資源工学専攻, Division of Environment and Resource Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-13, Nishi-8, Sapporo 060-8628.

Present address:

\*NASDA/EORC, Earth Observation Research Center, National Space Development Agency of Japan, 1-8-10, Harumi, Chuo-ku, Tokyo 104-6023.

†名古屋大学大学院環境学研究科, Division of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya 466-8601.

‡科学技術振興事業団, Japan Science and Technology Corporation, Kawaguchi, Saitama 332-0012.

気圧の谷東側付近で発生している温暖コンペアーベルトの影響を受けた上昇気流が、この粒子数変化の原因である可能性が高いことが分かった。

## 1. はじめに

エアロゾル、特に成層圏に存在する硫酸エアロゾルは化学的に安定なため、空気塊のトレーサーとして成層圏物質循環の解析に用いられてきた (Borrmann *et al.*, 1995)。例えば Farlow *et al.* (1979) は成層圏エアロゾルの粒径分布の緯度による違いから、赤道域成層圏で生成された粒子が次第に粒子上への硫酸ガス凝結、粒子同士の凝集によって成長 (大粒径が増加) しながら大循環によって極域へと輸送されるという考えを示した。また Trepte *et al.* (1993) はピナツボ噴火によって成層圏に注入されたエアロゾルを利用し、成層圏での極方向への空気塊輸送過程が高度によって違うことを示した。

Holton *et al.* (1995) は成層圏・対流圏物質交換過程に関するレビュー論文を近年まとめている。北半球高緯度は子午線断面で見ると等温位面が圏界面と交差している。そのため等温位面における対流圏・成層圏間の空気塊交換過程 (例えば、ブロッキング高気圧、切離低気圧、圏界面折れ込み) が、特に冬から春にかけて活発に発生すると考えられている。しかしその直接観測の困難さから各プロセスの規模、詳細についてはいまだ不明な点が多く、より多くの観測に基づく情報が求められている。

98年3月に名古屋を起点として北極点を横断する北極航空機観測計画 Arctic Airborne Measurement Program 1998 (AAMP 98) が実施された。一般的に低緯度ほど圏界面高度は高いので、通常のジェット航空機で中緯度～極域を巡航する場合、冬季では圏界面付近を通過する場が多い。今回の観測では名古屋やロシアといった中緯度地域ではレベル・フライト時に対流圏の空気塊を捉え、全観測では対流圏と成層圏の遷移領域を横切る形になるので、その観測されたエアロゾル分布から物質交換過程が見えるのではと予想された。本研究ではこの観測飛行に搭載された光散乱式粒子計数器のデータの報告と、それをもとにした議論を行う。

## 2. 観測装置

本観測に使用された装置は、Optical Particle Counter (光散乱式粒子計数器、以後 OPC と略) であり、シグマテック (株) と名古屋大学によって気球搭載用に共同開発された測器で、小型・軽量 (総重量 6 kg 以下) が大きな特徴となっている。OPC の光学系およびフロー・システムの構成を図 1 に示す。エアロゾル粒子を含むサンプル大気が毎分 3 l の流量で測定部まで吸引される。フィルター (カットオフ粒子直径 0.2  $\mu\text{m}$ ) を通し検出可能な粒径のエアロゾルを除去した空気 (シース・エア/流量 毎分 0.5 l) で、吸入したサンプル空気は包み込まれるようになっている。これは吸入されたのち散乱室に残留したエアロゾル粒子による、光学系の汚染お

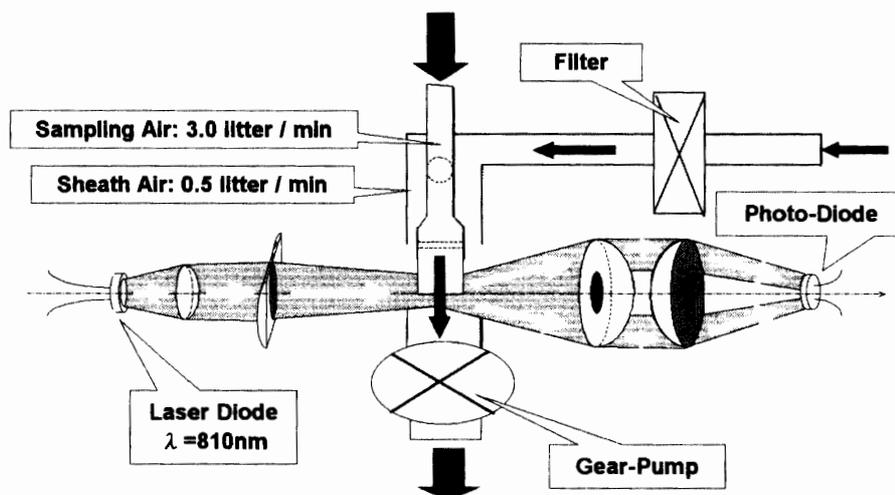


図1 OPCの光学系およびフロー・システムの構成  
 Fig. 1. Schematic diagram of the Optical Particle Counter (OPC).

よび偽計数を防ぐためである。レーザーダイオード光源からの光（波長 810 nm）はマイクロピックアップレンズ、シリンドリカルレンズを通して散乱室で集光される。集光された微小領域に粒子が導入され、レーザービームに対し前方 13-44° の、前方散乱光のみが非球面集光レンズで集められフォトダイオード受光回路で電圧パルスに変換される。その結果、粒子 1 個通過時の散乱光に対し一つの電気パルスが発生し、大粒子ほどそのパルスは高くなるので、適当なスレッシュホールド電圧を設けて計数することで、粒子数に加え粒径をも判別することが出来る。測定周期は 20 秒で、その時間ごとに粒子半径で 0.15, 0.25, 0.4, 0.6, 1.8  $\mu\text{m}$  以上（屈折率 1.4 の球形粒子を仮定）の粒子を各チャンネルで計数する。粒子数データは他の OPC モニターデータ（各部温度、気圧、ポンプ回転数、レーザー出力など）とともに RS232C 通信ケーブルを通し客室内のノートパソコンに送信され、ハード・ディスク及びフロッピー・ディスクに記録された。観測後の処理として、同時モニターしているポンプ温度、気圧、モーター回転数および外気温から粒子計数データは単位体積あたり数濃度に変換される。しかし本観測では OPC 周辺温度はモニターされるものの外気温が直接測定されず（機体側で測定する全温度のみ）、その正確な値が分からないことから数濃度ではなく「空気単位質量あたり粒子数混合比」をオリジナルの観測値として取り扱う。この OPC の特徴の一つとして大気吸引にギヤポンプを採用していることがあげられる。この理由は、通常のダイヤフラム型ポンプでは自由対流圏以上の高度で吸引効率が大幅に低下するのに対し、ギヤポンプは空気粘性を利用してギヤ隙間の空気を排出する仕組みであり、気球観測時に到達する高度 30 km の成層圏でも高い吸入効率を保つためである。しかしこのポンプは構造上、負荷に非常に弱いので長い吸排気用ホースが使用できず、またケースに隙間があるため、本観測では当初予定された（与圧された）機体内に搭載することが不可能であった。

### 3. 機体搭載状況

機体インレット寸法形状と設置状況を図 2(a) に示す。機体インレットは機体胴体下面、主翼前縁の取り外し可能な整備用パネル上に取り付けられ、OPC はそのパネル内側の空間に収納された。この空間は本来整備用かつ主翼着氷防止用温風通路のために確保されており、通気穴があいているため通常は外気圧状態に保たれている。機体巡航時約 200 m/s の空気流に対して OPC のサンプル空気吸入速度は 2.5 m/s 程度であり、直接吸入では非等速サンプリングの問題が生じる。準 1 次元圧縮流を仮定した計算によれば、インレット先端内径 5 mm を通る 200 m/s の空気流は管直径 30 mm まで広がる間に（インレット曲がり部に到達する前に）5 m/s まで減速させることが出来る。このディフューザー部については気流減速時のラム圧縮による 20

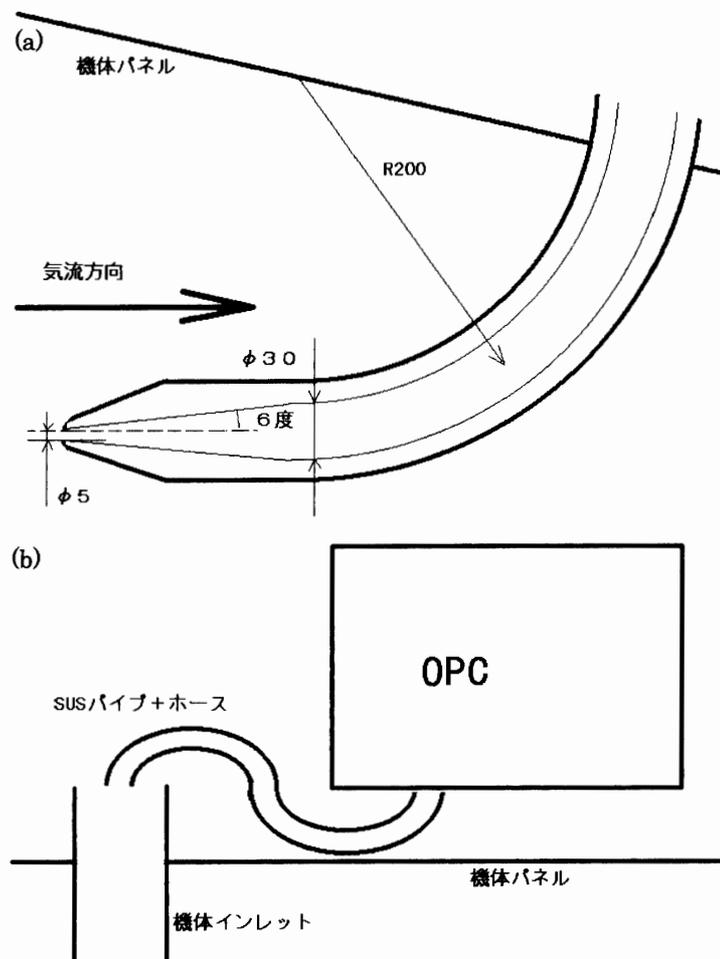


図 2 (a) 機体胴体下、インレットノズル位置 (b) 機体内における、機体インレットノズルと OPC 側インレットの位置関係

Fig. 2. (a) The location and dimensions of the inlet nozzle under the aircraft fuselage. (b) The locations of the aircraft inlet nozzle and the inlet tube connected to the OPC inside the aircraft.

K ほどの昇温が計算上予想されたが、自由対流圏、成層圏で一般的な硫酸(塩)エアロゾルはこの程度の昇温では粒径に影響は少なく、他の観測誤差に比べて十分に小さい。ディフューザー先端のテーパ部傾斜角については、文献(日本機械学会, 1984「流れ: 写真集」)によると $6^\circ$ を越える傾斜角を持つ経路の流れは表面から剝離して乱流が発生する。乱流は粒子同士の凝集や管壁面への粒子付着を引き起こすのでエアロゾル観測では望ましくない。しかし傾斜角を小さくすることはディフューザー部全長を大きくすることにつながり、亜音速ジェット機から前方に突き出す構造物のフラッター等、構造力学上の問題を考えると極力短くする必要があり、最終的に傾斜角は $6^\circ$ となるように設計した。機体表面の乱流境界層がインレット部付近では厚さ10 cmほどになることが表面境界層理論から予想され、その影響を受けない大気を測定するために機体表面から20 cm離れた位置にインレット先端がくるように設計した(図2a)。また曲がり部での曲率半径が大きいほど管内での粒子慣性衝突の効果が少なくなるため図のような全体形状となった。

機体インレット終端と OPC 吸気ホース(材質: テフロン, 先端部: SUS パイプ, 全長約40 cm)との間はギヤポンプの負荷影響を防ぐために開放状態で接続し、バッファの役割を持たせた(図2b)。OPC 吸気ホース使用による計数損失の影響については、粒子半径 $0.6 \mu\text{m}$ までは測定誤差範囲内のレベルであることを事前の実験で確認した。観測最大半径 $1.8 \mu\text{m}$ 以上の粒子に関しては数十%程度の減少が確認され、データ取り扱いに注意を要する。インレットとホースの開放接続部にサーミスタが設置され、機体インレット出口の(ラム圧縮加熱後の)温度がモニターされた。これはディフューザー部が十分な減速効果をもたらしているか、また観測途中で雲粒子の付着等によりインレット内(特に先端)が塞がれてしまっていないかを確認するのが目的である。インレット出口の流量、流速が微小のため簡便な流量計が見当たらず、OPC 周辺でも温度をモニターし、両者と外気温を比較することで間接的に気流の減速効果を判断した。実際の観測データを見てみると(例えば図 A1-I(d))、機体外気温に比べインレット出口温度はだいたい計算で想定された昇温範囲であったことが分かり、ディフューザー部はおおよそ計算通りに気流を減速させ、観測中のインレット内空気流路の閉塞も無かったと考えられる。機体外気温は機体側でモニターしていた全温度を機速から静温度(Static Air Temperature; SAT)に公式によって換算した値とした。

外気取り入れノズルの曲がり部では気流は十分に減速されていたと考えられるが、さらにその減速状態での粒子損失について、粒子の慣性と空気粘性を考慮した粒子軌跡計算(層流を仮定)を事前に行った。計算結果ではほとんど管壁面への衝突損失は見られなかった(粒子直径 $5 \mu\text{m}$ で2-3%)ものの、3月8日に同期観測が実施された OPC 気球観測でのデータと粒径分布を比較してみると(図3)、全体としては粒径が大きいほど、また高度が高いほど飛行機観測で得られた粒子数混合比の方が低く出る結果となり、最大の誤差要因となった。最小粒径( $0.15 < R < 0.25 \mu\text{m}$ )の値がより大きい粒径( $0.25 < R < 0.4 \mu\text{m}$ )に比べ小さく出ているのは、

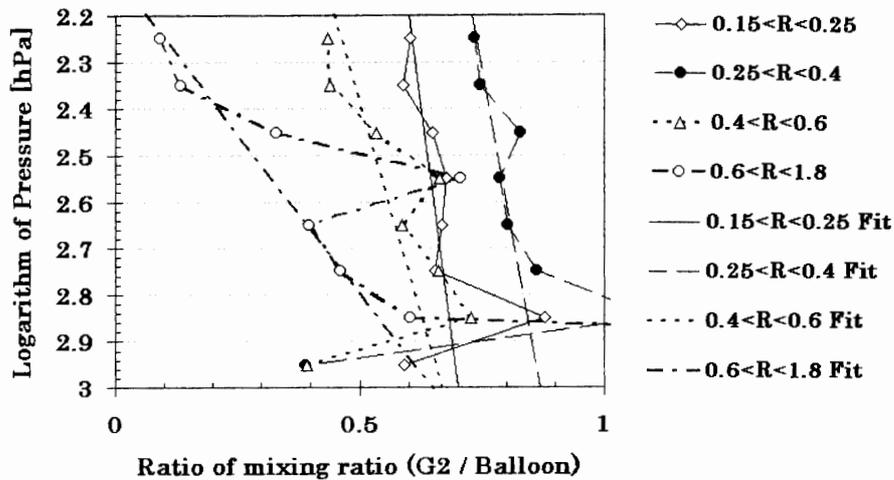


図3 機体搭載 OPC (G2) と気球搭載 OPC (balloon) の観測値 (粒子数) の比。鉛直軸は観測された気圧高度 (hPa) の対数値を示す。プロットされた各点は気圧対数値で 0.1 刻みに平均されたもの。

Fig. 3. Ratio of particle number mixing ratio measured with the OPC onboard the aircraft (G2) by that with the balloon-borne OPC (balloon), on 8 March 1998. The vertical axis indicates the logarithm of the observed pressure altitude (hPa). The data were averaged for each 0.1 of the logarithm of pressure.

これらの粒径では空気粘性に比べ粒子慣性力の影響が比較的小さく気球搭載 OPC と航空機搭載 OPC の粒径設定に起因する誤差 (それぞれ 10% 程度) のほうが大きいと考えられる。しかしその誤差の影響を受けない高度勾配で見れば、(空気粘性の低い) 高々度での減率が大粒径ほど大きいことを図 3 は示している。途中 2 カ所の高度 (気圧対数値で 2.5 と 2.85 近辺) で傾向が大きく変わるところがあるが、これは雲の分布が気球観測地点と航空機観測地点とで若干異なっていたためと思われる。この差の発生原因としては、機体インレット内部の形状や溶接部の凹凸によって乱流が発生してしまい、壁面に粒子が予想より多く付着してしまった可能性が考えられる。航空機搭載 OPC に取り付けられたチューブ中での粒子付着も一部影響している。この他に、機体インレット取り込みから OPC の計測室に粒子が吸引されるまでの加熱によって粒子中水蒸気が一部蒸発して、粒径が縮小してしまった可能性も、特に対流圏では否定できない。このような理由により絶対値として OPC データを取り扱うときは上記 (損失) 誤差に注意する必要がある。また相対値であっても高度プロファイルの鉛直勾配を議論するときは、上記の理由から注意が必要である。動作状況確認のため OPC 内部でも回路基板上で温度モニターが行われた。断熱材 (発砲ウレタン製、側面 4 cm, 上下面 2 cm) によって OPC 内部は観測期間中 0-30°C に保たれており、この温度変化によるレーザーダイオード出力波長変化が粒子数測定に及ぼす影響はレーザーダイオードの仕様によれば他の測定誤差に比べて十分無視できることが確認された。

## 4. 観測結果

3月5日に名古屋(37°N)を出発したガルフストリームII型双発ジェット機は、観測を実施しながらロシア、アラスカを経由して、北極点を通過した後、6日に北極域の Longyearbyen (79°N) に到着、12日まで周辺観測を行い、帰路も同じルートで15日に名古屋に到着した。そのうち地上付近の離発着時を除くほぼ全ての飛行区間で OPC による測定が実施され、途中装置のトラブルもなく、中緯度から北極点までの対流圏、成層圏観測データを取得することが出来た。以下、観測フライトごとのデータの解説を行う。

### 4.1. 5 March 1998: Nagoya-Petropavlovsk

初日は名古屋からロシア・ペトロパブロフスクまで観測(フェリー)フライトが実施された。図 A1-1(a) にこのフライトでのエアロゾル粒子数混合比の観測中時間変化を示す。時刻は以後すべて世界標準時(UTC)で記す。図 A1-1(d) は観測中の飛行高度、外気温(静温度 SAT)、機体インレット出口の大気温度(Inlet\_T)を示す。飛行高度は 01:20 あたりまで 11 km、それ以後は 12 km 付近であり、図中の気温ギャップはこの高度変更によるものと思われる。また気温はこの高度変更時近辺で本フライト最低値を記録している。

図 A2(a) に本フライトにおける気圧高度 200 hPa 面(通常の巡航高度)上のジオポテンシャルハイト分布を示す。地衡風の関係から、この等高度線に沿って Synoptic scale の風の流れが形成されており、隣接する線の間隔の短いところほど強風が吹いている。冬半球の気圧配置として、極側に低気圧が滞在し、低緯度側では高気圧となるのが一般的なため、本文では半球スケールで見た低気圧部を、気圧配置的に高緯度側の空気塊、と表現することにする。また本図は等気圧面上の高度線マップであるが、同時に等高度面の気圧配置と相似でもあるので、以後、便宜上気圧配置の図と呼ぶこともある。図 A2(a) の気圧配置を見ると本フライトはロシア東部で低緯度に張り出した極域側の低気圧部(気圧の谷)を横切る形となっている。

図 A1-1(b1, b2) はそれぞれ名古屋離陸後とペトロパブロフスク着陸前の粒子数混合比の鉛直プロファイルを示す。水平方向の粒子数混合比の分布は図 A1-1(a) から分かるように、高度 12 km を巡航中(図 A1-1(d)) の約 2000 km (800 km/h × 2.5 hours) の間は非常に安定した分布をしている。図 A1-1(b1, b2) の鉛直プロファイルの距離スケール(～10 km) を考えると成層圏エアロゾルが水平方向に非常に安定して分布していることが分かる。

図 A1-1(b1) を見ると名古屋を離陸した時点では高度 8 km あたりまで非常に濃度が高くその高度変化も大きい。8 km より上では粒子数混合比は安定している。気温プロファイルは上空ほど低くなっているが、高度 8 km あたりで勾配が若干変化している。一方ペトロパブロフスク着陸時(図 A1-1(b2)) には高度 8 km あたりで温度勾配が逆転し、圏界面を示している。それより上層(成層圏)と下層(対流圏)で粒子数混合比分布の擾乱の度合いも明らかに異なる。

る。離着陸時の粒子数混合比分布が高度 8 km より上でよく一致していることから、名古屋で観測された 8 km より上の層も成層圏空気塊であると考えて良いと思われる。図 A1-1(b1) のように下部成層圏でも高度と共に緩やかに気温が減少する、あるいは明確な高度変化のない温度プロファイルは冬の極域においてよく観測される。

図 A1-1(a), A1-1(b1, b2) において粒子半径  $0.6 \mu\text{m}$  以上の粒子数混合比に大きなばらつきがあるのは低濃度で統計誤差が大きくなっているためである。また高度 10 km 以上で高度と共にその粒子数が急激な増加を示しているが、これは高々度での流量補正と粒子数混合比の低さが生み出したもので、実際の鉛直勾配とは異なるので注意を要する。

#### 4.2. 6 March 1998: Petropavlovsk-Anchorage

本フライトではロシア・ペトロパブロフスクからアラスカ・アンカレッジまでフェリー・フライトが実施された。図 A2(b) に本フライトにおける気圧高度 200 hPa 面 (通常の巡航高度) 上のジオポテンシャルハイト分布を示す。今回は前回の低気圧張り出し部の東端を横切る飛行となっており、低緯度側空気塊へ向かう観測であった。ペトロパブロフスクには (より高緯度の) アラスカよりも極域に近い空気塊が流れ込んでいたと考えられる。

図 A1-2(c) は本フライト (04:55-08:20 の間, 高度約 11 km を巡航) でのエアロゾル粒子数混合比の観測中時間変化を示す (ただし縦軸は線形スケール)。この図を見ると 06:00 あたりから特に粒子半径  $0.15 \mu\text{m}$  以上で擾乱が激しく、またその擾乱領域の通過前後で粒径分布も違ってきているのが分かる。5 時台に観測された相対的に粒子半径  $0.25, 0.4 \mu\text{m}$  以上の粒子数混合比が高い (気圧配置的には高緯度側の) 粒径分布を A, 7 時台に観測された低濃度の (気圧配置的には低緯度側の) ものを B と、以後呼ぶことにする。図 A1-2(b1, b2) の鉛直プロファイルを見るとペトロパブロフスク側では前回同様、気温プロファイルは高度 8 km あたりで反転し巡航時は成層圏空気を観測しているのに対し、アラスカ・アンカレッジ側では巡航高度でも対流圏下層の温度勾配と大きく変わらず対流圏空気であることを示している。そこでこの粒径分布の違いを説明する原因として 2 つ考えられる。一つは離着陸時の鉛直プロファイルから推測されるように A が成層圏空気塊, B が対流圏空気塊であったため、もう一つは後述する極ジェットに対する相対的位置の違いである。図 A1-2(f) の風速を見ると離陸後の上昇終了前 (04:35 頃) に大きな増加が見られる他、06:00 あたりの粒径分布変化直前に若干の風速増加が見られる。この特徴について後で詳しく議論する。

図 A3(a) は、ペトロパブロフスク離陸から巡航に入った直後に観測された、前述の A の粒径分布を持つ空気塊のバックトラジェクトリー解析を示す。ソースの客観解析データは気象庁・気象研究所から供給されたもの (the Global Objective Analyses Data of the Japan Meteorological Agency) である。この図を見ると過去 10 日間にわたって高緯度 (北緯  $50^\circ$  以上) に観測空気塊は滞在していたことが分かる。これに対し図 A3(b) は図 A1-2(c) で粒子数混合比

布に大きな変化が現れた地点の解析結果であるが、過去 10 日間では 40-45°N あたりの、より低緯度に起源を持っている。図 A3(c) は粒子数混合比分布変化直後 (7 時) のもので、図 A3(b) に近い履歴を持っている。

#### 4.3. 6 March 1998: Anchorage-Barrow

フライトパスは前フライトと共に図 A2(b) に載せてある。アンカレッジからバローまでのフライトでは、図 A1-3(b1) (Anchorage), 図 A1-3(b2) (Barrow) の気温鉛直プロファイルから分かるように、離着陸時にはいずれも圏界面を通過している。この間の高度、気温プロファイルが安定している (図 A1-3(d)) ことから成層圏を飛行したと判断でき、その間の粒径分布は B に近い (図 A1-3(c))。圏界面はアンカレッジで 11 km, バローでは 10 km であった。図 A3(d) は巡航時に観測された空気塊の履歴を示すが、低緯度側の空気塊が 2 日ほど前から高緯度側へ移動してきている。上部対流圏における、一般的な温位の緯度勾配を考えると、高緯度側への移流はより高い高度への上昇運動につながる。これが本フライトで観測された比較的高い圏界面高度を形成したと考えられる。

#### 4.4. 7 March 1998: Barrow-Longyearbyen (以後 LGY と略)

本フライトは北極点を通過する横断飛行であった。このときの気圧配置を図 A2(c) で見ると観測機は気圧の尾根の部分から極低気圧部に進入し、到着地点のロングイヤビーンは極低気圧内部にあった。離陸時に高度 10 km にて圏界面を通過し、巡航高度 12 km に達したのちの 5:40-6:00 あたりで粒子半径  $0.15 \mu\text{m}$  以上で粒子数混合比は増加し、他の粒径域では逆に減少した (図 A1-4(c))。その時間以後は粒径分布 A に近い粒子数混合比分布を示している。図 A3(e) はこの粒子数混合比変化が現れた地点の履歴であるが、前日のもの同様、低緯度側から上昇してきた空気塊を観測している。同図の高度履歴、温度履歴を見てみると 1 日前に空気塊は上昇し、それに伴う 10 K もの気温減少を経験している。これによって通常 OPC で観測できない小粒径 ( $R < 0.15 \mu\text{m}$ ) の粒子が凝結成長して検出された結果、数濃度が増加した可能性がある。一方、図 A3(f) はロングイヤビーン付近での履歴であるが、数日前から極域に滞在し、あまり移動していなかったことが示されている。図 A1-4(f) の風速を見ると 06:20 あたりに本フライトでの最大値を記録しており、この風速最大の領域より低緯度側で粒子数混合比変化が生じていることが、図 A1-4(c) から分かる。風速の大きい地点を図 A2(c) で見ると、いずれも等高線が比較的密になっているところであり、極ジェットが形成されていたと考えられる。これまで注目してきた粒子数混合比変化の領域はいずれも極ジェット外周部において発生している。

#### 4.5. 8 March 1998: LGY-Ny-Ålesund-LGY

本フライトは観測拠点であるロングイヤビーンに到着して最初の周辺観測 (ニーオルスン

経由) となった。図 A1-5(b2) を見て分かるように、本フライトは空間分解能の高い鉛直プロフィールの取得が目的の一つとなっており、これに同期した OPC 気球観測が実施された。比較結果は図 3 に示したとおりである。圏界面高度は 9 km あたりであったが、明確なものではない。図 A1-5(b2) を見ると高度 8 km あたり (11:30 頃) と 1 km あたり (12:20 頃) に粒子数の増加が見られる。一般的な雲内に存在するエアロゾル粒子の粒径分布は大粒子が多数を占めるが、高度 8 km ではどちらかという小粒径ほど増加の割合が高い。

#### 4.6. 9 March 1998: LGY-Tromsø-LGY

本フライトは雲粒子観測が第一目的となっていたため、図 A1-6(a) から明らかなように非常に高濃度の粒子層を度々観測した。このときのエアロゾル粒子数は OPC の観測限界を超えて飽和状態になっている。例えば観測時間で 11:00-12:20, 13:10-13:30 のように特に大粒径の粒子数混合比の高い状態では OPC はパルス検出回路が正確に計数出来なくなり、この間のデータについては、絶対値は勿論、他の測定値と比較する場合においても取り扱いに注意を要する。

#### 4.7. 10 March 1998: LGY-Ny-Ålesund-LGY

周辺飛行の最終日、観測中の最高高度 13 km 近辺までの鉛直プロフィールが測定された。圏界面高度は高度 9.5 km でかなり明確な温度勾配変化が観測され (図 A1-7(b2)), 圏界面より上では粒子数混合比の安定した鉛直プロフィールが観測された。高度 7,9 km の上部対流圏に雲粒子と思われる大粒子層が観測された。

#### 4.8. 12 March 1998: Longyearbyen-Barrow

この日は 7 日と逆ルートの北極点横断飛行であった。図 A2(d) の気圧配置で見るとロングイヤビーンは気圧の尾根に位置しており、より低緯度側の空気塊が到達していることを示している。同様に気圧の尾根がバロー側にも存在しており、観測機は長く伸びた極低気圧部のくびれの部分をまたがって飛行した。図 A1-8(b1) (ロングイヤビーン)、図 A1-8(b2) (バロー) の鉛直プロフィールを見ると、この観測時の圏界面は高度 11 km あたりとこれまでに観測された平均的圏界面より高く、両地点の対流圏は比較的低緯度側の空気塊が存在していたことを示している。バロー上空ではより明瞭な圏界面が温度勾配から見えた。

機体は 16:50 頃に北極点を通過しており、風速は巡航状態に入ってから北極点通過前 (16:00 頃) と後 (18:00 頃) に 1 回ずつ強風域を通過していることから (図 A1-8(f)), 本フライトでは極ジェットの外周から反対側外周までまたがった観測が行われたと考えられる。この二つの強風域と比較して図 A1-8(c) を見ると、やはり粒子数混合比の変化 (今回は観測全粒径での粒子数混合比の減少) (15:40 と 18:50 あたり) は極ジェットの外周部で発生しているのが分かる。図 A1-8(c) の粒径分布で見ると、風速の 2 つのピークに挟まれた領域では今まで述べ

てきた粒径分布 A に近く、バロー側の極ジェット外周部では粒径分布 B に近い。

図 A3(g) はロングイヤビーン離陸後の粒子数混合比変化域を通過した後の地点の履歴であるが、過去 10 日間にわたって極域に滞留していたことを示している。一方、図 A3(h) はバロー側の粒子数混合比変化域での履歴を調べたものであるが、7 日の図 A3(e) 同様低緯度からの移流が見られる。

#### 4.9. 12 March 1998: Barrow-Anchorage

本フライトではバロー離陸時、高度 9 km あたりの上部対流圏において、全粒径で粒子数の急激な減少（おおよそ数十分の一）が観測された（図 A1-9(b1)）。この減少は前日のバロー上空（図 A1-8(b2)）でも規模は小さいが観測されており、装置のトラブルではないと考えられる。観測空間幅で 1 km ほどと、トラジェクトリー解析を行うには空間スケールが小さすぎるが、参考までに濃度減少の地点の履歴を取ったものが図 A3(i) である。低緯度からの移流の他に、湿度履歴を見ると 1 日ほど前まで非常に高湿度であった気塊が急に乾燥しており、水蒸気過飽和による粒子成長と降水による粒子の除去が生じ、（上下層からの粒子が拡散によって供給される前に）測定が行われたということが、可能性の一つとして挙げられる。図 A3(j) はバロー上空での鉛直プロファイル観測終了後の巡航時に観測された空気塊の履歴であるが、低緯度からの移流を示している。図 A2(e) の気圧配置を見ても、本フライトは低緯度から北上してきた空気塊を観測していたことが分かる。

#### 4.10. 13 March 1998: Anchorage-Petropavlovsk

この日のフライトでは巡航高度を 11 km 辺りとしたため離着陸時に圏界面を越えていない。そのため巡航時の粒子数混合比の変化が他のフライト巡航時に比べて大きく（図 A1-10(a)）、成層圏に対して対流圏の粒子数混合比の水平分布変化が大きいことを示している。雲粒子が大きく影響を与えていると思われるが、00:30 あたりの粒子増加は小粒径ほど規模が大きく、大粒子が多数を占める一般的な雲粒子の粒径分布とは異なっている。図 A1-10(f) を見ると本フライトでは巡航時に 2 つの風速極大領域があり、風向で見ると両者はほぼ正反対の風向きであった。2 つの風速極大領域をそれぞれトラジェクトリー解析したのが図 A3(k, l) であり、図 A3(k) は低緯度側に大きく南下した後に再び北上してきた空気塊、図 A3(l) は南下前の空気塊であるために、このような風速分布になったことが分かる。図 A2(f) を見て分かるようにアラスカの南側に切離低気圧が発生しており、トラジェクトリーでの大きな蛇行はこれが原因と考えられる。

#### 4.11. 14 March 1998: Petropavlovsk-Nagoya

離陸時の圏界面高度は 11 km あたりと比較的高く、他の日の巡航時プロファイルと比べ図

A1-11(c) で粒子数混合比の変化が若干大きいのは圏界面と近いために対流圏空気塊の影響を受けていると考えられる。07:10 あたりに粒子数混合比の小さなギャップが見られるが、これは飛行高度が数百メートル上昇したためエアロゾル高度分布の違いを観測したものである。トラジェクトリー解析結果、気圧配置図を見ると巡航中の履歴は低緯度側空気塊を観測していたことを示している。しかし巡航時の粒径分布 (図 A1-11(c)) は粒子半径  $0.25, 0.4 \mu\text{m}$  以上の粒子数混合比が比較的高く、さきに名古屋-アンカレッジ-ペトロパブロフスク間の観測で定義した粒径分布 A に近い。この原因としては、フライトパス西側に切離低気圧が発達しており極側の空気塊の影響を受けていた可能性が考えられる。

## 5. データ検討

今回の観測での粒径分布の傾向をまとめると、巡航高度 (約 12 km, 成層圏底部) で見た場合、極ジェット内部と外周部では粒径分布が異なり、観測最小粒径の粒子半径  $0.15 \mu\text{m}$  以上の粒子数混合比に対し、内部はより大粒径の粒子の粒子数混合比が高い。これは赤道域成層圏で生成された粒子が次第に硫酸ガス凝結、粒子同士の凝集によって成長 (大粒径が増加) しながら大循環によって極域へと輸送されるという考え (Farlow *et al.*, 1979) と一致している。

「はじめに」で述べたように、今回の観測は対流圏・成層圏間の空気塊交換過程が活発な領域を飛行するため、対流圏と成層圏の気塊交換過程がエアロゾル分布から見えるのではと予想された。しかし、今回の実際の飛行は上昇・下降時にほとんどが圏界面を通過し巡航時は成層圏を飛行したと考えられ、対数スケールで見た粒子数分布の変化が巡航時には小さいことから、巡航時に測定されたのは大部分が成層圏空気塊であろうと考えられる。ただし粒子数混合比の時系列図を線形軸で書き直してみると、観測された大部分の領域で測定誤差 (統計誤差) では説明付かない大きさの変化を示し、水平スケールで数十~数百 km といった領域で粒子数混合比の異なるところが数カ所存在した。今回の飛行高度は成層圏とはいえ圏界面から十分離れた高度ではなく、対流圏からの影響を受けたと考えられる。

図 4 は (測定された全温度から求めた) 外気温 (SAT) から計算された温位の鉛直プロフィールである。高度 10 km 以下では大きく 2 つの分類に分かれることがはっきり分かり、これまでの議論と合わせると、高温位側は極ジェット外側、低温位側は内側にほぼ一致する。一例を取ってみれば温位 300 K の空気塊は、極ジェット外側では高度 5, 6 km の自由対流圏にあるが、内側では高度 9, 10 km の圏界面か成層圏底部に位置し、ジェットをまたがる移流が起きれば (あるいは拡散混合に十分な時間滞在すれば) 等温位面上で成層圏・対流圏の空気塊交換が行われることを意味している。

今回の観測で頻繁に見られた現象として、極ジェット外縁部で発生した粒子数混合比の変化 (減少) が挙げられる。これについては空気塊の上昇に伴う見かけ上の減少である可能性が高い。成層圏エアロゾルは圏界面から数 km 上空でピークを持つため、それより下の底部では

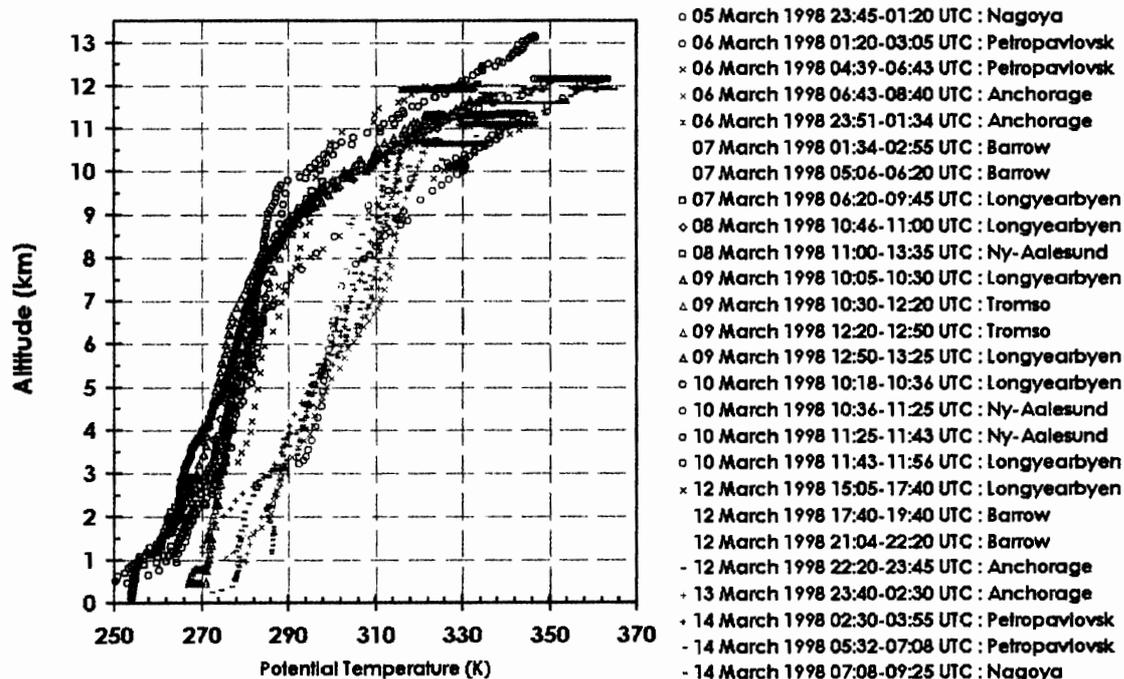


図4 全観測における温位の鉛直プロファイル

Fig. 4. Vertical profiles of the potential temperature (K) for all the flights.

下層ほど粒子数混合比が低くなっている。しかし図 A1-4(c)に見られたように粒子半径  $0.15 \mu\text{m}$  以上で粒子数混合比の増加が見られることもあり、これは前述のように空気塊上昇に伴う気温減少によって通常 OPC で観測できない小粒径 ( $R < 0.15 \mu\text{m}$ ) の粒子が凝結成長したものが検出されたと考えられる。このような気圧の谷・東側付近での上昇流は温暖/寒冷コンベアーベルトと呼ばれている (小倉, 2000)。温暖コンベアーベルトは気圧の谷付近から地表近くの暖湿な低緯度空気塊を引き込み、その風速極大軸の東側 (ジェットの外縁) で雲生成や降水を伴う上昇流を引き起こす。この特徴は本観測で得られた風速分布、粒子数分布と一致する。

また本観測では自由対流圏および成層圏底部における粒子数混合比の増大について、大粒径粒子側が増加するパターンと、小粒子ほど増加するパターンの2通りが見られた。通常自由対流圏および成層圏底部で観測されるエアロゾルの粒径分布を考慮すると、水蒸気の凝結によって既存粒子が全体的に成長する場合には大粒径ほど数濃度増加率が高くなるので、前者はこのプロセスでも説明が可能である。後者については、観測限界より小粒径だが高濃度の粒子が既に存在あるいはガスから生成して、凝結成長により可観測粒径まで成長して検出されたと考えられる。

今回の観測結果の問題点として、エアロゾルは水平方向の均一性に比べて鉛直方向には非常に細かな変化があるために、高度が異なった各フライト巡航時の粒径分布を単純に比較できないことがある。比較のためにはある程度の高度幅を持った観測が必要であることが本観測に

よって分かった。今後のエアロゾル航空機観測では、巡航時に1,2回鉛直プロファイルを取り3次元的な空間分布構造の把握に役立てるなどの観測手法が期待される。

もう一つの問題として気球観測データと比較して特に大粒子側で計数損失が大きかったことが挙げられる。もっとも可能性の高い損失箇所は機体インレット(曲がり部)およびOPC吸入ホースであり、OPC観測でよく問題になるものである。これを避ける一つの方法として、機体胴体に観測用ポッドをつり下げ、インレットは直線形で減速のためのディフューザー部のみ持つものとし、そのまま最短距離で(接続ホースを使用せずに)OPCインレットに開放接続する方式が考えられる。インレットについても今回は機体固定式としたが、厳密には気流に平行でないと非等速サンプリングとなってしまうので、風見鶏のようなサンプリング・デバイスを付加し、常に気流に平行な状態でサンプリングできるものが望ましい。

## 6. ま と め

中緯度～極域の対流圏、成層圏エアロゾル粒子数を計測するために、ガルフストリームII型双発ジェット機に光散乱式粒子計数器が搭載され、98年3月に名古屋から北極点を横断するAAMP 98キャンペーンが実施された。観測の結果、成層圏では水平方向には非常に粒子数の変化が少ない、安定した数濃度分布を示したが、数カ所で粒子数に大きな変化が検出された。極ジェット外縁部、特に気圧の谷東側付近で発生している温暖コンペアーベルトの影響を受けた上昇気流が、この変化の原因である可能性が高い。3月8日に同期して行われた気球観測のデータと比較して、航空機観測データは特に高々度、大粒子側で計数損失が大きく、絶対値の評価については問題が残った。

## 謝 辞

名古屋大学長田和雄助手(現助教授)、ダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様、特に大須賀勝氏、大橋敏次氏、景山大郎氏、北原国治氏、上根通氏にはOPC搭載、運行に当たり大変お世話になりました。本観測へのOPC参加を認めていただいた国立極地研究所塩原匡貴先生、現地まで引率していただいた国立極地研究所藤井理行先生にお礼申し上げます。

## 文 献

- Borrmann, S., Dye, J.E., Baumgardner, D., Proffitt, M.H., Margitan, J., Wilson, J.C., Jonsson, H.H., Brock, C.A., Loewenstein, M., Podolske, J.R. and Ferry, G.V. (1995): Aerosols as dynamical tracers in the lower stratosphere: Ozone versus aerosol correlation after the Mount Pinatubo eruption. *J. Geophys. Res.*, **100**, 11147-11156.
- Farlow, N.H., Ferry, G.V., Lem, H.Y. and Hayes, D.M. (1979): Latitudinal variations of stratospheric aerosols. *J. Geophys. Res.*, **84**, 733-743.
- Holton, J.R., Haynes, P.H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood, R.B. and Pfister, L. (1995): Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.

日本機械学会編 (1984): 流れ: 写真集. 東京, 丸善, 134 p.

小倉義光 (2000): 総観気象学入門. 東京, 東京大学出版会, 289 p.

Trepte, C.R., Veiga, R.E. and McCormick, M.P. (1993): The poleward dispersal of Mount Pinatubo volcanic aerosol. *J. Geophys. Res.*, **98**, 18563-18573.

(2001年4月10日受付; 2002年1月29日受理)

## APPENDIX

図 A1 フライト別 OPC 観測データ一覧。添え数字はフライト順を示す。添え数字あとのアルファベットの意味は以下の通り:

(a) 各フライトにおける各粒径ごとの空気単位質量あたり粒子数混合比 ( $\text{mg}^{-1}$ ) の時間変化。時刻は UTC。鉛直軸は対数値である。(b) 上昇・下降時における気温および各粒径ごとの粒子数混合比 ( $\text{mg}^{-1}$ ) の鉛直プロファイル。(c) 図 (a) に対し、縦軸を対数軸から線形軸に変更した、各粒径における粒子数混合比 ( $\text{mg}^{-1}$ ) の時間変化。時刻は UTC。各粒径で比較しやすいようにそれぞれ乗数 ( $X$ ) を掛け、さらに移動平均 (前後 RM 区間) を取ったもの。(d) 各フライトにおける高度、機体インレット出口温度 (Inlet\_T, 単位は度)、外気温 (SAT, 単位は摂氏) の時間変化。時刻は UTC。(e) フライト中の機体の緯度 (北が正, 単位は度)、経度 (東が正, 単位は度) の時間変化。(f) フライト中の風向 (北向き 0 として時計回り正, 単位は度)、風速 (m/s) の時間変化。

Fig. A1. Measurement results on each flight. Letters after numbers mean the following: (a) Particle number mixing ratio ( $\text{mg}^{-1}$ ) for each size versus time (UTC). The vertical axis is on a logarithmic scale. (b) Vertical profiles of static air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and particle number mixing ratio ( $\text{mg}^{-1}$ ) for each size during the period shown in the title. (c) Particle number mixing ratio ( $\text{mg}^{-1}$ ) for each size versus time (UTC). The vertical axis is on a linear scale. The data were multiplied by a factor  $X$  for each size and were smoothed by the running mean method using adjacent RM sampling points. (d) The flight altitude, the temperature at the exit of the aircraft inlet, and the outer air temperature (Static Air Temperature) versus time (UTC) on each flight. (e) The latitude and longitude of each flight versus time (UTC). (f) The wind direction and the wind speed on each flight path versus time.

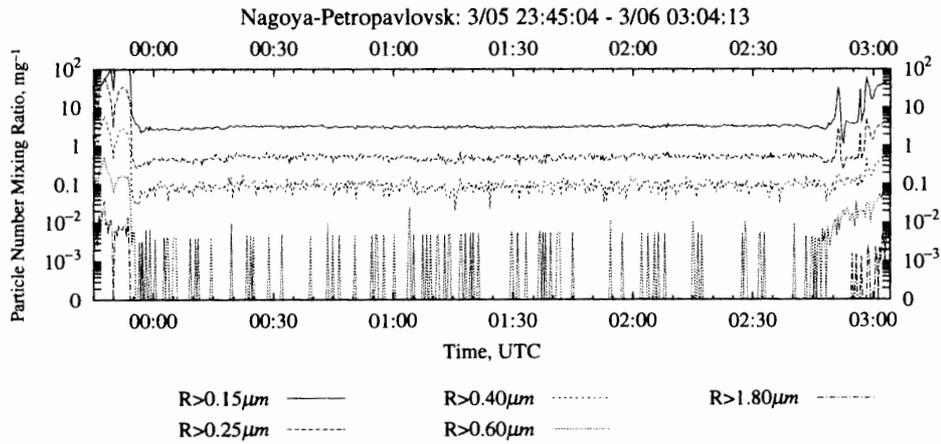


Figure A1-1(a)

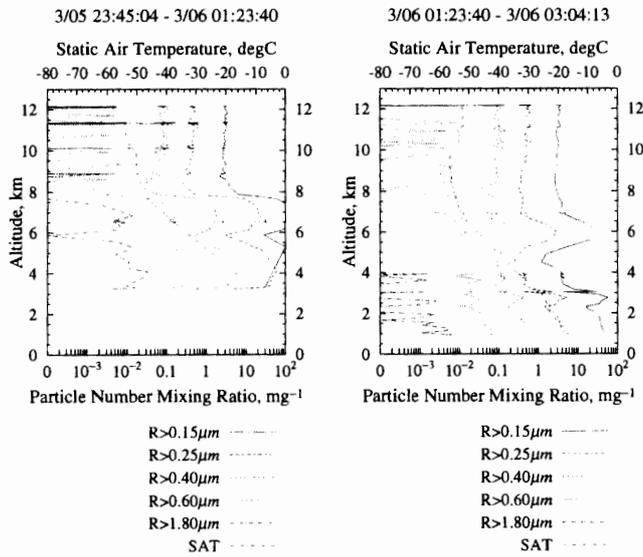


Figure A1-1(b1)

Figure A1-1(b2)

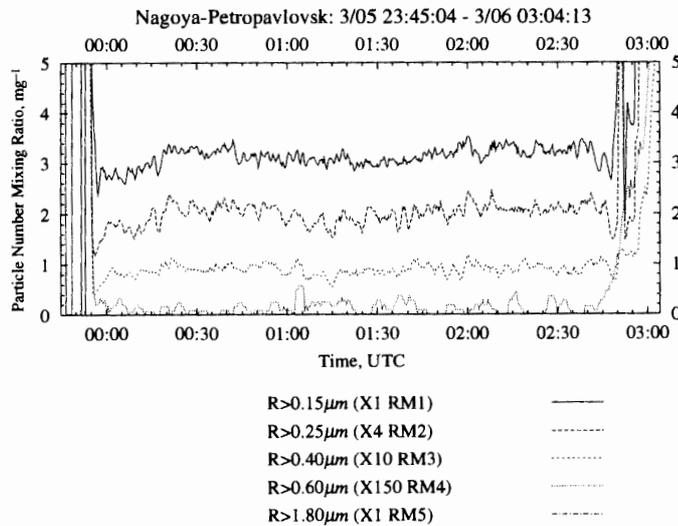


Figure A1-1(c)

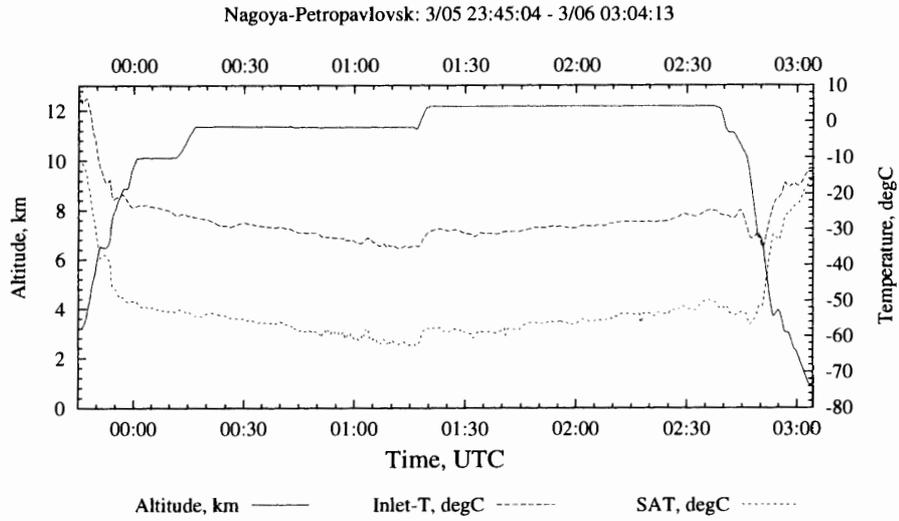


Figure A1-1(d)

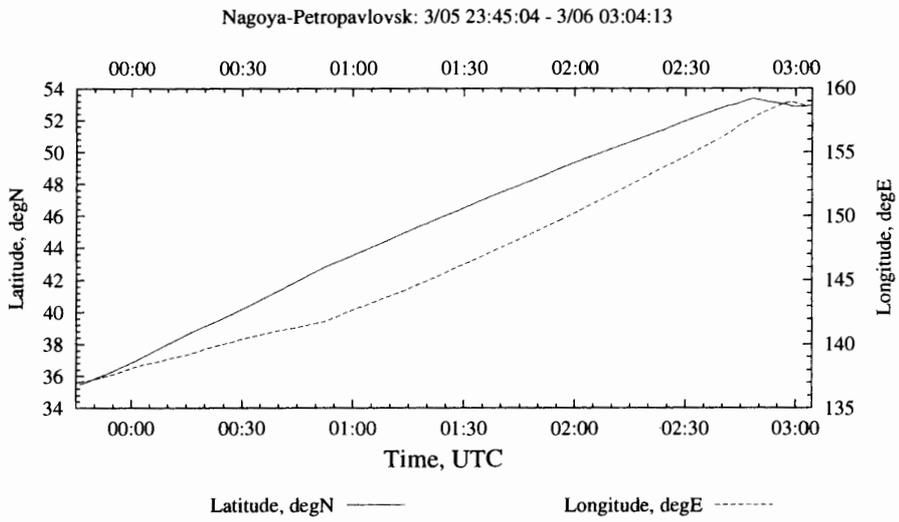


Figure A1-1(e)

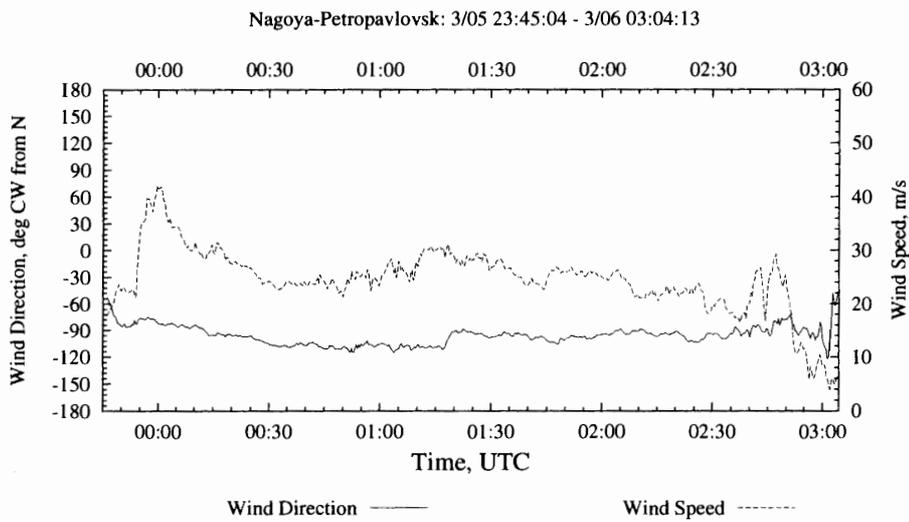


Figure A1-1(f)

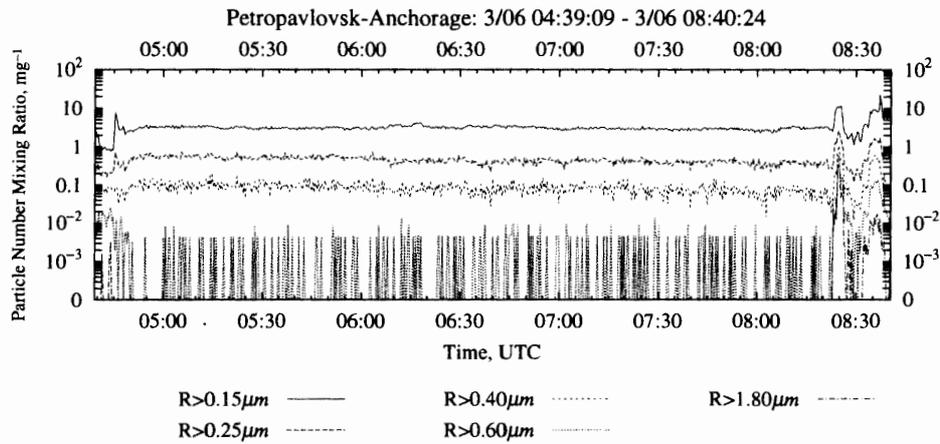


Figure A1-2(a)

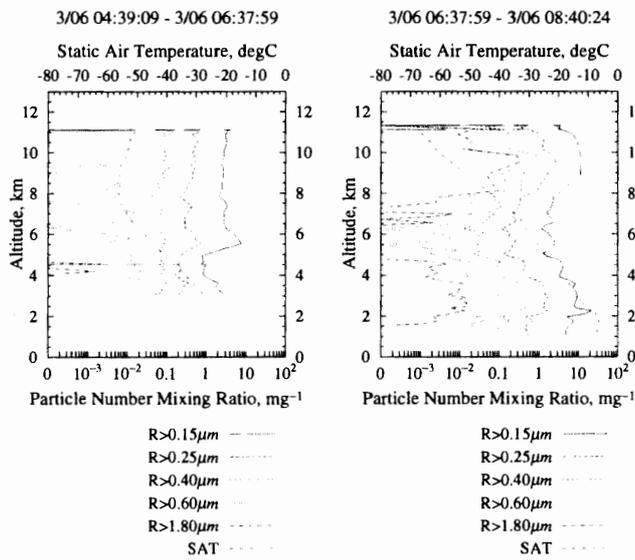


Figure A1-2(b1)

Figure A1-2(b2)

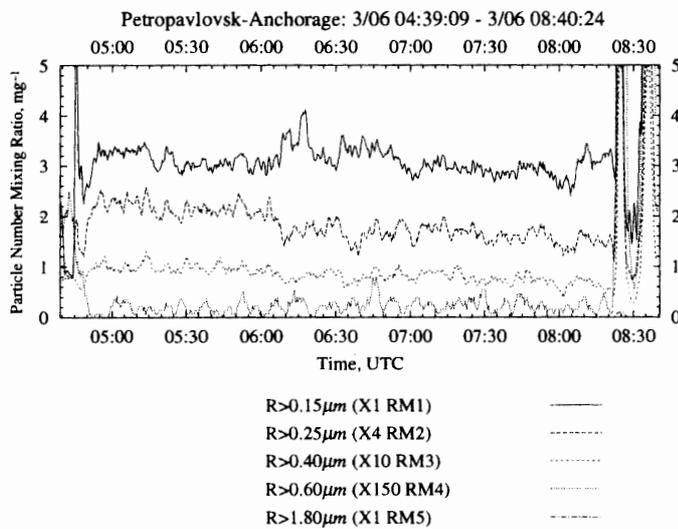


Figure A1-2(c)

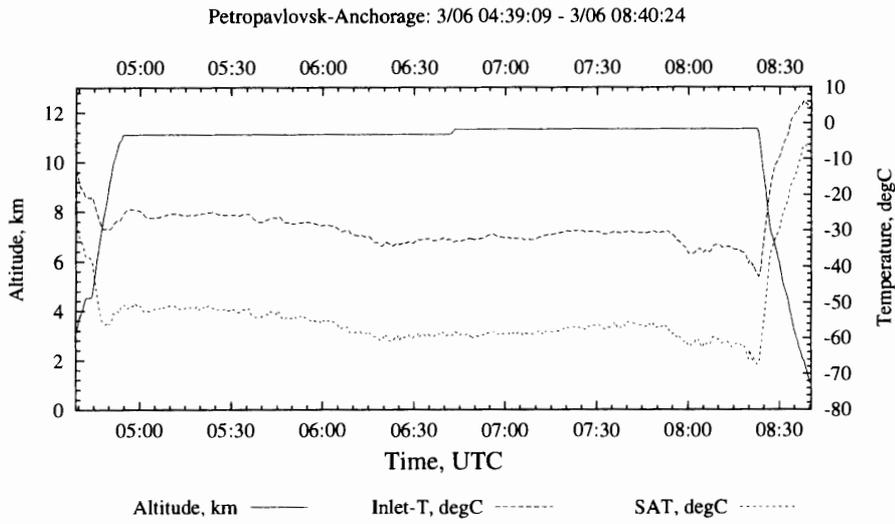


Figure A1-2(d)

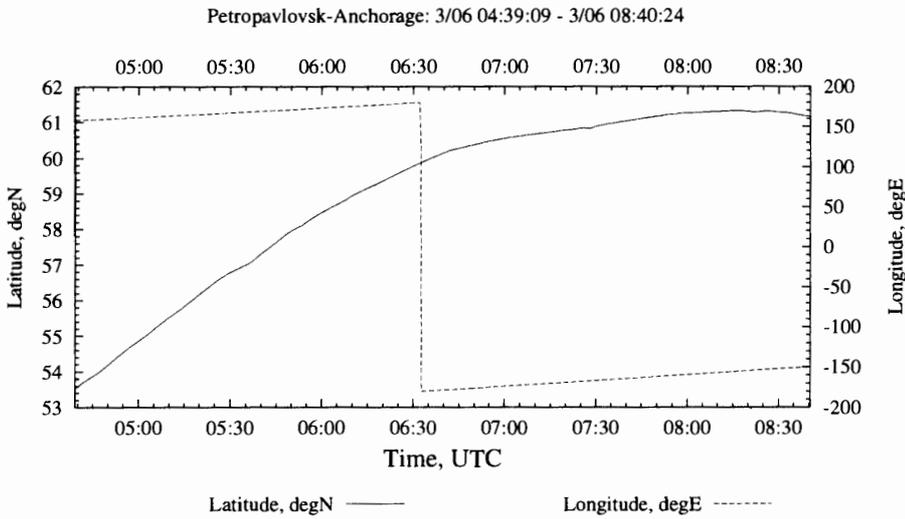


Figure A1-2(e)

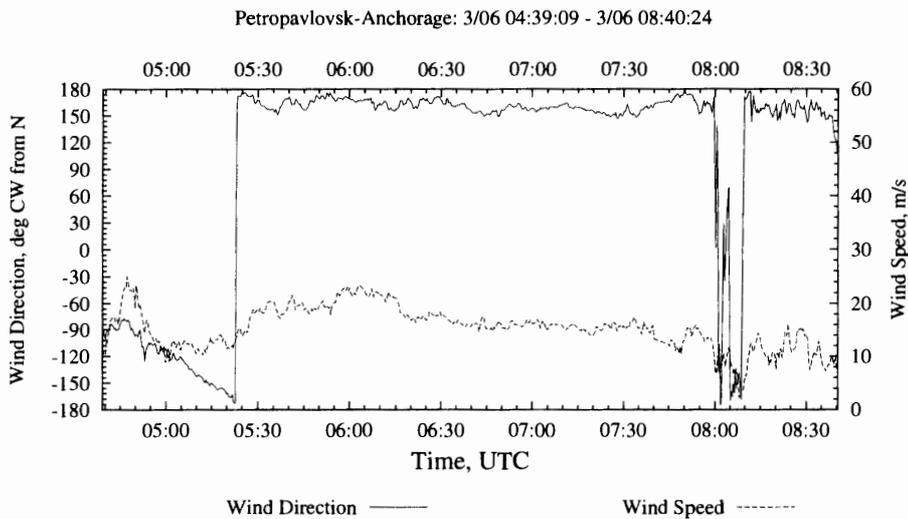


Figure A1-2(f)

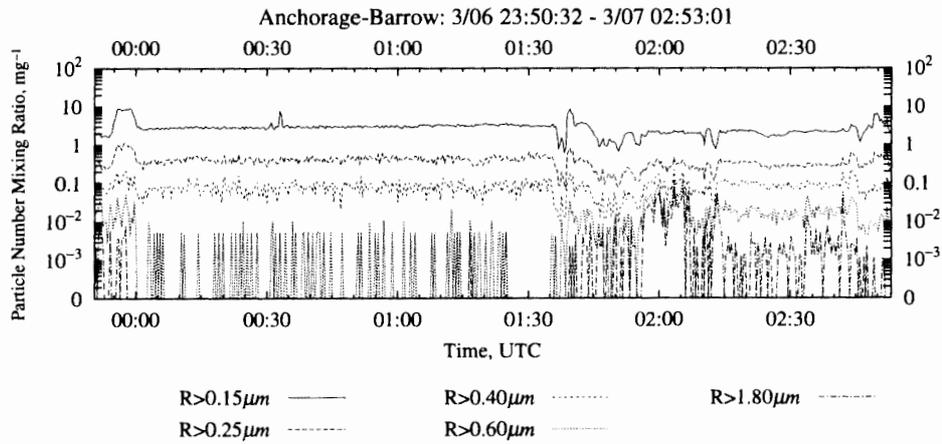


Figure A1-3(a)

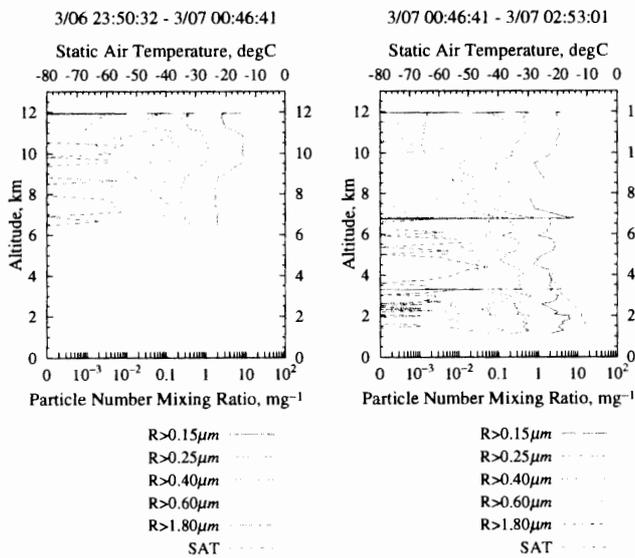


Figure A1-3(b1)

Figure A1-3(b2)

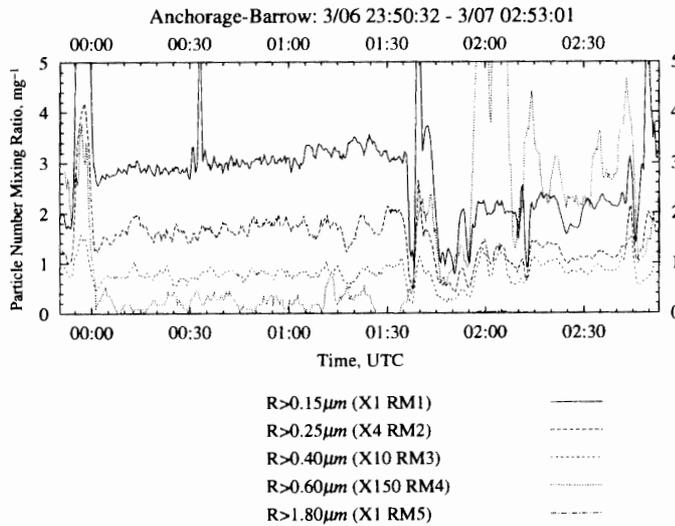


Figure A1-3(c)

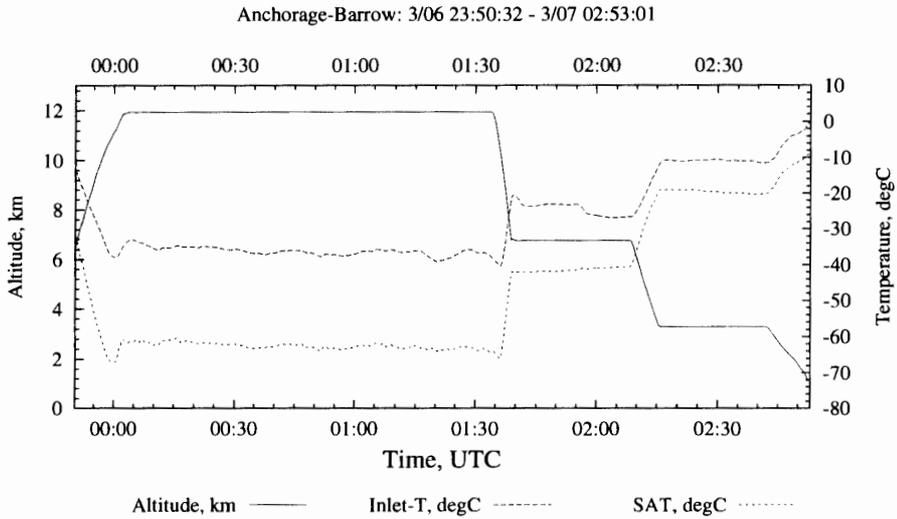


Figure A1-3(d)

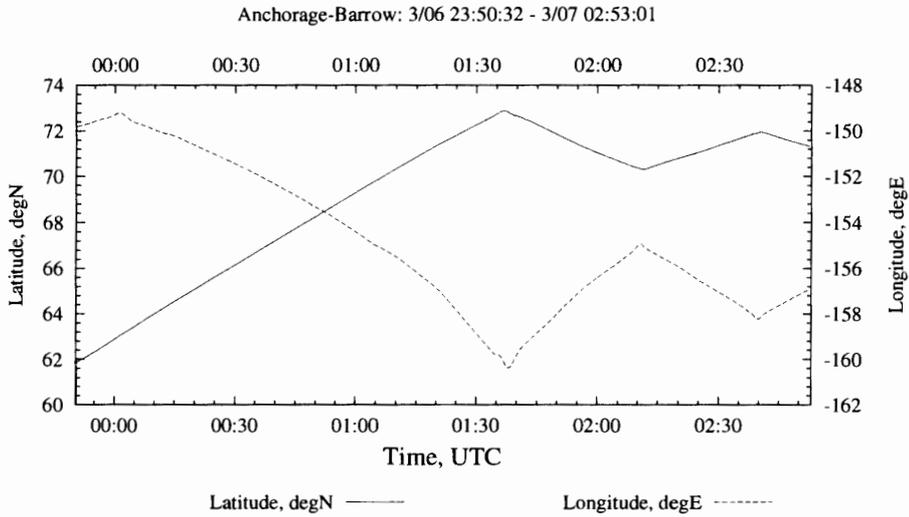


Figure A1-3(e)

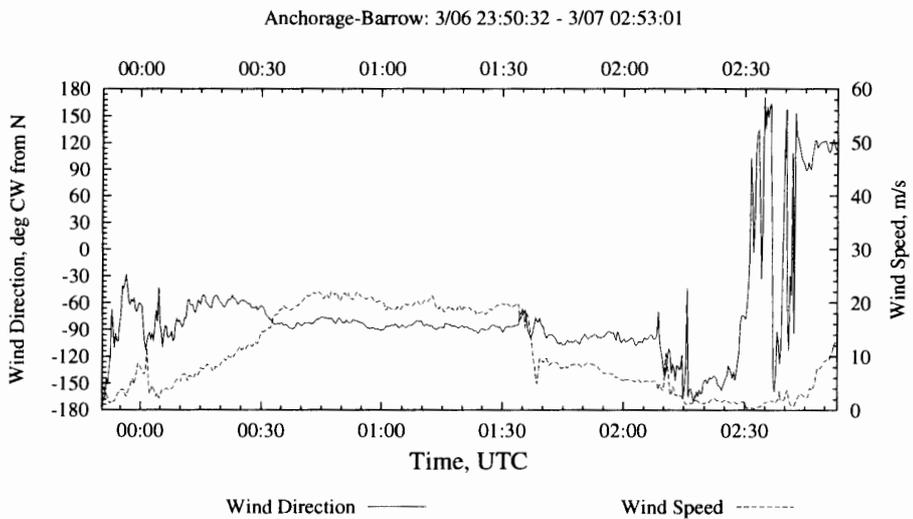


Figure A1-3(f)

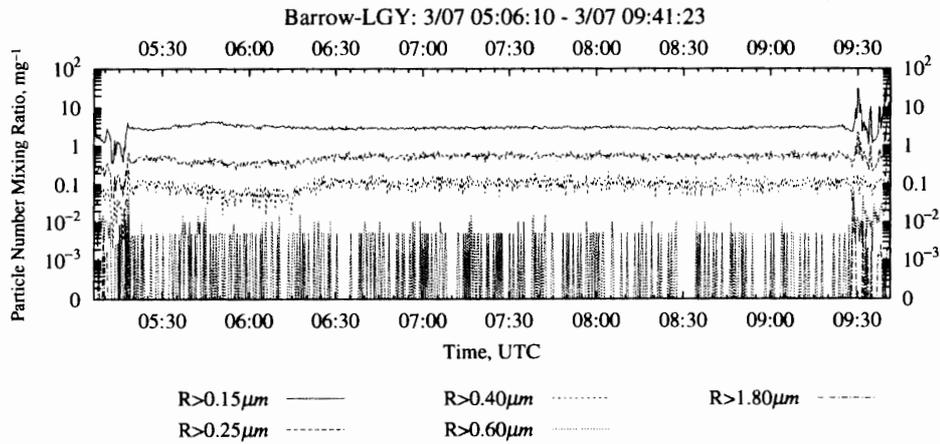


Figure A1-4(a)

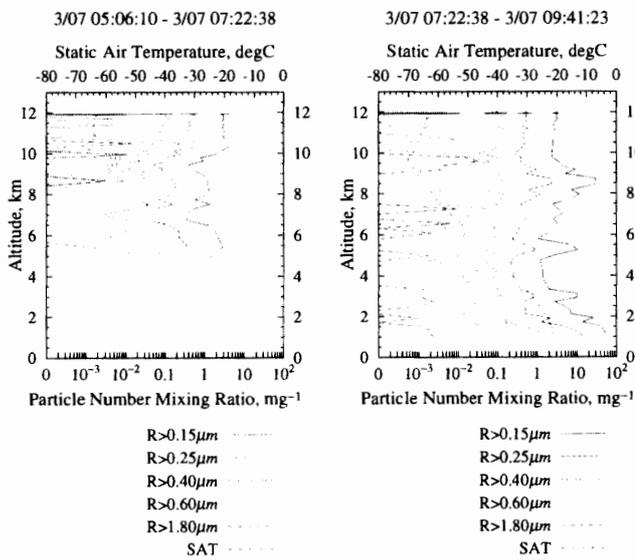


Figure A1-4(b1)

Figure A1-4(b2)

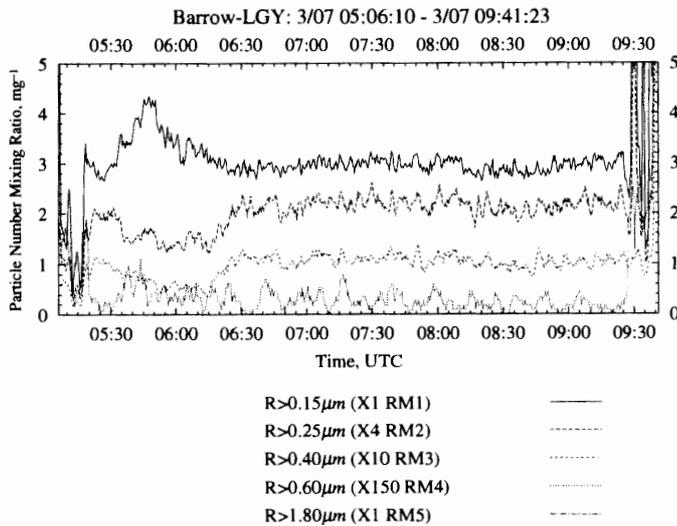


Figure A1-4(c)

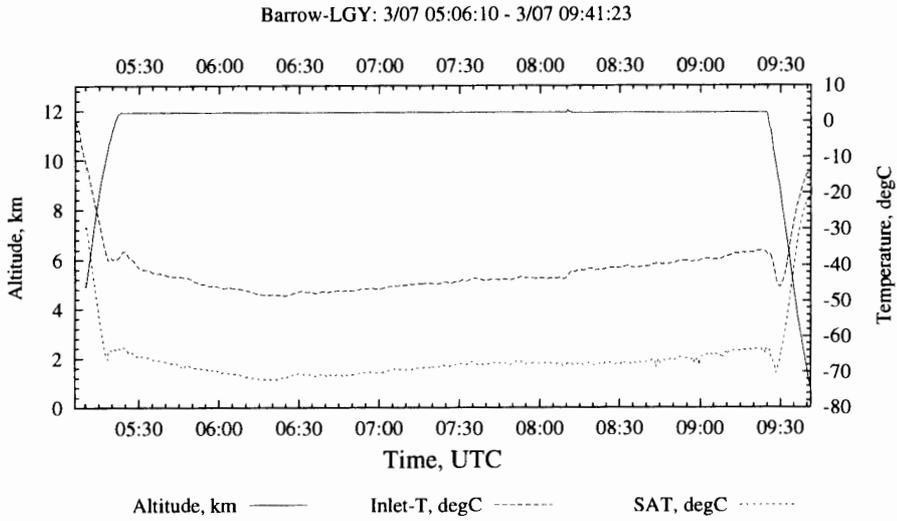


Figure A1-4(d)

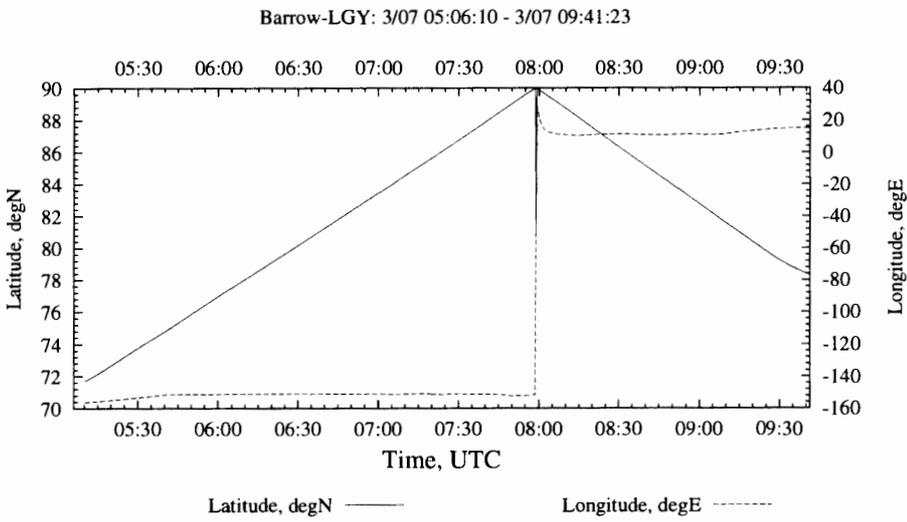


Figure A1-4(e)

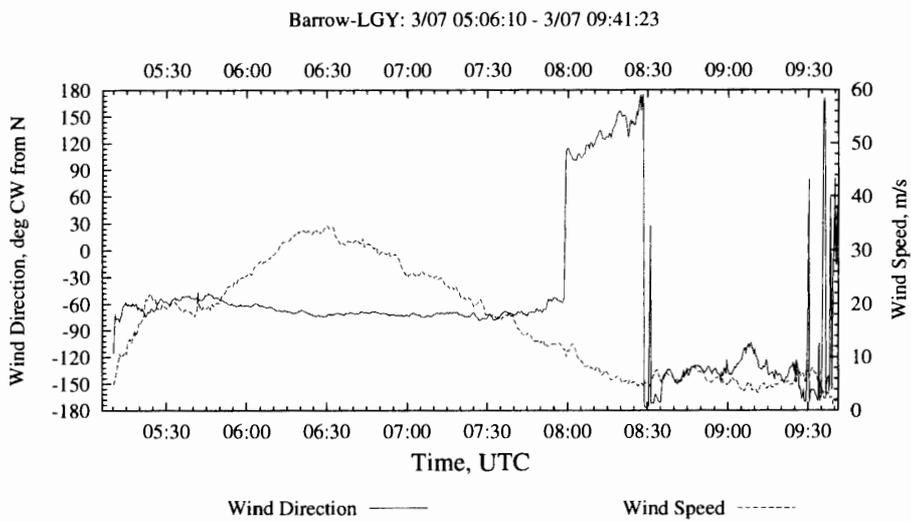


Figure A1-4(f)

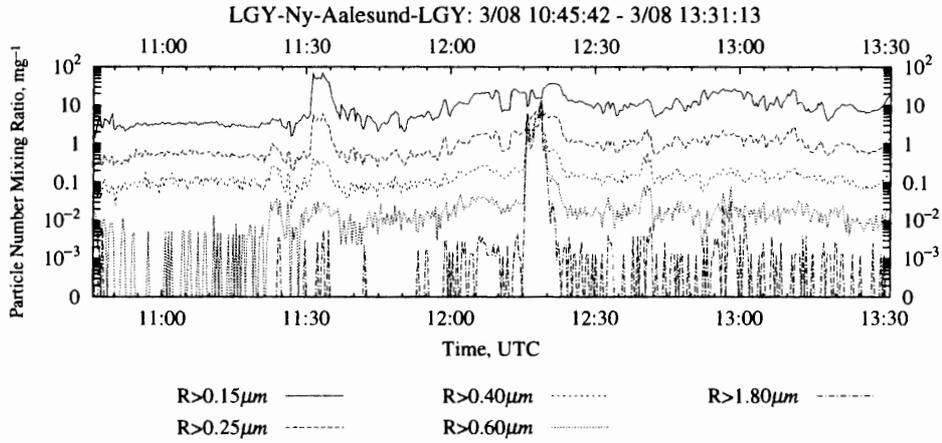


Figure A1-5(a)

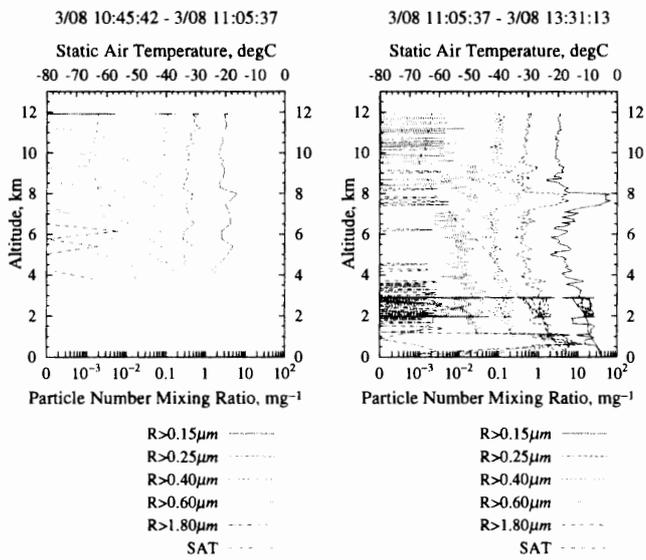


Figure A1-5(b1)

Figure A1-5(b2)

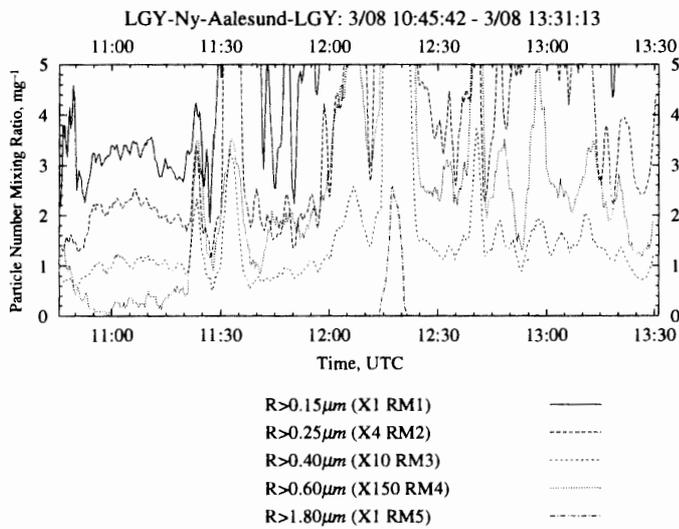


Figure A1-5(c)

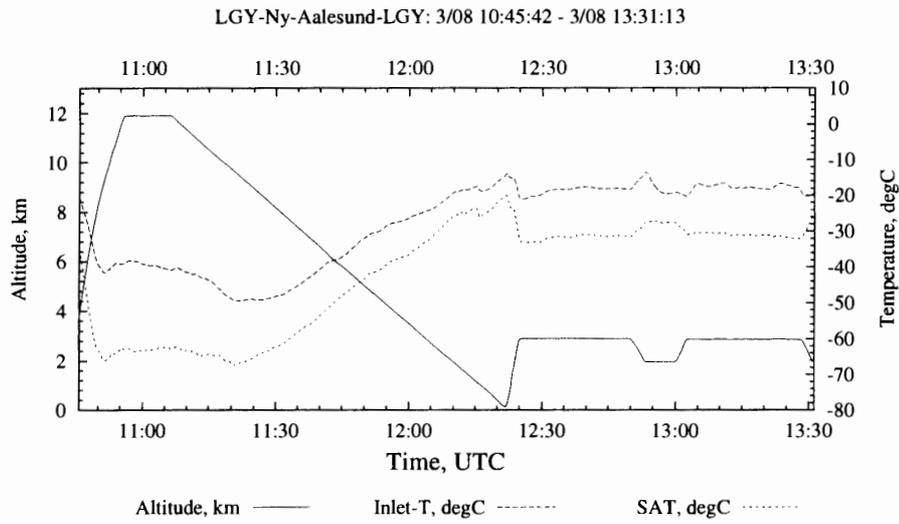


Figure A1-5(d)

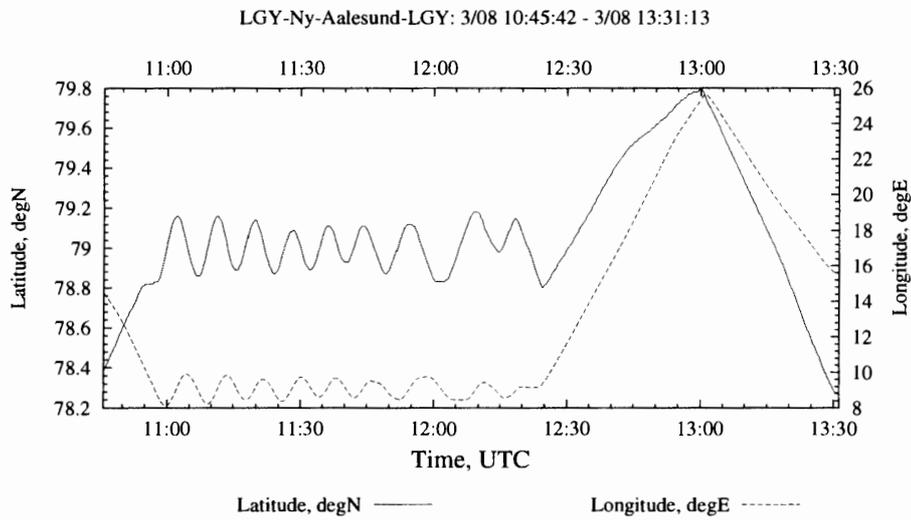


Figure A1-5(e)

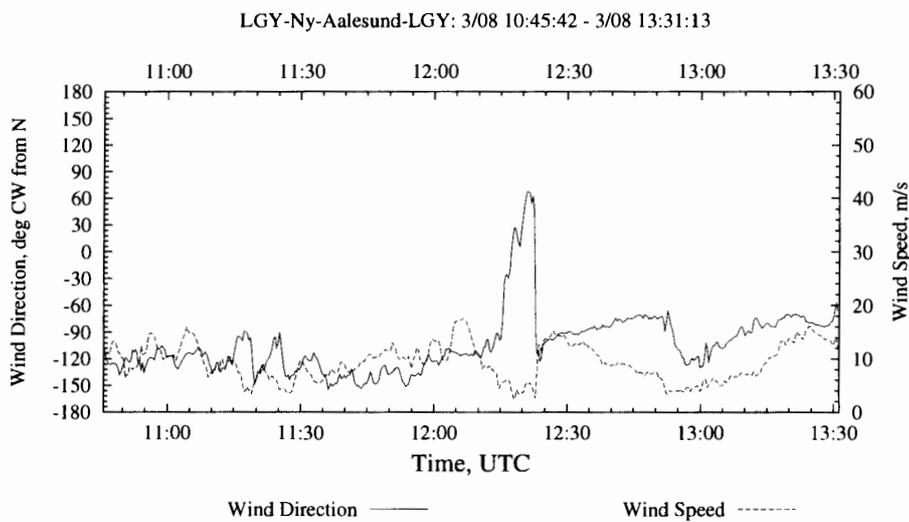


Figure A1-5(f)

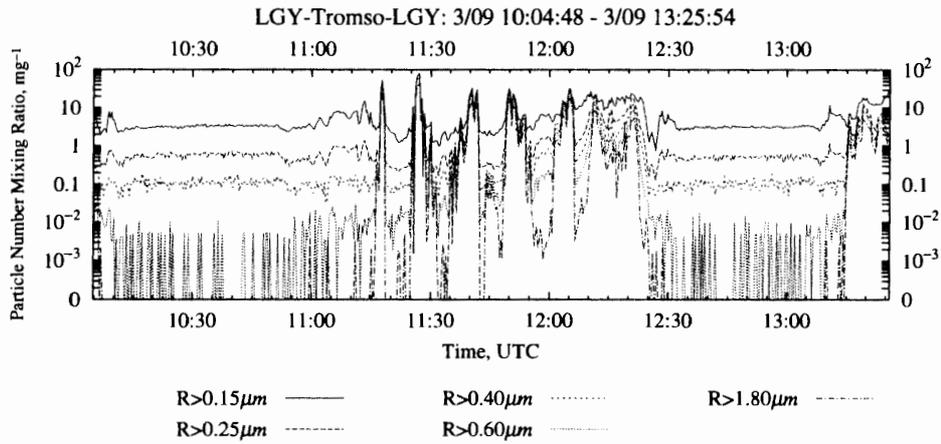


Figure A1-6(a)

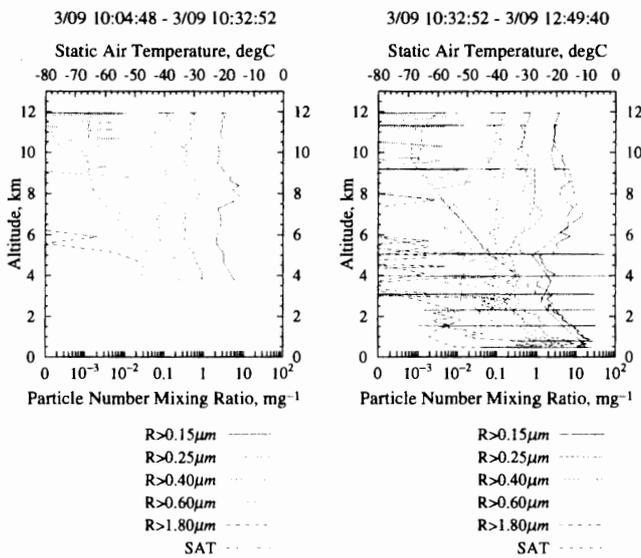


Figure A1-6(b1)

Figure A1-6(b2)

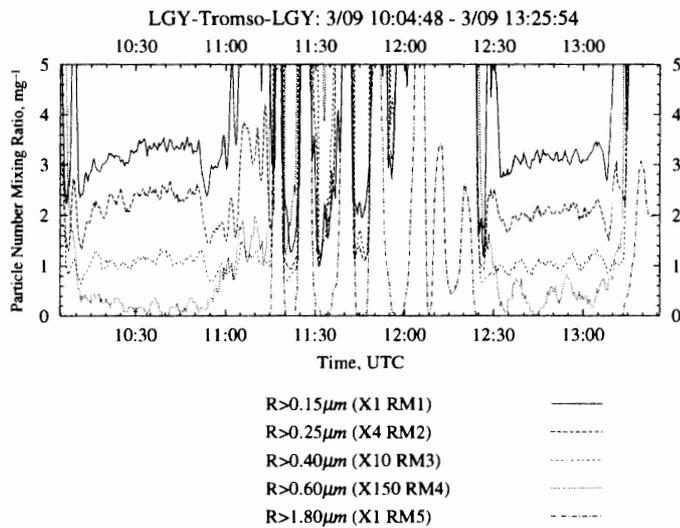


Figure A1-6(c)

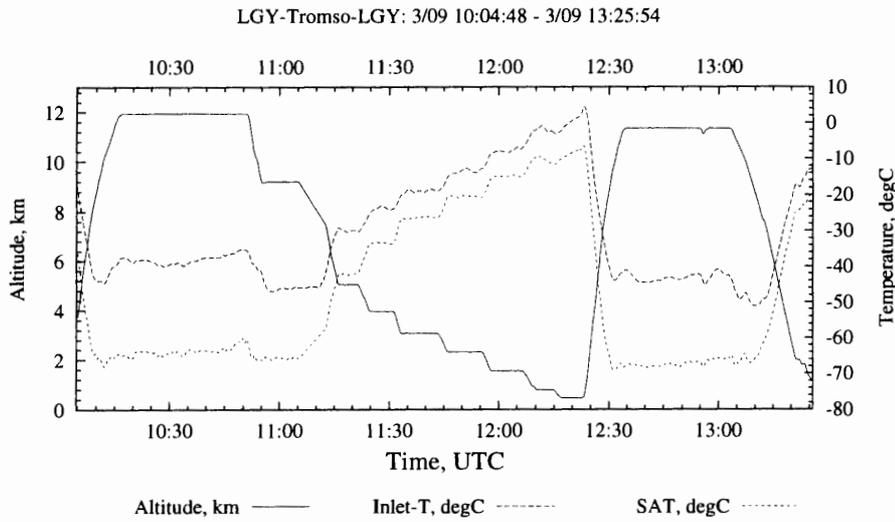


Figure A1-6(d)

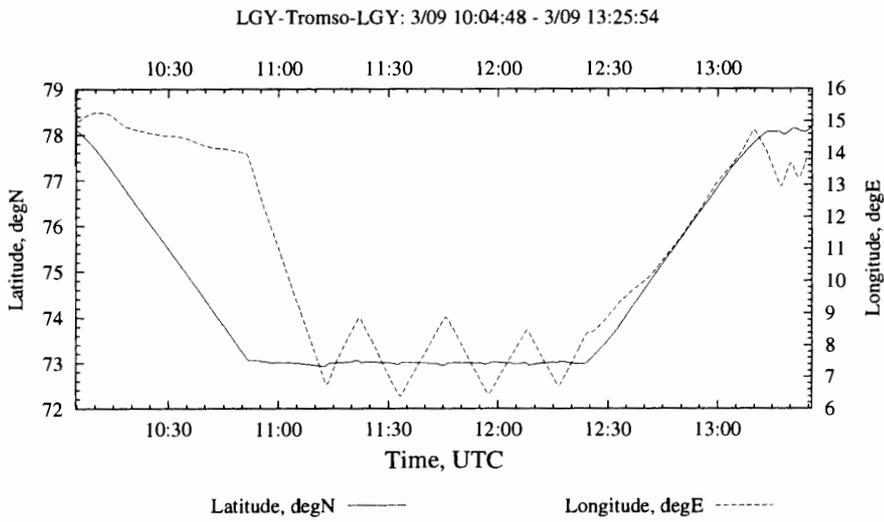


Figure A1-6(e)

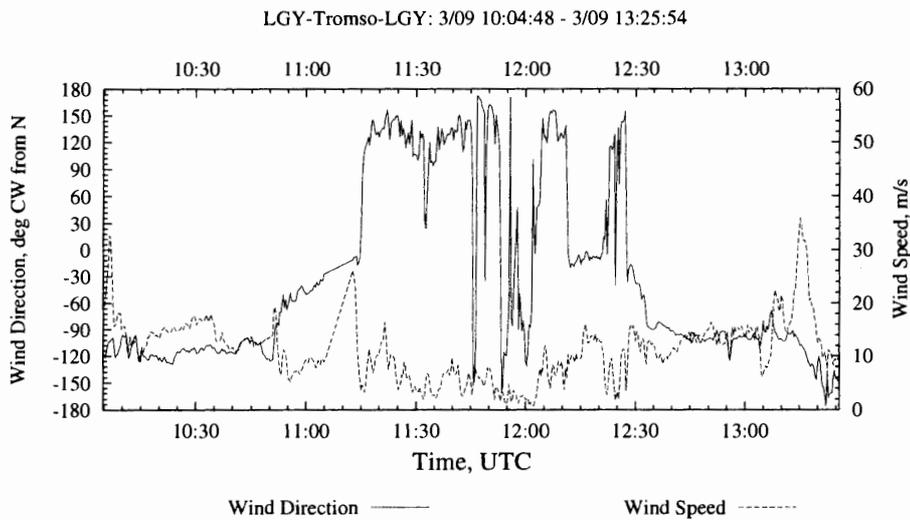


Figure A1-6(f)

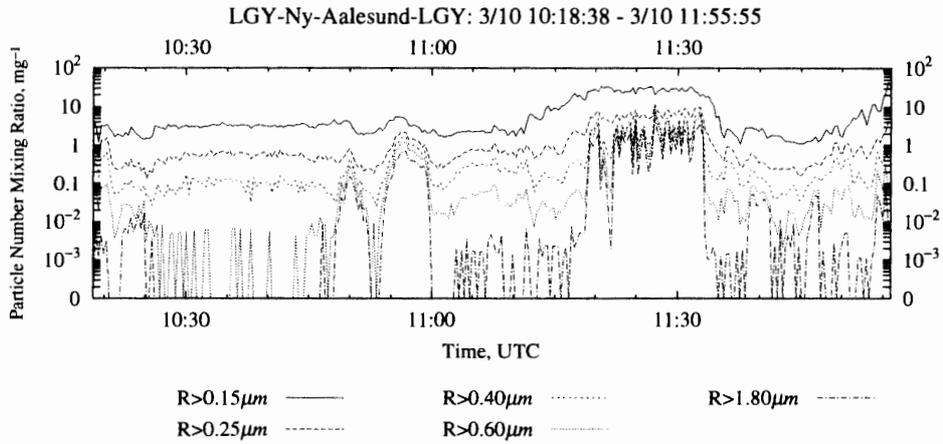


Figure A1-7(a)

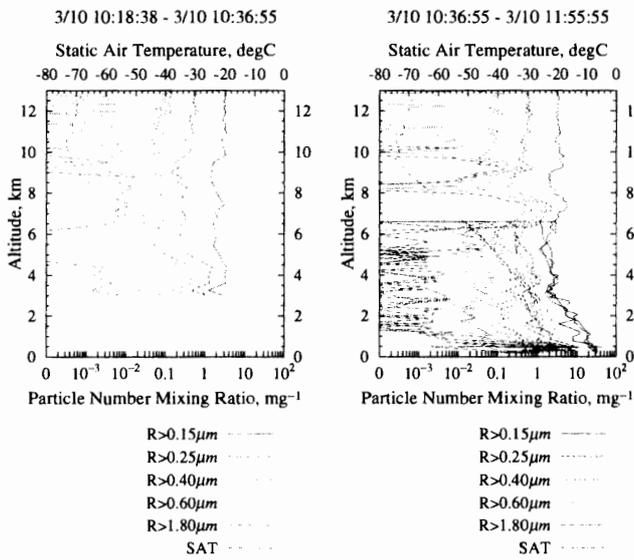


Figure A1-7(b1)

Figure A1-7(b2)

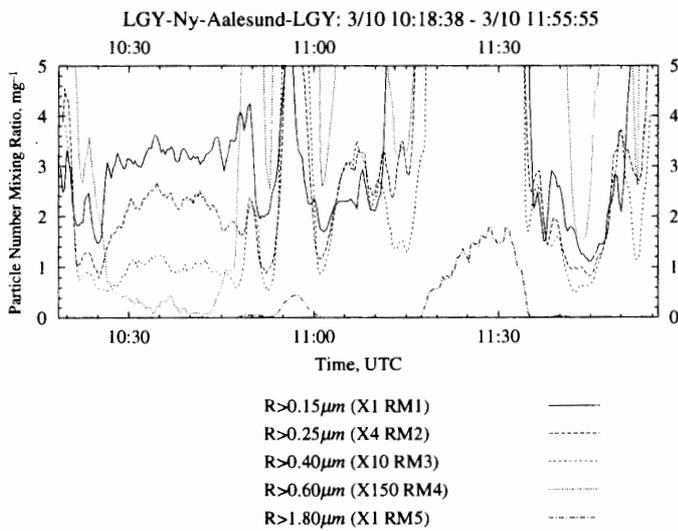


Figure A1-7(c)

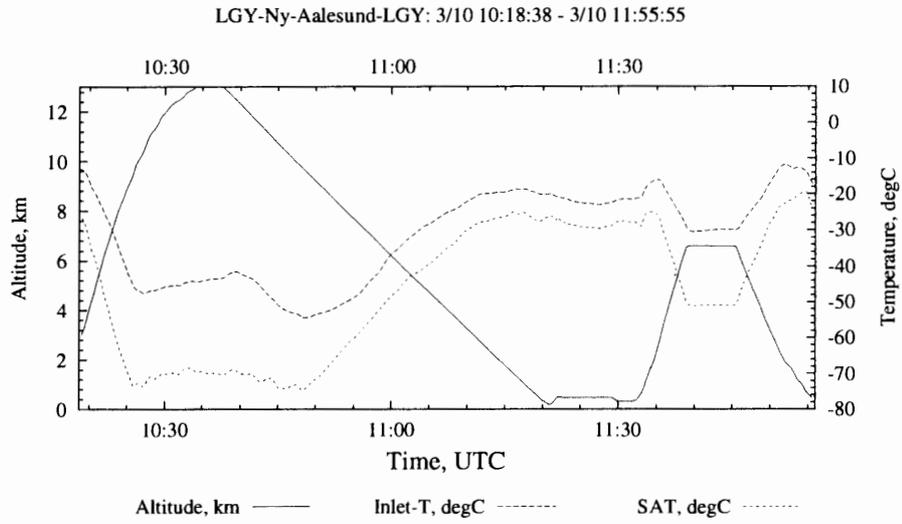


Figure A1-7(d)

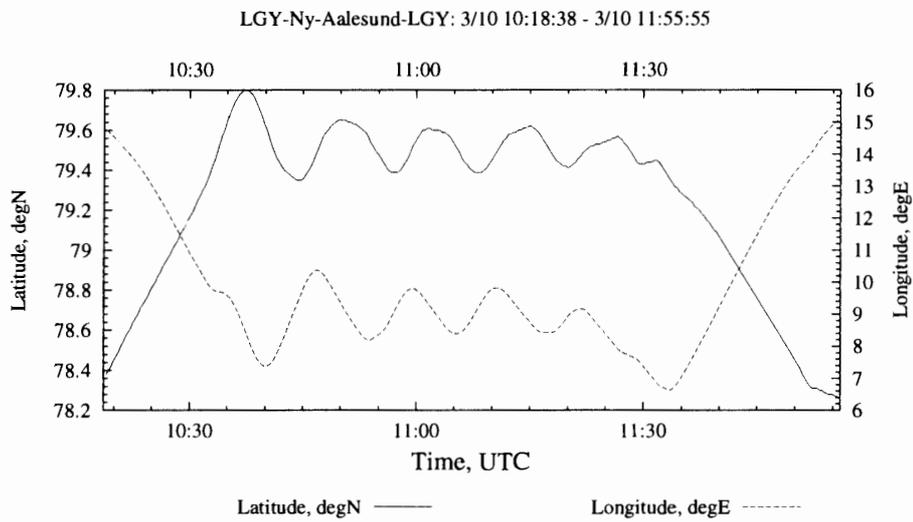


Figure A1-7(e)

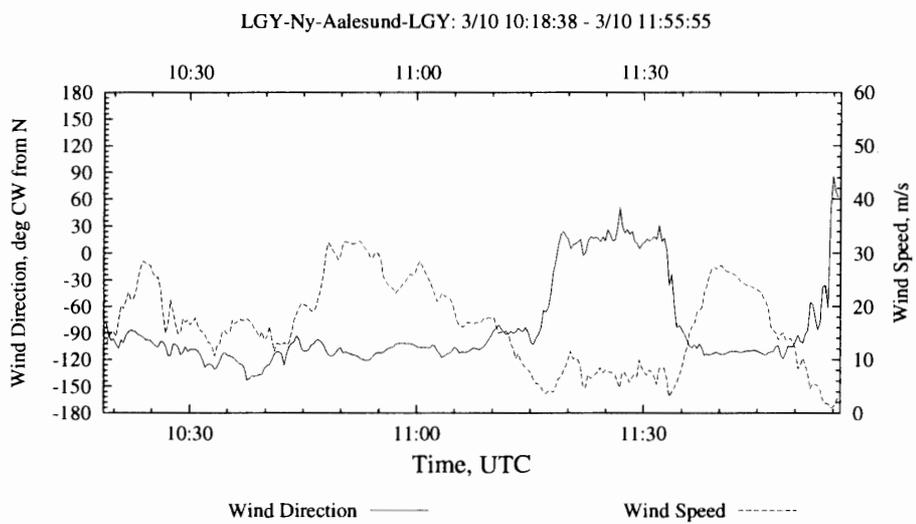


Figure A1-7(f)

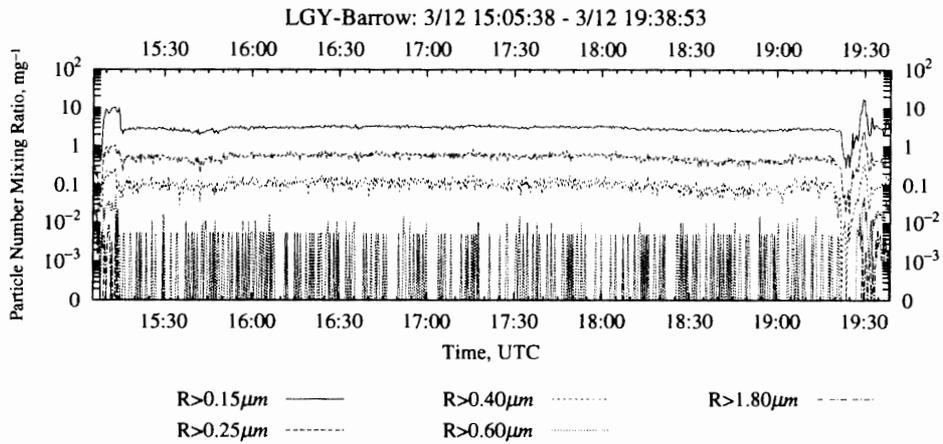


Figure A1-8(a)

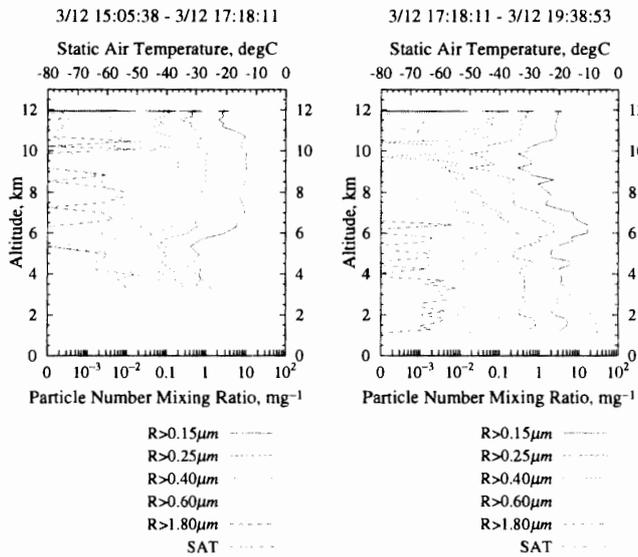


Figure A1-8(b1)

Figure A1-8(b2)

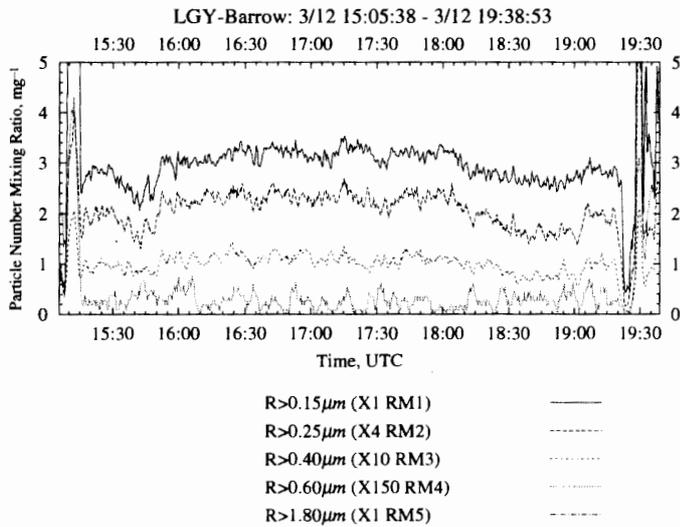


Figure A1-8(c)

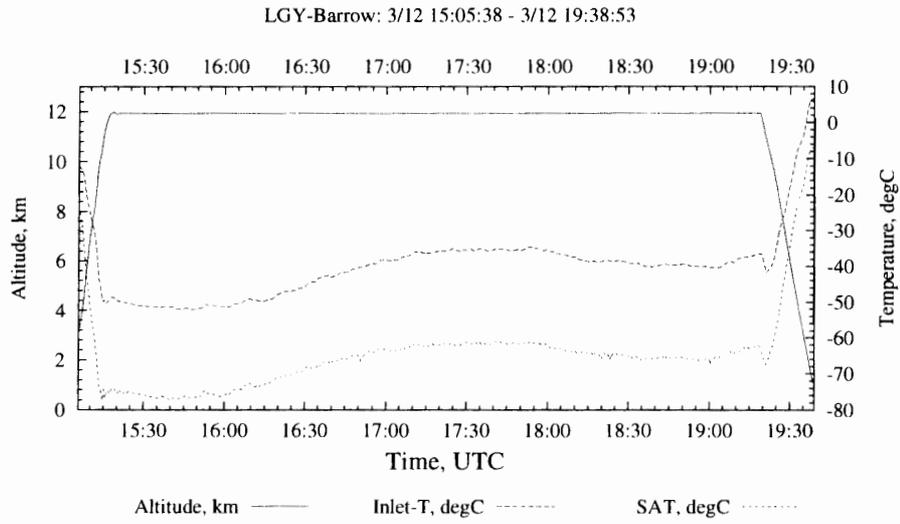


Figure A1-8(d)

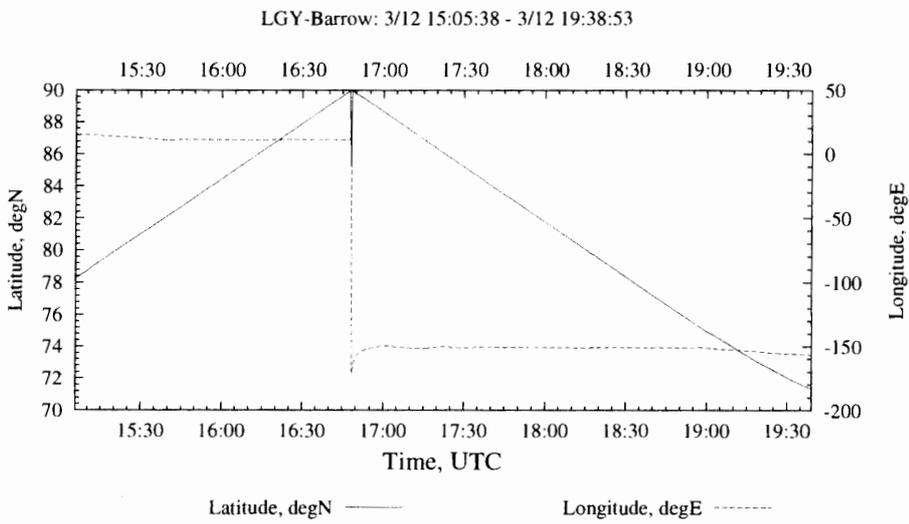


Figure A1-8(e)

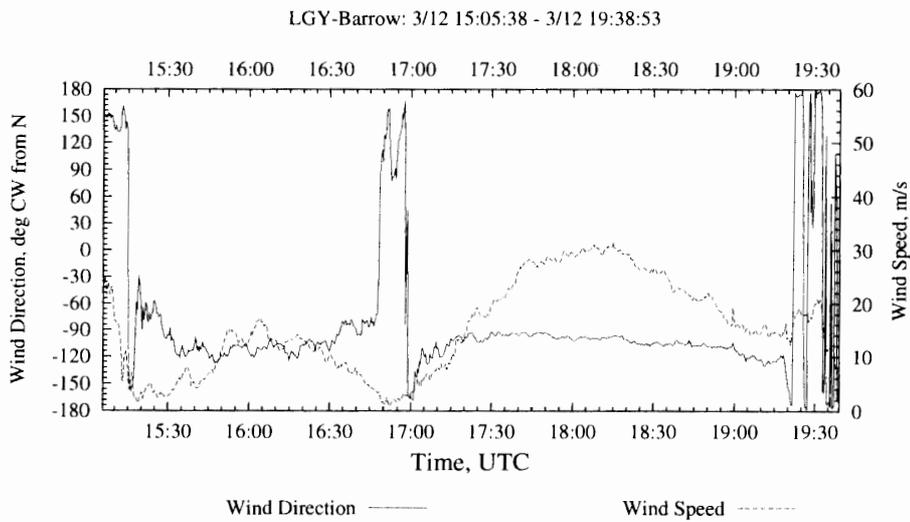


Figure A1-8(f)

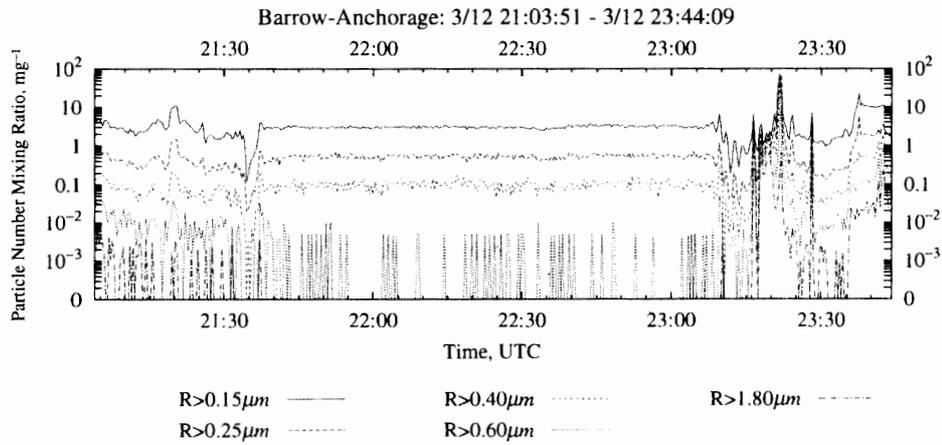


Figure A1-9(a)

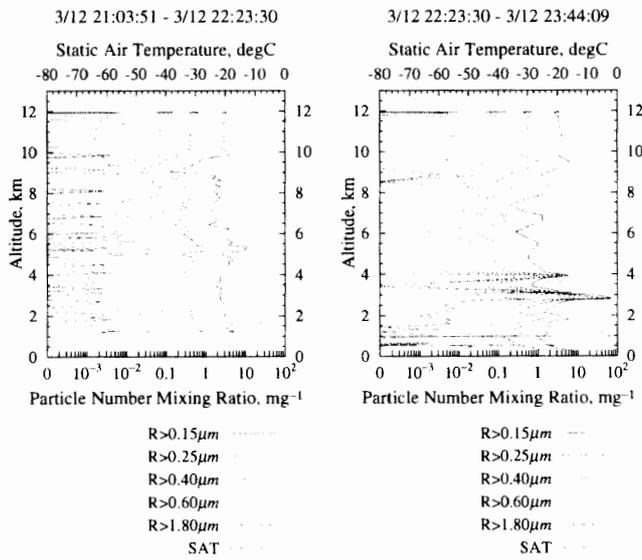


Figure A1-9(b1)

Figure A1-9(b2)

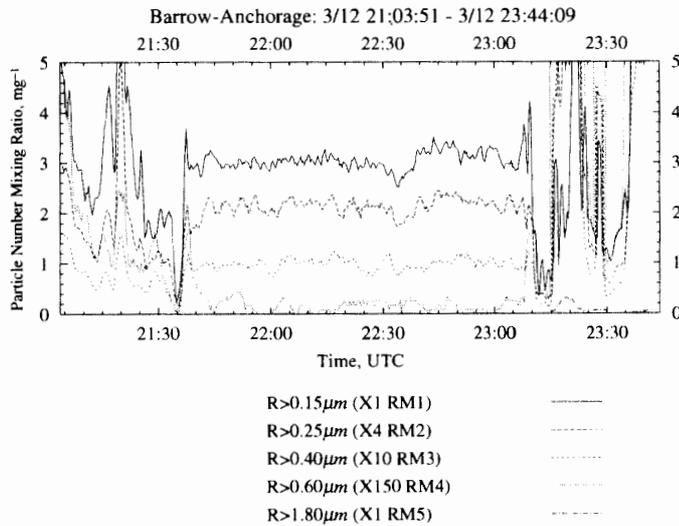


Figure A1-9(c)

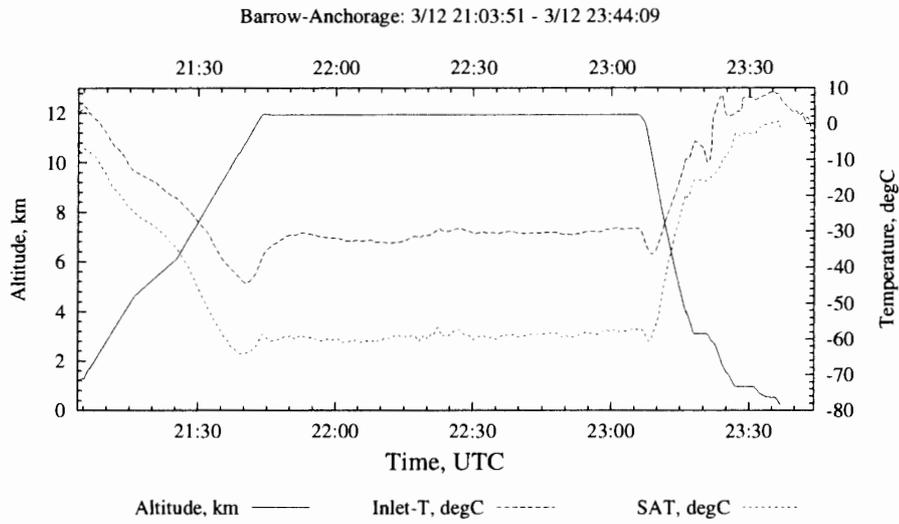


Figure A1-9(d)

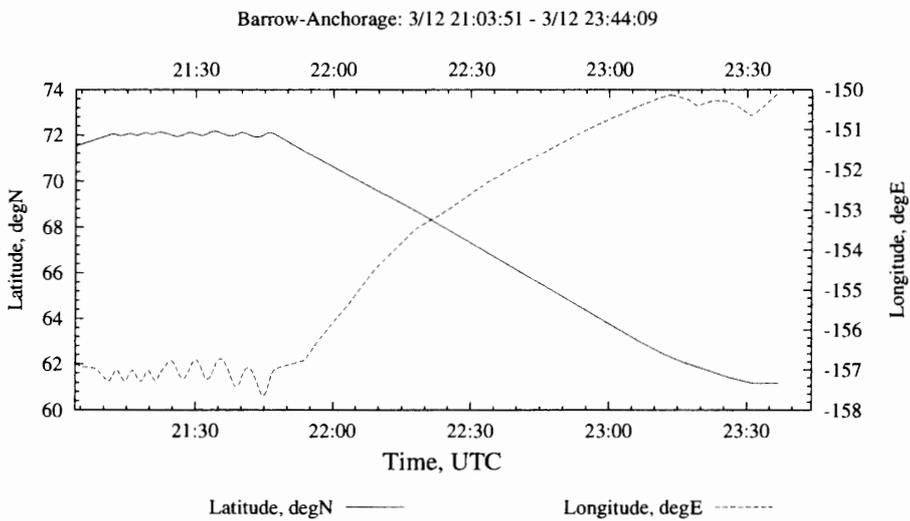


Figure A1-9(e)

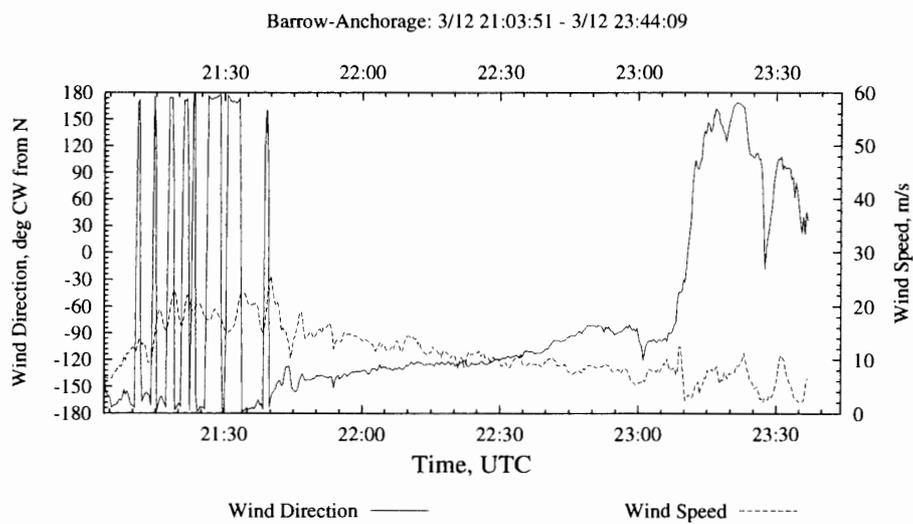


Figure A1-9(f)

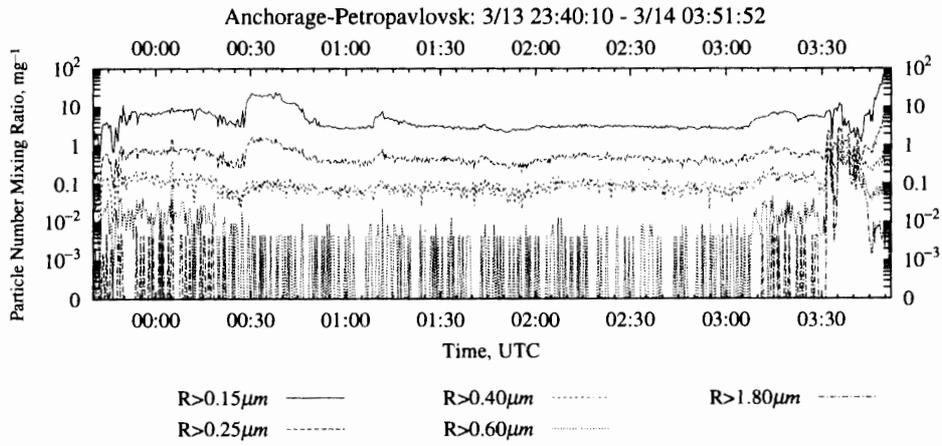


Figure A1-10(a)

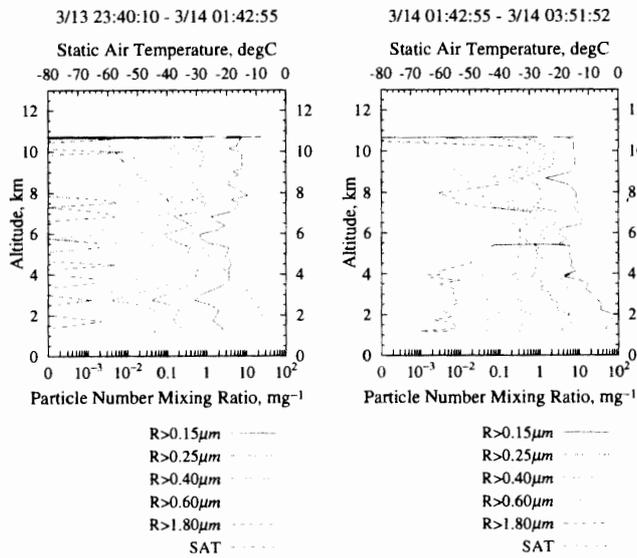


Figure A1-10(b1)

Figure A1-10(b2)

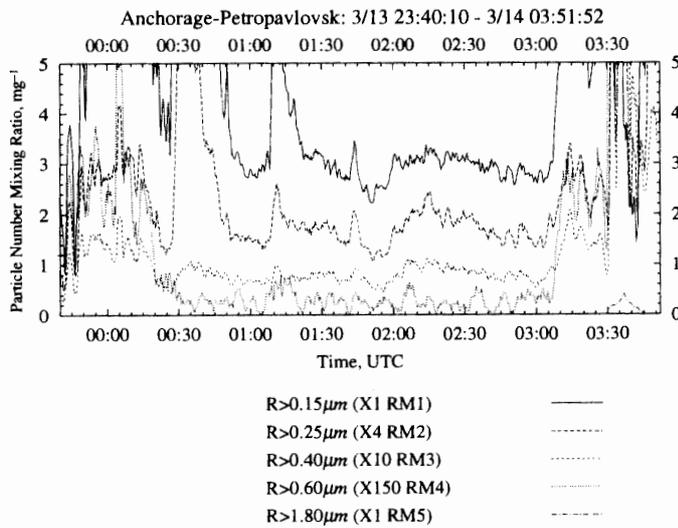


Figure A1-10(c)

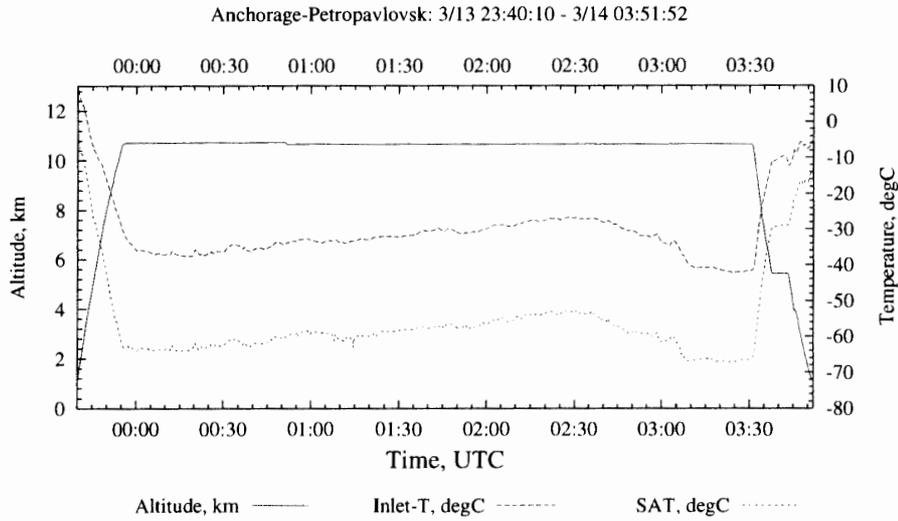


Figure A1-10(d)

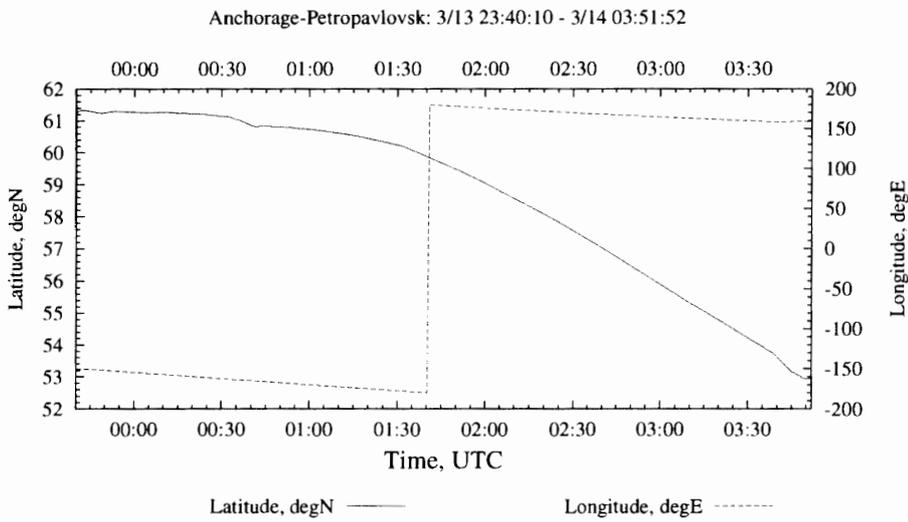


Figure A1-10(e)

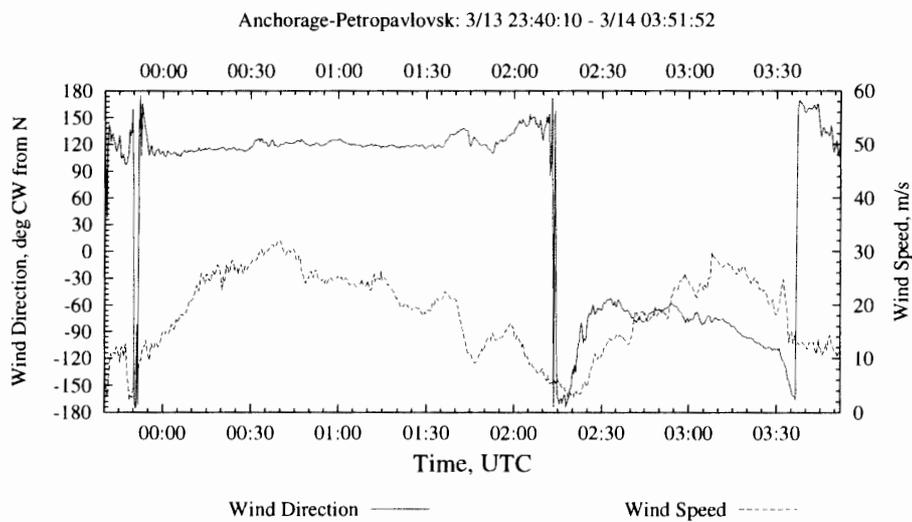


Figure A1-10(f)

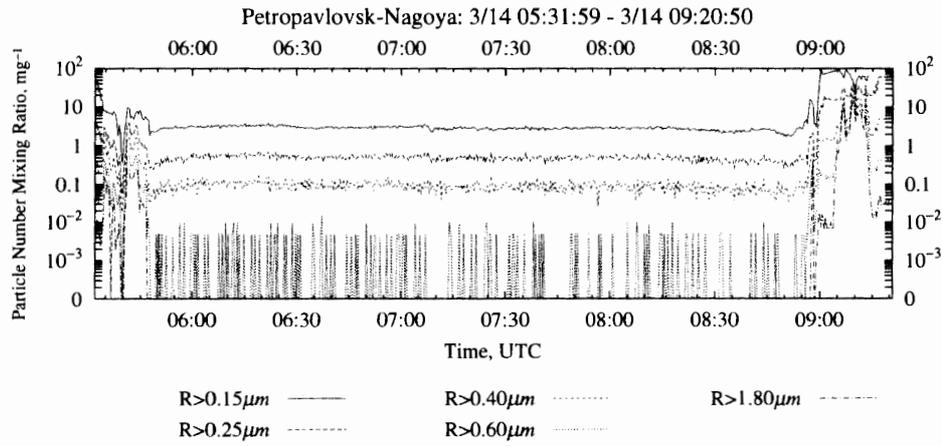


Figure A1-11(a)

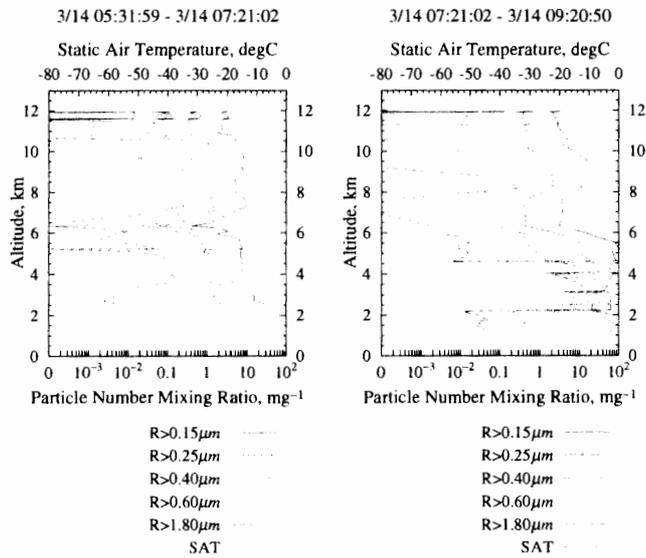


Figure A1-11(b1)

Figure A1-11(b2)

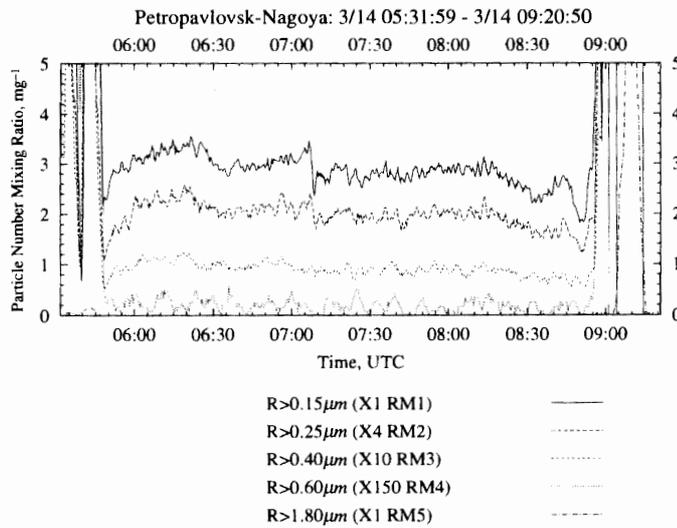


Figure A1-11(c)

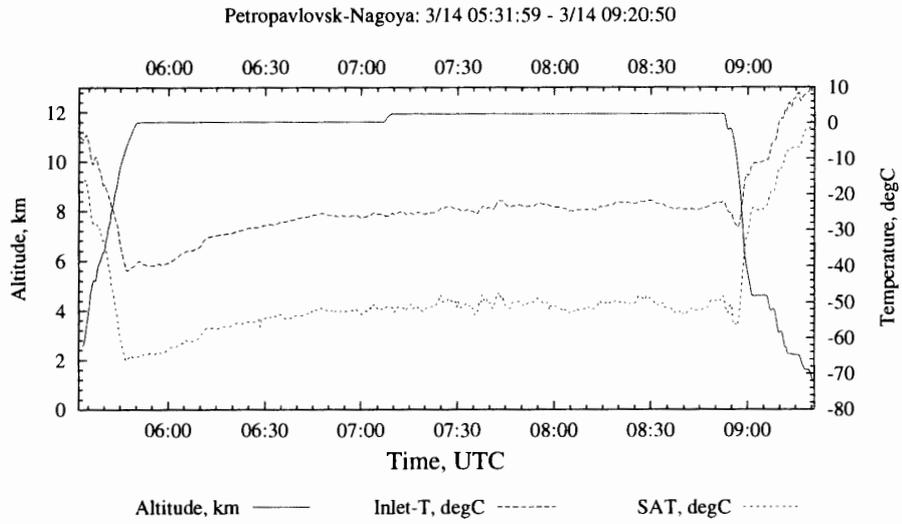


Figure A1-11(d)

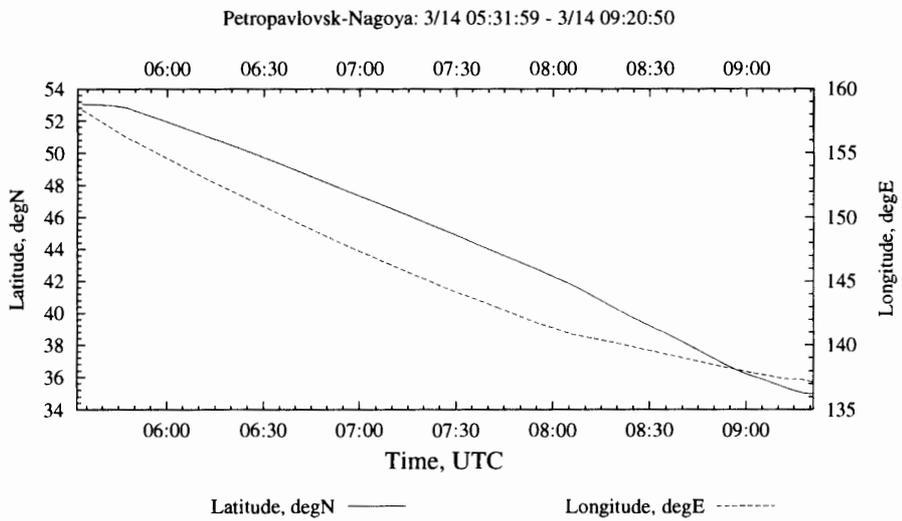


Figure A1-11(e)

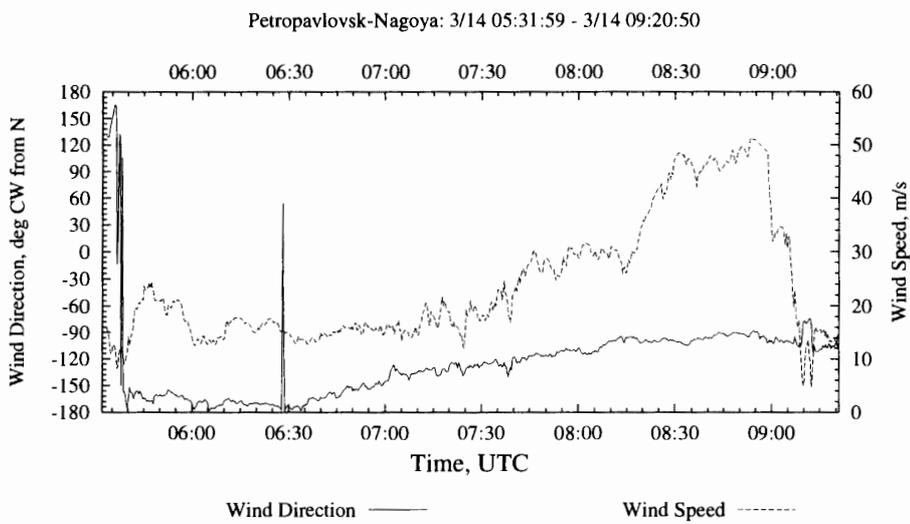


Figure A1-11(f)

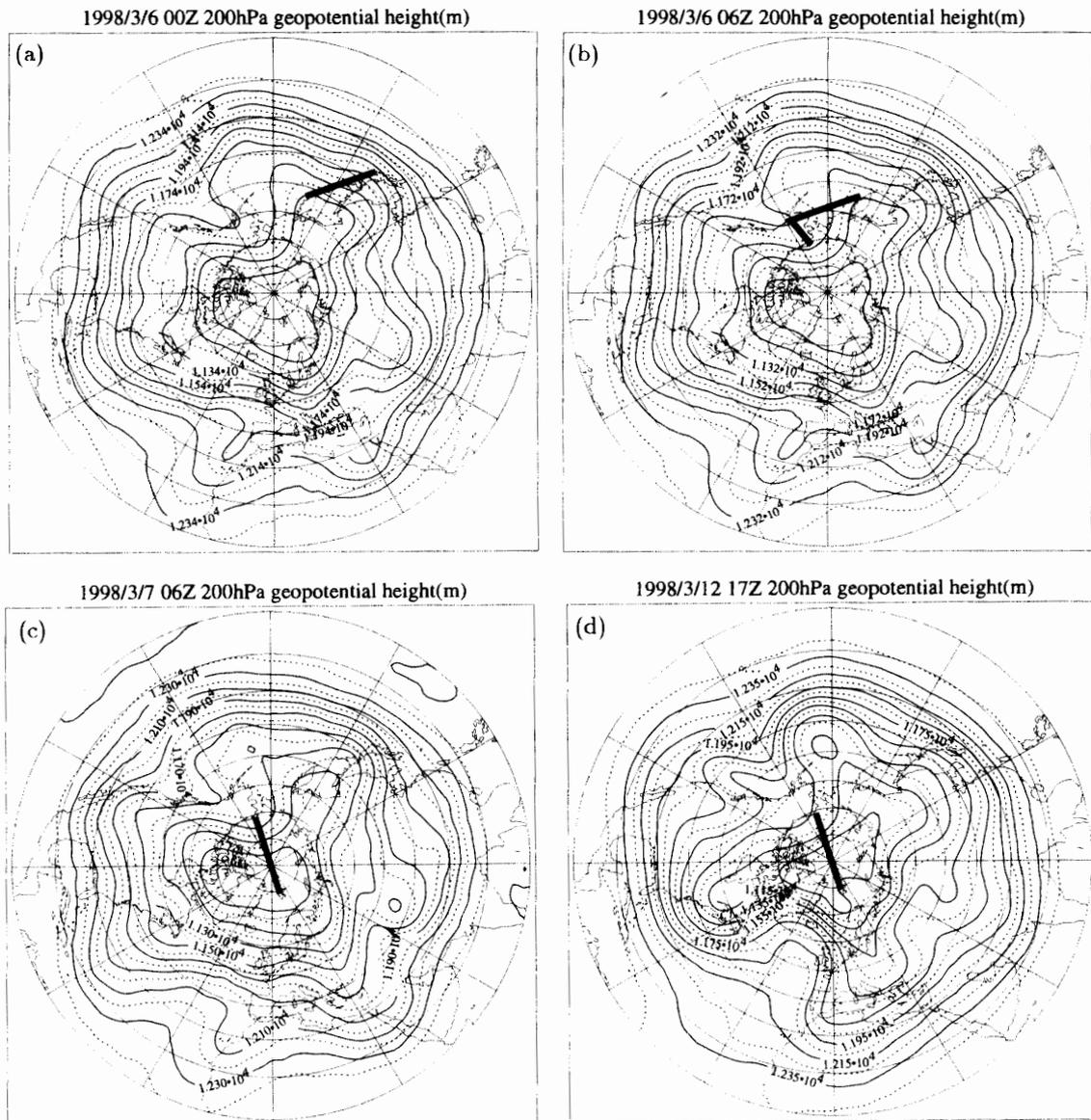


図 A2 各フライトにおける気圧高度 200 hPa 面 (通常の巡航高度) 上のジオポテンシャル  
 ハイト分布およびフライト・パス (太線). 各図 (a-g) の時刻は以下の通り.

Fig. A2. The geopotential map at the 200 hPa pressure altitude for each flight. The flight  
 path is shown as a thick line.

(a) 00 UTC, 6 March 1998. Nagoya-Petropavlovsk-Kamchatski, (b) 06 UTC, 6  
 March 1998. Petropavlovsk-Anchorage-Barrow, (c) 06 UTC, 7 March 1998.  
 Barrow-Longyearbyen, (d) 17 UTC, 12 March 1998. Longyearbyen-Barrow, (e)  
 22 UTC, 12 March 1998. Barrow-Anchorage, (f) 02 UTC, 14 March 1998.  
 Anchorage-Petropavlovsk, (g) 07 UTC, 14 March 1998. Petropavlovsk-Nagoya.

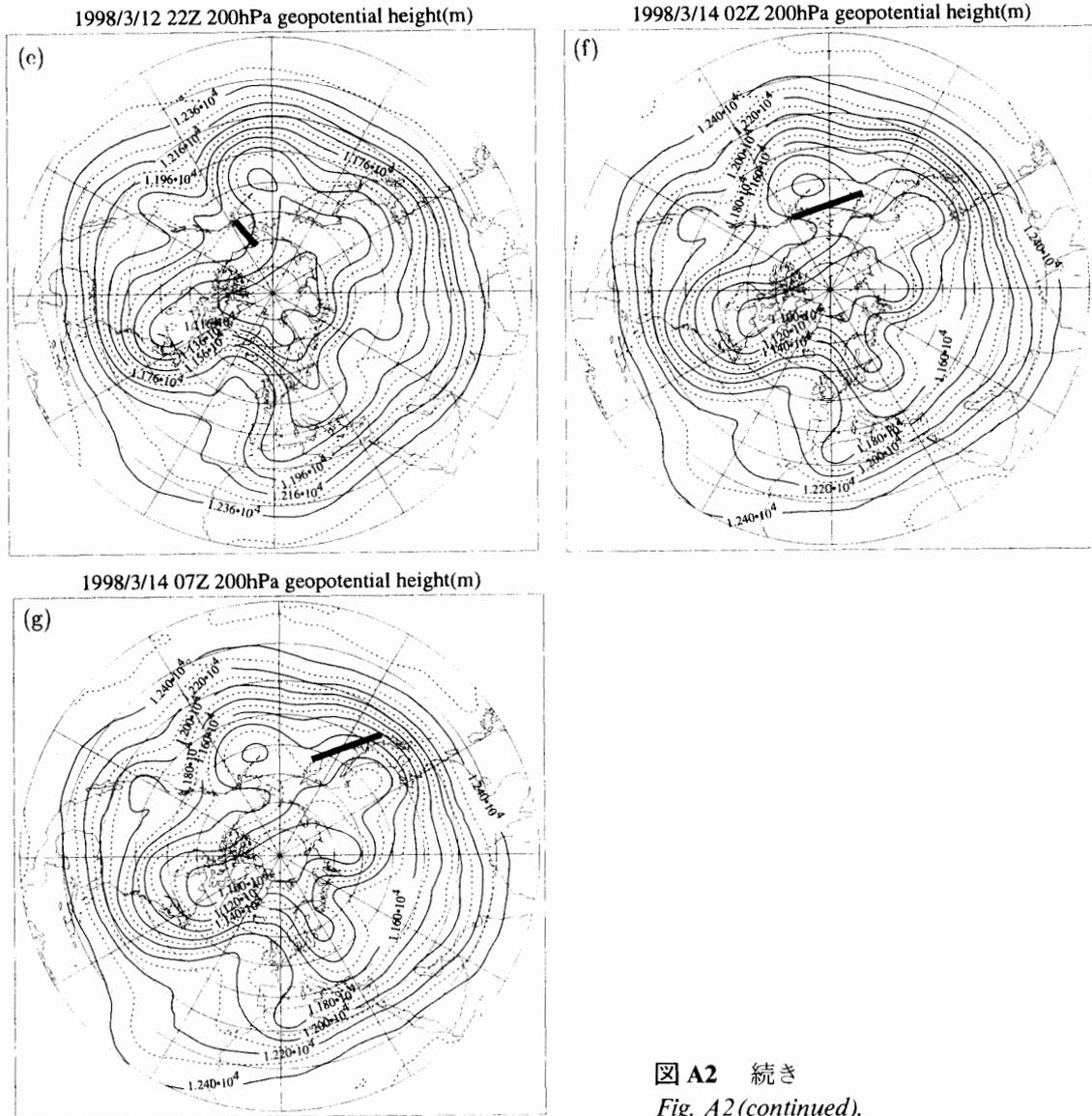
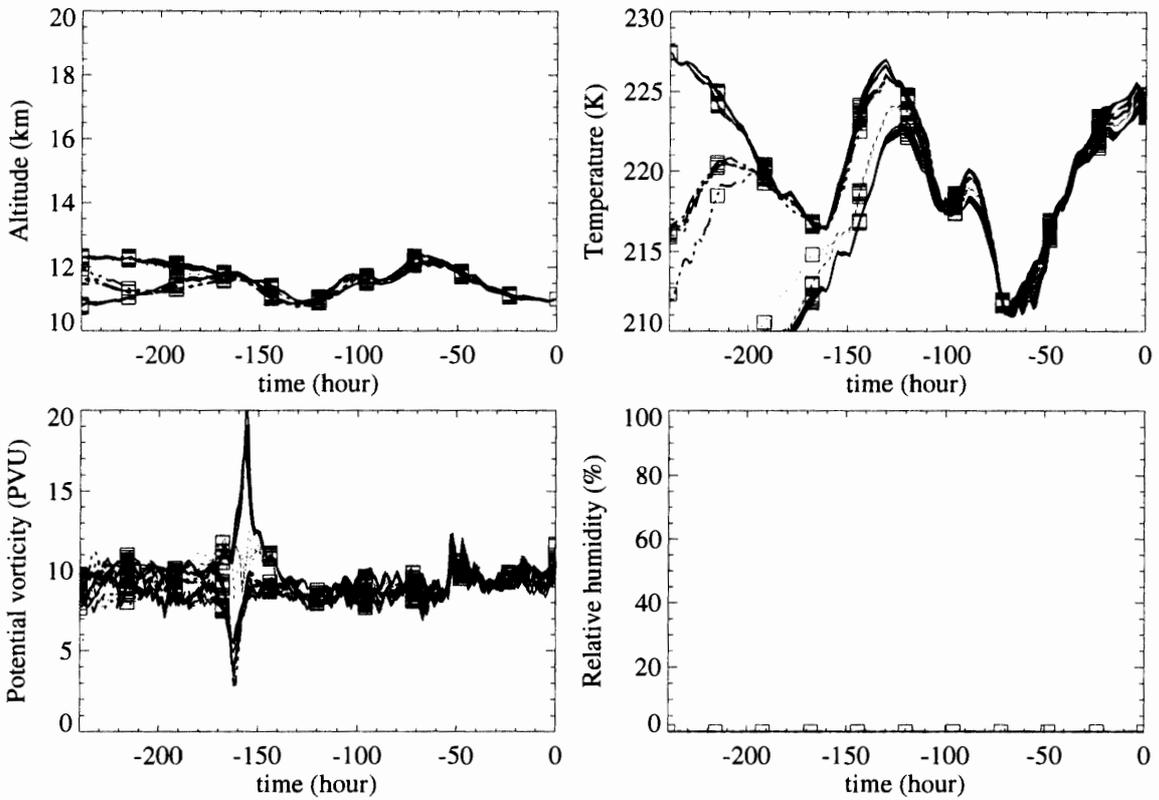
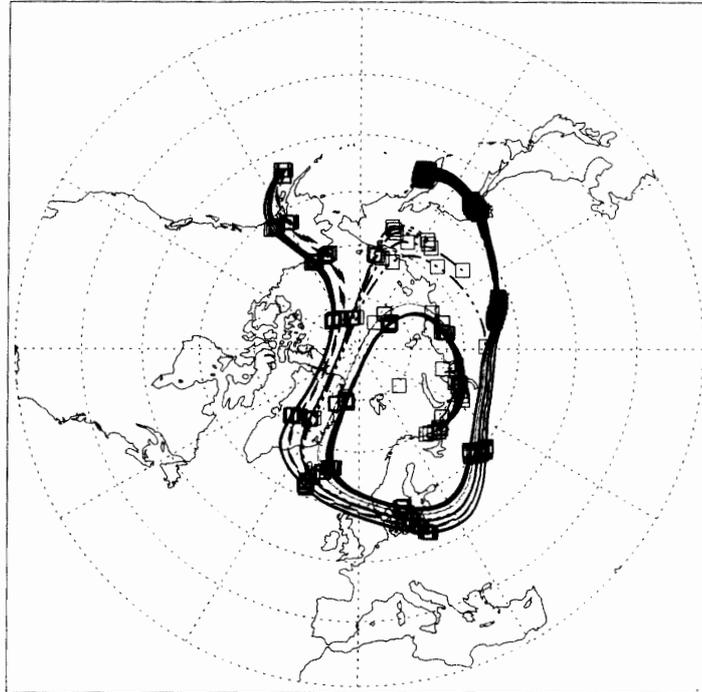


図 A3 (opposite) 観測時の特徴的空気塊のバックトラジェクトリー解析結果。最上段は水平方向履歴，中段左は高度，右は温度，下段左は渦位 (potential vorticity)，右は相対湿度の履歴を示す。元となる客観解析データは気象庁・気象研究所から供給されたもの (the Global Objective Analyses Data of the Japan Meteorological Agency) で，等温位面上で風向・風速から空気塊の履歴を計算している。渦位の履歴は，理論上は保存されるものが実際の計算でどれだけ変わるか，その履歴計算の信頼性の指標として示してある。空気塊の計算開始地点および時刻は各図 (a-m) に示す通り。

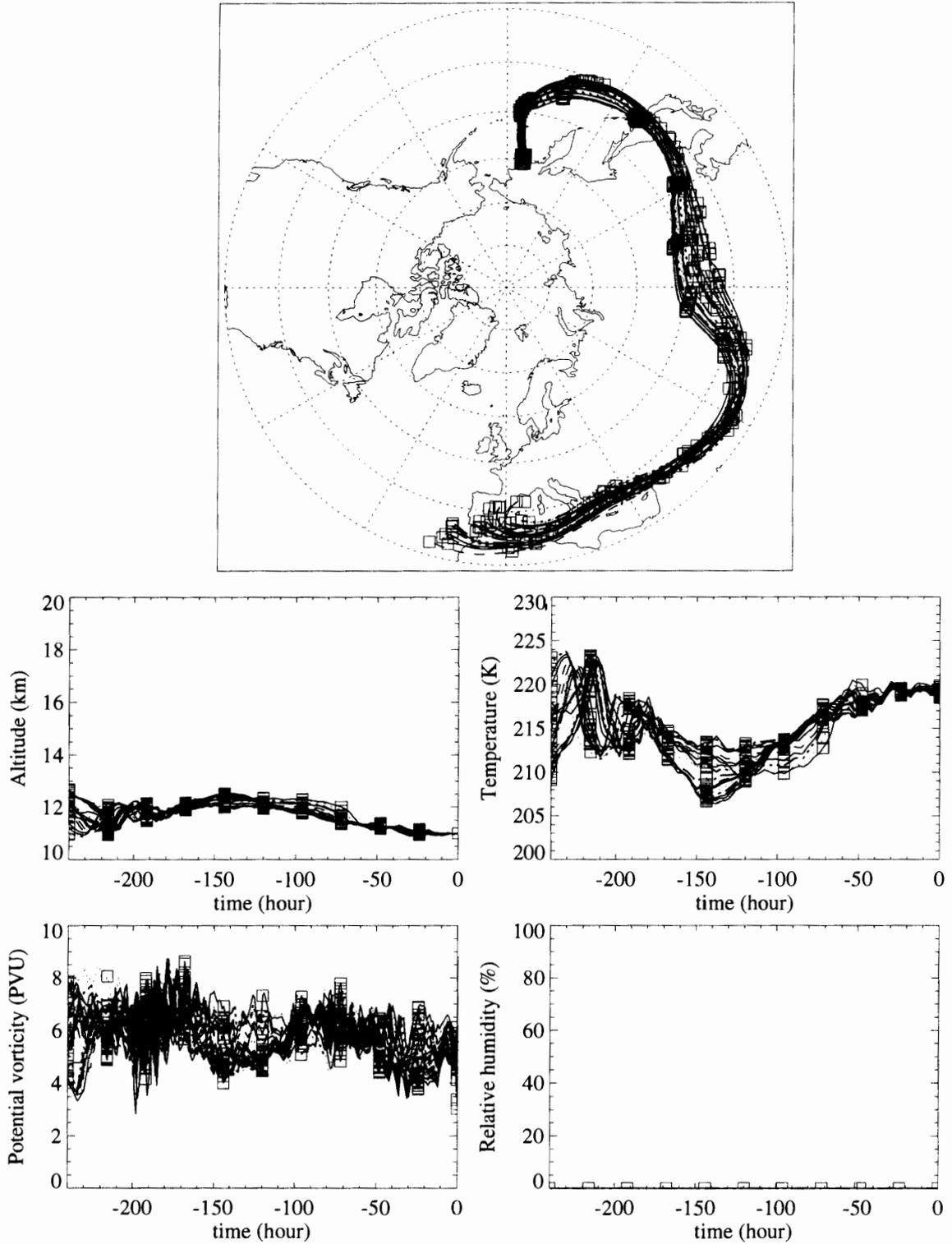
Fig. A3. (opposite) The isentropic backward trajectory analysis for the initial points. Horizontal advection (top), altitude (middle left), temperature (middle right), potential vorticity (lower left), and relative humidity (lower right), based on the Global Objective Analyses Data of the Japan Meteorological Agency.

Initial point 55.0°N, 160.0°E Z=11.0 km -  $\theta=353.45$  K 1998/03/06 05:00Z



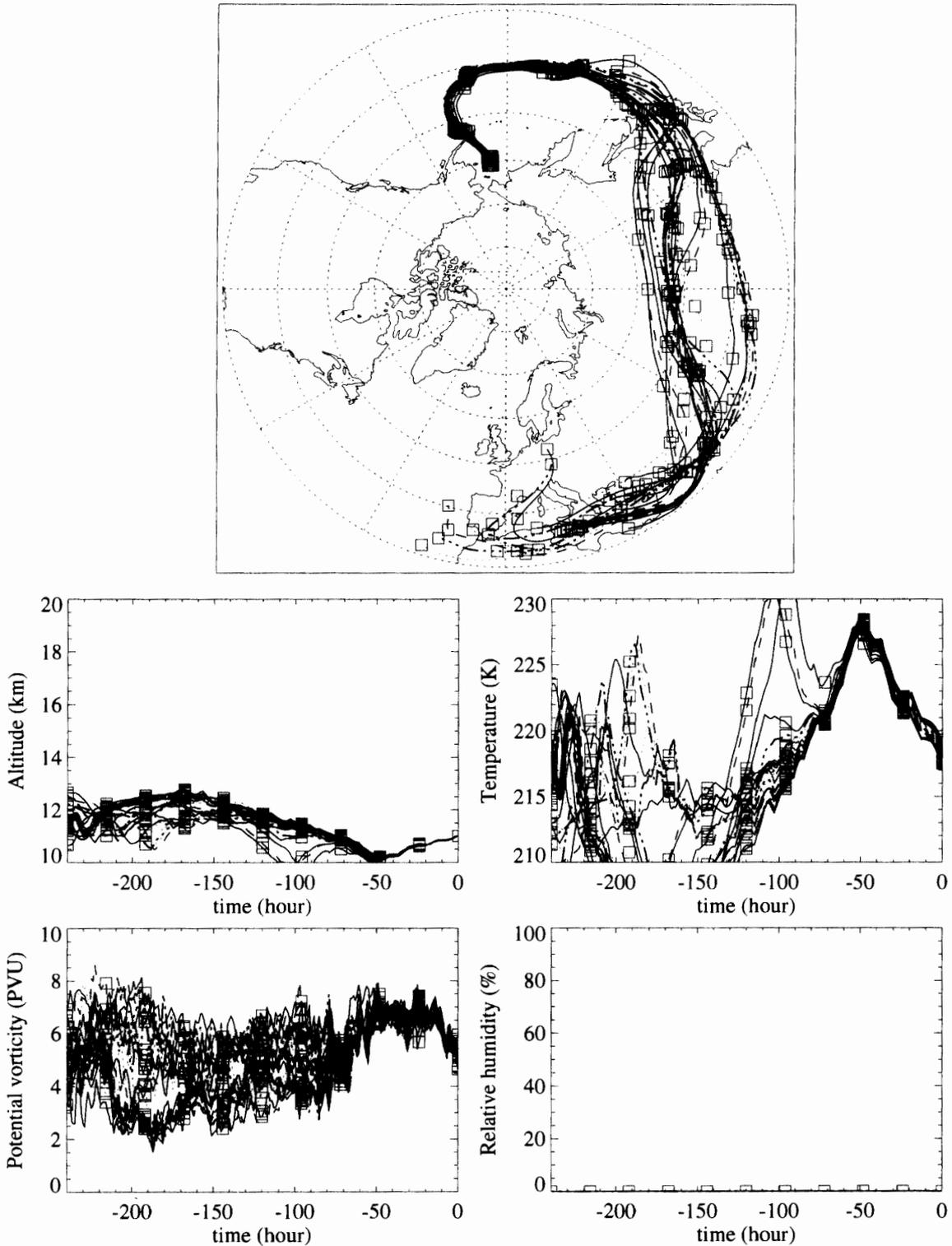
(a) 55°N, 160°E, 11 km, 6 March, 5 UTC.

Initial point 60.0°N, 173.0°E Z=11.0 km -  $\theta=342.49$  K 1998/03/06 06:00Z



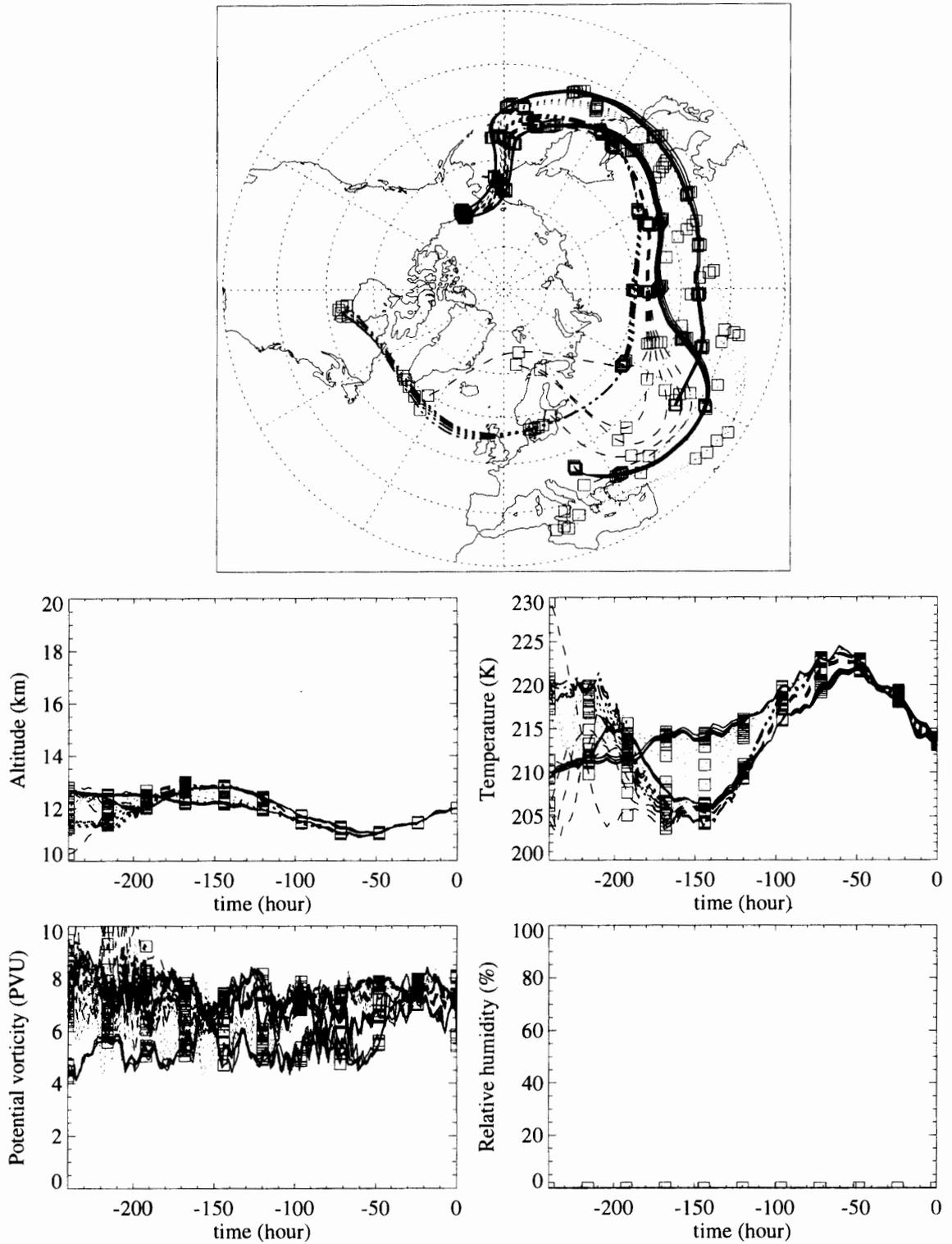
(b) 60°N, 173°E, 11 km, 6 March, 6 UTC.

Initial point 60.0°, -173.0° 11.0 km -  $\theta=339.2$  K 1998/03/06 07:00Z



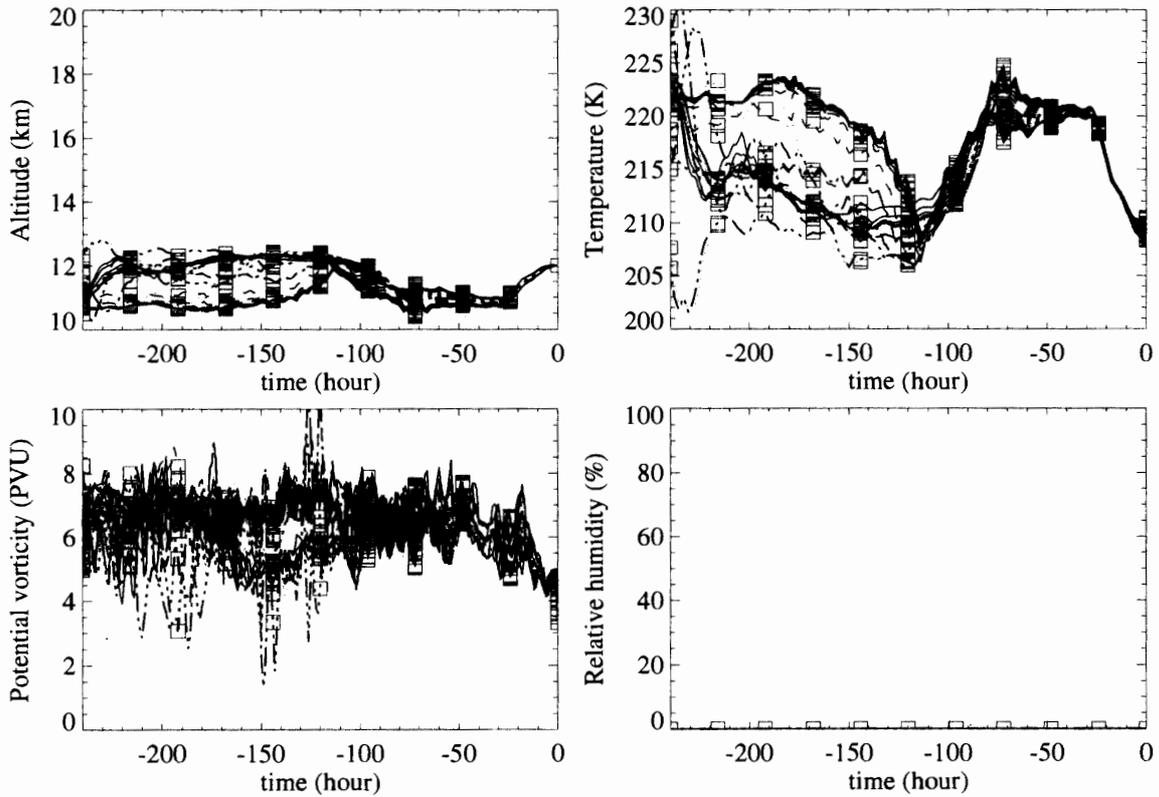
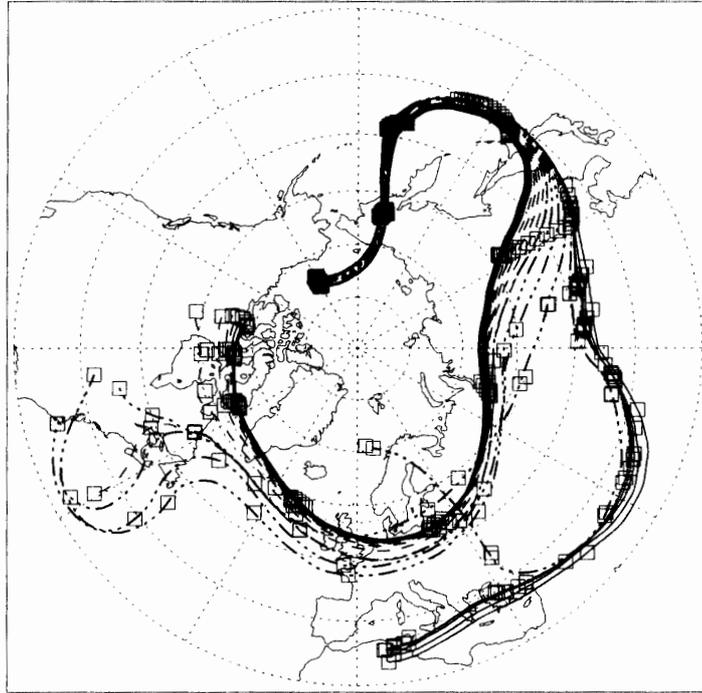
(c) 60°N, 173°W, 11 km, 6 March, 7 UTC.

Initial point  $70.0^\circ$ ,  $-152.0^\circ$  12.0 km -  $\theta=347.9$  K 1998/03/07 01:00Z



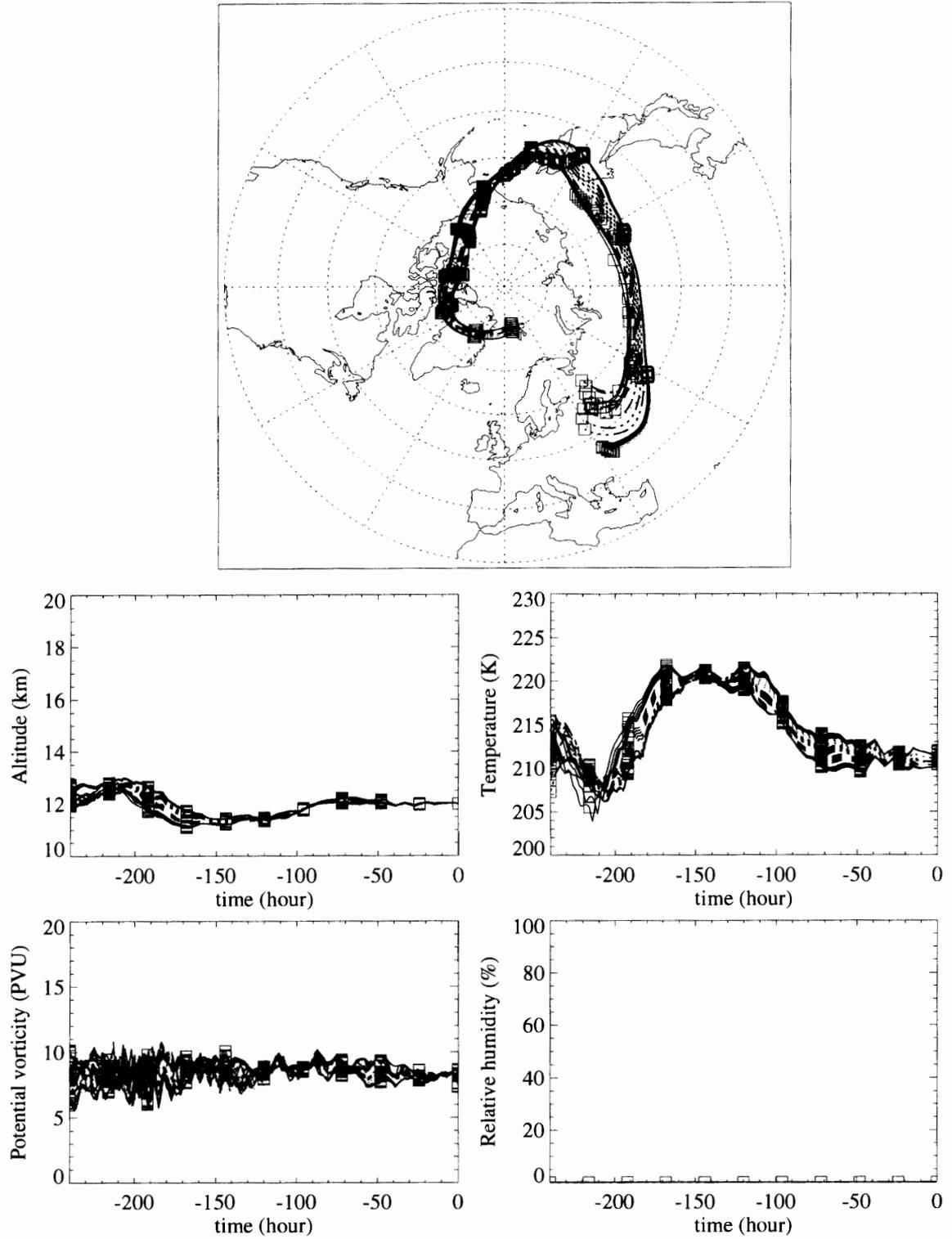
(d)  $70^\circ$ N,  $152^\circ$ W, 12 km, 7 March, 1 UTC.

Initial point 75.0°, -150.0° 12.0 km -  $\theta=342.7$  K 1998/03/07 06:00Z



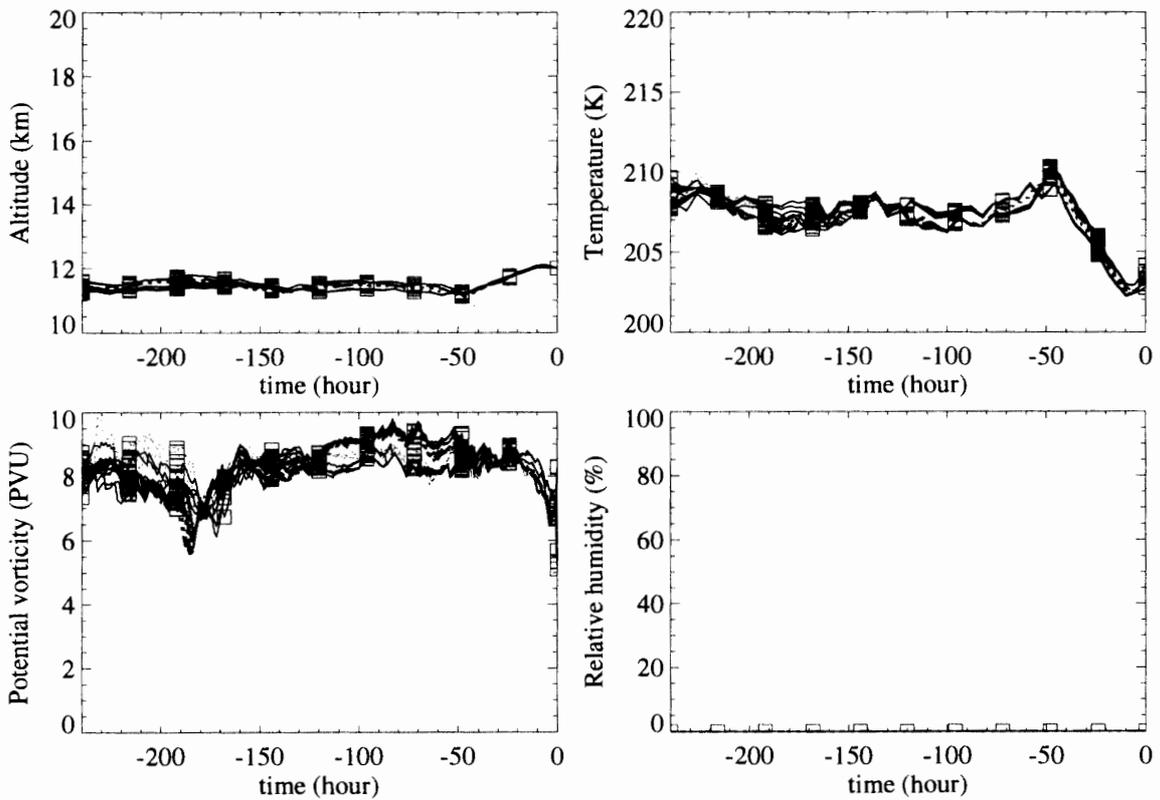
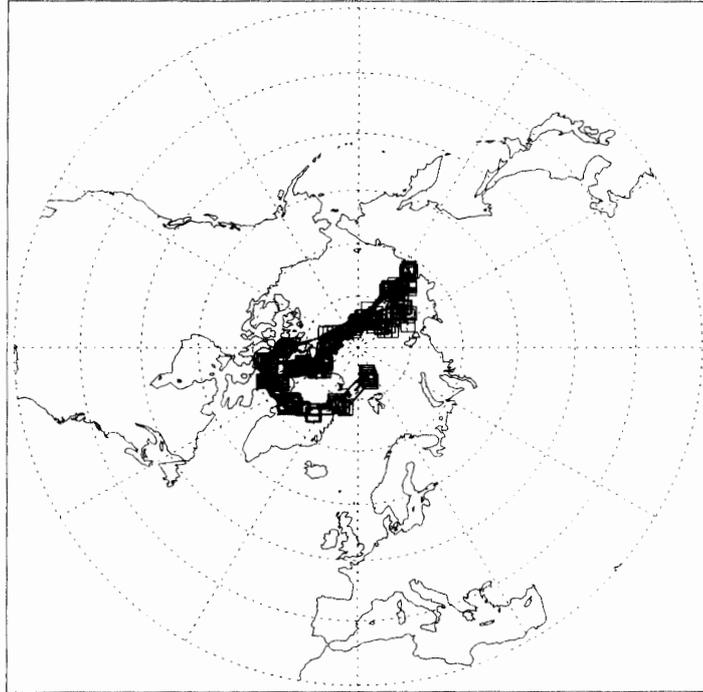
(e) 75°N, 150°W, 12 km, 7 March, 6 UTC.

Initial point 80.0°N, 10.0°E Z=12.0 km -  $\theta=352.87$  K 1998/03/07 09:00Z



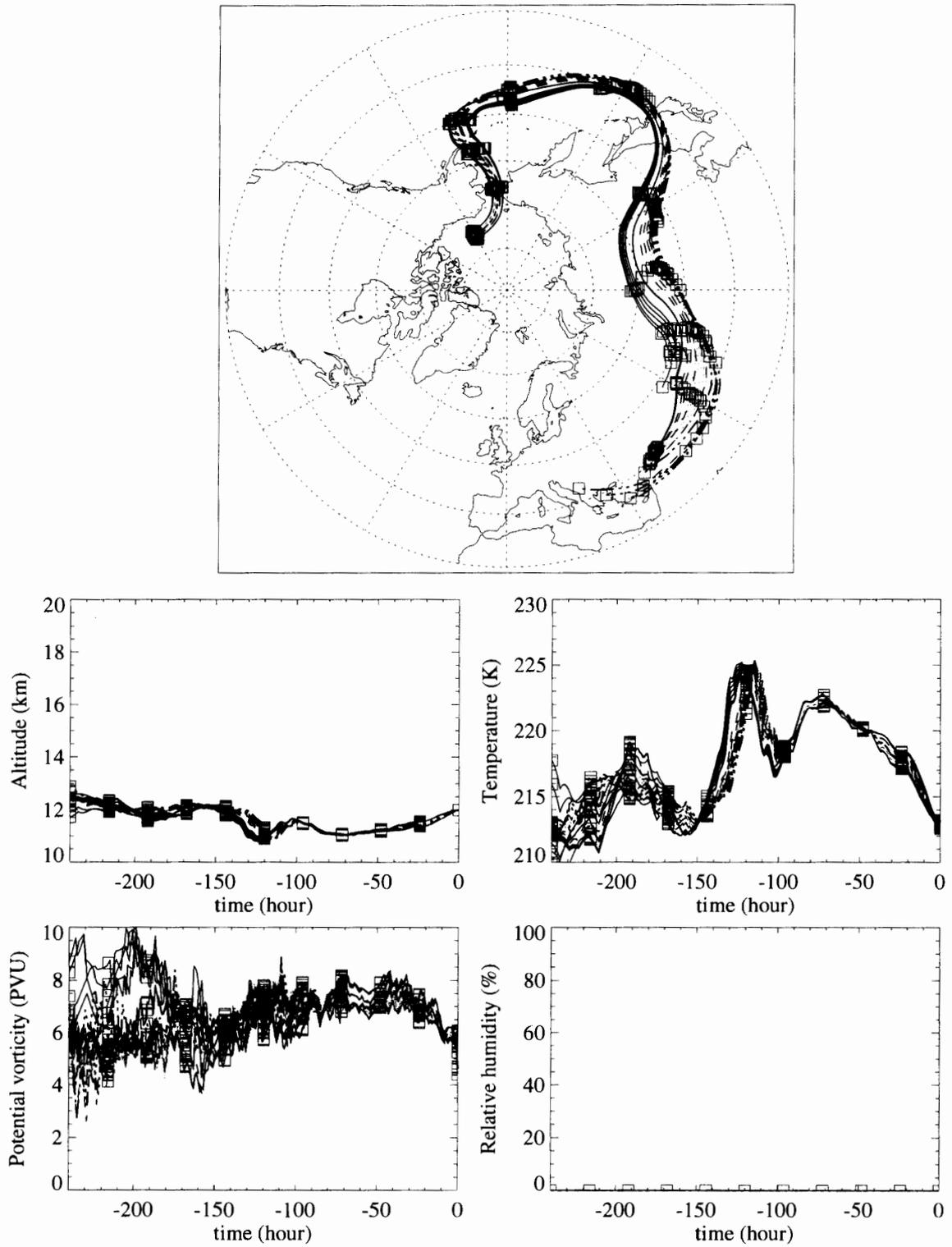
(f) 80°N, 10°E, 12 km, 7 March 9, UTC.

Initial point 84.0°N, 20.0°E Z=12.0 km -  $\theta=339.13$  K 1998/03/12 16:00Z



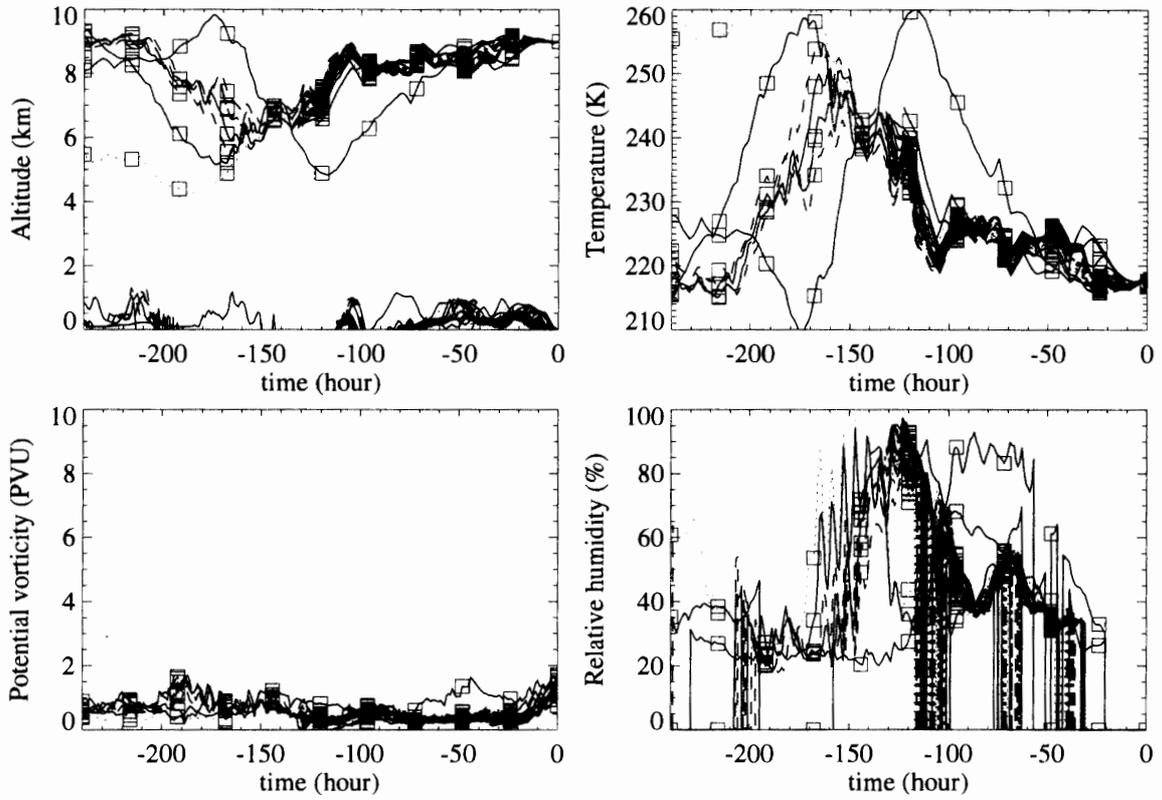
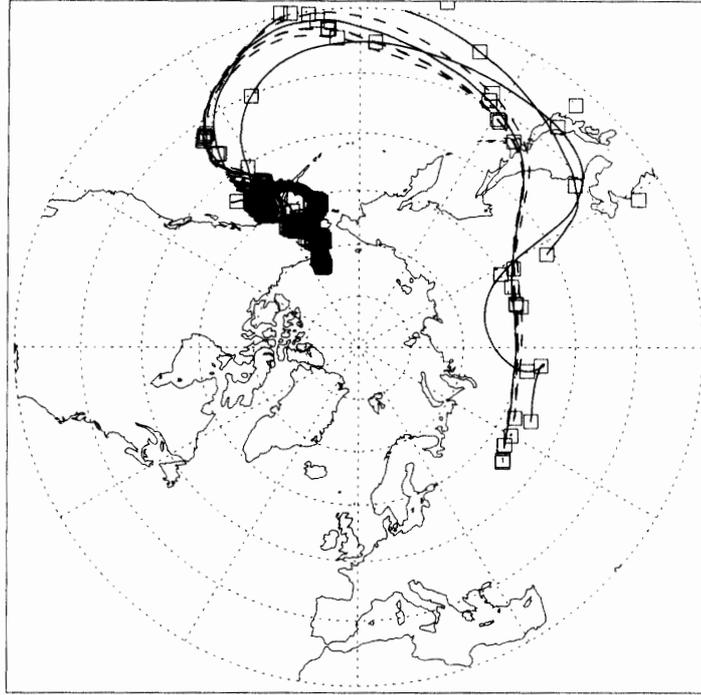
(g) 84°N, 20°E, 12 km, 12 March, 16 UTC.

Initial point 75.0°, -150.0° 12.0 km -  $\theta=347.7$  K 1998/03/12 19:00Z



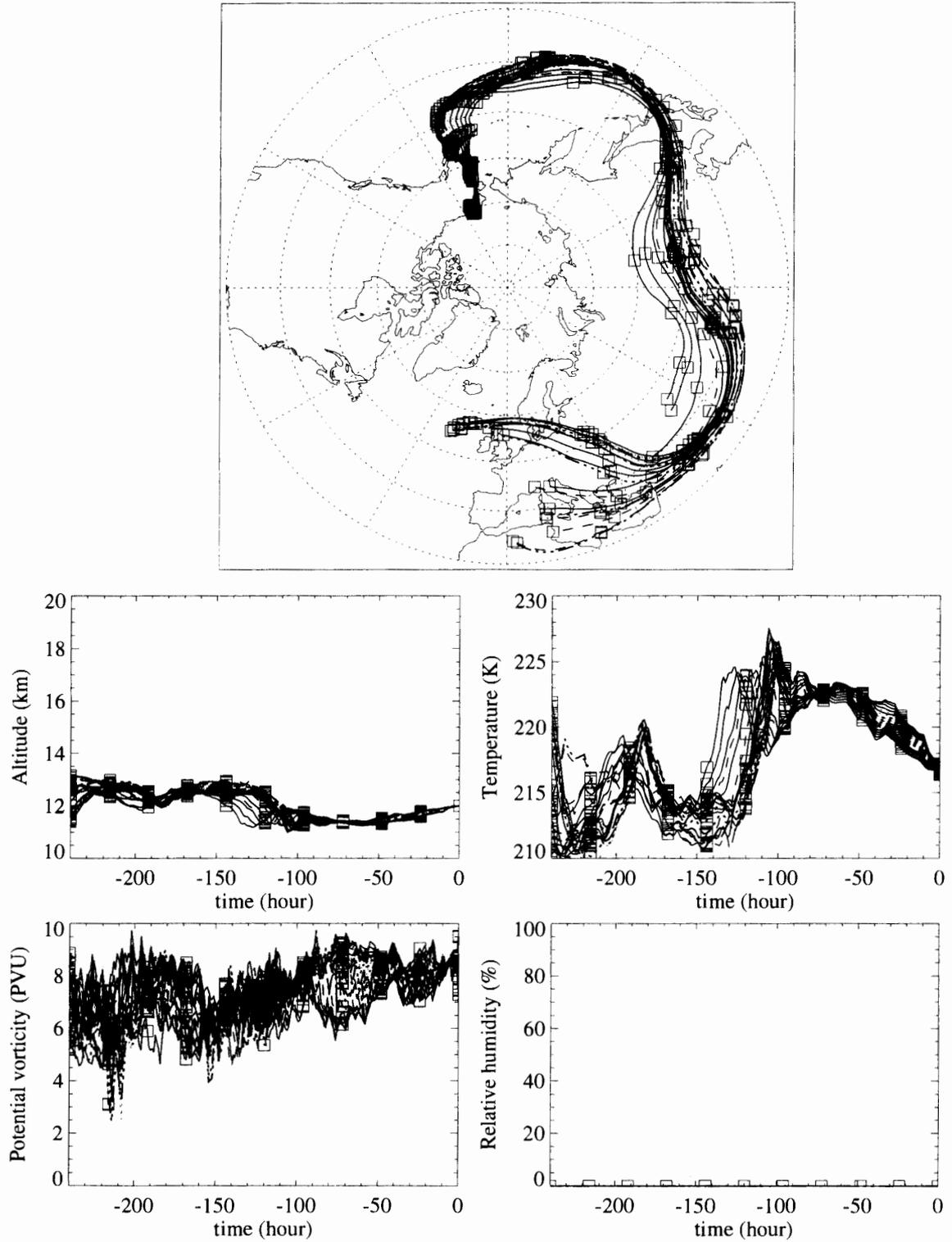
(h) 75°N, 150°W, 12 km, 12 March, 19 UTC.

Initial point 72.0°, -157.0° 9.0 km -  $\theta=309.2$  K 1998/03/12 21:00Z



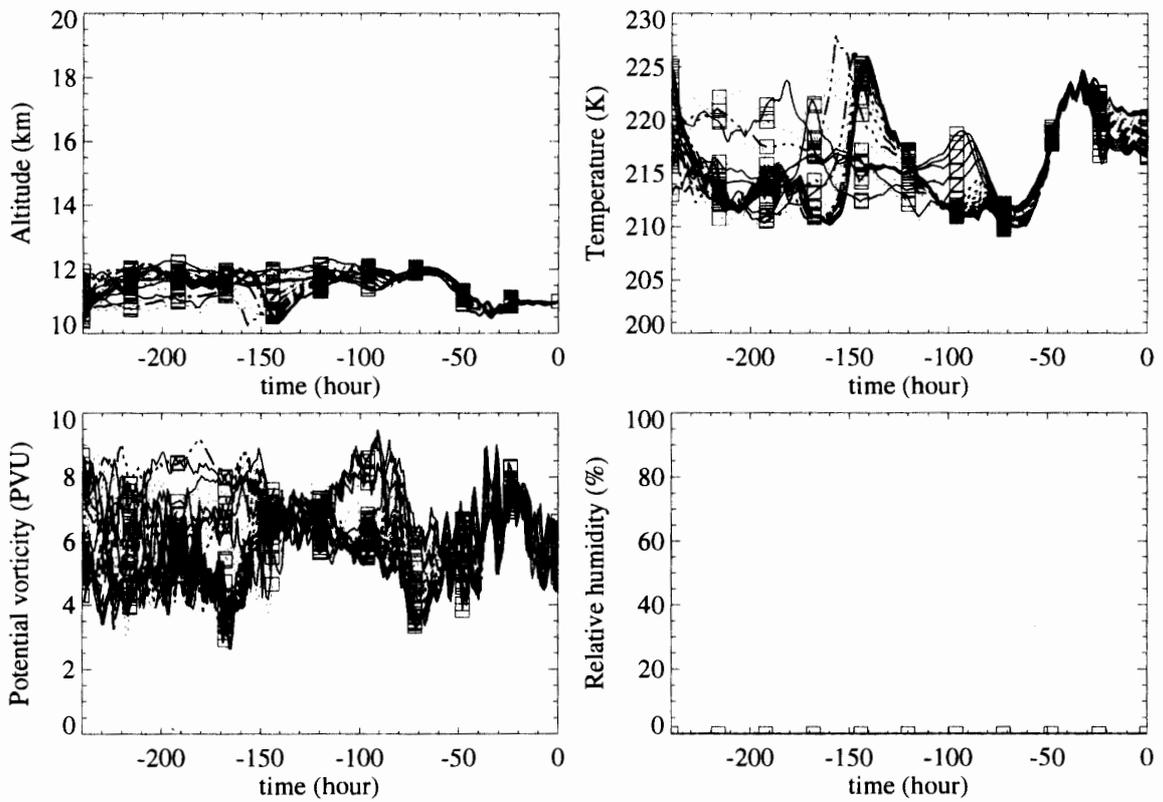
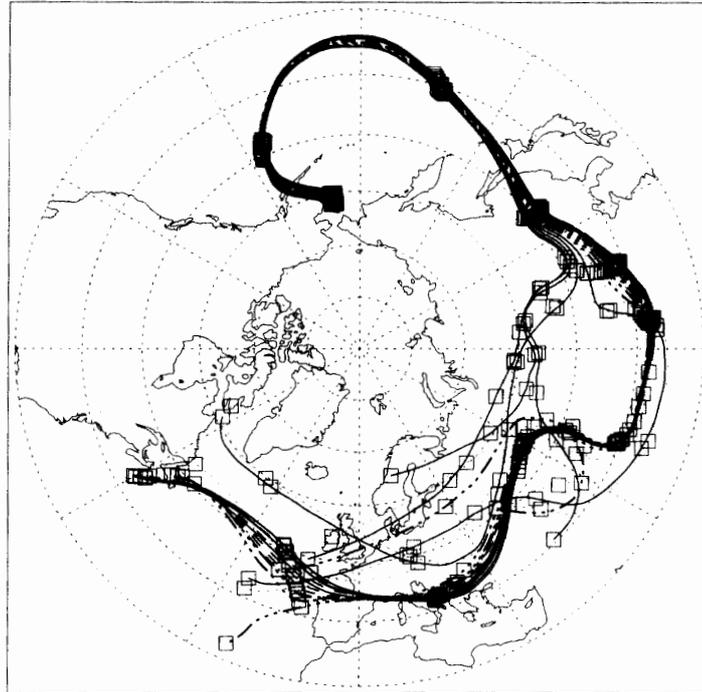
(i) 72°N, 157°W, 9 km, 12 March, 21 UTC.

Initial point 70.0°, -156.0° 12.0 km -  $\theta=353.5$  K 1998/03/12 22:00Z



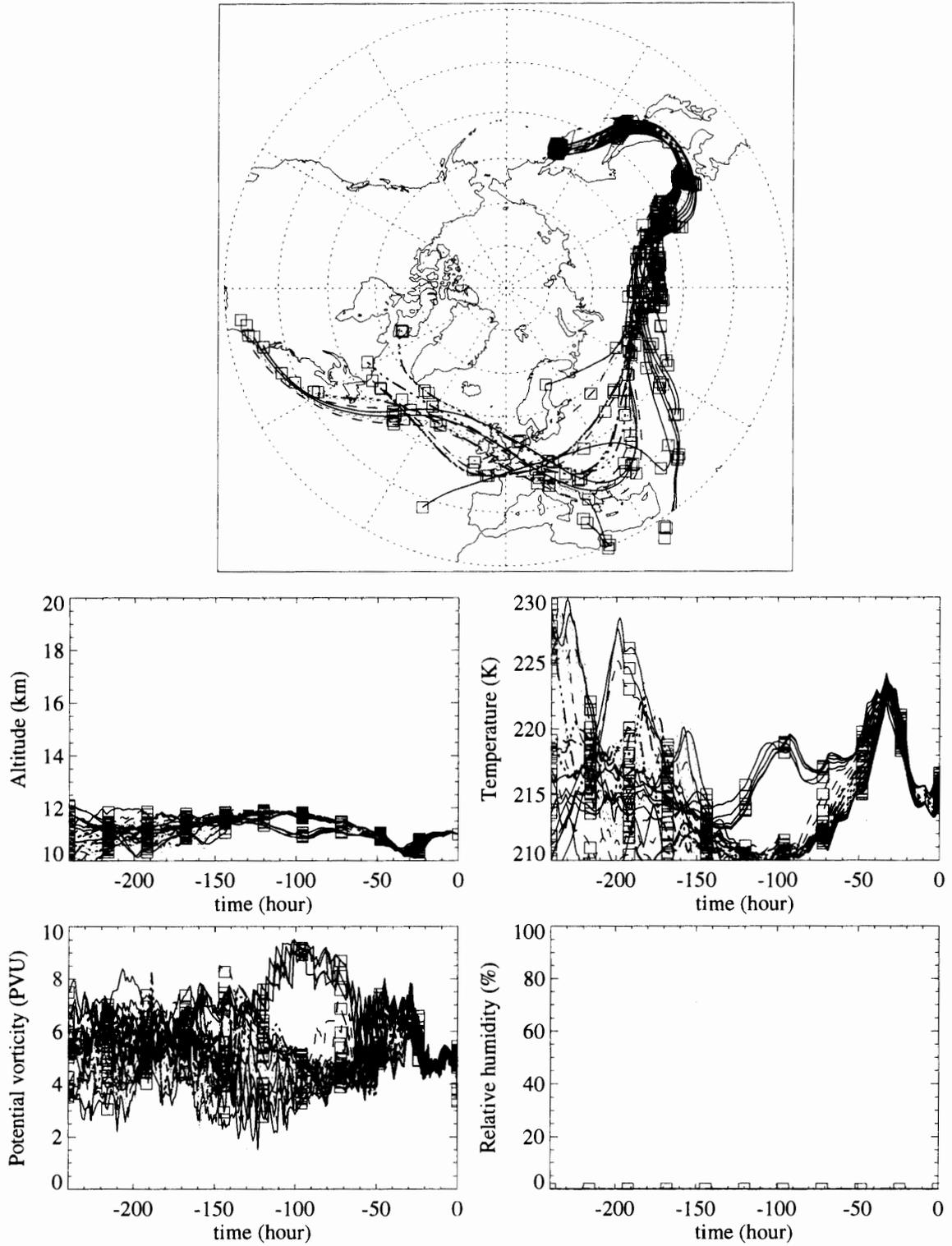
(j) 70°N, 156°W, 12 km, 12 March, 22 UTC.

Initial point 61.0°, -170.0° 11.0 km -  $\theta=340.9$  K 1998/03/14 01:00Z



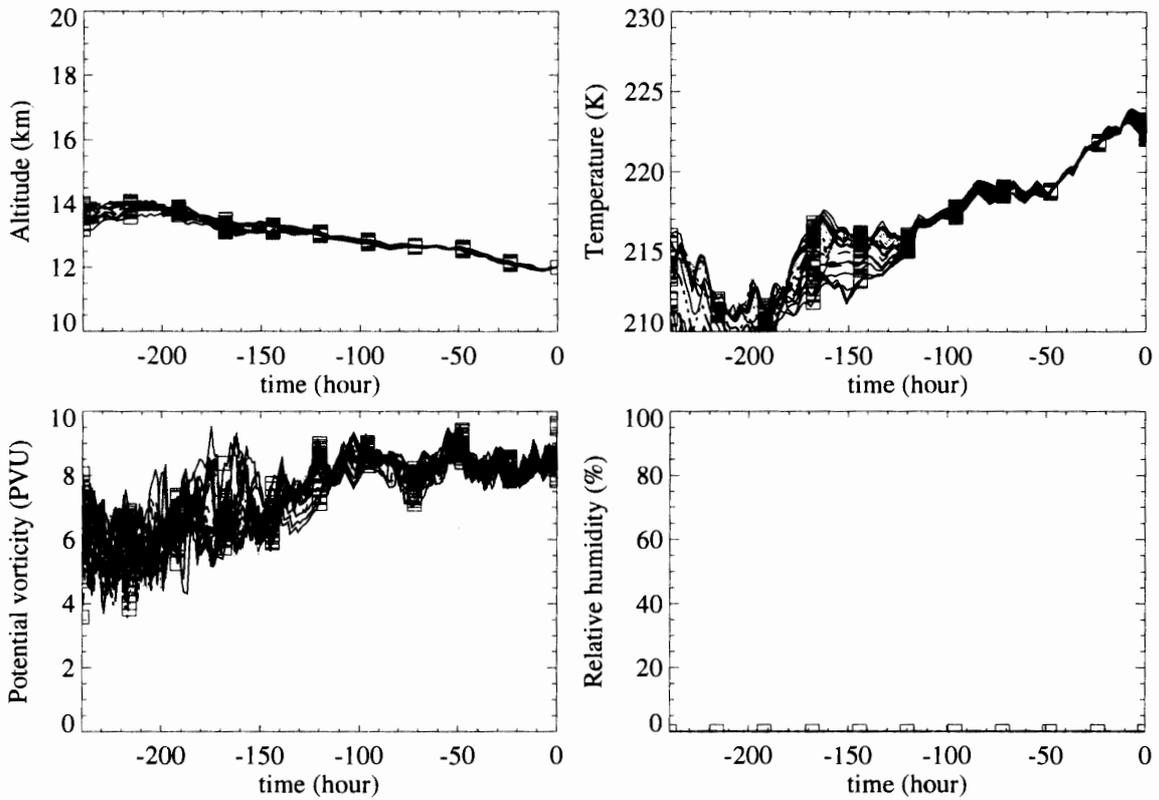
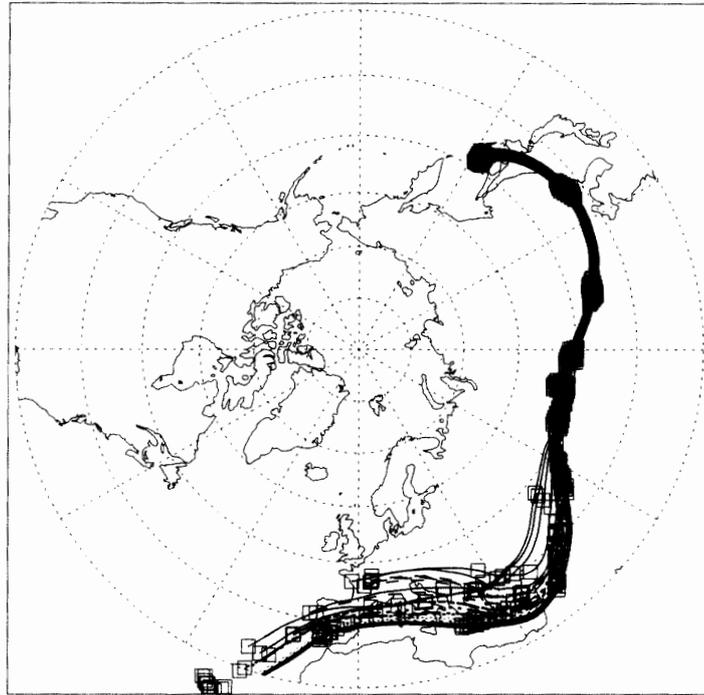
(k) 61°N, 170°W, 11 km, 14 March, 1 UTC.

Initial point 56.0°N, 160.0°E Z=11.0 km -  $\theta=336.18$  K 1998/03/14 03:00Z



(l) 56°N, 160°E, 11 km, 14 March, 3 UTC.

Initial point 48.0°N, 148.0°E Z=12.0 km -  $\theta=364.37$  K 1998/03/14 07:00Z



(m) 48°N, 148°E, 12 km, 14 March, 7 UTC.