

離着陸時の航空機観測による風に含まれている誤差の評価

遠 峰 菊 郎・後 藤 仁 志*

要 旨

本研究では、小松空港で航空機により計測されている離着陸時の風のデータに含まれている誤差について、輪島における高層観測、及び小松空港に設置したドップラーソーダーを用いて調査した。その結果、大気下層において離陸時に計測された風速はドップラーソーダーにより計測された10分間平均値の風速よりも大幅に小さく、その差は大きい場合が多い。これに対して着陸時において大気下層で計測された風とドップラーソーダーによる風の風速差は、風速によらず比較的に一定であり、 4 ms^{-1} 以下であった。その結果、風速が小さい場合は風向差が大きい場合もあるが、風速が 6 ms^{-1} 以上の場合は風向差は小さく15度以下となった。この着陸時における風の差は航空機観測による瞬時値とドップラーソーダー観測による平均値の差である可能性が大きく、風速が 6 ms^{-1} 以上で安定している場合は、着陸時の航空機により計測されている風を用いて大気下層における気象現象を解析できる可能性を示した。

1. はじめに

商用航空機により観測される気象データは ACARS (Aircraft Communication Addressing and Reporting System) を通じて飛行場に通報され、この気象データは時間分解能が大きくデータ総量が多いので、様々な解析に利用する多くの試みが行われている (楠・弟子丸, 1994)。これらの例として、Benjamin *et al.* (1991) による数値モデルの中に航空機のデータを取り込む試みや、Tenenbaum (1992) による Jet Stream 近傍の風について数値モデル上のデータと航空機によるデータを比較した研究がなされている。

ここで、飛行場の局地的な気象現象を理解するためには、飛行場上空における大気下層の風と気温分布を知ることが重要である。このためには、ACARS により地上に通報されている風と気温のデータを用いることが有効である。しかし立平・鈴木 (1994) は単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度を求めめるために離発着時の ACARS のデータを用いたが、一般的に

は離発着時の風データは誤差が大きい可能性があるとして述べている。ACARS により通報されている風の誤差については、機体の横軸と水平面がなすバンク角が風向風速に影響を与えること、また、離陸時において下層大気中で計測された風速が小さく表現される例が Bisiaux *et al.* (1983) により示されている。また、Schwartz and Benjamin (1995) は1828 m から9144 m 高度間の ACARS データをレーウィンゾンデデータと比較し、気温、風向、風速の自乗平均誤差はそれぞれ 0.59°C , 35.1° , 4.1 ms^{-1} であることを示した。

本研究のために、ボーイング777とボーイング747-400に搭載されている FMS (Flight Management System) により算出された風のデータの中で、ACARS を通じて石川県小松飛行場に通報されたものを使用した。ここでは、輪島における高層観測における自由大気中の風と小松飛行場に設置したドップラーソーダーにより計測した100~300 m 高度における風の10分間平均値を真値として、ACARS により地上に通報されている風の誤差評価を行う。ここで用いられているセンシトロン社のドップラーソーダーシステム325の性能諸元を第1表に示す。接地境界層内で ACARS により通報された風の誤差は、本研究により初めて調べら

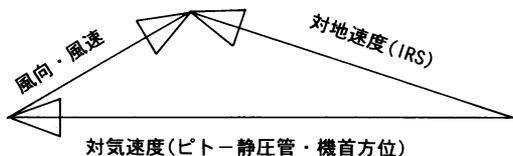
* 防衛大学地球科学科。

—1997年5月27日受領—

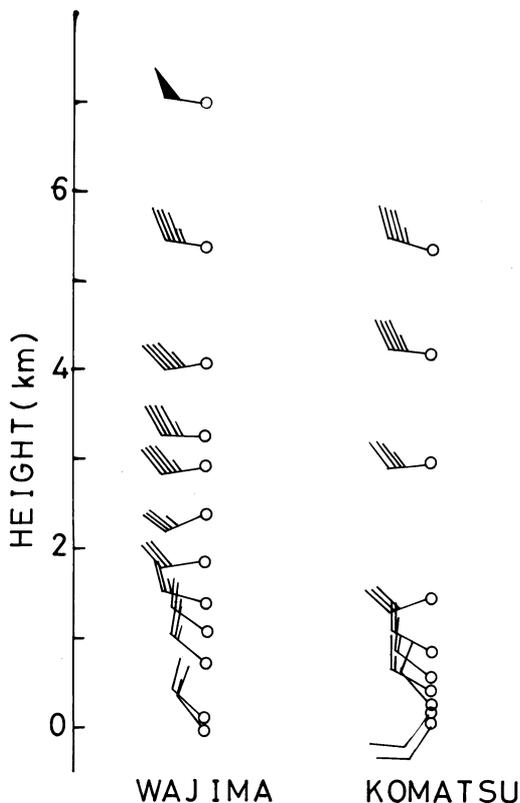
—1999年3月24日受理—

第1表 ドップラーソーダーの性能諸元.

項目	仕様
測定方式	3方向モノスタティック方式
送信周波数	2300Hz
送信出力	150W
送信パルス長	30~290 msec
送信繰返し間隔	2~7sec
測定範囲	25~1000m
鉛直風速レンジ	+/-0.2~1.1ms ⁻¹
水平風速レンジ	+/-0.2~22ms ⁻¹
鉛直分解能	5~50m
水平風速精度	0.2ms ⁻¹ 以上
風向精度	+/-5° 以上
鉛直風速精度	0.1ms ⁻¹ 以上
積分時間	2~90分



第1図 航空機により風向, 風速を計測する原理.



第2図 1996年12月28日9時の高層観測(輪島)と航空機観測(小松)による風の鉛直分布. 三角矢羽, 長矢羽, 短矢羽はそれぞれ50 kt, 10 kt, 5 ktを表す.

れている.

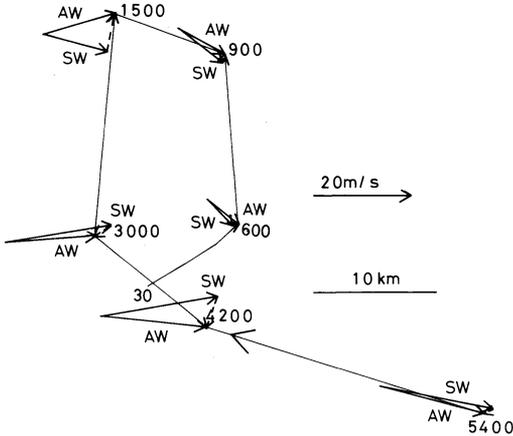
ここで, ACARS により通報されている風を測定する方法を概説する. 航空機には機首方向に開口したピトー静圧管が装備されており, 対気速度が測定できる. また, 対地速度は IRS (Inertial Reference System) により加速度を時間積分して求められるので, 両者の速度ベクトルの差として風ベクトルが算出される (第1図). また, ACARS により通報される風向と風速の測定精度は0.3°と0.15 ms⁻¹であり, 非常に小さいと言われている (Schwartz and Benjamin, 1995).

2. 飛行経路がカーブすることに起因する誤差

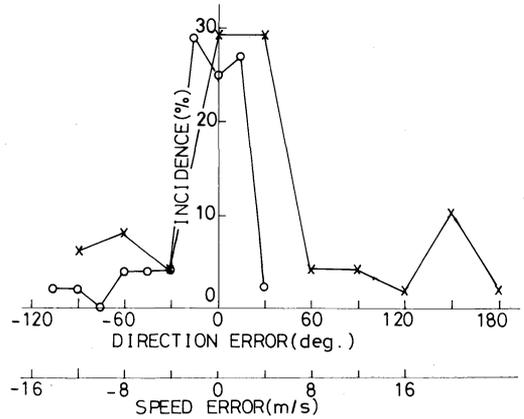
本研究では, 1996年12月と1997年1月のデータを使用した. 第2図に比較的強風日の12月28日9時における, 輪島の高層観測と小松飛行場に到着する航空機により観測された風を示す. ここで, 高層観測により求

められる風向, 風速は, 5 km 高度以下では1分間の平均(約360 mの平均)値である. 第2図で5400 m 高度の風は風向, 風速とも両者は良く一致しているが, 450 m から4200 m までの風は風向については30°以下, 風速については5 ms⁻¹以下であるが, わずかに異なっている. ACARS により通報された風とレーウィンゾンデ観測による風向, 風速の差は Schwartz and Benjamin (1995) により統計的に求められており, その自乗平均誤差は風向で35.1°, 風速で4.1 ms⁻¹であった. この差は小松飛行場について上述されている差と同程度である. しかし, 450 m 高度以下では両者の風向は全く異なっていた. この両者の相違はドップラーソーダーによっても確認されており, 低高度の風に対しては局地的な影響が大きいことを示している.

このように ACARS による風とレーウィンゾンデ観測による風の差が比較的小さい高度600 m 以上の



第3図 着陸時の航空機により観測された風(AW)と高層観測による風(SW). 図中の数字は高度(m)を表す. SWとAWの先端を結んだベクトルが風の誤差を表す.



第4図 離着陸時に低高度を直進している際の航空機観測による風向(×—×), 風速(○—○)の誤差の発現率. 真値はドップラーソナーにより計測された10分間平均値とする.

風について両者の差を航空機の着陸経路に沿って調べ第3図とする. ゾンデ観測による風を ACARS により通報された風の高度に内挿して両者を比較した. 上述しているように5400 m 高度では両者の差は小さい. 600から4200 m 高度間の風を比べると, 両者のベクトル差は常に航空機が描くカーブの外側に向いている. このように飛行経路の外側にこのベクトル差が向く傾向は, 風が弱い時にはこれ程顕著ではないが, よく見受けることができる. IRS より導かれる対地速度の誤差は 1.4 ms^{-1} 程度以下であり, また, 経路のカーブとは無関係に現れなければならないので, このような系統的な速度差は対地速度の誤差からは生じない. そこで対気速度ベクトルに含まれる誤差を考える. 対気速度ベクトルの方向は航空機の機首方位により決定するが, 航空機がカーブする際には一般的に機体を内側に傾け, バンク角を取る. バンク角を取ると, 風向, 風速に含まれる誤差が大きくなり, 特に風向差とバンク角の相関が良いことは Bisiaux *et al.* (1983) により報告されている.

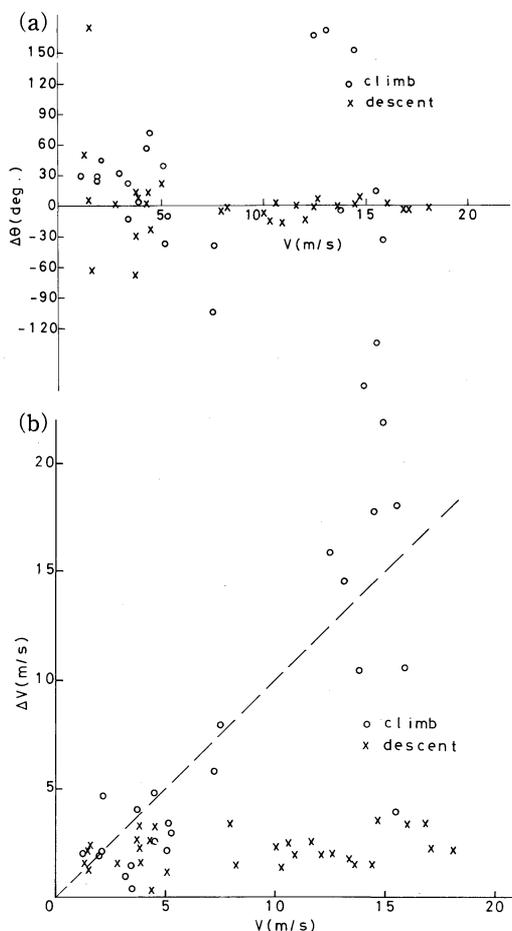
航空機がバンク角を取って旋回している時は, 航空機は機首の方向だけでなく機首と直交方向に横滑りを起こしている可能性があり, この横滑り速度を計測するためのセンサーは本研究対象としている航空機には搭載されておらず, 横滑り速度は対気速度には含まれない. そこで, この横滑りが ACARS による風とレーウィンゾンデ観測による風のベクトル差として現れていることが推察される. 本研究の範囲内では, このベ

クトル差の大きさは 10 ms^{-1} 以下である. 風速が小さい場合も同様な傾向は頻繁に現れるが, 第3図ほど顕著ではない. これは, 風速が小さい場合は風向が安定していないことが多く, 航空機では風の瞬時値を計測し, ゾンデ観測では1分間の平均値を算出するために, 両者の風向差のばらつきが大きくなるためであろうと推察される.

3. 離発着時の風の誤差について

低高度で航空機が直進している最中に測定された風向・風速と, 小松空港に設置したドップラーソナーにより測定した10分間平均の風向・風速との差の発生頻度を第4図に示す. ここではドップラーソナーにより風を常時測定している300 m 高度未満において ACARS による風が通報されているデータのみを用いた. その離発着件数は13件であり, 1件につき3から4高度の風データが通報されているので, 第4図に用いられているデータ総数は42である.

この図によれば, 風向, 風速とも差が小さい範囲内に出現頻度の最大が存在しているが, 風向差は -90° から 180° に広がり, 風速差は -14 ms^{-1} から 4 ms^{-1} にまで広がっている. またそれぞれの差の平均値とその標準偏差は風向で 25.2° と 21.9° であり, 風速で -1.2 ms^{-1} と 0.7 ms^{-1} であった. Schwartz and Benjamin(1995)は ACARS による風とレーウィンゾンデ観測による風を比較し, 風向と風速の自乗平均誤差はそれぞれ 35.1° と 4.1 ms^{-1} であったと述べている. これらの自乗平均誤



第5図 風速 V に対する (a) 風向差 ($\Delta\theta$) と (b) 風速差 (ΔV) の散布図。離陸時と着陸時のデータをそれぞれ○と×で表す。

差は風向については本研究によるものと同程度であるが、風速については本研究による差の方がはるかに小さい。しかし第4図は大気下層のみのデータの統計であり、そこでの風速は大気上層に比べて小さいことが推察され、このために風速差が小さくなったものと考えられる。

この風向差と風速差の分布を調べるために、ドップラーソナーによる風速の10分間平均値を横軸として、風向差 ($\Delta\theta$) と風ベクトル差の大きさ (ΔV) の散布図を作り、第5図 a, b とした。またここでは、特に離陸時において風速が大きい場合のデータ数を増やすために、ACARS による通報が300 m 高度以上でしかなされていない場合でも、離陸時において ACARS によるデータとドップラーソナーによる観測高度が

一致している場合はそのデータセットを使用した。このようにして増加されたデータ数は8である。まず第5図 a によれば、風速が小さい場合に $\Delta\theta$ が大きくなる傾向が見られる。風速が 6 ms^{-1} 以上では着陸時の $\Delta\theta$ が小さくなり 15° 以下になるが、離陸時における $\Delta\theta$ は小さくならない。また第5図 b によれば、着陸時の ΔV は風速によらず概ね 4 ms^{-1} 以下であるが、離陸時の ΔV は風速とともに増大する傾向が見られる。着陸時におけるこのような傾向は境界層内の擾乱の影響であろうと推察される。しかし離陸時に見られる風速が大きくなると ΔV が大きくなる傾向は、大気擾乱の影響とは考えられない。

ACARS により通報される風とレーウィンゾンデ観測による風の差を着陸時と離陸時において比較すると、1500 m 高度以上における風の差は上述されているような両者間の相違を示さなかった。しかし800 hPa 高度程度以下では、離陸時には上空で風速が大きくなっても ACARS は地上風速に近い弱い風を通報する例が Bisiaux *et al.* (1983) により示されている。ここで1500 m 高度以下における航空機の操縦の仕方の中で、離陸時にはエンジン出力を大きくし、離陸時の上昇角 (約 15°) は着陸時の降下角 (約 -3°) よりもかなり大きいこと等が離着陸時に航空機により観測される風に相違を与えていることが想像されるが、その詳細は明らかでない。

4. 着陸時の風の誤差について

風速が大きくなると離陸時における風の誤差は特に大きくなる傾向があるのでこれを除き、ここでは着陸時に航空機が直進している際の誤差についてのみ調べる。

ピトー静圧管の振る舞いは航空機の姿勢により影響されるが、本データの場合、この影響は既に補正されている。ピトー静圧管の気圧計の誤差は 0.549 hPa 以下に定められており、一般的にはその半分以下で運用されている (日本航空技術協会, 1995)。マッハ数 (M) とプレッシャーレシオ (P_t/P_s) の関係式は、

$$M = \sqrt{\frac{1}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{P_t}{P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

となる。ここで、 P_t , P_s は全圧と静圧であり、 $\gamma \equiv C_p/C_v$, C_p と C_v はそれぞれ定圧、及び定積比熱である。この関係式において、対気速度を 60 ms^{-1} とし、静圧を 1000 hPa とすると、 0.2 hPa の気圧計の誤差から導出

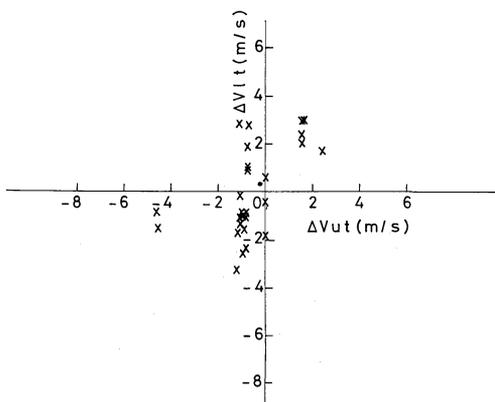
される速度誤差はおよそ 2.5 ms^{-1} となる。この誤差は対気速度に反比例する性質があり、対気速度の減少とともに増加する傾向があるが、離着陸時の航空機の対気速度は $60\sim 70 \text{ ms}^{-1}$ 程度なので、この気圧計の誤差に起因する速度誤差はおよそ 3 ms^{-1} 以下であると見積もられ、第5図bに示されている速度差と同程度であり、本研究が対象としている誤差を考察する場合、無視することはできない。なお5000 m 高度における対気速度は $180\sim 200 \text{ ms}^{-1}$ 程度であり、この場合の気圧計の誤差に起因する速度誤差は 1 ms^{-1} 程度である。

また、着陸時には航空機の航跡は斜めになり、これにともないピトー静圧管にも斜め方向から気流が当たることになり、このために対気速度に誤差が生じることが予想される。この降下角は約 -3° である。 -3° の降下角による動圧の誤差は $3/100$ 程度であり(Hagen and Deleo, 1987)、これに起因する速度差は対気速度を 60 ms^{-1} とすると 1.8 ms^{-1} となり、あまり大きくない。

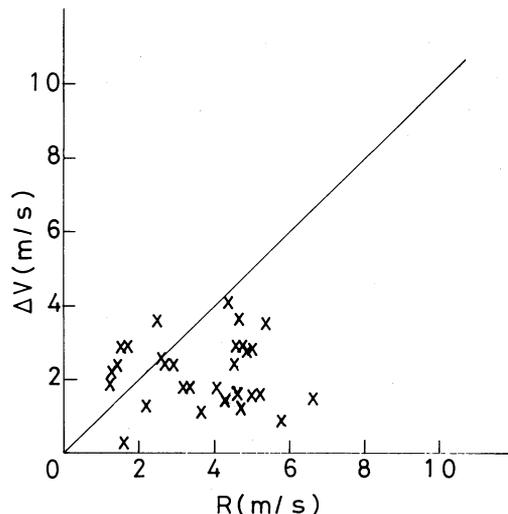
次に対地速度に含まれている誤差について考える。前述しているように対地速度はIRSにより航空機に加えられた加速度を時間積分することにより求められている。加速度計の誤差は $10^{-5} g$ (g は重力の加速度)程度であり(日本航空技術協会, 1985)、ここから導かれる速度誤差は本研究の場合は非常に小さく無視し得る。しかしながら、安定プラットホームはジャイロが生じる1時間あたり 0.01° 程度のランダムドリフトのためにしだいに水平位置よりずれ、このためにプラットホームは振動し、速度の誤差を発生させる。この誤差はプラットホームの傾きが 0.01° とすると約 1.4 ms^{-1} となり、本研究では無視し得る程度である。

前述されているような原因により対気速度に含まれている誤差が支配的である場合には、航空機が高高度で直進している際に航空機により計測された風とゾンデによる高層観測による風の差と着陸時の風の誤差の飛行経路に対する接線成分の大きさは比例し、高高度と着陸時の誤差の大きさはそれぞれ 1 ms^{-1} と 3 ms^{-1} 程度以下であることが予想される。そこで、上空の風速差の飛行経路に対する接線成分 ΔV_{ut} と着陸時の飛行経路に対する接線成分 ΔV_{lt} の散布図を作成し、第6図とする。この図によれば、両者はほとんど無関係であることが確認され、誤差の大きさも予想外に大きいので、ピトー静圧管の誤差が支配的であるとは考えられない。

次にドップラーソーダーでは風の10分間平均値を記録し、航空機では風の瞬時値を測定するために両者の



第6図 上空における風の誤差の飛行経路に対する接線成分 ΔV_{ut} と着陸時における風の誤差の接線成分 ΔV_{lt} の散布図。



第7図 着陸時におけるドップラーソーダーによる風速の標準偏差 R に対する風のベクトル差 ΔV の散布図。

間には風の息による差が存在することが推察される。そこでこの考えを確認するために、ドップラーソーダーによる風の標準偏差 R に対して風のベクトル差 ΔV の散布図を第7図に示した。この図によれば、ほとんどのベクトル差は標準偏差よりも小さく、風の差が大きい場合は標準偏差も大きい。また、 ΔV が大きい場合も R と同程度である。そこで、風の息が風の差に対して与える影響が大きいことが理解される。

5. 議論と結論

第3図より、カーブしている最中に航空機により計測された風は、カーブの外側に向かい、これはバンク角の影響であることが推察される。本研究の範囲内ではこのACARSにより通報される風とゾンデ観測による風のベクトル差は 10 ms^{-1} 以下であり、風速が 20 ms^{-1} 以上であれば、これに起因する風向差は 30° 以下になる。しかし風速が 20 ms^{-1} を越える事例は少なく、気象現象の解析のために飛行経路がカーブしている際に計測された風データを用いることは不相当である場合が多いことが予想される。

離陸時にACARSにより通報された風は大きな誤差を含んでいる場合が多い。離陸時にACARSにより通報された風の方が着陸時の風よりも誤差が1.3倍程度大きいということは、Schwartz and Benjamin (1995)によっても述べられている。彼らは1828.8 m高度以上の風について飛行場から離れた場所から飛揚されたレーウィンゾンデにより計測された風と比較してこの結論を導いているが、本研究では該当飛行場に設置されたドップラーソーダーにより計測した接地境界層内の風と比較し、離陸時の風の誤差は着陸時の誤差よりもはるかに大きいことを示している。

着陸時にACARSにより通報された風に含まれる誤差は、瞬時値と平均値の差である可能性が大きい。この差は風速によらず比較的に一定なので、風速が小さい時は風向差が大きくなる場合が多く、本研究では風速が 6 ms^{-1} 以上になると風向差は 15° 以下になる。また、平均風速が大きい場合には、この誤差は無視し得るようになり、このような場合にACARSにより通報された風は局地的な気象現象を解析するために有効である。

謝 辞

本研究のために貴重なデータを提供して下さった、日本航空(株)小松空港所の皆様に深く感謝します。また、観測を支援して下さった航空自衛隊小松基地の皆様にも感謝いたします。

参 考 文 献

- Benjamin S. G., K. A. Brewster, R. Brümmer, B. F. Jewett, T. W. Schlatter, T. L. Smith and P. A. Stamus, 1991: An isentropic three-hourly data assimilation system using ACARS aircraft observations, *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 888-906.
- Bisiaux, M., M. E. Cox, D. A. Forrester and J. T. Storey, 1983: Possible improvements in meteorology for aircraft navigation, *J. Navigation*, **36**, 54-63.
- Hagen F. W. and R. V. Deleo, 1987: Accuracies for digital multiple output air data systems for angle of attack, Pitot and static pressure measurements, Rosemount report, D8720047, 1-8.
- 楠 昌司, 弟子丸卓也, 1994: 航空機データの新たな発展: ACARS データ, *天気*, **41**, 303-312.
- 日本航空技術協会, 1985: 航空電子装備(下巻), 新航空工学講座, **13**, 59.
- 日本航空技術協会, 1995: 航空宇宙電子システム, 航空保安無線システム協会, 338.
- Schwartz B. and S. G. Benjamin, 1995: A comparison of temperature and wind measurements from ACARS-equipped aircraft and rawinsondes, *Wea. Forecast.*, **10**, 528-544.
- 立平良三, 鈴木 修, 1994: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度, *天気*, **41**, 761-764.
- Tenenbaum J., 1991: Jet stream winds: comparisons of analyses with independent aircraft data over southwest Asia, *Wea. Forecast.*, **6**, 320-336.

Estimations of Errors Included in Wind Measured with the Flight Management System on Aircrafts in Landing or Taking off

Kikuro Tomine* and Hitoshi Goto**

* (Corresponding author) Department of Geoscience, National Defense Academy, Yokosuka 239-0811, Japan.

** Department of Geoscience, National Defense Academy.

(Received 27 May 1997; Accepted 24 March 1999)