

B-4 シベリア凍土地帯における温暖化フィードバックの評価に関する研究
(4) 航空機による温室効果ガスの測定法の高度化に関する研究

研究代表者 航空宇宙技術研究所 特別研究官 田丸 卓

科学技術庁 航空宇宙技術研究所

飛行実験部	航空情報処理研究室	矢澤健司
	飛行課	中村 勝、照井祐之、鎌田幸男、 白井正孝
	航法研究室	井之口浜木、稲垣敏治
原動機部	原動機制御研究室	田頭 剛

環境庁 国立環境研究所

大気圏環境部	上席研究官	井上 元
地球環境研究グループ		町田敏暢、S.Mackshutov

平成6～8年合計予算	34,944千円
(平成8年度予算)	11,889千円)

(要旨) 航空機により大気採取を行いCO₂等の温暖化ガスの測定を行った。これと同時に飛行経路等の飛行データ及び温度湿度、大気移動速度等を航空機運動計測装置と超音波風速計を組み合わせ上下の大気移動速度を正確に計測し、これより温暖化ガスのフラックスを求めることを最終目的とする。平成6～8年度に超音波風速計の開発、風洞試験、実験用航空機(Do228及びB-65)への搭載及び地球温暖化ガス測定のための飛行試験を行った。

(キーワード) 二酸化炭素、地球温暖化、航空機観測、超音波風速計、風洞試験

1. 序

航空宇宙技術研究所は国立環境研究所と共同で燃焼排出ガス等地球温暖化ガスの航空機による調査研究を1993年から共同研究の覚え書きを交わし、当研究所所有の実験用航空機ドルニエ機(Do228)及びクインエアー機(B-65)を用いて飛行試験及びデータ解析を行なった。

1994年にドルニエ機(Do228)による冬季温暖化ガスの測定を行った。温暖化ガスのフラックスを計るためには大気の上下風速を精度よく測る必要がある。そのために超音波風速計を開発し、7月に風洞試験を行った。10月にドルニエ機による秋季温暖化ガスの測定を行い、冬季と秋季のデータの比較検討を行った。1995年には温暖化ガス測定システムをクインエアー機(B-65)に搭載し、航空機による予備飛行試験を行った。高速性能を調べ

るため第1次の超音波風速計の遷音速風洞試験を行い、超音波風速計の精度を確認し、測定可能上限速度を調べた。1996年は音響ノイズを減らすためセンサーに整流用のカバーをつけた超音波風速計と新しい型のセンサーの性能を調べるため第2次の遷音速風洞試験で行った。飛行試験により超音波風速計の上下風の計測を試みた。航空機による温暖化ガスの採取とリアルタイムに計測した二酸化炭素と上下風との相関関係を明らかにし、フラックスを求め、温暖化ガス測定値各種温暖化ガスのフラックスの測定手法を開発した。

2. 目的

航空機で二酸化炭素などのフラックスを測定するには、高度を変えた飛行により高度分布を求め大気力学的な計算によってフラックスを計算するのが一般的に用いられているが、この方法は幾つかの仮定・パラメータを使っており不十分で、より直接的な方法が求められている。ここでは、物質の輸送を担う風の垂直成分を航空機で測定する方法と、二酸化炭素の高速・高精度の測定法とを開発し、二酸化炭素のフラックスを直接測定することを最終目標とする。その目的の一段階として、航空機による気象や二酸化炭素の高度分布の測定、人為的な発生の指標としてのNO_x測定法の開発研究、風の垂直成分を正確に求めるため風洞を使用した超音波風速計の開発研究などを行う。

3. 研究方法

(1) 飛行試験

1994年は、二酸化炭素濃度高度分布を高精度でリアルタイム測定する目的で、圧力の変動に耐える二酸化炭素濃度測定機器の開発と、その測定装置を実験用航空機ドルニエ機(Do228)に搭載するための搭載工事を行い、飛行試験を行った。1995年は、エアライン機でも大気のサンプリングを自動的に行えるように自動サンプリング装置を開発し、実験用航空機クインエアー機(B-65)により実証実験を行った。1996年は、シベリアにおいて自動サンプリング装置により定期観測を行う準備のため装置の改良を行った。日本においてもシベリアの測定結果と比較するため定期的な観測体制を整えた。二酸化炭素のフラックスを測定する方式の一つである渦相関法の実証のために北海道釧路湿原上空で実験用航空機ドルニエ機(Do228)により実施した。

(2) 超音波風速計の開発

地球温暖化ガスのフラックス測定のために高精度での大気の移動速度を測定する必要がある。航空機で大気移動速度を測定するには航空機に対する対気流速から航空機の慣性速度を差し引いて求めることが出来る。対気流速を計測するセンサーとしてはペーンタイプのものや多孔ピトー管タイプのものがあるが十分な精度が得られない。超音波風速計は超音波を利用した3次元の風速を高精度計測できるセンサーで主に気象用として使用されてきたが、今回航空機搭載用のセンサーとして開発した。

① 超音波風速計の原理

超音波は人間の耳に感じないような高い周波数 (20kHz 以上) の音波でその早さは毎秒、約 340m/s で、ほとんど一定である。しかし、空気が流れている状態では速度は若干変化し、

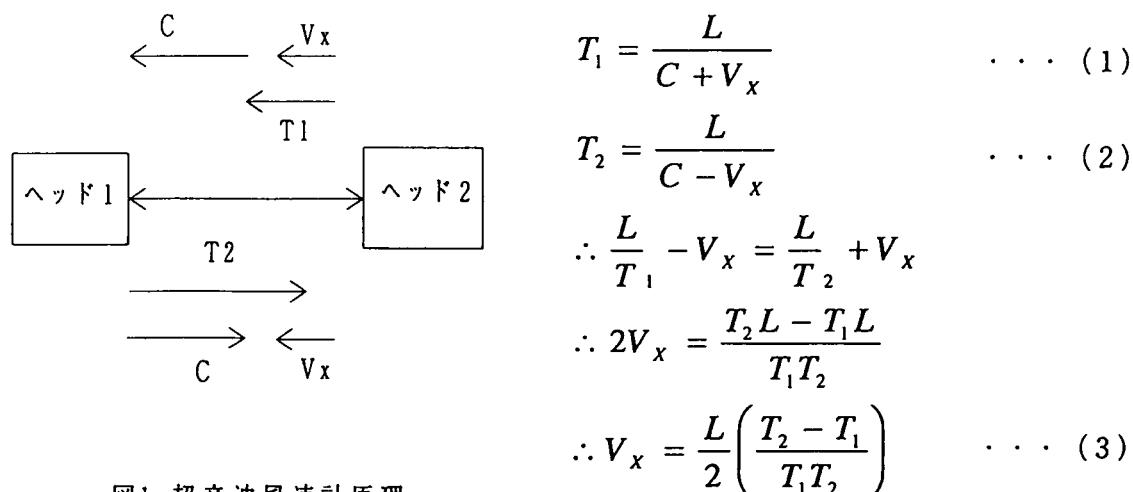


図1 超音波風速計原理

音波が風と順方向に伝わる場合は風速分だけ早くなり、逆方向に伝わる場合は風速分だけ遅くなる。超音波風速計はこの現象を応用したもので、図1のように超音波パルスの送受波圧電素子 (ヘッド) を2個向かい合わせに一定距離 (スパン) をおいて固定し、ヘッドから、一定時間毎に交互に超音波パルスを発射させる。伝播方向がお互いに逆向きな超音波パルスが交互に伝搬するが、この時の伝搬時間をT1とT2とすると(1)及び(2)式のようになる。ここから音速Cを消去すると(3)式のようにV_xがT1, T2及びスパンLの関数として得られる。超音波風速計は1対のヘッドを結ぶ軸に平行な風速をはかることができ温度や気圧に無関係に測定できるので直線性がよく安定した出力を与える特徴を持っている。

・温度の計測：

(1) 及び (2) 式から音速 C を解くことができる。

$$C = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2 + T_1}{T_1 T_2} \right) \quad \dots (3)$$

音速は温度の 1/2 乗に比例することから、標準温度 T₀ その時の音速を C₀ とすると測定温度 T_m は次式のように得られる。

$$T_m = T_0 \left(\frac{C}{C_0} \right)^2 \quad \dots (4)$$

センサー軸方向の風速は音速及び温度測定結果には影響しないが、センサー軸に直角方向

の速度 V_n は音源が風下に流され、見かけ上のセンサー間距離 L を $(1 + V_n^2/C^2)^{1/2}$ だけ長くする。このため測定音速はそのぶんだけ遅くなり温度も低く出る。そのため次の補正式が必要である。

$$T_c = T_o \left(\frac{C}{C_o} \right)^2 (1 + V_n^2 / C^2)$$

$$T_c = T_m + T_o (V_n^2 / C_o^2) \quad \dots (5)$$

ここで、 T_c が補正後の温度。 T_m は補正前の温度。 T_o は標準温度 (273.15° K)
 C_o は標準温度での音速 (331.45m/s)。 V_n はセンサー軸に直角方向の速度。

② 風洞試験によるデータ処理

風洞試験結果によるデータからセンサーのモデルの係数を求めるデータ処理を示す。

風洞試験の目的として次の項目を挙げる。

- ・超音波風速計のスケールファクタ、各センサーの取り付け角度を求める
- ・マウントの形状が性能にどのように影響するか調べる
- ・総合的な精度及び誤差解析を行う
- ・計測可能な上限速度を求める

この3年間3回の風洞試験を2種類の風洞で行った。一つは突風風洞で最高風速 55m/s で図2の超音波風速計の風洞試験をおこなった。この風洞は、単回路横形のゲッチングン型で測定部は 2 m X 2 m、長さ 4 m、風速常用 3 ~ 5 0 m/s で風洞吹出し口にはトップ発生翼列が駆動アクチュエータで駆動され突風を発生させる。模型の支持は六分力天秤の上に設置された3本のストラットにより支持される。横方向 (β) は天秤ごと回転させ設定する。縦方向 (α) はストラットを上下することにより設定する。このため風洞で設定した風速 V_w はセンサー軸に変換され次式のように求められる。

$$V_{xyz} = R_{\theta}(\alpha) R_{\phi}(\beta) V_x \quad (6)$$

但し、

$$V_{xyz} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, R_{\theta}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}, R_{\phi}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, V_x = \begin{bmatrix} V_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

超音波風速計は下図のように超音波の送波と受波を兼ねる一对の圧電素子 (ヘッド) からなるセンサーをマウント軸周りに 120 度づつ回転させて3組取り付けられている。

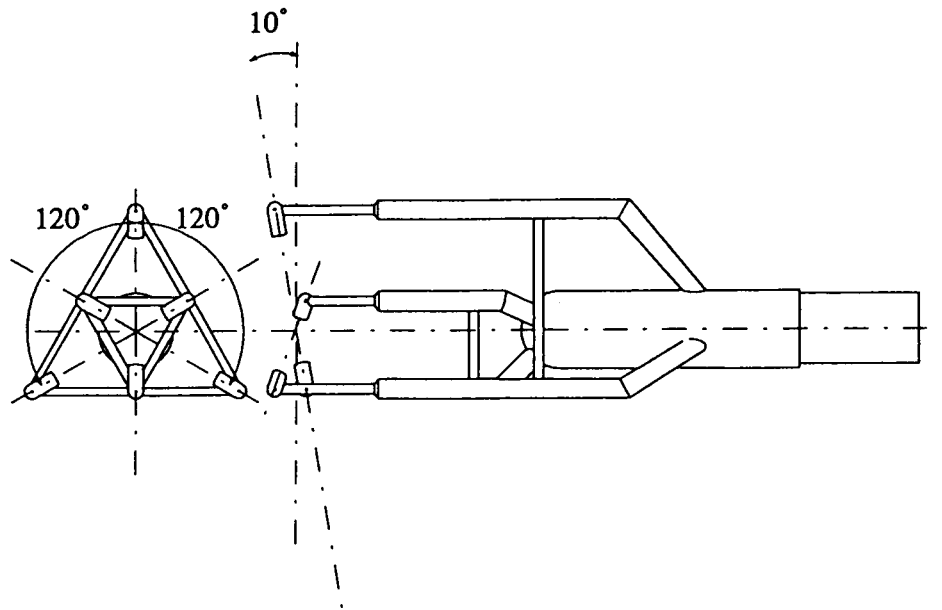


図2 200kHz 超音波風速計 (スパン=50mm)

各センサーは10度前に傾いており、3組のセンサー出力から3次元速度ベクトルを計算する。センサーの出力ベクトル V_{abc} と風洞の速度ベクトル V_{xyz} との間に変換マトリックス $T(p)$ を設定する。

$$V_{abc_i} = T(p)V_{xyz_i} \quad (7)$$

ただし、 i はデータのポイントをしめす。

ここで $T(p)$ は次のように定義される。

$$T(p) = K [I_{11} R_{\theta_a}(\theta_a) R_{\phi_a}(\phi_a) + I_{21} R_{\theta_b}(\theta_b) R_{\phi_b}(\phi_b) + I_{31} R_{\theta_c}(\theta_c) R_{\phi_c}(\phi_c)]$$

$$p = [K_a \ K_b \ K_c \ \phi_a \ \phi_b \ \phi_c \ \theta_a \ \theta_b \ \theta_c]$$

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} ka & 0 & 0 \\ 0 & kb & 0 \\ 0 & 0 & kc \end{bmatrix}, I_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_{\phi}(\phi_a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi_a & \sin\phi_a \\ 0 & -\sin\phi_a & \cos\phi_a \end{bmatrix}$$

K はセンサーのスパンに比例するスケールファクターマトリックス、 ϕ_a は a センサーのマウント軸周りの取り付け角度(120° おき)、 θ_a は a センサーの前方への傾斜角度(約10°)、マトリックス $I_{11} \sim I_{31}$ は各センサーのセンサー軸方向の速度を取り出すためのマトリックスである。

ここで、パラメータマトリックスPを求めるため次式のように誤差モデルを設定し、誤差を最小にすることによりパラメータPを推定する。

$$\varepsilon_i = V_{abc_i} - V_{mabc_i} \quad (8)$$

今回、このパラメータPを求めるために修正ニュートンラプソン法を用いた³⁾。

超音波風速計としてセンサーからの測定値 V_{mabc} から航空機の機体軸に対する速度ベクトルを求めるためには(7)式から $T(p)$ のインバースを計算して両辺に掛けることにより次式を得る。

$$V_{xyz_i} = T(p)^{-1} V_{mabc_i} \quad (9)$$

また、温度の修正を行うためにセンサーの直角風速成分を求める必要がある。そのため、温度を測る a センサーのセンサー軸回りの速度成分は次式によって求められる。

$$\begin{bmatrix} V_{ax_i} & V_{ay_i} & V_{az_i} \end{bmatrix} = K_a R_{\theta_a} R_{\phi_a} V_{xyz_i} \quad (10)$$

よって、センサー軸に直角方向の速度成分 V_n は次式のように求められる。

$$V_n^2 = (V_{ay_i}^2 + V_{az_i}^2) \quad (11)$$

この値を (5) 式に代入し補正した温度 T_c を得ることができる。

・遷音速風洞試験

第1次遷音速風洞試験及び第2次遷音速風洞試験は、スティング方式の風洞模型取り付けがされるため、横方向の設定をするために模型をセンサーをスティング軸周りに回転させる。これにより、(6)式の変換方式は次式ようになる。

$$V_{xyz} = R_{\phi}(\phi) R_{\theta}(\alpha) V_x \quad (12)$$

但し、

$$V_{xyz} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}, R_{\phi}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}, R_{\theta}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix}, V_x = \begin{bmatrix} V_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

V_w :風洞設定速度

第2次遷音速風洞試験では、2種類の超音波風速計について試験を行った。

・超音波風速計整形センサー：第1次の遷音速風洞試験で風速の早いところでノイズが増大して風速が計れなくなる現象が確認されたので、ノイズを減らす一つの対策として第2図のセンサーヘッドの周りにカバーを付けセンサー周りの流れを整流することを試みた。写真1のようにセンサーの周りを水滴が落下する時の形状に似せたカバーを作り、センサーヘッドはカバーの横に開けた穴から超音波を送信及び受信するようにした。後から取り付けたカバーのため若干センサーヘッドがカバーから飛び出した形になった。このセンサ

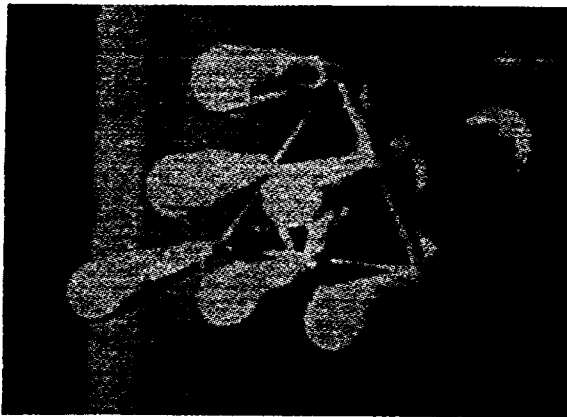


写真1 整形カバーを取り付けたセンサー



写真2 新しいセンサー

ーに対し1気圧と0.57気圧(高度4600mに相当)における試験を行った。これにより気圧及び空気密度変化によるセンサー感度の変化を確認した。

・新しいセンサー：超音波風速計の形状を単純化し空気の流れを乱さないように新しいセンサーを制作した。写真2のように、上下方向のマウントには1対のセンサーを取り付け、上下方向の風速を計測する。水平面に取り付けたマウントには、2対のセンサーが±20度水平面で回転させて取り付けてある。この3組のセンサーから3次元の風速ベクトルを計測することができる。このセンサーのモデルは基本的には(7)式のモデルを使う。修正ニュートンラプソン法で解くときの初期値を変えることにより解を収束させることができる。

③ 超音波風速計による風の観測

機上での風の観測を超音波風速計で行った。図1に超音波風速計で計測した垂直対気速度(V_z)と対気速度(V_x)及び慣性航法装置で計測した上昇率(R/C)と姿勢角(θ)から垂直風の速度(Wwind)を次の式で求めた。

$$Wwind = Vz \cos \theta - Vx \sin \theta + R/C \quad (13)$$

・ V_z のローカル流れの補正

飛行機で風速を計測するときにローカルな流れの補正が必要になってくる。これは胴体や主翼による揚力の影響で前方にブームを出して計測しても上方へのローカルな流れが生じてくるためである。この補正は次の近似式で表される。

$$V_{zc} = k V_{zm} \quad (14)$$

ここで、 V_{zc} は修正された迎え角、 k は修正係数、 V_{zm} は計測された迎え角
 k の値は、数値計算及び飛行試験結果から、B-65は0.8、Do228は0.84を得ている。

④ フラックスの計算

二酸化炭素の他に湿度計を搭載し湿度のフラックスも同時に計測を試みた。フラックスを計算するためにガス濃度と上下風速の相関係数を計算する。

$$F_T = \langle c' \cdot w' \rangle = \langle c \cdot w \rangle - \langle c \rangle \cdot \langle w \rangle, \quad (15)$$

ここで、 $c' = c - \langle c \rangle$, c : ガス濃度, w : 上下風, $\langle \dots \rangle$: 平均演算記号

4. 結果

(1) 石垣島飛行試験

ドルニエ機による秋季温暖化ガス測定の飛行実験は表1に示すように1994年10月6日に調布飛行場を離陸して名古屋空港及び宮崎空港を経由して奄美空港に到着したが、台風29号が石垣島周辺を通過することが分かり、宮崎に引き返し4日間待機した。石垣島では風速50m/s以上の強風のため建物や農作物に大きな被害が出た。

図3は奄美大島の上空から降下したときの冬季(1994年1月)のデータ(○印)と今回行った秋季の二酸化炭素濃度(実線)をプロットしたものである。縦軸に高度(ft)、横軸は二酸化炭素濃度(ppm)である。冬季のデータは3000m(9000ft)付近でピークがあり温度の逆転層が存在したことが分かる。冬季飛行時のこの高度付近は一面の雲が存在していた。

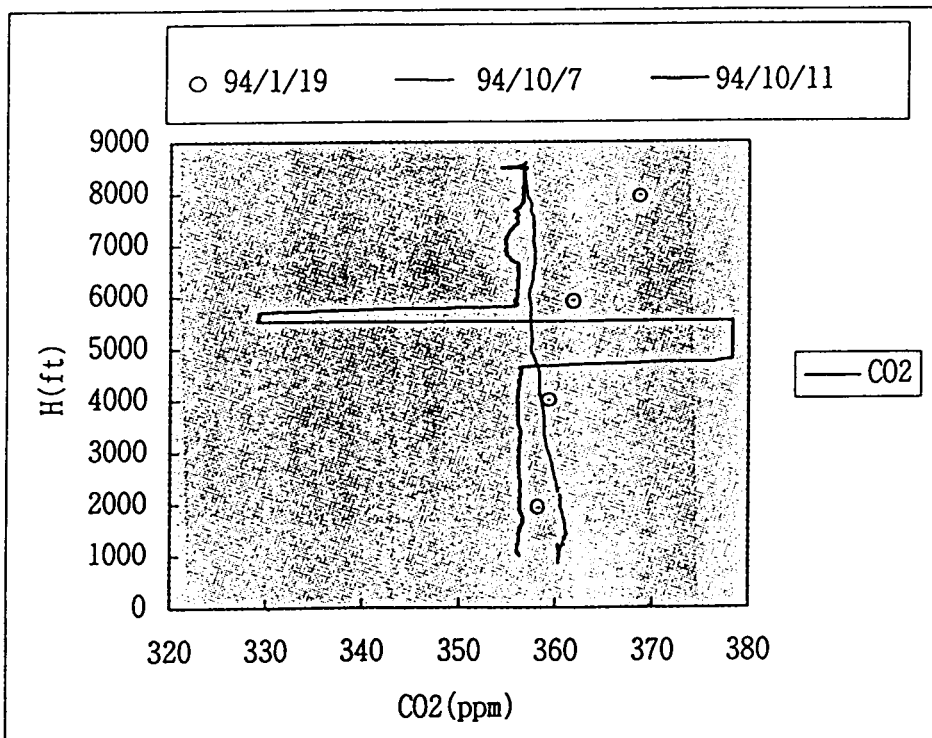


図3 奄美大島の冬季と秋季の二酸化炭素分布の比較

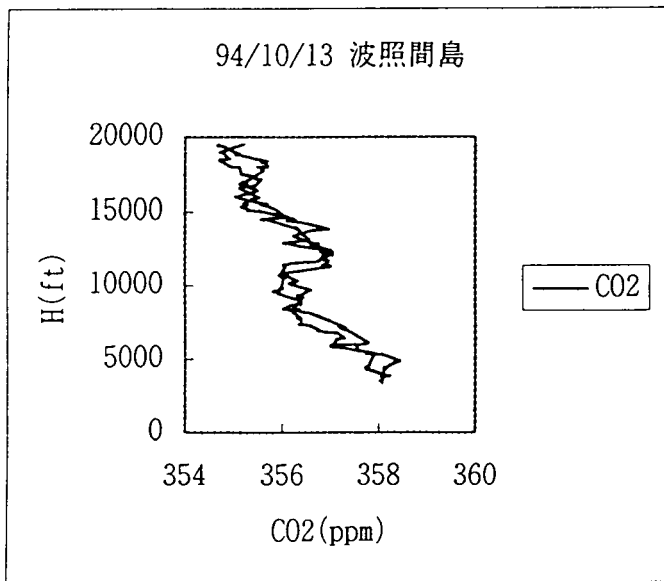


図 4 波照間島上空での二酸化炭素の濃度高度分布

秋季のデータは台風到来の前の快晴の天候であった。二酸化炭素濃度は高度に逆比例して直線的に減少する傾向が見られる。台風 29 号とすれ違った、10 月 11 日の降下データは二酸化炭素濃度が高度に関係せずに一定で台風の影響で大気全体が攪拌された影響が見られた。10 月 11 日のデータで 330ppm と 380ppm のデータは基準ガスによる較正データである。

・波照間島の周辺二酸化炭素測定
波照間島の周辺で高度 700m(2000ft) から 6400m (20000ft)間を上昇及び

降下したときの二酸化炭素のデータを比較してみると高度と共に濃度が減少する傾向が見られる。減少傾向は一定でなく高度によって揺らぎが見られるが上昇及び降下時のデータの再現性は高い。

(2) ボトルサンプリング装置

1996 年に写真 3 に示すボトルサンプリング装置を製作し、マイクロコンピュータによる自動制御の自動サンプリングシステムを整備し、1996 年 1 月に B-65 機で機能確認試験を行った。この装置は 1996 年 10 月から東シベリアの二酸化炭素とメタンガスの高度

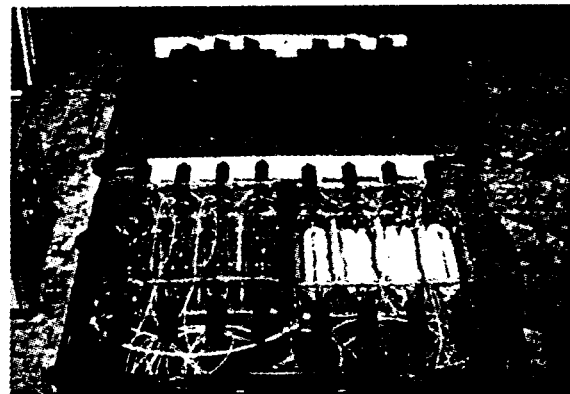


写真 3 トランクに入れたサンプルボトル

分布を調べるため旅客用航空機 AN-24 に搭載して Yakutsk(N 62° , E 129°)周辺の定期的な計測を開始した。1997 年 2 月からはこのシベリアのデータを比較するために日本でも相模湾上空の定期観測を開始した。

(3) フラックス計測

1996 年 7 月に北海道の釧路湿原上空で二酸化炭素と水蒸気のフラックスを計測する飛行試験を行った。航空機は Do228 で二酸化炭素のセン



写真 4 釧路湿原でのフラックス計測

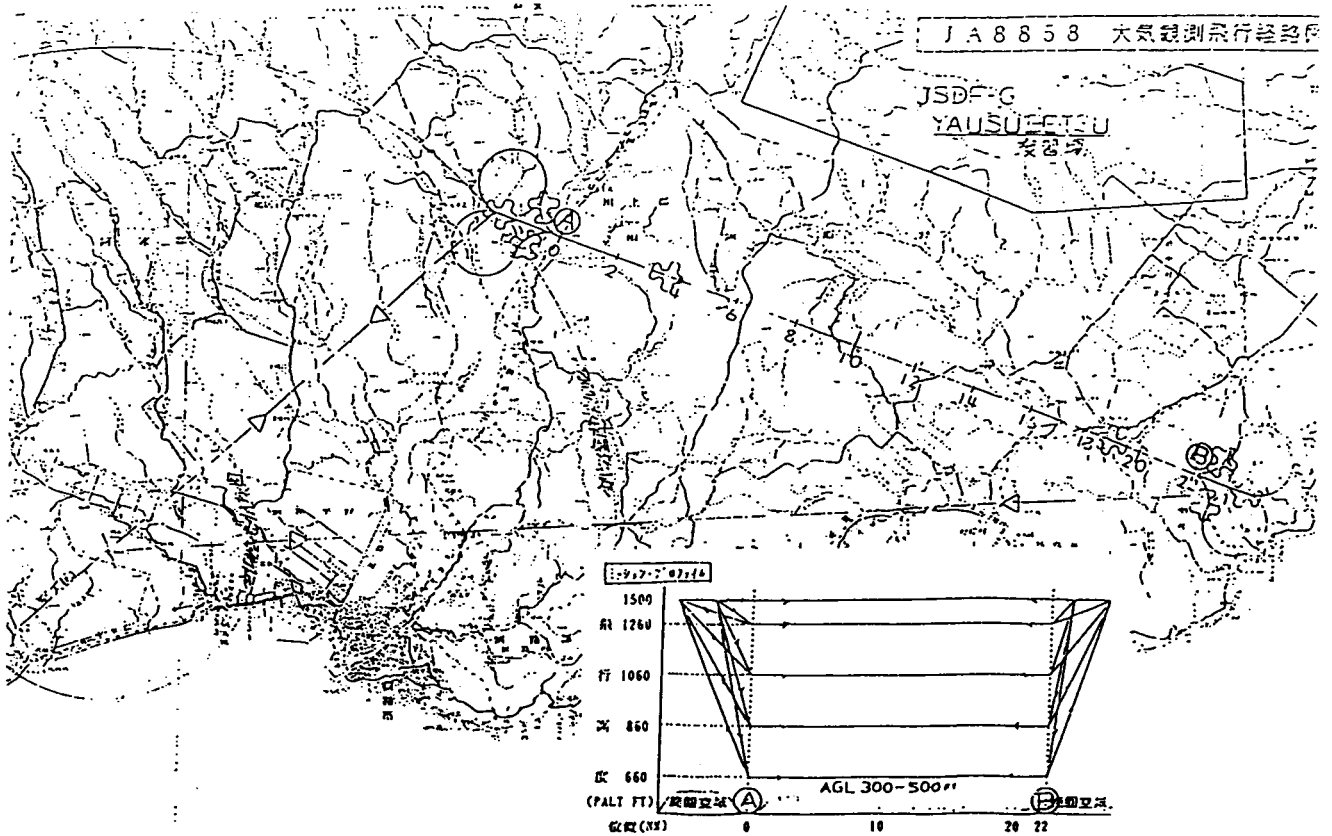


図5 北海道釧路湿原上のフラックス測定飛行コース

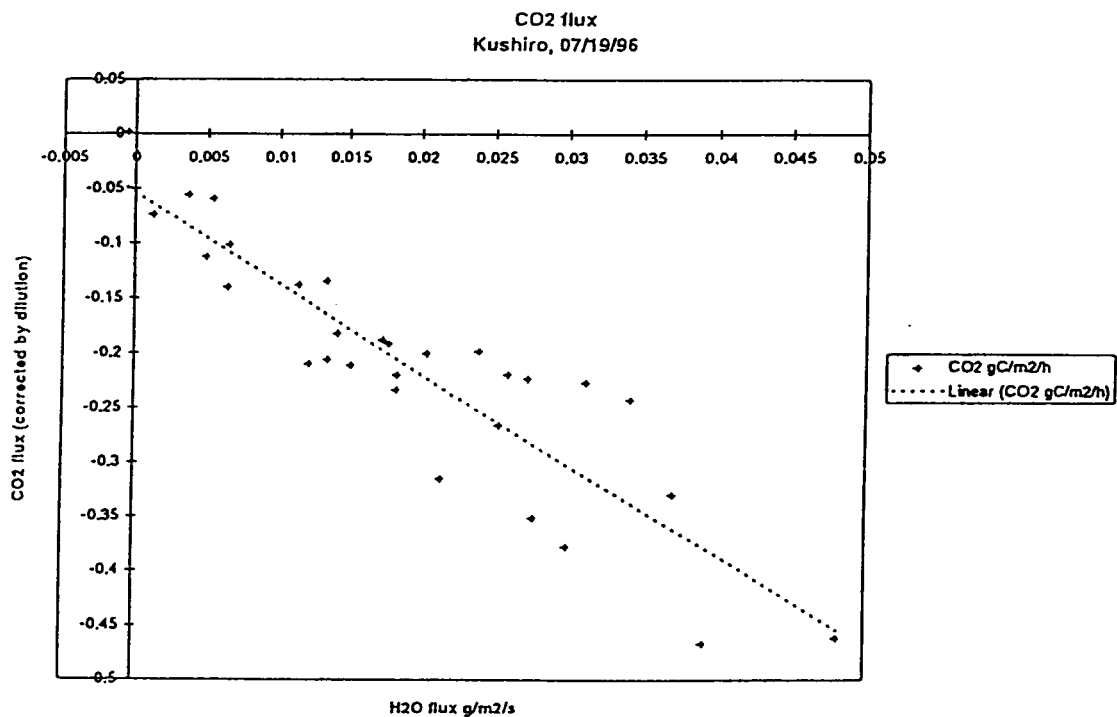


図6 二酸化炭素フラックスと水蒸気フラックスの相関

サー（非分散赤外線吸収法 NDIR）と湿度センサー（Lyman- α ）のほかに上下風を計るセンサーとして五孔ピトー管を使用した。空気取り込みの配管の長さ及び二酸化炭素センサーの遅れより上下風速とガス濃度との間に位相差が生じる。この位相差を補正するため

ガスセンサーの遅れを計算した。この結果、二酸化炭素センサーは約5秒、湿度センサーは0.5秒程度の遅れが確認された。これらの時間遅れを補正して二酸化炭素及び水蒸気のフラックスを計算したところ、図6のように二酸化炭素は負のフラックス（吸収）及び水蒸気は正のフラックス（発生）であることが確認できた。以上により、この方法でフラックスが計測できることが実証された。

(4) 超音波風速計の風洞試験解析結果

・1994年突風風洞での試験：突風風洞で超音波風速計のを行った結果、風速55m/sまでは直線性のよい結果が得られた。高速性については風洞が55m/sが運用限界のため確認できなかった。この風洞試験から得られたデータを使って(7)式の変換マトリックス $T(p)$ を求め、これから逆マトリックス $T(p)^{-1}$ を求めた。この結果を下記に示す。

$$T(p)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.866 & 1.796 & 1.948 \\ -0.00084 & 0.538 & -0.5425 \\ -0.0632 & 0.310 & 0.3192 \end{bmatrix} \quad (94-01)$$

この係数を使って(8)式の誤差を調べてみると、標準偏差が0.4m/s以下であることがわかった。

・1995年は高速性能を調べるために遷音速風洞を使用した。風速設定は50~100m/sで仰角は0, 10, 20°で、各仰角でセンサーシャフト回りに15°置きに±180°までの試験を行った。高速性能は70m/sまで計測できることが分かった。この風洞のデータを処理し変換マトリックス $T(p)$ を求め、これから逆マトリックス $T(p)^{-1}$ を求めた。この結果を次に示す。

$$T(p)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.886 & 1.898 & 1.936 \\ -0.0096 & 0.5398 & -0.5413 \\ -0.628 & 0.302 & 0.3152 \end{bmatrix} \quad (95-01)$$

・1996年は高速性能及び高度特性を調べるため高度15,000ftの遷音速風洞試験を行った。風速設定は50~100m/sで仰角は0及び10°のみで、各仰角でセンサーシャフト回りに30°おきに0~150°までの試験を行った。

・超音波風速計整形センサー：この風洞のデータを処理し変換マトリックス $T(p)$ を求め、これから逆マトリックス $T(p)^{-1}$ を求めた。この結果を下記に示す。

$$T(p)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.731 & 1.772 & 1.739 \\ -0.039 & 0.675 & -0.672 \\ -0.814 & 0.374 & 0.409 \end{bmatrix} \quad (96-02)$$

第2次遷音速風洞試験で行ったオリジナルのセンサーは整流カバーを取り付けたために、整形カバーのためセンサーの回りの流れが変わり、得られた係数もそれなりに変化してい

る。高速性能は 70m/s とほぼ同じだが、受信波形のノイズの周波数が低くなっていることがわかった。これはノイズがセンサー回りの流れに影響されていることを示すもので、流れの制御が高速性能をあげる鍵となる。

・新型センサー：2対のセンサーを1対のマウントに取り付けて水平面内の速度ベクトルを測り、これと垂直のマウントに取り付けられた1対のセンサーで構成された新型センサーの変換逆マトリックスを次に示す。

$$T(p)^{-1} = \begin{bmatrix} 1.359 & 1.334 & -0.020 \\ 0.716 & -0.702 & -0.0154 \\ 0.0122 & -0.0028 & 1.260 \end{bmatrix} \quad (96-10)$$

高速側測定限界は 80m/s まで計測できることを確認し、性能が改善されている事が分かった。また、新しいセンサーは当然のことながら構成が違うため係数は前のセンサーとは異なった値が得られた。特に、X 軸出力に関しては t11 と t12、Y 軸出力に関しては t21 と t22、Z 軸出力に関しては t33 が主要なパラメータになりその他のクロスカップリングの係数は非常に小さくなっていることがわかる。高速性能に関して新しいセンサーは、垂直方向に取り付けられた c センサーがよい性能を示している。これは、センサーが垂直に取り付けられているためマウントカバーとセンサー振動面がほぼ平行になり、流れの乱れが少ないためと考えられる。

(5) 超音波風速計の飛行試験結果

機上での風の観測を超音波風速計で行った。図7に超音波風速計で計測した上下速度 (V_z) と対気速度 (V_x) 及び慣性航法装置で計測した昇降率 (R/C) とピッチ角 (θ) から上下風速を前に示した (13) 式で求めた。

風の観測中で 高度 18,000ft 以上で超音波風速計の出力が不安定になった (V_z 参照)。この原因は、気圧減少に伴う密度の減少により、真対気速度が早くなる事が1つの原因である。又、空気密度が下がることにより音響インピーダンスが下がり、感度が落ちることが後日の検討で判った。1500 秒と 2500 秒の付近で急に上下風速が変化する原因は慣性航法装置の昇降率 (R/C) が気圧高度計に追従しているが、この気圧高度計が 5000 meter 以上で測定できないためである。このため 1500 秒と 2500 秒の間では航空機が上昇及び降下しているにも拘わらず平均値がほぼ零になっている。3300 秒以上で上下風速が乱れるのは超音波風速計のセンサーのコネクターが接触不良で正常に動作しなかったことが原因であった。よって、上下風速が正常に計測できている部分は 0 から 1500 秒及び 2500 秒から 3300 秒の間である。

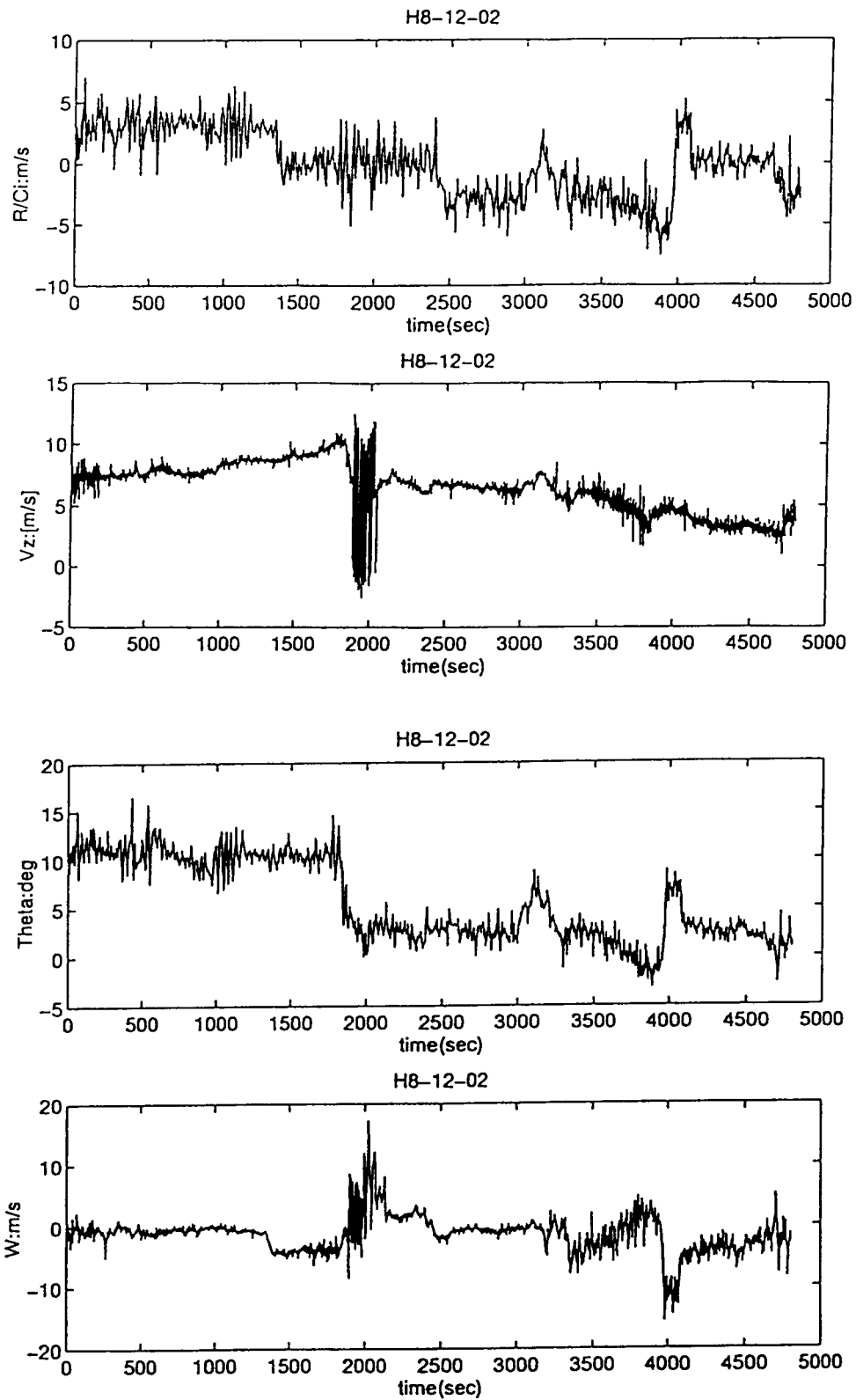


図8 INSと超音波風速計から求めた上下風

5. 考察と検討

1. ドルニエ機による飛行試験は二酸化炭素測定システムの高精度化が達成でき安定したデータが計測できるようになった。
2. 航空機の飛行パラメータ（位置、高度、温度、風速等）を二酸化炭素と同一の計測システムでデータを取り込むことができ、データ処理も早く行うことができるようになった。
3. ドルニエ機は別目的による大規模改修のため、計測システムをクインエア機に搭載することになったが、搭載容量の減少により飛行時間の減少、航続距離等が制限された。この為、今後計測システムの自動化を計り、計測員の搭乗を減らす等の運用上の問題を解決しなければならない。
4. 上下気流の測定のため超音波風速計の開発は実用のレベルまで達した。今後、遷音速風洞による高速域の特性を調べ、直線性等の性能向上のためセンサーの改良を行う必要がある。
5. 慣性速度の精度向上のため慣性航法装置とGPSを組み合わせたハイブリット航法システムを検討して、実時間でフラックス測定に必要な上下風を実時間処理して行く必要がある。
6. 北海道釧路湿原での二酸化炭素及び水蒸気のフラックスを Do228 機に搭載したガスセンサー及び飛行運動センサー及び気流測定センサーにより測定したガス濃度と上下風からフラックスを求めることができた。
7. ボトルサンプリングによる温暖化ガスの測定と共に渦相関法を使ったフラックスの測定は今後の地球環境試験データの測定法の確立された方式として用いることができる。

研究発表

- 1) 田丸 卓、矢澤健司、井上 元、町田敏暢；ドルニエを用いた二酸化炭素高度分布の測定計画、第2回日本・ロシア国際共同シベリア永久凍土総合調査報告シンポジウム、平成6年1月13日、国立環境研究所、茨城県つくば市
- 2) 矢澤健司、田丸 卓、中村 勝、照井祐之、鎌田幸男、白井正孝、井上 元、町田敏暢；航空機を用いた二酸化炭素の測定と超音波風速計の開発、第3回日本・ロシア国際共同シベリア永久凍土総合調査報告シンポジウム、平成7年1月31日、国立環境研究所、茨城県つくば市
- 3) 田丸 卓；航空機による温暖化ガスの測定法の高度化に関する研究、平成8年度地球環境研究総合推進費研究発表会、平成7年10月3日、中央大学駿河台記念館、東京都
- 4) 矢澤健司、井之口浜木、稲垣敏治、白井正孝、；超音波風速計の開発、第33回飛行機シンポジウム、平成7年11月8日、広島国際会議場、広島市
- 5) 矢澤健司、田丸 卓、中村 勝、照井祐之、鎌田幸男、白井正孝、井上 元、町田敏暢；

航空機による炭酸ガスのフラックス計測のための超音波風速計の開発、第4回日本・ロシア国際共同シベリア永久凍土総合調査報告シンポジウム、平成8年1月22日、北海道大学百年記念会館、札幌市

- 6) 北 和之他；航空機排出ガスに関する環境研究、気象学会 1996 春季大会
- 7) 田丸 卓、矢澤健司；航技研航空機による大気環境研究、航空宇宙技術研究所第 34 回研究発表会、航空宇宙技術研究所、平成 8 年 11 月 5 日
- 8) 田丸 卓；航空機による温暖化ガスの測定法の高度化に関する研究、平成 8 年度地球環境研究総合推進費研究発表会、平成 8 年 11 月 11 日、中央大学駿河台記念館、東京都
- 9) 矢澤健司、田丸 卓、中村 勝、照井祐之、鎌田幸男、白井正孝、井之口浜木、稲垣敏治、井上 元、町田敏暢、Mackshutov；航空機における風速測定と温暖化ガスのフラックス測定について、第 5 回日本・ロシア国際共同シベリア永久凍土総合調査報告シンポジウム、平成 9 年 1 月 27 日、国立環境研究所、茨城県つくば市
- 10) 井上 元、Mackshutov、 矢澤健司、田丸 卓、井之口浜木、白井正孝、中村 勝、照井祐之；北海道東における CO₂ フラックス測定、第 5 回日本・ロシア国際共同シベリア永久凍土総合調査報告シンポジウム、平成 9 年 1 月 27 日、国立環境研究所、茨城県つくば市

参考文献

- 1) Tamaru, T., Yazawa, K., Machida, T., Inoue, G.; Measurement of Carbon-Dioxide Variation with Altitude Using Dornier 228, Proceedings of the Second Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1993, Tsukuba, 12-13 January 1994
- 2) Yazawa, K., Tamaru, T., Nkamura, M., Terui, Y., Shirai, M., Inoue, G., Machida, T.; Aircraft measurement of CO₂ and development of an ultrasonic anemometer, Proc. of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost studies between Japan and Russia in 1994, Tsukuba, 30-31 January 1995
- 3) Yazawa, K., Tamaru, T., Shirai, M.; Anemometer for Local Flux Data of Global Warming Effect Gases, Proc. of the Fourth Symposium on the Joint Siberian Permafrost studies between Japan and Russia in 1995, Sapporo, 23-24 January 1996
- 4) Yazawa, K., Tamaru, T., Inokuchi, H., Shirai, M., Nkamura, M., Terui, Y., Inagaki, T., Inoue, G., Machida, T., Makshutov, S.; Research on Upgrading the Measuring Method of the Global Warming Gases by Aircraft, Proc. of the Fifth Symposium on the Joint Siberian Permafrost studies between Japan and Russia in 1996, Tsukuba, 27-28 January 1997
- 3) 田丸 卓；航空機による温暖化ガスの測定法の高度化に関する研究、地球環境研究総合推進費平成 6 年度研究成果報告集、環境庁企画調整局地球環境部環境保全対策課研究調

査室、平成7年10月

3) 田丸 卓；航空機による温暖化ガスの測定法の高度化に関する研究、地球環境研究総合推進費平成7年度研究成果報告集、環境庁企画調整局地球環境部環境保全対策課研究調査室、平成8年11月

表1 地球環境研究風洞試験

超音波風速計風洞試験（突風風洞）						
試験日時	最高風速	迎角	横滑角	気圧	温度	備考
94/07/12	55m/s	±20°	0～10°	1010mbar	30℃	200kHz3軸センサー
94/07/18	55m/s	0～20°	±20°	1010mbar	31℃	200kHz3軸センサー
94/07/19	55m/s	0～20°	±20°	1018mbar	29.3℃	200kHz3軸センサー
94/07/20	40m/s	0～20°	±20°	1012mbar	28.2℃	200kHz3軸センサー
94/07/22	55m/s	0～20°	±20°	1012mbar	29.7℃	200kHz3軸センサー
94/07/25	55m/s	-10～20°	0	1010mbar	30.5℃	100kHz1軸センサー
94/07/26	55m/s	-10～20°	0	1008mbar	32.5℃	200kHz1軸センサー
94/07/27	55m/s	-10～20°	0	1008mbar	32.5℃	200kHz1軸10°傾き
超音波風速計風洞試験（第1次遷音速風洞）						
試験日時	最高風速	迎角	回転角	気圧	温度	備考
	m/s	deg	deg	mm bar	°K	
95/6/27	100	20	0～90	1008	297.5	200kHz3軸センサー
95/6/28	80	10,20	0～180	972	300.1	200kHz3軸センサー
95/6/29	70	10	0～180	800	301.4	200kHz3軸センサー
超音波風速計風洞試験（第2次遷音速風洞）						
試験日時	最高風速	迎角	回転角	気圧	温度	備考
	m/s	deg	deg	mm bar	°K	
96/9/25	100	10	0～150	1000	296.5	200kHz3軸整形センサー
96/9/26	100	10	0～150	570	297.5	200kHz3軸整形センサー
96/9/27	100	10	0～150	1000	299.5	200kHz3軸変形センサー

表 2 地球環境研究飛行試験

調布－石垣飛行試験(Do228)						
飛行日	離陸	T/O 時間	着陸	L/D 時間	飛行番号	備 考
94/9/30	調布		調布			予備試験
94/10/6	調布	15:00	名古屋	16:25	F416	94 秋季環境試験
94/10/7	名古屋	08:20	宮崎	10:35	F417	Do-228
94/10/7	宮崎	11:30	奄美	13:10	F419	往路
94/10/7	奄美	15:15	宮崎	16:45	F420	台風 29 号のため
94/10/11	宮崎	13:45	奄美	15:35	F421	往路
94/10/12	奄美	13:05	那覇	14:35	F422	往路
94/10/12	那覇	16:00	石垣	17:30	F423	往路
94/10/13	石垣	10:40	石垣	12:55	F424	西表島周辺
94/10/13	石垣	14:25	石垣	16:25	F425	波照間周辺
94/10/14	石垣	9:40	奄美	12:05	F426	帰途
94/10/14	奄美	13:40	高知	15:50	F427	帰途
94/10/14	高知	9:45	調布	12:00	F428	帰途
サンプルリンク装置試験 (B-65)						
96/01/19	調布	14:35	調布	15:15	F5202	サンプルリンク装置試験
96/01/25	調布	14:00	調布	15:35	F5202	B-65
フラックス測定 (Do-228)						
96/7/12	調布	14:40	調布	15:35	F6101	予備試験 Do-228
96/7/18	大樹	11:35	釧路	14:20	F6102	フラックス測定
96/7/18	釧路	15:05	帯広	15:45	F6103	風観測
96/7/19	大樹	11:05	釧路	13:40	F6104	フラックス測定
96/7/18	釧路	15:00	帯広	15:55	F6103	風観測
96/7/19	帯広	11:05	帯広	13:40	F6104	フラックス測定
サンプルリンク装置試験 (B-65)						
96/12/25	調布	14:30	調布	15:40	F6201	サンプルリンク装置試験
96/02/05	調布	14:10	調布	15:50	F6202	B-65 相模湾
96/03/04	調布	14:20	調布	15:55	F6203	B-65 相模湾