5

空中花粉の形態と飛散

Morphology and Dispersion of the Airborne Pollen Grains

佐橋 紀男

Norio Sahashi

Key Words : Airborne pollen, Dispersion, Pollen diameter, Dropping velocity

はじめに

本誌の20巻(1988)に、筆者は「空中花粉粒と花粉症のはなし」¹⁾と題して主な花粉症原因花粉について紹介したが、生命ある空中浮遊粉体とも言い換えられる空中花粉 (airborne pollen grain) の本質、すなわち空中花粉の飛散能力 (水平分布と垂直分布) はどの程度あるのか、あるいは膨潤形と乾燥形の形態変化はどうか、さらに落下速度は花粉の大きさで左右されるのかについて、筆者の実験結果や他の研究者のデータを紹介し、読者に少しでも花粉の素顔を理解して頂ければ幸いである。その意味でも、今回は花粉をカラー写真で紹介することにしたい。

1. 空中花粉の飛散能力

1.1 水平分布

実際にスギ林から花粉が雲か霞のように舞い上がる様子を筆者は過去何回となく観察しているが、その光景 (図3-q) は実に圧巻である。この時、筆者は空中に放出された花粉が竜巻のように上空へ登って行く様子をカメラで撮影に成功し報告した²⁾。このような花粉雲は、マツ類や多くの沢山花を咲かせる裸子植物

では珍しくない。しかし、被子植物の風媒花粉では稀である。多分、花粉生産量が少ないためであろう。

では、無数の花粉が上空高く風で舞い上がったあと飛散距離 (水平分布) はどうなるか、塚田³⁾は著書の中で流体力学を応用して計算された典型的な理論値として、高さ25mの木から平均風速3m/秒の条件のとき放射された花粉は、放射源から400m付近で最大落下濃度を示した。しかし、100m以内にはほとんど落下しないことが示された。実際には上記の理論値を実験で再現するのは不可能に近いが、筆者⁴⁾は実際に砂浜に10mの櫓を建て、2年がかりで集めたスギの花粉2kgで飛散実験を試みた。結果は風速2mの時、放射源から80mの地点で最大落下濃度を示した。次に、同じ高さから風速4mのときは、放射源から100m以内にはほとんど落下しなかった。Colwell⁵⁾のマツ属花粉を使った10mからの放射実験結果は、さらに花粉源に近い最大落下地点を示した。塚田の理論値では花粉放射源が25mの高さなので比較は無理だが、風が弱いと花粉は案外遠くまで飛ばないこと、しかし風が強くなると、たとえ低い放射源からでもかなり遠くへ飛んでいってしまうことがある程度把握できた。

一方、これまでに花粉の遠距離飛散の報告は幾つもあるが、なかでも上野⁶⁾の報告では南極の昭和基地で、3000km離れたアフリカ大陸から飛んできたマキの花粉を発見している。

1.2 垂直分布

一度高く舞い上がった花粉は上昇気流に乗って数千メートルもの上空にまで到達してしまうことも外国では良く知られているが、日本では筆者がヘリコプターを使って調査した結果がこれまでの最高高度

2000年10月11日受付
東邦大学薬学部生物学教室

(〒274-8510 船橋市三山2-2-1) TEL 047-472-2604

< 著者紹介 >

昭和41年東邦大学薬学部卒、同大同学部助手、講師、助教授を経て平成9年教授、理学博士。

専門：植物分類・形態学、特に花粉の形態、空中花粉の調査研究を高校時代から続けている。現在はスギ花粉症の予防対策に全国の共同研究者と奮闘中。

表1 体積法による東京タワーおよびその上空周辺での空中花粉垂直分布

高度		スギ+ヒノキ (個/(m ³ ・時間))	ハンノキ 他 (個/(m ³ ・時間))	total (個/(m ³ ・時間))
東京 タ ワ ー	159m	43	3	46
	253m	40	4	44
ヘ リ コ プ タ ー	350m	71	15	86
	450m	52	9	61
	1000m	52	24	76

調査日：1990年3月22日

体積法：空気を一定速度で一定時間吸引し、その中の花粉を一定体積あたりの個数として示す方法

(注)：東京タワーは当日12時30分～15時30分間の3時間採集数を1時間値に換算したもの

ヘリコプターは当日12時30分～15時30分間の各1時間毎に350mから連続して1000mまで採集した値

(3000m)であろう⁷⁾。この調査は5月だったので、マツ属の花粉がかなり捕集できた。恐らく3000mも上昇してしまえば、もはや落下することはなく半永久的にミクロのゴミとして空中に漂っているのではないだろうか。このことを、将来明らかにしてみたい。

一方、同じくヘリコプターによる東京タワー上空350m、450m、1000mの高度と、さらに東京タワーの展望台159m、253mの同時調査では、高度差による極端な違いは見いだせなかった(表1)。つまり、これまでの筆者の調査では、スギ花粉の垂直分布は高い高度まで一様に拡散分布していることが裏付けられつつある。

2. 花粉の形態変化

花粉の形態変化は花粉の水分含有率に左右される。言い換えると、花粉の脱水率の大小が形態変化に大きく関与している。今回は花粉を膨潤形にする方法として、グリセリンゼリーに色素(メチルバイオレット)を加えた菅谷⁸⁾のGVゼリーで封じ、さらに加温して花粉を膨潤させた。一方、乾燥形にする方法としては、単に冷凍庫に貯蔵してあった新鮮な花粉をいきなり99.5%エタノールで封じ、即撮影した。従って、図2～3のカラー写真による花粉の膨潤形の色はメチルバイオレットの色であり、乾燥形の色は花粉そのものの色に近い。

2.1 裸子植物の花粉、乾燥形と膨潤形(図1～3)

裸子植物の花粉は図1. a-hに示したように、膨潤形と乾燥形では極端に形態が違ってしまふ花粉が多い

ようである。その大きな理由は、恐らく裸子植物花粉の脱水率が大ききことであろう。マツ類は9%、スギやネズミサシは実に30%と上野⁹⁾が報告している。図1に示した裸子植物花粉4種類はいずれも花粉症原因花粉であるが、中でもスギ花粉(a, b)は今日東京都民の5人に1人が花粉症患者になったと言われている。

スギ花粉をよく見ると、膨潤形(a)は花粉内部の原形質(ここでは花粉の内容物を原形質と呼ぶ)はほぼ中央のややパピラ(カギ状突起)よりに台形状に見られるだけで、それ以外の部分は空のように見える(実際は透明な厚い内膜がある)。乾燥形(b)はパピラの周囲が低く陥没したり、走査電子顕微鏡(SEM)では軟式のテニスボールのように陥没している(図3-s)。同じくSEM像の膨潤スギ花粉(図3-r)ではパピラの周囲だけ顆粒状の最外膜が欠損している。この外膜構造と原形質の少ないことが乾燥形のスギ花粉の形態を変化させているものと解釈できる。

ヒノキ科のネズミサシ(図1-c, d)では膨潤形(c)はほぼ球状であり、原形質は中央に星状で花粉直径の1/3の大きさがあるにすぎない。それ以外の部分が透明の内膜だとしても、原形質は無いので乾燥形(d)ではスギ花粉よりも萎縮し、あたかも紙風船を折り畳んだように見られる。

アカマツ花粉(図1-e, f; 図3-t)は膨潤形(e, t)が見事な2個の翼を持った大きめの花粉で、重そうである。花粉本体内部の原形質も直径の約1/2あり、明らかにスギやヒノキ科花粉より乾燥にも強そうであ

図1 光学顕微鏡による膨潤形と乾燥形花粉の比較

- a) スギ (*Cryptomeria japonica*):
膨潤形, 大きさ $\phi 35 \mu\text{m}$
- b) スギ (*Cryptomeria japonica*):
乾燥形, 大きさ $\phi 26 \mu\text{m}$
- c) ネズミサシ (*Juniperus rigida*):
膨潤形, 大きさ $\phi 27 \mu\text{m}$
- d) ネズミサシ (*Juniperus rigida*):
乾燥形, 大きさ $\phi 25 \mu\text{m}$
- e) アカマツ (*Pinus densiflora*):
膨潤形, 大きさ $\phi 56 \mu\text{m}$ (全長)
- f) アカマツ (*Pinus densiflora*):
乾燥形, 大きさ $\phi 40 \mu\text{m}$ (全長)
- g) イチョウ (*Ginkgo biloba*):
膨潤形, 大きさ $19 \times 25 \mu\text{m}$ (単径 $\times$ 長径)
- h) イチョウ (*Ginkgo biloba*):
乾燥形, 大きさ $\phi 15 \times 35 \mu\text{m}$

るが、乾燥形 (f) を見ると、2 個の翼は完全に花粉本体に覆い被さっており、翼を広げた膨潤形の大きさの約 66 % にすぎない。このマツ型の花粉が空中を飛散している時は、翼を広げグライダーのように飛んでいるのではなく、2 枚の翼は花粉本体を乾燥から守るために花粉の発芽口に密着し、萎縮した型で飛散している可能性が高い。さらに SEM で翼の表面を高倍率で観察 (図 3-u) したところ、ミクロの小穴が沢山確認できた。翼内の空気がこの穴を通して出入りすることが十分考えられる。また凍結切片による観察から、クロマツ花粉の翼の中は空で、翼の裏側にやや大きめの網目状の模様 (図 3-v) を発見したが、この網目構造

図2 光学顕微鏡による膨潤形と乾燥形花粉の比較

- i) クヌギ (*Quercus acutissima*):
膨潤形, 大きさ $\phi 39 \mu\text{m}$
- j) クヌギ (*Quercus acutissima*):
乾燥形, 大きさ $\phi 30 \times 44 \mu\text{m}$ (単径 $\times$ 長径)
- k) モクマオウ (*Casuarina stricta*):
膨潤形, 大きさ $\phi 37 \mu\text{m}$
- l) モクマオウ (*Casuarina stricta*):
乾燥形, 大きさ $\phi 25 \times 30 \mu\text{m}$
- m) グロリオサ (*Gloriosa sperba*):
膨潤形, 大きさ $\phi 35 \mu\text{m}$ (長径)
- n) グロリオサ (*Gloriosa sperba*):
乾燥形, 大きさ $\phi 36 \mu\text{m}$ (長径)
- o) ヤブツバキ (*Camellia japonica*):
膨潤形, 大きさ $\phi 47 \mu\text{m}$
- p) ヤブツバキ (*Camellia japonica*):
乾燥形, 大きさ $\phi 32 \times 57 \mu\text{m}$

なら、膨らんだ花粉の翼の中は空でもあまり原型を失わず、ある程度飛散の役にたっているものと思われる。

イチョウの花粉 (図 1-g, h; 図 3-w) は膨潤形で球状 (w) あるいは長球状 (g) になり、SEM 像でも発芽口は丸くレンズ状に突出する (w)。しかし、乾燥形 (h) はボート状となり、発芽口の部分が湾曲し、凹む。イチョウの花粉も脱水率はスギ花粉に次ぐものと思われる。

スギ花粉の発芽口が水分次第で極端に突出したり凹むのは、発芽口の裏側に仕掛けがあることを、筆者は花粉の切片を観察することで発見した¹⁰⁾。図 3-x に

示したように、発芽口の裏側にはやや大きめの網目状の彫紋があった。この彫紋はアカマツ花粉の翼の裏側の網目状の彫紋(図3-v)とよく似ており、この彫紋が恐らく発芽口の突出や萎縮に関与しているものと思われる。

2. 2 被子植物の花粉

被子植物双子葉の下等な種類に風媒花が比較的多いが、なかでも雄花の花序を長く下垂するヤナギ科、カバノキ科やブナ科のいわゆる尾状花序を持つ種類が知られている。花粉症原因花粉としてはカバノキ科が重要であるが、最近ではブナ科が庭木や街路樹などにも好まれ、全体の空中花粉数としては比較的多い。

クヌギはブナ科の代表的な里山樹木で、その花粉(図2-i, j)の膨潤形(i)は、3個の溝型発芽口(花粉管口)が大きく開いており、さらに不明瞭だが、原形質はそれらの周囲には存在せず、中心にテトラポット状に見える。一方、乾燥形(j)は膨潤形とは対照的に四角張った形態となり、発芽口は口を真一文字に閉じて花粉を乾燥から守っていることがわかる。やはり、脱水率はかなり大きいものと思われ、大きなゴムまりを畳んだような形をしている点、興味深い。

次に、モクマオウの花粉(図2-k, l)であるが、この植物は亜熱帯育ちの風媒花で、膨潤形の花粉(k)はややふくらしたおにぎり型(円状正三角形)をしている。3個の丸い発芽口があり、その周囲はやはり空間のようになっていて原形質は中心に角の丸い三角形形状になって見える。前述のクヌギほど原形質は萎縮していない。発芽口が丸く小さいことが乾燥形(l)でもクヌギほど膨潤形の形態変化をせず、おにぎりを多少強くにぎった形をしていることから、脱水率はさほど大きくはなさそうである。

一方、単子葉の虫媒花であるユリ科のグロリオサ(図2-m, n)では、膨潤形(m)も乾燥形(n)もほとんど形態変化が見られず、大きさもほぼ同じであった。両方の原形質を見るとぎっしりと内膜にそって存在し、わずかながら乾燥形で筋のような溝が認められる程度である。

最後の双子葉の虫媒花であるヤブツバキの花粉(図2-o, p)を見ると、膨潤形(o)は直径47 μ mもある美しい円状正三角形で、中央に外膜の一部が残存する大きな3個の発芽口の溝があり、原形質は発芽口の縁まで隙間なく満たされている。しかし、乾燥形(p)は一変してこの大きな発芽口は全く一本の細長い筋状の溝になり、花粉形態もラグビーボールのように長楕円形に変化している。原形質が萎縮しているかどうか

図3 走査型電子顕微鏡 (SEM) による裸子植物の花粉

q) スギ林からのスギ花粉雲の発生の瞬間
(神奈川県足柄峠, 1990.3.7)

r) スギ (*Cryptomeria japonica*):
膨潤形, 大きさ ϕ 33 μ m

s) スギ (*Cryptomeria japonica*):
乾燥形, 大きさ ϕ 26 μ m

t) アカマツ (*Pinus densiflora*):
膨潤形, 大きさ ϕ 55 μ m (全長)

u) アカマツ (*Pinus densiflora*):
翼の表面, 小さい孔は ϕ 0.07 μ m

v) クロマツ (*Pinus thunbergii*):
翼の内側断面, 中央の孔は ϕ 1 μ m

w) イチョウ (*Ginkgo biloba*):
膨潤形, ϕ 28 μ m, 中央の円形部分は発芽口

x) イチョウ (*Ginkgo biloba*):
wの発芽口断面, 内側に網目彫紋(約 ϕ 1 μ m)

この図からは不明だが、外膜の乾燥による皺が認められないこと、長径が著しく長いことなどから、たとえ形態変化が著しくても、原形質の大きさは変わらないように見られる。

以上より、まだ観察数は少ないが、膨潤形と乾燥形の花粉の形態変化は風媒花で脱水率が大きな花粉ほど原則として両者の間に大きな違いがあり、虫媒花の花粉ではほとんど両者の花粉形態に変化が認められない種類と、著しく変化はするが、風媒花粉ほど原形質が萎縮しない花粉が認められた。

3. 空中花粉の大きさと落下速度

空中花粉すなわちほとんどの風媒花の花粉は、「一般に小型で軽く遠くまで飛散する」と杓子定規に言われているが、田中^{11, 12)}は、幾瀬¹³⁾の報告した花粉の大きさの表から風媒花の花粉の大きさだけを引用し、大変興味ある結論を得ている。要約すると、風媒花を花粉散布様式により弾発型、強風型、長花糸型の3型に分けて分析すると、花粉を自力で放出する弾発型は大きさが平均して15 μm と最も小さいが、風のあまり吹かない谷間にこの型の植物が多い。強風型の植物は木本が主で、マツ類などの裸子植物、尾状花序のカバノキ科の花などの花粉で平均的な大きさは26 μm あり、強い風が吹けばかなり遠くまで飛散できる。最後の長花糸型は、木本の小高木やイネ科の花粉であり、大きさの平均値は31 μm で比較的大きいため、また花粉放出位置があまり高くないことからあまり遠くには飛散できないと解釈できる。田中¹²⁾は、散布型ごとに生育地の風環境や生活様式の共通性を反映して花粉粒径が収斂していると結論している。

一方、実験室内で花粉の落下速度を機械的に行った市倉¹⁴⁾の実験結果は、花粉の大きさと落下速度とは正の相関があり、花粉は小さいほど長時間浮遊することを示唆し、また虫媒花の花粉はわずかな材料での結果だが、大きさに関係なく一様に早く落下することを述べており、水分の含有量の違いを指摘している。

筆者は、個々の花粉の形態が空中を飛散している間

に空中の水分により膨潤形に移行することは十分考えられることから、室内での実験結果が即野外の自然な状態での落下速度や花粉形態を反映するかどうかは疑問がもたれる。しかし、空中を飛散している花粉をそのままの状態で観察することはなかなかできないことから、田中¹²⁾は花粉の大きさに焦点を絞ったが、風媒花を3種類に分けて個々の花粉散布型のバックグラウンドを把握し結論していることから、極めて信頼のおける分類方法と思われる。

おわりに

風媒花の花粉が花から空中に放射され、同じ仲間の風媒花の雌しべに付着し、結実されることがある確率は放射された距離に左右される。幾つかの実験データがあるが、意外にもどのデータも結実率を調べると花粉を放出した放射源からわずか10m以内の個体が至近距離ほど高く、離れるほど急激に低くなる。このことから、花粉がどんなに遠くへ飛んだとしても到底有効な受粉ができるとは思えない。

また、空中花粉の多くは確かに軽く、小さく遠くまで飛んでいける形態をしているものの、子孫を残す面から考察すると、小さな花粉は受粉に適していないことが言われている。すなわち、雌しべに付着しにくいことが力学的な解析からわかっている。以上の観点から、案外乾燥形で放出された空中花粉は、わずかの時間で空中の水分を吸収し、膨潤形に近い形態に変化するものと考えてならない。

引用文献

- 1) 佐橋紀男：“空中花粉粒と花粉症のはなし”，粉体工学会誌，**20**, 58-64 (1988)
- 2) 佐橋紀男：“乱流によるスギ花粉雲の発生過程”，花粉誌，**41**, 55-58 (1995)
- 3) 塚田松雄：“花粉は語る”，p. 24，岩波新書 (1974)
- 4) 佐橋紀男：“図説スギ花粉症”，信太隆夫，奥田稔編著，p. 15，金原出版株式会社 (1991)
- 5) Colwell, R. N.: “The use of radioactive isotopes in determining spore distribution patterns”, *Amer. J. Bot.*, **38**, 511-523 (1951)
- 6) 上野実朗：“花粉百話”，p. 146，風間書房 (1982)
- 7) Sahashi, N. and K. Murayama: “Cold air dome and role in pollen transport based on preliminary survey of airborne pollen in upper air”, *JPN. J. Palynol.*, **44**, 125-128 (1998)
- 8) 菅谷愛子：“東京都港区における空中飛散花粉分析”，アレルギー，**22**, 321-325 (1973)
- 9) 上野実朗：“花粉学研究”，p. 47，風間書房 (1978)
- 10) Sahashi, N.: “Pollen morphology of *Ginkgo biloba* and *Cycas revoluta*”, *CAN. J. BOT.*, **64**, 3075-3078 (1986)
- 11) 田中 肇：“花に秘められたなぞを解くために”，p. 118，農村文化社 (1993)
- 12) 田中 肇：“風媒性被子植物の花粉粒径と散布様式”，植物研究雑誌，**75**, 116-122 (2000)
- 13) 幾瀬マサ：“日本植物の花粉”，pp. 35-152，廣川書店 (1956)
- 14) 市倉賢樹，岩波洋造：“花粉の落下速度の研究”，花粉誌，**27**, 5-13 (1981)