

無人航空機によるリアルタイム in-situ 測風

尾塚 馨^{1) 2)}, 林 政彦²⁾, 岡部 和夫³⁾, 東野 伸一郎⁴⁾

(平成25年12月9日受理)

Real Time in-situ Wind Measurement by an Unmanned Aerial Vehicle

Keiichi OZUKA^{1) 2)}, Masahiko HAYASHI²⁾, Kazuo OKABE³⁾, and Shin-Ichiro HIGASHINO⁴⁾

(Received December 9, 2013)

Abstract

無人航空機に磁気方位計, 5孔ピトー管, 熱線風速計, GPSを搭載し, 計測された対気速度, 対地速度を用いて, 風速ベクトルを算出することにより風向・風速を測定した. 機体旋回中の測風データは磁気方位計による誤差が大きいため, 直線飛行時のデータを用いた. 棄却後の測定システムが測風に与える誤差を検討した結果, 今回の実験における測風誤差が, 風向 ± 17 度, 風速 ± 1.1 m/s程度であると考えられた. 主な誤差の要因は磁気方位計によるものと考えられるため, 磁気方位計による機首方位の測定方法の改善により測風精度の向上が可能と思われる.

In this study, a wind velocity vector was measured with a magnetic direction meter, a 5 hole pitot tube, a hot wire anemometer, and GPS on Unmanned aerial vehicle. A wind velocity vector is computed using the airspeed and ground speed which were measured by the instruments. The error of wind measurement data of turning flight was increased by the magnetic compass. We used the data of straight flight. The result of having examined the error of wind which these measurement systems give to measurement, the error of measurement in this experiment was considered to be ± 17 degrees wind directions and about ± 1.1 m/s wind velocity. The factor of the main errors is based on a magnetic direction meter. An improvement of the measuring method of the direction by a magnetic direction meter, It seems that improvement in measurement accuracy is possible.

1. 緒言

近年, 無人航空機の研究観測利用の動きが活発である. 無人航空機の多くはガソリンエンジンによって駆動するプロペラ推力により飛行し, その対気速度は機種によるが, およそ130~35 km/hの範囲である. 例えば, 筆者らが使用している80 ccガソリンエンジンを備えた大型カイトプレーンの対気速度はおよそ40 km/hであり, 高度3000 mまでのエアロゾル観測の実績がある (Hayashi et al. 2010). また, ほぼ同級のエンジンを備えた極地研究所の無人航空機 AntPlaneは, 対気速度130 km/hで飛行し, 高度5700 mまでの鉛直大気観測, 1000 kmの長距離飛行に成功している (平沢ほか2009).

無人航空機を用いた測風の意義として, 最初に気象要素としての利用が挙げられる. 鉛直方向のみの気象ゾンデと違い, 無人航空機を用いることによって, 数百kmにわたる水平方向, 数kmにわたる鉛直方向と, 機体性能の範囲内の時間的, 空間的な分解能の高い直接観測が可能となる. また, 搭載する観測装置との併用により, そのデータ解釈の幅も広がる. 例として筆者らが運用するカイトプレーンの場合, エアロゾル, 気温, 湿度に加えて風のデータが加わることになる.

また, 長距離・高々度とその飛行領域が拡大する無人航空機の安全な飛行のためにも, リアルタイムな風向風速の情報は航法上必要不可欠なものである. 上空

1) 日本タングステン株式会社 Nippon Tungsten Co., Ltd.

2) 福岡大学理学部地球圏科学科 Department of Earth System Science, Faculty of Science, Fukuoka University

3) 株式会社スカイリモート Sky Remote Co., Ltd.

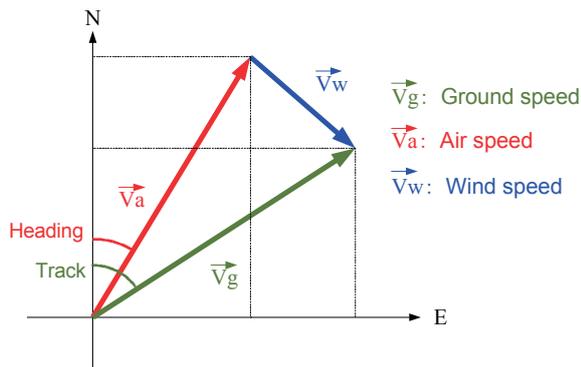
4) 九州大学大学院工学研究院 Kyushu University

の風向・風速に加え、燃料残量、飛行速度から、機体の最大進出距離を算出することができる。また、回収地点へ帰投不可能となるような強風に遭遇するおそれがある場合、早めに帰還を指示することも可能となる。以上の観点から本研究ではリアルタイムな測風を目的として、無人航空機カイトプレーンによるin-situ測風の飛行実験を行い、その誤差について検討した。

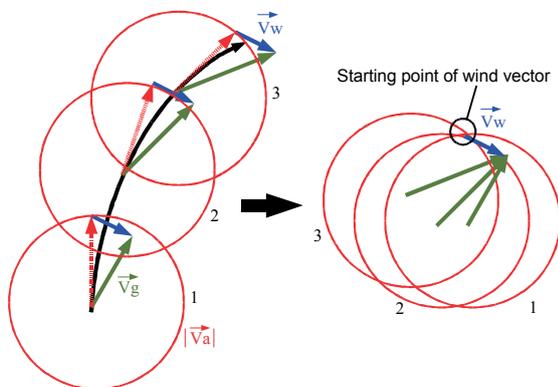
2. 測風の原理

基本的な風算出の原理は第1図のようになる。機体が大気中を進む速度を対気速度ベクトル V_a 、同様に機体が地上に対して進む速度を、対地速度ベクトル V_g とする。機体を包む大気の移動が風であるので、対気速度 V_a と風速 V_w の合成が、対地速度 V_g となる。本研究では、対気速度 V_a 、対地速度 V_g を測定、南北成分、東西成分に分解し、風向・風速（風速ベクトル）を算出した。なお、これら3ベクトルによる三角形は、航空航法分野では風力三角形と呼ばれている（時枝1998）。

また、機体の飛行針路が変化する状況にあつては、



第1図 風力三角形による測風の原理。
Fig.1 Method of Wind Velocity measurement (Wind Triangle method).



第2図 3円交点法（ウインドスター測風法）による測定の原理。
Fig.2 Method of Wind Velocity measurement (Windstar method).

第2図に示すように対地速度ベクトルと対気速度ベクトルのスカラーのみの測定から風速ベクトルを算出することが可能である。本研究においては便宜的に3円交点法とよぶが、特に複数方向の針路上にて取得したデータより算出する方法は、ウインドスター測風法として用いられている（多目的小型無人機チーム2007）。対地速度ベクトルは機体に搭載されたGPSにより簡便に測定できるので、ピトー管等より得られる対気速度ベクトルのスカラーの測定ですむ簡便な方法であるが、飛行中に複数の変針を行う必要がある。長距離の進出を考えれば、飛行途上の変針による時間・燃料のロス避けたいという考えから、本研究では3円交点法で求めた平均風速を参考値とし、対気速度ベクトルの逐次測定を比較検討することとした。

3. 使用機材

一般に無人航空機の搭載量は有人航空機と比較して限られており、風計測のためには主となる観測機材を圧迫しない必要最小限度の測器を用いる必要がある。無人航空機カイトプレーンは第3図に示すように折りたたみ式のロガロ翼の主翼を特徴としており、低速で飛行し搭載重量は6 kgと比較的余裕がある（第1表）。本研究にてカイトプレーンに搭載した測定機器を第2表に示す。対気速度 V_a のスカラーは機体翼端に搭載した熱線風速計を用いて測定した。対気速度 V_a ベクトルの方向と飛行中のカイトプレーン機軸は、気流による動揺や操舵などにより、常に一致しているとは限らない。対気速度 V_a ベクトルの方向の測定については、超音波風速計とINSを用いた例があるが（光本ほか1985）、本研究では小型軽量な面を考慮し、機首方位を測定する磁気方位計に加え、すべり角を測定する5孔ピトー管を搭載した。磁気方位計にはセンセーション社製VectorCube (VC-03)を用いた。VectorCubeは地磁気3成分に加え、3軸加速度計によりピッチ角、バンク角の測定が可能である（第4図）。5孔ピ



第3図 無人航空機カイトプレーン外観。
Fig.3 Uninhabited Aerial Vehicle KitePlane.

第1表 無人航空機カイトプレーン 機体諸元.
Table.1 Specifications of KitePlane.

Wing span	2.3 m
Length	3.0 m
Total weight	27 Kg
Payload weight	6 Kg
Cruising speed	14 m/s
Flight time available	2 hour
Maximum rise height	3000 m
Engine	KOMATU ZENOAH 80 cc, 6 HP, 9000 rpm
Production	Sky Remote Co., Ltd

第2表 搭載測器の仕様.
Table.2 Specifications of instrument.

Specifications and performance	
Air speed	Hot wire anemometer (KANOMAX JAPAN)
	Wind speed converter MODEL6331, Probe 0964-01
	Weight 200 g
	Measuring range 0.1~50.0 m/s
Magnetometer	Accuracy ±3% of the indicated value +0.1 m/s
	VectorCube (VC-03) Sensation CO., LTD
	Measurement values Acceleration 3 axis Geomagnetism 3 axis
	Accuracy ±5 degree (Measured in flight)
5 hole Pitot Tube	Differential pressure gauge 1INCH-G-P4V-MINI (AllSensors Corporation)
	Measuring range 0~245 Pa

トー管は第5図に示すように先端に5つの孔があげられており、中心とその周囲の孔の差圧により相対風とピトー管のなす角度を測定することが出来る。

5孔ピトー管は九州大学工学部航空宇宙工学科の小型風洞にて迎角 α 、横滑り角 β について、それぞれ ± 15 度までの較正試験を行った。差圧計より得られた圧力差 $\Delta P_1 \sim \Delta P_4$ を用いて、(1) (2) より滑り角を算出する変数 C_α 、 C_β を求めた結果を第6図に示す。較正試験結果の最小2乗法により(4)に示す較正式が得られた。

$$C_\alpha = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_3}{\bar{q}} \quad (1)$$

$$C_\beta = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_4}{\bar{q}}$$

ここで、静圧は $\Delta P_i = P_5 - P_i$, $i = 1, 2, 3, 4$ として

$$\bar{q} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \Delta P_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha [deg] &= -0.5061 - 11.7952C_\alpha + 0.0556C_\beta + 0.4637C_\alpha^2 - 0.3753C_\beta^2 \\ \beta [deg] &= -0.486 - 0.9008C_\alpha - 11.6064C_\beta + 0.0001C_\alpha^2 + 0.2302C_\beta^2 \end{aligned} \quad (3)$$

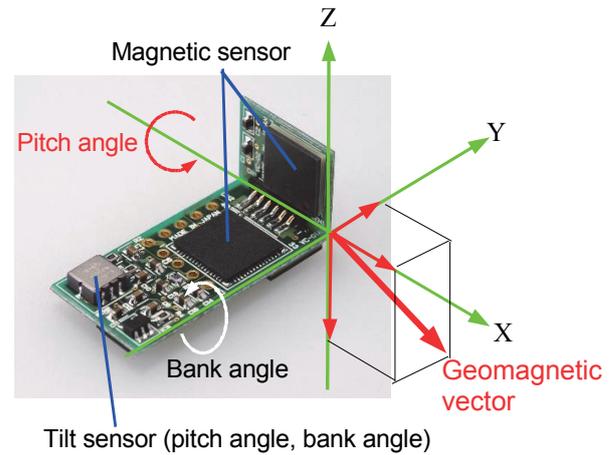
算出された較正式と実測値の差は、 ± 0.5 度以内であり非常に正確な迎角測定が可能である。これら磁気方位計と5孔ピトー管は、双方の軸に誤差を生じないように注意し胴体機首に取り付けた。

なお、対地速度 V_g はGPSによる経度、緯度の変移より簡単に算出できる。本研究では3秒間の移動平均値を用いている。

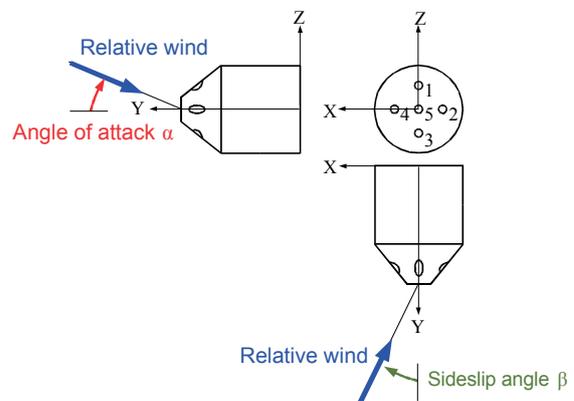
以上の測定器およびデータ収集システムの概略を第7図に示す。5孔ピトー管の微差圧計と熱線風速計は電圧で出力され、機上のH8マイコンのADコンバーター(10bit)により計測される。GPS及びベクターキューブはシリアル通信により、H8マイコンのCOMポートへ入力される。H8マイコン内で整理された各種観測データは無線モデムを介して地上へ電送され、地上局に設置されているノートパソコンへリアルタイムに記録される。

4. 飛行実験と測定結果

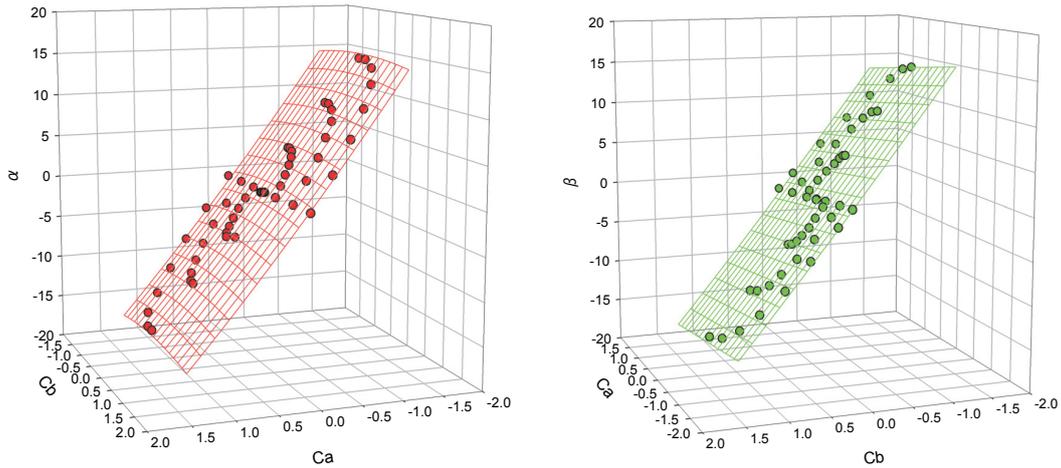
飛行実験は2004年12月23日、熊本県益城町にて行っ



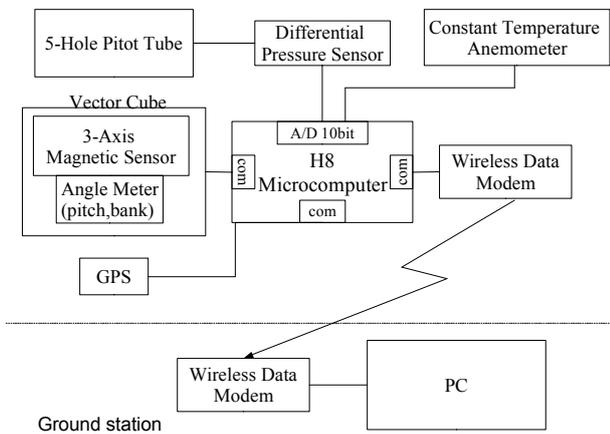
第4図 磁気方位計VectorCube (VC-03) の外観と測定項目.
Fig.4 Magnetometer VectorCube (VC-03).



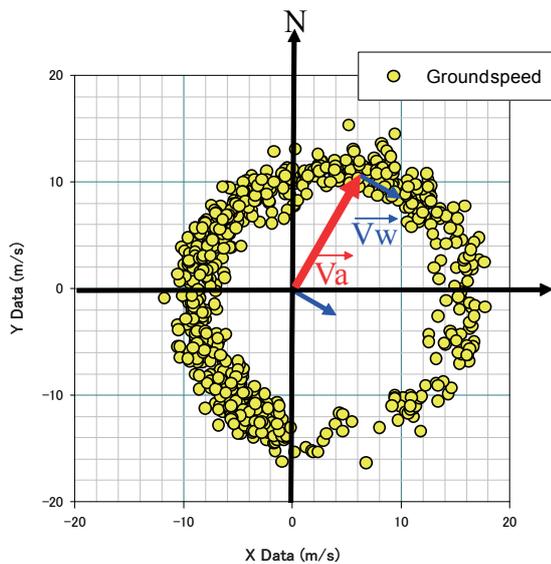
第5図 5孔ピトー管の概要と迎角、横滑り角の算出式.
Fig.5 Figure of a 5 hole Pitot Tube.



第6図 風洞実験により得られた5孔ピトー管の校正式.
Fig.6 Calibration of 5 hole Pitot Tube by Wind tunnel test.



第7図 測定システムの概要.
Fig.7 Figure of measurement system.



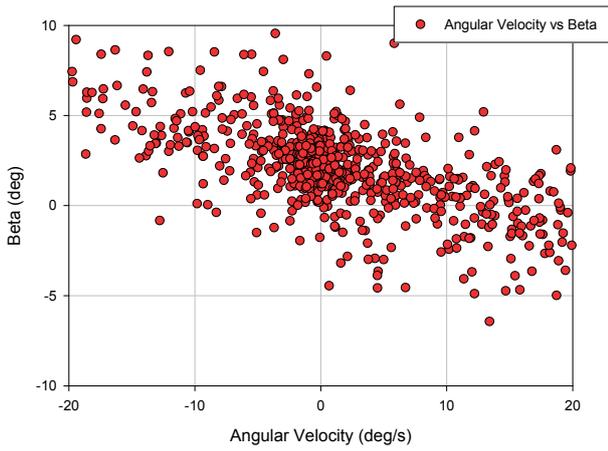
第8図 12分間の飛行実験中の対地速度Vg.
Fig. 8 Ground speed Vg of the flight for 12 minutes.

た、データの解析に用いた飛行の時間は14:53～15:05までの約12分である。実験地点の周辺は丘陵地帯であり、飛行高度は地上から高度約100 mまでの比較的低空であったため、地形による乱流によって若干の機体の動揺がみられた。

まず、リアルタイム測風による妥当性を評価するため、前述の3円交点法により飛行実験時の平均風を推定した。第8図は飛行実験中12分間のGPSより得られた対地速度Vgベクトルをプロットしたものである。上空の風速が安定しており、飛行中の対気速度が一定ならば、中心から風速Vaベクトル分、オフセットした形でプロットされるはずである。第8図より飛行実験時の平均風を最小自乗法を用いて算出したところ、風向292°風速3.9 m/s程度と推定された。

横滑り角βの補正に用いている5孔ピトー管の取り付け誤差を評価するため、対地速度Vgベクトルの転向率と（いわゆる旋回角速度）に対する横滑り角βを第9図に示す。5孔ピトー管の取り付け誤差は機体胴体の首尾方向に対しておよそ2.5度であった。カイトプレーンはラダーの操舵のみで旋回するラダー機であることから、内滑りの状態で旋回しているものと思われる。以降の対気速度は、ピトー管取り付け誤差を考慮して算出している。

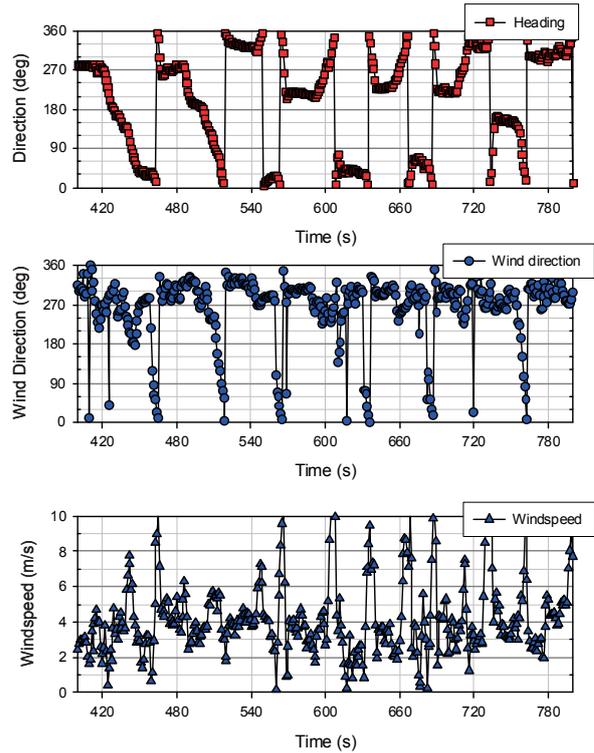
5孔ピトー管、磁気方位計、熱線風速計より得られた対気速度Va、対地速度Vgから算出した風向・風速を第10図に示す。機体針路が一定である場合（上図）、算出される風向風速はおおむね安定している。しかし、機体針路が変化する場合、旋回中に算出される風向・風速が大幅に乱れていることがわかる（中・下図）。つぎに対地速度Vgベクトルの転向率と算出された風向・風速を第11図に示す。転向率が大きい場合には測定される風向・風速が大幅に乱れている。この理



第9図 対地速度の転向率に対する β .
Fig. 9 Correlation between Angular Velocity of Ground speed and Angle of Sideslip.

由として、磁気方位計VectorCubeは地磁気の伏角の影響を、3軸加速度計によって計測した重力方向を用いて補正を行う。しかし、機体の旋回中は第12図に示すように遠心力が加わり、加速度計が参照する方向に誤りが生じる。このため旋回中の磁気方位計は機体針路を正確に算出できないものと考えられる。旋回中の精密な針路・姿勢計測には高精度の慣性航法装置を搭載する必要があると考えられるが、ペイロードが限られた無人航空機による測風には実用的でない。

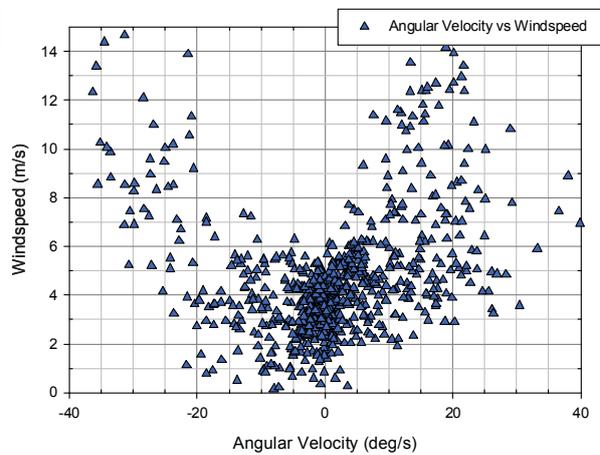
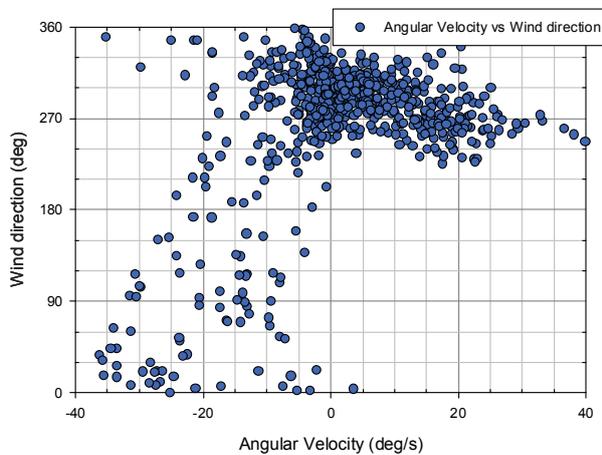
第13図に推定された風速ベクトル(風向292°風速3.9 m/s)と導出された風速のベクトル差の絶対値を左図に、旋回率に対する絶対値の平均を右図にそれぞれ示す。0-1 deg/sの区分において誤差が増大しているが、これはGPSの直行座標を極座標に変換する際に生じる誤差のためと思われる。対地ベクトルの転向率が5 deg/s以上となると、推定される風速との誤差が大きくなる



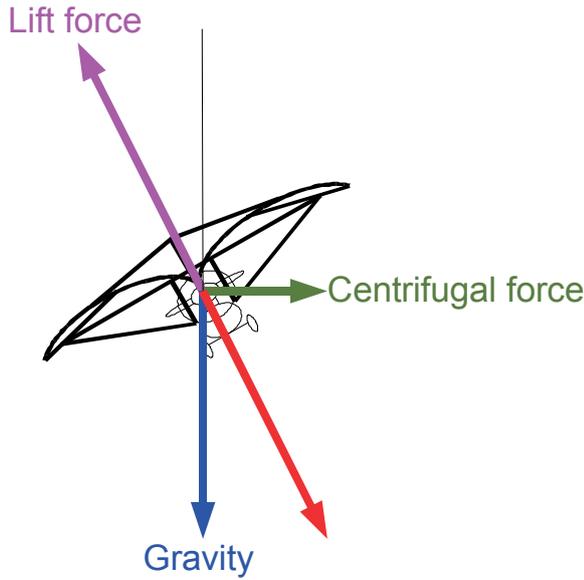
第10図 経過時間に対する機体針路(上)、算出された風向(中)・風速(下).
Fig.10 The variations of measured Heading, calculated Wind direction and Wind speed.

なることがわかる。これら誤差の大きい転向率5 deg/s以上のデータを棄却したものが第14図である。棄却後の平均値は風向291°風速3.6 m/sであり、前述の最小自乗法によって算出された平均風である風向292°風速3.9 m/s程度と近い値となっており、概ね妥当な値を示していると考えられる。

また、そのほかの誤差の要因としては、個々の異なる測器を用いることによるデータ同期の不一致が考え



第11図 対地速度 V_g の転向率と風向(左)、風速(右).
Fig.11 Correlation between Angular velocity of Ground speed and Wind direction (left), Wind speed (right).

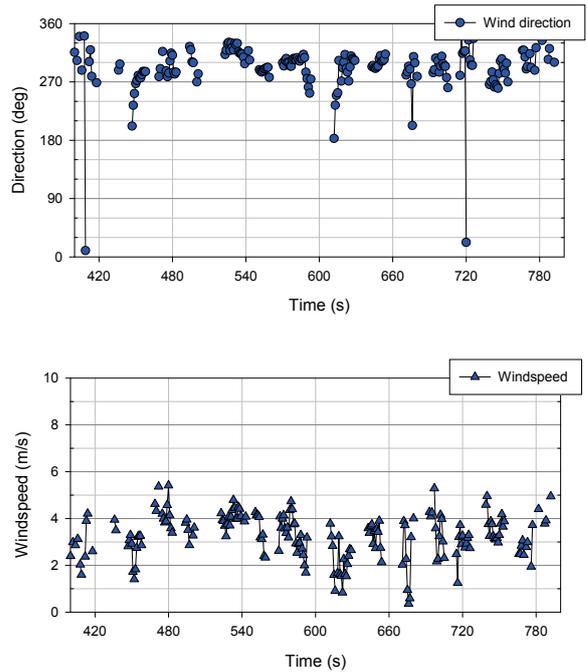


第12図 カイトプレーン旋回中の力の釣り合い。
Fig.12 Equilibrium of force under Turning.

られるが、前述のようにマイコンのAD変換により得られた各データセットを逐次地上へ伝送、記録するためにずれが1秒を超えることはなく、その他の誤差要因と比較して無視できると考えられる。

5. 測風誤差の見積、考察

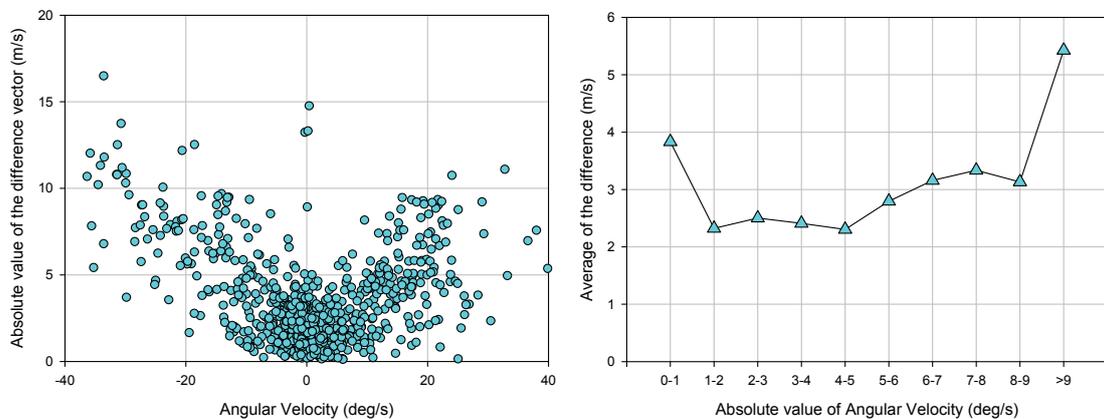
風力三角形をもちいた測風による誤差は、対気速度ベクトルのスカラーは熱線風速計、方向は磁気方位計により求めていることから、第15図のように考えられる。対地速度の測定誤差は、対気速度の測定誤差に比べて十分小さいと考えられるので、ここでは磁気方位計と熱線風速計による誤差について考察する。両者のカタログ上の誤差を用いて、今回の平均風を測風した場合の誤差を第16図に示す。風向に対する機体針路によって測風の誤差は変化するが、おおよそ風向 ± 17



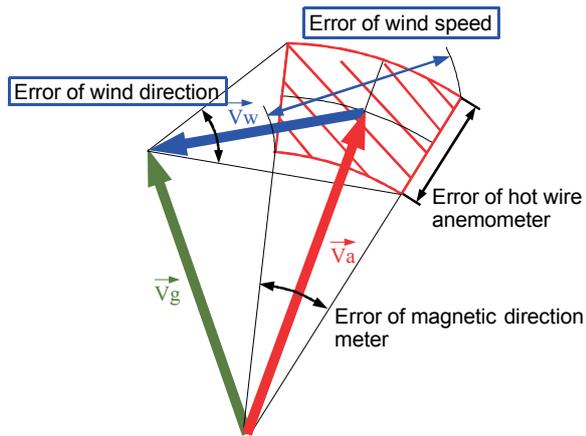
第14図 経過時間に対する算出された風向(上)・風速(下)。(対地速度の転向率 5° 以上を棄却)
Fig.14 The variations of calculated Wind direction and Wind speed. (removed more than $5^\circ/\text{s}$)

deg, 風速 ± 1.1 m/sの誤差が生じることがわかる。第14図の旋回中を棄却した実測値の標準偏差を求めると風向 30° 風速 1.1 m/sとなり、推定される誤差よりも大きくなるが、これは実際の大気の風の変動の影響を受けているためと考えられる。

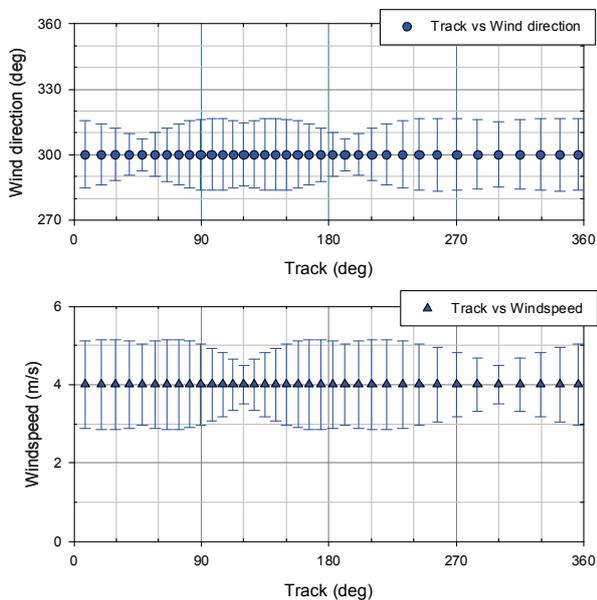
さらに測風誤差が磁気方位計による誤差のみと仮定した場合、風向 ± 15 deg, 風速 ± 1.0 m/sとなる。一方、熱線風速計による誤差のみと仮定した場合は、風向 ± 7 deg, 風速 ± 0.5 m/s程度となり、測風の誤差に与える影響は、磁気方位計による誤差の影響が大きいこと



第13図 推定される風速ベクトルと導出された風速ベクトルの差の絶対値(左)、旋回率に対する絶対値の平均(右)。
Fig.13 The absolute value of the difference estimated wind velocity and calculated wind velocity (left), Average of absolute value of the difference vector (right).



第15図 風力三角形を用いた測風の誤差。
Fig.15 Measuring error of Wind Triangle.



第16図 飛行針路による測風誤差の見積。
平均風を風向300°, 風速 4 m/sと仮定した場合。
Fig.16 Simulation of measuring error,
wind direction and wind speed.

がわかる。

なお、磁気方位計が測風誤差に与える影響を、熱線風速計と同程度とするためには、機首方位の測定誤差を ± 2.5 deg以内に抑える必要がある。この測定精度が達成できれば、今回のような平均風4.0 m/sの状況においての測風誤差は、風向 ± 10 deg, 風速 ± 0.7 m/s程度にまで抑えられると見積もられ、十分に実用の範囲内と考えられる。各種小型センサーの進歩がもたらす測風精度の向上により、今後もその活動範囲を広げつつある無人航空機の観測、及び航法計算に有用なものになると思われる。

参考文献

- 遠藤菊郎, 後藤仁志, 1999: 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, 天気, 46, 447-452.
- Masahiko HAYASHI, Yoshiteru KAMIYA, Keiichi OZUKA, Katsuya YAMASHITA, Hitomi HIGASHI, Masami ASHIDA, Kazuo OKABE, and Tetsuo SHIGETA, 2010: Mineral Particles Internally Mixed with Sea Salt over Karatsu Bay, South west of Japan, Observed with a Small Unmanned Aerial Vehicle, FUKUOKA UNIVERSITY SCIENCE REPORTS, 40, 267-275.
- 平沢尚彦, 尾塚馨一, 林 政彦, 船木 實, 2009: 北海道紋別市で行った大気観測における無人航空機の飛行特性と気象測器の動作状況, 天気, 56, 61-67.
- 光本茂記, 植田洋匡, 山本一夫, 1985: 航空機による風速の測定, 天気, 32, 497-506.
- 多目的小型無人機チーム, 2007: 多目的小型無人機の開発と気象観測飛行実験, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-06-023, 1-79.
- 時枝 勲, 1998: 基礎航法教室, 鳳文書林, 226pp