

Helicopter の Down Wash に関する研究

—散布薬剤粒子の Drift について—

田 辺 一 *

Study on the Down Wash of Helicopter Rotor —Drift of Sprayed Particle of Chemicals—

Hajime TANABE

Spray method by means of the helicopter has many problems, like as the pollution due to the sprayed chemicals. Therefore, this study has a purpose of the drift prevention of sprayed particle.

The drift of sprayed particle was affected by the wind velocity of both down wash through the rotor and natural wind. And the nature of down wash had wind velocity in proportion to the rotor radius, and the maximum wind velocity was at 80% of rotor radius owing to the contraction of air flow, getting through the simple test by the Model Rotor.

Based on this nature, theoretical analyses on the drift under the effects of the down wash and the natural wind, respectively, were carried out.

On the result, the drift was affected by the sprayed altitude, forward velocity of helicopter, radius of rotor, and radius of sprayed particle, etc. And the position of spray apparatus aiming to shortening the drift, and a method of data analysis were proposed.

緒 言

ヘリコプターによる松喰い虫防除について、賛否両論がある。そうした中で、島根県は、遅れ馳せながら、今や我が国で、最大被害県に発展した。

農林航空センターでは、長年、航空散布に用いる有効で、しかも、低公害薬剤の開発、及び散布機械や散布法の改良開発に努めている。その研究の一端として、公害防止の意味からも、散布薬剤粒子の Drift の防止が研究課題に上がっている。

Drift の発生機構を機械的に調査することは、裏返せば、Drift の防止、ひいては公害防止にも繋がることになるので、ここでは、Helicopter の Rotor の発生する Down Wash の性質を解明し、それによって生じる散布薬剤粒子の飛行拡散の状況を、理論的に解明して、

散布機械、散布方法の必要な条件、及び、これまで得られた多くのデータの解析方法を考察する。

実験方法および結果

Helicopter は、現在、技術の固まりといわれるほど、技術の粋を集めた機械で、その飛行理論については、多くの研究がある。しかしながら、飛行した結果、発生する Down Wash の性質に関しては、多くの未開明部分が残されている。

したがって、まず、Rotor の発生する Down Wash の性質を解明することから開始する。

実物の Helicopter を使用することは、莫大な経費支出が伴い、また、繰り返し実験には不向きであるので、自作模型を用いることにする。

表1は、実験に用いた模型である。Rotor の回転数

* 農業機械工学研究室

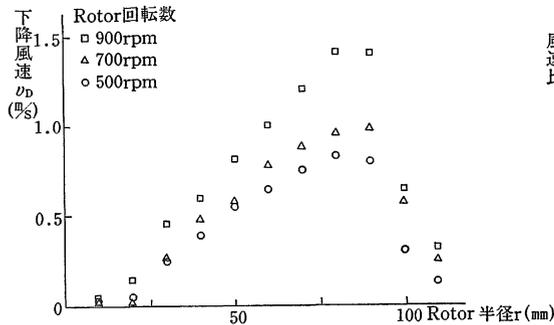


図1 Rotor 直下 20mm の所の風速 (Hovering時)

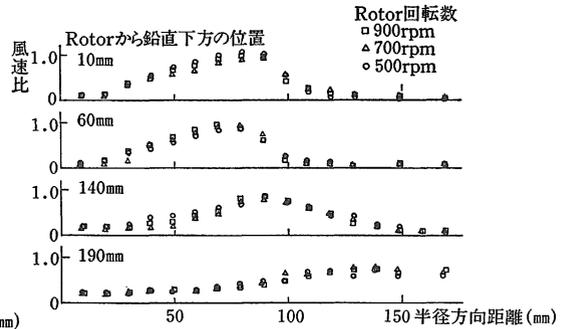


図2 Rotor の回転数を変えた場合の風速 (Hovering 時)
(各風速を Rotor 直下 20mm の所の風速で除す. 高度 200mm)

は、正確には測定できなかったが、Down Wash の風速分布は図1の通りである。また、図2は、Rotor の回転を比例的に増加し、各々の風速を、基準回転数の、Rotor 直下の風速で除してある。また、風速の方向性は無視している。

図1、2によると、Down Wash は、Rotor の Radial 方向には、Rotor の半径に比例し、Rotor の端では、縮流が生じ、Rotor 直下では、Rotor 径の約80%の所に最大風速が現われる。いま、もし対置地面がなければ、この縮流は、Tip Vortex を発生しながら、次第にその半径が小さくなる。

対置地面があるときは、地面効果をうけ、途中で縮流をやめ、地面の近くで、四方に拡散する。図3は地面効果の測定値で、Rotor の地面からの高さが、ほぼ170mm くらいまでであることを示している。そして、その高さの位置から、次第に四方に拡散し始め、地面に沿った拡散状況は、Rotor の高さには関係がない。この事については、いずれ改めて考察する予定である。

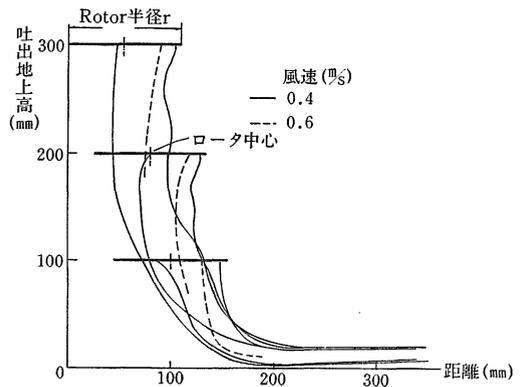


図3 Down Wash の地面による効果

散布粒子の Drift の解析のための仮定

前節の実験結果をもとに、Helicopter から散布された粒子の Drift を解析するために、次の仮定を設ける。

- 1). 航空用薬剤の製剤には、液剤、粉剤、粒剤等があるが、粒子径を考えて、液剤とする。したがって、空気密度 $\rho_a = 0.125(\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$ 、水の密度 $\rho_w = 102(\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4)$ 。
- 2). 散布液剤は、飛行中は、蒸発等性状は変化しない。そして、球形で、粒子径 d に比例する空気抵抗を受ける。(Stokes の法則 $D = 3\pi \cdot \mu \cdot v_d \cdot d$ 。ここに $\mu = 1.83 \times 10^{-6} (\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2})$; 空気の粘性係数、 v_d は空気と粒子の相対速度)
- 3). 薬剤粒子は、Rotor 面で、Rotor 中心より、飛行方向に直角の各位置で下方に吐出される。
- 4). 機体の前傾による Down Wash の風速の増加は、

表1 実験及び計算条件

Rotor 模型諸元		規 準 計 算 条 件	
半径 R	105mm	Helicopter の速度 V	13m/s
翼弦長	14mm	Rotor の半径 R	5m
迎え角 α	6°	迎え角 α	6°
		回転数 n	300rpm
		地上高 H	5m
		自然風速 u	2m/s
		散布粒子径 d	200 μm

機体重を支えるのみとし、機体の前進による推力の増加は考えない。

- 5). Down Wash は、Rotor 面通過後、直ちに縮流し、以後、そのままの半径で、しかも、風速の変化も生じない。また、Tip Vortex 等は考慮しない。
- 6). Down Wash は、地面に到達後、消滅する。
- 7). 薬剤粒子は、Down Wash の作用域から逸脱し、Down Wash の影響を受けなくなった位置から、自然

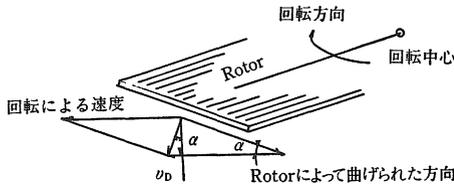


図4 Rotor の発生する気流の方向

表2 Rotor の推力 (風速) 係数の値

Rotor の回転数 rpm	200	300	400
K_p	0.199	0.127	0.096

風速の影響下に入る。

散布粒子の Drift の理論的解析

1. Hovering 時に Rotor の発生する風速

Helicopter が飛行を続けるためには、Rotor によって、上向きの推力が必要である。すなわち、機体重量と Rotor 面を通過する空気の運動量が等しくなければならないが、機体重量は、使用機種の違いのほか、操縦士の搭乗や、散布薬剤の搭載によって、一定しない。したがって、ここでは、普通一般に用いられている平均風速 $10(m/sec)$ を用いる。

$$\text{すなわち、} v_m = \sqrt{\frac{W}{2\rho a \cdot S}} \quad (1)$$

ここに、 W ；機体重量、 S ；Rotor の円盤面積。

しかしながら、実験により、発生風速は、Rotor の半径に比例するので、Rotor の推力係数を K_p として、
 $v_m = K_p \cdot r_m \cdot \omega$

ただし、 r_m ；Rotor 平均半径、 ω ；Rotor の回転角速度

$$\therefore K_p = \frac{v_m}{r_m \cdot \omega} = \frac{10}{2.5 \times \frac{2\pi n}{60}} \quad (2)$$

式(2)より K_p の値を計算し表2を得る。

よって、Rotor の半径を R として、

$$\text{最大風速} = K_p \cdot R \cdot \omega = 20(m/s)$$

$$\text{最小風速} = 0(m/s)$$

一方、風向は、実験より、Rotor 下面、垂直線より回転前方向、ほぼ Rotor の迎え角の方向である。(図4参照。実験では、これよりやや大きく観察されたが、理由その他不明のため、ここでは、このように仮定する。)

故に、Rotor の迎え角を α として、

$$\text{Rotor 面方向 } v_r = K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

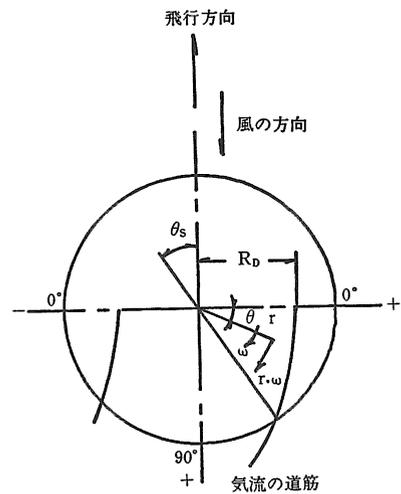


図5 Rotor 面内での気流の状態

$$\text{Rotor 下方向 } v_z = K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

2. Rotor 面内での気流の動き

Helicopter の飛行速度を $V(m/s)$ として、Rotor の中心から飛行直角方向 R_0 の位置にある空気粒子の動きをみる(図5)。ただし、飛行前進の代わりに、風速 V が吹くものとする、

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\theta}{dt} &= K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \alpha + V \cdot \cos \theta \\ \frac{dr}{dt} &= V \cdot \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

この連立微分方程式を解いて、式(6)を得る。ただし、初期値は、 $t=0$ のとき $r=R_0$ とする。ただし、気流が Rotor を離れる角度を θ_s とする。

$$\cos \theta_s = \frac{R_0}{r} + \frac{K_p \cdot \omega \cdot \sin \alpha}{2V} \left(\frac{R_0^2 - r^2}{r} \right) \quad (6)$$

1表の数値を用いて計算した結果は、表3計算1の通りで、Rotor 半径を $R=5$ とした場合、気流が Rotor を離れる角度 θ_s は、 R_0 の位置により、かなり差がある。(2., 3. の計算には、Rotor の縮流については、考慮されていない。)

3. Rotor の影響範囲内の散布粒子の動き

Rotor 直下に初速0で吐出された薬剤粒子に対する微分方程式は、式(7)の通りである。

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 y}{dt^2} &= -K_R \left\{ v_y - (K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta + V) \right\} \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -K_R (v_x - K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \alpha \cdot \sin \theta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

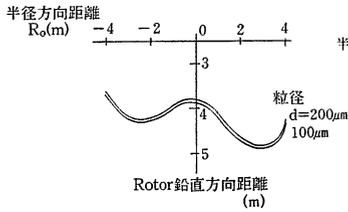


図6 粒径による下方到達距離 (Down Wash による)

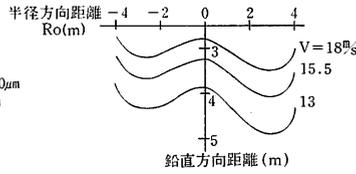


図7 飛行速度による下方到達距離 (d=100μm, Down Wash による)

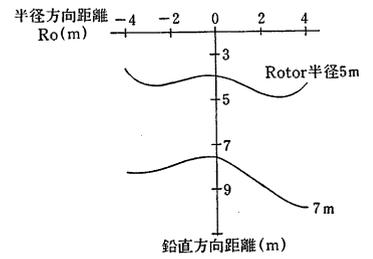


図8 Rotor 半径による下方到達距離 (d=200μm, Down Wash による)

ただし $K_R = D/v_d$

この両式から、 x または y を消去して、粒子の動きを知ることができるが、いずれも4階の線形微分方程式となり、解を求めることは困難である。したがって、正否は別として、両式の微係数の項を消去すると、式(8)を得る。

$$\left(R_0 - x + \frac{V}{K_p \cdot \omega \cdot \sin \alpha} \right) (R_0 - x) = y^2 \quad (8)$$

この式には、薬剤粒子径に関する項を含まないので、Stokes の法則が適用される範囲の粒子径では、おおむね気流に沿って動くといえる。

前掲の数値を当てはめて計算して、表(3)計算2を得る。この値は、計算1の値に近いので、以後の計算は計算1によることにする。

4. Down Wash 内を降下する薬剤粒子の動き

Rotor 直下に吐出された薬剤粒子は、Down Wash の影響を受けて降下する。此の時の微分方程式は、式(9)の通りである。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - K_R (v_z - K_p \cdot r \cdot \omega \cdot \cos \alpha) \quad (9)$$

ここに、 v_z ; Down Wash 作用域内の粒子の下降速度(m/s)

$$m; \text{ 粒子の質量 } \frac{\pi d^3 \rho_w}{6} \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right)$$

初速を0とし、Down Wash の作用風速を、Simpson の公式による平均風速が作用するとして、その半径を r_m として解を求め、式(10)、(11)を得る。

$$v_z = \left(\frac{m}{K_R} g + K_p \cdot r_m \cdot \omega \cdot \cos \alpha \right) \left(1 - e^{-\frac{K_R t}{m}} \right) \quad (10)$$

$$z_z = \left(\frac{m}{K_R} g + K_p \cdot r_m \cdot \omega \cdot \cos \alpha \right) \times \left\{ t + \frac{m}{K_R} \left(e^{-\frac{K_R t}{m}} - 1 \right) \right\} \quad (11)$$

前掲の数値を用いて計算し、図6~8を得る。ただ

し、ここでは、2.で行なった計算から、Helicopter の前進時の Down Wash に補正してある。

図6より、Rotor の先端に行くほど、早く Down Wash の影響から逸脱することは当然な事であるが、小さい粒子径が、やや下方まで到達する。Helicopter の飛行速度の増加(図7)、Rotor の半径長さの減少(図8)は、いずれも、到達距離を減少させる。

5. Down Wash の影響を離れた薬剤粒子の動き

Down Wash の中から逸脱した薬剤粒子は、自然風の影響を受けて、地上に降下する。此の時の微分方程式は式(12)の通りである。ただし、Helicopter の飛行速度は補正してある。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - K_R (v_z - u_z)$$

これを解いて

$$z = \frac{m}{K_R} \left(V_z - \frac{m}{K_R} g - u_z \right) \left(1 - e^{-\frac{K_R t}{m}} \right) + \left(\frac{K_R}{m} g + u_z \right) t + Z_z \quad (12)$$

V_z は粒子が Down Wash を離れたときの下降速度、

表3 気流が Rotor を離れるときの中心角 θ_s

半径方向位置 R_0 (m)	計算 1	計算 2*	差
- 4	- 34.02	- 34.43	-0.41
- 3	- 49.36	- 49.76	-0.40
- 2	- 62.14	- 62.47	-0.03
- 1	- 73.92	- 74.11	-0.13
0	- 85.40	- 85.45	-0.05
1	82.93	83.05	0.12
2	70.57	70.84	0.33
3	56.72	57.09	0.37
4	39.54	39.93	0.39

*注 y の精度0.01, $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ は少数点以下2位まで正確

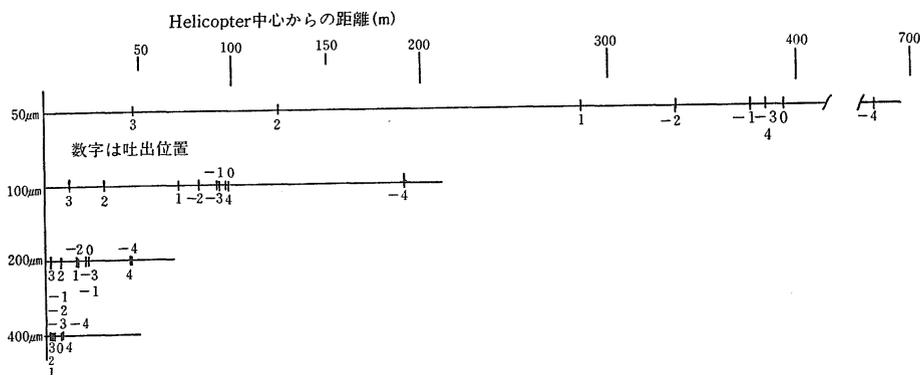


図9 散布粒子の水平到達距離 (縮流係数0.8, 自然風速横風 2m/s)

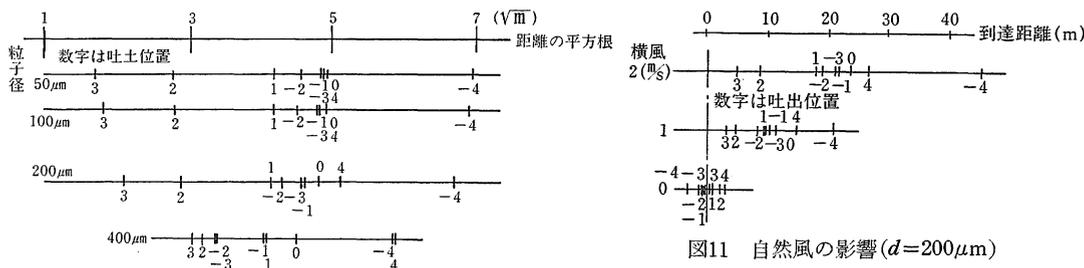


図10 散布粒子の水平到達距離の平方根×粒径比 (縮流係数0.8, 自然風速横風 2m/s)

式(10)による。Z₂は同下降距離，式(11)による。

これより，飛行高度 H から，4.で得た Down Wash 作用域内での，粒子の降下距離 Z₂を差し引いた距離を，自然落下する時間を求める。

そして，その時間内で，散布粒子が Drift する距離を，式(13)，(14)，(15)によって求める。ただし，自然風速を u(m/s)とする。

$$飛行直角方向 \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = -K_R(v_x - u_x) \quad (13)$$

よって，到達距離は

$$x = \left(\frac{v_x - u_x}{K_R/m} \right) \left(1 - e^{-\frac{K_R}{m}t} \right) + u_x \cdot t + X \quad (14)$$

ただし X = R · cosθ_s。

同様に，飛行方向の到達距離は

$$y = \left(\frac{V_y - u_y}{K_R/m} \right) \left(1 - e^{-\frac{K_R}{m}t} \right) + u_y \cdot t + Y \quad (15)$$

ただし Y = R · sin θ_s - √(R² - R₀²)

初速 V_x, V_y に，式(4)の半径 R における値を用い，風の脱出方向を式(5)によるとして計算し，図9を得る。ただし，X, Y は Down Wash 内の水平移動距離。

図9から，薬剤粒子径が小さい場合は，意外に遠くに

まで到達する。しかも，Rotor の端に吐出された粒子の飛散が大きい。その他の条件の影響については，4.における考察の通りである。

考 察

ここでは，標準的かつ実用的な散布法を，散布装置の改良および Drift のデータの整理法について，考察する。

1. 薬剤吐出位置

Helicopter の薬剤散布装置，および，散布方法の改良の目的の一つに，散布薬剤の飛散堆積，すなわち Drift の防止がある。計算結果から，散布薬剤粒子をあまり細かくしないことと同時に，吐出位置を，Rotor 半径の80%以内にとどめるべきである。しかし，薬剤は Rotor の位置で吐出できない。通常，操縦 Cabin の下に配置される。したがって，Down Wash は Rotor の下面で縮流を生じることを考慮し，Rotor 半径の60%以内，あるいは，それ以下の半径内にとどめるべきである。

2. 薬剤粒子径の統一

散布装置の改良の為に，実際に Helicopter を飛行させて，薬剤の散布実験が行なわれる。このさい，自然風の影響があり，装置の良否の判断に戸惑う場合が多い。しかしながら，図10より，粒径毎の落下距離 (Drift) の

図11 自然風の影響 (d=200μm)

表4 粒径 $d=200\mu\text{m}$ に統一する方法

粒子径 (μm)	$R_0 = -4 \sim 4$		$-3 \sim 3$	
	平均の平方根	換算値	平均の平方根	換算値
50	18.56	$\times \frac{50}{200} = 4.64$	16.69	4.17
100	9.26	$\times \frac{100}{200} = 4.63$	8.30	4.15
200	4.56	4.54	4.07	4.07
400	2.13	$\times \frac{400}{200} = 4.26$	2.29	4.59

$$u_x = 2 \frac{m}{s}$$

算術平均の平方根を取り、それと基準粒径との比の積をとれば、一定の値となる(表4)。すなわち、Driftの粒径による差がなくなる。散布ノズルが短縮された場合でも、この方法はおおむね適用される。

3. 自然風速の除去

同じ薬剤粒径でも、自然風の影響を受け、Driftが異なる。したがって、散布装置、散布法の改良のためには、自然風の影響を取り除いた方が、散布結果の観察が容易となる。

幸いにも、図11において、Driftの算術平均をとれば、自然風速とは、一次の関係にある。式(14)、式(15)でも、このことを示している。したがって、各風速時のDriftの値を、その風速と比例乗数の積で除すことにより、自然風の影響を除外することができる(表5)。

2.と3.を実施することにより、散布装置の改良の目安が、容易に付けられる。

表5 自然風速0 m/s に換算する方法

風速(m/s)	平均値 吐出位置 $R_0 = -4 \sim 4$		$R_0 = -3 \sim 3$
	平均の平方根	換算値	
2	20.82		16.5
1	10.25		8.09
0	-0.31		-0.36
比例常数	10.57		8.43

$$\text{風速 } 0 \text{ m/s にする場合} = \frac{\text{データ}}{\text{風速} \times \text{比例常数}}$$

粒径 $d=200\mu\text{m}$

結 語

実際に Helicopter を飛行させて、薬剤散布装置、散布法を改良するには、莫大な金を必要とする。その反面、自然風の影響があり、実験データの整理の仕方によっては、誤った結論を導き兼ねない。したがって、模型による簡単な実験を元にして、薬剤粒子の Drift に関する理論解析と、シミュレーションを行ない、散布装置の改良法と、データの整理検討法を考察した。以後は、これまでに収集された多くの実験データを用いて、その適用の可否を待つのみである。この結果を待って、より効果的で、公害の少ない散布法の開発を期待するが、この研究がその一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 加藤寛一郎・今永勇生：ヘリコプタ入門 東大出版会、東京、1985、P.75-77
- 2) 今井正信・田辺 一：農業機械学会誌 13(2)：124-127、1957.

注) 数値計算に誤りがありました。したがって、図6~11は傾向を示します。