農業施設の気密形成に関する研究

1999

奥島里美

①

農業施設の気流形成に関する研究

筑波大学大学院
農学研究科
農林工学専攻

奥島里美

目　次

	頁
目次	i
本論文で用いた記号	iv
第１章　緒言	1
１－１　背景	1
１－２　農業施設の気流に関する研究の現状と問題点	2
１－３　本研究の目的	5
第２章　施設周辺に形成される気流の推定	8
２－１　大型農業施設による周辺気流の形成	8
２－２　風洞模型実験による解析方法	8
２－２－１　対象施設および地域	8
２－２－２　相似条件	11
２－２－３　実験方法	11
２－３　数値シミュレーションの概要	13
２－３－１　基礎方程式および数値解法	13
２－３－２　メッシュ分割	15
２－３－３　境界条件	15
２－４　風洞実験において形成された気流性状の概略	17
２－４－１　気流の可視化	17
２－４－２　平均気流分布	17
２－４－３　乱流エネルギー分布	18
２－５　推定気流の検討	23
２－５－１　平均気流の風洞実験との対応	23
２－５－２　乱流エネルギーの風洞実験との対応	23
２－６　まとめ	27
第３章　強制換気時の気流形成と施設構造	28
３－１　貯蔵施設における気流形成	28
３－２　数値シミュレーションによる解析方法	28
３－２－１　対象とする貯蔵施設	28

３－２－２　実験方法　29
３－２－３　実験条件　32
３－３　気流の可視化　32
３－３－１　気流のベクトル、スカラー表示方法　32
３－３－２　気流のアニメーション化　34
３－４　施設構造と気流形成の関係　36
３－４－１　ダクト長さと気流分布の比較　36
３－４－２　ダクト長さと換気性能の比較　40
３－５　まとめ　46

第４章　温度差換気時の気流の形成と施設構造　47
４－１　鶏舎における気流形成　47
４－２　模型実験の方法　47
４－２－１　相似条件　47
４－２－２　対象とする施設と模型化　48
４－２－３　温度・気流分布および換気量の測定方法　50
４－３　温度差換気における気流の概略的特徴　51
４－３－１　気流分布　51
４－３－２　温度分布　53
４－４　施設構造が気流形成におよぼす影響　55
４－４－１　床構造の影響　55
４－４－２　屋根構造の影響　55
４－４－３　屋根換気窓の形状や開口面積がおよぼす影響　56
４－４－４　高床式における2階床部の開口部がおよぼす影響　58
４－５　まとめ　60

第５章　風力換気時の気流の形成と施設構造　61
５－１　フェンロ型温室における気流形成　61
５－２　模型実験方法　61
５－２－１　対象とする施設と模型化　61
５－２－２　風洞実験概要　61
５－２－３　可視化およびPIV解析方法　63
５－３　施設構造が気流形成におよぼす影響　65

5－3－1　気流の概略的特徴　65
5－3－2　棟高が気流形成におよぼす影響　66
5－3－3　屋根換気窓の開閉条件が気流形成におよぼす影響　69
5－4　まとめ　76

第6章　風力換気と温度差換気が併存する場合の気流の形成と施設構造および群落　77
6－1　多連棟フェンロ型温室に関する気流形成　77
6－2　実験方法　77
6－2－1　対象とするフェンロ型温室　77
6－2－2　測定方法および実験種類　79
6－2－3　風洞における相似条件　79
6－3　群落がない場合の温度分布の特徴　81
6－3－1　空間平均気温　81
6－3－2　気温分布　82
6－4　群落がある場合の温度分布の特徴　86
6－4－1　気温分布　86
6－4－2　草丈の違いが気温分布におよぼす影響　87
6－5　まとめ　89

第7章　結言　91

謝辞　95
参考文献　96

本論文で用いた記号

第2章で用いた記号

U_i：風速の3方向成分

i, x：主流方向

j, y：横方向

k, z：鉛直方向

U, V, W：平均風速のx, y, z方向成分，$m \cdot s^{-1}$

u, v, w：風速変動のx, y, z方向成分，$m \cdot s^{-1}$

U_0：基準高さ20mにおけるアプローチフローの風速，$m \cdot s^{-1}$

（$=8\ m \cdot s^{-1}$）

k：乱流エネルギー，$m^2 \cdot s^{-2}$

k_{before}：建設前の乱流エネルギー，$m^2 \cdot s^{-2}$

ℓ：乱流の代表長さケース，m

ε：kの粘性消散率，$m^2 \cdot s^{-2}$

ν：粘性，$m^2 \cdot s^{-1}$

ν_t：渦粘性，$m^2 \cdot s^{-1}$

κ：カルマン定数，(= 0.4)

P：静圧/ρ +2/3k，$N \cdot m^{-2}$

ρ：密度，$kg \cdot m^{-3}$

t：時間，s

添字　n：境界での鉛直成分

　　t：境界での平行成分

第３章で用いた記号

H：貯蔵施設の高さ，m (=5 m)

h：壁面から第一セルの差分定義点までの距離，m

k：乱流エネルギー，$m^2 \cdot s^{-2}$

k_{out}：吹出乱流エネルギー，$m^2 \cdot s^{-2}$

L：貯蔵施設の奥行き，m (=15 m)

m：Utがベキ乗分布するとみなした時のベキ指数 (= 1/7)

P：圧力，$N \cdot m^{-2}$

U_{in}：吸込風速，$m \cdot s^{-1}$

U_i：平均速度，$m \cdot s^{-1}$

U_{out}：吹出風速，$m \cdot s^{-1}$

ε：乱流散逸率，$m^2 \cdot s^{-2}$

κ：カルマン定数 (=0.4)

ν_t：渦動粘性係数，$m^2 \cdot s^{-1}$

ℓ：乱れの長さスケール，m

ℓ_{out}：吹出口における乱れの長さスケール，m (=0.05 m)

添字t, n：吹き出し、吸い込み面に対する接線方向、法線方向成分

第４章で用いた記号

Ar：アルキメデス数，無次元

U_0：代表速度，$m \cdot s^{-1}$

N_θ：気温差の実物に対する模型の縮率，無次元

N_L：幾何学形状の実物に対する模型の縮率，無次元

N_V：風速の実物に対する模型の縮率，無次元

N_Q：発熱量の実物に対する模型の縮率，無次元

W：鶏舎開口，m

w_m：モニター幅，m

h_m：モニター高さ，m

第6章で用いた記号

α：天窓の開度，°

LAI：葉面積指数，無次元

Ar：アルキメデス数，無次元

Gr：グラスホフ数，無次元

Re：レイノルズ数，無次元

U_0：代表速度，$m \cdot s^{-1}$

L_0：代表長さ，m

$\triangle \theta_0$：代表温度差，K

V：外風速，$m \cdot s^{-1}$

ν：運動粘性，$m^2 \cdot s^{-1}$

g：重力，$m \cdot s^{-2}$

β：熱膨張係数，K^{-1}

N_θ：気温差の実物に対する模型の縮率，無次元

N_L：幾何学形状の実物に対する模型の縮率，無次元

N_V：風速の実物に対する模型の縮率，無次元

N_Q：発熱量の実物に対する模型の縮率，無次元

$N_{\alpha C}$：対流熱伝達の実物に対する模型の縮率，無次元

T_o：外気温，°C

T_s：ヒーティングシートの温度，°C

T：気温，°C

X：温室幅方向の距離，m

Z：温室床面からの高さ，m

第１章　緒言

１－１　背景

園芸施設、畜産施設あるいは貯蔵施設など農業生産に関わる施設は建物を伴い、機械、設備を備えて、建物内の空間に野外とは異なる環境を作り出して "controlled environment agriculture" を実現する。最小のコスト・エネルギー投入で最も農業生産に適した施設内環境を引き出すことが要求される。

近年、高品質で多品目、しかも、季節にとらわれない食料の供給に対する社会的ニーズが高まる中で、生産形態は多様化し、生産や供給は周年化し、生産地は大消費地から一層遠距離化している。

例えば、園芸施設では、規模拡大のため大型温室を建設する例が増え、大型施設での周年生産のため、夏期の昇温抑制が課題となっている。そのため、近年、軒高を高くした大型温室を建設する例が増えている。屋根形状もフェンロ型をはじめとして、新しい構造の屋根形状を持つ温室も多い。これらの大型温室では、夏期の昇温が従来の温室に比べて低いなどの利点が報告されているが、軒高を従来の温室よりも高くしたにもかかわらず、夏期の高温障害が発生した例もあるなど、これら大型温室の内部環境について未解明な部分も存在する。特に、実際の大型温室は 1ha 以上の多連棟として建設されることが多く、内部の不均一性、特に温度むらが大きな問題になっている。

流通分野でも、夏期には端境期の供給を目的として、東北や北海道などで　野菜の生産が進むのに伴って、貯蔵・予冷施設の大型化が進んでいる。しかし、大型化は環境の不均一によって品質をそこなう場合が少なくない。また、貯蔵施設の吸・排気形態は、天井ダクトから送風し側壁下方から冷気を吸引する方式、天井に多孔板を張り天井全体から冷気を吹出させる二重天井方式、側壁から送風し反対側壁から吸引する方式など、多様である（農業施設学会，1990）。換言すれば、内部の環境設計については試行錯誤の段階ともいえる。さらに、貯蔵施設では温湿度の均一な保持と、呼吸熱やエチレンガスなどの有害物質の速やかな除去が同時に要求される。

すなわち、農産物の品質を保持しつつ、大規模かつ長期の貯蔵・予冷・輸送を達成するためには、最適環境を時間的かつ空間的に均一に維持するための環境制御技術が不可欠となっている。

また、畜産施設の場合も側壁部や屋根部を開放し自然換気によって環境調節を行う開放型が多く見られる。例えば、鶏舎の場合、近年、生産規模の拡大から大型化する傾向があり、大型開放鶏舎の多くは高床式を採用している。高床式鶏舎では、鶏糞搬出作業について省力化されると同時に、床下からの気流の吹き上げ効果により換気が円滑に行われると経験的に言われている。さらに鶏舎の大型化に伴って、連棟化も進んでいる。大型化による暑熱環境の悪化を改善するため、モニターを有するタイプやのこぎり屋根など、いくつかの屋根形態も提案され、大型化、多様化が畜舎でも進んでいる。

さらに、農業施設の大型化、新構造の出現は、その周辺の農地の風環境も大きく変化させると予想される。本来は、施設の形状や配置を設計する段階で風環境の変化を予測し、農作物に対する風害等が発生しないような措置をとることが望ましい。しかし、実際には施設の建設後、農作物の被害が出てはじめて防風林等の措置がとられることのほうが多い。

以上、農業施設の大型化、新構造の出現に対して、内外空気環境の工学的検討が追いついていない部分がある。

１－２　農業施設の気流に関する研究の現状と問題点

施設の空気環境については、これまで、模型実験を主として、優れた多くの研究蓄積がなされてきた。たとえば、施設の換気性能について換気回数や通風率など、施設を代表するパラメータをひとつあるいは複数用いた解析方法が提案され、農業施設の換気設計に大きく貢献してきた。しかし、近年の大型化や新構造の出現に対応するためには、施設に形成される流れの空間的分布を把握し、環境工学の観点からそれを施設の設計・制御へ発展させることが望まれている。そのために、限定された一部の施設については気流の把握が行われてきたが、近年新たな構造の農業施設も出現してきており、多様な構造に対応した気流の把握や設計への展開が十分になされて

いるとは言い難い状況である。

例えば、農業施設周辺の気流について、農業分野における防風林等の風害対策について設計指針もまとめられている（日本農業土木総合研究所，1987）が、既存の農地における防風対策が主であり、施設の建設に伴う風環境の変化については言及されていない。現在、風環境の変化を事前に把握するためには、机上予測や風洞実験等が行われる。このうち、もっとも簡便である机上予測では、風環境の変化の影響範囲や強さがどの程度のおよぶかを調査した例は限られているため、個々のケースについて風環境の変化を十分に把握することは困難である。一方、風洞実験は現在のとところもっとも信頼性が高い予測法と考えられており、建築分野では大型団地や高層ビルの建設に当たっては、事前に風洞実験を行い、風環境の変化を検討し、強風対策を施すことが以前から一般的になっている（住宅・都市整備公団建築部建築技術開発室，1981，1982）。ただし、風洞実験は大規模な風洞施設、費用と時間、および労力を要し、手軽に利用することは困難であるため、風洞実験に代わる実験方法として、数値計算手法の開発がなされて（Kulter，1985；村上，1985）、現在では数値計算のパッケージソフトもいくつか市販されるようになってきている。しかし、大型の農業施設について、予測の妥当性を確認した事例は多くない。

施設内の気流形成や換気特性に関しても、時間的変化や空間分布を既存施設の実測によって解析することは、困難が多い。

比較的外部気象条件の影響を受けにくい強制換気方式の貯蔵施設でも、環境の時間的変化や空間分布を既存施設の実測によって解析することは、施設が大型になるほど困難が多い。また、空調設備、吸・排気系、農産物の配置などの条件を種々に変化させてそれらの影響を実測することも困難である。そのため、空調設備の形態、吸・排気系の形態、農産物の配置や量などと関連づけて環境工学の観点から体系的に扱った研究は少なく、環境の不均一が発生したり、施設の空調設計が経験によるところが少なくないのもこのような理由による。一方、建築における空調設計などの分野においてはComputational Fluid Dynamics (CFD) を用いた気流環境の予測の妥当性について、乱流モデルの検討を主体とした精力的な研究がなされ、近年著しい進展を遂げている。特に室内気流に関して1980年代

から半導体産業に不可欠のクリーンルームの需要が増加し、それに対応して、クリーンルームの気流性状に関する一連の研究が行なわれてきた。それらの検討結果から、室内（閉空間）の気流分布の再現性に関して平均場に限定すれば、２方程式型の乱流モデルでも実用的に許容し得る精度の予測が可能であることが示されている（村上ら, 1988～1992； 山口ら, 1985；大西ら, 1985）。なお、貯蔵施設のような農業施設内の流れ場は非常に複雑になることが知られている。例えば、もっとも単純な形状の一つであるslot-ventilated enclosure structure でさえ噴流、衝突、剥離、再付着等の流れを含む（例えば、Choi et al., 1988；Hoff et al., 1992）。これら複雑な３次元流れ場をいくつかの２次元断面の表示からだけで検討することは難しい。また、数値計算における数値データは膨大な数となる。Computer Graphics (CG)は農業施設の複雑な流れ場を理解する上でも、また、換気効果を最適にするような環境設計を行う上でも不可欠となってきている。

畜舎の換気についてはこれまで多くの研究がある。例えば、各種の平床式開放型鶏舎について換気量、通気輪道、気温などを現場実測し、鶏舎構造と関連づけて換気性能の比較・検討を行っている貴重な研究がある（太田養鶏・養魚研究室, 1979）。しかし、これらの研究は対象鶏舎や測定条件の範囲が限られており、新構造における換気性状の把握例は少ない。模型実験では、開放型畜舎の棟開口と換気特性の関係について、有風時（Egan and Hellickson, 1978）と無風時（Timmons and Baughman, 1981）の研究があり、理論的にも考察例（Bruce, 1982）がある。また、自然換気の牛舎において現場実測と模型実験を行い、無風時には側壁が十分開放されていれば換気量はモニターの形状や大きさにあまり影響されないことを明らかにしている（鮫島・岡田, 1985）。しかし、模型畜舎内部の温度分布や気流分布といった詳細な換気性状を調べた例は、強制換気については多いものの（Wilson and Bishop, 1974；Boon, 1978；池口ら, 1986）、自然換気では少ない。

作物生産の収益性を上げるため、温室の需要は増加している。特に、低コスト化をねらって床面積が1haを越えるような大型の温室も建設されている。これらの大型温室では、温度差換気、風力換気ともに自然換気効率が悪くなりやすく、内部環境も不均一になりやす

い傾向がある。これらの問題を解決するために、軒の高い温室が導入された。しかしながら、軒の高い温室でも夏期の高温による生育障害が発生した事例も報告されており、大型温室内の温度、湿度分布や気流分布を最適で均一にする方法は、日本のような温暖地域では報告事例も少なく、まだ十分に検討されていない。

園芸施設の自然換気に関しては、その物理的プロセスの複雑さと実際の栽培現場での重要性のため、長年にわたり研究されてきた。また、近年は世界的にも、自然換気方式への関心が高まり、実測や物理モデル（Kittas et al., 1997；Boulard and Baille, 1995；Boulard and Draoui, 1995；Miguel et al., 1998)、あるいはニューラルネットワーキングモデル(Segine et al., 1994；Boulard et al., 1997）等、様々な手法を用いた研究が行われるようになり、いくつかの換気設計法が提案されている(例えば、Kozai and Sase, 1978)。しかし、そこでのパラメータは代表風速、内外気温差、開口面積比等、全体の代表値であり、温室内部の分布性までを検討した例は多くなかった。最近になってようやく、温室内部の気流速や温度の空間分布について注目が高まり、いくつか報告がなされてきている(Sase et al., 1984; Boulard et al., 1996, 1998)。たとえば、Boulard et al.は単棟の棟方向に連続する換気窓をもつ温室について模型実験を行い、気流分布と温度分布を明らかにしている。また、ＣＦＤによる数値シミュレーションにより、温室内の気流分布や温度分布を予測した例もある（Okushima et al., 1989；Mistriotis et al., 1997a, 1997b）。また、屋根開放型の２種類の多連棟温室について気流や温度分布を数値シミュレーションにより予測したものもある（Lee et al., 1999）。しかし、数値シミュレーションの精度の検証に必要な、入力境界条件の確定した測定データは少ない。境界条件を一定にした風洞模型実験は、数値シミュレーションの精度の検証用も含めて、今後、施設の設計、制御に有用なデータを提供するものと思われる。

１－３　本研究の目的

前節で述べたように、農業施設は園芸施設、畜産施設あるいは貯

蔵施設など多様な建物構造と各施設に特有の機械、設備を備えている。さらに、動物・植物等、生産対象物も様々である。特に、近年、高品質で多品目、しかも、季節にとらわれない食料の供給に対する社会的ニーズが高まる中で、生産形態は多様化し、生産や供給は周年化し、生産地は大消費地から一層遠距離化していることから、多くの農業施設は大型化・多様化する方向にある。しかし、各種農業施設内外の気流形成機構はすべて空気力学に基づくものであり、境界条件だけが多様性を有すると解釈できる。

本研究では、これら大型化・多様化した施設を対象として、気流形成に共通する部分と境界条件により影響される気流形成の多様性について、模型実験や数値シミュレーションを用いて明らかにする。

第2章では、大型農業施設の建設に伴う周辺風環境の変化について風洞実験により検討する。また、風洞実験とほぼ同一の条件を適用した数値シミュレーションを行い、施設外の風環境の変化について比較検討する。

第3章では、第2章において検証した、数値シミュレーション手法を応用して強制換気方式の貯蔵施設を対象に、吸・排気形態が施設内気流の形成におよぼす影響を検討する。また、CGによる流れの可視化手法を導入して、気流形成から施設の換気特性を明確にする。

第4章以降では、施設の内外の気流分布が相互に影響し合う自然換気方式の大型施設について、気流形成とそれに伴って生じる換気性状に関して検討する。自然換気では、温度差に伴って生じる浮力を駆動力とする温度差換気と風圧の差によって生じる風力換気に分けられるが、第4章では、この自然換気方式の内、温度差換気だけで生じる気流形成、および温度場形成について、模型実験を用いて検討する。

第5章では、自然換気方式の内、風力換気だけで生じる気流形成、および温度場形成について、風洞模型実験を用いて検討する。具体的には、大型園芸施設を対象として、その構造と風力換気時の気流形成について、以下のような点について特に明確にする。

1）軒高の違いが温室内部気流分布へ与える影響
2）天窓の開閉条件による気流の流入・流出状況の把握

第6章では、第4章で得られた温度差換気の知見と第5章で得られた風力換気の知見とを総合して、温度差換気および風力換気がともに併存する場合の気流形成、および温度場形成について、風洞模型実験により検討する。最後に、施設構造と同様に気流形成に大きな影響をおよぼすと思われる施設内の動・植物の影響を検討するため、本章では温室を想定し、植生条件と気流形成、および温度場形成の関係を調べる。

第２章　施設周辺に形成される気流の推定

２－１　大型農業施設による周辺気流の形成

本章では、まず風洞実験により、大型農業施設の一つである揚水場が周辺農地（ハス田）の風環境へおよぼす影響を検討した。ビル風等、建築分野では人間の風による被害を基準とした評価法が確立されているが、農作物については、限界風速等、風害の発生に関与する条件について定量的に明確にされたものは非常に少ない。そこで特に、風環境の変化と農作物（ハス）の風害の関係について検討した。次に、差分法による乱流の数値計算手法を風洞実験とほぼ同一の条件に適用し、数値計算結果がどの程度風洞実験を再現しているかを確認した。

２－２　風洞模型実験による解析方法

２－２－１　対象施設および地域

大型農業施設が周辺農地の風環境に与える影響を把握するため、本実験ではＫ揚水機場を事例とした風洞実験を行った。潅漑用水の確保のため湖岸に建設されたＫ揚水機場の敷地内には、吸水槽、ポンプ棟、二つの操作棟（ここではA操作棟、B操作棟と呼ぶ。）、鉄塔、変電施設、および道路がある。図2.2.1にその配置を示す。揚水機場敷地周囲は農地（ハス田）である。ハスは5～6月上旬にかけて植え付けられる。揚水機場建設後、図2.2.2-(1)に示す7月11日から18日にかけて風害が発生した。この時の風向は南であり、被害領域は図2.2.1に示す揚水機場敷地の北側に限られていた。なお、ハスの生育期間（5～10月）における取水湖の湖心での月最大風速発生時の風配図を図2.2.2-(2)に示す。

風洞は農業工学研究所の大型風洞（奈良，1983）を使用した。

図２．２．１　対象施設および地域の配置平面図
（■は風洞実験での風速測定点）

（１）日平均風速の推移

（２）風配図

図２．２．２　風害発生時の状況

2－2－2　相似条件

複雑な境界層上の乱流場における中立状態での基本的な相似条件は乱流レイノルズ数の一致である（片山ら，1980）。

$$\frac{\hat{U}_R \cdot L_R}{\nu_{tR}} = \frac{\hat{U}_M \cdot L_M}{\nu_{tM}} \qquad (2.1)$$

$\hat{U}$，Lは乱流運動を特徴づける代表風速、代表長さであり、添字のM，Rはそれぞれ模型と実物を表す。

乱流拡散係数ν_tは代表風速と代表長さの積に比例すると考えられる（Tennkes and Lumley，1985）。

$$\nu_t \propto \hat{U} \cdot L \qquad (2.2)$$

上式が成立すると仮定すれば、模型と実物の幾何学的形状が相似であれば相似条件は満足されることとなる。そこで、幾何学的に相似な1/100模型を製作した。なお、厳密には乱れの強さや乱れのスケールに関しても相似条件を満足する必要がある（村上・小峯，　1980）が、ここでは風洞実験での揚水機場建設前後の相対的な乱れの増減を比較するにとどめ乱れに関する相似条件については特に考慮していない。

2－2－3　実験方法

揚水機場のほか、周辺農地（ハス田）の畦畔、住宅についても模型化し、風洞内に設置した。本来は農地の作物体も模型化すべきであるが、作物体について正確な模型化方法は確立されていない。また、本実験では揚水機場が農地の風環境へ与える影響のみを対象とし、作物体の影響は揚水機場に比べ小さいと考え、作物体の模型化は行わなかった。そこで、地表面粗度の一致に関しては、砂を混入した塗料で風洞内床面を塗装するにとどめた。この場合の粗度長は約3cm（実物換算）で、農作地帯での粗度長にほぼ対応していると考えられる（Counihan，1971）。

また、風洞実験での模型化領域は、建物高さの2～3倍以上の半径領域とすることが多い（Jones and Wilson，1968）ので、ポンプ棟

高さの2～3倍で、かつハス田を含む範囲として、ポンプ棟を中心とした南北に約300m、東西に約400mの領域を模型化した。

風害発生時の風向および図2.2.2-(2)において最も出現頻度の高い風向について風洞実験を行った。すなわち、南風の場合とポンプ棟に湖からの風が直交する方向から当たる南南西の風場合の2風向である。

上述の通り、幾何学形状が一致していれば、風速の値に関係なく相似則が成立すると仮定できる。ここでは風洞内基準風速は$8m \cdot s^{-1}$に設定して測定を行った。アプローチフローの平均風速Uおよび乱流エネルギkの鉛直プロフィルを図2.2.3に示す。平均風速の鉛直プロフィルはほぼ$U \propto z^{0.17}$であり、波立った水面上等の鉛直プロフィルに対応している（Darvenport, 1965）。

揚水機場建設前の旧地形について気流計測を行い、その後、旧地形の一部を揚水機場模型に置き換えて、建設後の気流計測を行った。測定点を図2.2.1に示す。測定高度は実物換算で、地表面より1、4、8、18mの4高度とした。

まず全体的な流れの状態を把握するため、四塩化チタンを含ませた脱脂綿を模型上の適所に配置して気流を可視化し、煙の状態をビデオカメラにより収録した。

次に、熱線風速計（日本カノマックス製、4ch）を使用し、風速の主流（x）方向成分、水平（y）方向成分、垂直（z）方向成分を計測した。具体的には、各測定点につき、各方向成分毎に1024個の風速を計測し、それらからそれぞれの平均値（U, V, W）と変動量(u, v, w）を求めた。

風の変動周期と作物体の固有振動周期が一致した時、作物体の振動が強まると考えられる。そこで、ビデオ撮影により、実際のハス体の固有振動周期を調べた結果、固有振動周期は1s前後であった。模型と実物の時間スケール比は次式で表される。

$$\frac{T_M}{T_R} = \frac{L_M/\hat{U}_M}{L_R/\hat{U}_R} = \frac{1}{100} \qquad (2.3)$$

風洞内風速と実際の風速がほぼ対応しているものと仮定すれば、模型と実物の時間スケール比は1/100となる。よって、サンプリング時間間隔は10msとした。

図２．２．３　風洞内アプローチフローの平均風速および乱流エネルギープロフィル（U_0=8 m・s^{-1}）

２－３　数値シミュレーションの概要

２－３－１　基礎方程式および数値解法

数値計算を行う場合、大気境界層は乱流であるため乱流モデルの導入が不可欠である。乱流モデルには表2.3.1に示す標準的なk-ε型モデルを適用した。このモデルはkとεの輸送方程式から乱流を特徴

づける物理量であるところのν_tを見積もるモデルであり、断面が急変する管内流や噴流、平板境界層等、様々な流れをほぼ正しく予測することが確認されている（Launder and Spalding, 1974）。このモデルは、風上側で壁近傍のkの生産を過大に評価する(村上ら, 1988)等、いくつかの欠点はあるものの、計算機の記憶容量、計算時間の点から、これまで実用的計算方法として広く用いられてきている(日本機械学会, 1988）。

計算は差分法により、MAC法を用いて行った。MAC法では連続の条件を満足するために、圧力と速度を独立に求めるというテクニックが導入されており（Hirt et al., 1975）、計算上の省力化が可能である。

表２．３．１　使用した乱流モデル

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\nu_t)\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2.5}$$

$$\nu_t = C_D\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \nu_t\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - \varepsilon \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\nu_t\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2.8}$$

ここで、$C_D = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

2－3－2　メッシュ分割

計算領域は実物換算でポンプ棟高さのそれぞれ17.8倍（x方向）×14.4倍（y方向）×2.5倍（z方向）の3次元空間である。計算メッシュを図2.3.1に示す。模型形状はメッシュの矩形形状に合わせて単純化した。また、鉄塔、変電施設、住宅などは遮閉面積が小さいことから、模型化しなかった。

計算はすべてポンプ棟高さとその高さにおける風速で無次元化した値を用いて行った。

風向は風洞実験と同様、南風の場合と南南西の風の場合の2風向である。

図２．３．１　水平面におけるメッシュ分割
（26(x)×23(y)×17(z)=10,166セル）

2－3－3　境界条件

設定した境界条件を表2.3.2に示す。上流面では風速とkは風洞実験値を与える。また、流出面、側面、上空面では自由流出とし、kおよびεはすべり条件（free slip）とする（村上ら，1986）。地上面、壁面の風速分布はそれぞれ1/7、1/4乗の指数分布（坂本ら，1980）に従うものとし、kはいずれもすべり条件（free slip）とする。流出

面、側面、上空面以外のεについては壁法則を適用する。すなわち、完全乱流層において、k、ε、ν_tはKolmogorov-Prandtlの仮定より、次のように表せる（谷, 1978）。

$$k = \text{const.} \tag{2.9}$$

$$\varepsilon = C_D \cdot k^{3/2} / \ell \tag{2.10}$$

$$\nu_t = C_D \cdot k^2 / \varepsilon \tag{2.11}$$

壁近傍で（粘性底層外）では次のように表すことができる（Rodi, 1980）。

$$\ell = C_D^{1/4} \cdot \kappa \cdot y \tag{2.12}$$

ここで、yは壁からの距離で、

$$y = h/2 \tag{2.13}$$

ここで、hは壁面あるいは地上面に接するメッシュにおける幅、であるから、壁面あるいは地上面に接するメッシュにおけるεは次式から求めることができる。

$$\varepsilon = 2 \cdot C_D^{3/4} \cdot k^{2/3} \cdot \kappa \cdot h \tag{2.14}$$

表２．３．２　境界条件

流入面	U, k : 実験値（図 2.2.3参照） V, W = 0 $\nu_t = k^{1/2} \cdot \ell$, $\ell = \kappa \cdot z$
流出面、側面、および上空面	$P = 0_{境界外}$ U_t, k, ε : すべり条件(free slip)
地上面	$U_t \propto z^{1/7}$, $U_n = 0$ k : すべり条件(free slip) $\varepsilon(h) = 2 \cdot C_D^{3/4} \cdot k^{2/3} / \kappa h$
壁面	$U_t \propto z^{1/4}$, $U_n = 0$ k : すべり条件(free slip) $\varepsilon(h) = 2 \cdot C_D^{3/4} \cdot k^{2/3} / \kappa h$

hは境界面に接したメッシュの幅

2－4　風洞実験において形成された気流性状の概略

2－4－1　気流の可視化

最初に揚水機場がない場合について検討した。南風、南南西の風、いずれも場合も揚水機場建設前の旧地形はほぼ平坦であるため、気流はそのまま農地を吹き抜けることとなり、風向、風速ともほぼ一定であった。

揚水機場建設後の南風の場合の、流れの様子を煙により可視化し、スケッチしたものを図2.4.1-(1)に示す。気流はポンプ棟、およびA、B操作棟によって遮られながら、下流に流れる。図には示していないが、一部はポンプ棟屋上に沿って流れ、ポンプ棟下流域のポンプ棟高さの3倍付近で再付着した。再付着点までの領域では渦を生じ、非常に乱れた気流となっている。また、ポンプ棟西側においても強い渦の形成が見られた。さらに、ポンプ棟の風上側に接する吸水槽上に気流の通り道ができ、吸水槽上のA、B操作棟寄りに渦が観察された。

南南西の風の場合の揚水機上建設後の流れの様子を図2.4.1-(2)に示す。気流はポンプ棟に直交する方向から当たることとなり、A、B操作棟およびポンプ棟によって遮られ、ポンプ棟東西の両短辺の側壁に沿って下流に流れる。図には示していないが、ポンプ棟屋上より生じた剥離流は下流域のポンプ棟高さの3倍で再付着した。また、吸水槽上に渦が形成されているのが観察された。

2－4－2　平均気流分布

平均風速の指標として平均風速の3方向成分の和の絶対値($\sqrt{U^2+V^2+W^2}$)を用いた。農作物に直接影響すると考えられる実物換算高さ1mにおける、基準風速が$8m \cdot s^{-1}$の時の揚水機場建設後の平均風速の水平分布を図2.4.2-(1), (2)に示す。

南風の場合（図2.4.2-(1)）、旧地形ではいずれの領域でも$4m \cdot s^{-1}$前後の風速があったのに対して、揚水機場建設後は揚水機場の風下側となるポンプ棟の北側の農地で、風速は$2m \cdot s^{-1}$まで低下する。そ

して、その領域より西側および東側の領域では逆に風速が増加している。これら風速の増加領域は建設物による縮流効果によって形成されたものと考えられる。ただし、6m・s^{-1}以上となる領域はポンプ棟の東側の揚水機場敷地内に含まれ、農地での風速の増加は最大でも6m・s^{-1}程度である。

南南西風の場合（図2.4.2-(2)）も、ポンプ棟のすぐ下流側の農地で風速は2m/s以下と旧地形の時よりも低下している。4m・s^{-1}以下に風速が低下する領域は南風の場合よりもやや広い。これは、建設物の風に対する遮閉面積が南風の場合に比べて大きいためと考えられる。また、揚水機場の西側と東側では逆に風速が強まる領域が見られる。特に、ポンプ棟の東側では揚水機場の敷地近辺の農地においても6m・s^{-1}以上の風速となる領域が現われる。

2－4－3　乱流エネルギー分布

風の乱れの指標として、ここでは乱流エネルギーkを用いた。図2.4.3-(1), (2)に揚水機場建設後の実物換算高さ1mにおける乱流エネルギーの水平分布を示す。図中の数値は揚水機場建設前の旧地形の乱流エネルギーに対する比（以下、乱流エネルギー比という）である。

建設前の地形では、基準風速が8m・s^{-1}の時の乱流エネルギーはどこでも約0.2m^2・s^{-2}であったが、建設後はポンプ棟の風下側農地で乱流エネルギーの高い領域が見られるようになった。その領域では南南西の風の場合、建設前の4倍程度となる領域が若干あるものの、それ例外では南風と南南西の風とで大きな違いは見られず、いずれも建設前の2～3倍となった。

市街地においては人間への風害が評価基準となっており、一般に平均風速が5m・s^{-1}以上では風環境として不適であり（Penwarden, 1973）、平均風速30m・s^{-1}以上では屋根瓦の飛散などの強風による被害が生じるといわれている（岡田，　1988）。また、水稲では水田を吹く風自体が稲体と共振しやすい変動周期をもっており、風の強いところでの共振現象が風害に大きく関与する。たとえば、風速が18m・s^{-1}で、ほぼ90%の稲が座屈することが報告されている（氷高，

1968）。また、吹走時間が長いほど被害が増大する（坪井，1961）。

ハスの場合、図 2.2.1に示した南風の場合の風害発生領域を見る限り、風洞実験で平均風速の増加した領域よりもむしろ、乱流エネルギーが増加した領域（本風洞実験値で乱流エネルギー比が2.0以上）と対応している。風害は生育ステージ、耕土条件、限界風速や風の種類など、いくつかの要素が複雑に関連し合って発生することから、その条件に関してきわめて相対的なものならざるをえないが、風の条件のみを対象とした場合、平均風速よりも乱れのほうがハスの風害発生に大きく関与しているものと考えられる。ハスはその形態的特徴からも風の乱れによる振動・動揺に弱いものと考えられる。

この結果から、南南西の強風が吹いた場合には、図2.4.3の風洞実験結果において乱流エネルギー比が2.0以上になる、揚水機場風下側の領域で風害が発生することが予想される。

ハスに関しては、強風防止よりも気流の乱れを防ぐことのほうが重要であることから、設計段階で風害の防止を考えるならば、乱れが大きくなる領域を敷地内に含むように、風向を考慮した施設の配置を工夫したり、あるいは風がスムーズに流れるような形状の建設物を設計するなどの対策が考えられよう。

なお、揚水機場敷地内を見ると、南風の場合、吸水槽上の乱流エネルギー比は1.0程度であるが、南南西の風の場合には、2.0の領域が見られる。また、南南西の風の場合にはポンプ棟東側に乱流エネルギーの高い領域が見られるが、南風の場合には見られない。この違いは、南風の場合のほうが南南西の風の場合に比べて、建設物による気流の遮閉面積が小さく、よりスムーズに気流が流れるためと考えられる。

これらの乱流エネルギーの高い領域は、四塩化チタンによる可視化において風向、風速ともに激しく変動している領域として観察された。

（１）　風向Sの場合

（２）　風向SSWの場合

図２．４．１　煙の可視化による気流パターンのスケッチ
（実物換算高さz=1mにおける水平面）

（１）　風向Ｓの場合

（２）　風向ＳＳＷの場合

図２．４．２ 風洞実験における平均風速（$(U^2+V^2+W^2)^{1/2}$, $m \cdot s^{-1}$）の分布（実物換算高さz=1mにおける水平面）

（１）　風向Ｓの場合

（２）　風向ＳＳＷの場合

図２．４．３　風洞実験における乱流エネルギーの分布
（数値は建設前との比、実物換算高さz=1mにおける水平面）

2－5　推定気流の検討

2－5－1　平均気流の風洞実験との対応

数値計算における実物換算高さ1mでの基準風速3m・s^{-1}の時の平均風速の絶対値の分布を図2.5.1に示す。

南風、南南西の風、いずれの場合も計算（図2.5.1)と風洞実験(図2.4.2）の平均風速の分布は比較的良く一致している。

ただし、南風の場合、ポンプ棟の東側に見られる5m・s^{-1}の風速増加領域は、風洞実験の方が計算値よりもやや広い。一方、ポンプ棟の西側の風速増加領域を見ると、計算では5m・s^{-1}程度の領域が広く分布するのに対し、風洞実験では6m・s^{-1}の領域が存在する。

南南西の風の場合は、ポンプ棟下流側農地における3m・s^{-1}以下の領域は風洞実験の方がわずかに小さめである。また、ポンプ棟の東側の6m・s^{-1}以上の強風領域は計算結果の方が風洞実験より狭い。

2－5－2　乱流エネルギーの風洞実験との対応

数値計算における実物換算高さ1mでの旧地形に対する乱流エネルギー比の分布を図2.5.2に示す。

計算（図2.5.2）と風洞実験（図2.4.3）の乱流エネルギーは、いずれもポンプ棟の風下側の農地で高い値を示す分布となっている。特に、ポンプ棟風下側農地では、風洞実験で2.0の等値線と数値計算で3.0の等値線とがほぼ対応した分布となっている。このため、ポンプ棟風下側農地に関しては本数値計算法で乱流エネルギー比が3.0以上となる領域を風害発生危険領域と仮定しておおまかな予想が行えるものと期待される。

ただし、揚水機場敷地内といった建設物近辺では風洞実験を再現しておらず、分布傾向も異なる。すなわち、南風の場合、風洞実験（図2.4.3）ではポンプ棟付近の乱流エネルギー比は1.0程度であるが、計算（図2.5.2）では最大で約5.0となる領域がある。また、計算では吸水槽上のB操作棟近辺においても5.0以上の領域が存在するが、風洞実験ではそのような領域は見られない。また、計算では、

吸水槽上のB操作棟近辺においても5.0以上の領域が存在するが、風洞実験ではそのような領域は見られない。南南西の風の場合、計算（図2.5.2）では、B操作棟近辺とポンプ棟の西側でそれぞれ3.0、4.0といった領域が存在するが、風洞実験（図2.4.3）ではポンプ棟の東側に乱流エネルギー比が3.0の領域が存在する。

これら不一致の原因は、風洞実験、数値計算、それぞれの制約に起因すると考えられる。すなわち、風洞実験においては、建設物近傍などの低風速域での測定精度の低下が考えられる。数値計算では、建設物近傍の風速の急激な変化を正確にとらえきれていないことなどが考えられる。これらに関しては、境界条件や乱流モデルの改善も含めて、今後の課題である。

以上より、揚水機場周辺の平均風速の分布については、本数値計算により、風洞実験をおおよそ再現できることが明らかになった。また、乱流エネルギー比の値自体について風洞実験値を再現することはできなかったが、建設物の近辺を除く風下側の農地での乱れの分布に関しては風洞実験との類似傾向が認められた。施設の設計に当たっては、数値計算によって農地での風害発生を最小とするような大まかな設計条件の選択を行った上で風洞実験を行うなど、実験の省力化が期待される。

（１）　風向Ｓの場合

（２）　風向ＳＳＷの場合

図２．５．１ 数値計算における平均風速（$(U^2+V^2+W^2)^{1/2}$, $m \cdot s^{-1}$）の分布（実物換算高さz=1mにおける水平面）

（１）　風向Ｓの場合

（２）　風向ＳＳＷの場合

図２．５．２　数値計算における乱流エネルギーの分布
（数値は建設前との比、実物換算高さz=1mにおける水平面）

2－6　まとめ

本章では、風洞実験により施設が周辺農地の風環境におよぼす影響を検討した。さらに、数値計算による風洞実験の再現性の可能性について検討した。結果を以下に要約する。

（1）　建設物による縮流効果などのため、揚水機場の建設に伴い、気流パターンが大きく変化することが風洞実験において観察された。その結果、周辺農地においても平均風速および乱れが強まるところと弱まるところが現われた。

（2）　実物換算高さ1mでの基準風速8m/sの時の平均風速は、揚水機場がない場合、約4m・s^{-1}であった。揚水機場建設後は、南風の場合、揚水機場の風下側の農地における風速は2m・s^{-1}まで低下した。また、ポンプ棟の東西両側では5～6m・s^{-1}の強風域が発生した。南南西の風の場合は南風の場合とほぼ同様の傾向が、気流がポンプ棟に直交する方向から当たる形で現われた。

（3）　風向、風速共激しく変動している乱流エネルギーの高い部分は、可視化により観察された渦の部分とほぼ対応していた。すなわち、南風、南南西の風、いずれの場合にもポンプ棟の風下側に乱れの強い領域が見られた。ただし、南南西の風の場合には、南風の場合に比べて建設物による気流の遮閉面積が大きく、ポンプ棟の東側にも乱流エネルギー量の増加領域がみられた。また、吸水槽上での乱流エネルギー量も南南西の風の場合の方が大きい。

（4）　ポンプ棟風下側の農地では乱流エネルギー量が旧地形の2～3倍に増加した。その領域は、ハスの風害発生領域と対応している。このことから、ハスの風害には、平均風速よりも風の乱れが大きく関与していることが本風洞実験からほぼ明確に示された。

（5）　標準的なk-ε型モデルを用いて揚水機場周辺気流の数値計算を行った結果、平均風速の分布は全体として風洞実験結果と比較的良く一致し、数値計算による風洞実験の再現の可能性が示唆された。

（6）　標準的なk-ε型モデルを用いた数値計算では、乱れの値自体について風洞実験を再現することはできなかったが、建設物の近辺を除く揚水機場風下側の農地での乱流エネルギーの分布は風洞実験との類似傾向が認められた。

第３章　強制換気時の気流形成と施設構造

３－１　貯蔵施設における気流形成

貯蔵施設では、温度、湿度、ガス環境などが場所的に均一に保たれ変動が少ないことが農産物の品質保持に不可欠である。そのため、例えば予冷方式では、強制通風方式、着圧通風方式、真空予冷方式、冷水予冷方式など様々な方式が考案されている。また、冷蔵施設でも吸・排気の壁面配置や天井配置などが工夫された様々な方式が存在する（農業施設学会，　1990）。しかし、これら方式の多様さは、換言すれば、決定的な方式が確立されていないと言うことであり、現場でも、経験によって、方式や配置を決定していることが多い。

本章では、貯蔵施設内気流環境の空間分布を予測できるように、前章で用いたk-ε型乱流モデルを基礎方程式とした数値シミュレーションモデルを応用して、施設形状、施設内の空調設備、吸・排気の形態などが任意に設定できるようなモデルを開発した。また、貯蔵施設のような農業施設内の流れ場は３次元的に非常に複雑になることが知られているので、この複雑な流れ場を理解するためにＣＧ(Computer Graphics) を導入した。

これにより、吸・排気ダクトの長さが平均気流速の分布へ与える影響について数値シミュレーションとそのCGによる可視化を用いて調べた結果について報告する。

３－２　数値シミュレーションによる解析方法

３－２－１　対象とする貯蔵施設

解析対象とした貯蔵施設の概要を図3.2.1に示す。本施設の大きさは、奥行き15m、間口10m、高さ5mであり、施設内空気は図の左側壁面のダクトの底面より吸込まれ、天井ダクトの両わきの幅0.1mのスリットから吹出す方式である。吸込ダクトと吹出ダクトの位置は間口方向には一致している。出入口は吸込ダクトがある壁面と反対

側の、図では右側の壁面にある。このように天井にダクトを設置し、ダクトの奥行き方向に設けられたスリットから低温の気流を吹出す方式は野菜の貯蔵施設に多い空調方式である（佐瀬・椎名, 1993）。

図３．２．１　貯蔵施設の形状

３－２－２　実験方法

（１）計算概要

ここでは等温状態を仮定し、乱流モデルには表3.2.1に示す標準的なk-ε型モデルを適用した。

なお、計算時間節約のため計算領域は対照面（中央の垂直断面）で区切られた半分とし、計算には差分法を用いた。計算領域は実験ケースに応じて35～39（X方向）×20（Y方向）×29～35（Z方向）個の矩形メッシュに分割した。なお、メッシュ分割の１例を図3.2.2に示す。Maker and Cell法のアルゴリズムにより計算した。計算機は農林水産研究計算センタのCONVEX model 3820を使用した。計算に要した時間は１ケース当たりおよそ４時間であった。

本方法は前章にて風洞実験との比較を行っている。その結果、平均気流については予測可能であったが、乱れに関しては壁面近傍で過大評価する傾向にあった。しかしながら、壁面近傍を除く大部分の貯蔵施設内部では平均流が気流性状において支配的であると考えられることから、本方法を適用した。

表3．2．1　k-ε型モデル

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial}{\partial X_i}\left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3}k\right) + \frac{\partial}{\partial X_j}\left\{\nu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right)\right\}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_1}\frac{\partial k}{\partial X_j}\right) + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_2}\frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j}\right) + C_1\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_2\frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = k^{1/2}\,\ell$$

$$P_k = \nu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial X_j}$$

$C\mu=0.09$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_1=1.0$,　$\sigma_2=1.3$

図3．2．2　メッシュ分割（実験ケース1の場合）

（2） 境界条件

境界条件を表3.2.2に示す。ただし、いずれの実験ケースにおいても吸込面、吹出面の流速分布はないものと仮定した。また、吹出面での乱流エネルギーkはスリット部の吹出速度の2乗値の5%とし、乱れのスケールℓはスリット幅の1/2と仮定した。また、壁面近傍の風速分布は1/7乗の指数分布に従うものとした。壁面近傍におけるkとεの境界条件としては、それぞれすべり条件（free slip）、壁法則を適用した（加藤ら，1988；永野ら，1988）。なお、室内気流では、壁面近傍（粘性低層）について低レイノルズ流れを考慮すべきであり、特に、噴流域、衝突域、壁面近傍などの局所的な流れ自体を対象とした場合、境界条件をさらに厳密に設定する必要がある。しかし、今回用いた境界条件でも空間の全体的な平均気流分布にはそれほど大きな影響はなく、ダクト長さの違いが流れの様相におよぼす影響を検討するには十分であると考えられる。

表3．2．2　境界条件

吹出面	$U_t = 0.0,\ U_n = U_{out},\ k = k_{out},\ \ell = \ell_{out}$
吸込面	$U_t = 0.0,\ U_n = U_{in},\ \partial k/\partial n = 0.0,\ \partial\varepsilon/\partial n = 0.0$
壁面	$(\partial U_t/\partial n)_{n=0} = m\,(U_t)_{n=h}/h,\ U_n=0.0,\ \partial k/\partial n=0.0$ $(\varepsilon)_{n=h} = \left\{C_\mu (k)^{3/2}_{n=h}\right\} / \left(C_\mu^{1/4}\kappa\ h\right)$
対照面	U_t, k, ε：すべり条件（free slip），U_n=0.0

3－2－3　実験条件

吸込・吹出の形態が施設内気流環境におよぼす影響を系統的に検討するため表3.2.3に示すように、吸込・吹出ダクトの形状を変化させて6つのケースについて計算を行なった。施設全体の送風量はすべて$6m^3 \cdot s^{-1}$とした。吹出ダクトの長さの影響を調べるため、ケース1～4では吸込ダクト長は同一であり、吹出ダクトの長さが異なる。吹出速度は$2 \sim 6m \cdot s^{-1}$である。次に、吸込面の高さの影響を調べるため、ケース5、6において吹出ダクト長を固定し、吸込ダクトの長さを変化させた。吸込面の面積は長さを変化させても同じなので吸込・吹出速度はすべて同一である。

表3．2．3　実験条件

実験ケース	吸込ダクト長(流速)	吹出ダクト長（流速）
1	4／7H（$6m \cdot s^{-1}$）	1L（$2m \cdot s^{-1}$）
2	4／7H（$6m \cdot s^{-1}$）	2／3L（$3m \cdot s^{-1}$）
3	4／7H（$6m \cdot s^{-1}$）	1／3L（$6m \cdot s^{-1}$）
4	4／7H（$6m \cdot s^{-1}$）	0L（$6m \cdot s^{-1}$）
5	1／7H（$6m \cdot s^{-1}$）	2／3L（$3m \cdot s^{-1}$）
6	4／5H（$6m \cdot s^{-1}$）	2／3L（$3m \cdot s^{-1}$）

3－3　気流の可視化

3－3－1　気流のベクトル、スカラー表示方法

ベクトル表示や速度、乱流統計量、静圧、温度、ガス濃度といった流れの特性量のスカラー表示は複雑な3次元流れを直接目に見える形で表すことができる。図3.3.1にベクトル分布表示のためのAVSモジュール構成を示す。このモジュールは数値データを読み込み、表示項目と表示断面を指定して、ベクトル分布を表示する構成になっている。AVSでは簡単なコンピュータ操作で変数や視点を変える

ことができるので、全体的な流れ場の様相や部分的に詳細な流れを理解するのに有用である。

ベクトル表示やスカラー表示にて流れの特性量の分布が表示される。しかし、汚染質の除去や新鮮空気の供給のような部分的換気性能には、汚染質の発生位置も影響するため、流れの特性量自身だけと直接関係しているわけではない。仮想粒子であるパーティクルを放出し、その挙動を追跡することは部分的換気性能を理解する上で有用である。ここでは、空気と等比重のパーティクルを想定した。パーティクルの挙動は図3.3.2に示すようなAVSモジュールの構成によってコンピュータディスプレイ上に可視化した。このモジュールでは、数値データを読み込み、パーティクルの発生位置と数を指定し、経過時間とパーティクルの動きを可視化する。AVSではパーティクルの放出位置を自由に変えたり、動きの早さも簡単に制御できる。パーティクルの残留数や位置を追跡することができる。パーティクルの排出時間も示すことができる。

図３．３．１　ベクトル分布表示のためAVSモジュール構成

図３．３．２　パーティクルの挙動のAVSモジュール構成

3－3－2　気流のアニメーション化

変数のベクトル表示やスカラー表示が可能であるが、そのうち平均流速のベクトル分布を図3.3.3に示す。給気スリット→天井→壁→床→対照面と循環する主流と排気面へと吸い込まれる流れとが組み合わさった複雑な流れであることが可視化によって示される。この分布から、構造上換気効率の良い設備の配置も提案することができる。また、壁面近傍の平均流速は数値シミュレーションにおける壁条件に影響することも把握することができる。

1.0m/s

図３．３．３　平均流速のベクトル分布

流れ場におけるパーティクルトレーサーの挙動はAVSモジュールによってコンピュータディスプレイ上に可視化でき、ビデオテープに記録することができる。図3.3.4に中央高さ断面から放出された25個のパーティクルの、0、10、50、100秒後の残留パーティクルの時間経過例を示す。図3.3.4は空気とほぼ同じ比重を持つエチレンガスのような汚染質の挙動に対応しているものと考えられる。この情報

から、エチレンガスの除去のための装置を生鮮野菜のために最も効果的な場所や配置を決定することができる。図3.3.4によれば、天井、壁、床付近のエチレンガスは循環する流れに沿ってスムーズに除去されるものと考えられる。しかし、循環流れの中央でエチレンガスは残留しやすく、除去されるまでに時間が長くかかる傾向がある。このように、パーティクルのアニメーション化は局所的な換気効率に対する非常に重要な指標を与えている。

AVSモジュールによるベクトルやスカラー分布とパーティクル追跡のアニメーション化は施設の環境設計だけでなく、農業施設の管理や生産にとっても大変重要な支援ツールになりうるものと考えられる。

(1) t = 0 s　(2) t = 10 s

(3) t = 50 s　(4) t = 100 s

図３．３．４　残留パーティクルの時間経過例

3－4　施設構造と気流形成の関係

3－4－1　ダクト長さと気流分布の比較

（1）気流ベクトル

各実験ケースのY－Z断面における平均流速のベクトル分布を図3.4.1-(1)～(6)に示す。

吹出ダクトの長さが施設長さと等しい実験ケース1の場合（図3.4.1-(1)）、天井ダクトのスリットから吹出された気流は天井面→壁面→床面→中央断面へと循環する流れとなって主流を形成している。この循環流はすべての領域で見られる。同時に、吸込面に向かう流れが見られる。ケース2のように吹出ダクトが施設長さの2/3に短くなると（図3.4.1-(2)）、天井に吹出ダクトのある領域では循環する流れと吸込面に向かう流れが見られるが、吹出ダクトのない出入口側の領域では流速が低下する。さらに吹出ダクトを施設長さの1/3にまで短くしたケース3（図3.4.1-(3)）では、吹出気流速自体が$6m \cdot s^{-1}$と大きくなるため、循環する流れが見られると同時に、側壁近くで出入口側の壁面に向かう流れが見られ、吹出ダクトのない出入口側の領域では循環する流れの他に2次渦が形成されている。天井の吹出ダクトを使用せず、吸込ダクトの上部から直接吹出すケース4（図3.4.1-(4)）の場合には、ケース1～3のような天井面→壁面→床面→対照面へと循環する流れは見られなくなり、吹出された気流は出入口側の壁面に直接ぶつかって大きく方向を変え、吸込面に戻っていく流れを形成し、その途中に2次渦の形成が見られる。

実験ケース5、6（図3.4.1-(5)、(6)）は、吸込面の高さをケース2に比べて低く、あるいは高くした場合である。天井面→壁面→床面→対照面へと循環する流れの渦の中心の位置がケース2に比べてやや上部に位置するものの、いずれのケースでも循環する流れと吸込面に向かう流れが形成されている。

農産物の入ったコンテナを配置する場合にも、コンテナの通気孔を循環する流れや吸込面に向かう流れの向きと直角に近い面にできるだけ多く設けたり、あるいは、流れの向きと平行する方向に隙間を設けてコンテナを積み上げるなど、通気に配慮したコンテナの配置方法が、これらベクトル図から得られるものと考えられる。

1.0m/s(ケース4のみ0.5m/s)

(1) 実験ケース1

(2) 実験ケース2

(3) 実験ケース3

図3．4．1　平均流速のベクトル分布

(4)　実験ケース４

(5)　実験ケース５

(6)　実験ケース６

図３．４．１　平均流速のベクトル分布

（2）平均気流のエネルギー量

平均気流の絶対値の分布を知るために流速のエネルギー量（$=(U^2+V^2+W^2)/2$）の分布を図3.4.2-(1)～(6)に示す。吹出、吸込気流に対応していずれの実験ケースでも吹出、吸込面付近で高風速領域が見られる。

吹出ダクトが施設長さと等しいケース1では、吹出気流速が$2m \cdot s^{-1}$と最も小さいため、天井、側壁、床面付近のエネルギー量も他のケースに比べて小さい。ケース2では、出入口側の低流速領域を除けば、その分布はケース1と似たパターンを示す。天井、側壁、床面付近のエネルギー量はケース1より大きい。ケース3では吹出ダクトが施設長さの1/3に短くなって吹出気流速が$6m \cdot s^{-1}$と大きくなっているため、中央X－Z断面において、ケース2よりもさらに高エネルギー量の領域が広く、特に、側壁、床、および対照面付近のエネルギー量が大きい。ケース4では気流は出入口側の壁面に向かって吹出されるので出入口側のX－Z断面のエネルギー量が大きくなっている。中央X－Z断面においては床と側壁に囲まれた領域でエネルギー量が大きく、床と対照面の間の領域では小さくなっている。気流ベクトル分布と考え合わせると、吸込面へと戻る流れが床と側壁に囲まれた領域を集中して通る不均一な流れ場となっている。青果物コンテナをこの場所に置いた場合にはコンテナが遮弊物となって急激に全体の空気の流れを悪化させることも危具されよう。

ケース5と6でもケース2と同様に、気流ベクトル分布にて見られた循環する流れに対応して、側壁、および床面にエネルギー量の高い領域が存在し、循環する流れ内部の領域ではエネルギー量が低い。しかし、中央X－Z断面の$0.1m^2 \cdot s^{-2}$以下のエネルギー量の低い領域の面積を比較すると、ケース2がケース5、6よりも小さい。特に、中央X－Z断面の下半分ではケース2のエネルギー量がケース5、6よりも大きい。ケース5の場合は吸込口が床面に近いため、吸込口から離れるに従ってエネルギー量が急に小さくなると同時に、吹出流によって形成された循環流れの上昇部分が抑えられることが相乗して、床面付近のエネルギー量が小さくなったと考えられる。ケース6では吸込口が天井面に近く、循環流れの中心が上側にあるため中央断面下半分のエネルギー量が小さくなったと考えられる。

一方、ケース２では吸込口が中央高さ付近にあるため循環流れの中心が中央断面でも中央高さにあり、循環流れの上昇が促進された形となったことから、ケース２の中央断面の下側のエネルギー量がケース５、６よりも大きくなったものと考えられる。ただし、吹出ダクトのない出入口側のX－Z断面では、ケース２の床面付近のエネルギー量がケース５、６より低かった。貯蔵施設において農産物コンテナは床から積み上げられるので、下半分の領域の流速が大きいことは有利であると考えられる。

以上、壁面のダクト底面にて吸込み、天井ダクト両脇スリットより吹出す方式の貯蔵施設では、施設内をできるだけ均一化し温湿度の保持を図る観点からは、吸込ダクトの高さを高くもしくは低く取り付けるよりも施設高さの中程に設置した方がよい結果となった。また、吹出ダクトの長さを加減することによって出入口側の低気流速領域をどの程度の広さにするかを決めることができると考えられる。

３－４－２　ダクト長さと換気性能の比較

貯蔵施設においてはエチレンガスなど、貯蔵物にとって有害なガスを速やかに除去する必要があり、部分的に滞留域ができてしまうことは好ましくない。エチレンガスの密度は$1.26\times10mg\cdot cm^{-3}$（標準状態）と空気の密度（$1.29\times10mg\cdot cm^{-3}$）と大差なく、また、室内の汚染物質拡散に関して空気と等比重のガス拡散に関する数値シミュレーションが模型実験をよく再現することはすでに確認されている（田中・村上，　1982）。ここでは、空間のどの部分に滞留域ができやすいかといった部分的換気性能を調べるため、質量が貯蔵施設内空気と同じと仮定したパーティクルをトレーサとして、その動きを追跡した。パーティクル、25個をX－Y中央断面から放出し、残留数がおおよそ半分以下になる時間（200s）経過後の分布を調べた。残留パーティクルの分布を図3.4.3-(1)～(6)に示す。

ケース１の場合、パーティクル13個が施設長さ方向に均一に滞留している。すなわち、天井→側壁→床→対照面へと循環する流れの内部で滞留域が存在することを意味する。ケース２の場合、残留数は11個である。その内、吹出ダクトのある領域に6個、吹出ダクトの

ない出口側の低流速領域に5個残った。すなわち、ダクトのある領域ではケース１と同様に循環する流れの内部に、また、ダクトのない領域では天井寄りの空間に残りやすいことがわかる。ケース３の場合には残留パーティクル数は5個となる。ケース４の場合にはわずかに2個となり、吹出ダクトが長いほど残留パーティクル数が多い結果となった。特に、ケース４の場合、吹出方向が側壁方向ではなく、出入口の方向に向かっているので、ケース１～３で見られた循環する流れは存在せず、吹出気流は出入口側の壁面に当たって吸込面に戻る流れになる。このため、パーティクルも速やかに吸い込まれるものと考えられる。

ケース５の場合の残留数は6個であり、同じ吹出ダクト長さのケース２の場合の11個に比べて少ない。ケース６の場合の残留数は12個であり、ケース２の場合と大差ない。しかし、吹出ダクトのある領域に限れば、ケース６の場合の残留数が10個であるのに対してケース２では6個であった。吹出ダクトが長く、吸気位置が床面に近い時が最も残留パーティクル数が少なく、吸気位置が高くなるにつれて残留パーティクル数が増加する結果となった。

以上、吹出ダクトに関していえば、有害物質の速やかな除去のためには吹出ダクトが短く、高気流速の吹出しにより一気に吹き飛ばしてから吸込むケース４が最も効果的で、次がケース３であった。ただし、これらのケースでは気流速の空間分布が不均一になるので、実用的には問題が多いと考えられる。　気流速の空間分布の均一性は吹出ダクトが長い方が高いが、全体に低風速であり、パーティクルの残留も多い。吸込ダクトの高さに関していえば、有害物質の速やかな除去の観点からは床面に近いほうが適当であると考えられる。しかし、ある程度の気流速を保持し、撹拌する観点からは施設高さの1/2程度が適当と考えられ、除去あるいは撹拌のどちらの点を優先するかで吸込ダクトの長さが決まるものと思われる。

(1) 実験ケース１

(2) 実験ケース２

(3) 実験ケース３

図３．４．２　平均流速のエネルギー量の分布

(4)　実験ケース４

(5)　実験ケース５

(6)　実験ケース６

図３．４．２　平均流速のエネルギー量の分布

(1)　実験ケース１

(2)　実験ケース２

(3)　実験ケース３

図３．４．３　残留パーティクルの分布

(4)　実験ケース４

(5)　実験ケース５

(6)　実験ケース６

図３．４．３　残留パーティクルの分布

3－5　まとめ

k-ε型2方程式乱流モデルを用いた数値シミュレーションを用いて、天井ダクト吹出・壁面ダクト吸込方式の貯蔵施設内気流（等温場）の予測を行った。計算結果について、平均気流速のベクトル分布、エネルギー量分布およびパーティクルの残留量を解析した結果、次のことが明らかとなった。

（1）　吹出された気流は天井→側壁→床→対照面へと流れる「循環する流れ」を形成する。これに吸込面に向かう流れが加わった複雑な気流分布となった。さらに吹出ダクトが短く、気流速が$6m \cdot s^{-1}$の実験ケースでは側壁近くで出入口側の壁面に向かう気流も生じる。

（2）　吹出ダクトの長さによって、気流分布のパターンは大きく異なる。吹出ダクトが長くなると、天井→側壁→床→対照面へと流れる「循環する流れ」が施設内空間の大部分を占めて、気流分布の均一性が増す。逆に、吹出ダクトが施設長さの1/3以下になると、平均流速のエネルギー量が$0.6m^2 \cdot s^{-2}$以上の高気流速域が広くなるが、流速分布が不均一な場となる。

（3）　吸込ダクトの高さが違っても気流分布のパターンに大きな違いは見られない。しかし、平均流速のエネルギー量が$0.1m^2 \cdot s^{-2}$以下の低気流速域は吸込面が施設高さの中程にある場合が最も小さく、それより高くても低くても広くなる。

（4）　残留パーティクル数は、吹出ダクト長が短く、吹出気流速が大きい場合に少なく、吹出ダクト長が増加するに従って、直線的に増加する。また、吸込ダクト長との関係については、吸込ダクト長が長く、吸込面が床に近いほど残留パーティクル数は少なく、吸込ダクト長の減少に伴って増加する。

（5）　吸込ダクトの高さに関していえば、施設内をできるだけ均一化し温湿度の保持を図る観点からは、吸込ダクトの高さを施設高さの中程に設置した方がよい結果となった。有害物質の速やかな除去の観点からは床面に近いほうが適当であると考えられ、除去あるいは撹拌のどちらの点を優先するかで吸込ダクトの長さが決まるものと考えられた。

第４章　温度差換気時の気流の形成と施設構造

４－１　鶏舎における気流形成

本章では、自然換気の場合の換気性状を決定する要因を単純化して、同じ測定条件のもとで各種鶏舎の比較が可能な模型実験により、広範囲の鶏舎構造について換気性状との関係を明らかにする。夏期に問題となる高温、無風時の暑熱環境を実験対象として、内外温度差分布および気流分布から、高床式鶏舎と平床式鶏舎の比較、屋根形態と換気性状の関係、およびモニター形状と換気性能の関係について検討した。また、高床式鶏舎において床下からの風の吹き上げ効果を考慮した床部の構造についても比較・検討した。

４－２　模型実験の方法

４－２－１　相似条件

内部に熱源があり、かつ、施設内流れが乱流域にある施設での模型と実物の換気特性は次の２つの条件を満足させれば相似になる。

①模型と実物の幾何学的相似

②アルキメデス数（Ar数）

Ar数は浮力と慣性力の比として表わされるものであり、模型と実物のAr数が一致した場合の発熱量、気流速、温度について次の関係がある（勝田・土屋，1981）。

$$N_V = N_\theta^{1/2} \cdot N_L^{1/2} \qquad (4.1)$$

$$N_\theta = N_Q^{2/3} \cdot N_L^{-5/3} \qquad (4.2)$$

$$N_Q = N_\theta^{3/2} \cdot N_L^{5/2} \qquad (4.3)$$

ここで、Nは実物に対する模型の縮率であり、添字Q，V，L，θはそれぞれ発熱量、気流速、長さ、舎内と舎外の気温差を示す。鶏舎内の大部分は乱流であるので上の関係を採用した。想定した実物にお

ける飼養密度は12.9羽・m^{-2}であり、各ゲージ2羽飼い、ゲージ列あたり208羽として、以下の条件を設定した。

産卵鶏の適温範囲の上限温度（24℃）時の鶏体からの顕熱発生量を3.0kcal・h^{-1}・kg^{-1} として、1羽平均1.8kgとすれば、5.4kcal・h^{-1}・羽$^{-1}$となる。舎内と舎外の気温差を十分な精度で測定できるようにN_θ=5.7と設定した。N_L=1/7であるから、ヒーターからの発熱量は1.1kcal・h^{-1}・ゲージ$^{-1}$とした。この場合、N_V=0.90となる。

鶏舎内の温度分布、気流分布を決定する要因として鶏体からの顕熱の発生以外にも潜熱移動や放射交換（屋根との放射交換や開口部からの日射の放射環境への影響等）が考えられるが、要因を単純化するため今回の実験ではそれらは考慮しなかった。

4－2－2　対象とする施設と模型化

模型鶏舎の例を図4.2.1に示す。本模型鶏舎は、縮尺を1/7として、屋根部、飼養空間部、および床下部に分離できるようになっている。そして飼養空間部は同一のものを用い、屋根部と床下部を各設定条件に合わせて適宜組み合わせて実験に供した。たとえば、モニター型平床式鶏舎は図4.2.1-(2)の床下部を取り除いたものである。屋根面のふく射の影響を小さくするために屋根面にはアクリル板に黒色塗装を施したものを用いた。屋根勾配は3/10とした。夏期を想定して梁部屋根部の開口部および側壁を全開放した状態とした。なお、高床式鶏舎のゲージ下の糞受けは模型鶏舎のモデルとなった実鶏舎に合わせて開口比（スノコの全面積に対する開口の割合）1/2のスノコとした。

実験には、表4.2.1に示すように、平床式2種類、高床式10種類の開放型鶏舎について行った。モニターについては、開口幅（w_m）が間口（W）の1/5、開口高さ（h_m）が開口幅の1/2の形状（以下（1/5×1/2）と記述）を採用する鶏舎が多いことから、その前後7種類のモニターについて実験を行うこととした。のこぎり屋根鶏舎の屋根部の開口面積は（1/5×1/2）モニターの1.5倍である。

温度差換気の主要因となる鶏体からの発熱は角型鋼管（60mm×60

mm×3000mm）内にニクロム線ヒーターを設置して、鶏がゲージに入った状態をモデル化した。なお、ゲージ列はこの状態でも通気性があると考えられるが、単純化するため角型鋼管を使用した。ゲージ列（角型鋼管）は図4.2.1に示すように2段とし、16本配置した。

（1） のこぎり屋根平床式鶏舎

（2） モニター屋根高床式鶏舎

（単位：mm）
（奥行きは3380 mm）

図４．２．１ 鶏舎模型の形状および温度測定点
（鶏舎中央部分横断断面）
（屋根部、飼養空間部、床下部は取り外して適宜組み合わせ可能）

表4．2．1　実験条件

番号	床方式	屋根形態	モニター寸法 $(w_m/W)\times(h_m/w_m)$	通路の形態
①	平床式	のこぎり	−−	−
②	〃	モニター	1/5×1/2	−
③	高床式	のこぎり	−−	板
④	〃	〃	−−	スノコ
⑤	〃	モニター	1/3（モニターなし）	板
⑥	〃	〃	1/3×1	〃
⑦	〃	〃	1/3×1/2	〃
⑧	〃	〃	1/3×1/3	〃
⑨	〃	〃	1/5×1/2	〃
⑩	〃	〃	〃	スノコ
⑪	〃	〃	1/5×1/3	板
⑫	〃	〃	1/10×1/2	〃

（W：鶏舎開口，w_m：モニター幅，h_m：モニター高さ）

4－2－3　温度・気流分布および換気量の測定方法

温度測定はC-C熱電対（素線直径0.3mm）を使い、その分布は図4.2.1の○で示した位置で行った。また舎外気温には鶏舎模型の影響を受けない程度離れた場所で、高さ1.5mの地点の値を用いた。同一測定条件下で実験が行えるように、模型鶏舎は農業工学研究所の環境実験室に設置した。この環境実験室は8m×8m×8mの恒温室であり、-20℃～50℃の範囲で温度を制御できる。実験室内気温が定常状態（本実験では10℃）に達し空調機による送風が停止し、鶏舎外の気流速がなくなると考えられる十分な時間経過の後、測定を開始し

た。各部温度はデータロガー（タケダ理研、TR-2711）にて集録した。コンクリート床面の熱容量が大きいことにより発生すると考えられる室内の対流熱伝達を抑制するため発泡スチロール（厚さ2cm）を敷いて断熱した。

鶏舎内気流分布の状態は発煙物質として四塩化チタン、流動パラフィン発煙装置（流れの可視化学会, 1986）、および線香を適宜組み合わせて、目視により把握した。

換気性能の定量的比較を容易にするため、高床式（1/5×1/2）モニター屋根鶏舎の気温と舎外気温の差を基準（100）として、鶏舎の内部気温と舎外気温の差を表わした値（’内外気温差の割合’と記述）も指標の1つとして採用した。

4－3　温度差換気における気流の概略的特徴

4－3－1　気流分布

床形態（高床式、平床式）、および屋根形態（モニター屋根、のこぎり屋根）の異なる4タイプの鶏舎における気流分布を図4.3.1に示す。気流分布については、鶏舎内各部の気流速は0.3m・s^{-1}の微風速であり、定量的な比較は困難なため目視による定性的分布の記述にとどめた。

平床式、高床式いずれの場合もゲージを取り巻くようにして気流が上昇し、上昇した気流は屋根面に沿って流れ屋根開口部より流出する。側壁近傍では軒下から一部流出する。

(1)　モニター屋根平床式鶏舎

(2)　モニター屋根高床式鶏舎（板通路）

(3)　のこぎり屋根平床式鶏舎

(4)　のこぎり屋根高床式鶏舎（板通路）

図４．３．１　4タイプの鶏舎における気流分布

4－3－2　温度分布

床形態（高床式、平床式）、および屋根形態（モニター屋根、のこぎり屋根）の異なる4タイプの鶏舎における内外気温差の分布を図4.3.2に示す。図に示される鶏舎内外気温差は式（4.2）を用いて実物値に換算したものである。モニター屋根高床式鶏舎（飼養密度1.1羽・m^{-2}、日中の平均外気温35℃、外風速0.7m・s^{-1}）について実測した結果によれば、鶏舎中央部と外気との差は最も外気温の高い時間帯で1℃程度であり（佐瀬ら，　1987）、図4.3.2の結果とほぼ一致していたので、今回の模型実験の相似則については妥当であったと考える。

高温、無風時には鶏舎内外の気温差が換気性能を表わす指標となると考えられるが、各鶏舎の飼養空間部の平均内外気温差（飼養空間部の温度測定点28点の平均温度と舎外気温の差）を比較した場合、実物換算値で0.75℃（高床式（1/3×1）モニター屋根鶏舎）～1.2℃（平床式（1/5×1/2）モニター屋根鶏舎）と差が小さい。すなわち無風時においても側壁が十分開放されていれば、内外気温差は屋根形態や屋根の形状などの構造に大きく影響されないこととなる。これは鮫島と岡田の報告と一致する。しかし、外気が30℃以上となるような暑熱環境は鶏にとって非常に厳しいものとなるので、各鶏舎間のわずかな内外気温差の差異について検討することも有効と考えられるので、先に定義した内外気温差の割合も意味のある指標と考えられる。

図4.3.2に示すように、高床式、平床式いずれの場合も内外気温差の分布は気流分布と良く対応していた。内外気温差の分布のパターンは高床式と平床式でほぼ同様であり、ケージ部を中心として同心円状の温度分布が形成されている。

(1)　モニター屋根平床式鶏舎

(2)　モニター屋根高床式鶏舎（板通路）

(3)　のこぎり屋根平床式鶏舎

(4)　のこぎり屋根高床式鶏舎（板通路）

図４．３．２　4タイプの鶏舎における温度分布

4－4　施設構造が気流形成におよぼす影響

4－4－1　床構造の影響

（1）気流分布

図4.3.1に示すように、平床式と高床式の舎内気流分布の最も大きく異なる点はゲージ下部の空気の流れに認められた。すなわち、モニター屋根平床式鶏舎では、側壁の下部から外気が流入し床面に沿って水平の気流が形成される。ただし、この床面に沿う気流は鶏舎中央に至るに従って弱くなることが、目視から観察された。モニター屋根高床式鶏舎のゲージより下の部分ではゲージ下の糞受けのスノコ部から流入する流れがゲージに沿って上昇しており、平床式に見られたような床に沿って中央へ流れる気流は見られなかった。

（2）温度分布

飼養空間容積に占める内外気温差1.2℃以上の部分の容積割合を比較すると、高床式で53%（モニター屋根）、31%（のこぎり屋根）、平床式で75%（モニター屋根）、47%（のこぎり屋根）といずれも高床式のほうが高くなっている。これは通路列の上部と屋根内面に沿った部分で顕著な内外温度差の分布の違いが原因である。

4－4－2　屋根構造の影響

（1）気流分布

モニター屋根鶏舎とのこぎり屋根鶏舎の気流分布の定性的違いは、屋根の形状の違いによる屋根部の気流分布だけで、飼養空間には現われなかった。すなわち、モニター屋根ではケージを取り巻くようにして上昇した気流は屋根面に沿ってモニターへ流れモニター開口部で左右に分かれて流出する。一方、のこぎり屋根鶏舎ではケージを取り巻くようにして上昇した気流の一部は屋根面に沿って流れた後、隣接する屋根開口部より流出する様子が確認された。

（2）温度分布

高床式の場合、モニター屋根鶏舎はケージから飼養空間上部にかけて内外温度差が1.2℃以上の暖められた空気の層が広く存在する。全体的には左右対称にに近い温度差分布を示した。また、床下部からの上昇気流のためケージ列間に低温部が入り込んでいる。床下部の大部分の内外気温差は0.4℃以下である。のこぎり屋根鶏舎では、ケージ部を中心に同心円状の温度分布になっており、外側ほど低温になっている。また、モニター屋根鶏舎と同様にケージ列間に低温部が入り込んでおりケージ列間を通過する上昇気流の影響が認められた。鶏舎内中央部付近のケージ上部から屋根裏にかけて暖められた空気の層が見られる。床下部の大部分はモニター屋根鶏舎と同様に、内外温度差は0.4℃以下である。飼養空間容積に占める内外温度差1.2℃以上の部分の容積割合を求めて見ると、モニター屋根鶏舎で53%、のこぎり屋根鶏舎で31%とのこぎり屋根鶏舎の方が少なくなっている。飼養空間部の内外温度差もモニター屋根鶏舎で0.95℃、のこぎり屋根鶏舎で0.88℃と、モニター屋根鶏舎の方が8%高くなる傾向を示した。

平床式の場合も同様の傾向が見られ、鶏舎空間部の平均温度差はモニター屋根鶏舎で1.2℃、のこぎり屋根鶏舎で0.98℃と、モニター屋根鶏舎の方が22%高かった。

ただし、高床式鶏舎の飼養空間上部だけを見れば、平床式と同様に内外温度差はモニター屋根鶏舎の方が大きいが、飼養空間下部だけを比較すると、逆にわずかではあるが、のこぎり屋根鶏舎の方が内外温度差が大きくなる。これはケージ上部空間の気温と下部空間の気温の差がモニター屋根鶏舎では0.7℃であり、のこぎり鶏舎の0.5℃と比べてわずかに大きいため、ケージ下から上部への流れも強くなっていることが原因ではないかと考えられる。

4－4－3　屋根換気窓の形状や開口面積がおよぼす影響

幅と高さの異なる種々のモニターを有する鶏舎およびのこぎり屋根鶏舎について、鶏舎床面積に対する屋根開口部の面積割合（以下、'屋根開口部面積比'とよぶ）と飼養空間部の平均内外温度差の割合の関係を図4.4.1に示す。なお、屋根開口部面積とは、図4.2.1に示

すようにモニター側面およびのこぎり屋根の立ち上がり部分の面積を指す。

図4.4.1から明らかなように、高床式鶏舎の内外気温差はモニターの開口幅と屋根開口部面積によって説明できる。すなわち、側壁および床面の開口面積が同じならば、内外温度差は開口幅と屋根開口部面積に依存し、モニター屋根やのこぎり屋根と言った屋根形態の影響は少ない。前節において、内外温度差はのこぎり屋根鶏舎の方が（1/5×1/2）モニター屋根鶏舎より低いことを述べたが、その原因は屋根開口部面積が異なるためと考えられる（のこぎり屋根鶏舎の屋根開口部面積はモニター屋根鶏舎の1.5倍でである）。

平床式も含めた全体の傾向として、屋根開口部面積比が増加すれば、内外温度差は減少した。ただし、モニター開口幅以上に開口面積を増やしてもその効果は少なかった。すなわち、モニターの開口幅を鶏舎間口の1/3、1/2、1、モニターなしと変化させた場合、モニター高さがモニター幅の1/2以下では屋根開口部面積比が5割増加すると10%温度上昇を抑える傾向がある。一方、モニターなしの場合の内外温度差はモニター高さがモニター開口幅の1/2の鶏舎の内外温度差に近かったことからもそのように類推される。なお、モニター高さがモニター幅の1倍の鶏舎の方がモニターなしの鶏舎のよりも5%ほど内外温度差が減少したのは、モニターなしでは低温の外気が屋根流出口にふたをしたような状態になっているためではないかと想像される。モニター屋根におけるこれらの結果は、オープンリッジタイプの畜舎において換気量は棟開口幅に比例するという報告結果（Timmons and Baughman, 1981）とも一致しており、舎内の暖められた空気の流速は開口幅の厚さで流出し、左右に分かれて開口幅の半分ずつの流束となって開口部から出ていくためと考えることができる。

図４．４．１　鶏舎床面積に対する屋根開口部の面積割合と飼養空間部の平均内外温度差の割合の関係

（なお、数値の最初の数はモニター開口幅の間口に対する比、次の数はモニター高さの開口幅に対する比を表す。また、縦軸は(1/5×1/2)モニター屋根高床式鶏舎の内外気温差(0.95℃)を100%とする。）

４－４－４　高床式における２階床部の開口部がおよぼす影響

（1/5×1/2）モニター屋根鶏舎について、平床式（床面に開口なし）、高床式（ケージ下の糞受けのスノコ部のみ開口比1/2）、および高床式で通路部もスノコにしたもの（床面全体が開口比1/2）と床面を変えて、床面の開口面積の違いが換気性能におよぼす影響を比較した。ここで開口比とはスノコ全面積に対する開口面積の比である。結果を図4.4.2に示す。縦軸にはケージ列の平均内外温度差の割合、および飼養区間部の平均内外温度差の割合を示している。ここでケージ

列の平均内外温度差とは、各ケージ上下の測定点の平均温度と外気温の差を指す。飼養空間部の内外温度差の割合は床面の開口面積が広くなるに従って小さくなるが、ケージ列の内外温度差の割合はスノコ通路にした場合の方が板通路の場合よりもかえって拡大している。これはスノコ通路では床面からの上昇気流が通路部にも均一化され、ケージ下からの吹き上げ気流が弱くなっているためと推察される。これにより飼養空間部全体としての換気効果はスノコ通路の方が高いが、ケージに対する換気効果は板通路の方が高いこととなり、高温無風時には鶏体に対しても有効ではないかと考えられる。

図４．４．２　床面の開口面積の違いが換気性能におよぼす影響
（縦軸はいずれも(1/5×1/2)モニター屋根高床式鶏舎の内外気温差(0.95℃，ケージ列で1.12℃)を100%とする。）

4－5　まとめ

構造の異なる開放型鶏舎において、外風がなく温度差換気のみによって換気が行われる場合の気流分布と鶏舎内外の温度差分布を模型実験により比較した。

（1）　各鶏舎の内外温度差分布は気流分布と良く対応しており、各鶏舎の飼養空間部の内外温度差は実物換算値で0.75～1.2℃であった。

（2）　高床式鶏舎と平床式鶏舎の内外温度差の分布のパターンはほぼ同じであるが、高床式ではケージ下の糞受け（スノコ状床面）からの吹き上げ効果があった。そのため、平床式鶏舎は高床式鶏舎に比べてモニター屋根鶏舎で26%、のこぎり屋根鶏舎で11%、内外温度差が高かった。

（3）　一般的なモニター屋根鶏舎とのこぎり屋根鶏舎について比較したところ、飼養空間部の内外温度差はモニター屋根鶏舎の方がのこぎり屋根鶏舎に比べて8～18%高かった。

（4）　側壁および床の開口面積が同じならば、内外温度差は屋根の開口幅と開口高さに依存し、屋根形態の影響は少なかった。

（5）　屋根の開口幅が一定で、開口高さが開口幅の1/2よりも小さい範囲では内外温度差は開口高さが大きいほど減少した。開口高さが開口幅の1/2以上の範囲ではその効果は小さかった。

（6）　高床式鶏舎の床構造においては、飼養空間部全体としての換気効果はスノコ通路の方が高いが、ケージに対する換気効果は板通路の方が高かった。

第５章　風力換気時の気流の形成と施設構造

５－１　フェンロ型温室における気流形成

本章では、要因を単純化した風洞模型実験により、フェンロ型温室の気流特性を明らかにすることを試みた。風力換気のみを対象として、

1）温室内循環気流の垂直方向の流れの影響を把握し、

2）軒高の違いが温室内部気流分布へ与える影響と、

3）天窓の開閉条件が異なる場合の温室内気流分布および空気の流入・流出状況を定性的に把握することを主目的とした。

５－２　模型実験方法

５－２－１　対象とする施設と模型化

図5.2.1に示すようなフェンロ型屋根構造の温室を対象として、縮尺1/12の模型を製作した。今回は気流分布の把握が容易となるように、天窓が4列のみの1スパン分の2連棟温室について模型化した。ここでは図5.2.1に示すように、天窓列を風上側から第1～4列として表した。天窓を開放した場合の開度は45°とした。

５－２－２　風洞実験概要

軒高と気流性状の関係を明らかにするため、軒高が実寸で4mの高軒高温室と3mの通常軒高温室、さらに高い8mの超高軒高温室、の3種類について可視化実験を行った。また、天窓の開閉条件と気流性状の関係を明らかにするため、開閉を表5.2.1の条件1～5のように変化させた。この時の温室床面積に対する開口面積比は0.29～0.14である。また、これらの条件について流入出気流速の測定も行った。

図５．２．１　対象としたフェンロ型温室の寸法（実寸）

表５．２．１　実験種類

条件番号	軒高	天窓の開閉条件				
		第１列（風上側）	第２列	第３列	第４列（風下側）	開口面積／床面積
	通常（3 m）	開	開	開	開	0.29
条件1	高軒高（4 m）	開	開	開	開	0.29
条件2	高軒高	開	閉	開	閉	0.14
条件3	高軒高	開	閉	閉	開	0.14
条件4	高軒高	閉	開	閉	開	0.14
条件5	高軒高	閉	開	開	閉	0.14
	超高軒高（8 m）	開	開	開	開	0.29

注）天窓の開度はすべて45°。条件1～5については熱線風速計による測定を行った。

5－2－3　可視化およびPIV解析方法

農業工学研究所大型風洞に温室模型を設置した。風洞内気流速は約3m・s^{-1}である。風向はすべて温室奥行方向に対して直角とした。

気流の可視化には、直径0.5mm前後のシャボン玉を用いた。温室奥行方向のほぼ中央断面に照明をあて、その画像をビデオに収録した。次に、得られたビデオ画像のPIV（Particle Image Velocimetry）解析を試みた。PIVは画像処理による異なる時間でのトレーサ粒子の分布パターンの類似性から流速を計測する方法である（津田ら，1991）。画像計測は多点同時計測ができ、かつ、流速の2成分の同時計測ができる点から流れ場の制御等の基礎・応用研究に広く用いられるようになってきている。構造の複雑なフェンロ型温室内外の流れ場にも有用であると思われる。実験の概要を図5.2.2に示す。天窓近辺では部材が多く、鮮明な可視化画像が得られなかったので、天窓での流入・流出については熱線風速計（TSI社製、IFA300）による流速測定を行った。測定場所は可視化の場合と同様に温室奥行方向中央の中央断面部分の天窓開口部正面および側面の中心とした。この時の風洞内気流速を風洞床面から1mの高さで約5m・s^{-1}とした。風洞内気流の平均風速ならびに乱流強度の分布を図5.2.3に示す。風洞内気流の粗度長は実物換算で4.8mmであり、草丈の低い農耕地に対応している（Counjhan, 1971）。また、農耕地での乱流強度（Maki, 1981）に合わせて、風洞内乱流強度は地表面付近で10%前後となるよう調節した。

図５．２．２　可視化実験の概要

図５．２．３　風速プロフィル

5－3　施設構造が気流形成におよぼす影響

5－3－1　気流の概略的特徴

（1）高軒高温室における気流性状の概要

天窓を全て開放した場合の高軒高温室周辺の空気の流れの様子を図5.3.1に示す。風上側屋根面付近での気流の剥離やそれに続く後流の様子がPIV解析で捉えられている。切妻型温室の場合（佐瀬，1983）と同様に、温室風下側に逆流域が生じているが、その逆流域の大きさはフェンロ型の方がより風上側の屋根面近辺にまで広くおよんでいる。フェンロ型温室では天窓配置が切妻型に比べて複雑なため非常に乱れた気流を形成していることが原因のひとつと考えられる。また、この乱れた気流は天窓第2～4列付近での複雑な流入出状態を作り出していると考えられる。

温室内部の気流分布（図5.3.2-(1)）から、気流は最も風上側の天窓列から主に流入しているものと推察される。流入した空気は温室内部のほぼ中央を中心として循環する流れを形成している。このことから、内部の空気は天窓第2～4列にて流出しているのではないかと推察される。ただし、目視からはこれらの天窓列では流出と共に流入も同時に見られ、複雑な空気の出入りが生じていることが確認されたにとどまる。

温室内部に流入するシャボン玉の数は多くないので、正確な定量評価は難しいと思われるが、PIV解析によれば温室内部の流速はおよそ0.9m・s^{-1}以下であった。外風はおよそ3m・s^{-1}なので、温室内気流は最大でも外風の3割弱である。

なお、温室部材が複雑に入り組んだ天窓近辺では鮮明な画像が得られなかったため、PIV解析を行うことができなかった。

図５．３．１　フェンロ型温室周辺気流のベクトル分布

５－３－２　棟高が気流形成におよぼす影響

天窓列すべてを開放した条件下の通常軒高温室（図5.3.2-(2)）でも、温室内部の気流分布パターンは高軒高の温室の場合（図5.3.2-(1)）と類似している。すなわち、気流は主に最も風上側の天窓から流入し、流入した空気は温室内部のほぼ中央を中心として循環する流れを形成している。しかし、高軒高温室と通常軒高温室を比較してみると、高軒高では縦に長い楕円型の循環流であるのに対し、通常軒高では横に長い楕円で循環していると見なすことができる。このことは風力換気と温度差換気が併存した場合、通常軒高温室内では風力換気による循環流れは水平成分が相対的に大きな流れであるため、浮力による上昇・流出といった鉛直方向の流れに対してふたとなって抑制してしまう方向に働く可能性を示唆していると思われる。これに対し、高軒高温室内では縦長循環流のため下降流と共に

上昇流の領域も広く、浮力による上昇の妨げがより小さいのではないかと期待される。

通常軒高温室では流入気流は温室内部の風下側の側壁に当たって床付近を流れ、高軒高温室よりも循環が強い。通常軒高温室の内部気流速はPIV解析によれば最大で1.4m・s^{-1}であった。これは最大で外風の47%であり、外風の最大3割であった高軒高温室よりも大きい。一方、超高軒高温室（図5.3.2-(3)）においても温室内部の気流分布は高軒高温室と似た縦長の循環パターンを示す。温室内部での流速値は高軒高温室よりもさらに小さく、最大で0.6m・s^{-1}で、それは外風の20%である。これは単純に、開口面積に対する温室容積の比率が大きくなるにつれて単位容積当たりの換気量も小さくなることに対応していると考えられる。

（1）高軒高温室

→ 1.0 m・s^{-1}

図５．３．２　PIV解析による温室内部の気流分布

（2）通常軒高温室　　→ 1.0 m・s^{-1}

（3）超高軒高温室　　→ 1.0 m・s^{-1}

図５．３．２　PIV解析による温室内部の気流分布

5－3－3　屋根換気窓の開閉条件が気流形成におよぼす影響

（1）PIV解析による温室内部の気流分布

図5.3.3に天窓開閉条件の異なる高軒高温室内部のPIV解析結果を示す。これによれば、最も風上側の天窓第1列を開放した場合（条件1～3）はいずれも、第1列より流入した空気が温室内部で循環する分布を示す。ただし、循環の大きさは第2～4列の開閉条件により若干異なる。すなわち、風上方向の天窓だけが開放されている場合(条件2）には水平方向の流れが強く現れて横長の循環流となる。これに比べて、最も風下側の第4列を開放した場合（条件3）にはやや縦長の循環流となる。全列開放の場合（条件1）には、わずかであるが、条件3よりさらに縦長になる。

以上のことから、内部の気流分布への影響が最も大きいのは最も風上側の天窓第1列であり、次が最も風下側の第4列と考えられる。内側の第2、3列の影響は大きくないが、条件1では条件3よりもわずかに縦長の傾向が見られたことから、内部から外部への流出に若干は寄与しているものと推察される。

一方、天窓第1列を閉鎖した場合は、開放した場合と全く異なり、顕著な流入流や循環流は認められず、内部は低風速に留まる。この場合、第4列を開放した（条件4）方が閉鎖した場合（条件5）よりは内部気流速がやや大きい。また、条件5では下向きの流れが卓越しており、条件4では逆に上向きの流れが広く見られると同時に、他の条件と逆向きの循環流が生じているといった違いは観察された。

（2）開口部における気流の流入・流出

高軒高温室にて、5つの異なる開閉条件下における天窓開口部での気流速を図5.3.4に示す。これにより各天窓における流入出状態を判定した。

最も風上側の天窓列を開放した場合（条件1～3）、第1列では正面だけでなく、側面においても流入が卓越する結果となった。これは、PIV解析での温室内部の気流分布から推定された外気の直接流入を裏付けている。開口部正面中心での平均流入気流速は第2～4列の開閉条件の違いに関わらず、ほぼ共通して0.6m・s^{-1}前後と外風の12%前後となった。また、その乱れ成分は約3m^2・s^{-2}であった。側面での

平均流入気流速も0.6～1m・s^{-1}（外風の約12～20%）であったが、乱れ成分は4m^2・s^{-2}近くあり、正面より大きかった。

全列開放の場合（条件1）、内側の第2、3列の開口部正面では流出が卓越していて、その平均気流速はそれぞれ0.34、0.14m・s^{-1}（外風の約7%，3%）であった。側面では、逆に、流入方向を示した。ただし、その平均流速値は0.01、0.05m・s^{-1}と非常に小さい。第4列の開口部正面では0.51m・s^{-1}（外風の約10%）と流入が卓越する結果となったが、側面では逆に0.83m・s^{-1}（外風の約17%）の流出が測定された。

風上側の天窓列だけを開口した場合（条件2）では、第3列の開口部正面でも流入が卓越し、その平均気流速は0.26m・s^{-1}（外風の約5%）であった。側面からは平均気流速0.01m・s^{-1}とごくわずかに流出方向を示した。

両端列のみを開放した場合（条件3）の風下側の第4列での流入出方向は全列開放の場合（条件1）と同じであるが、平均流速は開口部正面で0.04m・s^{-1}、側面で0.16m・s^{-1}と全列開放の場合（条件1）に比べて小さい。

一方、風下側の天窓列だけを開放した場合（条件4）も開口部における気流の方向は全開放の場合（条件1）と同じである。すなわち、天窓第2列では正面で流出、側面で流入方向の流れが計測され、第4列では逆に正面で流入、側面で流出方向の流れが計測された。その平均流速は第2列では全列開放の場合（条件1）よりも大きく、第4列では逆に小さい。

内側の天窓第2,3列のみを開放した場合（条件5）も気流の方向は全列開放の場合（条件1）と同じであった。しかし、側面からの流入流速は約0.6m・s^{-1}と、条件1に比べて大きい。

乱れ成分については天窓第1列の側面以外を除き、すべての開口部正面、側面ともに2～3m^2・s^{-2}で、各天窓列の平均流速は0.01～1m・s^{-1}と幅があるのに比べてその違いは小さい。乱流成分の寄与率は温室のどの部分でも変化が小さいという報告（Boulard and Draoui, 1995；Boulard et al., 1996）に一致する結果となった。

（1）条件1（全天窓列開放）

（2）条件2（風上側天窓列開放）

（3）条件3（外側天窓列開放）

（4）条件4（風下側天窓列開放）

（5）条件5（内側天窓列開放）

図５．３．３　天窓条件の異なるベクトル分布

（1）条件1（全天窓列開放）

（2）条件2（風上側天窓列開放）

（3）条件3（外側天窓列開放）

（4）条件4（風下側天窓列開放）

（5）条件5（内側天窓列開放）

図５．３．４　異なる開閉条件下における天窓開口部での気流速
（数値は $m \cdot s^{-1}$）

（3）気流分布パターン

PIV解析と熱線風速計による測定から総合して推定した温室内部の空気の流れの様子を図5.3.5に示す。

条件1の場合、天窓第1列では正面、側面から流入する。第4列では外気が逆流域のため、正面から流入し、側面からは逆に流出する。第2、3列での流量は第1、4列に比べれば小さいが、第4列での流量に影響を与えている。

条件4の風下側の天窓列だけを開放した場合も流入出方向は変わらない。一方、条件2の風上側の天窓列だけを開放した場合には温室奥行き方向の中央断面部分では流入が大きく卓越し、温室内部での循環流れの強さと対応する結果となる。

条件1～5での出入りを総合すると、外風を最も直に受ける換気窓（天窓第1列）では開口部正面、側面ともに流入する。同じく開口が風上側を向いている換気窓（条件2の天窓第3列）では、第1列により外風は乱されるため、換気窓開口部正面では第1列と同様流入となるが、側面は流出となる。天窓第4列は開口が逆に風下方向を向いているが、天窓第4列付近の外気は温室が遮蔽物として働くことにより外風向とは逆向きの流れとなっている。そのため、条件2の第3列と同様、換気窓開口部正面では流入、側面では流出となる。より乱れが大きく、外風の影響を直に受けない内側に位置する換気窓（条件1、4、5の内側の天窓第2、3列）では側面から流入し、正面から流出する。以上のような流入出状況が各開閉条件における内部の気流分布の特徴を形成しているといえる。

なお、熱線風速計による流速値から通気量を精度よく推定することは困難であり、今回の測定値からだけでは通気量や換気量についての議論は不可能である。特に、温室奥行き方向の中央断面部分における流測値から推定される通気量からの流入出のバランスはとれていない。このことから、妻面に近い部分では中央部分とは流入出量が異なる。しかし少なくとも、本結果は奥行き方向に開口部が一定に続くタイプの換気方式の温室とは異なる複雑な出入りが存在することが明らかとなったといえよう。

今回は2連棟温室を対象としており、本結果を実際の大規模な多連棟温室に直ちに結びつけることはできないが、多連棟の温室内部の大部分は単棟の場合の内側の天窓第2、3列だけを開放した場合（条

件5）の気流性状に近いのではないかと類推される。条件5では天窓第2、3列正面から流出し、側面で流入している。さらに、全部の窓を開放した条件1の場合でも内側の第2、3列では条件5と同様に、開口部正面から流出し、側面で流入している。これらから、多連棟の場合でも両端の換気窓列を除くすべての換気窓列では、開口部の正面から流入し、側面から流出しているのではないかと考えられる。また、通常、天窓は同一開度に開放されるが、たとえば、全開放の場合に生じる循環流れの大きさを第4列の開度によって調整したり、第2、3列の開度を大きくしてこれら開口正面部分からの流出を促進するなど各天窓毎の開度調節によって内部気流性状の制御も可能であると考えられる。

なお、実際のフェンロ型温室では温度差、作物の影響等、多くの要因が複雑に関連して換気が行われている。これらについては今後の課題である。

（1）条件1（全天窓列開放）

（2）条件2（風上側天窓列開放）

（3）条件3（外側天窓列開放）

（4）条件4（風下側天窓列開放）

（5）条件5（内側天窓列開放）

図５．３．５　推定された気流

5－4　まとめ

風洞模型実験により風向が棟方向に直角の場合の風力換気時における2連棟フェンロ型温室の気流分布を可視化実験とそのPIV解析および開口部での風速測定から明らかにした。

（1）　気流は主に最も風上側の天窓列から温室内部へ流入し、流入した空気は温室内部のほぼ中央を中心として循環する流れを形成する。高軒高温室では縦に長い楕円型の循環流であるのに対し、通常軒高では横に長い楕円である。超高軒高内の流れも上下方向成分が大きい。

（2）　通常軒高温室では高軒高温室よりも循環が強く、高軒高温室内部の流速は最大で外風のおよそ30%であるのに対し通常軒高温室では47%であった。超高軒高温室においても温室内部は循環流れとなるが、その流速値は高軒高温室よりもさらに小さく、約20%であった。

（3）　天窓の開閉条件が温室内部の気流分布へ与える影響を調べた結果、最も風上側の天窓第1列を開放した場合は循環する流れを形成した。天窓第4列の開閉はその循環流れの大きさに影響をおよぼす。天窓第2、第3列の開閉の影響は小さい。一方、風上側の天窓第1列を閉鎖した場合は、開放した場合と全く異なり、顕著な流入流や循環流は認められず、内部は低風速に留まる。

（4）　換気窓での流入出を調べた結果、最も主風の影響を直に受ける換気窓（天窓第1列）では開口部正面、側面ともに流入していた。やや緩和されて影響を受ける換気窓（風上側のみ開放した場合の天窓第2列）では開口部正面流入、側面流出となる。第4換気窓列もこれと同様に開口部正面流入、側面流出となる。より乱れが大きく、主風の影響をまともに受けない内側の換気窓では側面から流入し、正面から流出した。これら換気窓列毎の流入出状況が各開閉条件における内部の気流分布の特徴を形成している。

（5）　流入速はその他の換気窓の開閉条件に関わらず温室中央部分の開口正面でおよそ0.6m・s^{-1}であった。

第6章　風力換気と温度差換気が併存する場合の気流の形成と施設構造および群落

6－1　多連棟フェンロ型温室に関する気流形成

本章では、6連棟のフェンロ型温室内の気温の空間分布を風洞模型実験により調べた。自然換気の風洞実験では、幾何学的相似と熱的相似の条件を同時に満足しなければならない。室内空間の大部分が高レイノルズ数 Reynolds number の十分に発達した乱流域で占められている場合には、相似条件はアルキメデス数(Ar)の一致を満足すればよい (Shoda and Tsuchiya, 1981)。また、グラスホフ数(Gr)はRe^2に比例するので、Grが十分に大きければ、相似条件は同様にArの一致となる (Kato et al., 1998)。そこで本実験における相似条件には、Arの一致を適用した。本風洞実験では、

1) 温度差換気および温度差換気と風力換気が併存する場合の自然換気が温室内の気温分布に与える影響、 2) 群落が温室内の気温分布に与える影響について検討した。

これ以降、特に断りがない場合には、数値は実物換算値を表す。

6－2　実験方法

6－2－1　対象とするフェンロ型温室

図6.2.1に対象とした6連棟のフェンロ型温室を示す。実験には1/12縮尺の模型を使用した。壁面は厚さ5mmのアクリル板とした。妻面は断熱のため、厚さ30mmの発泡スチロール板を用いた。棟をはさんで千鳥に天窓が設けられている。天窓はすべて開放とした。天窓の開度(α)はすべて45°である。床面積に対する開口面積の割合は0.29である。

温室内の作物群落にはトマトを想定し、葉面積指数(LAI)が1で草丈1m、およびLAIが2で草丈2mの2種類とした。通常の栽培方式を参

考として、3.3m^{2}当たり9本植えとした(Kono, 1987)。草丈1mの場合、植物体模型は幅5mm、長さ30mmの矩形葉を20枚付けた。植物体模型は図6.2.1-(3)に示すように植えた。

(1) 温室概要 (数値は実物換算値).

(2) 温度測定点の位置（温室中央断面）

(3) トマト群落モデルの設置状況　(数値は実物換算値)

図６．２．１　風洞実験対象とした6連棟フェンロ型温室模型

6－2－2　測定方法および実験種類

温室模型は農業工学研究所大型風洞に設置した。風洞計測胴は幅4m、高さ3m、長さ20mである。風向はすべて棟方向に直角とした。

土壌面での太陽熱エネルギー吸収による顕熱輸送を再現するため、市販の熱シート（バイナルヒーテックス社製）を用いて温室模型内床面を加温した。1枚の熱シートは500mm×1950mmであり、最大熱容量は600Wである。定常状態を仮定して、床面温度が50°Cになるよう、調節した。

気温は、銅コンスタンタン熱電対(径0.3mm)を図6.2.1(2)に示す断面において86箇所に設置して測定した。気流パターンは煙によって適宜可視化した。

風洞内外気温は実験中、9.7～15.5°Cであった。

群落のない場合には外風速は、0, 1.1, 1.2, 2.0, 2.8, 3.9 $m \cdot s^{-1}$、草丈1mの群落の場合には、0, 1.0, 1.2, 2.0, 2.7, 3.9$m \cdot s^{-1}$、草丈2mの場合には、0, 1.1, 1.2, 1.9, 2.7, 3.9$m \cdot s^{-1}$にて、それぞれ測定を行った。

6－2－3　風洞における相似条件

流れの指標である、レイノルズ数は次式で定義される。

$$Re = U_0 \cdot L_0 / \nu^2 \qquad (6.1)$$

ここで、U_0とL_0はそれぞれ代表速度と代表長さである。νは動粘性。

本模型実験では、風速U_0は外風速として0.4$m \cdot s^{-1}$、L_0は天窓の開口高さ、10^{-1}mとすると、Reは次のようになる。

$$Re = 0.4 \times 0.1 / (18 \times 10^{-6}) = 2.2 \times 10^3 \qquad (6.2)$$

一方、熱の指標であるグラスホフ数は次式で定義される。

$$Gr = g \cdot \beta \cdot L_0^3 \cdot \triangle \theta / \nu^2 \qquad (6.3)$$

ここで、gは重力、βは熱膨張係数、$\triangle\theta$は代表的な温度差を表す。外風速が0の場合、模型実験においては、L_0は10^{-1}m、床面と外気温の差($\triangle\theta_0$)は約40°Cであるので、Grは次のように算定される。

$$Gr = 9.8 \times 3.6 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \times 40 / (18 \times 10^{-6})^2$$
$$= 4.35 \times 10^6 \qquad (6.4)$$

このように、Re数とGr数は大きいので、十分発達した乱流と考えられる。そこで、実験の相似条件としては、次式で表されるアルキメデス数の一致が適用できる。

$$Ar = g \cdot \beta \cdot L_0^3 \cdot \triangle\theta / U_0^2 \qquad (6.5)$$

アルキメデス数の一致を適用すると、実物と模型での縮率の関係は次式となる。

$$N_\theta \cdot N_L = N_V^2 \qquad (6.6)$$

ここで、幾何学的縮率(N_L)は1/12である。1/12縮尺模型における床面と外気温の差は35～40°Cであった。実際の温室では、温室内地表面温度と外気温の差はしばしば20°C程度になるので、気温差の縮率(N_θ)は約2となる。よって、風速の縮率(N_V)は0.4である。

壁面や床面、屋根面での熱的相似も考慮されなければならない。熱容量の縮率(N_Q)は、$N_Q = N_L^2 \cdot N_V \cdot N_\theta$ および、$N_Q = N_{\alpha C} \cdot N_L^2 \cdot N_\theta$と表すことができるので、対流熱輸送の縮率($N_{\alpha C}$)は次のように記述される。

$$N_{\alpha C} = N_\theta \cdot N_L^2 / N_Q = 1 / N_V = 2.45 \qquad (6.7)$$

この値のオーダーは1である。放射熱輸送の縮率も同様であると考えられる。さらに、熱輸送の大部分は換気窓を通して行われるので、

これらの熱的相似条件を満足しなければならないのは壁面、床面および屋根面近くの領域に限られる。このことは、縮率のオーダーが1であれば、温室内の主要大部分の空間での気温分布や、また特に気流パターンについて議論することは可能であることを意味している。なお、トマトの幾何学的相似については、草丈とLAIだけを満足している。

6－3　群落がない場合の温度分布の特徴

6－3－1　空間平均気温

図6.3.1は、群落のない温室において、壁面、床面、屋根面近傍を除く温室中央断面の平均気温と風速の関係を示したものである。風速が実物換算値で$1m \cdot s^{-1}$以下の場合、平均気温はほぼ一定で、無次元の内外気温昇温率、$(T-T_o)/(T_s-T_o)$は約0.28であった。ここで、Tは気温、T_oは外気温、T_sは床面温度である。

風速が$1m \cdot s^{-1}$以上になると、平均気温は減少し、風速が2.0、3.9 $m \cdot s^{-1}$と上昇するにつれて、昇温率は0.28、0.17と減少した。

自然換気温室において、温度差換気と風力換気の割合を調べた研究がいくつかなされている。例えば、Kittas et al. (1997)の方法を用いた数値シミュレーションを行い、平均気温は風速が$0.5m \cdot s^{-1}$以下ではほぼ一定であり、それ以上になると風速に逆比例して平均気温は減少することを示した(Sase and Okushima, 1998)。この0.5と$1m \cdot s^{-1}$の風速の違いは地表面温度、潜熱輸送量等の仮定条件が異なるためと考えられる。Boulard and Baille (1995)は内外気温差が4Kの場合、$\alpha=40°$の温室において風速が$2m \cdot s^{-1}$以上になれば、温度差による浮力の効果は無視できることを示した。本実験においては、$\alpha=45°$であり、昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の0.28が内外気温差4Kに相当する。この場合、浮力の効果が無視できるのは、風速が$1.96m \cdot s^{-1}$以上の場合であった。

図６．３．１　温室中央断面での平均気温と風速の関係

６－３－２　気温分布

群落がない場合の気温の鉛直方向の分布を図6.3.2に示す。床面近くに薄く、急激な勾配を持つ熱境界層存在する。境界層付近では温度は急激に低下するが、温室中央部分での昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の変化は0.30～0.25となる。高さが3～4mでわずかに温度が上昇する。これはおそらく浮力によりスムーズに気流が上昇していることを意味していると思われる。最後に気温は天窓の開口部を介して外気温に連なる。温室の床面や屋根面近くを除いた中央部分だけの気温の垂直分布は水平分布に比べてほぼ一定していた。本実験から得られた床面付近の気温の急激な変化はBoulard et al. による単棟温室の縮尺模型で得られた結果とほぼ対応していた(1998)。すなわち、彼らの実験では、高さ2mの模型温室において床面と温室中央部の温度の全低下量の4/5は床面から4cmまでで生じていることが報告されている。一方、本実験では温室高さが実物換算値で4.5mであり、この急変層は最大でも30cmと見積もられるので、温室高さに対する急変層の厚さの割合はそれぞれ0.02と0.07となる。

図６．３．２　温室中央における昇温率の鉛直分布（X=9.6m）

図6.3.3は群落のない場合の棟方向に直角な温室中央断面における気温分布を示す。自然換気が温度差換気によってのみ行われる時、すなわち、V=0m・s^{-1}の場合、温室中央高さにおける昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$は0.22～0.32であった（図6.3.3-(1)）。温室内気温分布は左右対称ではなく、図の左側（X=0～1m）の方が右側に比べて高温となった。右側の天窓から外気が流入していることが煙による可視化からも観察された。内部の空気はこれ以外の天窓から流出するが、同時に外気の流入も起こっていた。大きく緩やかな循環流れが温室内部に生じているものと考えられる。床面温度のわずかな差もこのような流れの形成のひとつの原因かもしれない。このような循環流れの発生は単棟温室においても報告されている(Nara, 1979；Boulard et al. , 1998)。

温度差換気と風力換気が併存する場合も気温分布（図6.3.3-(2)～(4)）は温度差換気のみの場合の温度分布（図6.3.3-(1)）と同様に非対称の分布となった。すなわち、温室内部風上側の気温は風下側よりも高温となった。しかし、高さ1～3mでの気温の高い部分はX=0～1mから、X=5～6mへと移動した。

風速が約1m・s^{-1}の場合（図6.3.3-(2)）、温室中央高さにおける昇

温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$は0.20～0.36であったが、その最大値は0.36と、温度差寒気のみの場合測定された最大値の0.32を上回っていた（図6.3.3-(1)）。この局所的な高温は温度差換気と風力換気が拮抗したことによって生じたものと考えられる。内部空気は浮力により上昇する一方、風力によって外気は風上側天窓より流入しようとする。風速が$1m \cdot s^{-1}$前後の場合、昇温率が32%を越えるような領域に撹拌扇を付けることは高温や温度むらの解消に有効であるかもしれない。

風速が$1m \cdot s^{-1}$を越えても、依然として温室内風上側の気温は風下側に比べて高く、高さ1～3mでの気温の高い部分は風速が$1m \cdot s^{-1}$の場合と同様にX=5～6mにあった。しかし、昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の値は温室中央高さで、0.16～0.30、0.12～0.24と減少する（図6.3.3-(3)～(4)）。この気温の減少は風力換気が温度差換気に比べて支配的になったことを意味する。第5章で示した風力換気時の気流の可視化結果からも、時計回りの循環流れが存在すると推察される。

(1) V= 0 m・s^{-1}

(2) V= 1.1 m・s^{-1}

(3) V= 2.0 m・s^{-1}

(4) V= 3.9 m・s^{-1}

図６．３．３　温室内昇温率の分布（群落がない場合）

6－4　群落がある場合の温度分布の特徴

6－4－1　気温分布

図6.4.1は草丈1mの群落がある場合の、棟方向に直角な温室中央断面における気温分布を示す。

自然換気が温度差換気のみによる場合（図6.4.1-(1)）、温室中央高さにおける昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$は0.20～0.28%であった。これは群落がない場合（図6.3.4-(1)）の値、0.22～0.32に比べて小さい。これは、床面温度条件を発熱量一定ではなく、温度一定の条件としたため、群落がある場合の方が発熱量自体は小さいことが原因と考えられる。しかしながら、群落内約1m以下は、気温は群落がない場合に比べて高かった。群落上部の自由空間の気温分布のパターンも群落のない場合と若干異なった。すなわち、群落がない場合には温室左側（X=0～1m）が右側に比べて高い気温分布になったのに対し、群落がある場合には、気温の高い部分が温室左側（X=0～1m）以外にX=15m付近にも現れた。これは通路からの放熱に影響されたものと考えられる。

温度差換気と風力換気が併存する場合（図6.4.1-(2)～(4)）、1mより上の気温分布は昇温率自体は異なるものの、群落がない場合(図6.3.4-(2)～(4)）の分布パターンと類似していた。すなわち、温室内部風上側の気温は風下側よりも高温となり、しかも、高さ1～3mでの気温の高い部分はX=0～1mからX=5～6mへと移動した。これらの気温分布から、温室内の高さ1m以上の群落のない空間でも弱い循環流れが形成されていると考えられる。循環流れの領域は群落がない場合に比べて狭くなるので、温室内気温の最大と最小の差は群落がない場合に比べて大きくなる傾向にあった。例えば、風速が低い場合（図6.4.1-(2)）、温室中央高さにおける$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の最大値は0.38以上で、群落がない場合の値の0.36よりも大きい。約1m以下の領域でも、風速の大小に関わらず、気温は群落のない場合より高かった。

6－4－2　草丈の違いが気温分布におよぼす影響

群落の影響が強く現れた無風時について、群落がない場合と草丈が1および2mの群落がある場合の温室内高さ2mにおける気温の水平分布を図6.4.2に示す。草丈が1mの群落がある場合の分布には、群落がない場合に見られた温室の左側が高く右側が高いといった温度分布は見られなかった。草丈が高いと自由空間が鉛直方向の限られるため、無風時の場合には特に群落に強く規定されていると考えられる。

草丈が1mの群落がある場合、温室の横方向に2.5、6、15mの位置に3つのピークが見られる。草丈が2mの群落がある場合も草丈が1mの場合と類似の分布を示した。温室の横方向に6と13mの位置以外、その気温は草丈が1mの場合よりも低く、6と13mの位置では1mの場合よりも高かった。この2つのピークはトマト群落の通路に対応している。実験条件としては、床面の発熱量ではなく床面温度を一定としているため、熱量自体の比較はできないが、草丈が2mの場合の方が草丈が1mの場合よりも通路と群落上部の温度差が大きい。高さ2mにおける昇温率の尖度においても群落がない場合は、-0.92、草丈が1mの場合は-0.50、2mの場合は-0.21と差が見られた。すなわち、草丈が高いほど上部空間の温度むらを大きくするものと考えられる。

本実験において、草丈が1mの場合と2mの場合で、群落内の気温分布には大きな違いは見られなかった。ただし、今回の測定では、群落内の気温の測定点数が限られている。また、実際の温室では植物体自体による太陽熱の吸収があるが、本実験ではそれを考慮していないといった点や潜熱輸送を全く考慮していないことなどがあり、群落内の気温に関してはさらに検討を要するものと思われる。

(1) V= 0 m · s-1

(2) V= 1.0 m · s-1

(3) V= 1.9 m · s-1

(4) V= 3.8 m · s-1

図６．４．１　温室内昇温率の分布（草丈1mの群落がある場合）

図６．４．２　群落がある場合、および草丈1m、2mの群落がある場合のY=2mにおける温室内昇温率の水平分布

６－５　まとめ

6連棟フェンロ型温室内気温分布を1/12縮尺の風洞模型実験により測定した。風洞内風速は0から3.9m・s^{-1}とした。また、温室内に群落がない場合と草丈が1mおよび2mの群落がある場合についても調べた。測定から、次のような結果が得られた。

（１）　群落がない場合、風速が実物換算値で、1m・s^{-1}以下の温室内の平均気温はほとんど同じであり、気温の無次元量の昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$は約0.28であった。風速が1m・s^{-1}を越え、2.0～3.9m・s^{-1}と大きくなるにつれて、昇温率は0.28～0.17へと減少した。

（２）　温室中央断面において、気温の鉛直方向の分布は床面と屋根面の近傍を除けば、水平分布に比べて変化が小さかった。床面付近には薄い熱境界層があり、温室全体の高さが4.5mの場合の熱境界層の厚さは最大に見積もっても実物換算値で30cmであった。

（3）　風速が0で温度差換気のみが行われる場合、温室中央高さにおける昇温率$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の値は0.22～0.32であった。気温の分布は左右対称ではなく、左側（X=0～1m）の方が気温が高かった。この気温分布と煙による可視化から、弱く大きな循環流れが温室内部に生じているものと推察された。

（4）　温度差換気と風力換気が併存する場合の気温分布は温度差換気のみの場合と同様、風上側が風下側より高かった。しかし、気温の高い部分は左側（X=0～1m）からやや温室内側（X=5～6m）に移動した。風速が約$1m \cdot s^{-1}$の場合、温室中央高さにおける$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の値は0.20～0.36であった。

（5）　風速が$2m \cdot s^{-1}$を越えても、気温の高い位置は風上側（X=0～1m）からやや温室内側（X=5～6m）のままであった。しかし温室中央高さにおける$(T-T_o)/(T_s-T_o)$の値は0.16～0.30、0.12～0.24と減少した。

（6）　群落があって温度差換気のみの場合、群落上部の自由空間の気温分布のパターンは群落のない場合と若干異なった。すなわち、群落がある場合には、通路からの放熱に影響されて、気温の高い部分が温室左側（X=0～1m）以外にX=15m付近にも現れた。風力換気が併存する場合には、群落がない場合に生じたような大きく弱い循環流れが群落上部自由空間に存在し、そこでの気温の高い部分も群落がない場合と同様に風上側からやや温室内側（X=5～6m）にあった。

（7）　温室内の草丈2mの群落から上部自由空間への熱放出と通路への熱の放出の差は草丈1mの場合に比べて大きかった。草丈2mの群落の方が草丈1mの群落に比べて、群落上部の空間の環境を不均一にしやすいと考えられる。

第７章　結言

本研究では模型実験およびCFDによる数値シミュレーションを用いて各種農業施設内外における気流形成と施設構造の関係について調べた。

まず、大型施設外部の気流について、風洞実験と数値シミュレーションにより検討した。施設周辺が農地の場合、農作物への風害の指標となるのは風の乱れであり、検討すべき対象領域は高さ1m程度の範囲での気流の水平分布である。施設建設に伴う周辺の風害発生は風洞実験にて十分に予測可能であり、数値シミュレーションにおいてもその範囲をほぼ特定できることを明らかにした。これからの施設は、傾斜地や施設群の中に建設されることが多くなると予想される。その場合、平坦地にゆったりと配置された場合と異なり、気流の鉛直分布や施設近傍の気流が周辺へ大きく影響してくるものと考えられる。数値シミュレーションモデルと風洞実験による効率的な気流形成の予測が平均流に関しては可能であることを明らかにしたが、今後、数値シミュレーションにおいて、施設近傍での周辺気流の予測精度を向上させ、複雑化する施設の立配置に備える必要があると思われる。

施設内部については、強制換気方式、自然換気方式の両方について検討した。大型施設外部の気流について数値シミュレーションが平均流に関しては予測が可能であることを確認したので、強制換気方式に関しても、この数値シミュレーション手法を応用した。一方、自然換気方式では、施設内外のスケールの異なる気流が相互に影響し合う複雑な現象であることから、模型実験を用いた。自然換気はその駆動力の違いにより、温度差換気と風力換気に分けられるが、それぞれ、温度差換気のみの場合と風力換気のみの場合について検討した。さらに両者の知見も考慮して、温度差換気と風力換気が併存する場合について調べた。

強制換気時の気流形成と施設構造の関係を調べるため、具体的には貯蔵施設を対象とし、給排気形態と気流の関係を数値シミュレーションを用いて調べ、以下の事項を明らかにした。

１）　施設内の気流は循環する流れに、吸込面に向かう流れが加わるなど複雑な気流分布となる。

2）　吹出ダクトの長さによって、気流分布のパターンは大きく異なる。吹出ダクトが長くなると気流分布の均一性が増し、逆に、吹出ダクトが施設長さの1/3以下になると流速分布が不均一な場となる。一方、吸込ダクトの高さが違っても気流分布のパターンに大きな違いは見られない。

3）　残留パーティクル数は、吹出ダクト長および吸込ダクト長、両者に影響される。また、吸込ダクトの高さは除去あるいは撹拌のどちらの点を優先するかで決めるべきものと考えられた。

形成されたこれらの3次元的に複雑な流れはいくつかの2次元断面の表示からだけで把握することは難しく、CGによる可視化が気流形成の把握や換気性能の良否の判断に有用であった。今後、算出されるデータ量は数値シミュレーションの進展によりますます増加すると考えられるため、CGによる可視化技術はますます重要になっていくものと思われる。さらに、CGによる可視化は目に見えない空気の流れを具体的なイメージとして提示することができるため、農業施設の設計者だけでなく、実際の生産管理者へも多くの有用な情報を与えるものと期待される。

温度差換気時の気流形成についても屋根構造や床構造の異なる施設について、体系的な検討を行った。具体的には大型の開放型鶏舎を対象に模型実験を行った。その結果、施設全体での換気性能は施設の開口面積の大小と対応関係を示したが、床下部、通路部、ゲージ部、天井部などゾーン別のlocalな換気性能は屋根、床などの施設構造に強く規定されていることが明確に示された。必ずしも、農業施設では全体の換気性能と生産に直結するゾーンの換気性能が対応しているわけではない。生産に直結するゾーンの換気性能について議論すべきであり、そのためには各部の構造と気流形成の関係を把握することが重要である。

風力換気時の気流形成については、フェンロ型温室を対象に、軒高や換気窓の開閉条件と気流形成の関係を風洞模型実験により調べた。その結果、軒高の高低に関わらず気流は主に最も風上側の天窓列から温室内部へ流入し、温室内部のほぼ中央を中心として循環する流れを形成する。軒高の違いにより、この循環流の強さや楕円型が変化していた。また、換気窓での流入出を調べた結果、最も主風の影響を直に受ける最風上側の換気窓では開口部正面、側面ともに

流入していたが、それ以降の換気窓では開口部正面で流入、側面で流出と複雑な流入出状況を示すことが明らかとなった。

温度差換気と風力換気それぞれについて得られた知見を基に、温度差換気と風力換気の両者が併存する場合の気流形成について、多連棟のフェンロ型温室を対象として、風洞模型実験を行った。模型実験の温度分布と先の気流分布結果と合わせて、限定された条件下ではあるが、以下のような留意点が得られた。

1） 推定された気流分布パターンを考慮して1.5～2mの高さのいくつかの点で気温を測定すれば、実際の温室内部全体のおおよその温度分布が推定できる。

2） 風がなくても、日射のわずかな部分的差が温室全体での流れと温度むらを引き起こす可能性がある。

3） 微風の場合が最も温度の高い領域が部分的に現れる危険性が高いので、注意を要する。

4） 温室内では風上側に熱溜まりができやすいので、この部分に撹拌扇を取り付けることが有望であるかもしれない。

5） あるいは、側壁の低い位置に小窓を取り付けておき、風上側に当たる方を開け昇温抑制を図ることも考えられる。

以上、模型実験や数値シミュレーションといった工学的手法を用いることで、構造や設備の異なる大型で多様化した農業施設内外の気流形成を把握できることを示した。建物構造や設備の幾何学的形状が気流の形成を強く規定しているが、いづれの場合でも空気は空気力学に基づく連続、循環した流れを形成しようとする部分は共通していた。

なお、大型化・複雑化した施設では生産に直結する局所換気性能も重要であったが、局所換気性能を施設全体の換気性能と単純に対応させることは困難であった。局所換気性能については、それぞれの施設に固有の境界条件の違いを十分反映するよう、今後さらに工学的手法の信頼性の向上に努める必要がある。特に、農業施設の場合には構造・設備だけでなく、内部の動・植物が関連している。第6章では、植生の存在についてその幾何学的な影響を検討した。その結果、無風時以外は群落上部の自由空間での気流は群落がない場合の気流形成と類似しており、植生の影響は主に群落内部の気流形

成に限られていた。ただし、実際には、植生は顕熱および潜熱輸送源として大きな影響を有すると考えられる。すなわち、床面のわずかな温度差が無風時には施設全体の気流形成に強く影響を与えると推定されたことから、熱的境界条件は無風時には大きく影響してくるものと予想される。植生の幾何学形状の複雑さとともに、植生が有する物質やエネルギーの動的な境界条件を実験上どのように取り扱うかが、今後最大の問題になると考えられる。と同時に、新構造施設の開発時の環境設計手法として本論で用いたような空気力学に基づく工学的手法を利用するためには、実験の効率化をさらに進めることが不可欠と考えられる。

謝　辞

本論文のテーマは、農業施設の気流性状に関するものであり、昭和56年に農林水産省に入省して以来取り組んできた課題である。この課題について、筑波大学大学院の研究者リフレッシュ教育システムにて勉強できる機会を与えていただきました。筑波大学前川教授には、この制度の下で、懇切丁寧なご指導を賜り、厚くお礼申し上げます。同時に、アドバイザリーコミッティの木村俊範教授、天田高白教授、松村正利教授のご指導に対し厚くお礼申し上げます。また、筑波大学瀬能誠之助教授、山口智治教授から貴重なご助言、励ましをいただきました。

農業工学研究所長岩崎和己博士には、筑波大学大学院（昼夜開講制、研究者リフレッシュ教育システム）に入学する機会を与えていただきました。同所前農業施設環境制御研究室長奈良誠博士には、長年にわたる丁寧な指導と暖かい励ましをいただき続けました。また、同所農業施設環境制御研究室長佐瀬勘紀博士にも基礎理論から実験までの丁寧な指導と暖かい励ましをいただき続けました。畜産試験場飼養環境部池口厚男博士には、論文の作成に関する貴重なご助言・議論をいただきました。食品総合研究所の大谷敏郎博士、五十部誠一郎博士、椎名武夫博士から貴重なご助言をいただきました。数値シミュレーションに関して、東京大学生産技術研究所村上周三教授、同加藤大介教授はじめ村上・加藤研究室の方々から指導、議論をいただきました。実験の遂行に当たり、(株)テイコクの鹿児島美彦氏、埼玉県養鶏試験場の小滝正勝氏、(株)大成建設の金子伯男氏、農業工学研究所業務管理課の方々に多くのご協力をいただきました。本論文の作成に当たり、赤松誠子氏にご協力をいただきました。

また、農業工学研究所の各部・室の方々から多くのご助言、ご協力をいただきました。

本論文は、以上各位のご指導、ご助言、ご協力並びに励ましがなければ完成することができませんでした。

ここに記して各位に深甚なる謝意を表意致します。

参考文献

· Boon, C. R. (1978) : Airflow patterns and temperature distribution in an experimental piggery. Journal of agricultural engineering research, 23: 129-139.

· Boulard, T. and Baille, A. (1995) : Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. Journal of agricultural engineering research, 61: 37-48

· Boulard, T. and Draoui, B. (1995) : Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents:Measurements and data analysis. Journal of agricultural engineering research, 61: 27-36.

· Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M. and Papadakis, G. (1996) : The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. Agricultural and forest meteorology, 79: 61-77.

· Boulard, T., Feuilloley, P. and Kittas, C. (1997) : Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. Journal of agricultural engineering research, 67: 249-266.

· Boulard, T., Lamrani, M. A., Roy, J. C., Jaffrin, A. and Bouirden, L. (1998) : Natural ventilation by thermal effect in a one-half scale model mono-span greenhouse. Transactions of the ASAE, 41(3): 773-781.

· Bruce, J. M. (1982) : Vntilation of a model livestock building by thermal buoyancy. Transactions of the ASAE, 25(6): 1724-1726.

· Choi, H., Albright, L. D., Timmons, M. B. and Warhaft, Z. (1988) : An application of the k-epsilon turbulent model to predict air distribution in a slot-ventilated enclosure. Transactions of the ASAE, 31(6): 1804-1814.

・Counihan, J. (1971)：Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and roughness density of three-dimensional roughness element. Atomospheric environment, 5: 637-642.
・Davenport, A. G. (1965)：The relationship of wind structure to wind loading. Proc. 1st Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures: 53-111.
・Egan, R. H. and Helickson, M. A. (1979)：Ridge vent and wind direction effects on ventilation characteristics of a model open-front livestock building. Transactions of the ASAE, 21(1): 146-151.
・Hirt, C. W., Nichols, B. D. and Romero, N. C. (1975)："SOLA" A numerical solution algorithem for transient fluid flows. LA, 5852p.
・氷高信雄 (1968)：水稲の倒伏と被害の発生機構に関する実験的研究．農業技術研究所報告，A15: 1-175.
・Hoff, S. J., Janni, K. A., and Jacobson, L. D. (1992)：Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilated, livestock confinement facility. Transactions of the ASAE, 35(2): 671-686.
・池口厚男・相原良安・山口智治・佐瀬勘紀・奈良誠 (1986)：無窓分娩豚舎の舎内気動に関する研究(I)－夏期条件における模型実験－．農業施設，17(2): 3-15.
・Jones, P. M. and Wilson, C. B. (1968)：Wind on urban area: Comparison of full svale and model flows. Building science, 3: 31-40.
・住宅・都市整備公団建築部建築技術開発室 (1981)：高層建築物における周辺気流の影響とその対策に関する開発研究（その１）．関研，77-048: 118p.
・住宅・都市整備公団建築部建築技術開発室 (1982)：高層建築物における周辺気流の影響とその対策に関する開発研究（その２）．関研，79-070: 220p.
・片山忠久・後藤滋・堀寛 (1980)：市街地上の接地境界層の形成に関する風洞研究．日本建築学会計画系論文集，293: 97-

104.

・加藤信介・村上周三・永野紳一郎 (1988)：室内気流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第17報）k-εモデルの壁面境界条件の各種タイプの検討－その1－．空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集: 573－576.

・Kato, S., Nakamura, A., Takahashi, T. and Murakami, S. (1998)：Study on the indoor environment of ceiling-cooling-type cooling system using ceiling-adhering air jets 1 -experimental investigation of air jet adhesion through changing of blowing conditions of air supply. 空気調和・衛生工学会論文集, 70: 1-8.

・勝田亮司・土屋喬雄 (1981)：室内空気分布の模型実験法に関する研究第1報－室内空気分布の実用的相似則－．空気調和・衛生工学会論文集, 17: 1-10.

・Kittas, C., Boulard, T. and Papadakis, G. (1997)：Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effect. Transactions of the ASAE, 40(2): 415-425.

・Kittas, C., Boulard, T. and Papadakis, G. (1997)：Greenhouse ventilation rates through combined roof and side openings: An experimental study. Acta Horticulturae, 443: 31-38.

・Kono, T. (1987)：Changes in CO_2 concentration and climate in the ventilated greenhouse with forced tomato crops. 農業気象, 43(1): 15-20.

・Kozai, T. and Sase, S. (1978)：A simulation of natural ventilation for a multi-span greenhouse. Acta Horticulturae, 87: 39-49.

・Kulter, P. (1985)：A perspective of theoretical and applied computational fluid dynamics. AIAA Journal, 23(3): 328-341.

・Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1974)：The numerical computation of turbulent flows. Computer methods in

applied mechanics and engineering, 3: 269-289.

・Lee, In-Bok (1999)：Current status and latest technology in American greenhouse production-Newly-designed naturally ventilated greenhouses and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of naturally ventilated multi-span greenhouse. 第14回農業施設研究会資料: 21-32.

・Longhouse, A. D., Ota, H. and Ashby, W. (1960)：Heat and moisture design data for poultry housing. Agricultural engineering, 41(9): 567-576.

・Maki, T (1981)：Studies on the windbreak nets.(3) Horizontal and vertical turbulent characteristics influenced by two kinds of windbreak nets in a paddy rice field. 農業気象, 37(3): 197-210.

・Miguel, A. F., van de Braak, N. J., Silva, A. M. and Bot, G. P. A. (1998)：Physical modeling of natural ventilation through screens and windows in greenhouses. Journal of agricultural engineering research, 70: 165-176.

・Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Scarascia-Mugnozza, G. (1997)：Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. Agricultural and forest meteorology, 88 (1 / 4): 121-135.

・Mistriotis, A. , Bot, G. P. A., Scarascia-Mugnozza, G. (1997)：Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. Agricultural and forest meteorology, 85(3 / 4): 217-228.

・村上周三・小峯裕己 (1980)：建築周辺気流の乱れの性状の風洞における再現性に関する研究－野外実験と風洞実験の比較－. 風工学シンポジウム論文集: 349-355.

・村上周三 (1985)：風工学における乱流の数値シミュレーション. 日本風工学会誌, 20: 51-79.

・村上周三・持田灯・大和田淳・村上里美 (1986)：建築周辺気流の数値シミュレーションの診断システムに関する研究（I）-差分スキーム、境界条件、メッシュ分割に関する検討-. 風工学シンポジウム論文集，：295-300.
・村上周三・持田灯・林吉彦 (1988)：k-εモデルにおける建物風上のkの過大評価とモデルの改良. 風工学シンポジウム論文集: 199-204.
・村上周三・加藤信介・須山喜美 (1988～1992)：コンベンショナルフロー型クリーンルーム内の気流性状に関する研究（第1～5報）. 空気調和・衛生工学会論文集，37、40、44、49: 37－62、65－76、11－22、1－11.
・永野紳一郎・村上周三・加藤信介 (1988)：室内気流数値シミュレーションの診断システムに関する研究（第18報）k-εモデルの壁面境界条件の各種タイプの検討－その2－. 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集: 577－580.
・流れの可視化学会編 (1986)：新編流れの可視化ハンドブック. 朝倉書店，東京: 516p.
・Nara, M. (1979)：Studies on air distribution in farm buildings-two dimensional numerical analysis and experiment. 農業施設，9(2): 18-25.
・奈良誠 (1983)：温室の風圧係数に関する研究（I）風速分布と風圧特性について. 農業土木試験場技報，151(LI-3): 1-6.
・奈良誠・佐瀬勘紀 (1983)：畜舎の換気特性II風洞実験に基づく開放型畜舎の自然換気シミュレーション. 昭和58年度農業施設学会大会講演要旨: 37-38.
・日本農業土木総合研究所編 (1987)：土地改良事業計画指針「防風施設」. 日本農業土木総合研究所: 197p.
・日本機械学会編 (1988)：流れの数値シミュレーション. コロナ社，東京: 304p.
・農業施設学会編 (1990)：農業施設ハンドブック. 東洋書店，東京: 766p.
・岡田恒 (1988)：強風による屋根瓦の飛散に関する風洞実験. 日本風工学会誌，35: 1-15.
・Okushima, L., Sase, S. and Nara, M. (1989)：A support

system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. Acta Horticulturae, 248: 129-136.

・大西潤治・山口克人・内藤和夫・吉川あきら (1985)：不規則な境界条件に対する室内気流の数値解析（第２報）．空気調和・衛生工学会論文集，29: 107－116.

・太田養鶏・養魚研究室 (1979)：採卵用ケージ鶏舎の設計基準策定に関する研究のうち各種鶏舎の構造とその性能について．全農飼料畜産中央研究所試験研究報告: 121-124.

・Penwarden, A. D. (1973)：Acceptable wind speed in towns. Building science, 8(3): 259-267.

・Rodi, W. (1980)：Prediction Methods of Turbulent Flows. A von Karman Institute Book, Universitat Karlsruhe: 349p.

・坂本雄三・松尾陽・野村豪・鎌田元康 (1980)：２方程式モデルによる３次元熱対流の数値解析．日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）: 321-322.

・鮫島良次・岡田益己 (1985)：開放型牛舎における棟開口の防暑効果の検討．農業気象，41(3): 269-272.

・佐瀬勘紀 (1983)：温室の自然換気に関する基礎的研究．東京大学博士論文: 322p.

・Sase, S., Takakura, T. and Nara, M. (1984)：Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of a naturally ventilated greenhouse. Acta Horticulturae, 148: 329-336.

・佐瀬勘紀・竹園尊・小滝正勝・小峯浩二 (1987)：高床式鶏舎の夏期環境特性．農業気象学会全国大会講演要旨: 184-185.

・佐瀬勘紀・椎名武夫 (1993)：貯蔵庫の環境特性．平成5年度農業施設学会大会講演要旨: 45－46.

・Sase, S. and Okushima, L. (1998)：Effect of height and area of roof ventilator opening on a natural ventilation of greenhouse. 平成10年度農業気象学会大会講演要旨，: 258-259.

・Shoda, T. and Tsuchiya, T. (1981)：Modeling Criteria for the

room air motion Part1-practical similarity criteria for the room air motion. 空気調和・衛生工学会論文集,17: 1-10.

・田中俊彦・村上周三 (1982)：室内濃度分布の数値計算と模型実験の比較. 日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学）: 303－304.

・谷一郎編 (1978)：流体力学の進歩 乱流. 丸善, 東京: 269p.

・Tennkes, H. and Lumley, J. L. (1985)：A first course in turbulence. the MIT press, Cambridge: 300p.

・Timmons, M. B. and Baughman, G. R. (1981)：Similitude analysis of ventilation by the stack effect from an open ridge livestock structure. Transactions of the ASAE, 24(4): 1030-1034.

・豊田裕道・佐瀬勘紀・大谷敏郎 (1995)：園芸施設の動向と環境問題(I)－園芸施設の現状と最近の傾向－.農業施設,26(1): 51-58.

・坪井八十二 (1961)：水稲の防風被害に関する生態学的研究. 農業技術研究所報告, A8: 1-156.

・津田宜久・小林敏雄・佐賀徹雄・瀬川茂樹 (1991)：高速流れ場の実時間ディジタル画像計測システムの開発. 日本機械学会第68期通常総会講演会講演論文集, B: 316-318.

・Wilson, J. D. and Bishop, R. G. (1974)：A model study of alternative ventilation systems for a broiler house. Transactions of the ASAE, 17(1): 99-101.

・山口克人・吉川あきら・内藤和夫 (1985)：不規則な境界条件に対する室内気流の数値解析（第１報）. 空気調和・衛生工学会論文集, 29: 97－106.

inches
cm
Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue
Cyan
Green
Yellow
Red
Magenta
White
3/Color
Black
Kodak Gray Scale
C
Y
M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19