

北極圏航空機観測 (AAMP 98) の概要

塩原 匡貴*・藤井 理行*

An overview of the Arctic Airborne Measurement
Program 1998 campaign

Masataka Shiobara* and Yoshiyuki Fujii*

Abstract: The Arctic Airborne Measurement Program (AAMP) was planned to investigate the transport, exchange and chemical processes of gas and aerosol in the Arctic atmosphere in early spring, and further to understand their roles in global change. An instrumented aircraft, a Gulfstream II (G-II) twin-jet plane, was used for airborne measurements in the troposphere and lower stratosphere of the Arctic. For the AAMP 1998 campaign, the G-II was equipped with CO₂ and O₃ concentration measurement systems, gas and aerosol sampling systems, aerosol particle counters, and the PMS 1D and 2D airborne particle probes. The aircraft was flown from Japan to Svalbard via Alaska, passing over the North Pole, and on the reverse route, in the first half of March 1998. The approximate cruising altitude was 12 km for long-range flights. Vertical profiles of gas and aerosol concentrations were observed over Spitsbergen, Svalbard and Barrow, Alaska. A convective cloud system associated with a polar low was observed over the Norwegian Sea. Another cloud observation was made for marine boundary layer clouds over the open sea off Spitsbergen.

要旨: 北極圏の春季の大気中における微量気体およびエアロゾルの輸送、交換およびその化学過程を調べ、地球規模変化における極域の役割を理解するために、北極圏航空機観測計画 (AAMP) を立案した。本計画では北極域の対流圏および下部成層圏での観測を可能にするためにガルフストリーム II 型双発ジェット機 (G-II) を使用した。この G-II には二酸化炭素およびオゾンの連続測定装置、気体およびエアロゾルの採取装置、光学式エアロゾル粒子計数装置、PMS 社の 1 次元および 2 次元粒子計測プローブ等が搭載された。1998 年 3 月上旬、日本からアラスカおよび北極点上空を経てスバルバル諸島に至るルートおよびその逆ルートにおいて大気観測を行った。長距離飛行時の飛行高度は約 12 km だった。スバルバル諸島スピッツベルゲン島近海上空およびアラスカ州バロー上空では微量気体およびエアロゾルの濃度の鉛直プロファイル観測を行った。ノルウェー海上空ではポーラー・ローに伴う対流性雲システムの観測を行った。また、別種の雲観測としてスピッツベルゲン島近海の開水面上にできた境界層雲を観測した。

*国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

1. はじめに

北極圏は人為起源の微量気体やエアロゾルが収束する場所であると同時に、気候変化の影響が最も顕著に現れる場所であると言われる。そのため、それらの大気微量成分の観測を通して北極圏大気中の輸送過程や成層圏・対流圏・海洋間の物質交換・変質過程を調べることは、地球規模の変動のメカニズムを理解する上で極めて重要であると考えられる。

国立極地研究所はノルウェー極地研究所との共同研究によりスバルバル・ニーオルスンでの大気観測を1991年より行ってきた。その結果、地上における二酸化炭素やメタン等の温室効果気体の濃度は北半球高緯度で最も高く、かつ最も大きな季節変化を示すことが明らかになってきた (Yamanouchi *et al.*, 1996)。特に二酸化炭素濃度の季節変化は陸上植物の活動を反映したものであることが炭素同位体比の分析結果から明らかにされた (Morimoto *et al.*, 2001)。また、春先の対流圏オゾン濃度の急減現象も捉えられており、南極域との類似性、相違性が調べられた (Wessel *et al.*, 1998)。さらに、北極層雲の特徴的な季節変化や降水との関連も明らかになりつつある (Wada *et al.*, 1996)。

しかし、これらの結果はニーオルスンでの地上観測に基づくものであり、先に述べたような北極域への輸送過程や北極大気の交換過程を調べるには、鉛直分布や水平的な広がりなど、3次元的な立体構造の把握が必要であることは言うまでもない。そのため、航空機を用いた広域観測が必要であると認識され、国立極地研究所北極圏環境研究センターの国際共同研究事業の一環として北極圏航空機観測 (Arctic Airborne Measurement Program '98; AAMP 98) が計画され、1998年3月に実施されるに至った (Shiobara *et al.*, 1999)。ここでは、AAMP98の計画概要と実施内容および観測結果の概要について報告する。

2. AAMP 98 の目的

極域の成層圏・対流圏の物質輸送・交換過程では、極渦の存在が重要な役割を果たしている。すなわち、冬季の極域大気を特徴づける極渦は力学的に形成される孤立系であるため、その内外での物質交換を著しく困難にし、渦内では、例えばオゾンホールのような特異な現象を引き起こすことが知られている。極渦の崩壊が始まる極夜明けの時期は大気化学的にも重要な時期である。極渦の崩壊に伴って起こる中・低緯度からの人為起源物質の流入は北極ヘイズや北極層雲の形成に深く関わっている。このことから、本観測計画では、特に極渦内外での物質輸送・交換過程に焦点を当て、極渦が安定な時期から崩壊へ向かう3月に航空機を用いた広域観測を実施することになった。

AAMP 98 では次の4つの研究課題が上げられた。

- ① 各種微量気体の分布と変動の解明
- ② エアロゾルの長距離輸送と変質過程の解明

- ③ 対流圏エアロゾルの空間分布とその放射効果の解明
- ④ 擾乱の構造と微物理過程の解明

このため、CO₂とO₃の現場連続測定、およびフラスコサンプリングによるCO₂、CH₄、N₂O、COの各濃度とCO₂の炭素・酸素の同位体比、CH₄の炭素同位体比の測定を行い、北極上空の対流圏と下部成層圏における諸微量気体の分布と変動の実態を把握する。また、エアロゾルの粒径分布、化学組成および個々のエアロゾルの形状を広域かつ高度別に測定、観察することにより、中低緯度から極域へ輸送されるエアロゾルおよび各種化学成分のフラックス評価を行う。さらに、ポーラーローに伴う雲内外を航空機で観測することにより、北極域で特徴的な擾乱の力学的構造や雲物理学の特徴を調べることにした。本観測ではエアロゾルの放射効果に関する観測は十分ではなかったが、これについては、その後、北極域対流圏エアロゾル・放射総合観測 ASTAR 2000 に引き継がれ実現した (Yamanouchi and Herber, 2001; Yamanouchi *et al.*, 2002)。

3. 航空機と搭載機器

この観測計画を実行するためには、北極海を横断するのに十分な航続距離を有すること、下部成層圏に到達可能なこと、研究課題に示された観測内容を実施するための観測機器が搭載可能であることが航空機の性能として要求される。これらの要求性能を満たす航空機として、ガルフストリーム II 型双発ジェット機 (G-II, ダイヤモンドエアサービス株式会社所有) を使用することになった (図 1)。この G-II は種々の大気観測に対応できるよう改修された観測専用機で、表 1 および付録図 A1 に示すと通りの性能・諸元を有する。



図 1 ガルフストリーム II 型ジェット機 (ダイヤモンドエアサービス株式会社所有)
Fig. 1. The Gulfstream II twin jet plane (Diamond Air Service Co., Nagoya).

AAMP98 には、北海道大学大学院理学研究科・工学研究科，東北大学大学院理学研究科，宮城教育大学，名古屋大学太陽地球環境研究所，国立環境研究所，国立極地研究所が参加し，各グループが開発製作した CO₂ 濃度連続測定装置 (町田ら，2002)，オゾン濃度連続測定装置 (森

表1 ガルフストリーム II 型機の性能・諸元
Table 1. Performance of the Gulfstream II.

寸法	
全幅	21.0 m
全長	24.4 m
全高	7.5 m
重量	
最大離陸重量	28123 kg
最大着陸重量	26540 kg
ペイロード	2475 kg
性能	
最大速度	945 km/h (510 kt)
巡航速度	851 km/h (459 kt)
経済速度	776 km/h (419 kt)
最大運用高度	13106 m (43000 ft)
最大航続距離	4842 km (2613 NM)
滑走路長	
離陸時	1756 m
着陸時	1631 m

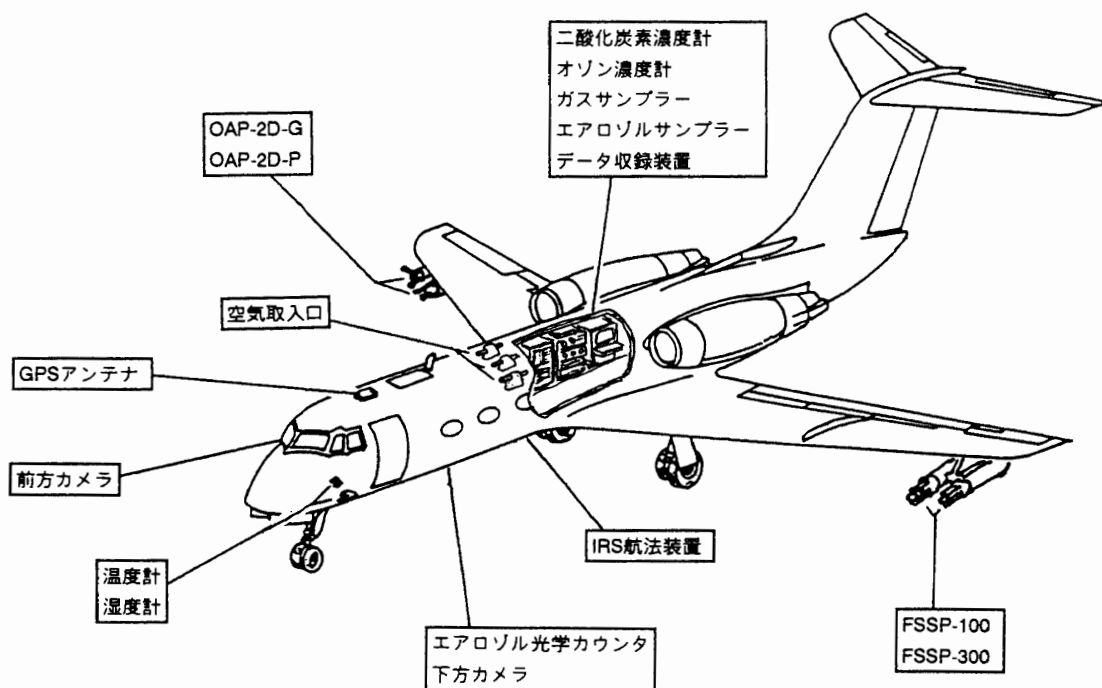


図2 航空機搭載機器配置図

Fig. 2. Instrumentation aboard the G-II.

本, 2002), 気体採取装置 (菅原ら, 2002; 猪股ら, 2002), エアロゾル採取装置 (山形ら, 2002; 原ら, 2002), エアロゾル計数装置 (渡辺ら, 2002) の他, 一般に用いられる大気計測用の各種プローブを搭載した。これらの搭載機器の配置の概略は図2のとおりである。搭載に関するより詳細な情報は付録図 (Appendix) として本報告の最後にまとめた (図A2-A5)。また, 個々の搭載機器の概要と仕様を付録表A1にまとめた。

4. 観測飛行の概略

飛行経路と行動日程の概略を図3及び表2に示す。また, より詳細な行動記録は Appendix にまとめた (図A6 および表A2)。1998年3月6日に名古屋 (35.3°N, 136.9°E) を出発しペトロパブロフスク (53.0°N, 158.3°E) に給油のため着陸した。同日夜, アンカレッジ (61.2°N, 150.1°W) に到着, 米国への入国手続きを済ませた。翌日, アンカレッジ～バロー間では高度を変えた南北飛行をバロー上空で行った後, バロー (71.3°N, 156.8°W) に着陸した。バローで給油後, 北極点上空を通過し, 3月7日ロングイヤービン (78.2°N, 15.4°E) に到着した。これら

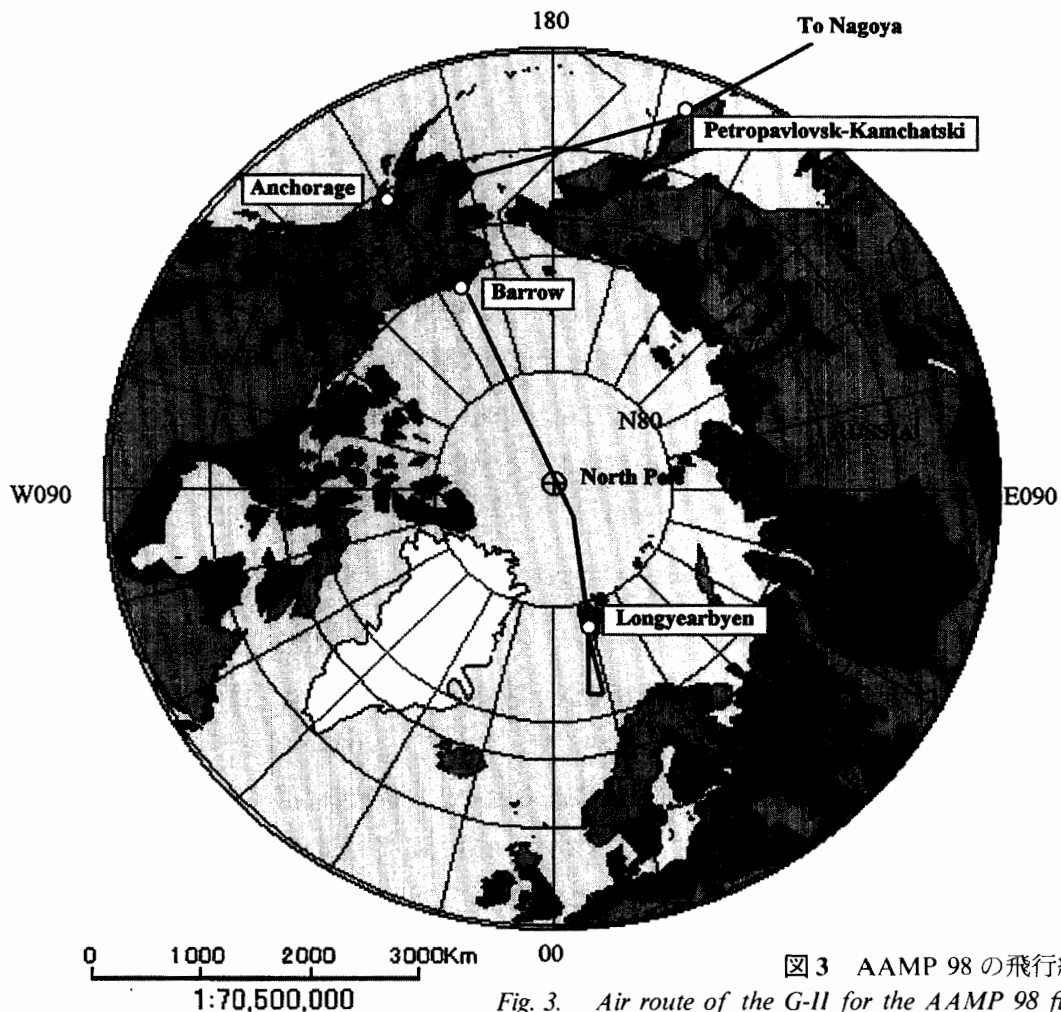


図3 AAMP 98の飛行経路

Fig. 3. Air route of the G-II for the AAMP 98 flight.

表2 AAMP 98 の行動
Table 2. The AAMP 98 flight summary.

飛行番号	飛行経路または飛行域 (飛行種別)	出発時刻 (UT) (下段: 地方時)	到着時刻 (UT) (下段: 地方時)	飛行時間
1	名古屋～ペトロパブロフスク (長距離高高度巡航)	2335, 3/5 (0835, 3/6)	0315, 3/6 (1515, 3/6)	4:40
2	ペトロパブロフスク～アンカレッジ (長距離高高度巡航)	0430, 3/6 (1630, 3/6)	0850, 3/6 (2350, 3/5)	4:20
3	アンカレッジ～バロー (長距離巡航+鉛直プロファイル)	2335, 3/6 (1435, 3/6)	0305, 3/7 (1805, 3/6)	3:30
4	バロー～ロングイヤービン (長距離高高度巡航)	0500, 3/7 (2000, 3/6)	0950, 3/7 (1050, 3/7)	4:50
5	ニーオルスン西側近海上空 (鉛直プロファイル観測)	1035, 3/8 (1135, 3/8)	1345, 3/8 (1445, 3/8)	3:10
6	スバルバル南方海上 (ポーラー・ロー/雲観測)	0955, 3/9 (1055, 3/9)	1340, 3/9 (1440, 3/9)	3:45
7	ニーオルスン西側近海上空 (鉛直プロファイル観測)	1010, 3/10 (1110, 3/10)	1155, 3/10 (1255, 3/10)	1:45
8	ロングイヤービン～バロー (長距離高高度巡航)	1455, 3/12 (1555, 3/12)	1945, 3/12 (1045, 3/12)	4:50
9	バロー～アンカレッジ (鉛直プロファイル+長距離巡航)	2055, 3/12 (1155, 3/12)	2345, 3/12 (1445, 3/12)	2:50
10	アンカレッジ～ペトロパブロフスク (長距離高高度巡航)	2335, 3/13 (1435, 3/13)	0400, 3/14 (1600, 3/14)	4:25
11	ペトロパブロフスク～名古屋 (長距離高高度巡航)	0525, 3/14 (1725, 3/14)	0935, 3/14 (1835, 3/14)	4:10

の長距離飛行時の巡航高度は約 12 km, 巡航速度は 800 km/h であった。なお, この高度は航空機搭載計器による気圧高度であり, 本報告では特に断らない限りすべて計器高度表示を用いており, 真の高度 (海拔 0 m までの鉛直方向の距離) とは異なることに留意する必要がある。航空機に装備された気圧高度計は次式で表される気圧 P (hPa) と高度 H (m) の関係を示すように目盛付けされている (加藤, 1986)。

$$P = P_0 (1 - 2.256 \times 10^{-5} \cdot H)^{5.256}$$

これは国際標準大気に基づく気圧とジオポテンシャル高度との関係式である。ここで, P_0 は 14000 ft (約 4200 m) 以下の飛行で QNH 規正 (離陸時の高度計目盛を滑走路高度に合わせる) により計器補正を行っている場合は海面較正気圧であり, 14000 ft 以上の高高度飛行では標準気圧 (1013 hPa) を用いる (景山大郎, 私信)。これにより, 計器高度 39000 ft (約 11900 m) から計算される気圧は 195 hPa である。すなわち, AAMP 98 での高高度巡航中はほぼ 195 hPa の等圧面高度を飛行していたことになる。なお, 離陸後この巡航高度に達するには通常 20 分前後の時間を要した。

3月8日より, ロングイヤービンを基地として3フライト行った。3月8日及び10日はニー

オルスン西側海上で鉛直プロファイル飛行を行い、大気微量成分およびエアロゾル濃度の鉛直分布を測定した。ただし、3月10日は対流圏下層に海洋性境界層雲が出現していたため、鉛直プロファイル飛行の後、雲物理観測を併せて実施した。これらのプロファイル観測では飛行速度を約500 km/hまで落とし、上昇/下降率を150-300 m/minに保持して螺旋状に上昇または下降した。3月9日はスバルバル南方のノルウェー海上で擾乱性対流雲、いわゆるポーラー・ローに伴う雲の構造に関する観測を行った。

3月12日、ロングイヤービンを離陸し、往路と同じルート上で、北極上空の長距離観測飛行を行い、バローで給油した後、同日、アンカレッジに到着した。その間、バロー上空では上昇しながら鉛直プロファイル観測を行った。翌日、アンカレッジを離陸し、日付変更線を越えてペトロパブロフスクで給油の後、3月14日に名古屋に帰着した。

5. 観測結果の概要

図4はAAMP 98観測時の200 hPaの等圧面高度の高層天気図である。前述のとおり、北極海を横断する長距離飛行では195 hPaの気圧高度で飛行したため、ほぼ図4に示された高度面を飛行したことになる。この図から、200 hPaのジオポテンシャル高度は往路復路共に11000 m \pm 500 mを示しており、計器高度よりやや低かったことがわかる。

飛行ルートに沿って図4を見ると、80°N以北では等高度線が閉じているが、カムチャツカ半島からベーリング海、アラスカに至る74-80°Nの区間では大きく蛇行する様子が見られる。このことから、航空機観測の往路、復路では同じような大気状態が維持されていたことや、スバルバルを含む極点周辺と異なりアラスカ周辺では低緯度の空気塊が流入していたことが予想される。このような循環場の特徴は大気微量成分の濃度変動にも現れている。図5はバロー～ロングイヤービン間の北極海を横断する長距離飛行で得られた下部成層圏でのオゾン濃度とCO₂濃度の変動である(森本, 2002; 町田ら, 2002)。このとき、G-IIはアラスカ・バロー側の73°Nからスバルバル・ロングイヤービン側の80°Nまでは計器高度12 kmすなわち気圧高度195 hPaで等高度飛行を行った。アラスカ側の74°Nから80°Nにかけて両者の濃度は大きく変動しているが、80°N以北の区間では安定した濃度(オゾン=0.4-0.7 ppmv, CO₂=361-362 ppmv)を示している。また、両者の濃度には明瞭な逆相関が見られるが、大きく変動している区間での濃度は安定した区間の濃度と比べて、オゾンは低濃度を、CO₂は高濃度を示している。図5に示された結果は成層圏-対流圏の交換過程や低緯度から高緯度への極域大気の輸送過程を反映しているものと思われ、より詳しい解析が町田ら(2002)および森本(2002)によってなされている。また、同様の変動は光学式エアロゾル粒子計測装置(OPC)による成層圏エアロゾルの濃度変動にも見られ、これについては渡辺ら(2002)が詳しく報告している。

対流圏でのCO₂濃度は約368-370 ppmvでほぼ一定しており、鉛直方向によく混合されている様子が示された。また、対流圏界面付近で濃度が急激に減少し、成層圏では約361 ppmvの

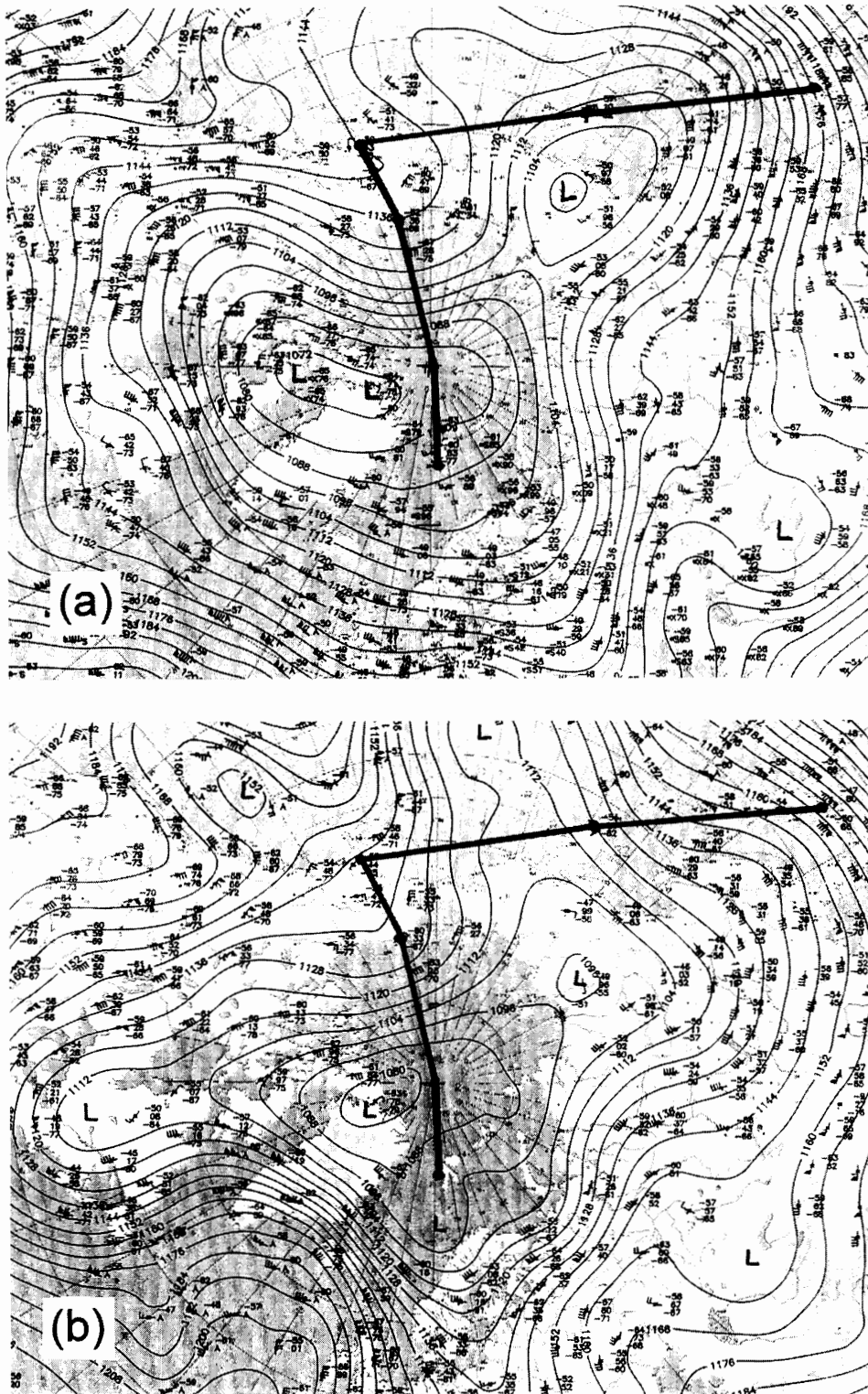


図4 200 hPaの高層天気図(ドイツ気象局作成)

(a) 1998年3月7日, (b) 1998年3月12日.

Fig. 4. Aerological maps of the 200 hPa height at (a) 12 Z on 7 March 1998 and (b) 12 Z on 12 March 1998, published by the German Weather Service. The bold line indicates the air route of the AAMP 98 long-range flights.

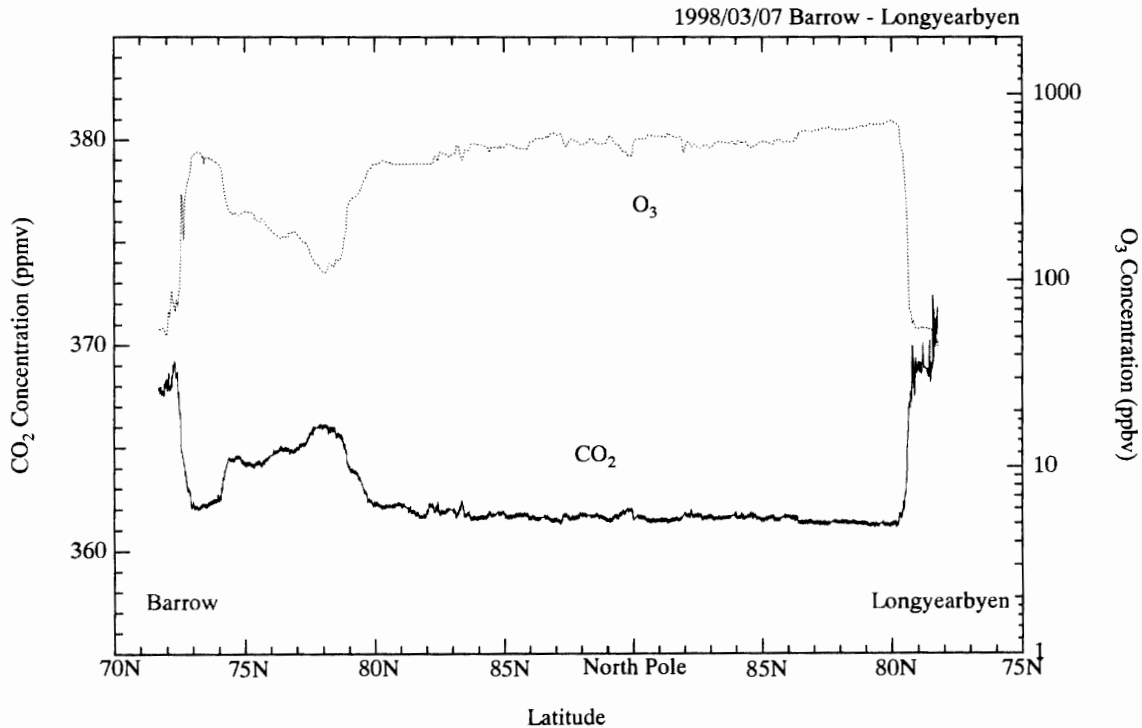


図5 北極圏長距離飛行中のオゾンと二酸化炭素の濃度変動

Fig. 5. Concentrations of CO_2 (solid line, left-side scale) and O_3 (broken line, right-side scale) during a trans-Arctic long-range flight from Barrow to Longyearbyen (Flt. No. 4). Large variations at both edges in the figure are due to ascending and descending flights in the troposphere.

濃度を示した。この結果は圏界面により大気鉛直混合が大きく妨げられることを示すものと思われた (町田ら, 2002)。

大気サンプリングおよびその分析の結果、メタンと N_2O の対流圏および下部成層圏での濃度はそれぞれ 1.6–1.9 ppmv, 0.28–0.32 ppmv を示した (菅原ら, 2002)。同時に、メタンと N_2O の濃度の鉛直分布の細かい構造について明瞭な正の相関が見られ、1997年スウェーデン・キルナで実施された成層圏気球観測実験で得られたメタンと N_2O の正相関と同様の結果 (Aoki *et al.*, 1998) を示した。

硫化カルボニル (COS) は火山性エアロゾル以外で成層圏に注入されうる主要な硫黄化合物であるといわれる。COS 濃度はフラスコに採取した大気サンプルをガスクロマトグラフ法により定量分析して求めた。今回の観測では、対流圏で 378–433 pptv の範囲でほぼ一定の濃度を示し、緯度による濃度差は見られなかった。下部成層圏の COS 濃度は対流圏内の濃度と比較して低い様子が認められたが、それほど顕著ではなかった (猪股ら, 2002)。

北極ヘイズは北極域での対流圏エアロゾルの特徴的現象であり、これまで多くの研究がなされている (Shaw, 1995)。今回の観測期間中も北極ヘイズと思われるエアロゾルの高濃度層がしばしば観測された。スバルバル上空及びアラスカ上空の鉛直プロファイル観測では、北極へ

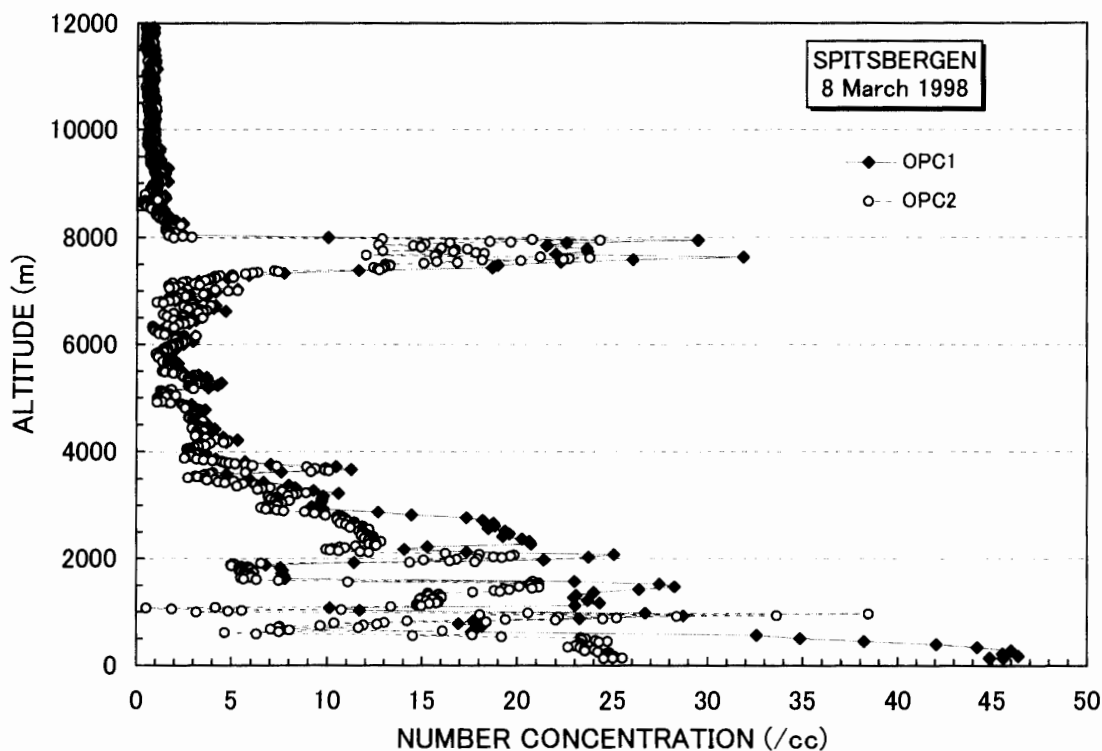


図6 スピッツベルゲン島上空で観測されたエアロゾル粒子 (直径 $3\ \mu\text{m}$ 以上) の数濃度の高度分布。

Fig. 6. Vertical distribution of aerosol particle number concentrations ($D > 0.3\ \mu\text{m}$) measured by OPC1 placed in a non-pressurized space (closed diamonds with the solid line) and OPC2 in the pressurized cabin (open circles with the dashed line), from a descending flight (Flt. No. 5) near Spitsbergen on 8 March 1998.

イズは多層構造を示し、圏界面付近まで達する様子が見られた。その1例として、図6にスバル諸島上空で観測された直径 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上のエアロゾル粒子の数濃度の鉛直分布を示す。この結果は機内に配置された OPC (山形ら, 2002) と機外に取り付けられた OPC (渡辺ら, 2002) による測定結果で、測定状況の異なる2台の測器により同じ高度に高濃度層が観測されており、ヘイズ層の存在が確認された。ただし、定量的に見ると測定値には数倍程度の差があり、測定時のエアロゾルの変質の可能性を示している。また、この時のヘイズの到来はニーオルスのマイクロパルス・ライダーにより数日前から観測されていた (塩原・柴田, 2002)。

直接採取されたエアロゾルの走査型電子顕微鏡による形態観察およびエネルギー分散型 X線分析装置による組成分析の結果、自由対流圏～下部成層圏では硫酸 (塩) 粒子が多く存在することが確認された。また、境界層内～自由対流圏で採取された試料には土壌粒子や海塩粒子と思われる結晶質粒子も存在し、中緯度域からの長距離輸送の可能性も示唆された (原ら, 2002)。

AAMP 98 では雲観測も含まれ、ポーラー・ローに伴う対流性の雲および海洋上の境界層内に出現した筋状雲の2種について観測が行われた。3月9日にスピッツベルゲン島南方のノル

ウェー海上で観測されたポーラー・ローは、はっきりとした「目」と対流雲列を持つ構造を示し、主に対流圏下層の混合層内で生成された雲粒子が強い上昇流により成長しながら高高度に達し、上空に運ばれた過冷却微水滴が氷晶化し氷粒子となって降水粒子を形成する様子が見られた (遊馬ら, 2002)。3月10日にスピッツベルゲン島北西沖合約 50 km の開水面上で観測された境界層内の筋状雲は雲頂高度 700 m, 雲底高度 150 m で、筋状の雲列の間隔はビデオ映像の解析から 1.5-2 km であると推定された。過冷却水滴と思われる 50 μm 程度の球形粒子が観測されたが、概して樹枝状雪結晶が多く存在した。

6. ま と め

航空機を用いた北極域の広域大気観測を目的に北極圏航空機観測 AAMP 98 が計画され、1998年3月上旬に実施された。この AAMP 98 では、主に温室効果気体やエアロゾル等の大気微量成分ならびに雲物理の観測が行われ、良好なデータが取得できた。その結果、成層圏-対流圏の物質交換過程、極域エアロゾルとその前駆物質の動態、さらにポーラー・ローの力学的雲物理学の特徴等に関する重要な知見が得られた。しかし、目標の1つに掲げられたエアロゾルの放射効果に関する観測は十分ではなかった。これについては、その後、北極域対流圏エアロゾル・放射総合観測 ASTAR 2000 に引き継がれ実現した (Yamanouchi and Herber, 2001; Yamanouchi *et al.*, 2002)。また、さらに 2002年3月には AAMP 98 と同様の航空機観測が実施される予定である。

謝 辞

本研究は国立極地研究所国際共同研究事業「北極圏環境観測」(1995-1998年度、総括: 渡邊興亜/藤井理行)、文部省科研費国際学術研究「北極圏環境変動に関する総合研究」(1997年度、代表: 藤井理行) 並びに同「北極域における温室効果気体の変動と循環に関する研究」(1997-1998年度、代表: 中澤高清) により実施された。実施にあたり、特段のご理解とご協力を賜ったダイヤモンドエアサービス株式会社 (DAS)、ロングイヤー空港管理事務所、ノルウェー極地研究所、アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所、キングス・ベイ社に感謝の意を表す。また、本報告の資料作成には DAS の景山大郎氏並びに大須賀勝氏にご協力いただいた。

文 献

- Aoki, S., Nakazawa, T., Honda, H., Yajima, N., Machida, T., Sugawara, S., Kawamura, K. and Yoshimura, S. (1998): CO₂, CH₄ and N₂O concentrations and $\delta^{13}\text{C}$ in CO₂ and CH₄ in the stratosphere over Scandinavia and Japan. Proc. 21st International Symposium on Space Technology and Science, Vol. II, 1568-1571.
- 遊馬芳雄・福田陽子・菊地勝弘・塩原匡貴・和田 誠・Moore, G.W.K. (2002): ノルウェー海上のポーラーローの航空機観測. 南極資料, **46** (1A), 243-260.
- 原圭一郎・岩坂泰信・猪股弥生・長田和雄・松永捷司・山形 定・長谷正博・中田 滉 (2002): 北極

- 圏航空機観測 (AAMP98) における大気エアロゾル粒子の直接採集. 南極資料, **46(1A)**, 230-242.
- 猪股弥生・松永捷司・長田和雄・渡辺征春・岩坂泰信 (2002): 北半球中・高緯度における硫化カルボニル (COS) の濃度の緯度分布. 南極資料, **46 (1A)**, 155-166.
- 加藤昭英 (1986): 航空計器 (3). 航空技術, **371**, 33-39.
- 町田敏暢・S. Maksyutov・菅原 敏・森本真司 (2002): 北極域対流圏及び下部成層圏における二酸化炭素濃度の航空機観測. 南極資料, **46 (1A)**, 125-138.
- 森本真司 (2002): 北極圏航空機観測 (AAMP 98) におけるオゾン濃度連続観測. 南極資料, **46 (1A)**, 139-146.
- Morimoto, S., Aoki, S. and Yamanouchi, T. (2001): Temporal variations of atmospheric CO₂ concentration and carbon isotope ratio in Ny-Ålesund, Svalbard. Mem. Natl Inst. Polar Res. Spec. Issue, **54**, 71-79.
- Shaw, G.E. (1995): The Arctic haze phenomenon. Bull. Am. Meteorol. Soc., **76**, 2403-2413.
- Shiobara, M., Fujii, Y., Morimoto, S., Asuma, Y., Yamagata, S., Sugawara, S., Inomata, Y., Watanabe, M. and Machida, T. (1999): An overview and preliminary results from the Arctic Airborne Measurement Program 1998 campaign. Polar Meteorol. Glaciol., **13**, 99-110.
- 塩原匡貴・柴田 隆 (2002): AAMP 98 観測期間中のニーオルスンでのマイクロパルス・ライダー観測. 南極資料, **46 (1A)**, 269-279.
- 菅原 敏・森本真司・青木周司・中澤高清 (2002): AAMP 98 における温室効果気体の航空機観測. 南極資料, **46 (1A)**, 147-154.
- Wada, M., Konishi, H. and Yamanouchi, T. (1996): Variation of monthly precipitation and frequency of radar echo existence at some altitudes in Ny-Ålesund, Svalbard, Arctic. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **51**, 239-246.
- 渡辺征春・岩坂泰信・長谷正博・中田 滉・山形 定・猪股弥生・酒井 哲 (2002): 航空機搭載光散乱式粒子計測器によるエアロゾル粒子数混合比の観測. 南極資料, **46 (1A)**, 177-229.
- Wessel, S., Aoki, S., Weller, R., Winker, P., Herber, A., Gernandt, H. and Schrems, O. (1998): Tropospheric ozone depletion in polar regions. A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. Tellus, **50B**, 34-50.
- 山形 定・庄司和弘・村尾直人・太田幸雄 (2002): AAMP 98 で行われた航空機によるエアロゾル中イオン成分測定. 南極資料, **46 (1A)**, 167-176.
- Yamanouchi, T. and Herber, A. (2001): Climate impact of the Arctic aerosols based on ASTAR 2000 (Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation) field campaign. Ext. Abst. 2nd Wadati Conference on Global Change and the Polar Climate, March 7-9, 2001, Tsukuba, Japan, 106-109.
- Yamanouchi, T., Aoki, S., Morimoto, S. and Wada, M. (1996): Report on atmospheric science observations at Ny-Ålesund, Svalbard. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **51**, 153-163.
- Yamanouchi, T., Herber, A., Shiobara, M., Yamagata, S., Hara, K., Sato, K., Treffeisen, R., Yabuki, M., Schumacher, R. and Schrems, O. (2002): Arctic Study of Tropospheric Aerosol and Radiation (ASTAR 2000) campaign: An overview and first results. submitted to Bull. Am. Meteorol. Soc.

(2001年12月26日受付; 2002年1月21日受理)

APPENDIX

表A1 航空機搭載機器

Table A1. The AAMP 98 instrumentation.

装置名	大気サンプリング装置	担当	宮教大、東北大、極地研
概要	機外の大気を吸引し、試料フラスコに加圧充填する。大気試料は国内に持ち帰り、CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、CO濃度、及びCO ₂ の炭素・酸素同位体比、CH ₄ の炭素同位体比を測定する。加圧ポンプ、バッファボリューム、ステンレスフラスコ、ステンレス配管で構成される。		
仕様	サンプリング容器数:56本 サンプリング容器ボリューム:1L 加圧:約7気圧 除湿:過塩素酸マグネシウム		
装置名	オゾン濃度連続測定装置	担当	極地研、東北大、宮教大
概要	機外の大気を吸引し、オゾン濃度を連続測定する。オゾンモニター、試料大気加圧部、データ収録装置より構成される。		
仕様	オゾンモニター:ダイレック製 model 1100 測定精度:±1 ppbv以内 測定範囲:0-1000 ppbv サンプル流量:1.5 L/min 応答時間:12秒 その他の特徴:セル内温度・圧力を独立して測定し、キャビン内圧力の変動を補正する。		
装置名	CO ₂ 濃度連続測定装置	担当	環境研、極地研、東北大、宮教大
概要	機外の大気を吸引し、二酸化炭素濃度を連続測定する。非分散赤外分析計(NDIR)、流路切替装置、及び圧力制御装置で構成される。		
仕様	NDIR:LI-COR社製、LI-6262 測定精度:±0.1 ppmv以内(1秒平均) 測定範囲:分析計のリニアリティが良いので、基本的に大気中濃度の全範囲を測定できる。但し、±0.1 ppmv以内を保証できるのは、搭載する標準ガスの範囲である、350-380ppmvの範囲内。 サンプル流量:0.3 L/min。(高度0-12km) 分析計の応答時間:6 sec.(98%応答) その他の特徴:圧力制御装置を装備しているので、キャビン圧変化に対して分析計の出力が影響を受けない構造になっている。		
装置名	ガス・エアロゾルサンプリング装置	担当	北大・工
概要	フィルターホルダー、マスフローメータ、真空ポンプで構成され、硫酸塩エアロゾル、亜硫酸ガス等をサンプリングする。		
仕様	サンプリング流量:10 L/min(海拔6000m), 30 L/min(海拔0m) サンプラーセット数:2(機内でサンプラーを即時交換可能) 消費電力:AC100V, 610VA(ポンプ+マスフローメータ) サンプラー切替:手動		
装置名	エアロゾル計数装置(OPC)	担当	北大・工
概要	外気を機内に導入し、ディフューザーを介してエアロゾルの粒径別個数を計数する。データはコンピュータに保存する。		
仕様	測定範囲:0.3~5.0 μm(5チャンネル) 流量:2.8L/min		

装置名	PANサンプリングシステム	担当	北大・工
概要	捕集管、低温恒温槽、マスフローメータ、ポンプで構成され、PANをサンプリングする。		
仕様	サンプリング流量: 1L/min 捕集管セット数: 6 消費電力: AC100V, 38VA (ポンプ分のみ) サンプラー切替: 手動		
装置名	エアロゾル採取計測装置	担当	名大・STE研
概要	アンダーセンサンプラー、インパクター、パーティクルカウンタで構成され、エアロゾルの粒径分布測定と化学成分分析を行う。 目的とするエアロゾルの種類やサイズによって異なるインパクターを用意。パーティクルカウンタは気球搭載用のものを航空機搭載用に改良する。		
仕様	アンダーセンサンプラー: 化学分析用多段エアロゾルサンプラー インパクター: エアロゾル粒子の形態観察 パーティクルカウンタ: 0.3 μ m以上の粒子計数		
装置名	COS採取用エアサンプラー	担当	名大・STE研
概要	外気を機内に導入し、1Lシリンダーに加圧サンプリングする。採取したエアは観測終了後、ガスクロマトグラフ法により分析し、COS(硫化カルボニル)濃度の鉛直分布、水平分布を得る。		
仕様	大気サンプリング装置の配管、加圧ポンプを共用する。		
装置名	エアロゾル散乱プローブ PMS FSSP-300	担当	極地研、北大・理
概要	翼端に固定し、大気中に浮遊する微小粒子(エアロゾル)のサイズ分布をレーザー光の散乱を利用して測定する。		
仕様	測定範囲: 0.3~20 μ m(直径)		
装置名	雲粒子散乱プローブ PMS FSSP-100	担当	北大・理
概要	翼端に固定し、大気中に浮遊する微小粒子(雲粒)のサイズ分布をレーザー光の散乱を利用して測定する。		
仕様	測定範囲: 2~50 μ m(直径)		
装置名	雲粒子2次元プローブ PMS OAP-2D-GA2	担当	北大・理
概要	翼端に固定し、大気中に浮遊する微小粒子(雲粒、氷晶)の個々のサイズと形をアレーセンサーにより測定する。		
仕様	測定範囲: 10~640 μ m(直径)		
装置名	降水粒子2次元プローブ PMS OAP-2D-GB2	担当	北大・理
概要	翼端に固定し、大気中に浮遊する氷晶粒子や降水粒子の個々のサイズと形をアレーセンサーにより測定する。		
仕様	測定範囲: 50~3200 μ m(直径)		
装置名	温度計 Weed A9816	担当	DAS、極地研
概要	飛行中の大気全温度(TAT)を測定するための温度計		
仕様	測定範囲: -70~+350°C 測定精度: $\pm 0.5^\circ\text{C}$		

装置名	湿度計 EG&G 137-C3	担当	DAS、極地研
概要	水蒸気量を得るための光学式露点湿度計		
仕様	reverse flow型 測定範囲: -65°C ~ +25°C (露点温度) 測定精度: ±0.5°C		
装置名	GPS航法装置 Trimble 2100T	担当	DAS
概要	全地球測位システム(GPS)を用いた航法装置		
仕様	位置精度: ±15 m(水平), ±35 m(高度) 位置更新: 毎秒		
装置名	IRS装置 Honeywell HG1050AD	担当	DAS
概要	飛行姿勢、飛行加速度等を計測し、飛行速度、飛行状態等の情報を出力する。		
仕様	入出力規格: AIRINC429		
装置名	ビデオカメラ録画装置	担当	DAS
概要	前方監視用および下方監視用の2台のビデオカメラにより飛行中の観測状況をモニターし、VHS方式VTRに記録する。		
仕様	カメラ部: エルモCCDカラーカメラ MN421, 1/2 IT-CCD, 768x494		

表A2 AAMP 98 観測時の飛行情報。「区間」の地点記号は図A6中のそれに対応
Table A2. Flight information of the AAMP 98 flight tracks.

Flight No.1

Nagoya – Petropavlovsk-Kamchatski

飛行時間 (UTC) : 23:35(3/5)~03:15(3/6)

区間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Nagoya~A	A点 00: 25	↗ 370	-52		427	459	Wind 258/47
A~B	B点 00: 34	370	-57		430	452	Wind 252/32
B~C	C点 00: 51	370					
C~D	D点 01: 07	370	-61		430	466	Wind 222/38
D~E	E点	370	-60		432	468	Wind 230/38
E~F	F点 01: 34	397	-57		438	469	Wind 258/41
F~Petropavlovsk		↘ 397	-55		433	471	

Flight No.2

Petropavlovsk-Kamchatski – Anchorage

飛行時間 (UTC) : 04:30(3/6)~08:50(3/6)

区間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Petropavlovsk~A	A点	↗ 364					
A~B	B点 04: 50	364	-50		423	441	
B~C	C点 05: 07	364	-48		426	444	
C~D	D点 05: 24	364	-49		434	449	
D~E	E点 06: 27	364	-57		428	421	
E~F	F点 07: 36	370	-56		436	424	
F~G	G点	370	-60		429	431	
G~Anchorage		↘					

Flight No.3

Anchorage – Barrow

飛行時間 : 23:35(3/6)~03:05(3/7)

区間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Anchorage~A	A点 01: 19	↗	-60		433	424	
A~B	B点 01: 35	390	-60		433	424	
B~C	C点 02: 08	220	-40		357	350	雲の中TAS 280KTまで減速
C~D	D点 02: 42	110	-17		241	235	
D~Barrow	03: 00	↘					

Flight No.4

Barrow – North Pole – Longyearbyen

飛行時間 : 05:00(3/7)~09:50(3/7)

区間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Barrow~A	A点 05: 44	↗ 390					
A~B	B点 06: 28	390	-70	-47	426	388	
B~C	C点 07: 14	390	-67	-45	429	401	
C~D	D点 07: 59	390	-65	-43	427	409	
D~E	E点 09: 06	390	-65	-41	448	432	
E~Longyearbyen	09: 45	↘ 390	-62	-38	449	437	

Flight No.5

West of Ny-Ålesund for vertical sounding

飛行時間 : 10:35(3/8)~13:45(3/8)

高度(×100ft)	TIME (UTC)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	IAS(KT)	備 考
390	11: 06	-62	-40			
380	11: 08	-62	-40			
370	11: 10	-62	-40			
360	11: 12	-62	-39			
350	11: 14	-63	-42			
340	11: 16	-63	-43			
330	11: 18	-64	-45			
320	11: 20	-65	-46			
310	11: 22	-65	-48			
300	11: 24	-64.5	-48			
290	11: 26	-63	-48	320	210	
280	11: 28	-62	-46			
270	11: 29	-61	-46			
260	11: 31	-60	-46			
250	11: 33	-58	-45	309		
240	11: 35	-56	-42			
230	11: 37	-55	-41			
220	11: 39	-53	-40			
210	11: 41	-50	-38			
200	11: 43	-48	-37			
190	11: 45	-46	-35			
180	11: 47	-44	-34			
170	11: 49	-42	-33			
160	11: 51	-40	-31			
150	11: 53	-39	-30	304		
140	11: 55	-37	-27			
130	11: 57	-36	-27			
120	11: 59	-35	-26			
110	12: 01	-34	-25			タービランス
100	12: 03	-32	-24			タービランス
090	12: 05	-30	-22			
080	12: 07	-28	-20			
070	12: 09	-25	-17			
060	12: 11	-23	-15			
050	12: 13	-23	-15			
040	12: 14	-21	-15			cloud top 3,800feet
030	12: 16	-23	-16			
020	12: 18	-21.5	-15			
010	12: 20	-19	-13			cloud base 1,300feet
005	12: 22	-18	-11			

Flight No.6

South of Svalbard for polar low sounding

飛行時間 : 9:55(3/9)~13:40(3/9)

区 間	TIME (UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	IAS(KT)	GS(KT)	備考
Longyearbyen~A	A点 10: 53	↗ 390	-61	-38	420		398	
A~C	C点 11: 11	300	-64	-46	350		339	73N,012.4Eから30,000ftまで降下
C~B	B点 11: 21	165	-40	-27	261	210	242	
B~C	C点 11: 31	130	-31	-22	245	205	248	
C~B	B点 11: 43	100	-25	-16	222	200	207	
B~C	C点 11: 55	075	-18	-10	223	205	221	航空機着氷
C~B	B点 12: 07	050	-13	-05	218	208	218	航空機着氷・タービランス
B~C	C点 12: 15	025	-08	-01	235	230	222	タービランス
C~B	B点 12: 25	015	-07	0	233	265	237	タービランス
B~Longyearbyen	13: 35	↗ 370 ↘						

Flight No.7

West of Ny-Ålesund for vertical sounding

飛行時間 : 10:10(3/10)~11:55(3/10)

高度(×100ft)	TIME (UTC)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	IAS(KT)	備 考
430	10: 37	-67	-43			0.78M
420		-67	-42			
410		-66	-42			
400		-67	-43			
390		-67.8	-42			
380		-69	-42			0.75M
370		-69	-44			
360		-68	-46			
350		-71	-48			cloud top
340		-72	-50			
330		-70.5	-52			
320		-72	-54			
310		-70	-55			
300		-69	-54			
290		-67	-53			
280		-64	-51			
270		-62	-50			
260		-60	-48			
250		-57	-46			
240		-55	-44	286	210	
230	10: 57	-53	-41			
220		-50	-40			
210		-48	-37			
200		-45	-35			
190		-43	-34			
180		-41	-32			
170		-40	-31			
160		-38	-29			
150		-36	-27			
140		-34	-25			
130		-32	-23			
120		-30	-22			
110	11: 09	-28	-20			
100		-27	-19			
090		-26	-18			
080		-25	-17			
070		-24	-17			
060		-24	-17			
050		-23	-16			
040		-23	-16			
030		-23	-16			
020		-24	-17			cloud top 2,600
010		-25	-17			
005		-24				

Flight No.8

Longyearbyen - North Pole - Barrow

飛行時間 : 14:55(3/12)~19:45(3/12)

	TIME (UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	IAS(KT)	GS(KT)	備考
Longyearbyen~E	E点 15: 38	390	-74	-50	419		409	
E~D	D点 16: 48	390	-75	-52	420		418	
D~C	C点 17: 31	390	-62	-40	425		416	
C~B	B点 18: 15	390	-60	-37	430		423	
B~A	A点 18: 59	390	-62	-39	429		413	
A~Barrow	19: 45	390	-63	-40	426		393	

Flight No.9

Barrow - Anchorage

飛行時間 : 20:55(3/12)~23:45(3/12)

高度(×100ft)	TIME (UTC)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	IAS(KT)	備考
070	21: 08	-07	-02		225	1,000ft/min
080		-09	-01			
090		-11	-02			
100		-14	-03			
110		-16.0	-04			
120		-17	-05			
130		-19	-08			
140	21: 15	-21	-10			
150		-22	-10			
160		-24	-12			500ft/min
170		-25.0	-13			
180		-28	-15			
190		-30	-16			
200	21: 25	-32	-18			
210		-35	-20			1,000ft/min
220		-36	-21			
230		-38	-23			
240		-41	-25			
250	21: 30	-44	-27	326	225	
260		-46	-30			
270		-49	-31			
280		-51	-33			
290		-53	-34			
300	21: 35	-56	-36	352	225	
310		-58	-38			
320		-59	-39			
330		-60	-40			
340		-62	-40			
350	21: 40	-62	-42	360	210	圏界面
360		-61	-41			
370		-60	-40			
380		-59	-39			
390	21: 44	-56	-36			

Flight No.10

Anchorage – Petropavlovsk-Kamchatski

飛行時間 (UTC) : 23:35(3/13)~04:00(3/14)

区 間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Anchorage~A	A点 00: 05	↗ 350					
A~B	B点 00: 32	350	-61	-36	427	444	Wind 027/42
B~C	C点 00: 40	350	-62	-38	422	459	Wind 048/49
C~D	D点 01: 31	350	-59	-35	423	450	Wind 037/37
D~E	E点 01: 43	348	-60	-36	424	464	Wind 120/52
E~F	F点 02: 51	348	-56	-33	419	440	
F~G	G点 02: 51	348	-54	-32	427	430	
G~H	H点 03: 10	348	-57	-33	429	403	
H~Petropavlovsk		↘	-65	-40	428	373	

Flight No.11

Petropavlovsk-Kamchatski – Nagoya

飛行時間 (UTC) : 05:25(3/14)~09:35(3/14)

区 間	TIME(UTC)	高度(×100ft)	SAT(°C)	TAT(°C)	TAS(KT)	GS(KT)	備考
Petropavlovsk~A	A点 05: 47	↗ 380					
A~B	B点	380	-63	-38	415	373	
B~C	C点 06: 37	390	-52	-26	442	410	
C~D	D点 07: 05	390	-51	-04	443	404	
D~E	E点	390	-47	-04	447	396	
E~F	F点 07: 36	390	-48		455	396	
F~G	G点 07: 55	390	-47	-20	455	400	
G~H	H点 08: 05	390	-50	-22	456	408	
H~Nagoya							

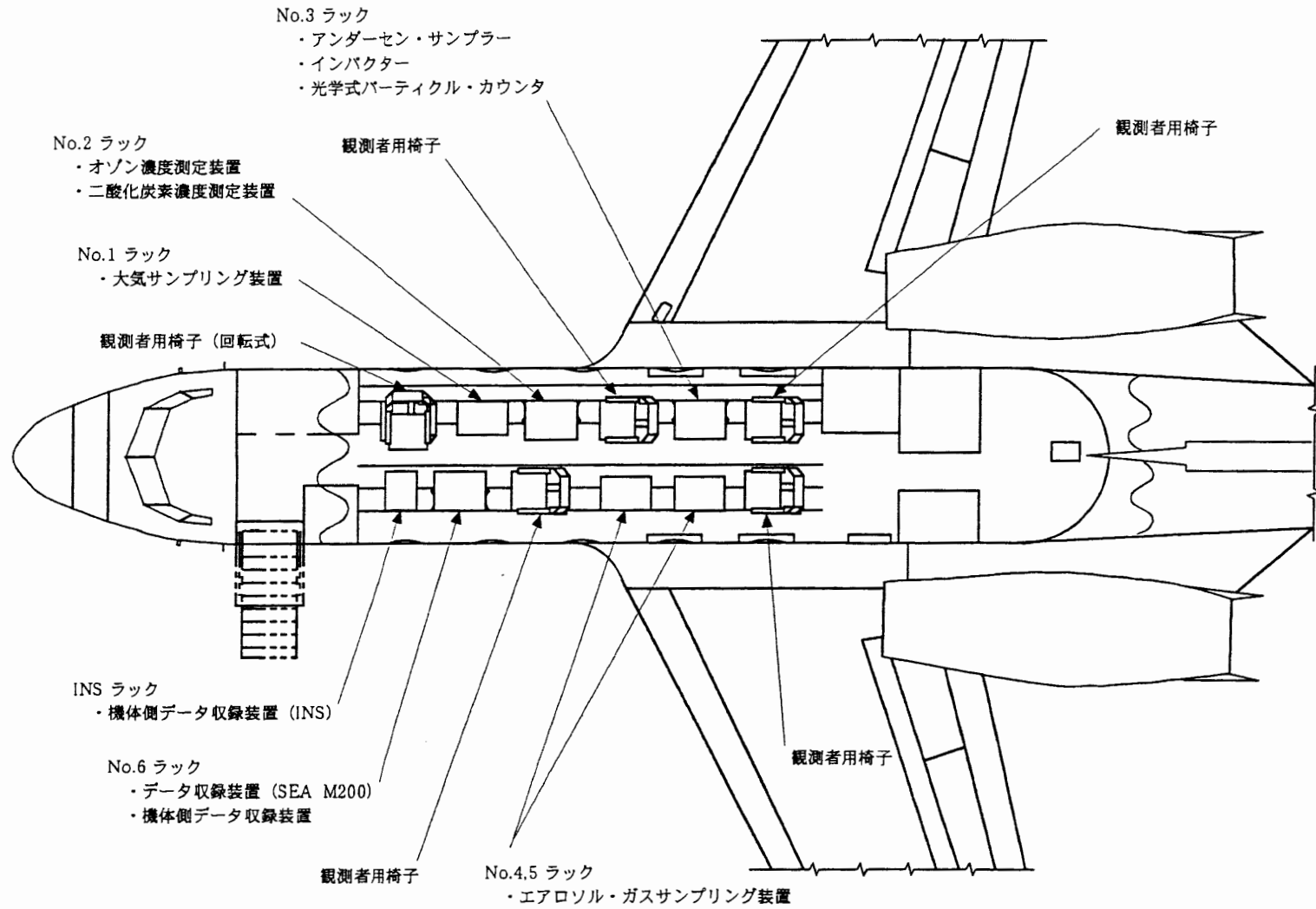


図 A2 観測機器の機内配置と座席位置

Fig. A2. Instrumentation and seat arrangement in the G-II cabin.

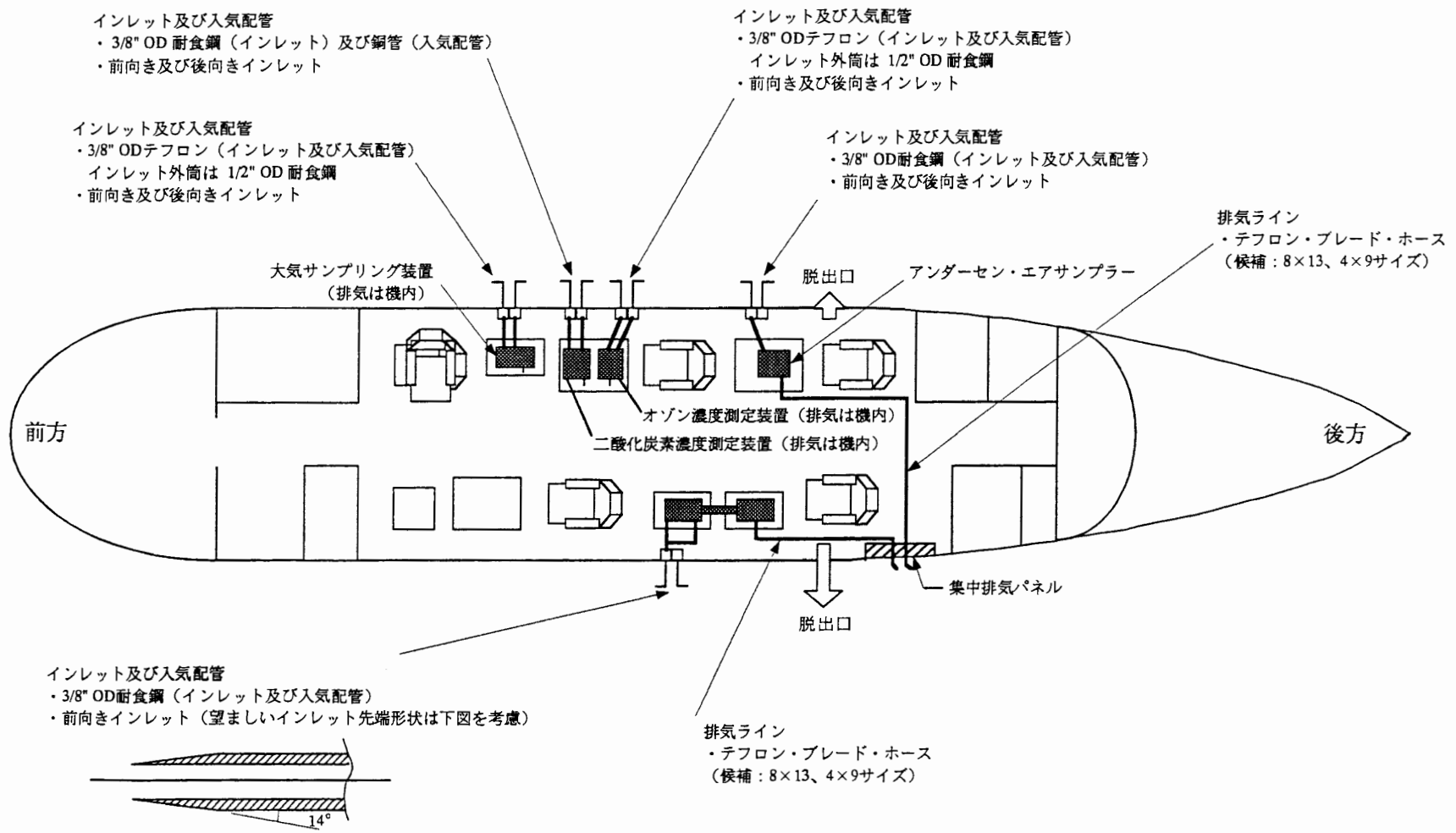


図 A3 エアサンプリングの配管系統図
 Fig. A3. Design of air sampling and tubing.

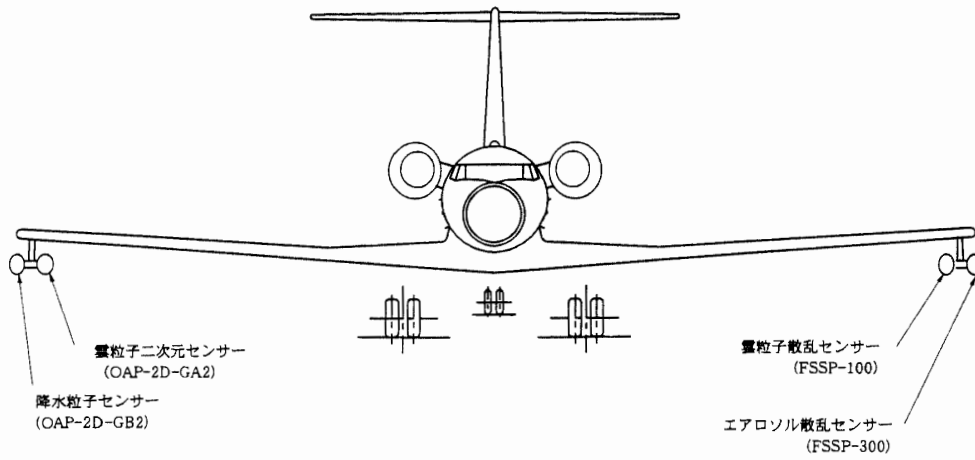


図 A4 雲粒子センサー等 (PMS プロブ) の取付位置

Fig. A4. Installation positions of the PMS probes.

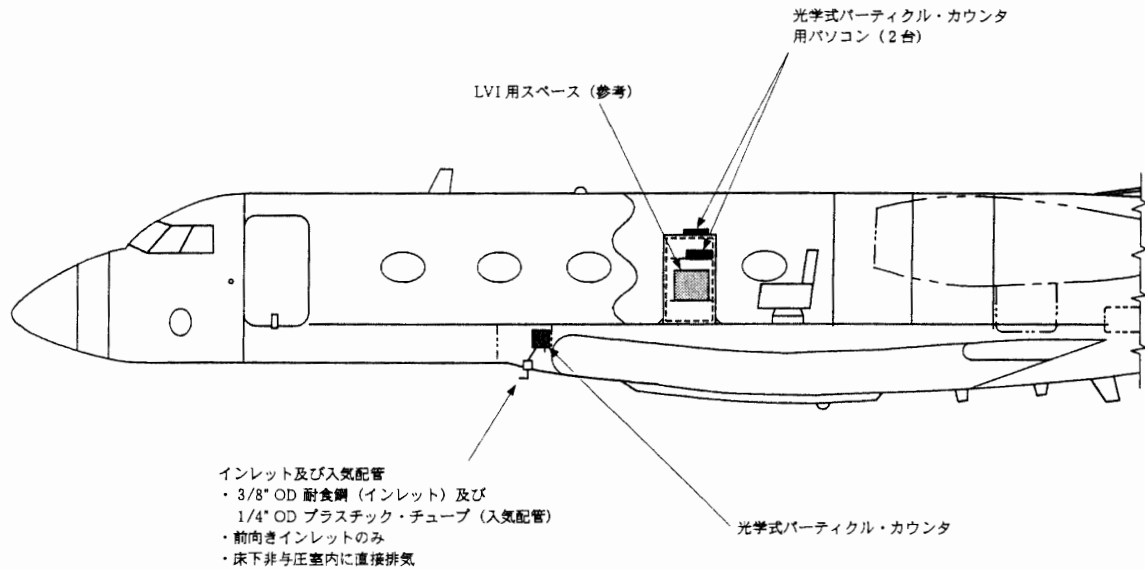


図 A5 光学式エアロゾルカウンタ (OPC) の搭載位置

Fig. A5. Installation position of the STEL optical particle counter.

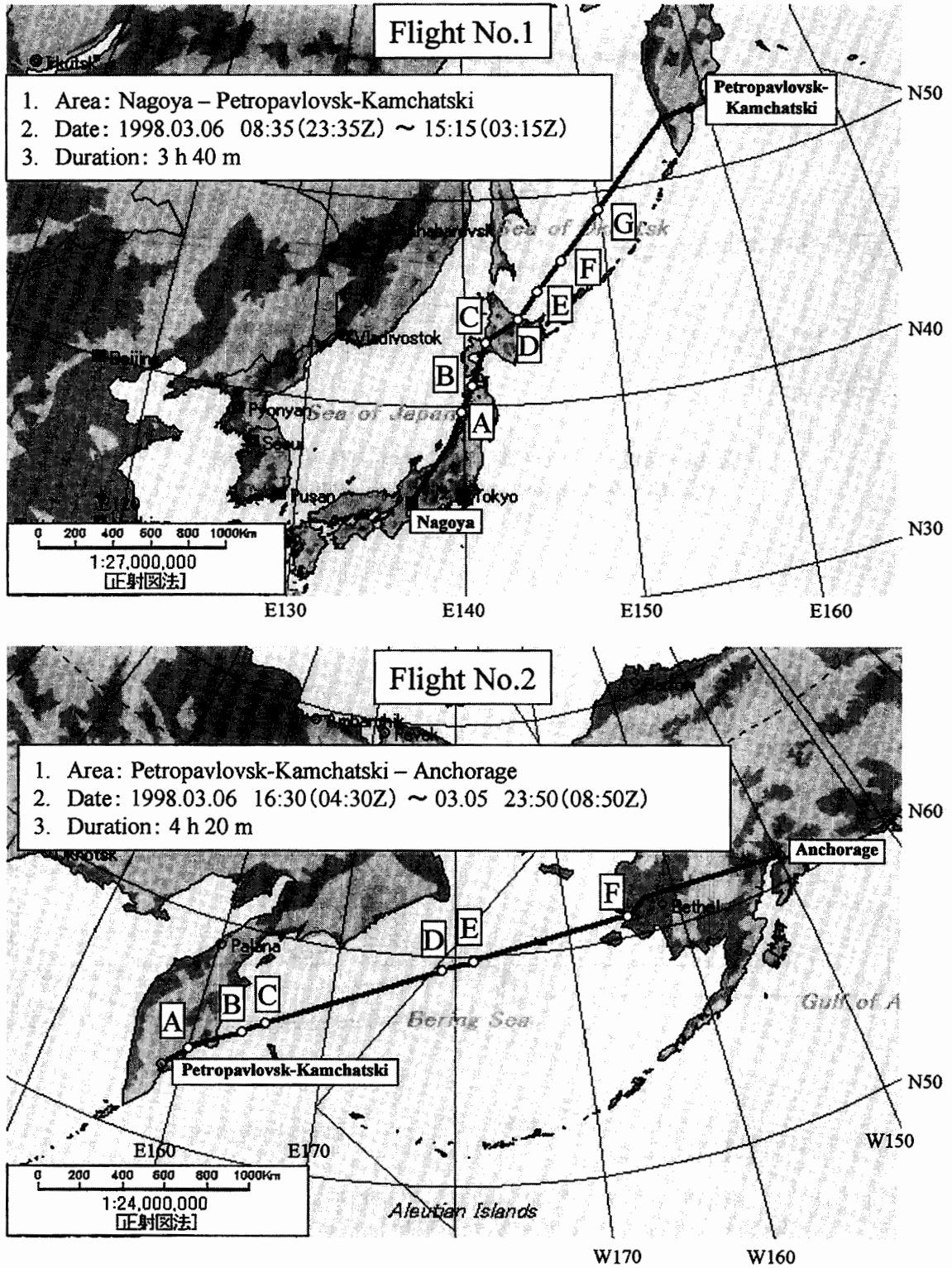


図 A6-1

図 A6 AAMP 98 の飛行経路と飛行形態
 Fig. A6. Flight paths and patterns for the AAMP 98 mission.

Flight No.3

1. Area: Anchorage – Barrow
2. Date: 1998.03.06 14:35(23:35Z) ~ 18:05(03:05Z)
3. Duration: 3 h 30m
4. Position: A (first point at 39,000 ft height)
 - B (72° 47'N 160° 00'W)
 - C (70° 18'N 155° 00'W)
 - D (72° 20'N 159° 00'W)

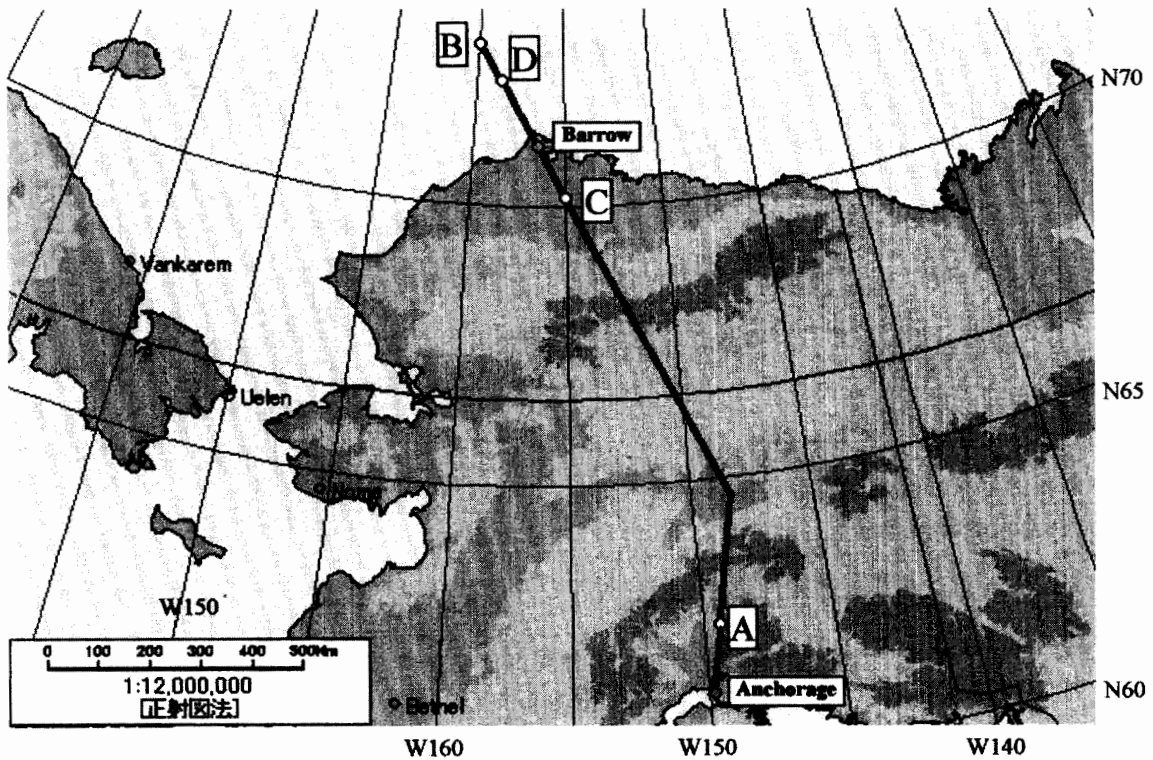
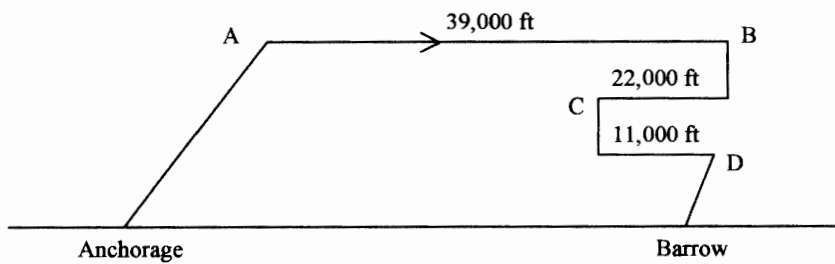


図 A6-2

Flight No.4

1. Area: Barrow – North Pole – Longyearbyen
2. Date: 1998.03.06 20:00(05:00Z) ~ 03.07 10:50(09:50Z)
3. Duration: 4 h 50 m
4. Position:

A	(75° 00'N	151° 00'W)
B	(80° 00'N	151° 00'W)
C	(85° 00'N	151° 00'W)
D	(North Pole	90° N)
E	(82° 00'N	011° 00'E)

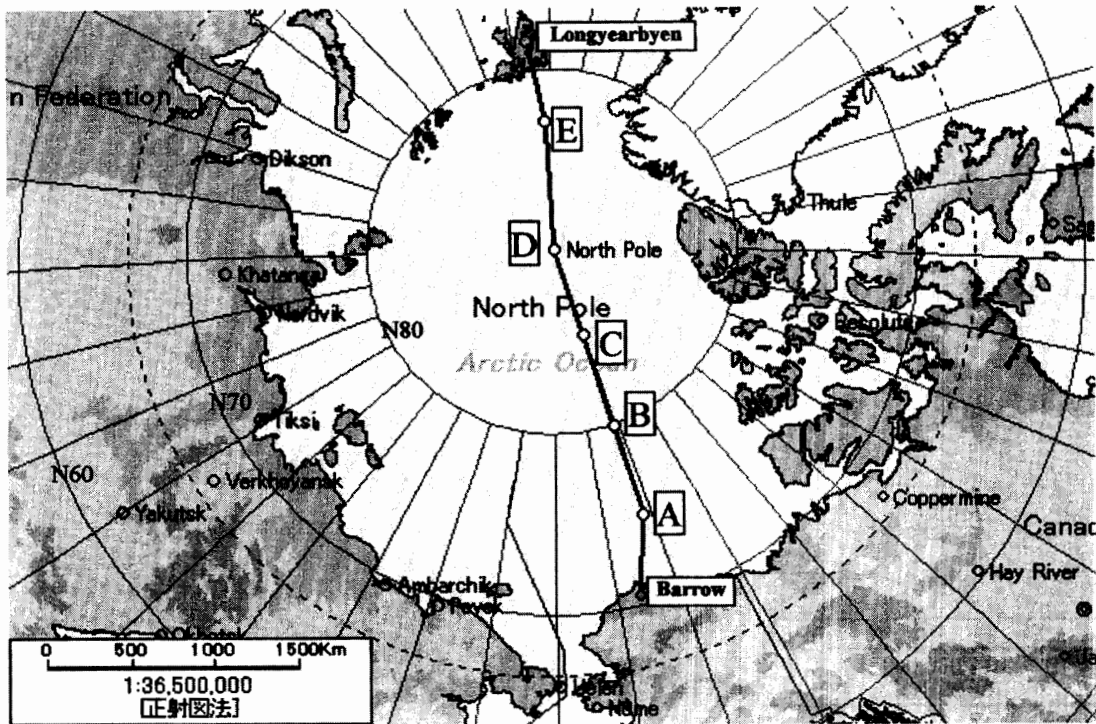
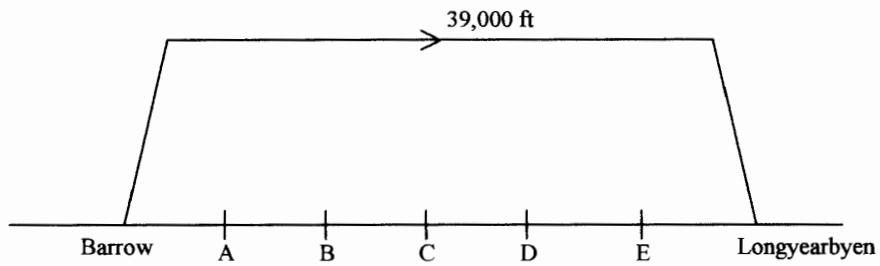


図 A6-3

Flight No.5

1. Area: Longyearbyen – Ny-Alesund – Longyearbyen
2. Date: 1998.03.08 11:35(10:35Z) ~ 14:45(13:45Z)
3. Duration: 3 h 10 m
4. Position: A (79° 00'N 009° 00'E)
 B (79° 45'N 024° 00'E)

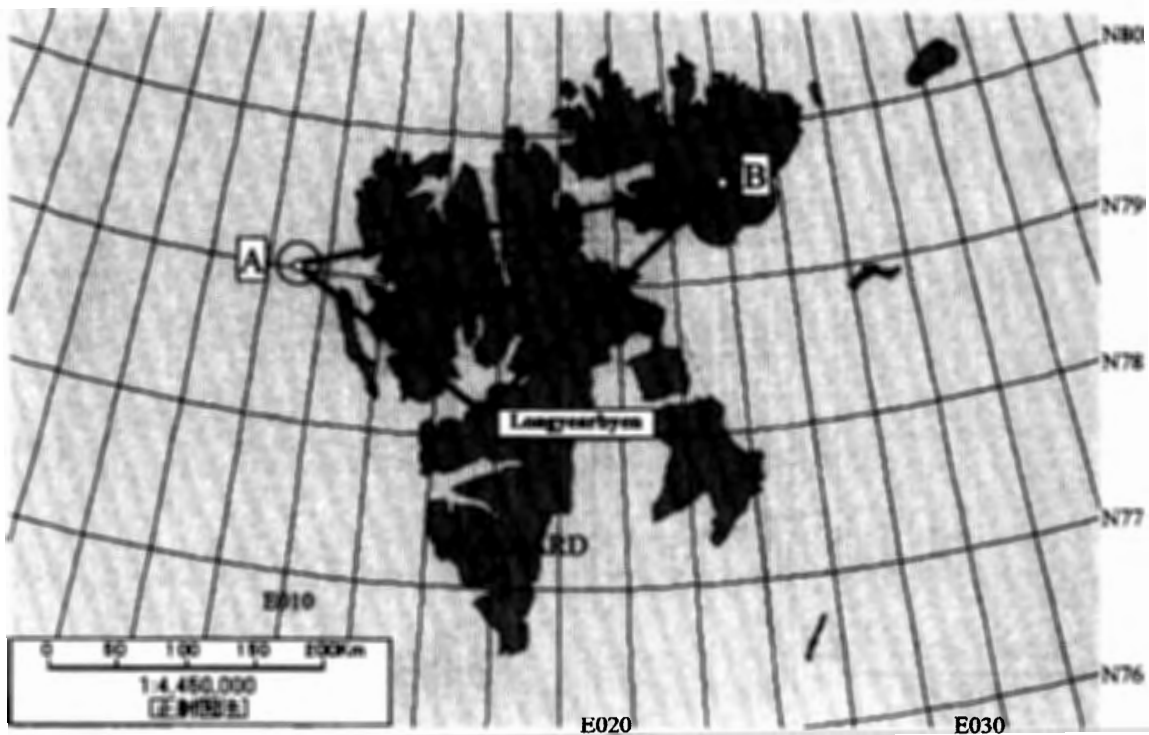
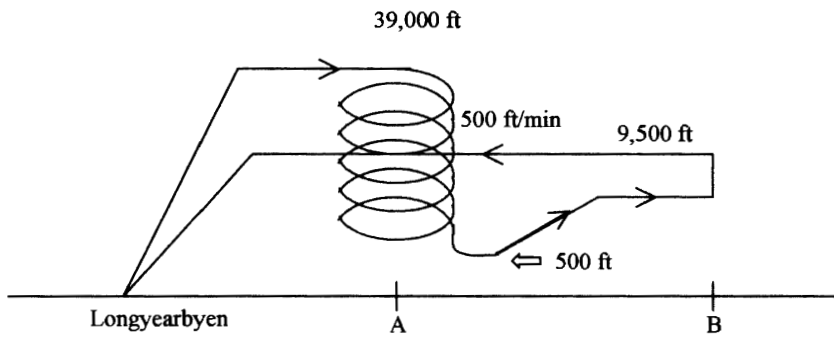


図 A6-4

Flight No.6

1. Area: Longyearbyen – Norwegian Sea - Longyearbyen
2. Date: 1998.03.09 10:55(09:55Z) ~ 14:40(13:40Z)
3. Duration: 3 h 45 m
4. Position: A (73° 00'N 014° 00'E)
 B (73° 00'N 009° 00'E)
 C (73° 00'N 007° 00'E)

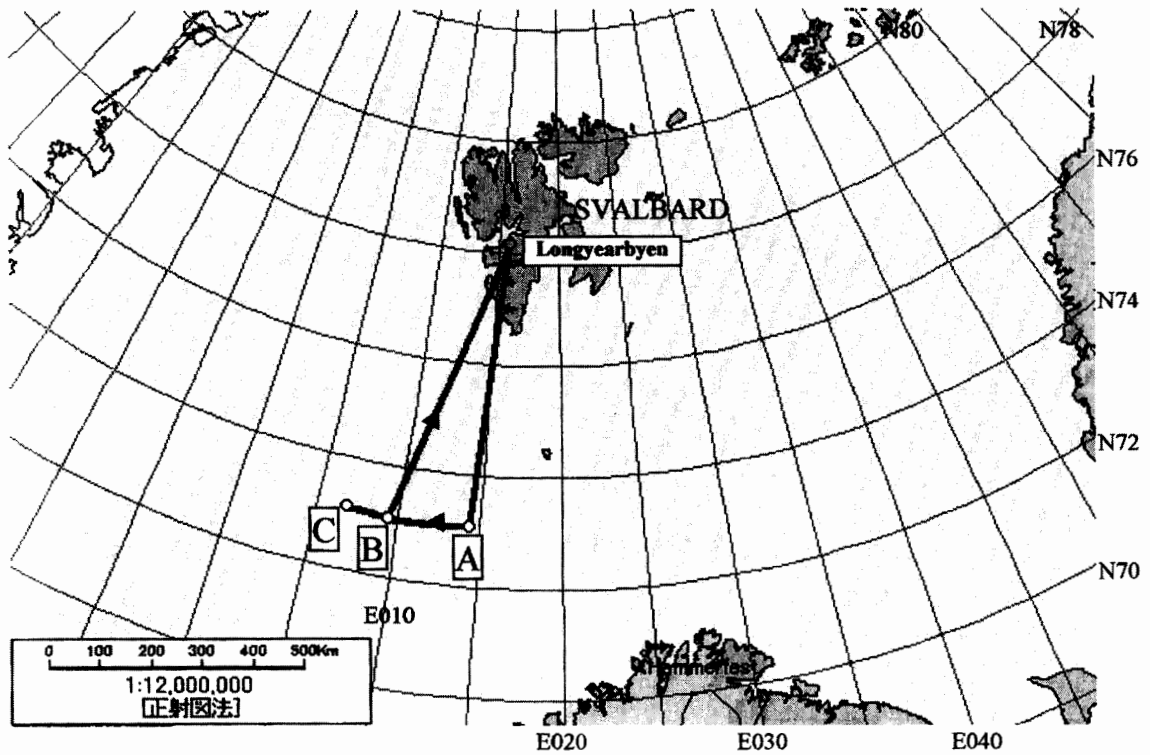
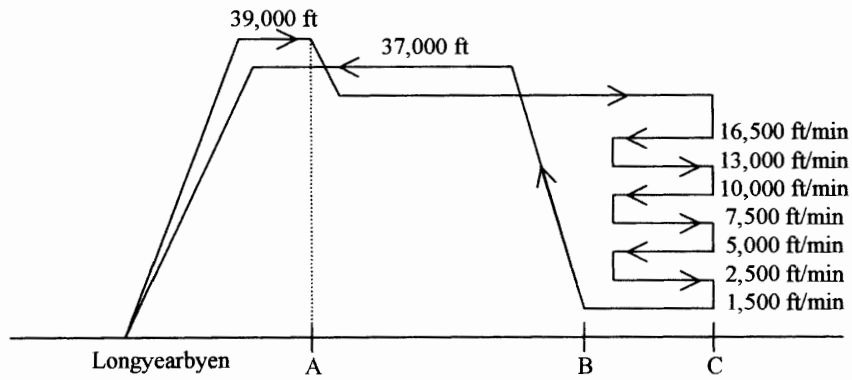


図 A6-5

Flight No.7

1. Area: Longyearbyen – Ny-Alesund – Longyearbyen
2. Date: 1998.03.10 11:10(10:10Z) ~ 12:55(11:55Z)
3. Duration: 1 h 45 m
4. Position: A (79° 30'N 009° 00'E)

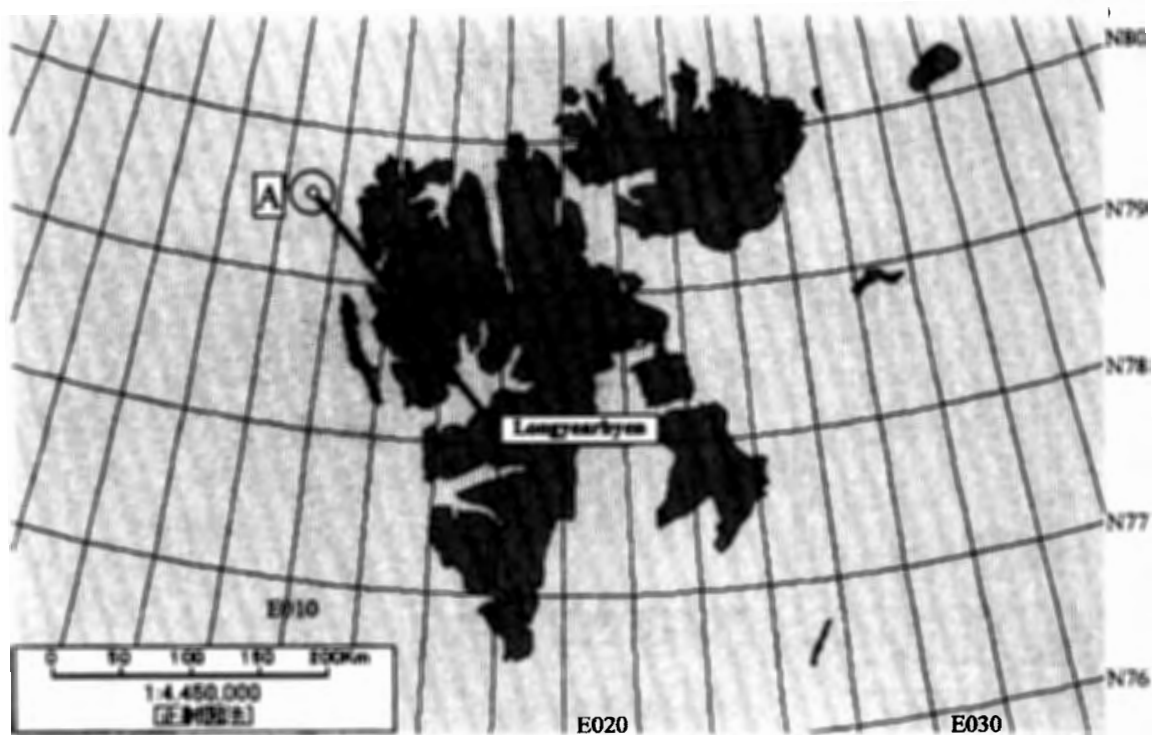
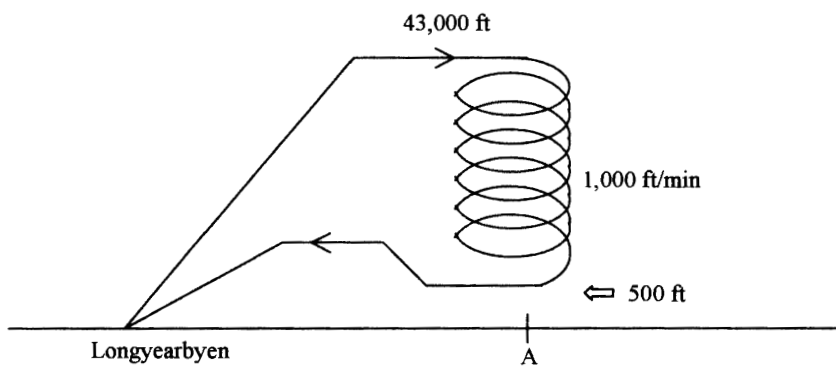


図 A6-6

Flight No.8

1. Area: Longyearbyen – North Pole – Barrow
2. Date: 1998.03.12 15:55(14:55Z) ~ 10:45(19:45Z)
3. Duration: 4 h 50 m
4. Position: A (75° 00'N 151° 00'W)
 B (80° 00'N 151° 00'W)
 C (85° 00'N 151° 00'W)
 D (North Pole 90° N)
 E (82° 00'N 011° 00'E)

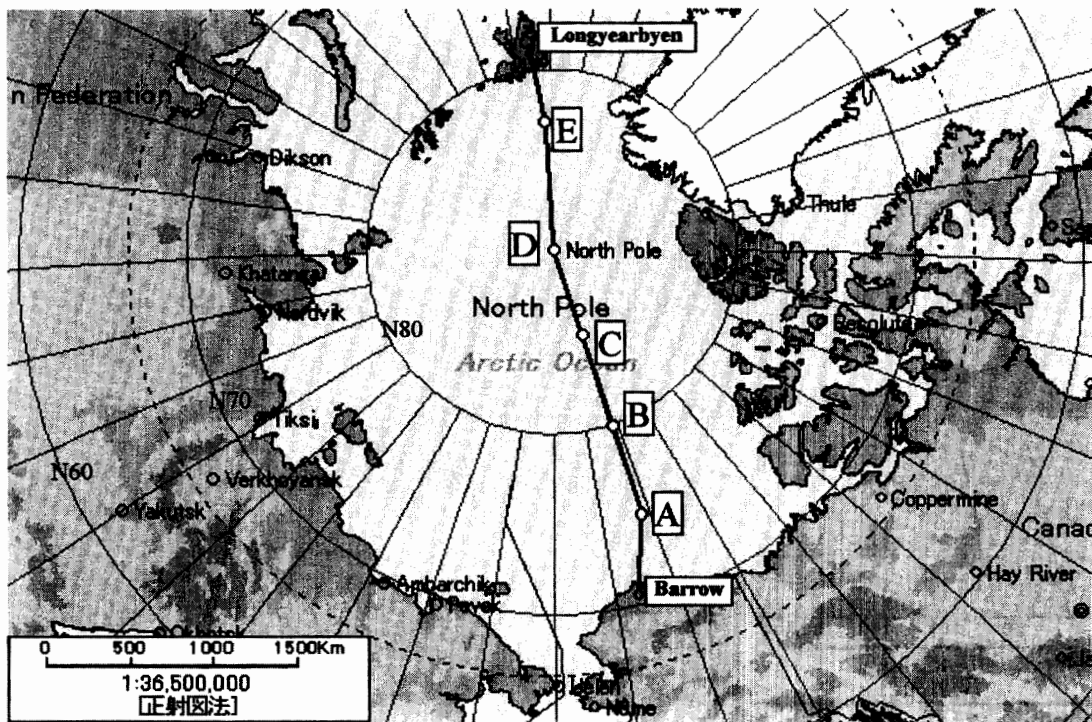
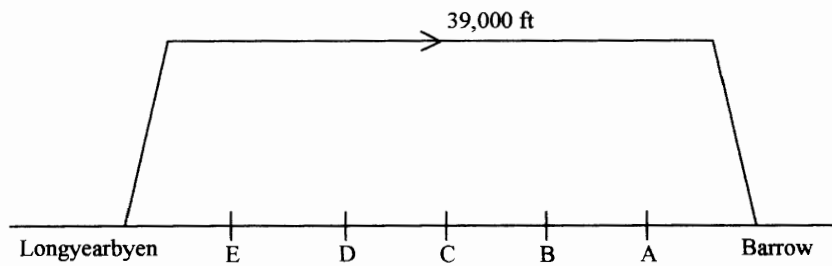


図 A6-7

Flight No.9

1. Area: Barrow – Anchorage
2. Date: 1998.03.12 11:55(20:55Z) ~ 14:45(23:45Z)
3. Duration: 2 h 50 m
4. Position: A (72° 00'N 157° 00'W)

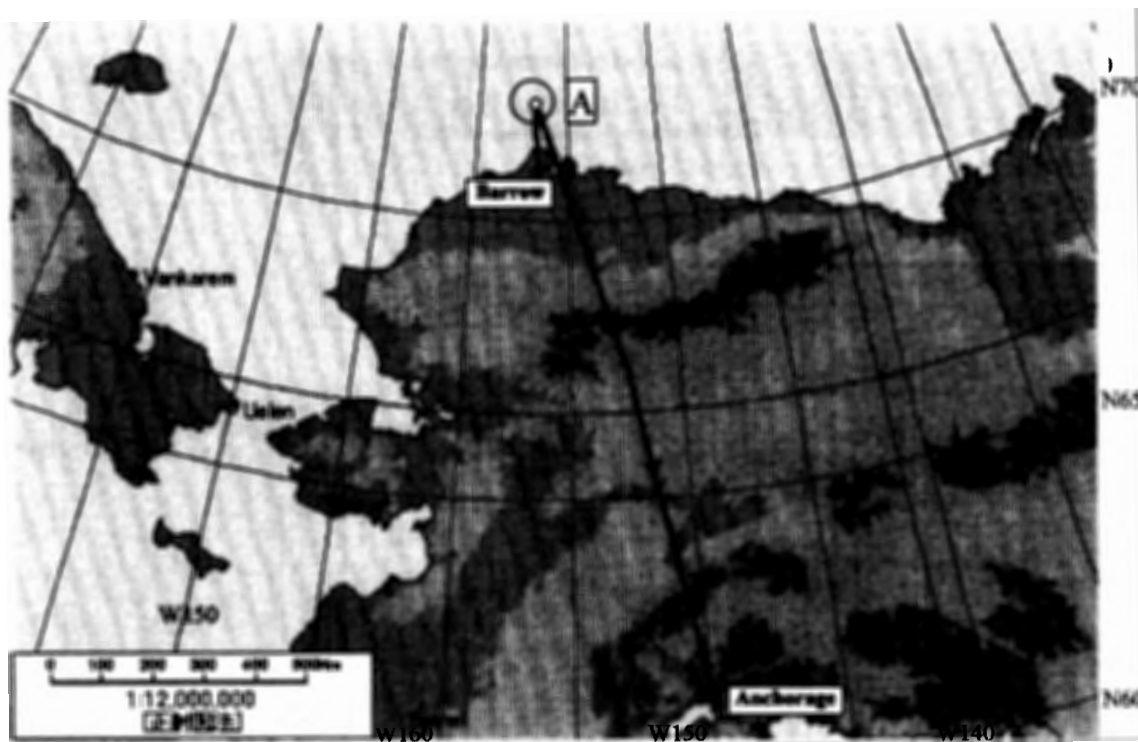
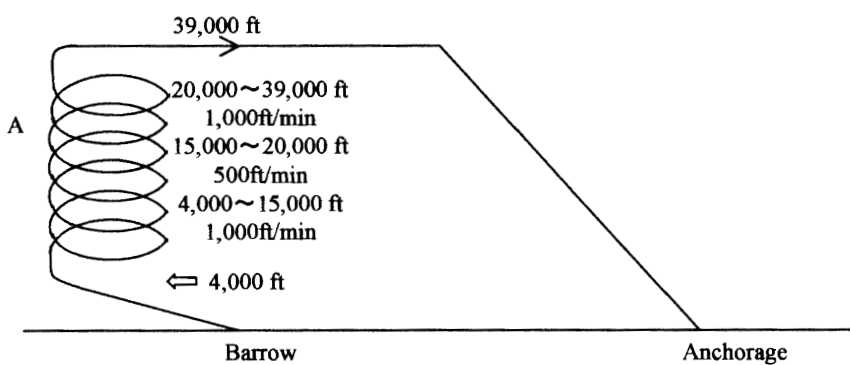


図 A6-8

