

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.85

**Development of Automatic air Sampling Equipment (ASE) for
passenger aircraft**

- Backgrounds and Techniques -

BY

Hidekazu Matsueda¹, Naoto Kondo², Akihiro Kudo³, Kazuhiro Tsuboi¹

¹Department of Climate and Geochemistry Research, Meteorological Research Institute

²JAMCO,³JANS

**気象研究所技術報告
第 85 号**

**旅客機搭載型の自動大気採取装置（ASE）の開発
—経緯と技術的要件—**

松枝秀和¹, 近藤直人², 工藤明宏³, 坪井一寛¹

¹気象研究所気候・環境研究部、²ジャムコ社、³日本アンス社



気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

October 2021

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General: Ko Koizumi
Senior Director for Research Affairs: Masao Ishii
Senior Director for Research Coordination: Hisaki Eito

Department of Atmosphere, Ocean, and Earth System Modeling Research	Director: Goro Yamanaka
Department of Physical Meteorology Research	Director: Yuji Yamada
Department of Observation and Data Assimilation Research	Director: Hiromu Seko
Department of Typhoon and Severe Weather Research	Director: Naoko Seino
Department of Climate and Geochemistry Research	Director: Kazuto Suda
Department of Seismology and Tsunami Research	Director: Mitsuyuki Hoshiba
Department of Volcanology Research	Director: Yasuhiro Yoshida
Department of Applied Meteorology Research	Director: Teruyuki Kato

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Editor-in-chief: Yasuhiro Yoshida

Editors:	Usui Norihisa	Yoshinori Mizuno	Haruma Ishida
	Akihito Umehara	Izuru Takayabu	Hiroaki Tsushima
	Eiichi Sato	Hidetaka Sasaki	
Managing Editors:	Yasuyuki Kawazoe	Yutaka Furuichi	

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute (MRI) since 1978 as a medium for the publication of technical report including methods, data and results of research, or comprehensive report compiled from published papers. The works described in the *Technical Reports of the MRI* have been performed as part of the research programs of MRI.

©2021 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.85

**Development of Automatic air Sampling Equipment (ASE) for
passenger aircraft
- Backgrounds and Techniques -**

BY

Hidekazu Matsueda¹, Naoto Kondo², Akihiro Kudo³, Kazuhiro Tsuboi¹

¹ Department of Climate and Geochemistry Research, Meteorological Research Institute

² JAMCO, ³ JANS

**気象研究所技術報告
第85号**

旅客機搭載型の自動大気採取装置（ASE）の開発

—経緯と技術的要件—

松枝秀和¹, 近藤直人², 工藤明宏³, 坪井一寛¹

¹ 気象研究所気候・環境研究部、² ジャムコ社、³ 日本アンス社

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

October 2021

序

気象研究所気候・環境研究部は、大気・海洋に存在する各種の化学物質の時間的・空間的な変動を把握し、地球環境変動を化学的に解明するための研究を行っている。二酸化炭素をはじめとする大気中の温室効果ガスの長期観測とその変動メカニズムの解明に関する研究は当研究部の重点課題の一つとして推進している。自然のメカニズムの理解を進展させるためには、新たな観測装置の開発とそれを長期間運用する手法の確立が不可欠であり、これら研究の基盤となる技術発展にも積極的に取り組んでいる。これまで培った最先端の技術とその研究実績は、気象庁が実施する大気中温室効果ガスの定常観測の発展と長期運営に大きな貢献を果たしてきた。

旅客機を利用した上空の温室効果ガス観測は、気象研究所において 1990 年代初頭から取組を継続している主要研究プロジェクトの一つである。このプロジェクトは、旅客機に搭載できる本格的な自動大気採取装置 (ASE) の開発に成功したことが契機となった。その後、改良型 ASE の開発を含めた共同観測プロジェクトへと発展し、現在も観測が続けられている。貴重な観測データから未知の領域であった上空の現象に関する重要な研究成果が得られると同時に、衛星観測や大気化学輸送モデルの検証データとしても世界の研究者に活用されている。

本技術報告は、旅客機搭載型観測装置の開発とその技術的要件の詳細を分かりやすく取りまとめたものである。また、民間と協力した大型共同研究プロジェクトの始まりとその進展の経緯についても記録されている。今後、さらに旅客機観測を発展的に推進する上でも、また新たな大型研究プロジェクトの立案においても有益な指針となることが期待される。

気象研究所研究総務官

石井 雅男

Abstract

An airliner (passenger aircraft) is suitable for regularly collecting air samples in the upper atmosphere all over the world. Such sampling makes it possible to quantify the spatiotemporal distributions of the concentrations of trace gases in the upper atmosphere over a long period of time. During the first phase of the CONTRAIL project (1993–2005), a sampling device, the Automatic air Sampling Equipment (ASE), was developed and deployed to collect air samples from a Boeing 747-200 operated by Japan Airlines (JAL). The ASE could automatically collect 12 air samples into titanium flasks using a metal bellows pump during each flight. The ASE development project was a collaboration between the Meteorological Research Institute (MRI), the JAL Technical Development Institute, and the JANS Corp. in Japan. The air samples were collected from the air-conditioning duct upstream of the recirculation fan. A test flight confirmed that the sampled air was useful for precise measurements of trace gases such as CO₂ and CH₄. A cabin pressure sensor in the ASE was used to start the collection of air samples without any assistance of crew members on board the aircraft. The automated sampling operation was controlled by specially designed control boards attached to the ASE. A security system was included to abruptly stop sampling if necessary. Airworthiness inspections by the Federal Aviation Administration (FAA) of the United States and the Civil Aviation Bureau of Japan (CAB) led to licensing of the operation of the ASE on passenger aircraft. An analytical system was established to precisely measure the concentrations of trace gases in the ASE samples at MRI.

Continuation of the observations after 2005 (the second phase of the CONTRAIL project) required that a new ASE be installed on a newer plane, the Boeing 747-400. The basic design of the new ASE for flask air sampling is similar to that of the previous ASE model, but all of the old components have been replaced with new ones. One of the most significant advancements in the new ASE instrument is the sampling operation system, which can be automatically controlled using real-time monitoring of flight navigation data through the ARINC-429 data bus of the aircraft. The new ASE is installed on the rack in the forward cargo compartment of the aircraft, and the air-sampling bypass intake is mounted on the air conditioning duct. JAMCO-Tokyo and JAMCO-America have performed various tests in accord with the environmental conditions and test procedures for airborne equipment specified in the Radio Technical Commission for Aeronautics document RTCA/DO-160D. Deployment of the ASE in a JAL Boeing 747-400 aircraft has been approved by the aviation regulatory agencies of the FAA and CAB through the issuance of a Supplemental Type Certificate (STC). The instrument can thus be used by any airline that flies any Boeing 747-400 series aircraft and thus provides a powerful observational platform for collecting samples for measurements of trace gas concentrations high in the atmosphere on a global scale.

In this report, details of not only the techniques used in the CONTRAIL project but also the background of the development of the ASE for passenger aircraft are described so that it will be easier for readers unfamiliar with this field to understand how we were able to overcome difficulties and restrictions to develop the ASE. We hope that this report will facilitate the advance of a next-generation airliner observation program.

概 要

気象研究所は定期的かつ長期的な上空の温室効果ガスの観測を実施するため、旅客機搭載型の自動大気採取装置 (ASE) を開発した。第 1 期 ASE 開発では日本航空 (JAL) 技術研究所と日本アンス社と共同で実施し、JAL のボーイング 747-200 型の旅客機への搭載を目指した。最初に、空調システムの空気が温室効果ガスの測定に適した空気試料であることを試験飛行によって確認した。ASE には 12 本の空気試料が採取できるフラスコを取り付け、特別に製作した電子ボードを用いて空気採取を自動制御した。機内の圧力をモニターするための圧力センサーを設けて、旅客機の出発が遅延しても装置が自動で始動するシステムを導入した。また、緊急時に自動で装置を停止させる二重の安全装備を付加した。ASE は米国の連邦航空局 (FAA) の環境試験要綱に従って耐空性試験を実施し、日本の国土交通省航空局 (JCAB) から旅客機に搭載する承認を取得することができた。

第 2 期 ASE 開発では、観測を継続するためにボーイング 747-400 型の旅客機に搭載できる改良型の装置を製作することになった。基本的な設計は第 1 期開発の ASE を踏襲したが、すべての部品は新たに選定して交換した。改良型 ASE の最も大きな特徴は、ARINC429 データバスを通して飛行データをリアルタイムで取得することによって、自動制御するシステムに発展させた点であった。環境試験要綱 (RTCA/DO-160D) に従って、様々な耐空性試験が JAMCO 社によって実施された。その結果、FAA と JCAB の両局から追加型式承認 (STC) を取得することができた。この STC により、すべての 747-400 型旅客機に改良型の ASE を搭載する承認が得られた。これは、旅客機を利用した上空の大気観測を拡大するための大きな進展であった。

目次

内容

1.はじめに	1
2. 第1期 ASE 開発	3
2-1 経緯.....	3
2-2 空気採取と機内配置.....	6
2-2-1 テスト・フライト.....	6
2-2-2 ASE の設置場所	8
2-3 ASE の製作.....	9
2-3-1 基本設計	9
2-3-2 自動化	11
2-3-3 安全機能.....	12
2-4 耐空性試験	13
2-5 分析装置.....	14
3. 第2期 ASE 開発	17
3-1 経緯.....	17
3-2 システム配置	19
3-2-1 実機調査.....	19
3-2-2 装置の設置場所	20
3-3 ASE の設計と製作	21
3-4 環境試験.....	24
3-4-1 環境試験とは.....	24
3-4-2 温度・湿度・高度試験	25
3-4-3 電気に関する試験.....	27
3-4-4 電磁波に関する試験	29
3-4-5 構造強度に関する試験	30
3-5 環境試験の対策.....	32
3-5-1 EMI 試験対策.....	33
3-5-2 振動試験対策.....	34
3-5-3 耐水試験対策.....	34
3-6 ライセンスの取得	34
3-6-1 FAA の立会い環境試験	34
3-6-2 機体改修.....	36
3-6-3 最終試験.....	38
3-6-4 STC 発行.....	38
3-7 ASE の整備と運用	39
4. まとめ.....	41
5. 謝辞	42
6. 参考文献	43
7. 参考資料	45
7-1 略語集	45
7-2 年表.....	46

1. はじめに

旅客機はその名が示す通り乗客を運ぶための航空機であり、現代社会において欠くことのできない輸送手段となっている。旅客機は世界中の空を休みなく飛んでいるため、上層大気の定期的かつ長期的な観測には最も適した航空機であるとも言える。しかし、もともと観測に使用することを目的として製造されていないため、観測機器の搭載には機体の改造を含めて様々な問題を解決する必要がある。特に、航空局の厳しい審査を通過して「航空機部品」として搭載の承認を受けなければならない。これが、観測専用機に搭載する観測機器とは決定的に異なる点である。航空局の承認が取得できれば、旅客機は上空の定常観測を行うことができる極めて有効な観測プラットフォームに生まれ変わる。

旅客機を利用して上空の二酸化炭素 (CO₂) 等の温室効果ガスを観測する研究は、単発的であるが 1960 年代から世界で行われてきた (Matsueda et al., 1991)。日本では、1979 年から東北大学が当時の東亜国内航空 (JAS) の旅客機に搭乗して、手動装置を用いて大気をサンプリングし、日本上空の CO₂ の鉛直分布とその変動を調べる定常観測を開始した (Tanaka et al., 1987)。この先駆的な観測は世界で最も長い観測記録をもち、現在も日本航空 (JAL) に引き継がれ継続されている。さらに、東北大学は JAL の国際便でも手動採取装置による観測を 1984 年と 1985 年の 2 年間実施し、広域の CO₂ 濃度分布と変動を捉える画期的な研究成果を挙げた (Nakazawa et al., 1991)。東北大学の一連の旅客機観測は、見えない一つの大きな成果を日本にもたらした。それは、地球温暖化に対する理解とその研究に貢献する意義を、旅客機運航に携わる航空会社 (通称、エアライン) に浸透させたことである。これが原動力となって、日本ではエアラインの支援による旅客機の大気観測が長期に亘って続けられてきたと言っても過言ではない。米国の研究者からは「JAL は旅客機観測に何故協力的なのか？」と質問されたことがある。米国では 1998 年頃に旅客機観測計画 (TOTCAP: Tropospheric Ozone and Tracers from Commercial Aircraft Platforms) が検討されたが、エアラインの協力が得られず実現することはなかった。

1990 年代に入って、旅客機を利用した上空の温室効果ガスやその他の微量成分を観測する研究プロジェクトが次々に実施されるようになった。気象研究所と JAL のチームは世界に先駆けて旅客機搭載型の自動観測装置を開発し、1993 年から上空の温室効果ガスの長期観測を開始した (Matsueda and Inoue, 1996)。この観測は 2005 年から **CONTRAIL** プロジェクトに引き継がれ、長期にわたる観測が現在も継続されている。国外では、1994 年からフランスを中心とした **MOZAIC** プロジェクトが複数の旅客機にオゾン分析計を搭載して広範囲にわたる観測を展開した (Marengo et al., 1998)。1995 年から 1997 年にかけては、スイスのグループが主導した **NOXAR** プロジェクトにおいて精度の高い窒素酸化物の測定が機上で行われた (Brunner et al., 2001)。さらに 1997 年からは、ドイツを中心としたグループによる **CARIBIC** プロジェクトが観測を開始し、微量気体やエアロゾルを測定できる多数の計測機器を搭載して「空飛ぶ実験室」と呼んだ (Brenninkmeijer et al., 1999)。MOZAIC と CARIBIC は 2011 年から **IAGOS** プロジェクトとして統合し、さらに発展的に観測を継続している。偶然にも 4 つの旅客機プロジェクトが同じ年代に誕生したが、観測の科学的目的や搭載装置の開発及び、機体への設置方法もそれぞれ異なり、どれも個性豊かな独創性に溢れたプロジェクトであった。1990 年代は、旅客機観測が一気に花開いた時代となった。なお、旅客機プロジェクトの英語の名称は巻末の略語一覧を参照されたい。

気象研究所による旅客機観測は 1993 年 4 月から開始された。この時使用された JAL の旅客機はボーイング 747-200 型機で、一般にジャンボ機と呼ばれている大きな機体である。

この航空機に搭載するために「自動大気採取装置」が開発された。英語名として「Automatic air Sampling Equipment」が付けられ、単語の頭文字を取って「ASE」を略称とすることになった。この最初の開発を「第 1 期 ASE 開発」と呼ぶことにする。ASE は、日本と豪州の定期旅客便として就航していた 747-200 型機に搭載することになった。この航路は赤道をまたいで飛行するため、南北両半球を一度に観測できる最適な航路であった。その後観測が 10 年近く経過した頃、747-200 型機が退役を迎えることとなり、2005 年 12 月からは、ボーイング 747-400 型機で日豪間の観測を継続することになった。この機体に切り替わる時に、第 1 期の ASE を改良して新たなモデルの装置を作るために 2 度目の開発が行われた。これを「第 2 期 ASE 開発」と呼ぶことにした。ただし、ASE の名称はそのまま引き継がれることになった。モデルチェンジする ASE と並行して、CO₂ 分析計を搭載して機上で連続測定を行うことのできる新たな観測装置 CME (Continuous CO₂ Measuring Equipment) の開発も同時に実施された。この第 2 期の開発が終了した後に、プロジェクトの名称が CONTRAIL と命名された。英語の意味の通り、「飛行機雲」をイメージして名付けられた。実は、第 1 期の観測ではプロジェクトの英語名称とその略称について特段の決め事はなかった。日本では関係者の間で通称「大気観測」と呼んでいたが、英語のプロジェクト名がなかった。このために、海外で会った研究者には、しばしば JAL の名前を頭につけて「JAL Project」とか「JAL Observation」と呼ばれていた。

「第 1 期 ASE 開発」と「第 2 期 ASE 開発」による装置とその搭載方法の概略について、すでに研究論文として発表してきた (Matsueda and Inoue, 1996; Machida et al., 2008)。また、日本語の短い解説記事にも記載した (松枝・吉川, 1995; 松枝, 1998; 松枝, 2000; 松枝, 2005a; 松枝, 2005b; 長田, 2006; 本多, 2011)。しかし、いずれも簡単な記述のみで、開発の経緯や技術的要件について詳細にまとめた資料はなかった。航空機に携わる専門家にとっては当たり前のことでも、観測研究者にとっては知らないことが沢山あり、またその逆の場合もしばしば経験した。そこで本報告書では、開発のプロセスを追いながら、観測装置を旅客機に搭載するために必要不可欠な技術的要件を解説することを目的とした。旅客機観測という特殊な分野の技術的知見ではあるが、広く航空機観測全般に共通する要件も多くあるため、本報告書をまとめて出版しておく意義があると考えた。また、異分野のエンジニアや研究者が一同に会した大型共同プロジェクトがどのように推進されてきたかを伝え、今後の新たな開発の際に参考例として活用してもらうことも重要と考えた。このため、技術的側面だけではなく、関連する出来事も織り交ぜて開発の背景や想いも記述することにした。さらに、写真を多数掲載して平易な文章で専門外の方々にも理解できる内容とした。専門的な技術要件については表にまとめたが、それらを読み飛ばしても、内容が理解できるよう記述した。

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 (CH₄) 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)。

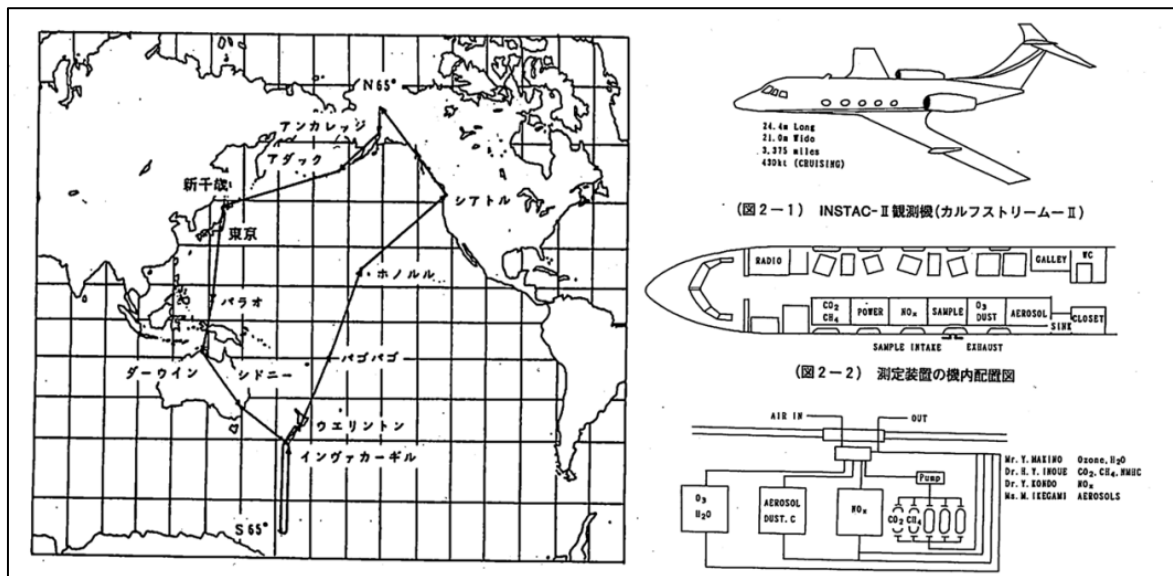


図 1 気象研究所ニュースに掲載された INSTAC-II の記事 (1990 年 8 月号)。

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（現在は無い）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。

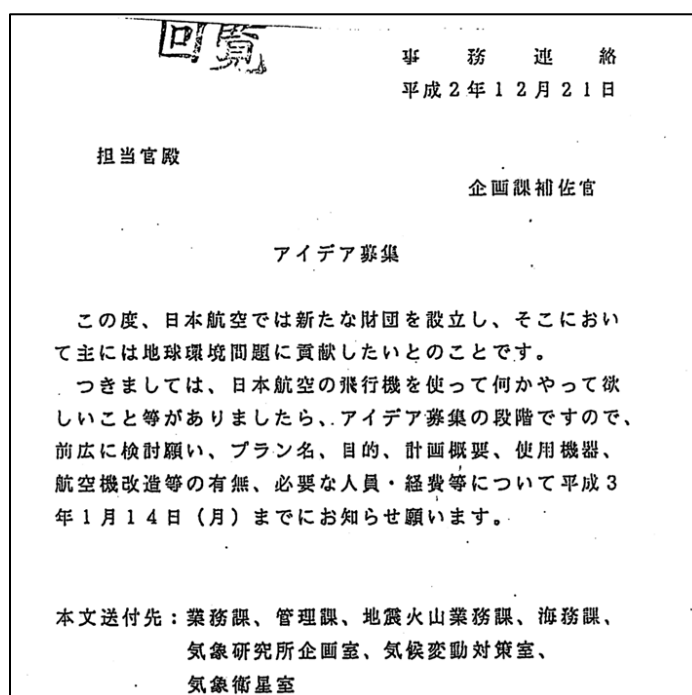


図2 1990年（平成2年）12月に回覧された事務連絡。

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。

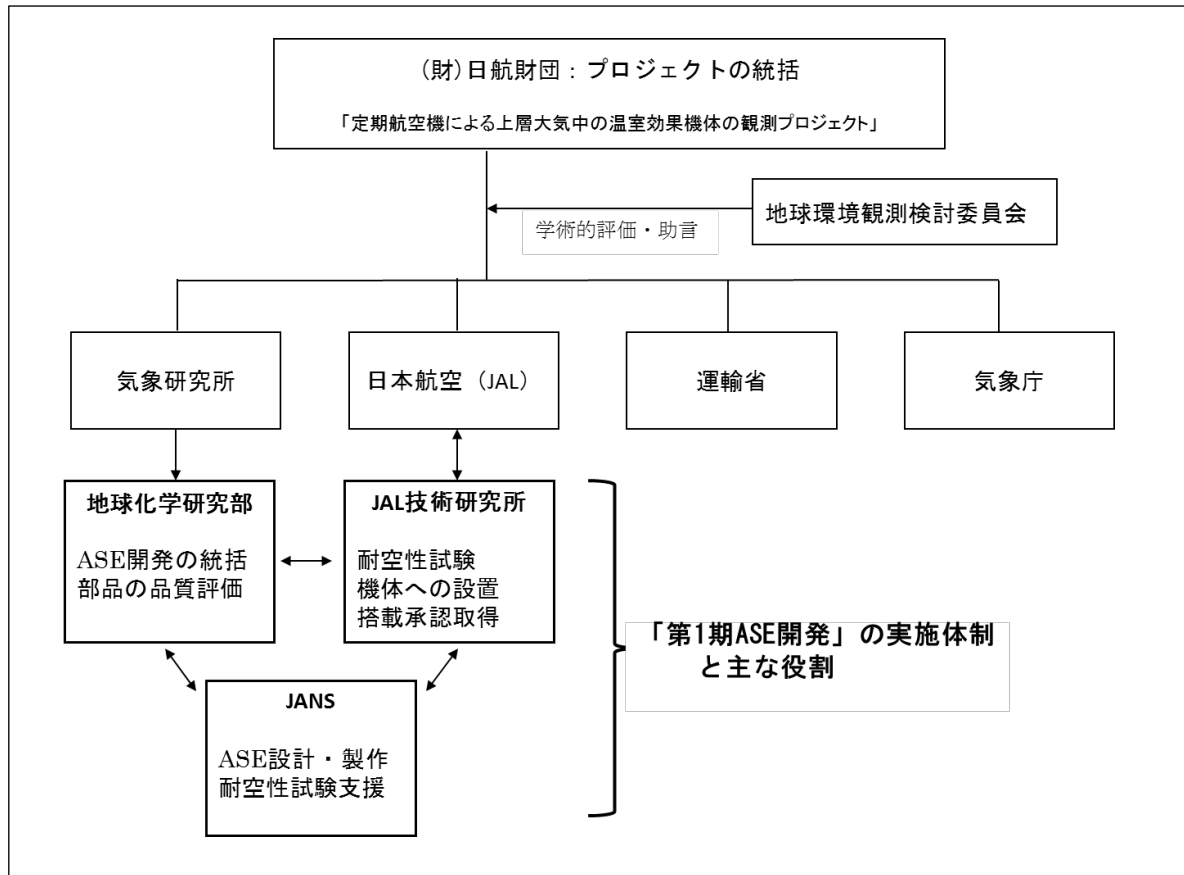


図 3 第 1 期プロジェクトの参画機関と ASE 開発の実施体制。

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、CO₂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。

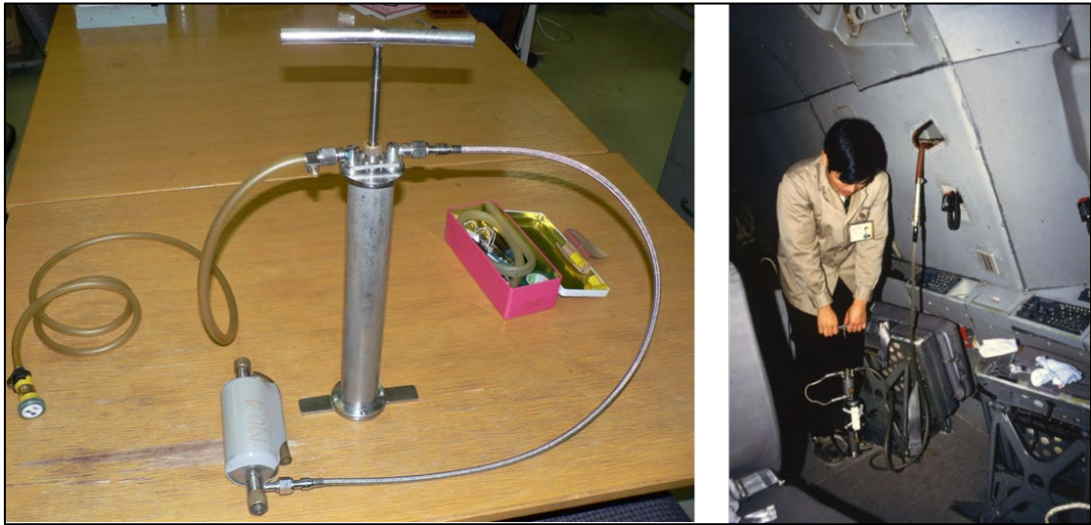


図 4 東北大学のサンプリング装置（左の写真）と機内でのサンプリングの様子（右の写真）。

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CO₂やCH₄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。

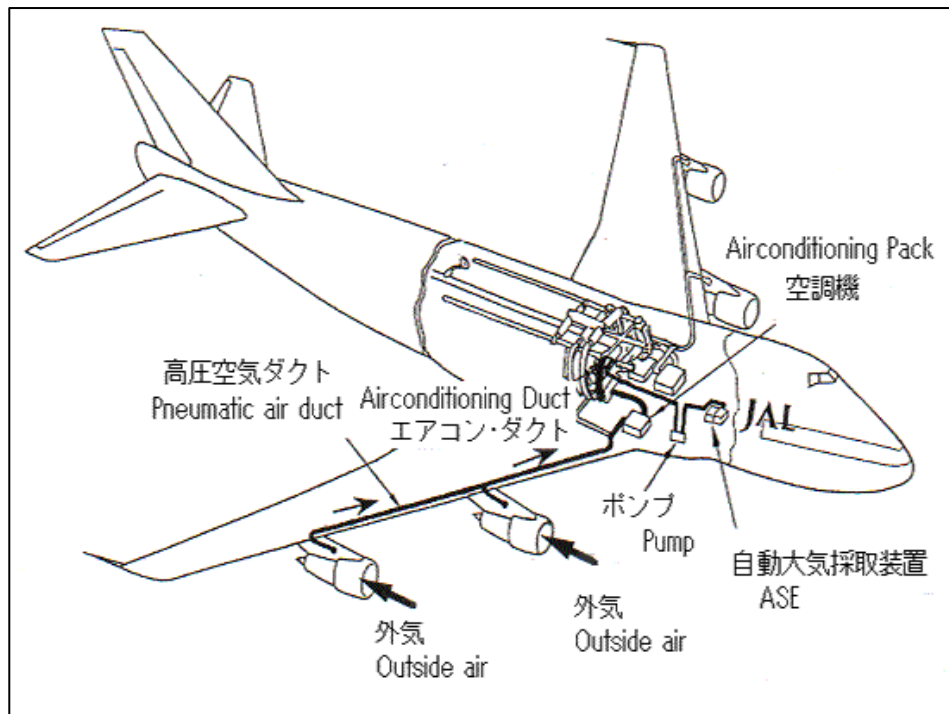


図 5 外気の旅客機内での流れを示した模式図。

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 CO_2 と 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。

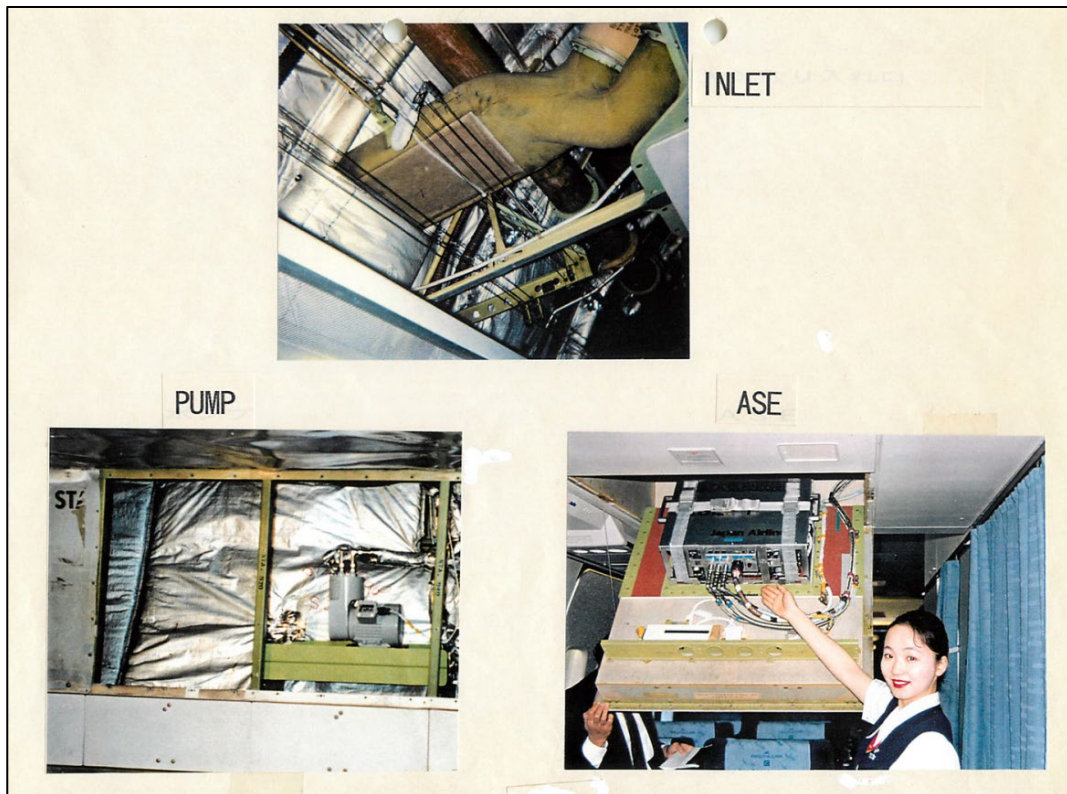


図 7 機体に搭載された観測装置の写真。INLET（空気取入口）は客室天井裏のダクト、PUMP（ポンプ）は貨物室、ASE（自動大気採取装置）は客室上部のライフ・ラフト・コンパートメントに設置。

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。

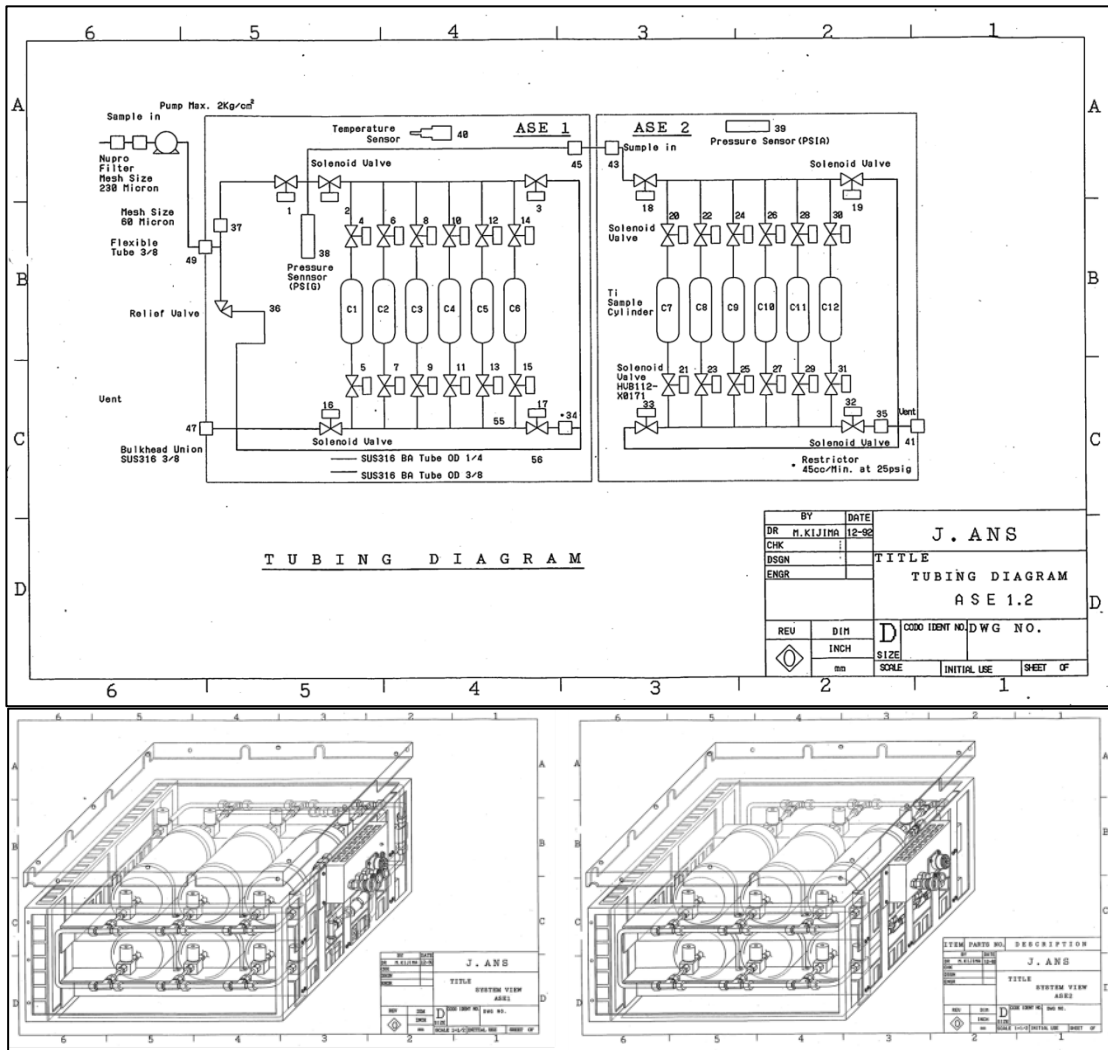


図 8 ASE の流路図面（上段）と装置の立体図面（下段）。

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。このよう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。

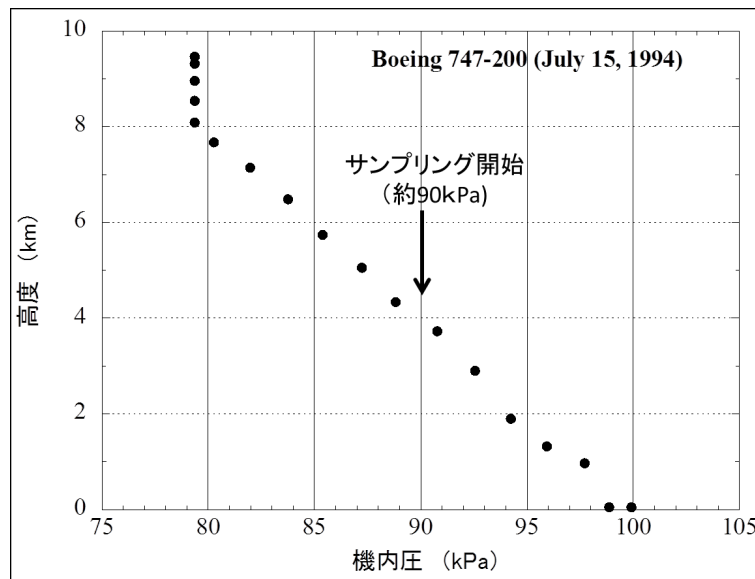


図 9 離陸 (Takeoff) 後の機内圧力の低下を実測した例。

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 CO₂ と CH₄ 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 CO₂ 分析と CH₄ 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。

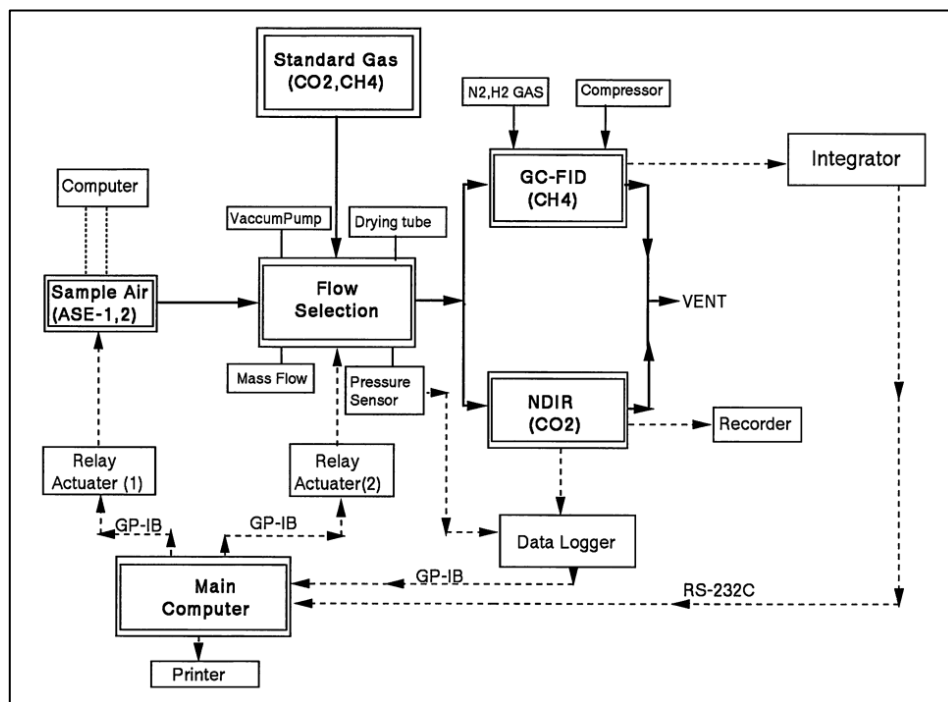


図 10 自動分析システムの流路 (実線) と電気・通信回線 (点線)。

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、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。

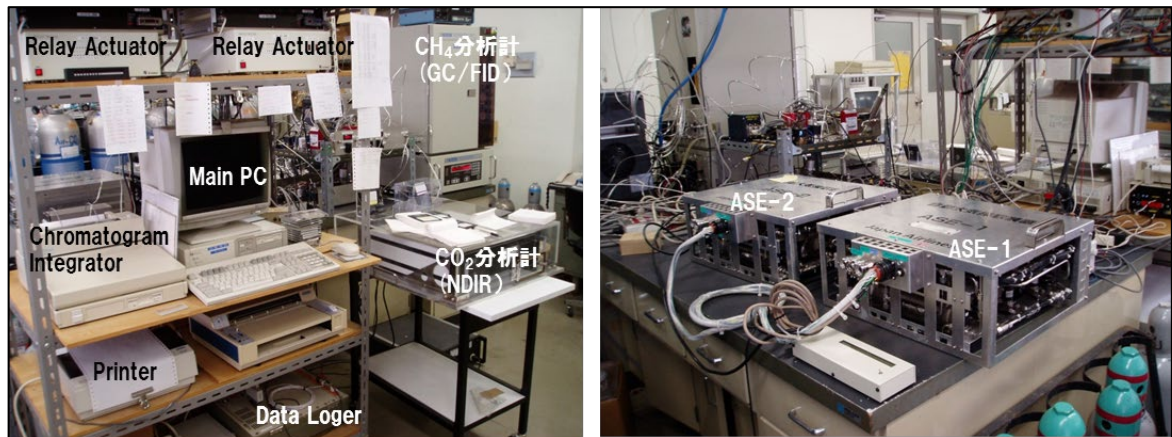


図 11 気象研究所の自動分析システム (左の写真) とその後ろに設置した ASE (右の写真)。

前述した通り、第 1 期のプロジェクトでは CO₂ と CH₄ 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、CH₄ を測定するために購入した GC/FID を改造して、CO と CH₄ 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。CH₄ 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、CH₄ 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、CH₄ 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が、キャリア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。

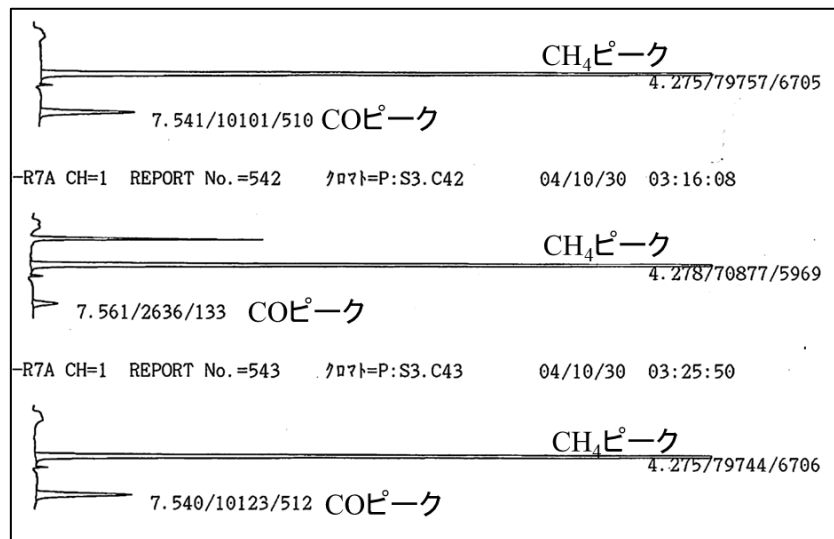


図 12 GC/FID 分析における CH₄ と CO のクロマトグラムの一例。

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 CO₂ と CH₄ 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)。

3. 第 2 期 ASE 開発

3-1 経緯

第 1 期の ASE による大気観測が 1993 年 4 月から開始されて 10 年目になろうとしていた頃、装置を搭載した JAL の旅客機ボーイング 747-200 型機がそろそろ退役を迎えようとしていた。後継機であるボーイング 747-400 型機に装置を移し替えないと、観測の継続ができなくなる時期が目の前に迫っていた。そのため、第 2 期 ASE 開発と同時に、機上で CO₂ 濃度を連続測定する新たな装置 CME の開発も含めた大型プロジェクトが計画された。この新たな開発を実行するために、2002 年にオール・ジャパン体制の組織化が進められた。第 1 期の観測を担当してきた気象研究所、JAL、日航財団に加えて、国立環境研究所、東北大学、航空宇宙技術研究所が参画し、さらに航空機エンジニアリングのエキスパートである JAMCO に参加が要請された。共同開発チームはつくられたが、想定された開発を実行するためには数億以上にのぼる多額の研究資金が必要と試算された。旅客機搭載用の装置開発には通常の研究費ではとても手が届かない、桁違いに膨大な費用がかかる。その理由は後述する内容を読み進めれば理解してもらえるが、一言で言えば「装置の安全性を証明するための費用」と言っても過言でない。第 1 期 ASE 開発では JAL 技術研究所が全面的な技術開発を担い、実質のエンジニアリング経費の支出は少なく、事業主体である日航財団の予算で賄うことができた。しかし、第 2 期 ASE 開発の時には JAL 技術研究所もなくなり、研究費の獲得が必要となった。

研究費獲得のため、2003 年 1 月 7 日に共同開発チームのミーティングが開かれ、文科省の科学技術振興調整費「産官学共同研究の効果的な推進」に応募することが提案された。この時点では、誰もが本当に開発を始められるのか半信半疑の状況で、応募書類の作成が急いで進められ、2003 年 2 月 28 日には研究費の申請書が提出された。3 年間の開発計画で、合計約 6 億（文科省が約 3 億円の研究費、民間が約 3 億円の拠出）の予算規模であった。その後の審査を経て、2003 年 6 月 3 日にプロジェクト「定期旅客便による温室効果気体観測のグローバルスタンダード化」の採択内定の通知が届いた。これでいよいよ大型共同プロジェクトが確定したが、その後、文科省と財務省との間で予算に関する協議が行われたため、実際にプロジェクトが動き出した時には、すでに 4 か月が過ぎ、汗ばむ季節を迎えていた。2003 年 8 月 5 日に新プロジェクトの初顔合わせとなるキックオフ会合が東京新橋のビルの一室で開かれた。当日は暑い夏の日で、メンバー全員が緊張した面持ちで集まってきたのを記憶している。航空機エンジニアからはこれから約 2 年半の短い期間で予定の開発を完了することは、通常の航空機部品開発では到底考えられない強行なスケジュールであるとの意見が大勢を占めた。しかし、プロジェクトはすでにスタート台に立っており、もう後戻りができないことはメンバー全員が分かっていた。図 13 に、本プロジェクトの全体構成と第 2 期 ASE 開発の実施体制を示す。開発は気象研究所地球化学研究部、JAL の技術部、JAMCO に加えて、JANS が参画した 4 つのグループで実施した。JANS は第 1 期 ASE 開発を行った豊富な経験をもつことから、この共同開発にも再び加わるようになった。

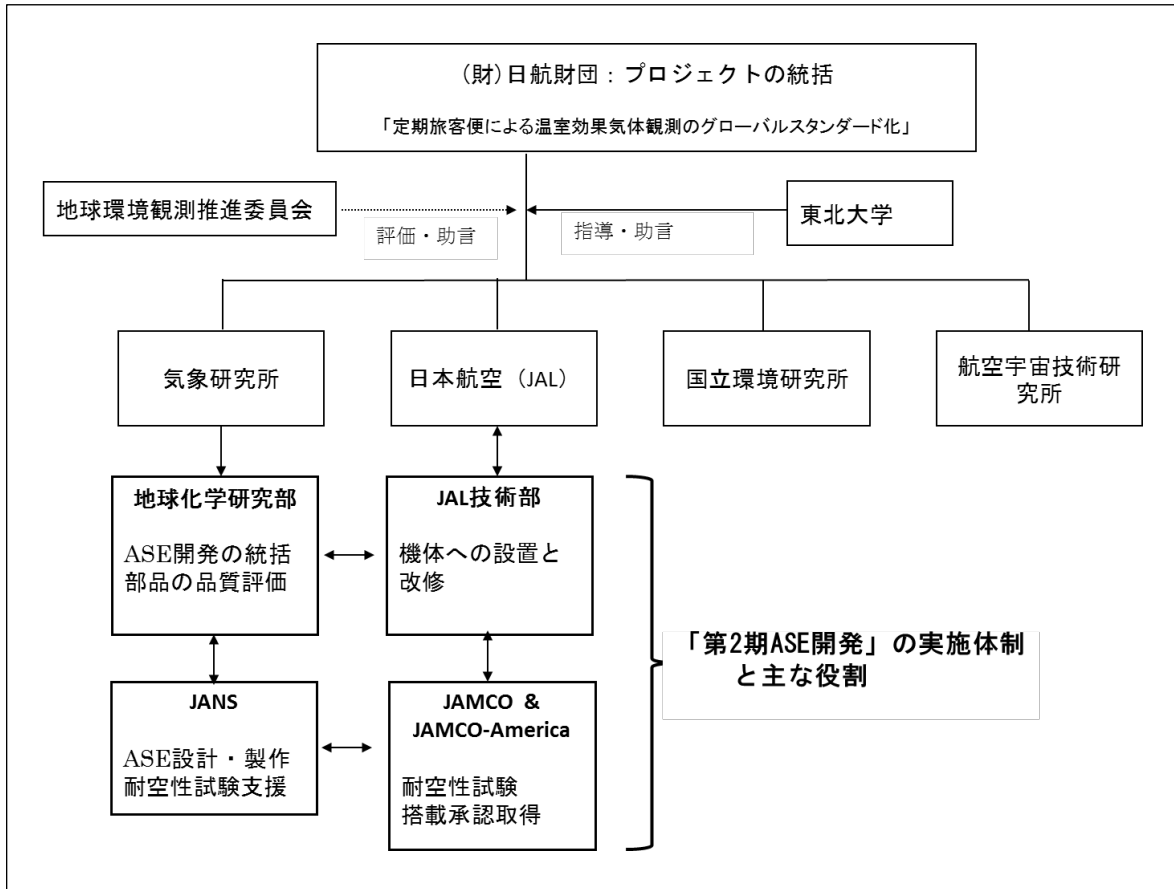


図 13 第 2 期プロジェクトの参画機関と ASE 開発の実施体制。

開発の最終ゴールは、第 2 期 ASE をボーイング 747-400 型に搭載できる「STC」を取得することであった。同時に、新たな CME 開発も STC 取得がゴールとなっていた。STC とは Supplemental Type Certificate の略号で、日本語では「追加型式設計承認」と呼ばれる。簡単に言えば航空局から装置搭載のためのライセンスを取得することである。今回の場合、「追加」が ASE を指し、「型式設計」はボーイング 747-400 型の機体本体を示す。したがって、全世界のボーイング 747-400 型機すべてに ASE を積むことができる、いわば万能型のライセンスを意味している。これに対して、第 1 期 ASE 搭載は「修理改造検査」による許可で、搭載できる機体は対象となる 1 機のみで、いわば限定型のライセンスであった。この場合、別の同型の機体に搭載するためには再び修理改造検査の審査・承認を受けなければならない。ちなみに、航空機を借用して行う単発的な観測のためのフライトでは、装置搭載は例えて言えば手荷物を持ち込む範疇で、STC を取得する必要はない。このようなライセンスの違いからも容易に想像できる通り、STC の取得には格段に厳しい審査が課せられる。したがって、費用も時間もかかることになる。今回の STC は、米国の連邦航空局 (FAA) と日本の国土交通省航空局 (JCAB : Japan Civil Aviation Bureau) の両機関から取得することになった。機体が米国のボーイング社製であることから、自国のメーカーの機体に精通している FAA からまず STC を取得し、その後 JCAB に STC の申請を行った。このため、米国で STC 取得に豊富な経験をもつ JAMCO-America が全体の手続きを代行することになった。一方で、日本国籍である JAL の機体に観測装置を搭載して運用するためには、JCAB から STC を取得する必要があった。

研究費獲得の申請と並行して、開発に関する予備的な技術検討もすでに開始されていた。2003 年 1 月 22 日に第 1 回の装置仕様に関する技術会合が開かれた。ここでは、新たな技術的進歩として、航空機から飛行データをリアルタイムで取り込みながら装置の作動を制御する課題が議論された。第 1 期 ASE 開発では、機内圧センサーを利用した方式による制御であったが、その後、PFIDS が導入されるようになり、これを観測装置に利用することが可能との提案が出された。続いて 2 週間後の 2003 年 2 月 6 日には第 2 回の技術会合がもたれた。この会合では、JAL のエンジニアによる機体設置場所の予備調査の結果と、JAMCO のエンジニアによる第 2 期 ASE の仕様書の初案が提示された。さらに、研究費の獲得が内定するまでの期間に、JAMCO による事前の準備作業として、ASE の耐空性試験方法の検討や装置改造に必要な部品の選定が進められていた。当時の技術会合資料を見返すと、装置搭載に関する基本的な構想が既にメンバー全員で共有できていたことが伺えた。第 1 期 ASE 開発が、第 2 期 ASE の技術開発のモデルケースとして大いに参考となったと言える。

3-2 システム配置

3-2-1 実機調査

事前調査で観測機材の搭載場所については大体の当たりがつけられていたが、それを実際に検証して配置を決定するために、まず実機調査が行われた。この調査には、想定された ASE の外寸に近い段ボール箱が持ち込まれた。これを機体の中に持ち込み、候補となる隙間（空間）に縦にしたり横にしたりしながら、どのように設置できるか検討が行われた。ちょっと原始的な方法に思えるが、空の段ボールは軽く、装置の配置をあれこれと調査するには非常に便利な道具である。図 14 には貨物室での段ボール調査の写真を載せた。航空機の場合には胴体が円形のために、図面よりも段ボールをあてがって確かめる方がより分かりやすい。また、装置を固定するための架台（ラック）を機体のどのフレームに取り付けられるかも検討することができた。さらに、その空間の周辺に航空機の運航にとって重要な装備品があるかどうか一目瞭然である。



図 14 段ボール箱を用いた実機調査。

3-2-2 装置の設置場所

実機調査によって、観測システム全体の機内配置と設置方法の目処が立った (Machida et al., 2008)。その概要を図 15 の写真に示す。ASE 本体は、前方貨物室後部の隔壁前面の隙間に置くことになった。4 個の大きな給水タンク (Water Tank) の隣の空間に縦置きで 2 個一組を並べて配置した。この場所は通常シートで覆われているが、ASE の設置場所だけワンタッチで着脱できるため、取付け取外し作業にも便利であった (図 15 の写真参照)。また、上部にしっかりしたフレーム (Floor Beam) が通っており、これに ASE 収納用のラックを固定できる好都合な場所であった。空気を供給するポンプ (PUMP) は、ASE に比較的近い左の胴体側壁の隙間に設置できることが分かった。ASE とポンプの電源は、前方貨物室の前にある電気室 (MEC: Main Equipment Center) から供給する配線を施す。同時に、この部屋にある PFIDS からフライト情報のデータを分岐させて ASE に送る配線を敷設することが可能であった。一方、採取空気の取り出し口は、前方貨物室の後方上部の客室の床下に設置してあるダクトに取り付けて、そこから配管をポンプまで引いてくるのが最も近道であることが分かった。なお、もう一つの CME 装置は ASE とは逆の給水タンク横の空間に設置することになった。このようなシステム配置を早い段階で決定することができたのは、「段ボール箱作戦」が功を奏したと言っても言い過ぎではない。

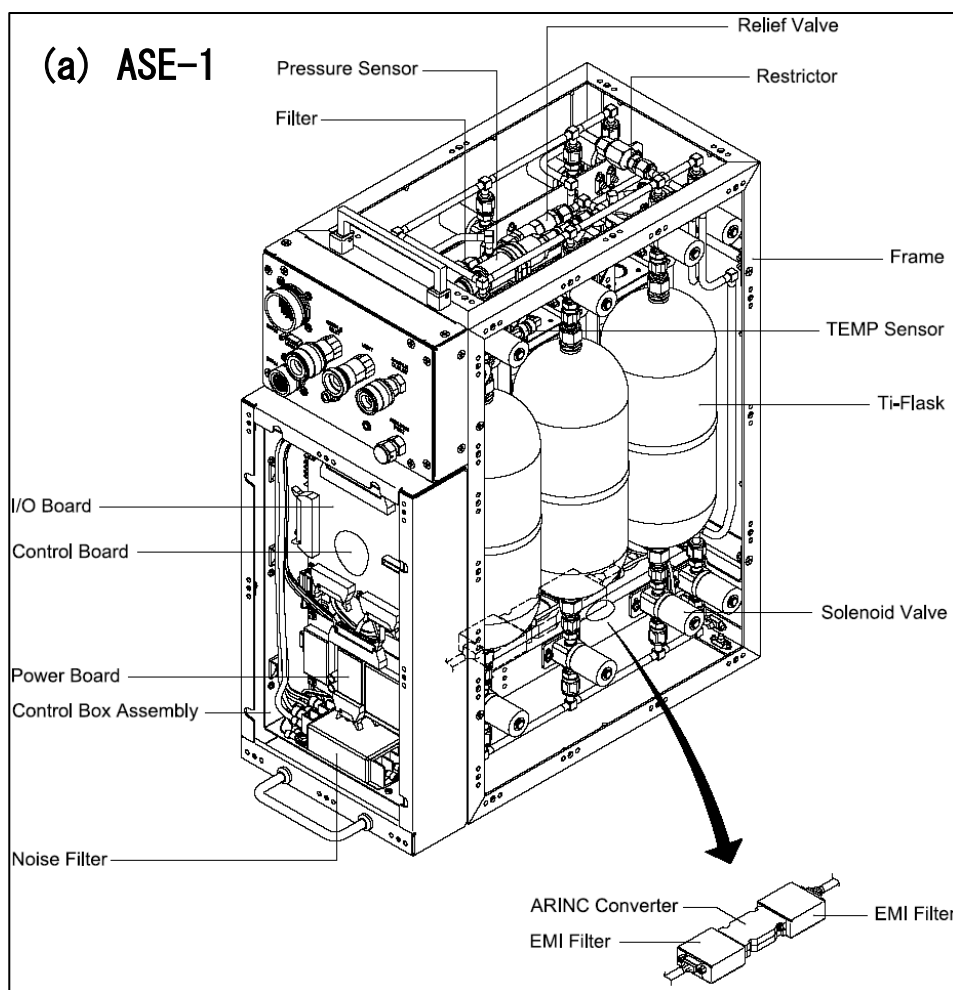


図 15 観測システムの配置。

3-3 ASE の設計と製作

第 2 期 ASE の空気採取の流路設計は基本的に第 1 期の ASE を踏襲することになった。つまり、フラスコを 6 本装着した 2 つのケース (ASE-1 と ASE-2) に分割して、合計 12 地点の空気を自動で順次フラスコに加圧充填する流路とした。ただし、それぞれのケースは、前述の実機調査で決められた設置場所に納まるようにサイズダウンする必要があり、それに合わせてケース内のフラスコのサイズや他の部品の配置のレイアウトを変更することになった。

初期設計で最も重要な検討事項は、将来の長期運用を見据えて、電気・電子ボード類、フラスコ、電磁弁、圧力センサーなどの ASE を構成する主要部品のすべてを新たに選定し直すことであった。10 年以上経過すると一部の部品は製造中止となり、違う部品に交換する必要がある。しかし、航空機搭載用の装置は、どんなに小さな部品一つでも異なる品番に変更する際は、航空局の審査と承認を受けなければ決して使用することはできない。これが一般の観測装置とは全く異なる点である。したがって、部品の選定は最も注意を払わなければならない重要な工程となる。図 16 には、選定に必要な主な ASE の部品リストを示した。



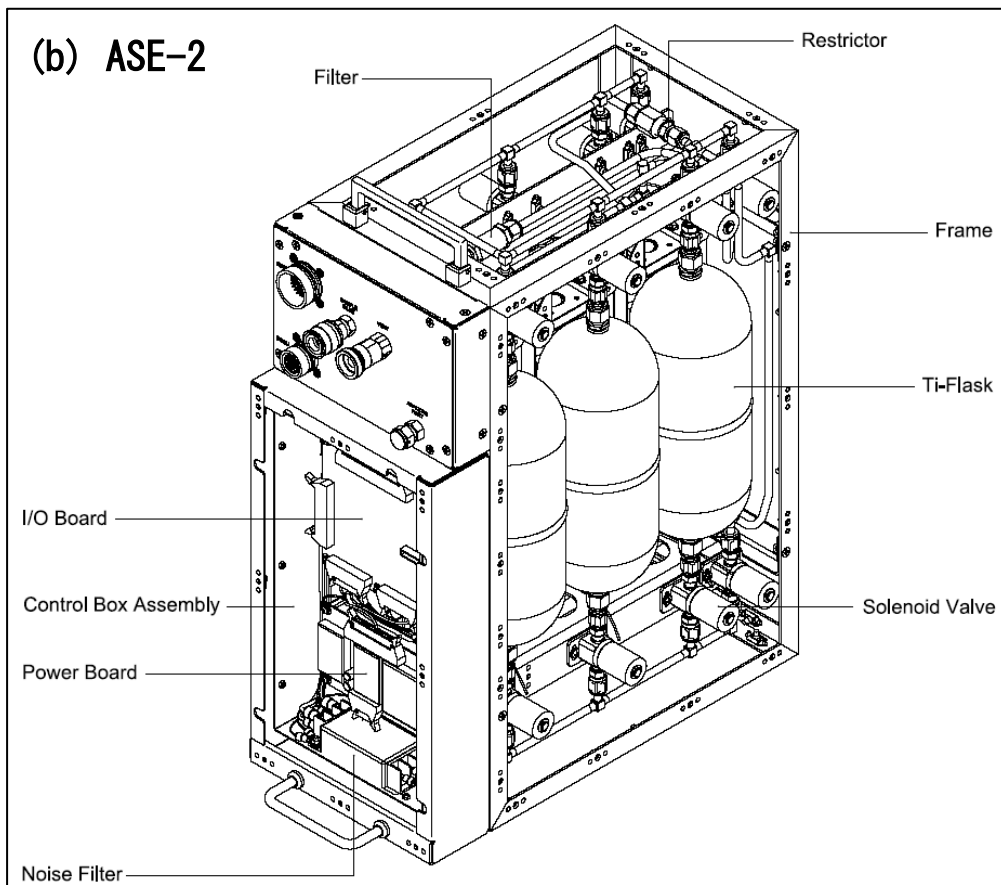


図 16 第 2 期 ASE-1 (a) と ASE-2 (b) モデルの立体図面。

部品選定に当たっては、STC を取得するための厳しい耐空性試験をクリアするために、可能な限り航空機に適合した部品を採用することが求められた。具体的に言えば、米国防総省が規定する装備品の耐久性能に関する規格の通称である「ミルスペック (MilSpecs)」や、FAA が規定する「FAR (Federal Aviation Regulations)」に適合する部品を指す。キャッチコピー的に表現すれば、「小さくて軽い、しかも丈夫で燃えない」部品である。ここで「燃えない」とは耐火性の意味で、航空機ではとても重要な要件の一つとなっている。一方で、航空機に適した部品であっても、大事な空気試料の汚染や濃度変化を起こすなど観測に支障をきたす部品や材質は採用できない。さらに、現実的な問題として調達に不都合が出る部品は諦めざるを得ない。つまり、開発スケジュールに支障をきたす納期のかかるものや、非常に高価なものは用いることはできない。このような多方面に配慮した部品の選定には大変な労力を要する。

2003 年 8 月のキックオフ会合を受けて、2003 年 9 月から部品の選定が本格的に開始された。選定で最も難航した部品としては、ASE を制御するための電気・電子ボード類であった。第 1 期の ASE と同様に、ボード類は JANS で特注製作する方向で進められた。その際、もう一つの装置である CME にも利用できるよう共通化したボードにして、CME の小型軽量化と操作性を向上させるかどうかで議論が白熱した。最終的には、予算や工期の点でボードの共通化は断念することになった。ASE の電気・電子ボード・ケース (Control Box Assembly) には主に以下の 4 つのパーツが組み込まれることになった(表 1)。

表 1 電子ボード内の主な部品リスト

①制御ボード (Control Board)	デバイスとしては、FPGA (field-programmable gate array), ROM, Clock, A/D Converter 等を含み、いわゆる CPU の役割を果たす。基本ソフトは ROM に書きこまれる。
②電源ボード (Power Supply Board)	機体から供給される 28VDC 電源を構成部品が必要とする電圧に変換する (DC-DC Converter)。ここでは、28VDC から 3 種類の電圧が供給されるデバイスを搭載 (3.3/5/12V)。ここには、安全装置として電流ヒューズ (Current Fuse ; 4A) と温度ヒューズ (Temperature Fuse ; 70° C) が組み込まれた。
③I/O ボード (I/O Board)	主に電磁弁やポンプの ON/OFF 信号の入出力に使用して、フォトカプラーを組み込んだスイッチング作動を行う。
④ノイズ・フィルター (Line Noise Filter)	電気ノイズの軽減のために使用。

図 17 左は、ASE-1 のボード・ケースの内部を撮影したものである。もう一つの重要な部品である、空気を供給するためのポンプとしては、第 1 期 ASE と同様にメタルベローズ社製のポンプ (MB-302 型) が選定された (図 17 中)。このポンプは航空機の搭載に適合した部品を用いて製作されているとのことであったが、事前に JAMCO によって電磁干渉試験や振動試験に関する基礎データを取得してから判断することになったため、採用決定までに時間を要した。さらに、ARINC 429 (Aeronautical Radio INCorporated 429) のデータ変換器 (図 17 右) をボード型にするかどうかの検討にも時間を要した。ARINC 429 とは航空機に搭載されている電子機器の間でやり取りされる 32 ビット・シリアルデータ・バスの代表的な規格の一つである。その他の部品についても慎重な選定が行われ、最終的に JANS に試作機 (プロトタイプ) 製作のゴーサイン (発注) が出されたのは、2003 年も終わろうとする 12 月 12 日となった。予想外に部品選定に時間がかかり、スケジュールの遅れを心配しつつ慌ただしく年が暮れた。



図 17 ASE の重要部品 (左から、ボード、ポンプ、ARINC429 変換器)。

2004 年 1 月の年明けから、JANS による設計図面の作成や部品の調達が急ピッチで始まった。フラスコにはチタン製のボトルを採用することになっており、1.2L 容量の既存の金型

があったため、それを利用して製作時間を短縮するのが当初の案であった。ところが、もう少し容量を大きくできないかという要求が急遽浮上し、再度サイズの検討が重ねられた。JANS によって図面の改訂が何度も繰り返し行われ、1.7L 容量まで大きくできることが分かってきたが、金型から製作する必要がある、費用と工期の点で変更できるかどうか、開発チームで検討が繰り返された。結局、プロトタイプ 1 号機には既存の 1.2L 容量のフラスコをまず組み込み、その後、1.7 容量のフラスコが製作できた段階で、それを収納するための固定方法（マウント）の設計変更を行うことで決着がついた。その間に、フラスコの保存性能試験も行われた。思わぬ変更が入ったものの、ようやく 3 月の終りに ASE のプロトタイプ機が完成した。それを使って、想定通りの動作をするかどうかの機能試験や、電磁干渉の影響を軽減するための試験を行いながら、JANS と JAMCO で改造と修正が繰り返された。最終的な完成型 ASE が出来上がったのは 2004 年 7 月で、製作が始まった 1 年前の 2003 年の夏から丸一年を要する大変な工程が終わった。CME の製作も同時に進める過酷なスケジュールであった。息つく暇もなく 8 月から、最大の山場となる耐空性試験が待っていた。

3-4 環境試験

3-4-1 環境試験とは

観測装置を旅客機に搭載するためには、その安全性を証明するための耐空性試験に合格することが必須であることはすでに述べた通りである。図面や計算による机上の安全証明ではなく、必ず実験を行って、取得したデータから実証することが求められる。航空機技術の分野では耐空性試験という言葉はあまり使われず、その代わりに「環境試験」と呼ぶのが一般的である。環境試験要綱の世界標準として、米国の航空機業界団体の航空無線技術委員会（RTCA : Radio Technical Commission for Aeronautics）が作成している「RTCA/DO-160」が広く利用されている。これには各種環境試験（Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment）に関する要件および試験方法が詳細に規定されている。実際の試験では RTCA/DO-160 に記載されているすべての項目が課せられるわけではなく、装置の特性に合わせて個別に必要な試験項目が取捨選択される。どの試験項目を実施するかは航空局の検査官によって最終的に決定される。環境試験の目的は当然ながら安全性の確保であるが、この試験に合格することによって、観測装置が正式な「航空機部品」の一つとして生まれ変わるという大きな意味を持つことになる。

環境試験の記載の一例を見ると、今回の ASE の温度試験（Temperature Test）では、「RTCA/DO-160D Section 4.5 Category A4」に基づいて実施したと報告された。この文中で、「160D」のアルファベット「D」は改訂の版（バージョン）を意味しており、試験はその時点での最新版に基づいて実施される。第 1 期 ASE の開発当時（1993 年）は「C」、今回（2004 年）の第 2 期 ASE では「D」であったが、現在（2018 年）では「G」が最新版となっている。版が改訂される度に適合基準が厳しくなり、時には改訂によって大幅に難度が変わる項目が出てくることもある。改訂が進んでも、旧版で過去に実施された試験を再度行う必要はない。ただし、観測装置に改造を加えて再度搭載の申請と承認を受ける場合には、その時点での最新版の試験要綱が適応されることになる。このため、大幅な改造になると、より高いレベルでの再試験項目が増えるために、全面的に装置全体の設計を見直すことになりかねない。次に、「Section 4.5」の数字は RTCA/DO-160 に記載されている試験項目の名前を指す。ちなみに、この例の「4.5」は温度試験の項目に相当する。さらに、「Category A4」の「A4」の記号部分は、試験項目の中で細かく分類されている試験条件の

違いを表わしている。Category 記号の区分は、主に航空機に与える影響の違いによって決まる。例えば、装置の設置場所は Category 区分の一つの重要な選択要因となる。客室に設置するのか貨物室に設置するのか、また、燃料タンクの近くかなどによって試験方法や判定基準が区分されている。以下に、今回の ASE 環境試験の主な項目について、その概略を解説する。

3-4-2 温度・湿度・高度試験

温度・湿度・高度に関する環境試験は大体どの装置でも共通して必要とされる基本的な項目となっている。下記に、今回の ASE について JAMCO 社内における事前の環境試験で実施された温度（表 2-1）と温度変化（表 2-2）及び、湿度（表 2-3）に関する試験内容の詳細を示す（表-2）。

表 2-1 温度試験の項目と内容

温度試験 (Temperature Test) (RTCA/160D Section 4.5 Category A4)	
①Section 4.5.1 Ground Survival Low Temperature Test	装置不作動状態で -55°C/3 時間以上（装置温度安定後）放置後装置が正常に作動することを確認。
②Section 4.5.1 Operating Low Temperature Test	-15°Cで装置が正常に作動することを確認（装置温度安定後最低 30 分）。
③Section 4.5.2 Ground Survival High Temperature Test	装置不作動状態で+60°C/3 時間以上（装置温度安定後）放置後装置が正常に作動することを確認。
④Section 4.5.2 Short-Time Operating High Temperature Test	+60°Cで温度安定後、最低 30 分間装置が正常作動することを確認。
⑤Section 4.5.3 Operating High Temperature Test	+40°Cで温度安定後、最低 2 時間装置が正常に作動することを確認。

表 2-2 温度変化試験の項目と内容

温度変化試験 (Temperature Variation Test) (RTCA/160D Section 5.2 Category B)	
①Section 5.0 Temperature Variation	+40°C~-15°Cの温度変化時に装置を動作させ、異常が無いことを確認。上記温度試験時に合わせて実施する。

表 2-3 湿度試験の項目と内容

湿度試験 (Humidity Test) (RTCA/D0-160D Section 6.2 Category A)	
①Section 6.0 Humidity	2 時間かけて相対湿度 95%、温度 +50°Cに、その後 6 時間保持した後、16 時間かけて温度を +38°C、相対湿度 85%以上にする。これを 2 サイクル繰り返した後、15 分後に機器を動作させ正常に作動することを確認。

温度試験は 4 つの異なる条件設定で実施された。温度範囲は-55°C~+60°Cであり、航空機が飛行する範囲における気温変動を想定して実験の幅が決められていると思われる。ASE を作動させた状態での試験は-15°Cと+40°Cの温度で行われた。それほど過酷な条件ではなく、問題なく終了した。また、湿度試験についても特段の不具合はなく、高い相対湿度（85%~95%）に晒しても正常に作動し合格の判定となった。温度・湿度試験は JAMCO 調布工場の試験器を用いて 2004 年 8 月 24 日~9 月 8 日にかけて実施された。図 18 の写真の通り、温度・湿度を制御できるチャンバーに ASE を入れて、外部に置いた PC で装置の作動状況をモニターして合否の判定を行った。



図 18 ASE の温度・湿度試験。

高度試験は、観測装置が気圧変動の影響を受けることなく正常に作動することを実証する実験である。当然のことながら、気圧は航空機の飛行高度に対応する環境要素である。試験は、異なる気圧の条件を作り出すことのできる 3 台の試験器を用いて実験が行われた。1 つ目の高度試験は 57.18kPa の低減圧下で装置の作動を確認するもので、2004 年 9 月 6 日に RCJ（日本電子部品信頼性センター）の試験器で行われた。2 つ目の急減圧試験は 11.60kPa まで急激に低圧にして作動を確認するもので、JAMCO 立川工場で 2004 年 10 月 4 日に行われた。急減圧は装置を入れたチャンバーと真空引きしたタンクを直結したバルブを開けることによって生み出される仕組みとなっている。3 つ目の加圧試験は 170kPa の高圧下に晒すもので、2004 年 12 月に JAMCO 調布工場で実施された。いずれも、問題なく終了した。以下に、3 つの高度試験の写真（図 19）と表に試験項目・内容（表 3）の詳細を示す。



図 19 気圧、急減圧、加圧試験。

表 3 高度試験の項目と内容

高度試験 (Altitude Test) (RTCA/D0-160D Section 4.6 Category A4)	
①Section 4.6.1 Altitude Test	15,000 ft 相当圧力 (57.18 kPa) に減圧し、装置が正常に作動することを確認 (装置温度安定後最低 2 時間)。
②Section 4.6.2 Decompression Test	75.26 kPa (8,000 ft) から最大運航高度相当の圧力 11.60 kPa (50,000 ft) に 15 秒以下で減圧し、最大 10 分間装置を作動させて異常が無いことを確認。
③Section 4.6.3 Overpressure Test	装置不作動状態で -15,000 ft 相当の圧力 (170 kPa) に 10 分間、その後通常圧力状態で正常に作動することを確認。

3-4-3 電気に関する試験

電気に関連した試験は、異常な電圧が装置に与えられた場合でも電気系統にダメージがなく、作動にも影響しないことを確かめるために行われる。予め ASE の電気系統に関する試験条件を勘案して、これに適合する電源・電子回路を組み込んだ特別仕様のボードを JANS で製作した。市販の汎用品に比べて費用はかかるが、環境試験による不具合があれば、修理改造の対策を容易に行える大きな利点がある。これが特注品にこだわった最大の理由であるが、もう一つの利点として装置組み込みの際のレイアウトの自由度も大きい。この特注ボードの使用により、D0-160D で規定されているいくつかの厳しい実験条件でも問題なく、良好な結果を得ることができた。以下に、電源入力試験（表 4-1）と電圧スパイク

試験（表 4-2）の詳細な内容を記した。図 20 は電圧スパイク試験の写真を示す。その他、静電気に関する試験（Electrostatic Discharge Test）も実施された。

表 4-1 電源入力試験の項目と内容

電源入力試験 (Power Input Test) (RTCA/DO-160D Section 16.0 Category A)	
①正常作動条件	最大 30.3V、最小 22.0V で各 30 分間入力し、装置の正常作動を確認。
②電源瞬断	電源を 2 回した遮断させ、装置の作動を確認。
③正常サージ電圧	28V→47V→40V→28V→17V→28V の電圧変化を 3 回繰り返す、装置の正常作動を確認。
④異常作動条件	最大 32.2V、最小 20.5V で各 5 分間入力し、装置の正常作動を確認。
⑤瞬間的な低電圧	7 秒間 12V に電圧を下げて、装置の正常作動を確認。
⑥異常サージ	28V→46.3V→37.8V の電圧変化を 10 秒間隔で 3 回繰り返す、装置の正常作動を確認。

表 4-2 電源スパイク試験の項目と内容

電圧スパイク試験 (Voltage Spike) (RTCA/DO-160D Section 17.0 Category B)	
①Section 17.0 Voltage Spike	正負の電圧スパイク (600V) を加える。それぞれの極性について、1 分以内に 50 回加える。



図 20 電圧スパイク試験。

3-4-4 電磁波に関する試験

電磁波に関する試験は、最も重要な項目の一つとして位置付けられている。特に、離着陸時の電磁波誘導システムや上空での自動操縦（オートパイロット）システムに与える影響が重視され、その審査基準も極めて厳しい。通称、EMI（Electro-Magnetic Interference）試験と呼ばれている。EMI 試験には大別すると 2 通りの項目が設定されている。一つは EMI 感受性試験で、これは電磁波が観測装置に対して誤動作などを引き起こさないどうかを調べることを目的としている。この試験はそれほど難易度の高いものではない。もう一つの項目は EMI 妨害性試験で、装置が発する電磁波が航空機の運航に影響を与えないレベルかどうかを調べることを目的としている。kHz から GHz の広い幅で発生する電磁波を測定するが、低周波数帯で問題が発生する場合が多い。通常、この妨害性試験を EMI 試験と呼び、観測装置にとっては最も難易度の高い試験である。D0-160D で規定されている両試験の周波数帯は以下の通りである（表 5-1、表 5-2）。

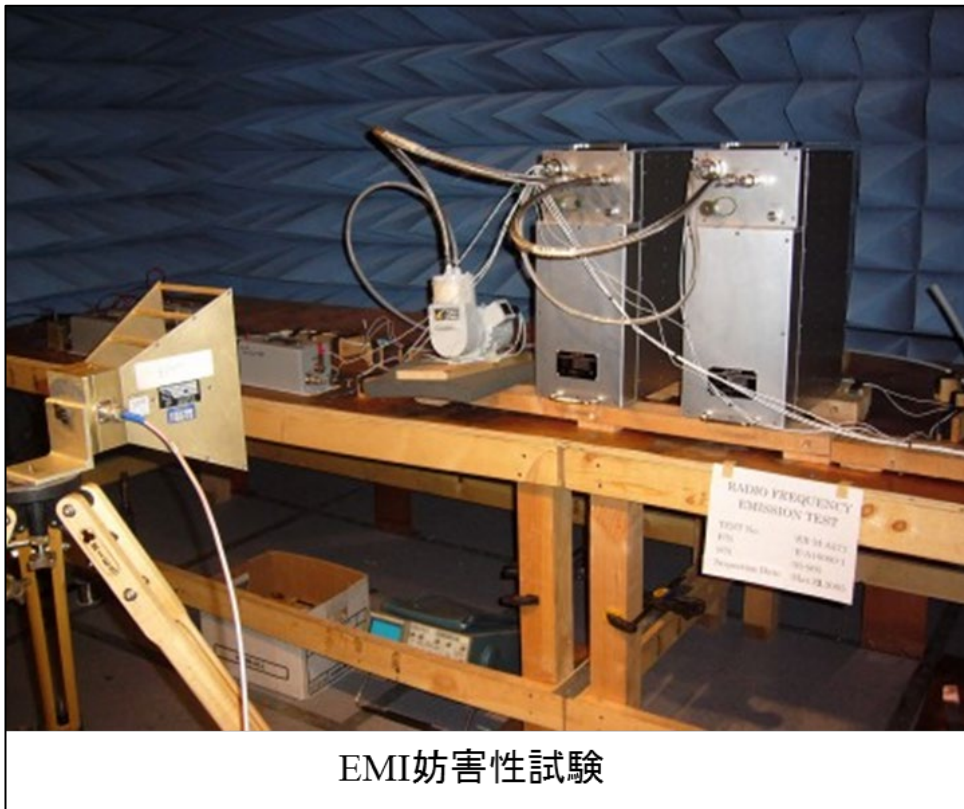
表 5-1 EMI 感受性試験の項目と内容

EMI 感受性試験 (Radio Frequency Susceptibility) (RTCA/D0-160D Section 20.0 Category T)	
①無線周波伝導感受性	10kHz ~ 400MHz
②無線周波放射感受性	100MHz ~ 8GHz

表 5-2 EMI 妨害性試験の項目と内容

EMI 妨害性試験 (Emission of Radio Frequency Energy) (RTCA/D0-160D Section 21.0 Category M)	
①無線周波伝導妨害性	150kHz ~ 30MHz
②無線周波放射妨害性	150kHz ~ 60GHz

EMI 妨害性試験と EMI 感受性試験とも JAMCO 調布工場で行われた。試験は外部の干渉を受けない専用の密室で行われる。観測装置と試験器の受信器（アンテナ）を D0-160D で定められた位置（距離）に設置し、装置を通常の観測モードで作動させてデータを取得していく。この試験では極度に低いレベルの電磁波を測定する。このため、あらかじめ測定対象以外の余計な電磁波の影響を排除して確認しておく必要がある。また、周波数帯毎に定められた位置関係が異なり、アンテナの種類も違うことから、何度も設置を変えては計測を行うことが繰り返され、手間のかかる試験である。大抵の場合、最初の試作装置では規定のレベルを超えてしまうことが多い。その場合は電磁波対策を行って計測をやり直し、規定のレベル以下になるまで対策と計測を繰り返す面倒な試験項目である。したがって、装置の設計の段階から、EMI 試験対策を考慮した開発を行うことが、後々の労力と時間を大きく軽減することにつながる。このため、ASE では EMI 対策のための修理改造が容易な特注の電気・電子ボードを採用することに大きな意味があった。図 21 に EMI 妨害性試験の写真を示す。



EMI妨害性試験

図 21 WMI 妨害性試験。

3-4-5 構造強度に関する試験

ASE の構造に関する強度を確認する試験は、主に 4 つの項目について実施された。強度試験は、通常の離着時における衝撃や重力加速度度に対する耐久性と不時着時の安全性を確認することを目的として実施される。この試験は特に慎重に実験を進める必要がある。試験中に破損や歪みが起こり、それがきっかけで修復できない致命的な損傷を招く恐れがあるためである。以下に、今回実施された 4 つの試験内容の詳細を列挙する（表 6-1, 2, 3, 4）。

表 6-1 衝撃試験の項目と内容

衝撃試験 (Operational Shocks and Crash Safety) (RTCA/DO-160D Section 7.0 Category B)	
① Operational Shocks (6G)	装置の 6 方向に対して Operational Shocks (6G) を印加し、異常が無いことを確認。
② Crash Shock (20G)	装置の 6 方向に対して Crash Shock (20G) を印加する。ゆがみ、変形は許容するが、取付部の破損がなく、装置が所定位置にとどまっていることを確認。

表 6-2 振動試験の項目と内容

振動試験 (Vibration Test) (RTCA/D0-160D Section 8.0 Category S)	
①Section 8.0 Vibration	装置取付場所により定められた振動を負荷して、装置内部に損傷がないこと、および装置が規定の性能を発揮し続けることを確認。10～2,000Hz のランダム振動を最小 1 時間、3 つの軸方向ごとに負荷する試験。

表 6-3 静強度 (旋回) 試験の項目と内容

静強度 (旋回) 試験 (Static Load Test) (D6-55441 Rev. D)	
①静強度 (旋回) 試験	供試品を機体搭載時と同じ固定方法で遠心加速機に取り付け、下記の 6 方向に最小 3 秒間の遠心加速度を印加し、取り付け部に破損なく所定の位置に止まっていることを確認。前方・後方・側方 (2 方向) は 12G、上方は 4.1G、下方は 8G を印加。

表 6-4 高圧破裂試験の項目と内容

高圧破裂試験 (Proof and Burst Pressure Test) (14CFR Part25, Section25.1438(b))	
①高圧破裂試験	常用圧力の 3 倍を負荷し、破裂が起こらないことを確認。

図 22 に強度試験で代表的な振動試験の写真を左側に掲載した。この試験は、試験機器として用いる加振器のテーブルに装置を乗せて、試験中に移動や共振のないように、特別に製作した分厚く重い治具で装置の周りをしっかりと固定する。試験が始まると、長短様々な周期の振動が連続して加えられるために、装置はブルブルと激しく震える状況が 1 時間程度続く。まさに「まな板の鯉」状態となる。その間、ASE を通常の観測モードで作動させ、異常が出ないかどうか、動作状況をモニターする PC 画面にくぎ付けとなる。同時に、装置に変化が生じていないかどうか、常に加振器上の装置を見守り続ける。もし、PC 画面や目視で異常が発生したことが分かると、直ぐに実験を中止しなければ修理できない大きな破損を招くことになる。後述するが、思わぬ不具合が発生することもしばしばあるので、加振器が止まるまでは気が抜けない。ASE 振動試験は 2004 年 8 月 18～20 日と 9 月 2 日に国内振動試験メーカーである IMV 社で 2 回に分けて実施された。この 2 回の試験の間に、最初の試験における不具合個所の改修が行われた。



図 22 振動試験（左の写真）と静強度試験（右の写真）。

もう一つの代表的な強度試験項目として静強度試験があり、別名、旋回試験とも呼ばれている。これは、航空機の離発着時には強い重力加速度を受けることを想定して、それに対する強度が十分であるかどうかを確かめることを目的とする。図 22 の右側の写真は 2004 年 8 月 23～24 日に公益財団法人鉄道総合技術研究所で実施された静強度試験を開始する前に撮影したものである。通常ではあまり見かけない珍しい実験装置である。長いアームの先端に ASE が固定されている。このアームを回転させることによって、強い重力加速度を装置に加えることができる大型の実験装置である。試験では 4～12G 程度の負荷をかける。F1 や戦闘機では 3～4 G と言われているので、装置にとっては厳しい条件となる。装置は 5 つの異なる向きに置き換えられては、その度に回転させられ、どの方向からも強い重力負荷に耐える構造体であることが要求される。試験後、装置に多少の曲りや歪みがあってもよいが、機体取り付け部に損傷がなく、所定の位置に止まっていることが認められれば合格となる。なお、この旋回試験施設は防衛省や JAXA 等の限られた特殊な機関しか保有していないため、事前の準備と日取りの確保が現実的な問題としては重要な要件となる。幸い、今回の試験は問題なく終了した。

3-5 環境試験の対策

米国での審査官立会いによる本番の環境試験に備えて、事前に日本において各種の環境試験が実施されたのは上述の通りである。これは、環境試験に不適合となる不具合箇所を見つけ出して、その対策を施す改造を行うことが主な目的である。対策を行った後に再度試験を実施するが、審査基準を満たす良好な実験データが取得できなければ対策と試験を繰り返し行うことになる。事前の試験結果は単なる手持ちのデータではなく、審査官にすべて提出しなければ米国での FAA 立会いの試験に臨むことはできない。なお、環境試験の基本的な考え方は、航空機の運航に影響を与えないことを実証することである。したがって、装置の外部に影響が及ばない限りは、内部で破損が起こっても装置の基本的な機能が維持されていれば問題とはならない。分かりやすい例で言えば、貨物室の荷物を収容するコンテナは内部で発火や破損が起こっても外部にその影響が飛び火しない耐性をもっていれば合格となるわけである。以下に、日本における ASE の環境試験で実際に発生した問題とその対策を施した事例をいくつか紹介する。

3-5-1 EMI 試験対策

当初から最も懸念されていた課題は、ASE 内部の電気・電子ボード類から発生する電磁波干渉ノイズを測定する EMI 試験をどう乗り切るかであった。ASE に取り付けられた電子基板はできるだけ低ノイズとなる設計が施された特注仕様であった。しかし、それらを構成する多数の電子部品は汎用品であり、厳しい基準が課せられた EMI に適合するかどうかは実験を実施してみなければ分からない。

図 23 は、対策を施す前と後の EMI 試験の結果を比較した一例である。赤の線 (Limit) が DO-160D で規定されているノイズ・レベルで、電磁波放出をこれ以下に低減することが定められている。対策前の状態は明らかにレベルを超えたピークが 8 MHz と 20 MHz 前後の周波数帯に認められた。また、図中の緑で囲った 150 kHz から 2 MHz 以下の低周波数帯にも大きくレベルを超えるノイズが発生しているのが見て取れる。この実験は 2 MHz 以上の条件設定で実施されており、2 MHz 以下の周波数帯のデータは有効でないことを示している。つまり、周波数帯によって異なる実験条件が設定されているためである。

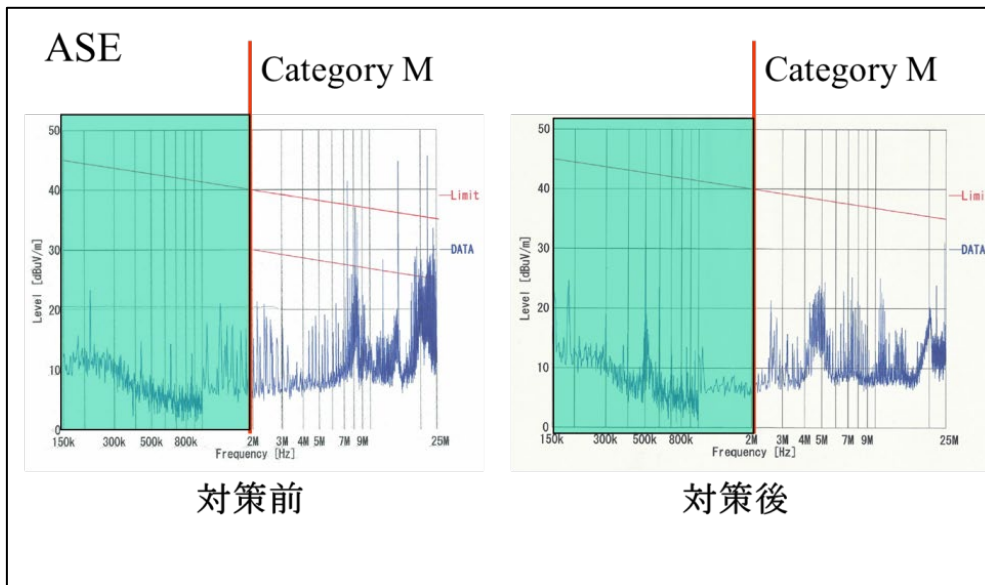


図 23 EMI 試験結果の一例 (対策前と対策後の比較)。

対策後の結果を見ると、無事、Limit 線の規定レベル以下にノイズを押されたことが見て取れる。今回の場合は、ARINC429 コンバーターから発生するノイズが影響していることが分かり、最終的に、ジュラルミンの板を加工したシールド・ケースで全体を覆うことで解決された。EMI の原因とその対策は理論的な考察に基づくものではなく、いわゆる「勘」に頼るしかない一面がある。一つ一つの部品に対策を施しては試験を実施してその結果をチェックする繰り返しの作業が行われるのが一般的である。したがって、エンジニアの知識・経験と技量が対策に費やす時間を大きく左右することになる。もう一つ EMI で注意すべき点として、対策後に 4~5 MHz の周波数帯のノイズが対策前に比べて逆に増大していたことである。幸いレベルを超えるものではなかったが、この例のように、EMI 対策には微妙な「匙加減」があり、実際に試験データを取得しないとその特性変化を予想することは難しい。今回の ASE では用いられなかったが、EMI 対策の一つとして、電源周りの配線にフェライト・コアを取り付けて、電磁波ノイズを軽減する方法も良く利用される。

どの位置にコアを設置するかで効果が大きく異なる。さらに EMI 試験では、観測装置と受信機の位置など、試験条件の僅かな変化が結果に影響を与える。したがって、本番の環境試験に臨むためには、可能な限りノイズを落としておく努力が必要である。ただし、過剰な対策は禁物である。シールドを増やす改造によって、重量変化やそれに伴う重心位置の移動、またはサイズの変更が起こると、EMI 以外の試験結果にも影響を及ぼし兼ねないばかりか、機体への取付けの大幅な設計変更を余儀なくされることに繋がる。必要最小限度の対策は、まさに「匙加減」と言える。

3-5-2 振動試験対策

振動試験は、環境試験の中でも最も注意を要する項目の一つである。実際に問題が起こった一例として、ARINC コンバーターを固定したネジが取れた事例がある。ネジが取れた結果、コンバーター内部の電子ボードが強く振動し、接続してある電気配線が損傷してしまった。この対策として、モールドと呼んでいる樹脂を注入してポートと配線を含めて全体を覆って固定する方法が取られた。モールドは振動対策として有効な方法であるが、一方で、モールドされた部品はもはや樹脂だけを取り除くことはできない状態となり、修理再生が不可能となる。高価な部品にはできるだけ使用したくない、「最後の手段」と言える。振動試験では試験機（加振機）に観測装置を固定するための治具を用いるが、これを固定するネジの締め付けにも十分注意を払う必要がある。治具の固定が不完全だと、致命的な損傷に発展しかねないからである。

もう一つ実際に起こった事例として、ASE に装着されたフラスコと電磁弁の間を繋ぐ配管を補強するために用いた板状のフレームに問題が発生した。この補強板の幅が変わる箇所に見つかった。この事例は航空機エンジニアによれば構造的な設計ミスとの診断であった。板の幅が変わる部分が「角張って」おり、振動に対して弱い構造となっていた。本来ならば、このような箇所はカーブをつけた曲線状にすべきで、明らかに強度設計の初歩的なミスであった。このような点は、通常の観測装置の開発では全く注意は払われない。旅客機観測装置には細部に亘る強度設計に対する配慮が必要とされる。

3-5-3 耐水試験対策

ASE の耐水試験 (Waterproofness Test) は、約 2m の高所から 280L/m²/h の水量を 15 分間装置に流して、作動に異常が起こらないかどうかを調べる過酷な試験である。

この試験では、水が電気・電子ボードを覆っているシールド・ケースの隙間から入り、作動が不能となった。このため水漏れの防止対策として、ケースの隙間をモールドして気密性を高めた。この試験装置は他の試験にも使用できず、代替の新たな試験用の ASE をもう一台製作しなければならなくなった。

3-6 ライセンスの取得

3-6-1 FAA の立会い環境試験

これまで述べてきた修正対策を施した後、新たな試験観測装置を複数台製作して、米国での FAA 立会いの試験に持ち込むことになった。日本で行った事前環境試験のデータは FAA に送付され、すべての項目が要求されるわけではない。図 24 に示す通り、比較的問題の少ない湿度試験等は省略されるが、振動試験、EMI 試験、静強度試験、耐水試験等の厄介な項目は漏れなく FAA の立会い試験が実施されることになった。悪く解釈すれば、日本で取得した難易度の高い項目のデータを FAA は一切信用していないことととれる。米国での試験は 2005 年 2 月 14 日からカリフォルニアにある公式試験場である ITL 社で始まった。立ち会う FAA の審査代理人である DER (Designated Engineering Representative) は一人ではなく、専門分野毎にそれぞれのエキスパートが担当し、試験項目によって異なる DER の指示で試験が行われる。試験データの良し悪しのチェックは勿論のこと、歪みや損傷が生じていないか入念な確認が行われ、合否の判定が下される。このため、JAMCO から派遣された航空機エンジニアは連日緊張の日々を過ごすことになる。

JAMCO社内試験	FAA立ち会い試験
1. Temperature and Altitude	1. Temperature and Altitude
2. Temperature Variation	2. Temperature Variation
3. Humidity	3.
4. Operational Shock	4.
5. Vibration	5. Vibration
6. Waterproofness	6. Waterproofness
7. Magnetic Effect	7.
8. Power Input	8. Power Input
9. Voltage Spike	9. Voltage Spike
10. Audio Frequency Susceptibility	10. Audio Frequency Susceptibility
11. Induced Signal Susceptibility	11. Induced Signal Susceptibility
12. Radio Frequency Susceptibility	12. Radio Frequency Susceptibility
13. Emission of Radio Frequency Energy	13. Emission of Radio Frequency Energy
14. Electrostatic Discharge (ESD) Test	14. Electrostatic Discharge (ESD) Test
15. Proof and Burst Pressure Test	15. Proof and Burst Pressure Test
16. Decompression Test	16.
17. Overpressure	17.
18. Static Load Test	18. Static Load Test

図 24 社内試験項目と FAA 立ち会い試験項目の比較。

日本で事前に試験を行い対策しても、本番の立会い試験では不測のトラブルが生じることが多々ある。裏を返して言えば、環境試験の条件がいかに厳しいものを物語っている。ASE では幸い大きなトラブルはなかったが、別の観測装置 CME では温度ヒューズの破損が起これ、試験が一旦中断した。日本から派遣された JAMCO の航空機エンジニアは直ちに破損した試験用の装置を滞在先のホテルに持ち帰り、修理・改造を行うことになった。同時に、日本でサポートする航空機エンジニアにも連絡が入り、修理した個所の図面を改訂する作業が時差とは関係なく行われた。米国に改訂図面が送付されなければ、試験を再開することはできない。予定している試験の期間は限られているため、最速で修正を進めなければ間に合わない。まさに瀬戸際の戦いで、滞在しているホテルの部屋が作業室に変わり、予備装置を分解して、部品の交換が行われた。その時の室内の写真を見ると修羅場の様相を呈しており、エンジニアの大変な苦労が痛いほど伝わってきた。

もう一つの予期しない出来事が起こった。米国での環境試験は、あらかじめ FAA の審査

官の承認を受けた項目と実験条件で実施されるが、今回は、突然にこれまで日本では実施していない追加の試験が要求された。日本ではその成否が確認出来ていないために、ぶっつけ本番の緊張した試験となった。これは FAA の審査官の判断で決定されるため、審査を受ける JAMCO は拒否することはできない。その背景には、審査官は装置の安全性の証明に対して重い責任を負っていることがある。装置による機体への影響に対して少しでも安全性への懸念があれば、それを払拭するために追加試験の実施を要請できる権限を持っている。今回の ASE の場合には、高温試験が追加された。温度+80°Cで3時間置いて作動を確認する試験であるが、事前の温度試験では最高温度は+60°Cまでしか経験していない。ASE の場合には異常高温事態の時に、+70°Cで複数の安全機能が働いて装置を緊急停止する機能を装備している。おそらく、+70°Cの緊急停止機能が万が一作動しない時でも装置に問題が発生しないかどうかを確認するために、+80°Cの実験が追加されたのではないかと思われる。審査官の DER が試験の状態を見つめている時、JAMCO のエンジニアは祈るような気持ちで見守っていたのではないだろうか。結果的には問題なく終了した。

3-6-2 機体改修

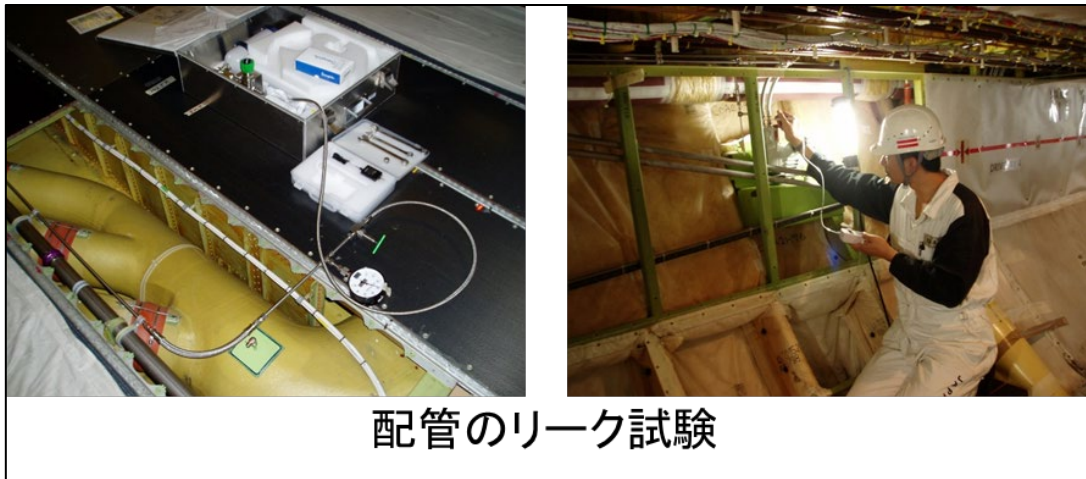
環境試験が終了すると、次は機体改修の工程に移る。ASE に関する機体改修の主な内容は、装置とポンプを設置する台座（ラック）の取付けと、空気取入口とその空気配管の敷設、それから電源と ARINC 信号を引き込む電気配線である。今回、改修対象となった機体は JAL 所有の Boeing 747-400 型機で、機番は「JA8917」であった。ちなみに、機番とは一機毎に割り振られた識別番号で、「JA」は日本国籍であることを指す。意外と気が付かないが、どの機体の胴体後部にも機番がペイントされている。

ASE の機体改修は 2005 年 10 月に成田空港内にある JAL の格納庫（ハンガー）で行われた。この時期は、ちょうど当該機が重整備（M 整備）に入る時で、それに合わせて ASE のための改修作業も組み込まれた。M 整備とは規程の飛行時間を超える前に義務付けられた一番大掛かりな定期点検で、数年に一度の割合で 1 か月程度の期間かけて行われる。このタイミングを狙って改修を実施しなければならない。これ以外の時期に旅客機を止めることは膨大な費用がかかるばかりか、JAL 全体の運航計画にも重大な支障をきたすことになる。M 整備では機体内部の装備品がほとんど全部取り外されて機体の骨格だけがむき出しの状態となる。このため、ラックや配管・配線の設置が容易で、改修作業には最も適した条件が整う機会でもある。この M 整備の予定時期を中心として、観測装置の開発計画のすべてのスケジュールが決められることになる。もし、M 整備の日程が予定より早まると、その前の工程もすべて前倒しで進めなければならない。スケジュール管理がとても重要となる。

機体改修に必要な部品はすべて JAMCO-America を通して米国で調達され、品質保証を受けた後に梱包されたキット（部品一式）が日本に空輸される。部品とその取付け位置・方法・強度計算等の資料や図面は事前に FAA に提出され、審査承認を受けておかなければならない。例えば、配管・配線をどの経路で這わせて、弛みの無いようにどの位置で固定するかなど、安全性に万全を期す観点から細かく記載されている。一方で、研究者にとっては部品の材質や取付け位置が空気採取の汚染を引き起こさないかどうか、観測に対する影響を見極める重要な工程である。さらに、装置の取付け取外しを行う航空整備士の作業性についても配慮する必要がある。このように様々な観点から総合的な検討が必要となるため、機体改修については開発の早い段階から議論が始められる。

部品の取付けを含めた機体改修の作業は、FAA で承認を受けた図面と手順に従って JAL の

航空整備士が実施する。このため、配管の接続に使用するスウェージ・ロックの取付けの際、締め付けるナットの回転数まで指定した細かな指示書が渡され、その通りに航空整備士が作業を行うことが原則となっている。大げさな言い方をすると、資格を持っている航空整備士以外は機体改修に指一本触れてはならない。それは、汎用品の配管パイプでもスウェージ・ロックでも、機体の中では「航空機部品」として位置付けられているためである。観測に重大な影響を及ぼしかねない部品の取付けは、研究者が必ず立ち会うことが重要である。例えば、空気配管を接続する場合、管の出入り口の部位が作業油等で汚れると、採取する空気試料が汚染される恐れがある。このため、作業前に航空整備士に注意を促し、取付けが完了するまで注視する。このような観測にとって必要な要件は航空機の安全性に影響を与えるものでなければ、作業指示書には全く記載されていない。特に重要な注意事項として、配管接続の僅かな漏れ（リーク）でも測定結果に重大な影響を与えかねないことがある。このため、配管全体をヘリウムガス（He）で加圧充填して圧力計に変化しないことを確かめた後、さらに高感度の He 検出器を用いてすべての配管接続部の漏れを丹念に検査することを実施した。図 25 にリーク試験を実施している写真を示した。試験方法については、事前に研究者と協議して詳しい手順書が準備され、それに沿って航空整備士が行う。この時も研究者が立ち会い、配管後にリークがないことを確認した。



配管のリーク試験

図 25 リーク試験器（左の写真）と試験の様子（右の写真）。

通常、機体改修は JAL と JAMCO の航空機エンジニアが改修作業をチェックするため、研究者は全行程に立ち会うことはない。たまたま作業を行っているハンガーを訪れた際、予期せぬパニングが発生し、改修作業が一時中断する場面に出会った。図面通りに部品の取付けができない箇所があることが判明した。これを受けて、担当の航空機エンジニアが直ぐに取付けを変更するための図面の改訂を行い、FAA に連絡をとった。図面の軽微な変更でもすべて FAA の検査官の承認を得るまでは作業を進めることはできない。幸い、素早い対処のお蔭で改修作業がほどなくして再開され、スケジュールに影響なく事なきを得た。原因は、航空機の図面上には出てこない機体毎の個体差があり、その微妙な構造体の違いが今回のトラブルを招いたとのことであった。このような事例はなかなか事前には把握できない。このため、改修期間中は航空整備士をサポートする JAL と JAMCO の航空機エンジニアがハンガーに常駐して、作業の工程を確認していくことになる。

機体改修を終えると、FAA から調査・試験・検査の実施を委任された代理人である DAR (Designated Airworthiness Representative) が来日し、図面通りに改修されているかど

うかのチェックが行われる。DAR は図面と資料を片手に、すべての改修箇所について入念に調べていく。DAR は一人ではなく、構造や電気等それぞれの専門分野のエキスパートに分かれているため、複数の DAR が来日して検査が行われる。

3-6-3 最終試験

機体改修の確認が終わると最終試験となる。最終試験とは実機に装置を搭載して作動した状態で、実際の航空機の運航状況下において問題がないかどうかを調べるものである。機体改修の DAR に代わって、次は DER が来日し、立会いの試験が実施された。今回は主に電気・電磁波の影響を調べる試験が中心で、地上試験（Ground Test）と飛行試験（Flight Test）の 2 つに分けて行われた。すでに述べたように、ポンプを含めた ASE 自体は厳しい環境試験に合格しているため、通常は問題がないはずである。しかし、航空機システムとして搭載した際に、装置単体では起こらない何らかの複合的要因で発生する不具合も含めて、現実の運航環境下でも実証することが要求される。もちろん、機体改修に手違いがないかどうか調べることも兼ねて、徹底した安全性能に対する審査が実施される。

地上試験としては、Ground Function Test, Ground EMI Test, Ground Harmonics Test が実施された。Harmonics Test は、航空機に搭載した空気採取用のポンプが AC115V/400Hz で作動することから、機体側の AC Bus および他の機器に及ぼす電氣的な影響がないことを確認する目的で実施された。実際の運航下を再現した試験となるため、エンジンを作動させた状況で行われる。このため、エンジンの爆音を軽減する特殊な格納庫、Noise Reduction Hanger の中で実地検査が実施された。

飛行試験（Flight Test）は EMI/EMC Flight Test を中心に行われた。EMC（Electro Magnetic Compatibility）は飛行中に電磁干渉と電磁感受性の両方に問題がないこと（電磁両立性）を調べる試験である。航空機に ASE を搭載して飛行中に作動させ、航空機に装備されている電子機器類に影響がないことを実際の飛行で確認するものである。2005 年 10 月 20 日に、成田—大分を往復する Boeing 747-400 による試験飛行が行われた。

3-6-4 STC 発行

試験飛行が終わると、第 2 期 ASE 開発の最終目的である STC がようやく発行される。図 26 に STC の写しを掲載した。FAA の STC は 2005 年 10 月 26 日に審査官のサイン入りで発行された。その後、JCAB の STC は平成 17 年 11 月 2 日の日付で日本式の公印が押されたライセンスとして取得された。たった紙切れ 2 枚の証明書であるが、これによって観測装置が「航空機部品」として生まれ変わったことになる。機体改修を受けた 747-400 型機はこの証明書が発行されて初めて旅客機として運航に復帰することになる。STC 発行が予定より遅れることになれば、JAL 全体の運航計画に大変な影響がでるため、開発担当の航空機エンジニアは胸をなでおろす瞬間でもあった。



図 26 ASE 搭載を承認する FAA の STC (左の写真) と JCAB の STC (右の写真)。

開発した観測装置システムは特許取得には至らなかったが、特許出願日 2007 年 10 月 12 日「航空機搭載型大気自動フラスコサンプリング装置」出願番号「特願 2007-266387」として特許申請した記録が残された。残念ではあったが、今後、同類の申請に対して先取権を主張する根拠資料として重要な意味をもつものとなった。

3-7 ASE の整備と運用

ASE を旅客機に搭載して観測するためには、その整備と運用に多くの関係者が協力してあたっている。前述した通り、STC 取得後の ASE は「航空機部品」として扱われるため、規則に則って JAL の航空整備士が機体への搭載を行うことになる。

図 27 は ASE の運用の一連の流れを示している。予め定めた手順によって実施される。観測が終わって空港に機体が到着し、乗客・乗員が降りた後、直ちに機体から ASE が取り卸される。作業には 2~3 人の航空整備士があたり、1 人は手元を電灯で照らしていることが多い。設置場所は昼間でも意外と暗いため、ASE に限らず他の整備作業でも機体でしばしば見かける光景である。航空整備士にとって電灯は誰もが携帯する必需品となっている。

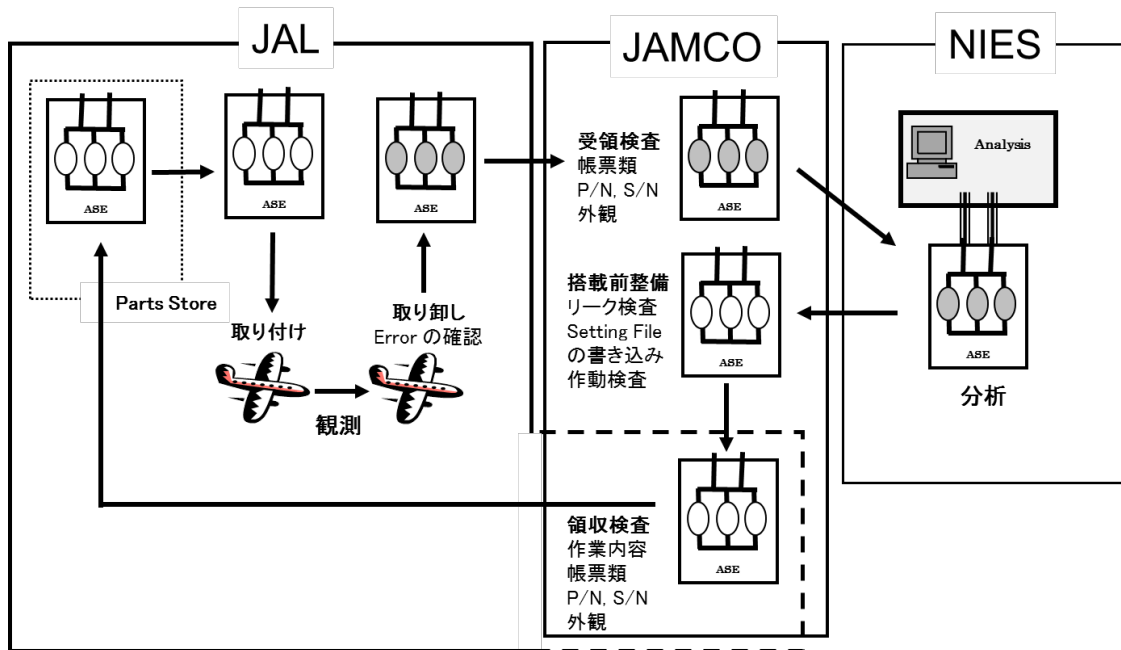


図 27 ASE 搭載の一連の流れ。

ASE はジュラルミンの専用輸送ケースに収納され、JAMCO に運ばれる。まず品番や外観等を確認する受領検査が行われ、その記録が帳票に残される。一旦試料の分析のために国立環境研究所に持ち込まれ、温室効果ガスの分析を行った後に、再び JAMCO に返送される。JAMCO では次の観測に備えて、検査を行い不具合箇所が見つければ部品の交換などの整備を実施する。また、飛行中の一連の作動を地上で再現するために試験用の航空機運航データ（位置情報等）を出力させて、模擬的なシミュレーション実験も毎回実施する。最後に、本番の観測用のプログラムが ASE に入力されて整備が終了となる。JAMCO における検査・整備はすべて CMM (Component Maintenance Manual) と呼ばれる分厚い手順書に従って行われ、その整備記録が保管される。CMM は ASE を構成するすべての部品とその取付け方及び、その検査方法が詳細に記載されており、整備に必要なすべての情報が含まれている基本資料となっている。資格を持っていない研究者は装置の整備や検査作業には直接関与できないために、事前に観測にとって必要不可欠な整備要件を整備関係者と協議し、その内容を CMM に反映することが重要となる。作業は CMM で定められたチェック項目をすべて実施して、必ず整備記録を残すことが義務づけられている。

次に、JAL に返送され、品番や外観等を確認する領収検査が行われ、倉庫 (Parts Store) に運び込まれて次の搭載を待つことになる。領収検査の意味は、JAL が自社の機体に搭載する ASE について、航空機部品としての品質保証の責任を負うことである。このため委託先の JAMCO の整備に対して定期的に立入検査を実施する。これら一連の定められた手順を踏むことによって、ASE の安全な運用が担保されている。同様な手順は他の航空機部品の運用についても全く同じである。搭載に当たっては、研究者の観測要望を聞き、どの機体にいつ ASE を取り付けるかを JAL の運航や整備を計画する部署で調整が行われる。このように、ASE 観測には多くの人々が関わり、その連携によって初めて観測が実施できる。したがって、一つの観測データでも大変貴重なものとなる。2005 年 12 月に第 2 期開発による ASE が豪州シドニー航路に就航する JAL 機に搭載され、それ以降も順調に観測が継続された (Matsueda et al., 2008; Matsueda et al., 2015; Matsueda et al., 2019)。

4. まとめ

旅客機搭載型の ASE の開発を通して得た重要な技術的要件と知見を以下に列挙した。今後の開発に参考となることを期待する。

- 1) 乗客に配慮した設計
- 2) 航空整備士の作業性を重視
- 3) STC 取得後は航空機部品扱い
- 4) 全自動制御のための PFID からのフライト情報
- 5) 二重の安全機能の装備
- 6) 高圧基準値は 280kPa
- 7) 耐空性試験（環境試験）を想定した設計
- 8) 開発の始まりは実機の事前調査
- 9) EMI 試験は最難関項目
- 10) 機体改修時の入念なリーク試験
- 11) 耐火性のある部品の選定
- 12) 重整備に合わせた開発スケジュール
- 13) 共同開発における目標共有の重要性

5. 謝辞

第 1 期 ASE 開発では全くの手探りの状況の中で、JAL 技術研究所の杉山之男氏、大河内洋氏、高橋竹志氏による特段の協力と指導を頂いたことに心より感謝します。また、その後の第 2 期 ASE 開発を含めて、数多くの方々の支援を受けました。関係者全員の名前を記すことはできませんが、日本航空、JAMCO、JAL 財団の皆様には心より御礼を申し上げます。

最後に、ASE 開発とその後の長期観測を継続する上で、大きな励みとなった出来事を紹介したい。初めて旅客機観測計画について国際会議で報告したのは、1992 年 1 月 5 日～10 日にかけて米国カリフォルニアの Huntington Beach で開催された CH₄ の国際会議であった。ちょうど、最初の開発の山場となる 1992 年 1 月 29 日の試験飛行が直前に迫った時期であった。この会議は当時の大気化学の一線の科学者が一同に会した会合で、その後ノーベル化学賞 (1995 年) を受賞した 2 人の科学者 (F. S. Rowland と P. J. Crutzen) も参加していた。この時発表した我々の観測計画に対して、カリフォルニア大学アーバイン校の Ralph J. Gicerone 教授から高い評価と開発成功を期待する暖かい励ましを受けた。その際、CH₄ の濃度だけではなく、その同位体比の測定にも挑戦すべきとの熱意のこもった助言を頂いた。当時、同位体を測定するためには大量の空気試料が必要で、設計していた ASE では十分な量の空気試料が得られないことを言い訳がましく説明した。この時の出来事はずっと気になっていたが、その後の分析技術の進歩によって、少量の空気でも CH₄ 同位体比の測定ができるようになった。そして、ASE で採取した上空大気の CH₄ 同位体比が東北大学の高精度測定装置によって初めて実測され、論文として発表することができた (Umezawa et al., 2012)。教授の先見の明の通り、大変興味深い結果が得られた。実に、20 年の長き時を経て、Gicerone 教授の助言に応えることができた。しかし、この観測結果を直接お伝えする機会はなく、2016 年に教授の訃報を知らせる追悼の記事がネイチャー誌とサイエンス誌に掲載された (Molina and Janda, 2016; Holdren and McNutt, 2016)。ご冥福をお祈りする。

6. 参考文献

- Brenninkmeijer, C. A. M., P. J. Crutzen, H. Fischer, H. Güsten, H. Hans, G. Heinrich, J. Heintzenberg, M. Hermann, T. Immelmann, D. Kersting, M. Maiss, M. Nolle, A. Pitscheider, H. Pohlkamp, D. Scharffe, K. Specht and A. Wiedensohler, 1999: CARIBIC-civil aircraft for global measurement of trace gases and aerosols in the tropopause region. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 1373-1383.
- Brunner D., J. Staehelin, D. Jeker and H. Wernli, 2001: Nitrogen oxides and ozone in the tropopause region of the Northern Hemisphere: Measurements from commercial aircraft in 1995/1996 and 1997. *J. Geophys. Res.*, **106**, 27673-27699.
- Duncan, B. N., I. Bey, M. Chin, L. J. Mickley, T. D. Fairlies, R. V. Martin and H. Matsueda, 2003: Indonesian wildfires of 1997: Impact on tropospheric chemistry. *J. Geophys. Res.*, **108(D15)**, 4458.
- Holdren, J. P. and M. K. McNutt, 2016: Ralph J. Cicerone (1943-2016). *Science*, **354** (6316), 1107.
- 本多毅, 2011: 民間航空機による温室効果ガスの観測—サンプリング手法の確立と今後—。 *航空技術*, **No.674[11-05]**, 40-46.
- Ikegami, K., K. Okada and Y. Zaizen, 1991: Sea-salt particles in the middle troposphere over the tropical Pacific Ocean., *Pap. Meteorol. Geophys.*, **42**, 31-41
- Inoue, H. Y., H. Matsueda, T. Midorikawa and Y. Sugimura, 1991: Atmospheric CO₂ and CH₄ observed during the flight of International Strato/Tropospheric Air Chemistry I. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **42**, 45-56.
- Kondo, Y., S. Iwasaka, A. Iwata, T. Ogawa, Y. Sugimura and Y. Makino, 1991: Measurements of nitric oxide and ozone in the troposphere from mid-latitudes to equator. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **42**, 21-29.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa and T. Ogawa, 2008: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1744-1754.
- Marengo, A., V. Thouret, P. Nédélec, H. Smit, M. Helten, D. Kley, F. Karcher, P. Simon, K. Law, J. Pyle, G. Poschmann, R. V. Wrede, C. Hume and T. Cook, 1998: Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, an overview. *J. Geophys. Res.*, **103**, 25631-25642.
- Matsueda, H., H. Inoue and M. Ishii, 1993: Latitudinal distributions of methane in the upper troposphere and marine boundary air over the Pacific in 1990. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 695-698.
- 松枝秀和・吉川久幸, 1995: 旅客機観測のための自動大気採取装置の開発。 *気象*, **No.459**, 4-8.
- Matsueda, H. and H. Y. Inoue, 1996: Measurements of atmospheric CO₂ and CH₄ using a commercial airliner from 1993 to 1994. *Atmos. Environ.*, **30**, 1647-1655.
- 松枝秀和, 1998: 森林火災と地球環境。 *森林科学*, **24**, 29-34.
- Matsueda, H., H.Y. Inoue, Y. Sawa, Y. Tsutsumi and M. Ishii, 1998: Carbon monoxide in the upper troposphere over the western Pacific between 1993 and 1996. *J. Geophys. Res.*, **103**, 19093-19110.
- Matsueda, H. and H. Y. Inoue, 1999: Aircraft measurements of trace gases between Japan and Singapore in October of 1993, 1996, and 1997. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2413-2416.
- Matsueda, H., H. Y. Inoue, M. Ishii and Y. Tsutsumi, 1999: Large injection of carbon monoxide into the upper troposphere due to intense biomass burning in 1997. *J. Geophys. Res.*, **104**, 26867-26879.
- 松枝秀和, 2000: 定期航空機を用いた上部対流圏における微量気体分布の観測研究—1999年度堀内賞受賞記念講演—。 *天気*, **47**, 767-775.
- Matsueda, H., H. Y. Inoue and M. Ishii, 2002a: Aircraft observation of carbon dioxide at 8-13 km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus*, **54B**, 1-21.
- Matsueda, H., S. Taguchi, H. Y. Inoue and M. Ishii, 2002b: A large impact of tropical biomass burning

- on CO and CO₂ in the upper troposphere. *Science in China (Series C)*, **45**, 116-125.
- 松枝秀和, 2005a: 旅客機を利用した大気微量気体の長期観測. *ぶんせき*, No.9, 490-495.
- 松枝秀和, 2005b: 地球温暖化を監視する旅客機. *PILOT*, No. 2, 6-11.
- Matsueda, H., T. Machida and Y. Sawa, 2008: Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new air sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 1-17.
- Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa and Y. Niwa, 2015: Long-term change of CO₂ latitudinal distribution in the upper troposphere. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 2508-2514.
- Matsueda, H., R. R. Buchholz, K. Ishijima, H. M. Worden, D. Hammerling and T. Machida, 2019: Interannual variation of upper tropospheric CO over the western Pacific linked with Indonesian fires. *SOLA*, **15**, 205-210.
- Molina, M. and K. Janda, 2016: Ralph J. Cicerone (1943-2016). *Nature*, **540**, 342.
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki and M. Tanaka, 1991: Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, **43B**, 106-117.
- 長田真司, 2006: 航空機搭載型大気観測装置の開発について. *航空技術*, No.613[06-04], 44-50.
- Sakamaki, F. and H. Akimoto, 1991: Measurement of light nonmethane hydrocarbons (C₂-C₅) in the western Pacific during the INSTAC-I flight campaign (1989.3). *Pap. Meteorol. Geophys.*, **42**, 11-19.
- Taguchi, S., H. Matsueda, H. Y. Inoue and Y. Sawa, 2002: Long-range transport of CO from tropical ground to upper troposphere: A case study in October 1997. *Tellus*, **54B**, 22-40.
- Tanaka, M., T. Nakazawa and S. Aoki, 1987: Time and space variations of tropospheric carbon dioxide over Japan. *Tellus*, **39B**, 3-12.
- Umezawa, T., T. Machida, K. Ishijima, H. Matsueda, Y. Sawa, P. K. Patra, S. Aoki and T. Nakazawa, 2012: Carbon and hydrogen isotopic ratios of atmospheric methane in the upper troposphere over the western Pacific. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 8095-8113.

7. 参考資料

7-1 英略語一覧

略語	英語	日本語（意味）
ARINC 429	Aeronautical Radio INC. 429	（航空機用のシリアルデータバスの標準規格の一つ）
ASE	Automatic air Sampling Equipment	自動大気採取装置
CARIBIC	Civil Aircraft for the Regular Investigation of the Atmosphere Based on an Instrument Container	（旅客機観測プロジェクト名）
CME	Continuous CO ₂ Measuring Equipment	CO ₂ 連続測定装置
CMM	Component Maintenance Manual	部品整備マニュアル
CONTRAIL	Comprehensive Observation Network for TRace gases by AirLiner	（旅客機観測プロジェクト名）
DAR	Designated Airworthiness Representative	FAAから委任された代理人（調査、試験、検査）
DER	Designated Engineering Representative	FAAの審査代理人（承認、承認推薦）
DOT	United States Department of Transportation	アメリカ合衆国運輸省
EMC	Electro Magnetic Compatibility	電磁両立性
EMI	Electro-Magnetic Interference	電磁波干渉
FAA	Federal Aviation Administration	米国連邦航空局
FAR	Federal Aviation Regulations	連邦航空規則
GC/FID	Gas Chromatograph equipped with Flame Ionization Detector	水素炎イオン化検出器を備えたガスクロマトグラフ
GC/HgO	Gas Chromatograph equipped with HgO	酸化水銀検出器を備えたガスクロマトグラフ
IAGOS	In-service Aircraft for a Global Observing System	（旅客機観測プロジェクト名）
INSTAC	InterNational Strato/Tropospheric Air Chemistry	（旅客機観測プロジェクト名）
JAL	Japan Airlines	日本航空
JAS	JAPAN AIR SYSTEM CO., LTD	東亜国内航空
JCAB	Civil Aviation Bureau of Japan	国土交通省航空局
MilSpecs	Military Specification	アメリカ国防総省仕様書
MRI	Meteorological Research Institute	気象研究所
MOZAIC	Measurement of Ozone and Water Vapor by Airbus In-Service Aircraft	（旅客機観測プロジェクト名）
NDIR	Non-Dispersive Infrared analyzer	非分散型赤外分析計
NOXAR	Measurements of Nitrogen Oxides and Ozone Along Air Routes	（旅客機観測プロジェクト名）
PFIDS	Passenger Flight Information Display System	（旅客機の客室モニター映写のシステム）
RTCA	Radio Technical Commission for Aeronautics	米国航空無線技術委員会
STC	Supplemental Type Certificate	追加型式設計承認
TOTCAP	Tropospheric Ozone and Tracers from Commercial Aircraft Platforms	（旅客機観測プロジェクト名）

7-2 年表

年月日	出来事
1989年3月	INSTAC-I（航空機観測）実施
1990年4月1日	日航財団設立
1990年2月～3月	INSTAC-II（航空機観測）実施
1990年8月	INSTAC-IIの記事掲載（気象研究所ニュース8月号）
1990年10月	INSTAC-III（航空機観測）実施
1990年12月21日	事務連絡回覧（「アイデア募集」）
1991年3月5日	JAL機観測提案の会議（羽田空港のJALのハンガーにて）
1991年4月	Nakazawa et al. (1991)論文出版
1991年4月16日	JAL技術研究所との初会合（気象研究所にて）
1991年5月8日	日航財団との初会合（日航財団にて）
1991年9月	第1期大気観測プロジェクトの発足
1991年9月5日	気象研究所とJAL技術研究所との間で技術会合
1991年9月18日	気象研究所とJAL技術研究所との間で技術会合
1992年1月5日～10日	メタン国際会議（米国カリフォルニア）
1992年1月29日	試験飛行（採取空気比較実験）
1992年3月13日	第1回の地球環境観測検討委員会
1992年11月～1993年3月	耐空性試験（第1期ASE開発）
1993年4月9日	試験飛行（実機における耐空性試験）
1993年4月23日	初ASE観測フライト（JL764便、JA8127機）
1994年7月15日	試験飛行（JA8131機による機内圧調査）
2003年1月7日	第2期開発チームの初会合
2003年1月22日	第1回技術会合
2003年2月6日	第2回技術会合
2003年2月28日	科学技術振興調整費プロジェクトの申請
2003年6月3日	プロジェクト内定の通知
2003年8月5日	第2期ASE開発プロジェクトのキックオフ会合
2003年12月12日	ASE製作開始（発注）
2004年7月	改良型ASE製作の完了
2004年8月18～20日	1回目の振動試験
2004年8月23～24日	静強度試験（公益財団法人鉄道総合技術研究所にて）
2004年8月24日～9月8日	温度・湿度試験（JAMCO調布工場にて）
2004年9月6日	高度試験（日本電子部品信頼性センターにて）
2004年9月2日	2回目の振動試験（再試験）
2004年10月4日	急減圧試験（JAMCO立川工場にて）
2004年12月	加圧試験（JAMCO調布工場にて）
2005年2月14日	米国での耐空性試験（ITL社にて）開始
2005年10月	機体改修開始（成田空港のJAL格納庫にて）
2005年10月20日	試験飛行（実機における耐空性試験、JA8917機）
2005年10月26日	FAAのSTC発行
2005年11月2日	JCABのSTC発行
2007年10月12日	ASEの特許出願
2012年9月	メタン同位体の論文出版（Umezawa et al., 2012）
2016年11月5日	Ralph J. Cicerone教授 死去

気象研究所技術報告一覧表

- 第 1 号 バックグラウンド大気汚染の測定法の開発 (地球規模大気汚染特別研究班, 1978)
Development of Monitoring Techniques for Global Background Air Pollution. (MRI Special Research Group on Global Atmospheric Pollution, 1978)
- 第 2 号 主要活火山の地殻変動並びに地熱状態の調査研究 (地震火山研究部, 1979)
Investigation of Ground Movement and Geothermal State of Main Active Volcanoes in Japan. (Seismology and Volcanology Research Division, 1979)
- 第 3 号 筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設 (花房龍男, 藤谷徳之助, 伴野登, 魚津博, 1979)
On the Meteorological Tower and Its Observational System at Tsukuba Science City. (T. Hanafusa, T. Fujitani, N. Banno, and H. Uozu, 1979)
- 第 4 号 海底地震常時観測システムの開発 (地震火山研究部, 1980)
Permanent Ocean-Bottom Seismograph Observation System. (Seismology and Volcanology Research Division, 1980)
- 第 5 号 本州南方海域水温図-400m (又は 500m) 深と 1,000m 深- (1934-1943 年及び 1954-1980 年) (海洋研究部, 1981)
Horizontal Distribution of Temperature in 400m (or 500m) and 1,000m Depth in Sea South of Honshu, Japan and Western-North Pacific Ocean from 1934 to 1943 and from 1954 to 1980. (Oceanographical Research Division, 1981)
- 第 6 号 成層圏オゾンの破壊につながる大気成分及び紫外日射の観測 (高層物理研究部, 1982)
Observations of the Atmospheric Constituents Related to the Stratospheric ozone Depletion and the Ultraviolet Radiation. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1982)
- 第 7 号 83 型強震計の開発 (地震火山研究部, 1983)
Strong-Motion Seismograph Model 83 for the Japan Meteorological Agency Network. (Seismology and Volcanology Research Division, 1983)
- 第 8 号 大気中における雪片の融解現象に関する研究 (物理気象研究部, 1984)
The Study of Melting of Snowflakes in the Atmosphere. (Physical Meteorology Research Division, 1984)
- 第 9 号 御前崎南方沖における海底水圧観測 (地震火山研究部・海洋研究部, 1984)
Bottom Pressure Observation South off Omaezaki, Central Honsyu. (Seismology and Volcanology Research Division and Oceanographical Research Division, 1984)
- 第 10 号 日本付近の低気圧の統計 (予報研究部, 1984)
Statistics on Cyclones around Japan. (Forecast Research Division, 1984)
- 第 11 号 局地風と大気汚染質の輸送に関する研究 (応用気象研究部, 1984)
Observations and Numerical Experiments on Local Circulation and Medium-Range Transport of Air Pollutions. (Applied Meteorology Research Division, 1984)
- 第 12 号 火山活動監視手法に関する研究 (地震火山研究部, 1984)
Investigation on the Techniques for Volcanic Activity Surveillance. (Seismology and Volcanology Research Division, 1984)
- 第 13 号 気象研究所大気大循環モデル-I (MRI・GCM-I) (予報研究部, 1984)
A Description of the MRI Atmospheric General Circulation Model (The MRI・GCM-I). (Forecast Research Division, 1984)
- 第 14 号 台風の構造の変化と移動に関する研究-台風 7916 の一生- (台風研究部, 1985)
A Study on the Changes of the Three-Dimensional Structure and the Movement Speed of the Typhoon through its Life Time. (Typhoon Research Division, 1985)
- 第 15 号 波浪推算モデル MRI と MRI-II の相互比較研究-計算結果図集- (海洋気象研究部, 1985)
An Intercomparison Study between the Wave Models MRI and MRI-II -A Compilation of Results- (Oceanographical Research Division, 1985)
- 第 16 号 地震予知に関する実験的及び理論的研究 (地震火山研究部, 1985)
Study on Earthquake Prediction by Geophysical Method. (Seismology and Volcanology Research Division, 1985)
- 第 17 号 北半球地上月平均気温偏差図 (予報研究部, 1986)
Maps of Monthly Mean Surface Temperature Anomalies over the Northern Hemisphere for 1891-1981. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 18 号 中層大気の研究 (高層物理研究部, 気象衛星研究部, 予報研究部, 地磁気観測所, 1986)
Studies of the Middle Atmosphere. (Upper Atmosphere Physics Research Division, Meteorological Satellite Research Division, Forecast Research Division, MRI and the Magnetic Observatory, 1986)
- 第 19 号 ドップラーレーダによる気象・海象の研究 (気象衛星研究部・台風研究部・予報研究部・応用気象研究部・海洋研究部, 1986)
Studies on Meteorological and Sea Surface Phenomena by Doppler Radar. (Meteorological Satellite Research Division, Typhoon Research Division, Forecast Research Division, Applied Meteorology Research Division, and Oceanographical Research Division, 1986)
- 第 20 号 気象研究所対流圏大気大循環モデル (MRI・GCM-I) による 12 年間分の積分 (予報研究部, 1986)
Mean Statistics of the Tropospheric MRI・GCM-I based on 12-year Integration. (Forecast Research Division, 1986)
- 第 21 号 宇宙線中間子強度 1983-1986 (高層物理研究部, 1987)
Multi-Directional Cosmic Ray Meson Intensity 1983-1986. (Upper Atmosphere Physics Research Division, 1987)
- 第 22 号 静止気象衛星「ひまわり」画像の噴火噴煙データに基づく噴火活動の解析に関する研究 (地震火山研究部, 1987)

- Study on Analysis of Volcanic Eruptions based on Eruption Cloud Image Data obtained by the Geostationary Meteorological satellite (GMS). (Seismology and Volcanology Research Division, 1987)
- 第 23 号 オホーツク海海洋気候図 (篠原吉雄, 四竈信行, 1988)
- Marine Climatological Atlas of the sea of Okhotsk. (Y. Shinohara and N. Shikama, 1988)
- 第 24 号 海洋大循環モデルを用いた風の応力異常に対する太平洋の応答実験 (海洋研究部, 1989)
- Response Experiment of Pacific Ocean to Anomalous Wind Stress with Ocean General Circulation Model. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 25 号 太平洋における海洋諸要素の季節平均分布 (海洋研究部, 1989)
- Seasonal Mean Distribution of Sea Properties in the Pacific. (Oceanographical Research Division, 1989)
- 第 26 号 地震前兆現象のデータベース (地震火山研究部, 1990)
- Database of Earthquake Precursors. (Seismology and Volcanology Research Division, 1990)
- 第 27 号 沖縄地方における梅雨期の降水システムの特性 (台風研究部, 1991)
- Characteristics of Precipitation Systems During the Baiu Season in the Okinawa Area. (Typhoon Research Division, 1991)
- 第 28 号 気象研究所・予報研究部で開発された非静水圧モデル (猪川元興・斉藤和雄, 1991)
- Description of a Nonhydrostatic Model Developed at the Forecast Research Department of the MRI. (M. Ikawa and K. Saito, 1991)
- 第 29 号 雲の放射過程に関する総合的研究 (気候研究部・物理気象研究部・応用気象研究部・気象衛星・観測システム研究部・台風研究部, 1992)
- A Synthetic Study on Cloud—Radiation Processes. (Climate Research Department, Physical Meteorology Research Department, Applied Meteorology Research Department, Meteorological Satellite and Observation System Research Department, and Typhoon Research Department, 1992)
- 第 30 号 大気と海洋・地表とのエネルギー交換過程に関する研究 (三上正男・遠藤昌宏・新野 宏・山崎孝治, 1992)
- Studies of Energy Exchange Processes between the Ocean—Ground Surface and Atmosphere. (M. Mikami, M. Endoh, H. Niino, and K. Yamazaki, 1992)
- 第 31 号 降水日の出現頻度からみた日本の季節推移—30 年間の日降水量資料に基づく統計— (秋山孝子, 1993)
- Seasonal Transition in Japan, as Revealed by Appearance Frequency of Precipitating-Days. —Statistics of Daily Precipitation Data During 30 Years— (T. Akiyama, 1993)
- 第 32 号 直下型地震予知に関する観測的研究 (地震火山研究部, 1994)
- Observational Study on the Prediction of Disastrous Intraplate Earthquakes. (Seismology and Volcanology Research Department, 1994)
- 第 33 号 各種気象観測機器による比較観測 (気象衛星・観測システム研究部, 1994)
- Intercomparisons of Meteorological Observation Instruments. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1994)
- 第 34 号 硫酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用 (応用気象研究部, 1995)
- The Long—Range Transport Model of Sulfur Oxides and Its Application to the East Asian Region. (Applied Meteorology Research Department, 1995)
- 第 35 号 ウインドプロファイラーによる気象の観測法の研究 (気象衛星・観測システム研究部, 1995)
- Studies on Wind Profiler Techniques for the Measurements of Winds. (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, 1995)
- 第 36 号 降水・落下塵中の人工放射性核種の分析法及びその地球化学的研究 (地球化学研究部, 1996)
- Geochemical Studies and Analytical Methods of Anthropogenic Radionuclides in Fallout Samples. (Geochemical Research Department, 1996)
- 第 37 号 大気と海洋の地球化学的研究 (1995 年及び 1996 年) (地球化学研究部, 1998)
- Geochemical Study of the Atmosphere and Ocean in 1995 and 1996. (Geochemical Research Department, 1998)
- 第 38 号 鉛直 2 次元非線形問題 (金久博忠, 1999)
- Vertically 2-dimensional Nonlinear Problem (H. Kanehisa, 1999)
- 第 39 号 客観的予報技術の研究 (予報研究部, 2000)
- Study on the Objective Forecasting Techniques (Forecast Research Department, 2000)
- 第 40 号 南関東地域における応力場と地震活動予測に関する研究 (地震火山研究部, 2000)
- Study on Stress Field and Forecast of Seismic Activity in the Kanto Region (Seismology and Volcanology Research Department, 2000)
- 第 41 号 電量滴定法による海水中の全炭酸濃度の高精度分析および大気中の二酸化炭素と海水中の全炭酸の放射性炭素同位体比の測定 (石井雅男・吉川久幸・松枝秀和, 2000)
- Coulometric Precise Analysis of Total Inorganic Carbon in Seawater and Measurements of Radiocarbon for the Carbon Dioxide in the Atmosphere and for the Total Inorganic Carbon in Seawater (I.Masao, H.Y.Inoue and H.Matsueda, 2000)
- 第 42 号 気象研究所／数値予報課統一非静力学モデル (斉藤和雄・加藤輝之・永戸久喜・室井ちあし, 2001)
- Documentation of the Meteorological Research Institute / Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model (Kazuo Saito, Teruyuki Kato, Hisaki Eito and Chiashi Muroi, 2001)
- 第 43 号 大気および海水中のクロロフルオロカーボン類の精密測定と気象研究所クロロフルオロカーボン類標準ガスの確立 (時枝隆之・井上(吉川)久幸, 2004)
- Precise measurements of atmospheric and oceanic chlorofluorocarbons and MRI chlorofluorocarbons calibration scale (Takayuki Tokieda and Hisayuki Y. Inoue, 2004)
- 第 44 号 PostScript コードを生成する描画ツール"PLOTPS"マニュアル (加藤輝之, 2004)

- Documentation of "PLOTPTS": Outputting Tools for PostScript Code (Teruyuki Kato, 2004)
- 第 45 号 気象庁及び気象研究所における二酸化炭素の長期観測に使用された標準ガスのスケールとその安定性の再評価に関する調査・研究 (松枝秀和・須田一人・西岡佐喜子・平野礼朗・澤 庸介・坪井一寛・堤 之智・神谷ひとみ・根本和宏・長井秀樹・吉田雅司・岩野園城・山本 治・森下秀昭・鎌田匡俊・和田 晃, 2004)
Re-evaluation for scale and stability of CO₂ standard gases used as long-term observations at the Japan Meteorological Agency and the Meteorological Research Institute (Hidekazu Matsueda, Kazuto Suda, Sakiko Nishioka, Toshirou Hirano, Yousuke, Sawa, Kazuhiro Tuboi, Tsutumi, Hitomi Kamiya, Kazuhiro Nemoto, Hideki Nagai, Masashi Yoshida, Sonoki Iwano, Osamu Yamamoto, Hideaki Morishita, Kamata, Akira Wada, 2004)
- 第 46 号 地震発生過程の詳細なモデリングによる東海地震発生の推定精度向上に関する研究 (地震火山研究部, 2005)
A Study to Improve Accuracy of Forecasting the Tokai Earthquake by Modeling the Generation Processes (Seismology and Volcanology Research Department, 2005)
- 第 47 号 気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 解説 (海洋研究部, 2005)
Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Manual (Oceanographical Research Department, 2005)
- 第 48 号 日本海降雪雲の降水機構と人工調節の可能性に関する研究 (物理気象研究部・予報研究部, 2005)
Study of Precipitation Mechanisms in Snow Clouds over the Sea of Japan and Feasibility of Their Modification by Seeding (Physical Meteorology Research Department, Forecast Research Department, 2005)
- 第 49 号 2004 年日本上陸台風の概要と環境場 (台風研究部, 2006)
Summary of Landfalling Typhoons in Japan, 2004 (Typhoon Research Department, 2006)
- 第 50 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2003 年国際共同実験報告 (青山道夫, 2006)
2003 Intercomparison Exercise for Reference Material for Nutrients in Seawater in a Seawater Matrix (Michio Aoyama, 2006)
- 第 51 号 大気および海水中の超微量六フッ化硫黄(SF₆)の測定手法の高度化と SF₆ 標準ガスの長期安定性の評価 (時枝隆之、石井雅男、斉藤 秀、緑川 貴, 2007)
Highly developed precise analysis of atmospheric and oceanic sulfur hexafluoride (SF₆) and evaluation of SF₆ standard gas stability (Takayuki Tokieda, Masao Ishii, Shu Saito and Takashi Midorikawa, 2007)
- 第 52 号 地球温暖化による東北地方の気候変化に関する研究 (仙台管区気象台, 環境・応用気象研究部, 2008)
Study of Climate Change over Tohoku District due to Global Warming (Sendai District Meteorological Observatory, Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, 2008)
- 第 53 号 火山活動評価手法の開発研究 (地震火山研究部, 2008)
Studies on Evaluation Method of Volcanic Activity (Seismology and Volcanology Research Department, 2008)
- 第 54 号 日本における活性炭冷却捕集およびガスクロ分離による気体計数システムによる ⁸⁵Kr の測定システムの構築および 1995 年から 2006 年の測定結果 (青山道夫, 藤井憲治, 廣瀬勝己, 五十嵐康人, 磯貝啓介, 新田 済, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)
Establishment of a cold charcoal trap-gas chromatography-gas counting system for ⁸⁵Kr measurements in Japan and results from 1995 to 2006 (Michio Aoyama, Kenji Fujii, Katsumi Hirose, Yasuhito Igarashi, Keisuke Isogai, Wataru Nitta, Hartmut Sartorius, Clemens Schlosser, Wolfgang Weiss, 2008)
- 第 55 号 長期係留による 4 種類の流速計観測結果の比較 (中野俊也, 石崎 廣, 四竈信行, 2008)
Comparison of Data from Four Current Meters Obtained by Long-Term Deep-Sea Moorings (Toshiya Nakano, Hiroshi Ishizaki and Nobuyuki Shikama, 2008)
- 第 56 号 CMIP3 マルチモデルアンサンブル平均を利用した将来の海面水温・海氷分布の推定 (水田 亮, 足立恭将, 行本誠史, 楠 昌司, 2008)
Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean (Ryo Mizuta, Yukimasa Adachi, Seiji Yukimoto and Shoji Kusunoki, 2008)
- 第 57 号 閉回路中のフローセルを用いた分光光度法自動分析装置による海水の高精度 pH_T 測定 (斉藤 秀, 石井雅男, 緑川 貴, 井上 (吉川) 久幸, 2008)
Precise Spectrophotometric Measurement of Seawater pH_T with an Automated Apparatus using a Flow Cell in a Closed Circuit (Shu Saito, Masao Ishii, Takashi Midorikawa and Hisayuki Y. Inoue, 2008)
- 第 58 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2006 年国際共同実験報告 (青山道夫, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E.S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. Dai, G. O Donnell, C. Engelke, Gwo-Ching Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, Ming-Ming Jin, 葛西広海, R. Kerouel, 清本容子, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, 熊谷正光, S. Leterme, Yarong Li, 増田真次, 宮尾 孝, T. Moutin, 村田昌彦, 永井直樹, G. Nausch, A. Nybakk, M. K. Ngirchchol, 小川浩史, J. van Ooijen, 太田秀和, J. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, 齊藤一浩, 佐藤憲一郎, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, 芳村 毅, A. Youéno, Jia-Zhong Zhang, 2008)
2006 Inter-laboratory Comparison Study for Reference Material for Nutrients in Seawater (M. Aoyama, J. Barwell-Clarke, S. Becker, M. Blum, Braga E. S., S. C. Coverly, E. Czobik, I. Dahllöf, M. H. Dai, G. O. Donnell, C. Engelke, G. C. Gong, Gi-Hoon Hong, D. J. Hydes, M. M. Jin, H. Kasai, R. Kerouel, Y. Kiyomono, M. Knockaert, N. Kress, K. A. Kroglund, M. Kumagai, S. Leterme, Yarong Li, S. Masuda, T. Miyao, T. Moutin, A. Murata, N. Nagai, G. Nausch, M. K. Ngirchchol, A. Nybakk, H. Ogawa, J. van Ooijen, H. Ota, J. M. Pan, C. Payne, O. Pierre-Duplessix, M. Pujo-Pay, T. Raabe, K. Saito, K. Sato, C. Schmidt, M. Schuett, T. M. Shammon, J. Sun, T. Tanhua, L. White, E.M.S. Woodward, P. Worsfold, P. Yeats, T. Yoshimura, A. Youéno, J. Z. Zhang, 2008)
- 第 59 号 気象研究所共用海洋モデル(MRI.COM)第 3 版解説 (辻野博之, 本井達夫, 石川一郎, 平原幹俊, 中野英之, 山中

- 吾郎, 安田珠幾, 石崎廣 (気象研究所海洋研究部), 2010)
 Reference manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Version 3 (Hiroyuki Tsujino, Tatsuo Motoi, Ichiro Ishikawa, Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano, Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki (Oceanographic Research Department), 2010)
- 第 60 号 栄養塩測定用海水組成標準の 2008 年国際共同実験報告 (青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Christopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youénoù, Jia-Zhong Zhang, 2010)
 2008 Inter-laboratory Comparison Study of a Reference Material for Nutrients in Seawater (青山道夫, Carol Anstey, Janet Barwell-Clarke, François Baurand, Susan Becker, Marguerite Blum, Stephen C. Coverly, Edward Czobik, Florence D' amico, Ingela Dahllöf, Minhan Dai, Judy Dobson, Magali Duval, Clemens Engelke, Gwo-Ching Gong, Olivier Grosso, 平山篤史, 井上博敬, 石田雄三, David J. Hydes, 葛西広海, Roger Kerouel, Marc Knockaert, Nurit Kress, Katherine A. Kroglund, 熊谷正光, Sophie C. Leterme, Claire Mahaffey, 光田均, Pascal Morin, Thierry Moutin, Dominique Munaron, 村田昌彦, Günther Nausch, 小川浩史, Jan van Ooijen, Jianming Pan, Georges Paradis, Chris Payne, Olivier Pierre-Duplessix, Gary Prove, Patrick Raimbault, Malcolm Rose, 齊藤一浩, 齊藤宏明, 佐藤憲一郎, Christopher Schmidt, Monika Schütt, Theresa M. Shammon, Solveig Olafsdottir, Jun Sun, Toste Tanhua, Sieglinde Weigelt-Krenz, Linda White, E. Malcolm. S. Woodward, Paul Worsfold, 芳村毅, Agnès Youénoù, Jia-Zhong Zhang, 2010)
- 第 61 号 強雨をもたらす線状降水帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究 (大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・神戸海洋気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・舞鶴海洋気象台・広島地方気象台・徳島地方気象台・予報研究部, 2010)
 Studies on formation process of line-shaped rainfall systems and predictability of rainfall intensity and moving speed (Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Kobe Marine Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Maizuru Marine Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory AND Forecast Research Department, 2010)
- 第 62 号 WWRP 北京オリンピック 2008 予報実証/研究開発プロジェクト (齊藤和雄, 國井勝, 原昌弘, 瀬古弘, 原旅人, 山口宗彦, 三好建正, 黄偉健, 2010)
 WWRP Beijing Olympics 2008 Forecast Demonstration/Research and Development Project (B08FDP/RDP) (Kazuo Saito, Masaru Kunii, Masahiro Hara, Hiromu Seko, Tabito Hara, Munehiko Yamaguchi, Takemasa Miyoshi and Wai-kin Wong, 2010)
- 第 63 号 東海地震の予測精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究 (地震火山研究部, 2011)
 Improvement in prediction accuracy for the Tokai earthquake and research of the preparation process of the Tonankai and the Nankai earthquakes (Seismology and Volcanology Research Department, 2011)
- 第 64 号 気象研究所地球システムモデル第 1 版 (MRI-ESM1) —モデルの記述— (行本誠史, 吉村裕正, 保坂征宏, 坂見智法, 辻野博之, 平原幹俊, 田中泰宙, 出牛真, 小畑淳, 中野英之, 足立恭将, 新藤永樹, 藪将吉, 尾瀬智昭, 鬼頭昭雄, 2011)
 Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model Description — (Seiji Yukimoto, Hiromasa Yoshimura, Masahiro Hosaka, Tomonori Sakami, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara, Taichu Y. Tanaka, Makoto Deushi, Atsushi Obata, Hideyuki Nakano, Yukimasa Adachi, Eiki Shindo, Shoukichi Yabu, Tomoaki Ose and Akio Kitoh, 2011)
- 第 65 号 東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究 (齊藤和雄, 黒田徹, 林修吾, 瀬古弘, 國井勝, 小司禎教, 上野充, 川畑拓矢, 余田成男, 大塚成徳, Nurjanna Joko Trilaksono, 許智揚, 古関俊也, Le Duc, Kieu Thi Xin, 黄偉健, Krushna Chandra Gouda, 2011)
 International Research for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia (Kazuo Saito, Tohru Kuroda, Syugo Hayashi, Hiromu Seko, Masaru Kunii, Yoshinori Shoji, Mitsuru Ueno, Takuya Kawabata, Shigeo Yoden, Shigenori Otsuka, Nurjanna Joko Trilaksono, Tieh-Yong Koh, Syunya Koseki, Le Duc, Kieu Thi Xin, Wai-Kin Wong and Krushna Chandra Gouda, 2011)
- 第 66 号 太平洋における大気-海洋間二酸化炭素フラックス推定手法 (杉本裕之, 平石直孝, 石井雅男, 緑川貴, 2012)
 A method for estimating the sea-air CO₂ flux in the Pacific Ocean (Hiroyuki Sugimoto, Naotaka Hiraishi, Masao Ishii and Takashi Midorikawa, 2012)
- 第 67 号 C-130H 輸送機を利用した温室効果ガス観測のためのフラスコ採取とその高精度測定システムの開発 (坪井一寛, 松枝秀和, 澤庸介, 丹羽洋介, 中村雅道, 久保池大輔, 岩坪昇平, 齊藤和幸, 花宮義和, 辻健太郎, 大森英裕, 西秀紘, 2012)
 Development of a flask sampling and its high-precision measuring system for greenhouse gases observations using a cargo aircraft C-130H (Kazuhiro Tsuboi, Hidekazu Matsueda, Yousuke Sawa, Yosuke Niwa Masamichi Nakamura, Daisuke Kuboike, Shohei Iwatsubo, Kazuyuki Saito Yoshikazu Hanamiya, Kentaro Tsuji, Hidehiro Ohmori, Hidehiro Nishi, 2012)

- 第 68 号 国際シンポジウム 電子顕微鏡を用いたエアロゾル研究 (五十嵐康人, Weijun Li, Peter.R.Buseck, 岡田菊雄, 張代洲, 足立光司, 藤谷雄二, 嶋寺光, 五藤大輔, 三井千珠, 野島雅, 大島長, 松井仁志, 石元裕史, 松木篤, Pradeep Khatri, 中山智喜, 向井将平, 大石乾詞, 間山憲仁, 坂本哲夫, 直江寛明, 財前祐二, 塩流水洋樹, 田中泰宙, 梶野瑞王, 2013)
International Symposium on Aerosol Studies Explored by Electron Microscopy (Yasuhiro Igarashi, Weijun Li, Peter. R. Buseck, Kikuo Okada, Daizhou Zhang, Kouji Adachi, Yuji Fujitani, Hikari Shimadera, Daisuke Goto, Chizu Mitsui, Masashi Nojima, Naga Oshima, Hitoshi Matsui, Hiroshi Ishimoto, Atsushi Matsuki, Pradeep Khatri, Tomoki Nakayama, Shohei Mukai, Kenji Ohishi, Norihito Mayama, Tetsuo Sakamoto, Hiroaki Naoe, Yuji Zaizen, Hiroki Shiozuru, Taichu Y. Tanaka and Mizuo Kajino, 2013)
- 第 69 号 マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究 (地震火山研究部, 2013)
Development of Quantitative Detection Techniques of Magma Activity and Improvement of Evaluation of Volcanic Activity Level (Seismology and Volcanology Research Department, MRI, 2013)
- 第 70 号 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波高の現地調査報告 (林豊, 前田憲二, 対馬弘晃, 岡田正實, 木村一洋, 岩切一宏, 2013)
Reports on Field Surveys of Tsunami Heights from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Yutaka Hayashi, Kenji Maeda, Hiroaki Tsushima, Masami Okada, Kazuhiro Kimura and Kazuhiro Iwakiri, 2013)
- 第 71 号 気候研究のための気象研究所アンサンブル予測システムの概要とその応用 (藪将吉, 水田亮, 吉村裕正, 黒田友二, 向川均, 2014)
Meteorological Research Institute Ensemble Prediction System (MRI-EPS) for climate research - Outline and its applications - (Shoukichi Yabu, Ryo Mizuta, Hiromasa Yoshimura, Yuhji Kuroda, and Hitoshi Mukougawa, 2014)
- 第 72 号 日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究 (地震火山研究部, 地震火山部, 気象大学校, 札幌管区気象台, 仙台管区気象台, 大阪管区気象台, 福岡管区気象台, 沖縄気象台, 2014)
Survey of moderate repeating earthquakes in Japan (Seismology and Volcanology Research Department of MRI, Seismology and Volcanology Department, Meteorological College, Sapporo Regional Headquarters, Sendai Regional Headquarters, Osaka Regional Headquarters, Fukuoka Regional Headquarters, and Okinawa Regional Headquarters, 2014)
- 第 73 号 気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について (佐々木秀孝, 村田昭彦, 川瀬宏明, 花房瑞樹, 野坂真也, 大泉三津夫, 水田亮, 青柳暁典, 志藤文武, 石原幸司, 2015)
Projection of Future Climate Change around Japan by using MRI Non-hydrostatic Regional Climate Model (Hidetaka Sasaki, Akihiko Murata, Hiroaki Kawase, Mizuki Hanafusa, Masaya Nosaka, Mitsuo Oh'izumi, Ryou Mizuta, Toshinori Aoyagi, Fumitake Shido, and Koji Ishihara, 2015)
- 第 74 号 新型自己浮上式海底水圧計の開発 (平田賢治, 山崎明, 対馬弘晃, 2015)
Development of a new pop-up ocean-bottom pressure gauge (Kenji Hirata, Akira Yamazaki, and Hiroaki Tsushima, 2015)
- 第 75 号 2012 年・2013 年に日本に接近・上陸した台風の概要と特性 (北島尚子, 小山亮, 嶋田宇大, 櫻木智明, 沢田雅洋, 2015)
Summary and Characteristics of Approaching and Landfalling Tropical Cyclones in Japan in 2012 and 2013 (Naoko Kitabatake, Ryo Oyama, Udai Shimada, Tomoaki Sakuragi and Masahiro Sawada, 2015)
- 第 76 号 WMO 福島第一原発事故に関する気象解析技術タスクチーム活動と気象研究所の大気拡散モデリング (斉藤和雄, 新堀敏基, R. Draxler, 原旅人, 豊田英司, 本田有機, 永田和彦, 藤田司, 坂本雅巳, 加藤輝之, 梶野瑞王, 関山剛, 田中泰宙, 眞木貴史, 寺田宏明, 茅野政道, 岩崎俊樹, M.C. Hort, S.J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx, P. Chen, 2015)
Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on Meteorological Analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and Relevant Atmospheric Transport Modelling at MRI (K. Saito, T. Shimbori, R. Draxler, T. Hara, E. Toyoda, Y. Honda, K. Nagata, T. Fujita, M. Sakamoto, T. Kato, M. Kajino, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, T. Maki, H. Terada, M. Chino, T. Iwasaki, M.C. Hort, S.J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx and P. Chen, 2015)
- 第 77 号 海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究 (地震津波研究部, 2017)
Research on rapid estimation of the parameters for large earthquakes along trenches (Seismology and Tsunami Research Department, 2017)
- 第 78 号 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究 (高木朗充, 長岡優, 福井敬一, 安藤忍, 木村一洋, 土山博昭, 2017)
Studies on Monitoring of the 2013 - 2015 Nishinoshima Eruption (Akimichi Takagi, Yutaka Nagaoka, Keiichi Fukui, Shinobu Ando, Kazuhiro Kimura, and Hiroaki Tsuchiyama, 2017)
- 第 79 号 2012 年から 2016 年に実施された温室効果ガス観測に関する相互比較実験 (iceGGO) (坪井一寛, 中澤高清, 松枝秀和, 町田敏暢, 青木周司, 森本真司, 後藤大輔, 下坂琢哉, 加藤健次, 青木伸行, 渡邊卓朗, 向井人史, 遠嶋康徳, 勝又啓一, 村山昌平, 石戸谷重之, 藤谷徳之助, 小出寛, 高橋正臣, 川崎照夫, 滝沢厚詩, 澤庸介, 2017)
Inter-Comparison Experiments for Greenhouse Gases Observation (iceGGO) in 2012-2016 (A. K. Tsuboi, T. Nakazawa, H. Matsueda, T. Machida, S. Aoki, S. Morimoto, D. Goto, T. Shimosaka, K. Kato, N. Aoki, T. Watanabe, H. Mukai, Y. Tohjima, K. Katsumata, S. Murayama, S. Ishidoya, T. Fujitani, H. Koide, M. Takahashi, T. Kawasaki, A. Takizawa and Y. Sawa, 2017)
- 第 80 号 気象研究所共用海洋モデル第 4 版(MRI.COMv4)解説 (辻野博之, 中野英之, 坂本圭, 浦川昇吾, 平原幹俊, 石崎廣, 山中吾郎 (気象研究所海洋・地球化学研究部), 2017)
Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model version 4 (MRI.COMv4) (Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Kei Sakamoto, Shogo Urakawa, Mikitoshi Hirabara, Hiroshi Ishizaki, and Goro Yamanaka, (Oceanography and Geochemistry Research Department), 2017)

- 第 81 号 集中豪雨・大雨発生の必要条件の抽出・妥当性の確認と十分条件の抽出 (津口裕茂 (予報研究部)・大阪管区気象台・彦根地方気象台・京都地方気象台・神戸地方気象台・奈良地方気象台・和歌山地方気象台・広島地方気象台・岡山地方気象台・松江地方気象台・鳥取地方気象台・高松地方気象台・徳島地方気象台・松山地方気象台・高知地方気象台, 2018)
Extraction and Validation of Necessary Conditions and Analysis of Sufficient Conditions for Causing Heavy Rainfall (Hiroshige TSUGUTI (Forecast Research Department), Osaka District Meteorological Observatory, Hikone Local Meteorological Observatory, Kyoto Local Meteorologica Observatory, Kobe Local Meteorological Observatory, Nara Local Meteorological Observatory, Wakayama Local Meteorological Observatory, Hiroshima Local Meteorological Observatory, Okayama Local Meteorological Observatory, Matsue Local Meteorological Observatory, Tottori Local Meteorological Observatory, Takamatsu Local Meteorological Observatory, Tokushima Local Meteorological Observatory, Matsuyama Local Meteorological Observatory and Kochi Local Meteorological Observatory), 2018)
- 第 82 号 台風予報・解析技術高度化プロジェクトチームによる 5 日先台風強度予報ガイダンスの開発 (山口宗彦、嶋田宇大、沢田雅洋、入口武史(台風研究部)、大和田浩美 (気象庁)) , 2019)
Development of 5-day Typhoon Intensity Forecast Guidance by the Project Team for Improvement in Operational Typhoon Forecasts and Analysis (Munehiko Yamaguchi, Udai Shimada, Masahiro Sawada, Takeshi Iriguchi(Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute), and Hiromi Owada(Japan Meteorological Agency), 2019)
- 第 83 号 日本沿岸海況監視予測システム 10 年再解析値 (JPN Atlas 2020) (広瀬成章、坂本圭、碓氷典久、山中吾郎、高野洋雄(全球大気海洋研究部)) , 2020)
The 10-year reanalysis dataset of an operational system for monitoring and forecasting coastal and open-ocean status around Japan (JPN Atlas 2020) (Nariaki Hirose, Kei Sakamoto, Norihisa Usui, Goro Yamanaka, and Nadao Kohno (Department of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling Research, Meteorological Research Institute), 2020)
- 第 84 号 気象庁移流拡散モデル設計書 (新堀敏基、石井憲介(火山研究部) ,2021)
Design of the Japan Meteorological Agency Atmospheric Transport Model(Toshiki Shimbori and Kensuke Ishii (Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute),2021))

気 象 研 究 所

1946 (昭和21)年 設 立

所 長 : 小 泉 耕
研究総務官 : 石 井 雅 男
研究調整官 : 永 戸 久 喜

全 球 大 気 海 洋 研 究 部	部 長 : 山 中 吾 郎
気 象 予 報 研 究 部	部 長 : 山 田 雄 二
気 象 観 測 研 究 部	部 長 : 瀬 古 弘 子
台 風 ・ 災 害 気 象 研 究 部	部 長 : 清 野 直 子
気 候 ・ 環 境 研 究 部	部 長 : 須 田 一 人
地 震 津 波 研 究 部	部 長 : 干 場 充 之
火 山 研 究 部	部 長 : 吉 田 康 宏
応 用 気 象 研 究 部	部 長 : 加 藤 輝 之

気 象 研 究 所 技 術 報 告

編集委員長 : 吉 田 康 宏

編集委員 : 碓 氷 典 久 水 野 吉 規 石 田 春 磨
梅 原 章 仁 高 薺 出 対 馬 弘 晃
佐 藤 英 一 佐々木 秀 孝
事 務 局 : 川 添 安 之 古 市 豊

気象研究所技術報告は、1978 (昭和53) 年の初刊以来、気象研究所が必要の都度発行する刊行物であり、気象研究所の研究計画に基づき実施した研究に関する手法、データ、結果等についてのまとめ、または、すでに公表した研究論文類をとりまとめ総合的報告としたものを掲載する。

本紙に掲載された報告の著作権は気象研究所に帰属する。本紙に掲載された報告を引用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。本紙に掲載された報告の全部又は一部を複製、転載、翻訳、あるいはその他に利用する場合は気象研究所の許諾を得なければならない。個人が研究、学習、教育に使用する場合は、出所を明示すれば気象研究所の許諾を必要としない。

気 象 研 究 所 技 術 報 告 ISSN 2189-8871
第 85 号
令和3年10月 発行
編 集 兼 気 象 研 究 所
発 行 者
〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
TEL(029)853-8535