

風によるスプリンクラー噴霧の飛散軌跡

岡村俊一*・岩屋京子**・中西賢二***

(受理 昭和44年6月6日)

TRAJECTORY OF FINE WATER DROPLET EMITTED BY THE SPRINKLER NOZZLE

Shunichi OKAMURA*, Kyoko IWAYA** and
Kenji NAKANISHI***

Water losses of sprinkler irrigation occur in many ways. Especially the parts of evapotranspiration and wind drift are apparent losses. And these losses are directly concerning with the behavior of fine water droplet. So in this report, trajectory of fine water droplet are treated.

The equation of flying water droplet in the moving air are as follows;

for x direction

$$\ddot{x} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q'(\dot{x} - w')$$

for y direction

$$\ddot{y} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q'(\dot{y} - w'')$$

for z direction

$$\ddot{z} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q'(\dot{z} - w''') - g$$

Drag coefficient is formulated as follows;

$$Re < 2 \quad C_D = \frac{24}{Re} + 1.5 \dots \dots \dots (\text{Osen's equation})$$

$$2 \leq Re \leq 100 \quad C_D = 33.3/Re - 0.0033 \quad Re + 1.2$$

$$100 < Re < 1000 \quad C_D = 72.2/Re - 0.0000556Re + 0.48$$

$$Re \geq 1000 \quad C_D = 0.45$$

Using a electronic computer, the equation of motion of flying water droplet are solved. These data shows that the initial velocity of fine water droplet emitted by the sprinkler nozzle is reduced rapidly by air drag force and also carried away by the wind. Wind drift are occurred by the upward component of wind. Relations between maximum drop diameter, which is not fallen on the earth's surface, and upward velocity component of wind are theoretically calculated.

1. ま え が き

スプリンクラー・カンガイにおける損失水量は、噴射水の蒸発損失、浮遊損失（飛散損失）、地表面での蒸発損失など、多くの損失成分より構成されていて、これらは蒸気圧、風速などの気象条件、作物などを含めたノズル圧力、ノズル口径、ライザー高さのような運転条件の影響を受ける。また、スプリンクラー・カンガイの研究において、解析の困難な部分である。この中で、スプリンクラー・ノズルからの噴射水に含まれ

る種々の粒径の水滴が空気中を飛行する時に失われる蒸発損失、散布領域外への浮遊損失（飛散損失）、地表面へ落下後の蒸発損失などの、いわゆる飛散損失には微小水滴の挙動が直接関係するものと考えられる。すなわち、微小水滴は空気抵抗によって、その初速度はきわめて短時間に失われ、空気の流動（風）のある時は、空気の動きによってはこぼれる。散水領域内に落下しない微小水滴は飛散損失となる。空気の流動は、平均速度と偏差速度成分の和と考えられていて、平均速度の風向は平均的に、ほぼ水平方向（平地において）

* 鹿児島大学工学部機械工学科・教授

** 鹿児島大学工学部機械工学科・助手

*** 鹿児島大学工学部大学院・学生

と考えられるが、瞬間的に上下方向の変動のあることが測定されている。このことは、垂直方向速度成分が存在しうることを示している。したがって、ある風速に対して存在する垂直方向速度成分のために、微小水滴は地面に落下せず、風によって飛散し、散水カンガイにおける損失水量となる。同時に、浮遊による滞空時間の増加と水滴の直径が小さいほど、単位体積当たりの表面積が大きいことは、飛行中の蒸発損失および地表面での蒸発損失を増加するものと考えられる。ここでは、飛行中の微小水滴の蒸発、地表面での蒸発は取り扱わず、これらに直接関係し、散水カンガイにおける飛散損失を与えられる微小水滴の飛行中の挙動を明らかにする。

2. 微小水滴の飛行軌跡

(1) 微小水滴の運動方程式

飛行水滴に対する運動方程式は、水滴が飛行中球体を保つものとする¹⁾

x 方向 (水平面内)

$$\ddot{x} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (\dot{x} - w) \quad (1)$$

y 方向 (水平面内)

$$\ddot{y} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot \dot{y} \quad (2)$$

z 方向 (垂直面内)

$$\ddot{z} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (\dot{z} - q) \quad (3)$$

が適用される。しかし、前述のごとく飛散損失を考慮する場合は、瞬間的に風向の変動を考慮に入れねばならない。したがって、(1), (2), (3) 式を書き改めて次式が得られる。

x 方向

$$\ddot{x} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (\dot{x} - w') \quad (4)$$

y 方向

$$\ddot{y} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (\dot{y} - w'') \quad (5)$$

z 方向

$$\ddot{z} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (\dot{z} - w''') - q \quad (6)$$

w' : 風の x 方向成分

w'' : " y " "

w''' : " z " "

$$\text{風速 } w = \sqrt{w'^2 + w''^2 + w'''^2}$$

風向の変動が上下方向のみとし、常に x, z 面に平行に吹くものと仮定すると $w'' = 0$ 。したがって、(5) 式は

$$\ddot{y} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot \dot{y} \quad (5')$$

$$\text{風速 } w = \sqrt{w'^2 + w'''^2}$$

$$\begin{cases} w' = w \cos A \\ w''' = w \sin A \end{cases}$$

A: 風向の水平方向となす変動角。

式中、抵抗係数 C_D はたがいに相似形の物体間では、レイノルズ数 Re のみの関数と考えられている。特に、微細水滴の場合には、 Re 数はかなり小さな値となることが予想される ($Re = vD/\nu$)。

Re 数の小さな範囲における抵抗係数 C_D の値については、ゴールドステンによって求められたオーゼン近似による厳密解

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1280} Re^2 + \frac{71}{20480} Re^3 - \dots \right)$$

の第1項のみをとったストークスの式として知られる

$$C_D = \frac{24}{Re}$$

および第2項までとったオーゼンの式として知られる

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \text{ すなわち } C_D = \frac{24}{Re} + 4.5$$

がある。ストークスの式では $Re < 0.5$ 、オーゼンの式では $Re < 2$ で実験値と一致することが確かめられている。したがって、微小水滴の挙動を取りあつかう場合にかぎり、抵抗係数を与える近似式は以下のごとく書かれる。

$$\left. \begin{array}{ll} Re < 2 & C_D = 24/Re + 4.5 \\ 2 \leq Re \leq 100 & C_D = 33.3/Re - 0.0033 Re + 1.2 \\ 100 < Re < 1000 & C_D = 72.2/Re - 0.0000556 Re + 0.48 \\ Re \geq 1000 & C_D = 0.45 \end{array} \right\} \quad (7)$$

(2) 初期条件

一例として、0.3 mmφ の水滴の飛行軌跡を、飛散損失を考慮するための飛行水滴に対する運動方程式(4), (5)', (6) 式および抵抗係数を与える式(7)を用いて解くことにする。

初期条件

ρ_a : 空気の密度 $= 0.119 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$

(空気温度 $t_a = 30^\circ\text{C}$ とし, かつ空気はかわき
空気とした場合)

(大気圧 760 mmHg)

ρ_w : 水滴の密度 $= 101.8 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$

(水滴温度 $t_w = 20^\circ\text{C}$ において)

$\rho_w = \gamma_w/g$ (大気圧 760 mmHg)

γ_w : 水滴の比重量 $= 998.2 \text{ kg/m}^3$

(水滴温度 $t_w = 20^\circ\text{C}$ において)

(大気圧 760 mmHg)

D : 水滴直径 (0.3 mm ϕ)

g : 重力加速度 $9.8 \text{ m/(sec}^2\text{)}$

q_0 : ノズルからの噴出速度 (m/sec)

$$q_0 = C_v \sqrt{2gH}$$

H : P/γ_w (m)

P : ノズル圧力 (kg/cm 2)

C_v : 速度係数 ≈ 0.98 を仮定する.

ノズル角度 27°

$\rho_a/\rho_w = 0.00116$ ($t_a = 30^\circ\text{C}$, $t_w = 20^\circ\text{C}$, 760 mmHg)

ノズル圧力 3.5 kg/cm^2

風速は, 平均風速 2 m/sec , 4 m/sec , 6 m/sec の3つを仮定し, 風向は x, z 面に平行で, x, z 面内で $A = +12^\circ$, $A = 0^\circ$, $A = -12^\circ$ の3つに変動するものとして各々の場合について算定を行う. ($\pm 12^\circ$ の風向の変動は, 文献²⁾ による塩田での実測結果から仮定された値である.)

噴射方向は風上方向, 風下方向の2方向とする.

噴射速度 $q_0 = 25.6 \text{ m/sec}$

(3) 計算結果

(2) の初期条件によって, 飛行水滴に対する運動方程式 (4), (5)', (6) 式を解くことによって得られた飛行軌跡を fig. 1 に示す.

fig. 1 (A) 平均風速 2 m/sec の場合

" (B) " 4 m/sec "

" (C) " 6 m/sec "

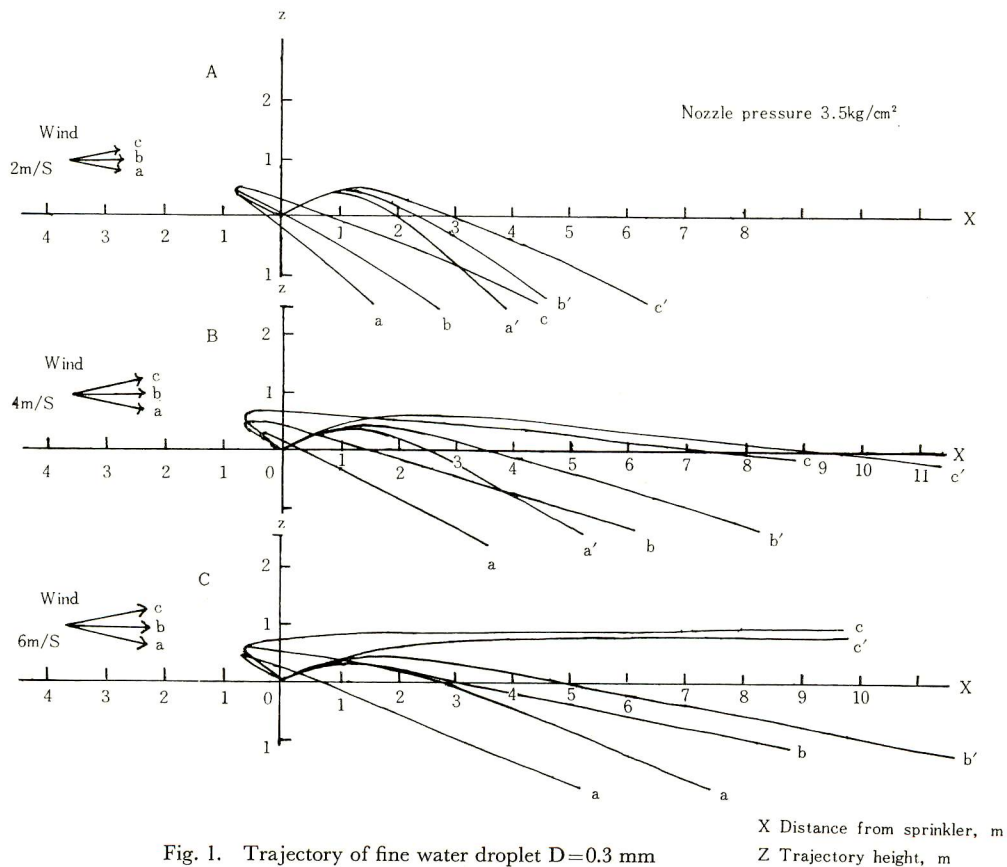


Fig. 1. Trajectory of fine water droplet $D=0.3 \text{ mm}$

また、水滴の軌跡の記号 a, b, c は、風向の a, b, c に対応するものである。すなわち、a は下向き風の場合、b は水平方向風の場合、c は上向き風の場合である。また、記号に付されたダッシュは、風下方向に噴出された場合を示し、何も付されていないのは風上方向に噴出された場合を示す。

fig. 1 から明らかなごとく、風速の増大にともなって上向き風の場合（すなわち風の上昇成分のある時）、水滴は風によってはこぼれることがわかる。特に、6 m/sec の風速すなわち 1.25 m/sec の速度をもった風の上向き成分が存在する場合は、0.3 mmφ の水滴は地表面に落下しないことが明らかにされる。もちろん、これらは風向の変動と風速に依存するものであり、地形などによっても変化するものと考えねばならない。

3. 飛散損失となる水滴

(1) 地表面に落下しない水滴の最大粒径 Dd

前述のごとく、ある風速に対して存在する垂直方向速度成分のために、微小水滴は地面に落下せず散水カンガイにおける損失水量となる。すなわち、風によって地表面と平行に飛行する球状水滴の直径を Dd とすると、 $D \leq Dd$ を満足する水滴は地表面に落下せず、風によってはこぼれ飛散損失となる。（また、飛行の途中で蒸発によって消滅すると考えられる。）

地表面に落下しない水滴の最大粒径 Dd は、(6)式において、 $\dot{z}=0, \dot{z}=0$ を代入し、(6)式を満足する水滴直径 Dd を求めることによって算定される。

(2) 初期条件

特性値は、2. の (2) の場合と同じ。

風速は、平均風速 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 6 m/s を仮定する。

風向は、 x, z 面に平行で、 x, z 面内で $\pm 12^\circ$ の変動をするものと仮定する（飛散損失に着目するならば、 $A = \pm 12^\circ$ のみを考慮すればよい）。

したがって、風の数値成分は Table. 1 となる。

Table 1. Velocity component of wind

Wind velocity w m/s	x component w' m/s	z component w'' m/s
2	1.96	0.42
3	2.94	0.62
4	3.91	0.83
6	5.87	1.25

(3) 計算結果

式(6)より

$$\ddot{z} = -C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{S}{V} \cdot \frac{3}{4D} \cdot q' \cdot (z - w''') - g$$

$\dot{z}=0, \ddot{z}=0$ を代入すると

$$\frac{3}{4D} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot q' \cdot w''' - g = 0 \quad (8)$$

初期条件より

$$\rho_a / \rho_w = 0.00116 \quad (\text{空気温度 } t_a = 30^\circ\text{C}, \text{ 水滴温度 } t_w = 20^\circ\text{C}, 760 \text{ mmHg}) \quad (9)$$

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2 \quad (10)$$

飛行水滴の風に対する相対速度 q' を求めると Table. 2 となる。すなわち、水滴が地表面に平行に

Table 2. Reference velocity q' of droplet

Wind velocity w m/s	Reference velocity q'
2	0.42
3	0.62
4	0.83
6	1.25

(x, y 面に平行に)、風によってはこぼれる時、 x 方向の水滴の速度は、ほぼ風の x 方向成分に等しく、 y, z 方向成分は 0 に等しい。したがって

$$q' = \sqrt{(\dot{x} - w')^2 + \dot{y}^2 + (\dot{z} - w'')^2}$$

$\dot{x} = w', \dot{y} = 0, \dot{z} = 0$ を代入すると

$$q' = w''$$

飛行水滴の Re 数を求めると Table. 3 となる。

Table 3. Re number

Wind velocity w m/s	Re
2	26.33 Dd
3	38.87 Dd
4	52.04 Dd
6	78.37 Dd

Dd : Drop diameter (mm)

$$Re = \frac{q' \times Dd}{\nu}$$

q' : Reference velocity of droplet (m/s)

ν : Kinematic viscosity of the air (m^2/s)

D : Drop diameter (m)

($t_a = 30^\circ\text{C}$, 760 mmHg, $1.604 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

$$Re = q' \cdot Dd / \nu$$

q' : 水滴の相対飛行速度 (m/s)

ν : 空気の動粘性係数 ($1.604 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

($t_a = 30^\circ\text{C}$, かわき空気, 760mmHg)

Dd : 水滴の直径 (mm)

Dd を 0.1 mm のオーダーとすると、飛行水滴の Re 数は

$$2 < Re < 10$$

の範囲にある。したがって、抵抗係数 C_D は (7) 式から

$$\begin{aligned} C_D &= 33.3/Re - 0.0033Re + 1.2 \\ &\approx 33.3/Re + 1.2 \end{aligned} \quad (11)$$

が適用される。

(8), (9), (10), (11) 式および Table 1, Table 2, Table 3 を用いることによって、落下しない水滴の最大粒径 Dd が求まる (Table. 4)。

Table 4. Drop diameter Dd mm

Wind velocity w m/s	Dd mm
2 ($w''' = 0.42$)	0.15
3 ($w''' = 0.62$)	0.19
4 ($w''' = 0.85$)	0.24
6 ($w''' = 1.25$)	0.34

$$\begin{aligned} z &= -\frac{C_D}{2} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} \cdot \frac{S}{V} \cdot q' \cdot (z - w''') - g \\ \dot{z} &= 0, \quad \dot{z} = 0 \\ \frac{S}{V} &= \frac{3}{2Dd} \end{aligned}$$

これによって、 Dd が 0.1 mm のオーダーであるとした仮定は正しいことがわかる。

したがって、風向が水平方向に対して $+12^\circ$ の変動がある時、風速 2 m/s で (すなわち 0.42 m/s の垂直方向速度成分のある時)、0.15 mm 以下の水滴は地表面に落下しない。同様に、風速 3 m/s, 4 m/s, 6 m/s で (それぞれ 0.62 m/s, 0.83 m/s, 1.25 m/s の垂直方向速度成分のある時)、それぞれ 0.19 mm 以下, 0.24 mm 以下, 0.34 mm 以下の水滴は地表面に落下しないこ

とを示す。

fig. 2 に垂直方向速度成分と、その時の落下しない最大 (限界) 水滴粒度を示す。

4. む す び

スプリンクラー・カンガイにおける損失水量の中で、飛散蒸発損失に直接関係する微小水滴の運動方程式を考察した。また、電子計算機による計算結果から、微小水滴においては、その初速度はきわめて短時間に失われることが確かめられた。したがって、 q' , D に比例する Re 数は、きわめて小となる ($Re < 2$) ことから、このような小さな Re 数での運動を取りあつかう場合は、抵抗係数 C_D に対しては、ストークスの式 $C_D = \frac{24}{Re}$ あるいはオーゼンの式 $C_D = \frac{24}{Re} + 4.5$ が適用されねばならない。

また、風によってはこぼれる時は、その水平方向速度成分は風の水平方向速度成分に等しい。垂直方向速度成分は、重力加速度の影響と空気抵抗に関係し、風によって地表面に平行に飛行する水滴直径 Dd よりも、小さくなるにしたがって大きくなる。 ($D = Dd$ においては、垂直方向速度成分は 0 である。)

また、飛散損失は平均的に水平方向と考えられている風向に、瞬間的に含まれる上下方向の変動によって生ずると考えられる。飛行水滴に対する運動方程式から、地表面に落下しない水滴の最大粒径 Dd を理論的に求めた。すなわち

0.42 m/s の垂直方向速度成分のある時

	$Dd = 0.15$ mm
0.62 "	" $Dd = 0.19$ "
0.83 "	" $Dd = 0.24$ "
1.25 "	" $Dd = 0.34$ "

が得られた。

上記の条件の下で、 $D < Dd$ を満足する水滴は地表に落下せず、風によってはこびさられる。また、滞空時間の増加と径の小さいことは、単位体積当りの表面積の大きなことから、これらは蒸発によって消滅すると思われる。

引 用 文 献

- 1) 岡村俊一：スプリンクラー散水に関する基礎的研究，鹿大工学部紀要第 14 号，昭44. 3 月，p. 1～71
- 2) 井上裕雄：Experimental studies on losses due to wind drift in sprinkler irrigation, 香川大農・学術報告，15巻 1 号，昭38. 12月

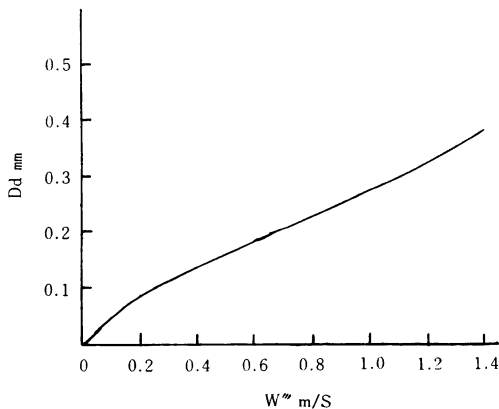


Fig. 2. Relation between drop diameter Dd and vertical wind velocity W''' .