

## 2. 第 1 期 ASE 開発

### 2-1 経緯

地球規模の上空における温室効果気体の観測を本格的に気象研究所で行う発端となったのは、1988 年から 1990 年の 3 か年の計画で行われた航空機観測キャンペーン、INSTAC (InterNational Strato/Tropospheric Air Chemistry)であった。この研究観測は科学技術庁（現在の文部科学省）の科学技術振興調整費で「気候変動に係る対流圏・下部成層圏大気の化学的研究」として当時の地球化学研究部（現在の気候・環境研究部）が主導して実施された。温室効果ガスの他に、窒素酸化物、オゾン、エアロゾル、炭化水素類などの多種類の気体微量成分が測定対象となった。このキャンペーンの最初のフライトである INSTAC-I は 1989 年 3 月に実施され、日本とインドネシアの間の西部北太平洋の空域が観測対象となった (Ikegami et al., 1991; Inoue et al., 1991; Kondo et al., 1991; Sakamaki and Akimoto, 1991)。次に、1990 年 2-3 月の INSTAC-II と 1990 年の 10 月の INSTAC-III の 2 回のフライトでは、太平洋上空の北緯 65 度から南緯 65 度に及ぶ南北両半球の広域観測が実施された。航空機はガルフストリーム II を米国ペンタスターからチャーターして行われた。当時としては先進的な航空機観測であった。図 1 は、1990 年 8 月号の気象研究所ニュースに掲載された INSTAC-II の記事に示された飛行経路と航空機の図である。世界に先駆けて得られた高度 11-13km のメタン (CH<sub>4</sub>) 濃度の広域分布の結果は国際誌に論文としても発表された (Matsueda et al., 1993)。INSTAC は上空の温室効果気体の分布や変動に対する興味を大いに掻き立てるものであった (松枝, 2000)。

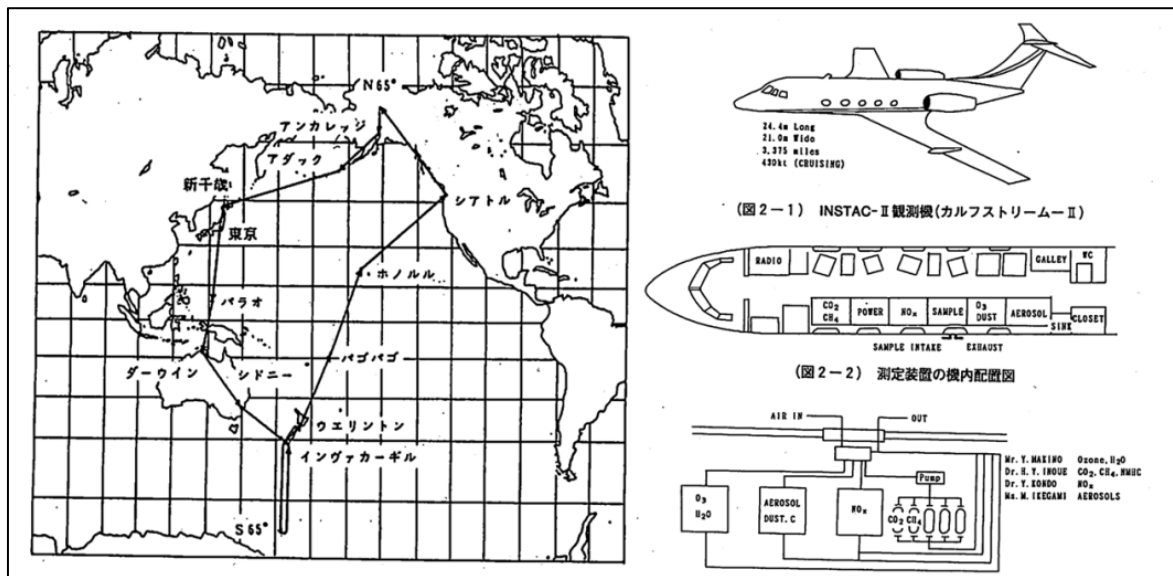


図 1 気象研究所ニュースに掲載された INSTAC-II の記事 (1990 年 8 月号)。

ポスト INSTAC となる後継の航空機観測プロジェクトを期待していた折、年の瀬も押し詰まった 1990 年 12 月 21 日に一通の事務連絡が気象研究所内に回覧され、目に留まった。それは、1990 年 4 月 1 日に設立されたばかりの日航財団（現在の公益財団法人 JAL 財団）の「アイデア募集」であった。その内容は、図 2 のような旅客機を地球環境問題に利用することを募る漠然とした素っ気ないものであった。この時は、まさか、この 1 枚の回覧文書から本格的な旅客機観測が始まるとは夢にも思わなかった。この募集に対して、気象研究

所からは、地球化学研究部の提案した温室効果気体観測の他にも、オゾン、ドロップゾンデやライダー等の航空機観測の要望が出された。提案した計画が真面目に検討されるものかどうか半信半疑であったが、1991年3月5日に羽田空港のJALのハンガーに隣接する会議室で提案を聞いてもらえることになり、JAL関係者との打合せが開かれた。打合せの後、整備中の大型旅客機を見学したハンガーは、まだ冷え冷えとしていたことを記憶している。予想通り、機体に観測専用の穴を開けて行う計画には難色を示されたが、機体に入ってくる空気を採取して温室効果気体を測定する我々の提案は実現可能かもしれないとの前向きな意見が出された。日航財団もアイデア募集をかけた成り行き上、何もしないわけにはいかない事情があったのかもしれない。ほどなくして、1991年4月16日にJAL技術研究所（現在はない）の航空機エンジニアが気象研究所を訪れて、大気採取による温室効果ガスの観測に関する技術的な見通しについて意見交換が行われた。また、5月8日には日航財団とプロジェクト化について懇談がもたれた。

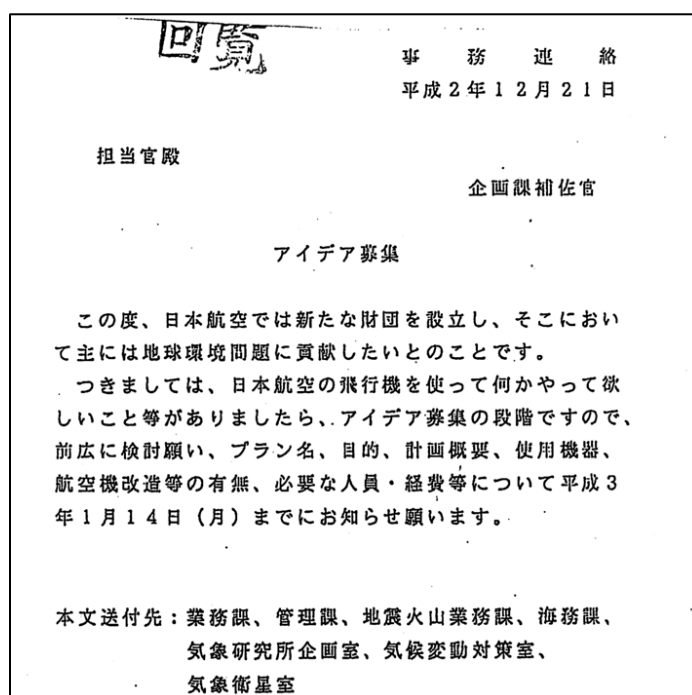


図2 1990年（平成2年）12月に回覧された事務連絡。

その後、3か月間は、気象研究所と気象庁を中心に関係機関との間で観測事業化の立案と体制や予算に関して包括的な協議と調整が行われた。そして、第1期の大気観測が1991年9月に日航財団、JAL、運輸省（現在の国土交通省）、気象庁、気象研究所の共同による「定期航空機による上層大気中の温室効果気体の観測プロジェクト」として正式に発足した。予算を含めた事業主体は日航財団で、装置の開発と観測は気象研究所とJAL技術研究所が担当し、事業の学術的評価は学識経験者から構成される「地球環境観測検討委員会」（委員長は京都大学名誉教授の山元龍三郎先生）が行うことになった。図3はプロジェクトの全体構成と、その中の第1期ASE開発の実施体制を示す。この開発は気象研究所地球化学研究部とJAL技術研究所に加えて、日本アンス社（JANS）も参画して3つのグループが共同して実施することになった。JANSは様々な観測装置を手掛けてきた高い技術力を持つことから、主にASEの設計・製作を担当した。

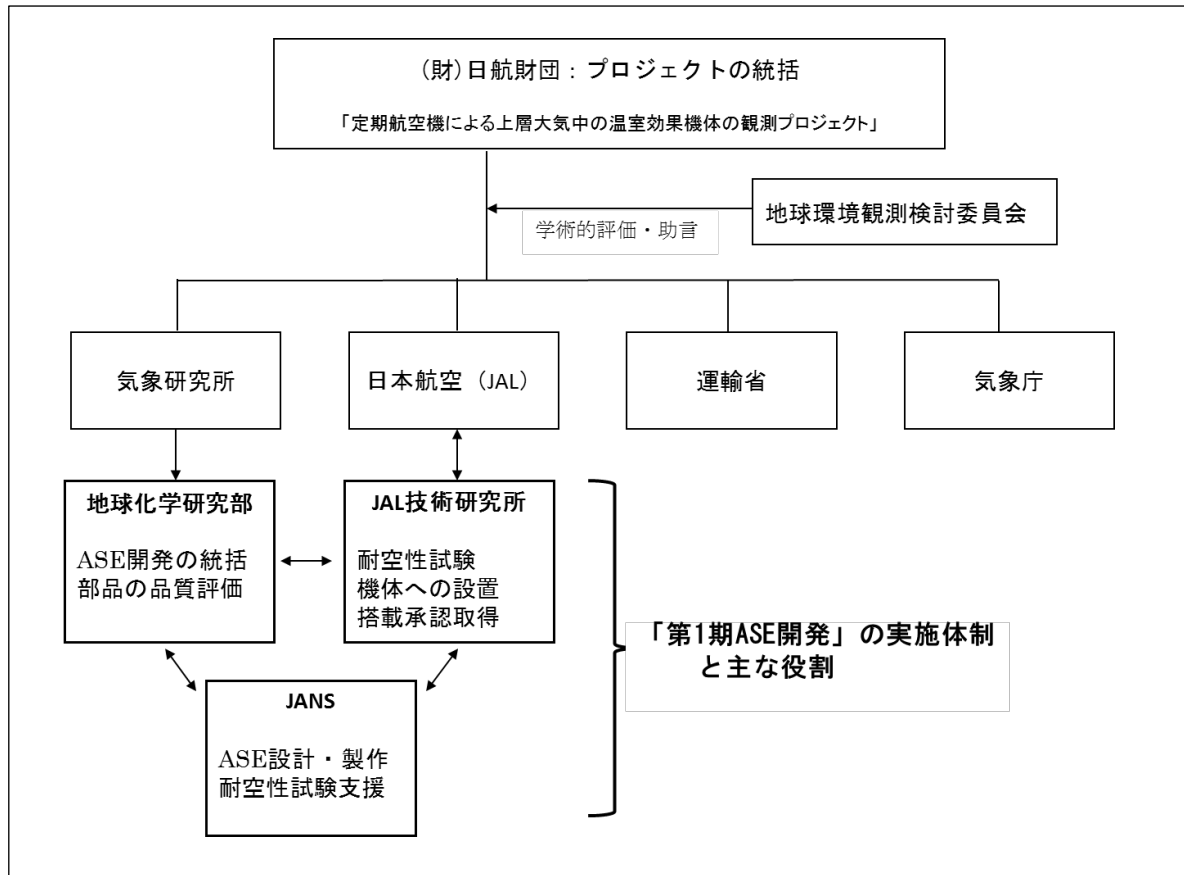


図 3 第 1 期プロジェクトの参画機関と ASE 開発の実施体制。

当時、全世界に展開されていた地上の観測網に比べ、INSTAC をはじめとする上空の温室効果ガスのデータは時間的にも空間的にも断片的で、観測結果の乏しい未知の領域であった。3次元の全球化学輸送モデルの結果も出始めていたが、上空に関しては観測による検証データが少なく、その実態については推定の域を出ていなかった。そのような状況の中で、東北大学のグループが1984年と1985年の2年間に日本と豪州を結ぶJALの旅客機（ボーイング747-200型機）を利用して、CO<sub>2</sub>濃度を精密に観測した研究論文が1991年4月にTellus誌に発表された。(Nakazawa et al., 1991)。この論文は、旅客機による定期的な通年の観測が、上空の温室効果ガスの地球規模の循環メカニズムの解明に極めて有効であることを実証した画期的な研究として注目された。図4は、JALに保管されていた当時の東北大学のサンプリング装置とJAL機内での空気採取を行う様子を撮影した貴重な写真である。この大気採取装置は手動型で、観測のために人手を必要とした。そこで、第1期の大気観測プロジェクトでは、新たに自動サンプリング装置を開発して、東北大学が実施した日本と豪州路線の大気観測を復活させ、その観測を長期間継続するという目標が掲げられた。まず、プロジェクト発足直後の1991年9月5日と18日に気象研究所とJAL技術研究所との間で会合がもたれ、ASE開発に関する技術課題について議論された。この会合における検討では、東北大学の観測の前例が大いに参考となった。その後も、気象研究所とJAL技術研究所との間で頻りに技術会合を持ち、開発のための課題の協議を重ねた。最初はお互いの専門分野が全く異なるために話が噛み合わず激論を交わすことも多くあったが、世界に誇れる長期観測用の装置開発を成功させる共通の目標が持てたことが、共同研究を推進させる大きな力となった。

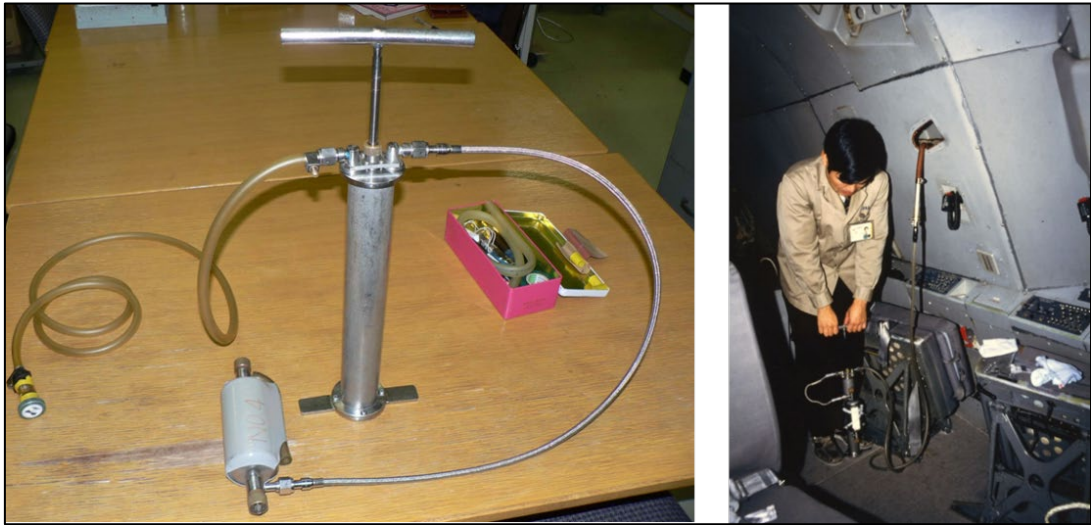


図 4 東北大学のサンプリング装置（左の写真）と機内でのサンプリングの様子（右の写真）。

## 2-2 空気採取と機内配置

### 2-2-1 テスト・フライト

開発の第一段階として、大気中の温室効果気体を精密に観測するためには、機外の空気をどのようにして採取するかが最重要課題として取り上げられた。旅客機の場合、機外の空気を直接採取するための取入口を機体に恒常的に取り付けることは安全上の観点から極めて困難である。そこで、空調システムを通して機内に入る空気を試料として採取する方法が検討された。図5は、ボーイング747型機における空気の流れを模式的に示す。4基のエンジンから入る機外の空気は高圧空気ダクト（Pneumatic air duct）と空調機（Airconditioning pack）において圧力や温度の調整が行われ、ライザー・ダクト（Riser duct）と呼ばれる通風管を通して最終的に客室内に供給される。客室内の空気の一部は、Recirculation fan を通ってライザー・ダクトの下流部に供給され循環するが、空調機に近い上流部では客室内の汚染された空気の混入が全くないことから、試料とする空気を採取するのに好都合な場所であると考えられた。しかし、機外の空気は空調システムにおいて170度付近まで温度の上昇を受けたり、オゾン・コンバーターや水分分離装置（ウォーター・セパレーター）を通過したりする。このため、大気中に微量にしか含まれていないCO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>の濃度が変化を受けていないという保証はどこにもなかった。前例として、東北大学の観測では同じ空調システムの空気を採取しており、問題はないはずであった。1991年9月18日の技術会合では、ライザー・ダクトの空気が測定に適した試料であるかどうかを自ら実証する実験が重要であり、そのためにテスト・フライト（試験飛行）を行うことがJAL技術研究所の航空機エンジニアから強く提案された。試験飛行の実施は手間もかかり、高額な費用も必要となる。また、期待した実験結果が得られない場合も当然想定される。会合の中では、試験飛行で実証できない場合にはプロジェクトの中止も考えるべきとの強い意見が出された。研究者にとっては願ってもない特別な実験の機会であったが、急いで準備を進めなければならない状況となった。

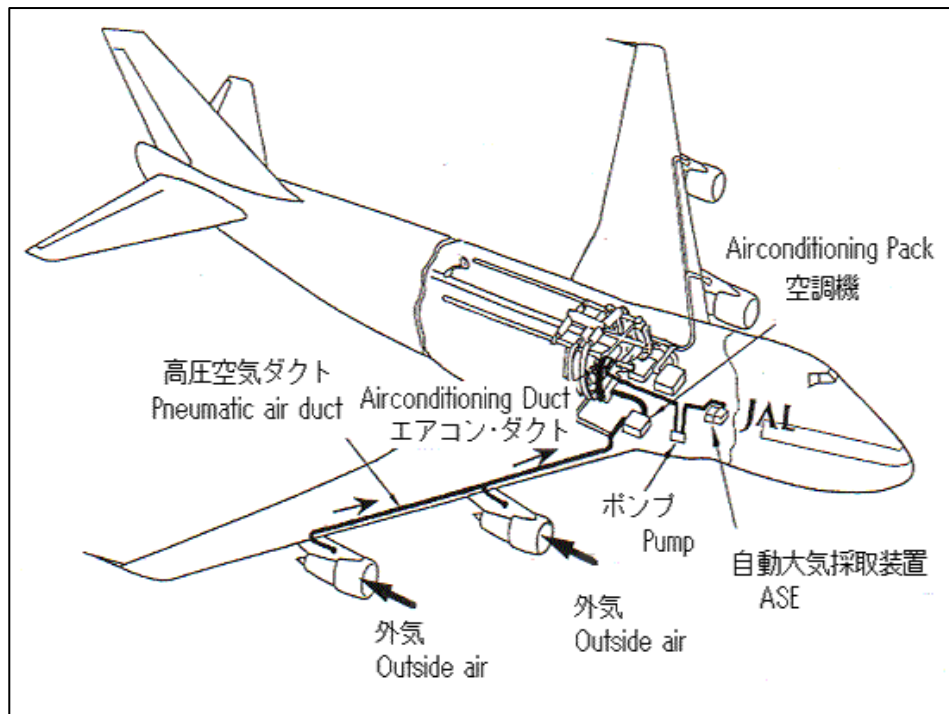


図 5 外気の旅客機内での流れを示した模式図。

1992 年 1 月 29 日にボーイング 747-200 型の JA8113 機による試験飛行が実施された。ダクトの空気と比較する機外の空気を直接採取する実験のために機体が改造された。図 6 の写真で見られるように、外気を直接採取するためのウインドー・プラグが特別に準備され、窓の代わりに機体に取り付けることになった。このプラグの使用は試験飛行に限り航空局より特別に許可されたもので、当然のことながら乗客を乗せた定期旅客便では使用できない。試験飛行はクルーや関係者を含めた約 30 名と航空局の検査官 1 名が搭乗した。成田空港を飛び立って南下した後、硫黄島付近で成田に引き返す数時間の飛行であった。この試験飛行中、西部北太平洋上の上空 6 地点において機外の空気とダクトの空気を同時に採取し、12 個の分析試料が得られた。図 6 の写真はボーイング 747-200 型機の機内における空気採取の実験風景を示したものである。空気試料はステンレス製の容器に採取して持ち帰り、気象研究所において  $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_4$  の濃度が直ちに分析された。空気採取用のポンプはパワーが弱かったため、地上に持ち帰ると 1 気圧より低い圧力で充填されており、繰り返し分析ができる程の十分な試料の量はなかった。そのため、1 試料につき 1 回の分析しかできない緊張した測定となった。幸い、ダクトの空気の濃度は同時に採取した外気といずれの 6 地点とも差がない結果が得られ、空調システムを通過する際に濃度変化が生じていないことを実証する実験が成功した (Matsueda et al., 1996)。一致した結果が出た時は胸をなでおろした。後で冷静にデータを眺めると、採取地点による濃度の違いは比較的小さく、大気の濃度変動が小さい状況で、比較実験には最も適した気象条件下の幸運なフライトであったことが分かった。このようなボーイング 747 型機による大掛かりな実験は、これまでほとんど行われておらず、今後旅客機を利用した観測を進める上で極めて貴重な知見を与えるデータとなった。試験飛行の結果は 1992 年 3 月 13 日に開催された第 1 回の地球環境観測検討委員会で報告され、この空気試料を採取する装置開発を進めることが承認された。



図 6 試験飛行の時のウィンドープラグ（左の写真）と機内でのサンプリング風景（右の写真）。

### 2-2-2 ASE の設置場所

試験飛行の実験結果をうけて、ライザー・ダクトに空気取入口を新設し、ダクト内の空気をポンプによって自動大気採取装置のフラスコに導くための機体内の装置配置が検討された。旅客機の場合、観測に使用できるスペースは極めて限られており、なおかつ客室の乗客に不快感を与えないことを考慮する必要があるがあった。図 7 に、空気取入口 (INLET)、ポンプ (PUMP) 及び自動大気採取装置 (ASE) を取り付けた写真を示す。これらの設置場所は客室を挟んで大きく離れていたため、約 25m のステンレス製チューブを使い、機体の内壁に沿って配管された。空気取入口は、客室の天井裏を通っているライザー・ダクトに取り付けられた。ダクトは客室内の汚染された空気を取り囲まれているために、空気取入口は漏れのないように注意深くダクトに固定された。一方、ポンプは客室下の前方貨物室の側壁の隙間に設置し、その振動と騒音が客室内に伝わらないように配慮された。ポンプは気密性が高く汚染のない金属製のベローズ・ポンプ (MB302 型) を採用し、そのモーター部は航空機の特異な電源仕様 (115VAC、400Hz) に合うように使用実績のある部品を用いた。ポンプを通った試料空気は毎分 20 リットル以上の流速で自動大気採取装置 (ASE) に導入され、最終的にフラスコに加圧充填される。ASE は図 7 の写真に示すように、客室の天井にあるライフ・ラフト・コンパートメントに備え付けられた。

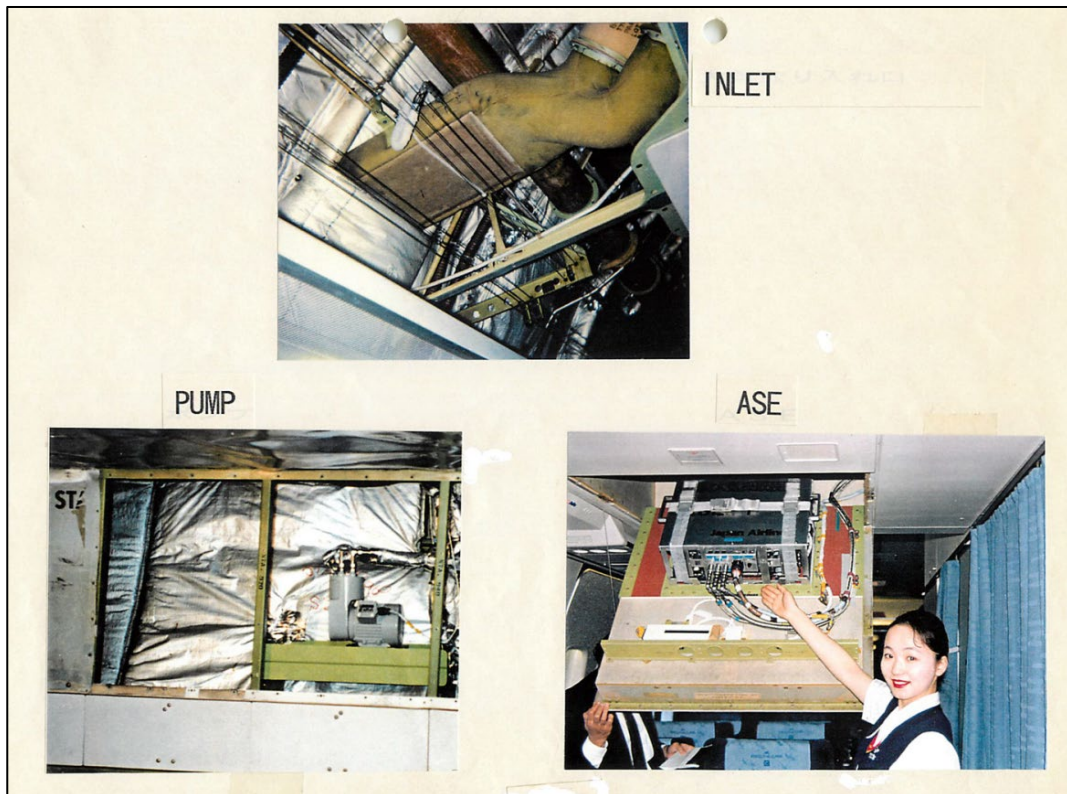


図 7 機体に搭載された観測装置の写真。INLET（空気取入口）は客室天井裏のダクト、PUMP（ポンプ）は貨物室、ASE（自動大気採取装置）は客室上部のライフ・ラフト・コンパートメントに設置。

当初から客室内に ASE を取り付ける方向で設計が進められていたが、途中で予想もしなかった問題が持ち上がった。装置の作動試験が実施された際、電磁弁が開閉する時の「カチッ」と鳴る音や余剰空気が抜ける際の「シュー」という排気音が、乗客に不快感と不安感を与える恐れがあるとの指摘の声が上がった。後日行われた試験飛行の結果、飛行中の騒音にかき消されて、乗客にはほとんど気にならないことが確認され、事なきを得た。乗客に対する配慮は、旅客機を利用する観測ならではの重要な搭載条件であることを痛感した。当初、ASE の設置場所として客室が選ばれたのは、旅客機が空港に滞在する時間が短いために、貨物室よりも取付け取外し作業が素早く行える利便性が重視されたためである。しかし、その後、このコンパートメントは航空局の通達により使用が禁止されることになり、ASE が客室に載った期間はわずか 1 年余りで終わってしまった。結局、1994 年 7 月に初号機 JA8127 機から 2 代目の JA8131 機に交替する際に、前方貨物室後部の隔壁前面の給水タンク隣の空きスペースに ASE を移設することになった。

## 2-3 ASE の製作

### 2-3-1 基本設計

ASE はサンプルの保存性、搭載時の操作性及び旅客機に対する安全性を考慮して設計・製作が進められた。図 8 は、1992 年 12 月に作成された ASE の最初の流路図の図面である。図に

示す通り、ASE は 2 つのボックス（ASE-1、ASE-2）で構成されている。それぞれのボックスには、6 個のフラスコ（約 1.9L 容量）と電磁弁及び圧力センサーが組み込まれており、1 回の飛行で合計 12 地点のサンプルが得られる。フラスコの両端には電磁弁が取り付けられ、それがプログラムで指定した時間間隔で開閉し、順次ポンプで 12 本のフラスコに加圧封入される単純な仕組みである。しかし、流路の配管は空気試料が淀みなく流れる構成となっており、目的の圧力で試料採取できるように工夫されている。そのため、この流路構成はそのまま第 2 期 ASE にも引き継がれることになった。

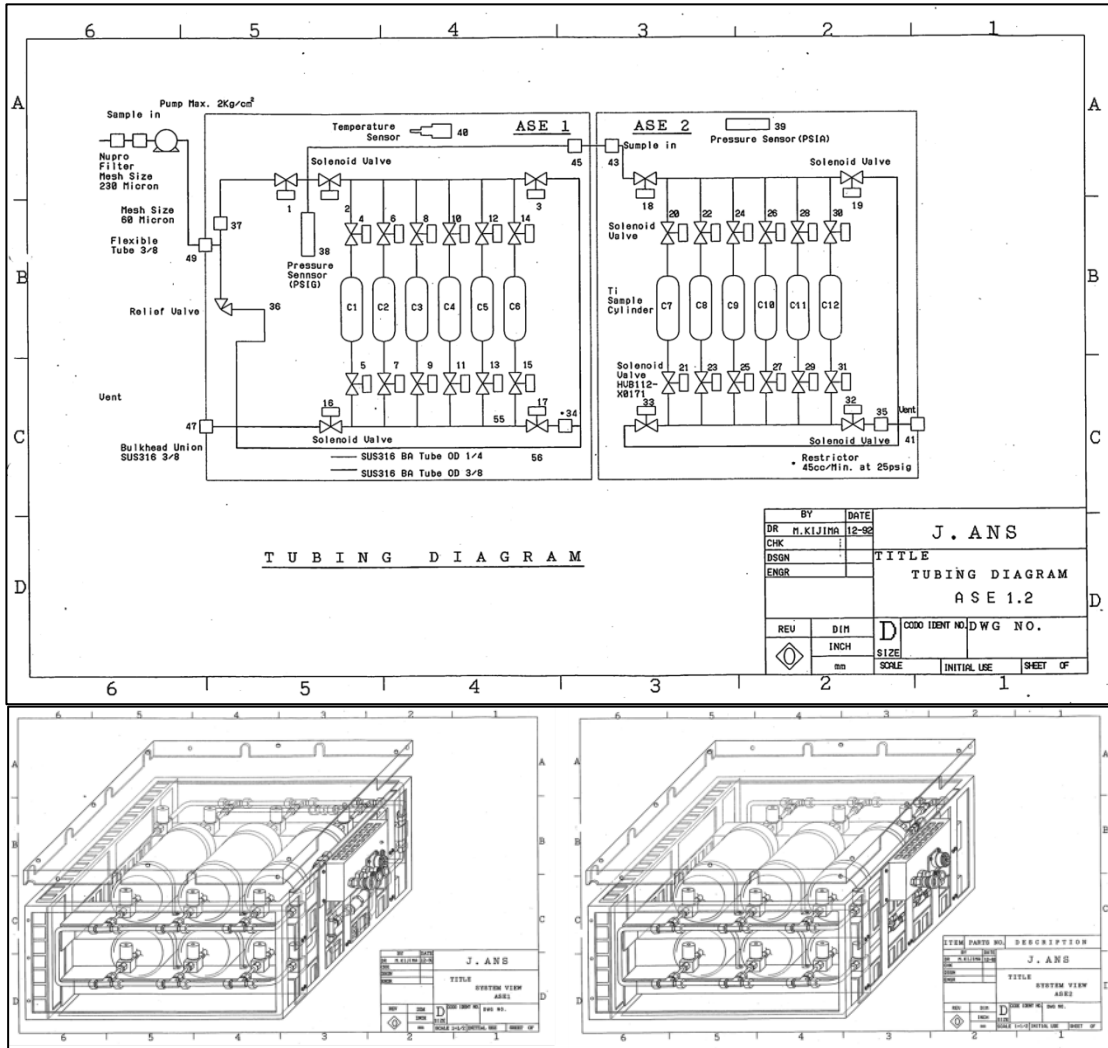


図 8 ASE の流路図面（上段）と装置の立体図面（下段）。

フラスコの内面は微量ガスの吸脱着を防ぐために鏡面加工を施し、容器内の試料濃度ができるだけ変化しないように処理された。ASE-1 の圧力センサーは、試料空気を 2-3 気圧程度まで加圧採取する際のモニターとして用いられている。一方、ASE-2 に装着した圧力センサーは空気流路から切り離し、客室内の圧力を常に監視するために取り付けられた。センサーの情報は ASE-1 の側面に装着されたコントロール・ユニットに送られるとともに、このユニットで空気採取に係わる総ての動作が制御されている。採取の終了時刻や採取圧力等のデータはコントロール・ユニット内部のメモリーに記録され、飛行記録（Aircraft Condition Monitoring System のデータ）と時間で照合することにより採取した緯度・経度及び高度が特定された。コントロール・ユニットは、JANS 社が専用部品として一から設



計・制作を行った、ASE の機能制御に必要なデバイス（CPU、I/O、A/D、Powersupply 等）を電子基板に集約したものである。制御プログラムも独自に作成した。今でこそ「組み込みシステム」は一般的になっているが、当時としては先進的な技術を導入した代物である。

ASE は航空機部品として取り扱われるため、航空整備士がその取付け取外しを行うことが義務づけられている。このため、操作しやすい作業性とできるだけ軽い重量が航空機エンジニアから要求された。この点は、観測専用機とは異なる旅客機観測ならではの重要な要件の一つである。航空整備士による作業をできるだけ簡便にするため、空気配管の接続部はすべてワンタッチ・コネクタを使用した。構成部品は可能な限りコンパクトに配置し、一つのボックスの大きさを 50cm X 42cm X 21cm とした（図 8）。また、軽量化を計るため、フラスコは高価であるがチタンを材料として使用し、厚さも 1 mm まで薄くして製作された。電磁弁は気密性に優れた汎用部品を約 300 g に小型化する改造を加え、それに新たに製品番号を付加して装置部品として使用できるようにした。その結果、一つのボックスの総重量が約 16Kg となり、一人の人間で何とか持ち運びができる重量まで軽量化することができた。ただし、接続配管部品として用いた T 字型コネクタの数が多く、合計すると相当な重量となった。この点は第 2 期の ASE 開発の重要な情報として引き継がれ、可能な限り配管を溶接で連結する手法に切り替えて、より軽量化を図る改善につながった。

## 2-3-2 自動化

第 1 期 ASE 開発で解決すべき課題の一つは、旅客機の出発時刻が遅延した場合、どうやってそれを検知して自動採取を開始させるかであった。当時から、航空機の航法システムから情報を取り込めれば、高度や対地速度の変化から装置の始動を容易に行えることが提案されていた。しかし、今では旅客機で普通に見られる客室のモニター画面に飛行機的位置を映し出すためのシステム、PFIDS (Passenger Flight Information Display System) は標準装備されていなかった。このため、観測装置と航法システムを直接繋ぐ必要があったが、それは運航安全性の面から極めて困難であることが航空機エンジニアから指摘された。そこで、機内の圧力をモニターする圧力センサーを ASE-2 に搭載し、その機内圧の変化から装置を始動させるタイミングを決定するアイデアが代替案として出された。通常、機体が地上にとどまっている間は、機内は地上の大気圧と同じ圧力に保たれている。しかし、離陸後の機内の圧力は高度の上昇に伴って徐々に降下してゆき、巡航高度の約 10 km 付近に達すると 80kPa 前後の圧力になる。これは、上空の低圧下における機体構造体への圧力負荷をできるだけ軽減するための措置で、低圧の機内ではアルコールの分解速度が遅くなり、機上のお酒は酔いが早く覚めにくいと言われている。図 9 に 1994 年 7 月 15 日の JA8131 による試験飛行の時に、成田空港を飛び立ってからの機内圧の変化を実測した結果を示す。機内圧の低下と高度の関係は飛行ごとに多少異なるが、毎回地上より低い圧力になることに変わりはない。この様な機内圧の低下をセンサーで検知することによって、はじめてポンプが動き始め、試料採取のための電磁弁が作動するよう設計された。実際の観測では機内圧が約 90kPa まで低下するとポンプが始動するよう設定された。逆に、空港降下の際には機内圧の上昇を検知して ASE の作動を停止させることができる。さらに、機内圧の上昇・下降の回数を検知することで、豪州から成田に向かう復路でも大気採取を行うことが可能となった。この機内圧モニター方式によって、旅客機の出発時間に左右されることなく、また搭乗乗務員の手を一切煩わすことなく、ASE 制御をすべて自動で行うための課題が解決された。この方式の導入は、第 1 期 ASE 開発の最大の特徴の一つであった。

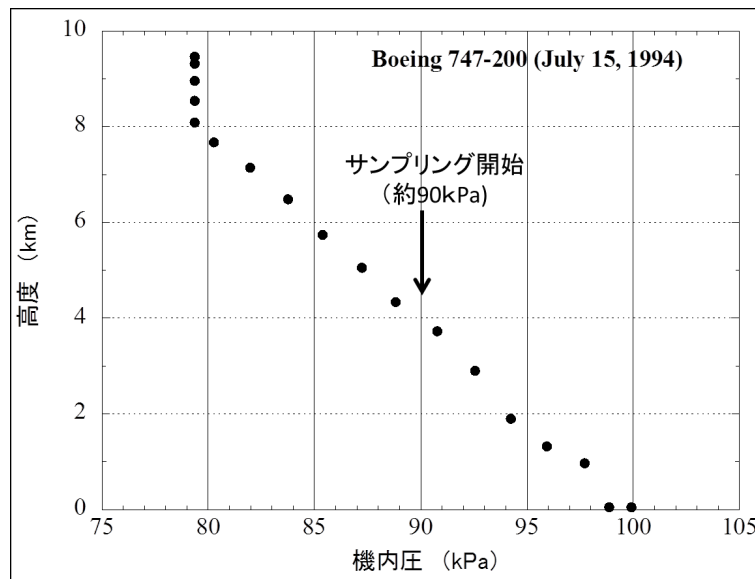


図 9 離陸 (Takeoff) 後の機内圧力の低下を実測した例。

### 2-3-3 安全機能

ASE を開発する際に特に注意を払った点は、旅客機の安全運航に影響を与えないために、緊急時に自動停止する機能を持たせることであった。たとえば、装置に異常な温度上昇が発生した場合は、ASE-1 に取り付けられた温度センサーが検知し、ポンプ及び装置の電源供給を総て遮断する。仮に温度センサーに障害が起こり機能しない状況になっても、コントロール・ユニット内の電源供給ラインに温度ヒューズが設けられており、装置内の温度が 70°C 以上になると遮断するよう二重の安全対策が施された。ここで採用された 70°C の根拠は不明であるが、この温度閾値は第 2 期 ASE にも安全限界温度として引き継がれた。一方、ASE-1 の圧力センサーは試料空気を採取する圧力を制御するために通常使用しているが、流路内の異常な圧力上昇も監視する役割も同時に果たしている。センサーが 280kPa 以上の高い圧力を検知するとシステム全体が停止するようプログラムが設定された。仮に圧力センサーが不能となっても、流路に組み込まれたリリーフ・バルブが作動して強制的に配管内の異常な高圧状態を解除する二重の安全機能をもたせた。このような緊急時に自動で働く二重の安全対策は、旅客機搭載用の観測装置において特に重要視された必須の機能であった。ここで、前述した圧力値 280kPa は ASE にとって特別に重要な数値である。開発チームでは単位を変えて、40.6 psia と呼んでいた。この圧力を超えるものはすべて高圧扱いの範疇に入り、格段に厳しい安全証明の試験が課せられる。このため、この圧力以下で空気試料の採取を行うよう航空機エンジニアからの強い要望を受けて、毎回同じ圧力で加圧採取できる制御方法を組み込んだ。おそらく、圧力値 280kPa はアメリカ合衆国運輸省 (DOT: United States Department of Transportation) の規定に由来し、これが航空機にも適応されていると思われる。いずれにしても、この圧力値は旅客機搭載用の観測装置の開発にとっては最も注意すべき重要な数値である。

## 2-4 耐空性試験

自動大気採取装置を長期に亘って旅客機に搭載するためには、様々な耐空性試験を実施して航空機の部品としての安全性を確認し、最終的に航空局の承認を得なければ使用できない。特に、試験の内容は通常の観測専用機に用いられる観測装置とは異なり、極めて厳しい試験条件が課せられている。この試験は JAL 技術研究所と JANS 社の技術者が担当し、1992 年 11 月から 1993 年 3 月にかけて実施された。当時の記録があまり残っていないために、その詳細な内容は断片であるが、すべての試験結果は良好であったことが航空局に報告された。耐空性試験については、旅客機搭載の条件として最も重要な要件の一つであり、後述する第 3-4 章の「環境試験」で詳しく概説する。

最後の試験は、実際の運航環境下における大気採取システム全体の作動状況とその安全性を調べることを目的とし、装置を搭載できるように改造を施したボーイング 747-200 型 (JA8127 機) による試験飛行が 1993 年 4 月 9 日に実施された。特にこの飛行では、ASE から発生する電磁波が航空機の運航機器に影響を与えないかどうか、航空局検査官が同乗して注意深く検査が行われた。飛行中にライフ・ラフト・コンパートメントに設置された ASE の検査をするため、小型のモニター装置にケーブルを接続して作動状況の確認が行われた。当時のモニターは、作動したバルブの番号だけが表示される簡便なものであった。この試験飛行の結果、航空局の航空機「修理改造検査」に合格し、定期旅客便での ASE の運用が承認された。この承認取得は、観測装置が航空機部品として使用できることを日本の共同開発チームが実現した点で大変意義深い。

記念すべき最初の観測は、1993 年 4 月 23 日に豪州のケアンズから成田に向かう JL764 便 (JA8127 機) で行われた。このフライトでは無事サンプルの採取に成功し、初の ASE による観測データが取得された。この時から第 1 期観測が終了する 2005 年 11 月までに、日本と豪州の航路で合計 274 フライト、約 5000 個の貴重なデータが収集された (Matsueda et al., 2008)。過去 13 年の観測期間中、ASE 搭載時における配管の接続や電源の入れ忘れなどの作業ミスでサンプルが取得できなかったことは何度かあったが、ASE 本体の誤動作は一度も発生しなかった。観測装置としては優れた成績を残した一級品であった。1994 年 7 月からの観測は、新たな機体 (JA8131 機) に ASE を搭載してシドニー航路で毎月 2 回実施された。さらに 2002 年 4 月からは JA8130 機も追加されて、ブリスベーン航路での観測に変わった。ASE による 12 本のフラスコサンプリングは、各航路における平均的な飛行時間を算出して、採取時間を等間隔に設定して実施された。このタイマー方式によるシドニー航路の採取結果を見ると、大多数のフライトでは緯度幅にして 5~6 度の間隔でサンプルを採取できていた (Matsueda et al., 2008)。しかし、気象条件によって飛行時間が大きく変わる場合もあり、想定外の地点でサンプルが採取されることが何度かあった。この問題は第 1 期 ASE の課題となったが、第 2 期の ASE 開発では、PFIDS を利用して飛行位置をリアルタイムで取得する方式が導入できたことで解消された。

## 2-5 分析装置

ASE の開発と並行して、採取した空気を気象研究所で測定するための自動分析システムの製作と性能試験が進められた。第 1 期のプロジェクトでは、観測対象は CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> とされ、それぞれ非分散型赤外分析計 (NDIR : Non-Dispersive Infrared analyzer) と水素炎イオン化検出器 (FID:Flame Ionization Detector) を備えたガスクロマトグラフ (GC: Gas Chromatograph) 分析計で濃度の測定を実施することになった。図 10 は、自動分析システムにおける ASE の試料空気の流れ (実線) と機器間の電気・通信経路 (点線) を模式的に示した。ASE-1 と ASE-2 に加圧された採取空気試料は、流路切替部 (Flow Selection) に配置した電磁弁を開閉することによって CO<sub>2</sub> 分析と CH<sub>4</sub> 分析の 2 つの流路に分かれ、それぞれ分析計に流れる。また、分析計を較正する標準ガスも流路切替部を通して分析計に導入される。なお、詳細な分析計の条件や精度については、Matsueda et al. (1996) と Matsueda et al. (2002a) で報告されているので、ここでは割愛する。

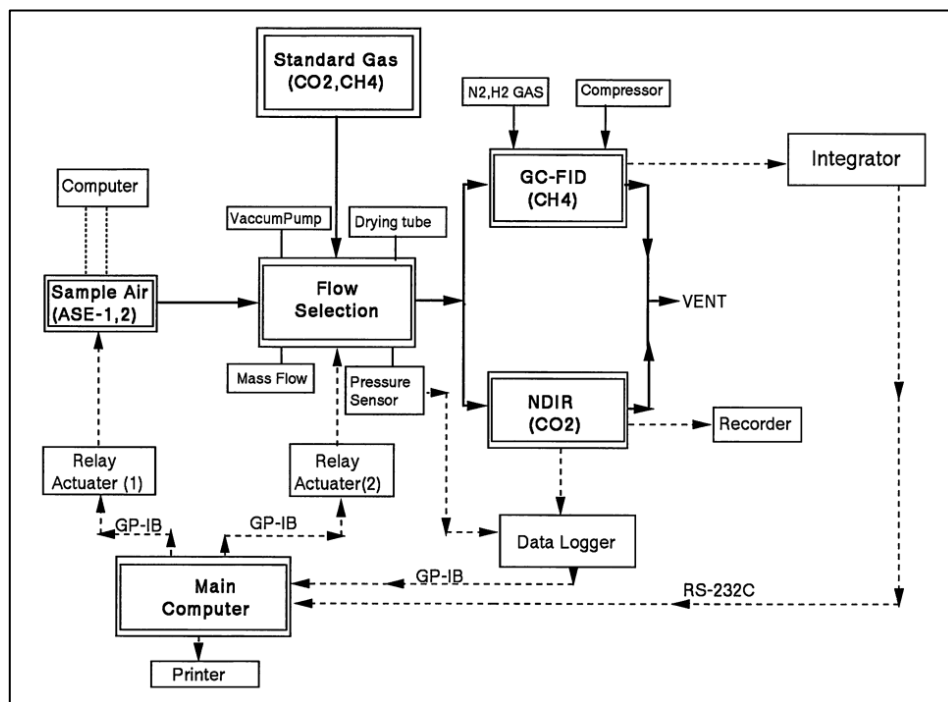


図 10 自動分析システムの流路 (実線) と電気・通信回線 (点線)。

当時は、まだパッケージ化された電子制御製品もあまり一般的に流通していなかったために、市販されている部品を組み合わせて、自動で分析できるシステムを製作した。制御の中心となる Main Computer に HP のパソコン (HP-PC) を利用し、ASE の電磁弁の開閉や、流路の切替え用の市販の Relay Actuator を GP-IB 通信で制御した。NDIR のアナログ出力は Data logger で A/D 変換して GP-IB 回線で HP-PC へ転送する一方、GC のクロマトグラムは市販の積分計 (Integrator) でピークの面積値を求めて、RS-232C 通信で HP-PC に送った。この自動システムの構築や制御プログラムは自作したためにすべての仕組みを十分に把握できており、その後の修理や改造を容易に行うことができた。図 11 は、実際の気象研究所に設置された自動分析システムとその背後に配置した ASE の写真を示した。

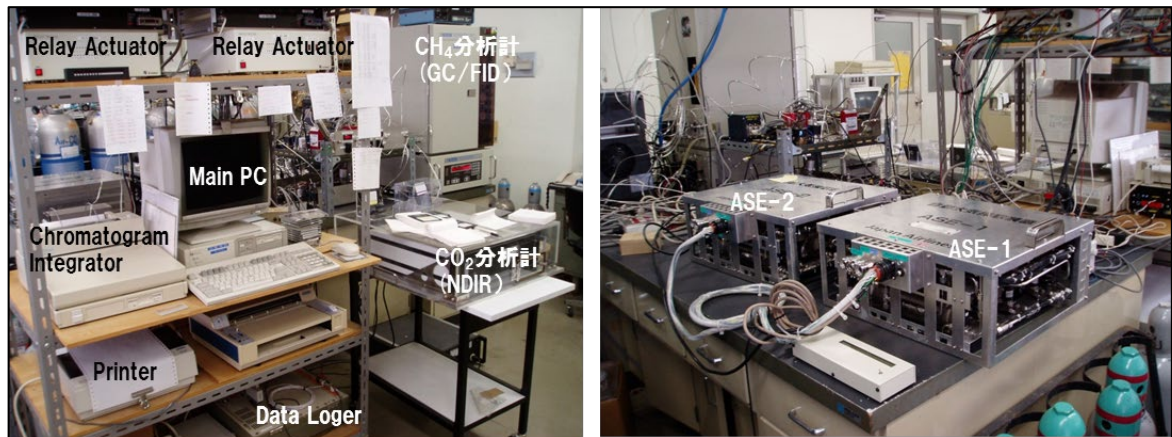


図 11 気象研究所の自動分析システム (左の写真) とその後ろに設置した ASE (右の写真)。

前述した通り、第 1 期のプロジェクトでは CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の 2 種類の微量気体が観測対象となっていたが、ある時、一酸化炭素 (CO) も同時に測定してはどうかとふと思いついた。当時、CO 測定には感度の高い酸化水銀を用いた検出器を備えた GC/HgO 法が使われるようになっていた。しかし、CO 測定はプロジェクトでは観測対象に入っていなかったために、その分析計を購入する予算は認められなかった。そこで、CH<sub>4</sub> を測定するために購入した GC/FID を改造して、CO と CH<sub>4</sub> を同時に測定することを試みた。図 12 は改造した GC/FID 分析計で得られた初期のクロマトグラムの一例を示した。CH<sub>4</sub> と CO を十分に分離できるクロマトカラム充填剤 (Silica Gel/TritonX-305) を選択して、CH<sub>4</sub> のピークが出終わった後に流路を切り替えて、CO を水素気流化において 450℃ のニッケル炉を通過させ、CH<sub>4</sub> に還元して FID で検出する改造を施した。この方法は GC/HgO 法に比べると感度は低い、キャリアーガスを高性能の浄化管 (ファインピュアラー、大阪ガスリキッド) を通して不純物を除去すると、クロマトグラムのベースラインが安定して、何とか大気中の CO 濃度を測定することが可能になった。

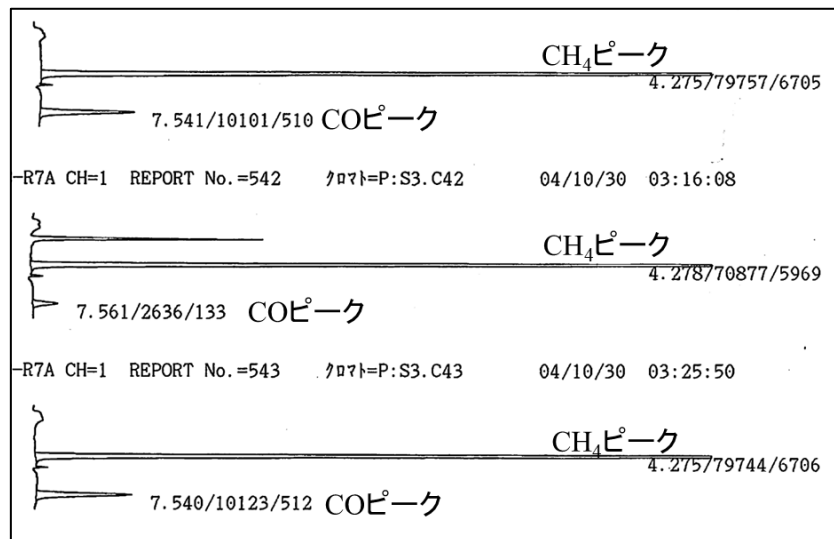


図 12 GC/FID 分析における CH<sub>4</sub> と CO のクロマトグラムの一例。

観測が始まって暫くの間は、観測結果を評価する地球環境観測検討委員会では CO の分析結果は発表せず、プロジェクトの必須観測項目であった CO<sub>2</sub> と CH<sub>4</sub> の結果だけを報告していた。ところが、1997 年にインドネシアで大森林火災が起こり、それから放出された大量の CO が日本と豪州を結ぶ上空約 10Km の観測航路にも到達したことが、ASE で採取された空気の測定結果から判明した。その時の観測では、CO 濃度の測定値に異常な上昇が検出され、森林火災のシグナルを CO の観測によって明瞭に捉えることに成功した。この事例は、第 1 期のプロジェクトにおける重要な科学的成果をもたらした (Matsueda et al., 1998; Matsueda and Inoue, 1999; Matsueda et al., 1999; Matsueda et al., 2019)。CO を測定することを思いついた当初は、このような興味深い現象を捉えることは全く想定していなかった。その後、大気輸送モデルを用いたシミュレーションでも CO 濃度の異常上昇の原因がインドネシアの大森林火災であることが追認された (Matsueda et al., 2002b; Taguchi et al., 2002; Duncan et al., 2003)。最近では、予算申請の時に何の目的で観測 (測定) を行うのかと厳しく問われるが、観測してみなければ分からないことはまだまだ沢山あることを忘れてはならない (松枝, 2000)。