

## 無人ヘリコプターのダウンウォッシュに関するフィールド実験

井上君夫<sup>1</sup>・永井秀幸<sup>1</sup>・渡辺 力<sup>2</sup>・大原源二<sup>1</sup>・中園 江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>農研機構・中央農業総合研究センター

<sup>2</sup>北海道大学・低温科学研究所

### 1. ダウンウォッシュとは

無人ヘリコプターとは「人が乗って航空の用に供することができない遠隔誘導式小型回転翼機」と定義され、産業への利用は1991年頃から始まった。現在では水稲病害虫防除、雑草防除、畑作病害虫防除、および林野害虫防除等に活用されている(中島ら, 2002)。ダウンウォッシュとは、無人ヘリコプターを浮揚・飛行させる主回転翼の直下に生じる下降気流(後流ともいう)を指し、このダウンウォッシュに乗せて薬剤を作物まで運ぶのが航空散布の原理である。しかし、気流の乱れなどによって作物以外にも飛散する場合がある。これをドリフトといい、その低減対策のためには、無人ヘリコプターによるダウンウォッシュの三次元乱流特性の把握が必要であるが、国内外において公表された報告および乱流データは見当たらない。そこで、実際の無人ヘリコプターによるダウンウォッシュのフィールド実験を試みた(井上ら, 2008)。

### 2. 実験概要と天気概況

実験は図1と図2に示すとおり、茨城県つくば市の農業環境技術研究所・微細気象観測露場(東西約130m×南北約150m)において、ヤンマーアドバンスヘリコプターAYH-3(主翼3115mm, 全長3630mm, 全高1080mm)を用いて行った。露場の芝生は刈取直後の状態にあった。

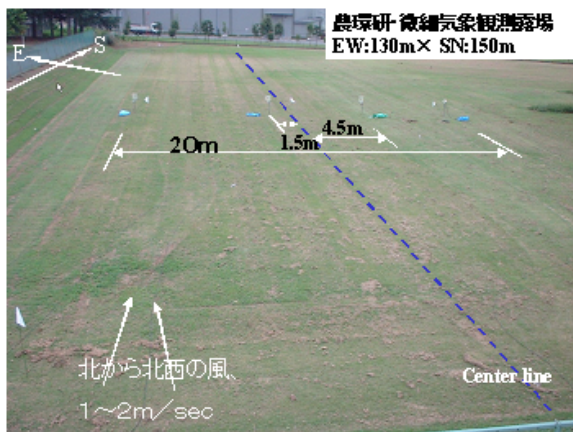


図1. 東西・南北に広がる露場の中央付近に4台の三次元超音波風速温度計を設置した。図中の左下に観測期間中の主風向と平均風速を記した。手前の実験棟屋上に気象観測装置が設置されている。



図2. 無人ヘリコプター (AYH-3) の全景を示す。左右の胴体にカセット式薬剤タンクが装着される。本実験では水を入れたタンクを用いた。図中の左上に示すヘリコプター後部のGPSによって姿勢制御が行われる。

飛行実験は2006年9月6, 8, 9日の3日間行われた(9月7日は悪天候のため中止した)。3日間の天候は終日曇天で、時折小雨が降るものの、風向は図1(左下)に示すとおり、北から北西の風、風速は約1~2 m/s と弱く、大気の流れは小さく安定していた。北寄りの主風向は東西に並ぶセンサにほぼ直角であった。乱流観測にはKAIJOの3台のTR-62AX(S1, S2, S3の地点)と1台のTR-61A(S4の地点)が用いられた。設置高度は水稻を想定して高さ1 mとした。無人ヘリコプターの回転翼上(影響のない)における風向風速は敷地内にある実験棟の屋上に設置した高さ7 mのウェザートランスミッターWXT510(VAISALA)で測定した。

飛行パターンは図3に示す3つである。センターライン上を南北に、高度を変えながら左右に1.5 m ずらして飛ぶのがパターン1である。パターン2は東西に並ぶセンサの真上を、高度を変えながら左右に1.5 m ずらして飛ぶコースである。パターン3は空中に静止するホバリング飛行で、高度を変えながら左右に1.5 m ずらして飛行する。パターン1と2の飛行速度は運行時の速度である約15 km/h、パターン3のホバリング時間は4~5分とした。

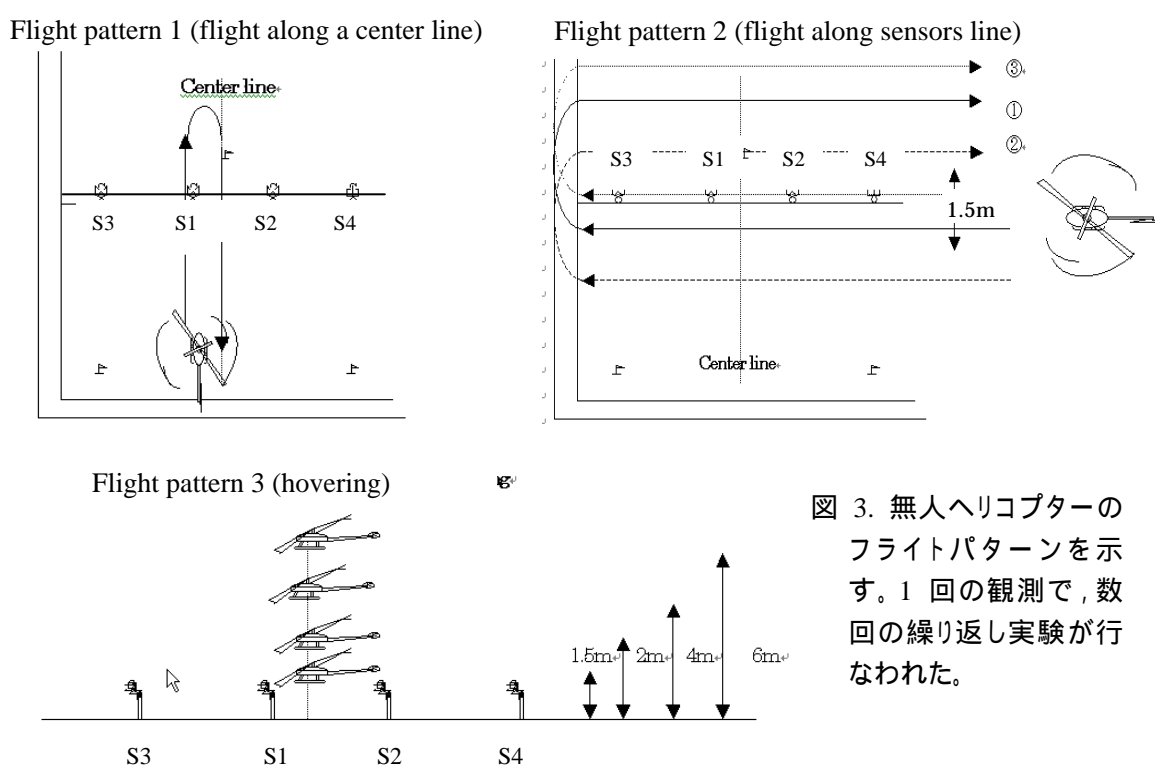


図3. 無人ヘリコプターのフライトパターンを示す。1回の観測で、数回の繰り返し実験が行われた。

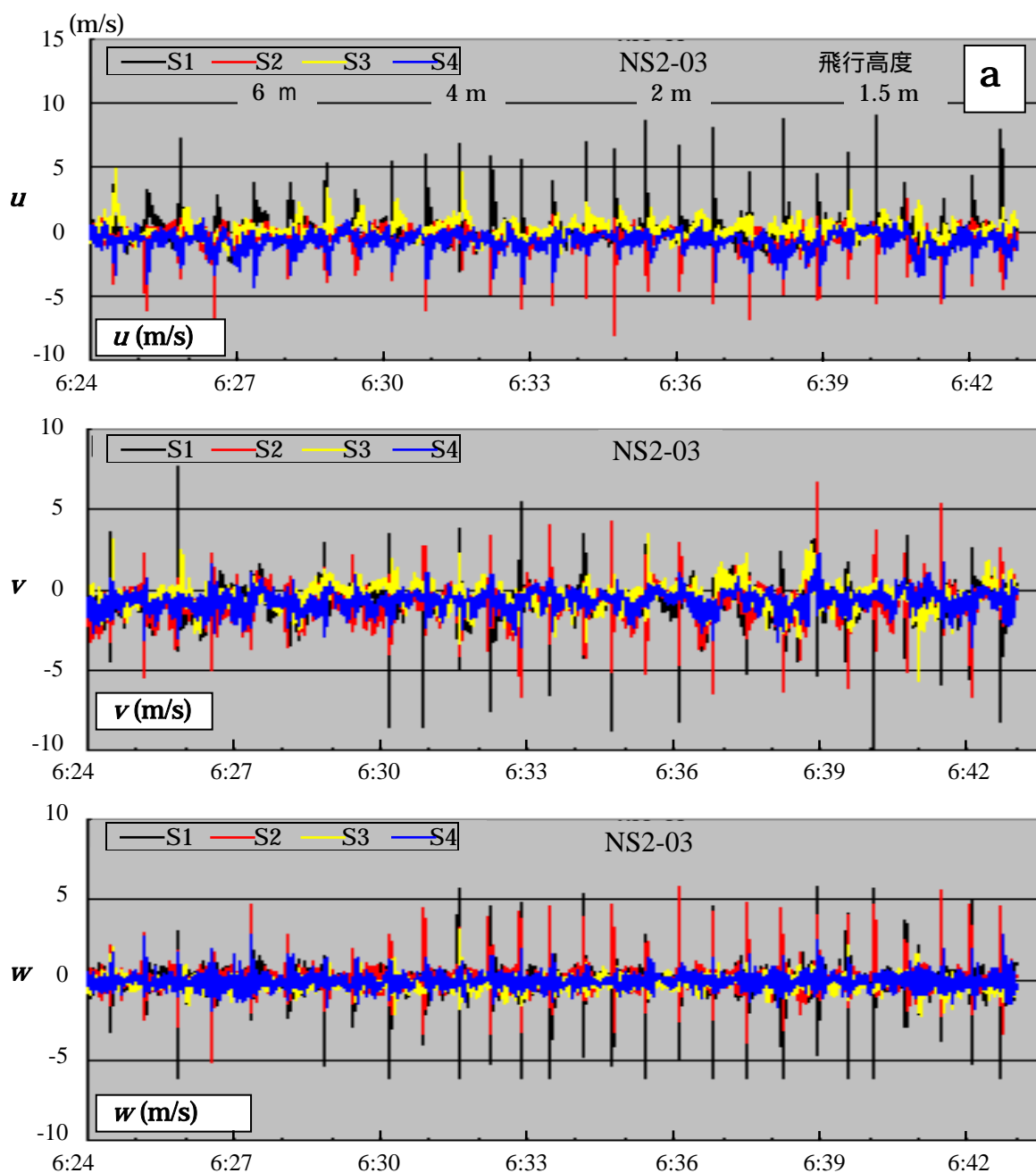
### 3. 結果

無人ヘリコプターのダウンウォッシュを超音波風速温度計で測定した報告は見当たらないが、市川ら(1994)は有人ヘリコプターのダウンウォッシュ(または後流)の挙動をゴム風船の浮遊軌跡から推定している。市川らのゴム風船の数値データをベクトル分解した結果、ヘリコプターと水稻の中間高度で最も強い約4.8 m/s の下向きの鉛直速度が測定されるが、それが水稻の表面付近では約1.8 m/s と弱くなり、逆に水平速度(風速)は約6.3 m/s に増大していることがわかった。この時の飛行高度は約15 m である。実験時に吹いていた約1 m/s の横風は、その風上側では主翼の外で水平速度を急速に弱めるが、反対の風下側ではダウンウォッシュに横風が加わって強まることわかった。このように市川らの研究はダウンウォッシュによる大気攪乱現象を三次元超音波風速温度計などで詳細に把握する必要性を示唆している。

#### 飛行パターンとダウンウォッシュの時系列速度データ

図4(a)は飛行パターン1における4地点(S1, S2, S3, S4)の成分別( $u, v, w$ )の時系列速度分

布である。飛行パターン 1 は東西に並ぶセンサと交差する Center line に沿って飛行するゆえ、S1 と S2 は強いダウンウォッシュの影響を受けるが、S3 と S4 は小さいと予想される。4 地点のデータを同一軸上に表示しているため分かりにくいだが、つぎのような特徴が認められる。まず、S3 と S4 の 3 成分には 1 m/s 程度の瞬間的に弱いピークは認められるものの、S1、S2 の強いピークとは大きく相違しており、ダウンウォッシュの影響は予想どおり小さかった。つぎにセンサと主翼の位置関係を S1 と S2 についてみると、両者の  $w$  成分の波形はよく似ているが、主翼直下にある S1 のピークは主翼の外にある S2 より大きいことがわかる。NS2-03 の事例だけではわかりにくいですが、その他の事例を詳細に検討してみると、左右の主翼の中央付近 (約 75 cm) でダウンウォッシュが最も強く、その先端の約 1.5 m では急激に弱まることわかった。



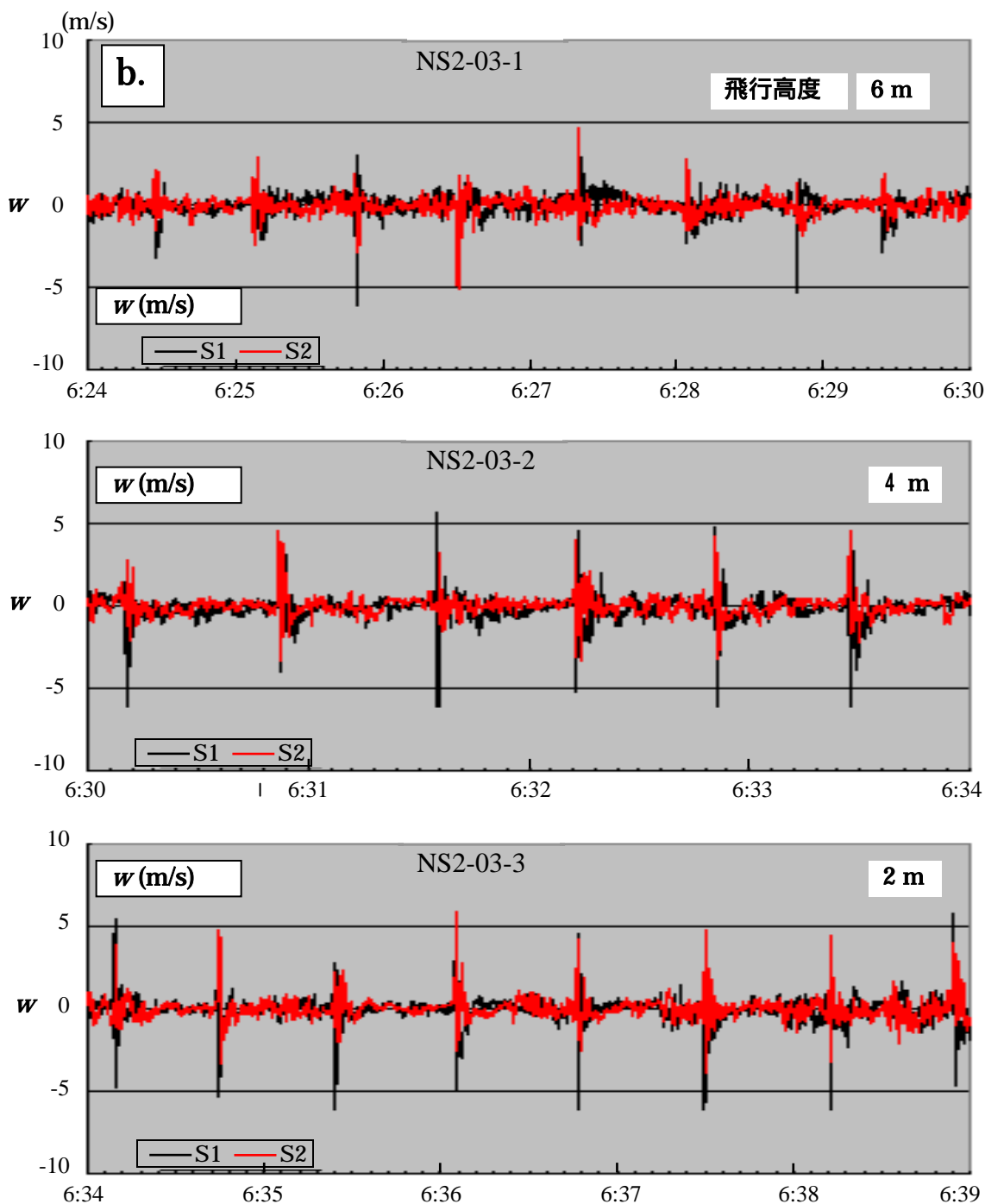


図 4. 飛行パターン 1(南北方向)における時系列速度分布(NS2-03/ 6:24-6:43/ 8 Sept. 2006)。(a)4 飛行高度(6 m, 4 m, 2 m, 1.5 m)の連続した  $u$ ,  $v$ ,  $w$  成分の時系列分布(S1 ~ S4 は図 3 を参照のこと)。(b)センサ S1, S2 における飛行高度別の鉛直速度成分( $w$ ), 測定時間は 6:24 ~ 6:39, 飛行高度は 6 m, 4 m, 2 m である。

つぎに図 4 のピークに注目すると,無人ヘリコプターの通過前後に上下の強いピークが  $u$ ,  $v$ ,  $w$  の 3 成分の乱流変動に表れ,その速度は  $\pm 5$  m/s 程であることがわかる。通過前後のピークは 0.15 ~ 0.25 秒と極めて瞬間的であることも明らかとなった。図 4 (b) は S1, S2 地点における  $w$  成分の高度別分布の拡大図である。この事例では,飛行高度 2 m と 4 m のダウンウォッシュに大きな違いはなく,5 m/s 前後であるのに対して,6 m では明らかに小さくなっている。ピークはプラスとマイナスに大きく振れるが,この部分を拡大してみると,最初にマイナスのピークが表れ,

つぎにプラスのピークが表れる。これは無人ヘリコプター通過時の下降気流と通過後の上昇気流（反流）であると推測されるが、これについてはパターン2の結果のところで考察する。

図5は飛行パターン2（東西方向）における時系列速度分布である。飛行はS4, S2, S1, S3のセンサ上を順に高度を変えながら数回繰り返される。図示したのは, EW3-03で9月9日の事例である。無人ヘリコプターの通過時に, 強いピークが次々と表れる特徴的な分布を示している(図5a)。また, 図5bには飛行高度約1.5 mにおける鉛直速度を拡大して示したが, つぎの特徴が指摘できる。最初に10 m/s 前後の強いマイナスのピークが表れてすぐに消えるが, その後時々5 m/s 程のやや強いプラスのピークが表れる。これは飛行パターン1と似ているが, パターン1で

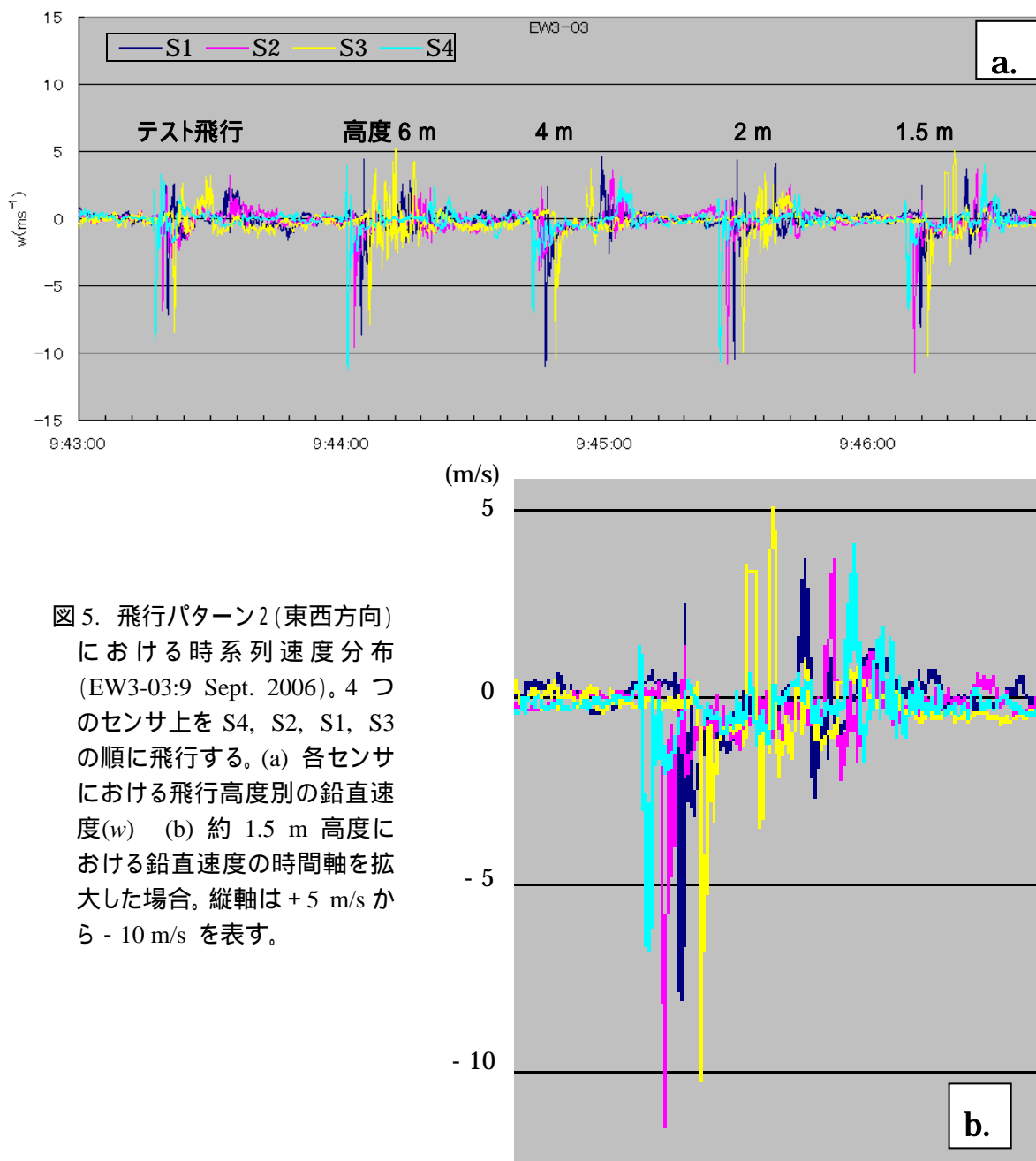


図5. 飛行パターン2(東西方向)における時系列速度分布 (EW3-03:9 Sept. 2006)。4つのセンサ上をS4, S2, S1, S3の順に飛行する。(a)各センサにおける飛行高度別の鉛直速度( $w$ ) (b)約1.5 m高度における鉛直速度の時間軸を拡大した場合。縦軸は+5 m/s から-10 m/sを表す。

はプラスとマイナスが同程度で, ほぼ同時に表れたのに対して, パターン2ではそれよりも長い時間にわたってプラスの変動が規則的に表れるという点で異なっている。その表れ方が図5bに見られるように, 下向きのダウンウォッシュが水色, 紫, 紺, 黄に表れた後, それとは反対に上向

きの流れが黄, 紺, 紫, 水色の順に表れる。

図6は飛行パターン3(ホバリング)における時系列速度分布(HV3-06/ 15:32-15:37/ 9 Sept. 2006)である。ホバリングは約5分間続けられた。図は上から  $u, v, w$  の速度成分を示し, S1は片側主翼の中央部分がセンサ直上にある場合, S4は主翼からセンサが約7m離れている場合のデータである。3成分ともに, 濃い青色のS1の変動は水色のS4と全く異質であることから, S4はダウ

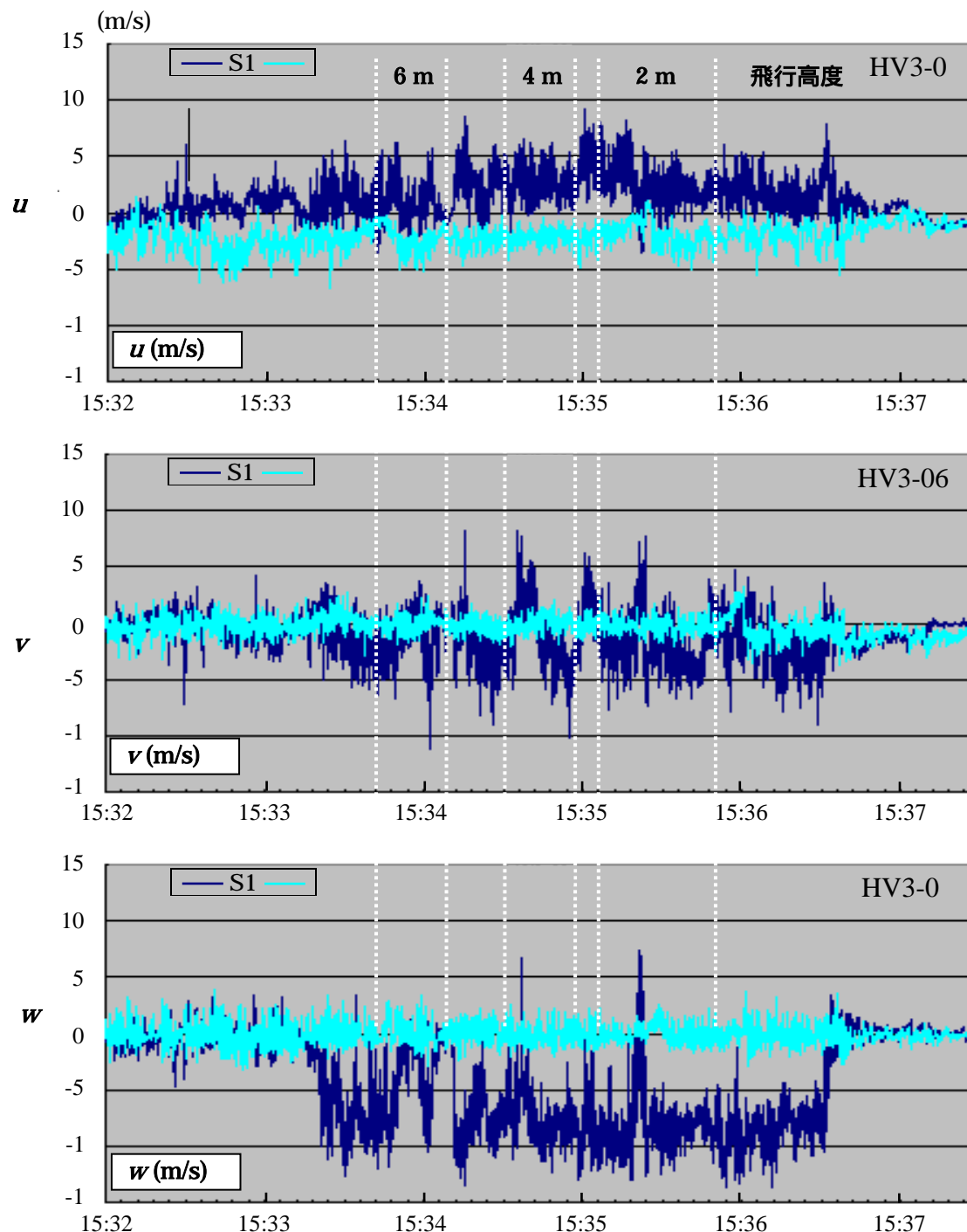


図6. 飛行パターン3(ホバリング)における  $u, v, w$  の速度分布(HV3-06/ 15:32-15:37/9,Sept.2006)。S1はセンサが片側主翼の中央部分にある場合, S4はセンサが主翼から離れている場合である。

ンウォッシュの影響をほとんど受けていないことがわかる。つぎにS1の3成分に注目すると, 何れも自然風と異なる乱れの大きな変動パターンはよく似ている。これは3成分ともにダウンウォ

ッシュの影響を受けている証拠であり、よく精査すると、水平成分の  $u$  と  $v$  の乱れは異なっている。ダウンウォッシュへの影響の表れ方が自然風の風向や風速によって違ってくるところを暗示している。つぎに  $w$  成分について見ると、強い下向きの下降気流が卓越している。この事例では、飛行高度 6 m の下降気流は 4 m と比べて弱くなるが、4 m と 2 m はほぼ同程度の 8 m/s 前後であった。ホバリング時の気流は比較的安定しているように見えるが、 $\pm 2 \sim 3$  m/s の変動幅を持っており、これを小さく安定した気流とすることがドリフト低減に役立つと考えられる。

図 4, 5 に示したパターン 1 とパターン 2 の時系列速度データには、無人ヘリコプターの通過前後のダウンウォッシュが瞬間的に記録されている。これは飛散モデルにおける放出源の取り扱いに係わる重要な情報、すなわち薬剤を瞬間的なダウンウォッシュに乗せて散布するという点で理論的には瞬間源として取り扱うべきか、あるいはそれが連続的に散布されるという点で面源として取り扱うべきかという情報である。理論的には後者の取り扱いが容易であり、渡辺・井上 (2007) は LES モデルにおいて、連続的な面源として取り扱っている。

つぎにダウンウォッシュの大きさや特徴については、パターン 3 のホバリングデータを用いて明らかにする。図 7 はホバリング時のデータから求めた鉛直速度分布 ( $w$  m/s) と水平速度分布 ( $U$  m/s) である。この図の縦軸は飛行高度を表し、図中にプロットされているデータは何れも高さ 1 m の三次元超音波風速温度計で測った値である。また、図 7 (右) の水平速度  $U$  は  $u$  と  $v$  のベクトル合成値であり、一般にいう風速である。はウェザートランスミッターで測った風速である。その他に留意すべき点として下表面が固い芝生であることから、水稻等の植被面とは異なり、地面からのダウンウォッシュの跳ね返りが想定される。

まず、水平速度  $U$  は最下層の 1.5 m を除けば、ほぼ一定の 1~2 m/s であった (図 7)。このときのウェザートランスミッターの風速は約 2 m/s であることからダウンウォッシュによる水平速度の増加は小さかったことがわかる。一方、最下層の 1.5 m で水平速度は明らかに増大しており、これは地面に衝突した下降気流が方向転換したことを物語っている (市川ら, 1994)。図 8 によ

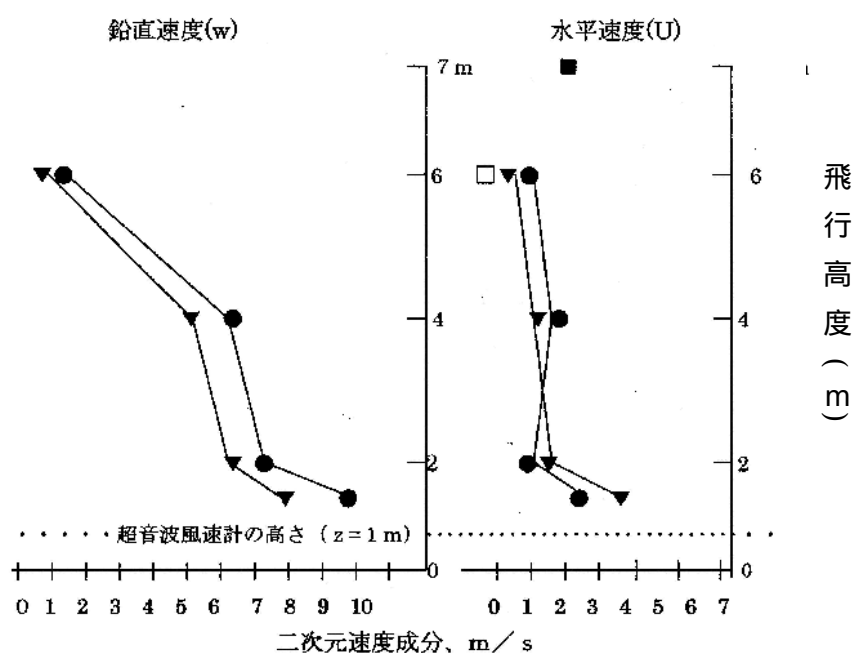


図 7. 無人ヘリコプターの飛行高度別データから求めた高さ 1 m における鉛直速度 ( $w$  m/s) と水平速度 ( $U$  m/s) の分布。( ) はヘリコプターの影響を受けない場所で測った風速。

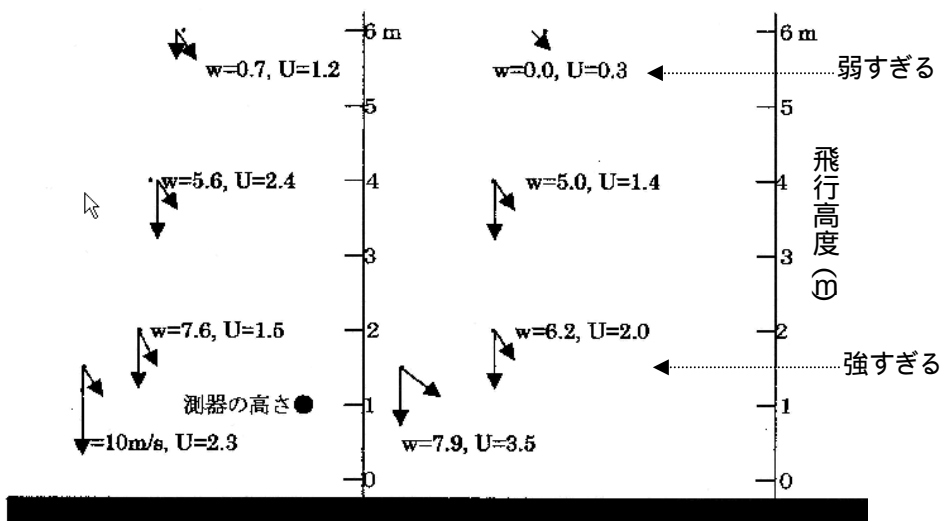


図 8. 無人ヘリコプターの飛行高度別データから求めた高さ 1 m における鉛直速度( $w$  m/s)と水平速度( $U$  m/s)のベクトル表示。図 7 と同様に、高さ 1 m の超音波風速温度計の測定値を示す。

ると、高さ 1.5 m の水平速度は 2.3 ~ 3.5 m/s に増大している。つぎに  $w$  成分の鉛直分布を見ると、飛行高度が高くなると、高さ 1 m で受ける下降気流の速度は明らかに減少することがわかる。飛行高度 6 m で 1 ~ 2 m/s、4 m で 5 ~ 7 m/s、最下層の 1.5 m では 8 ~ 10 m/s と指数的に増大する。無人ヘリコプターの散布諸元によると、種の YH-300 等で飛行高度は作物上の高さで 3 ~ 4 m と設定されている（農林水産航空協会，2005）。水稻の場合、実際の運行高度は 4 ~ 5 m といわれている。このときに予想される鉛直速度は図 7, 8 から約 5 m/s（風速が 1 ~ 2 m/s の場合）と推定できる。仮に、この高度が水稻上の高さで 7 m となると、鉛直速度は 1 m/s 以下となり、自然風の影響を極端に受ける結果になると予想される。

#### 4. 考察

農薬が目的とする作物以外に飛散する現象をドリフトといい、このドリフトの支配要因として風速、噴霧粒径、散布位置、送風、散布量、緩衝区域が挙げられている（ドリフト対策連絡協議会編，2003）。低ドリフトタイプのノズル開発、あるいは散布量や散布効率とドリフトとの関係等については本研究では触れず、ここでは気象要因によって支配されるドリフトについて考察する。すなわち、次式(1)のように風の乱れや粒子の大きさによって決まるドリフトであり、その推定式はいくつか提案されているが、Quantick (1985) の式が最も理論的であると考えられる。

$$\text{ドリフト} = (\text{飛行高度} \times \text{水平風速}) / (\text{終末速度} + \text{鉛直風速}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、粒子の終末速度は雨滴の落下速度と同様に Stokes の式から計算されるが、これはダウンウォッシュに比べて遥かに小さく、一般に回転翼の内側では無視できる大きさである。たとえば、直径 140  $\mu\text{m}$  の粒子の落下速度は 0.445 m/s と計算されるが、ダウンウォッシュによる鉛直速度は図 7, 8 に示されているとおり、5 ~ 6 m/s と一桁以上も大きな値をもつ。右辺の分子の水平風速には一般に地表付近の風速が用いられる。式(1)の適用限界やその他のドリフト要因については、3の結果を踏まえて若干考察する。

飛行パターン 1 と 2 の時系列速度分布には図 4 と図 5 に示したとおり、0.15 秒から 0.25 秒の強いピークが瞬間的に表れる点では共通している。しかし、通過後の上昇気流（反流）の変動パタ



ーンが大きく異なっている。パターン 1 の南北飛行の場合はほぼ同時に強い上向きのピークが表れたが、パターン 2 の東西飛行の場合には少し遅れて乱れの大きい変動が観測されている。この理由としては(1)無人ヘリコプターの通過後に流れ込む気流の動きがパターン 1 と 2 で異なる可能性、(2)無人ヘリコプターの進行方向に対して自然風を後ろから受けるパターン 1 と横から受けるパターン 2 との違いが考えられる。すなわち、図 5 に示すパターン 2 の場合、 $w$  成分の変動パターンは  $u$ ,  $v$  成分にも同様に認められることから無人ヘリコプターが横風を受けることによってダウンウォッシュが攪乱された可能性がある。つぎに回転翼の位置とダウンウォッシュとの関係については、約 1.5 m の回転翼内の中央付近が最も強く、その外側では急速に衰え、約 7 m 離れた地点では影響はほとんど表れなかった。

ドリフトの観点からすると、図 5b に示されているように強い下降気流の直後に表れる上昇気流が気中に浮遊する薬剤を上空に再飛散させる可能性がある。そのときのドリフトは式(1)から推定することはできないが、便宜的には一瞬にして散布高度が再び持ち上げられたと考えることができる。強いダウンウォッシュが働いている場合、通常のドリフトが 1~2 m であるのに対して上空に持ち上げられてダウンウォッシュを失うと、ドリフトは 10 m 以上になると計算される。さらに横風が吹けば地上の濃度分布にも影響が表れると推測される。つぎに回転翼周囲の速度分布と乱れがドリフトに与える影響であるが、本実験では約 1.5 m の回転翼内の中央付近が最も強く、その外側では急速に衰え、約 7 m 離れた地点では影響はほとんど表れなかったことから、散布は斉藤 (2003) が指摘するとおり、ローターの 70% より外側に噴霧ノズルを装着しない対策が必要と思われる。ただし、ローターの何%内側かは別の試験に拠らなければ明らかにできない。また、市川ら(1994)も翼端近くで噴霧すると、巻き上げの原因になることを指摘しており、ローターと噴霧口をできるだけ離すのが望ましいことは本実験からも推察された。

この他の気象要因もドリフトと関係していることが指摘されている。たとえば、Quantick (1985) は 2 高度の温度差と風速の 2 乗から計算される安定比がドリフトのひとつのパラメータと考え、Reichard *et al.*(1992)はスプレードリフトのモデル計算に大気湿度を要因として取り入れ、風洞実験等を通して定量化している。さらに Bird *et al.* (1996)は、効果的なドリフト制御は風速や大気安定度の気象条件に係わる制御と併せてノズルや散布方法に係わる制御の重要性を指摘している。後者のノズルの開発については、本研究で示したダウンウォッシュの乱流解析が極めて重要な意味を持って来る。一般的に、このような乱流は自然風に比べて乱渦が小さく、周波数は高いがエネルギー密度は低く、直ぐに減衰してしまうと思われるが、この点についてはホバリングデータのスペクトル解析等で明らかにしていきたい。

つぎに飛行パターン 3 による乱流データは散布方法等に関して多くの知見を与えてくれる。ドリフト要因のひとつである散布高度については、先に述べたとおり、農林水産航空協会の運行マニュアルに明記されている数値は実際の散布試験における薬剤の効果や散布効率の観点から経験的に決められている可能性が高く、ドリフトの理論的考察が不足していると思われる。そこで、このような観点から図 7, 8 の結果をみると、マニュアルに記されている作物上から 3~4 m の飛行高度の場合、群落上の鉛直速度は 4~5 m/s (水平速度が 1~2 m/s の場合)であることと、それよりも上空では鉛直速度が急激に弱まる可能性のあることがわかった。逆に、作物に接近しすぎると、鉛直速度が 10 m/s にも達してしまい、作物上面および内部での強い横風と作物の揺れから乱れが増幅され、薬剤の巻き上げを伴う大きなドリフトの原因となる可能性もある。

市川らは有人ヘリコプターの試験から横風と拡散幅との関係や 5 面体の付着箱の測定から薬剤の付着効率を明らかにしている。前者の風速と拡散幅については、井上・渡辺(2007)は有人ヘリコプターによる地上濃度分布に正規ガウス分布を適用し、横風が強くなるに伴いガウス分布は風下にほぼ平行移動すること(風によって、そのままの形でほぼ風下に流される)、横方向の拡散幅は風速とほとんど無関係であるが、鉛直方向の拡散幅は風速の増加と散布高度の上昇に伴って増大することを示した。散布された薬剤の大部分は無人ヘリコプターの直下に落下するため、地上の

濃度はヘリコプターの中央部が高濃度となり、左右の主翼端に進むにつれてガウスの急減する。しかしながら、そのまま落下しなかった僅かな薬剤が自然風の乱れの他に、本研究で示したような通過後の上昇気流によって、あるいは主翼周辺の複雑な高周波乱流によってドリフトが誘発される可能性がある。米国の SDTF は有人ヘリコプターによる散布時のドリフト低減対策などについて種々の情報提供を行っているが、わが国のような狭い国土にそのまま適用できる情報ではないように思われる。

先に示した(1)式のドリフトの計算では、平均的な風速や推定される鉛直風速が用いられるが、しかし巻き上げや大きな攪乱の状況によっては、飛散距離は実際と大きく相違してくる可能性がある。本研究で示したダウンウォッシュの解析結果から推察されることは、フィールドでのドリフトをより科学的に、かつ高精度に予測するには噴射された微粒子が地上に到達するまでの軌跡をラグランジュ的に捉えることが最良の手法である。しかし、微粒子をラグランジュ的に捉えることは実際にはほとんど困難であり、飛散モデルを用いた数値実験でなければでき得ないことである。渡辺・井上(2007)は、このような考えから LES (Large Eddy Simulation) を適用した乱流拡散モデルを開発している。森林上で散布された拡散物質が、大気乱流中の下降気流によって森林内部に拡散され、上昇気流によって森林上空に拡散されたりしながら風に乗って下流に運ばれる過程がシミュレーション実験によって再現できるようになった。今後の科学的なドリフト研究への貢献が期待できる。

## 5.まとめ

ダウンウォッシュ実験がヤンマーアドバンスヘリコプターAYH-3 を使ってはじめて行われ、つぎのような結果が得られた。

- (1) 無人ヘリコプターが風速センサ上を飛行すると、ダウンウォッシュによる強い下降気流が 0.15 ~ 0.25 秒の長さで観測され、通過後には反対の上昇気流が観測された。強い下降気流は風の影響を受ける可能性は低い、反対の上昇気流はドリフトの原因となる可能性がある。
- (2) ホバリング飛行から数分間の連続したダウンウォッシュの乱流データがはじめて得られた。この乱流データから高さ 1 m における水平・鉛直速度と飛行高度との関係を調べた結果、無人ヘリコプターが高さ 1.5 m から 6 m まで上昇しても水平速度はほとんど変わらないものの、鉛直速度は急速に衰え、逆に飛行高度が 1.5 m まで下降すると、鉛直速度は 10 m/s 以上となり、水平速度の増大も確認された。これらの情報から現行の無人ヘリコプターの運用マニュアルに示されている作物上の 3 ~ 4 m の散布高度は適切であると判断されるが、なお自然風の向きや風速を考慮して散布の高度や方向を変えることも必要である。
- (3) ダウンウォッシュは主翼の内側で強く、その外側で急激に弱まることが明らかとなった。ホバリング時のダウンウォッシュ(鉛直速度)は比較的安定しているものの、 $\pm 2 \sim 3$  m/s の振幅を持っており、この乱れを小さくすることはドリフトの低減に役立つと考えられる。
- (4) ドリフト研究を進めるにあたって、高周波乱流データの収集だけでなく、特に主翼周辺の気流に関する流跡線解析を行うことと、実験では困難な飛散現象を LES の手法等から明らかにすることが重要である。

## 引用文献

- ドリフト対策連絡協議会, 2003: 農薬散布時のドリフト防止対策ガイダンス, ドリフト対策協議会編, pp. 18.
- 市川良平他, 1994: 散布薬剤の落下・分散に及ぼすヘリコプター後流の影響, 日本農薬学会誌, 19(1), 1-9.

- 井上君夫・渡辺 力, 2007: 三次元気中濃度調査, 平成 18 年度 林野庁委託調査報告書, 1-39.
- 井上君夫・永井秀幸・渡辺 力: 無人ヘリコプターにおけるダウンウォッシュの時空間特性, 日本農業気象学会 2008 年度全国大会発表, pp.21.
- 中島 満 他, 2002: 航空機 (無人ヘリコプターを含む) を利用した農薬散布の現状とこれからの研究課題 その 現状, 植物防疫, 56(1), 13-17.
- 農林水産航空協会, 2005: 産業用無人ヘリコプターによる病害虫防除実施者のための手引書, 全国産業用無人ヘリコプター推進協議会編, pp.69.
- Quantick, H.R., 1985: *Aviation in Crop Protection, Pollution and Insect Control*. Collins, 428pp.
- Reichard, D.L. *et al.*, 1992: Computer simulation of variables that influence spray drift. *Transact. ASAE*, 33(6), 1767-1770.
- 斎藤武史, 2003: 農薬施用技術 航空防除について, 日本農業学会誌, 28, 392-396.
- SDTF, 1997: A summary of aerial application studies, <http://www.agdrift.com>.
- 渡辺 力・井上君夫, 2007: LES による農薬ドリフトのシミュレーション. 日本農業気象学会北海道支部 2007 年大会講演要旨集, 28-29.