

陽圧換気無窓豚舎内環境に関する研究

1993年

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(岩手大学)
田中章浩

①

陽圧換気無窓豚舎内環境に関する研究

1 9 9 3

岩手大学大学院
連合農学研究科
生物環境科学専攻
(岩手大学)
田中章浩

目 次

第一章 緒言

1.はじめに	P.1
2.従来の研究	P.2
(1)舎内環境と豚の生理に関する研究	P.2
(2)畜舎内環境に関する研究	P.7
(3)畜舎の数学モデルに関する研究	P.10
3.本研究の目的	P.11

第二章 陽圧換気方式無窓豚舎の空気分布に関する研究

1.はじめに	P.13
2.実験方法	P.13
(1)相似則	P.13
(2)模型豚舎	P.15
(3)実験装置	P.17
(4)実験条件	P.18
(5)測定方法	P.19
3.結果および考察	P.19
(1)夏期豚舎内換気の特徴	P.19
1)屋根裏空間と舎内空間との静圧差	P.19
2)舎内気流分布	P.22
(2)冬期豚舎内換気の特徴	P.24
1)吹出気流速	P.24
2)冬期舎内無次元温度分布	P.26
2-1)舎内無次元温度分布におよぼす因子の影響	P.26
2-2)舎内無次元温度分布への各因子の影響	P.26
i.換気回数の影響	P.26
ii.吹出温度差の影響	P.28
iii.測定面位置の影響	P.30

第三章 通風式二重被覆無窓豚舎に関する研究

1.はじめに	P.33
2.通風式二重被覆無窓豚舎の概念	P.33
3.通風式二重被覆無窓豚舎の概要	P.35
(1)豚舎寸法	P.35
(2)壁体物性値	P.36
1)熱伝導率	P.36
2)放射率	P.36
3)反射率	P.37
4)熱貫流率	P.37
4.実験条件	P.38
(1)模型豚	P.38
(2)豚房	P.39
(3)換気設計	P.39
1)必要換気量	P.39
2)許容換気量	P.40
(4)ポリダクト	P.42
(5)気流誘導シート	P.43
5.実験方法	P.44
6.夏期における測定結果	P.45
(1)気温および日射量の経時変化	P.45
(2)舎内気温に影響する熱量	P.47
(3)壁体熱収支	P.49
(4)換気回数と舎内外気温差	P.53
(5)舎内気流分布	P.55
1)気流誘導シート無しの場合の気流分布	P.55
1-1)吹出口1穴	P.55
1-2)吹出口2穴	P.57
1-3)吹出口4穴	P.58
1-4)気流分布評価	P.59

2)気流誘導シート有りの場合の気流分布	P.61
2-1)吹出口1穴	P.62
2-2)吹出口2穴	P.63
2-3)吹出口4穴	P.64
2-4)気流分布評価	P.65
3)総合評価	P.66
7.冬期における測定結果	P.69
(1)気温および日射量の経時変化	P.69
(2)舎内気温に影響する熱量	P.70
(3)壁体熱収支	P.72
(4)舎内温度分布および舎内気流方向	P.73
1)気流誘導シート無しの舎内温度分布 および舎内気流方向	P.73
1-1)吹出口1穴	P.74
1-2)吹出口2穴	P.75
1-3)吹出口4穴	P.77
1-4)温度分布評価	P.79
2)気流誘導シート有りの場合の舎内温度分布 および舎内気流方向	P.79
2-1)吹出口1穴	P.80
2-2)吹出口2穴	P.81
2-3)吹出口4穴	P.83
2-4)温度分布評価	P.84
3)舎内無次元温度分布	P.85
8.透過日射有りの場合における測定結果	P.89
(1)実験方法	P.89
(2)気温および日射量の経時変化	P.90
(3)舎内気温に影響する熱量	P.92

第四章 舎内気温予測数学モデルに関する研究

1.はじめに	P.95
2.数学モデルの概要	P.95
(1)フローチャート	P.95
(2)設定条件	P.96
(3)気象データ	P.97
(4)気象データの補間	P.97
(5)太陽位置の計算方法	P.97
(6)壁体取得日射量の計算方法	P.98
(7)壁体温度および気温の計算方法	P.100
1)外側壁体表面温度の計算方法	P.100
1-1)日中の外表面温度	P.100
1-2)夜間の外表面温度	P.100
1-3)内表面温度	P.101
2)通気層気温の計算方法	P.101
3)内側壁体表面温度の計算方法	P.102
3-1)外表面温度	P.102
3-2)内表面温度	P.102
4)舎内気温の計算方法	P.103
5)通気層気温および舎内気温の収束条件	P.103
6)土壌温度分布の計算方法	P.104
6-1)境界条件	P.104
i.土壌表面温度	P.104
ii.深さZ(1.5m)の土壌温度	P.104
6-2)土壌内部温度	P.105
7)豚体発生熱量	P.105
3.結果および考察	P.107
(1)計算値と測定値の比較	P.107
1)舎内気温の比較	P.107
2)舎内における熱量の比較	P.109

(2)暑熱対策	P.112
1)換気回数の影響	P.112
2)飼育頭数の影響	P.113
3)外側壁体反射率の影響	P.114
4)壁体熱抵抗の影響	P.115
(3)冬期対策	P.116
1)透過日射有りの場合の計算方法	P.116
2)透過日射の舎内気温への影響	P.121
3)透過日射の舎内相対湿度への影響	P.124
(4)舎内気温の年間シミュレーション	P.125
1)計算条件	P.125
2)棟方向の舎内気温へおよぼす影響	P.126
3)被覆構造の舎内気温へおよぼす影響	P.129
4)各地におけるシミュレーション	P.133
4.使用記号	P.135

第五章 結論

1.陽圧換気方式無窓豚舎の空気分布に関する研究	P.139
2.通風式二重被覆無窓豚舎に関する研究	P.139
3.舎内気温予測数学モデルに関する研究	P.141
4.今後の課題	P.141

謝辞	P.143
----	-------

参考文献	P.144
------	-------

第一章 緒言

1.はじめに

わが国の畜産は、近年、農産物の自由化などの社会情勢の変化にもなって、経営においても国際的競争力が必要となっている。そのために、生産性を追求した畜産経営が求められている。

戦後、農家の副業として養豚は行なわれてきたために、豚肉価格が上昇すると飼育を行ない、逆に価格が下がると飼育を止めるといった傾向が強く、養豚経営を不安定なものにしてきた。しかし、近年豚肉の消費増大にもなって、飼育頭数の増加が著しくなった。

農業白書附属統計表(1991)⁵⁰⁾によれば、わが国における養豚飼育規模500頭未満の農家経営戸数は昭和60年において36,254戸、養豚飼育頭数シェア72.9%であった。それが平成2年には16,281戸、24.4%へと減少している。また、一戸当たりの飼育頭数は昭和60年の129.0頭/戸が、平成2年度には272.3頭/戸と増加している。このように養豚では大規模経営化が進むとともに、経営に対する施設の重要性の認識が高まり、環境面からの生産性向上が注目されてきた。その1例として、環境調節が比較的容易である無窓豚舎が、分娩豚舎を中心に普及してきている。その反面、大規模経営化には資金調達等の問題があり、容易に大規模化を行なえないことから、小規模経営農家は減少している。すなわち、豚舎は環境調節装置などによって重装備化する方向へ進みつつあり、この費用が生産費に響いて、経営上の負担が大きくなるといった理由で、小規模経営農家が減少していると考えられる。このことから、豚舎の低コスト化という課題が新たに生まれている。本研究の目的は、この豚舎の低コスト化を計る上で、豚舎内

の物理環境を最良の状態におくのにはどのようにすれば良いかを、模型実験をもとに、明らかにすることである。

2. 従来の研究

(1) 畜舎内環境と豚の生理に関する研究

家畜が低温環境下に置かれたとき、生体恒温を維持するために、防熱反応および産熱反応が強化される。防熱反応は、主に、皮膚血管収縮による皮膚面からの放熱を減少させることである。また、産熱反応は、防熱反応だけでは体温維持ができないときに生じ、ふるえ産熱および非ふるえ産熱がある。これらの反応にはエネルギー消費がともなう。したがって、これらの熱量をできるだけ少なくすることが、低温環境下の生産向上に結び付く。また、高温環境下に置いて、家畜は放熱等で体温を一定に維持しながら肉等の生産を行なっている。しかし、食欲減退、成長の減少等生産に対する高温環境の影響は多大で、高温環境への家畜の適応は生産を犠牲にして成り立っている。したがって、冷涼下で認められるような高い生産を、高温環境下では、維持することはできないと考えられている。

生産に関係する気温および気流速が豚体におよぼす影響について次のような研究が、今日まで、見られる。

Bondら(1965)⁸⁾は0.05 m/sから0.15 m/sの気流速の影響を体重44 kgから98 kgの豚について調べ、気流速によって平均日増体量が大きく影響されると報告している。

豚は一般的に暑さに弱く、寒さには強い。米田(1975)⁸⁰⁾は、気温5℃において高湿度であってもあまり影響はない。しかし、床面が濡れている場合には、豚への影響は大きいと報告している。

戸原ら(1980)⁶⁸⁾によれば、舎内気温や湿度の変動が豚の呼吸数、心拍数、体温に影響する。それを、体重65kgから75kgの豚を用いて、調査した結果、夏期、呼吸数は気温の変化に敏感に反応し、気温の上昇に伴って急激に増加し最高74.1回/分、最低32.1回/分、平均55.5回/分であった。体温は早朝に低く平均39.4℃、1日の体温差は0.6Kとなっていた。心拍数の変動は、体温の変化と合致し、平均118.2回/分、最高と最低の差は25.0回/分であった。これに対して、冬期、呼吸数が平均24.6回/分、最高と最低の差が4.7回/分、体温は平均39.1℃、1日の体温差が0.7K、心拍数は平均107.9回/分、最高と最低の差が26.9回/分で、さらに呼吸数、心拍数および体温ともに6時に最低を示し、14時に最高を示すと報告されている。

Mountら(1980)⁴⁵⁾は初期平均体重23.2kgの群飼育されている豚では、気温を8℃から20℃に変化させても豚の増体量に大きな影響はないが、気温12℃において、気流速を0.1m/sから0.8m/sに増加させると、増体量は減少すると報告している。

Closeら(1981)¹²⁾は体重20kgから30kgの豚を用いた実験の結果、気流速を5cm/s増加させることは気温を1K下げると等価であると報告している。

Hellickson(1983)²²⁾は、体温調節機能がまだ発達していない子豚では、0.3m/s以上の気流から守らなければならないと報告している。

池内ら(1984)³²⁾は、気温の上昇にともなう豚の皮膚温変化は22℃以下の温域で大きく、28℃以上では小さい。皮膚温への気流速の影響は26℃以下の温域では大きい、30℃以上では明らかでない。呼吸数は気温の上昇にともなって増加するが、22℃から30℃の温域では気流速によって抑制される。心拍数は14℃から28℃では気流速に影響

されるが、30℃から34℃では気流速および気温の影響は認められなかったと報告している。

Sallvikら(1984)⁵⁹⁾は豚の行動と対流による冷却の関係を明かにし、夏期条件では、吹出気流の方向によって豚房の衛生状態が大きく影響されると報告している。

一般に15℃から26℃の気温が分娩舎に、また5℃から35℃の気温が育成舎に用いられる。これから、Nienaberら(1985)⁴⁷⁾は次のように報告している。育成舎における冷温環境は0.5頭/腹から0.6頭/腹の死亡損失をもたらす。分娩舎の温域は育成豚の成長に影響しない。豚が病気の場合、育成舎の気温と飼料内容との関係で豚の回復・生育に影響する。その1例として豚が下痢の状態にあるとき、高エネルギーの飼料と20℃の気温が先の状態の豚にとって、最も良い組み合わせであった。しかし7週齢の健康豚では、5℃の気温では、飼料内容が豚の成長率に影響しなかった。35℃の気温は飼料内容および豚の健康状態に関係なく、育成豚の食欲を弱らせ、これが豚の成長率を下げることになったなどである。

富家ら(1985)⁷²⁾は、夏期のダクト送風が肉豚の生産におよぼす影響について、研究を行なった。それによると、高温環境下において豚体に直接当たるような送風は、特に1.0m/sの送風において、豚による飼料要求量減少を緩和し、増体改善をもたらすと示唆している。

奏ら(1986)⁶²⁾によれば、4週齢離乳子豚の15℃から25℃の日飼料要求量は0.66kg/頭、日増体量は0.46kg/頭であることから、飼料効率は0.70であると報告されている。また気温10℃では、日飼料要求量は増加するが、飼料効率は低下する、さらに気温5℃では、日増体量も低下し、その結果、さらに、飼料効率が低下すると報告している。

戸原は(1987)⁶⁹⁾は肥育豚の場合の環境対策をするのは、舎内気温を豚の生育適温に近付けることによって、発育を促進し、さらに飼料消費量を節約するためである。これには、舎内気温を夏期は30℃以上、冬期には5℃以下にならないようにすることが重要であると報告している。

森山ら(1989)⁴⁴⁾は、1世代から4世代までの育成豚のデータから、最高気温平均値と平均日増体量との相関を求めた結果、1Kの上昇による平均日増体量は12g低下すると報告している。

Riskowskiら(1990)⁵⁷⁾は、3週齢から5週齢の128頭の豚を対象に、気流速を0.11m/sから0.40m/sの範囲、気温を23.9℃から35℃の範囲で2週間測定を行い、次の結果を得た。平均日増体量は気流速度に大きく影響されるが、気温には影響されない。これに対して、平均日飼料要求量は気温に影響され、気温が低いと増加する。飼料1kg当りの増体量は、気流速度と気温の影響を受けない。また別の論文⁵³⁾では、気流速が0.11m/sから0.40m/sの範囲で、気温が23.9℃から35℃の範囲において、寝ている豚の占める面積が気流速ならびに気温が増加するに従って増加すると報告している。

また、豚の健康状態は、空気の汚染状態によって影響される。豚舎内の空気は、豚の呼吸によるCO₂、排泄物からのNH₃、H₂S、飼料などからの浮遊粉塵、細菌などで汚染されている。

干場ら(1981)²⁴⁾は、無窓豚舎と開放型豚舎において、夏期および冬期の舎内の浮遊粉塵濃度、浮遊細菌濃度、CO₂濃度およびNH₃濃度を測定し、衛生状態は無窓豚舎の方が若干劣るが豚の発育は優れていること、その主要因は温度環境であることを報告している。

Henderson(1983)²³⁾によれば、子豚ではNH₃濃度が100ppmを越

えると日増体量と飼料要求量が低下するが、肥育豚においてNH₃濃度50ppmから75ppm以下ではそれらに影響しないと報告している。ASAE Date (1984)⁴⁾およびCurtis (1975)¹⁴⁾によれば、一般の豚舎では浮遊粉塵濃度は約5mg/m³、NH₃濃度は6ppmから35ppm、N₂S濃度は8.5ppm以下と報告されている。相原ら(1984)³⁾は無窓豚舎の実態調査を行い、CO₂濃度と浮遊粉塵濃度との間には正の相関性があると報告している。また、瀬能ら(1988)^{60,61)}は牛舎や鶏舎を実態調査し、浮遊粉塵濃度と浮遊細菌濃度の間には相関性があると報告している。田中(1989)⁶⁴⁾は陽圧換気方式無窓豚舎および隣接して建っている開放型豚舎のエアロゾルについて測定した結果、無窓豚舎のNH₃濃度は1.0ppm、浮遊粉塵濃度は0.17mg/m³、浮遊細菌濃度は65.6CFP/lであり、いずれの濃度とも無窓豚舎の方が低かった。また、夏期の無窓豚舎内気温は28.5℃から34.0℃の間を変化し、平均30.6℃であったと報告している。Ikeguchiら(1988)³¹⁾は、舎内のCO₂濃度分布は吹出気流に影響され、適切な気流分布が得られなければ換気量を増やしても、汚染空気を十分に排除できないと報告している。

以上の数多くの研究成果から、豚の生産に気温、気流速およびエアロゾルが関与していることがわかった。しかし、通常の換気を行っていれば、舎内におけるエアロゾルが豚の生産に影響するレベルまで高まることはあまりないと考えられる。また、エアロゾルが換気による空気によって運ばれることを考えれば、舎内気流が重要であるといえる。このことから豚の生産を高める舎内環境を考えると、第一に適した舎内気温および舎内気流を確保することが重要である。したがって、豚舎内気温およびその中の気流がともに重要な役割を果たしている

いえる。無窓豚舎内気温は、夏期においては 30°C 以上の高温環境、冬期においては 10°C 以下の低温環境となる。高温環境下では、豚の食欲は減退し飼料要求量が減少、その結果、成長率が下がる。しかし、比較的速い気流を豚体に当てることで日増体量を大きくすることができる。よって、夏期においては、舎内気温をできるだけ冷涼にし、速い気流を当てることによって、豚の成長低下を少なくすることが重要である。一方、低温環境は、豚の飼料要求量は増加させるがエネルギーを体温維持に消費するために、飼料効率を低下させる。また、速い気流は豚の増体量を減少させる。したがって、冬期には舎内気温を温暖に保ち、低温で速い気流を豚に当てないことが重要である。

(2) 畜舎内環境に関する研究

畜舎の環境調節に関する研究に次のようなものがみられる。

戸原ら(1971)⁶⁷⁾によると、舎内気温の日較差は、夏期および冬期ともに、閉鎖型豚舎よりも開放型豚舎の方が大きく、特に冬期においては顕著であった。このことから夏期には開放型豚舎が、冬期には閉鎖型豚舎が、温度調節機能を発揮すると報告している。

豚舎内において、できるだけ豚の生育に好ましい環境にするために、換気が必要となる。細谷(1972)²⁵⁾によれば、豚は体熱を十分発生するので、気温 -12°C 以下でなければ、理論的には、換気が生産効率に悪影響を及ぼすことはない、ただ舎内全体を均一に換気することが必要であると報告している。

細谷(1972)²⁶⁾によれば、換気が均一に行なわれるか否かは吸気の方法によるところが大きいので、換気設計の際には、適切な吸気口を計画することが重要であると報告している。

所(1973)⁷⁰⁾は、北海道で冬期の一般的な豚舎内気温は平均5℃であるが、これを断熱材や暖房などで10℃または15℃にすると、1頭当たりの飼料は、10℃で23kg、15℃で54kgが節約できると試算している。

堂腰(1978)¹⁶⁾は、密閉された畜舎内の空気は臭気強く、細菌数も多く、かなり汚染されているので、換気扇は停止することなく必要換気量を確保し、その上で温度を保つことが重要であると報告している。

沼田ら(1985)⁵¹⁾は自然換気豚舎に簡易吸排気装置を取付けた結果、設置前後の各々1年間の成績を比較すると、1頭当たり飼料要求率は0.14、衛生費は738円減少したと報告している。

これらの研究から、無窓豚舎における環境調節で換気が重要であり、換気による舎内での気流分布が豚の生産に影響をおよぼすことがわかる。しかし、無窓畜舎の舎内気流分布に関する研究はそれほど多くはみられない。いま、無窓畜舎の舎内気流分布に関する研究をみると以下のものがある。

Pattieら(1966)⁵³⁾は、側壁から吸気し、反対側の側壁から排出するタイプの、1/10スケール、模型鶏舎を用いて、模型実験を行なった。その結果、気流分布は吸気口形状によって大きく影響されると報告している。

Carpenterら(1972)¹⁰⁾は、横断面が実物大の模型を作製し、気流分布の可視化技術を開発した。気流分布に関して実物大模型は有効であり、大量換気の場合にも可視化できるが、費用および設置場所の確保などに問題があると報告している。

Randallら(1975)⁵⁵⁾は、両側壁上部に吸気口、天井中央部に排気口がある実物大の模型を作製し、4タイプの換気方式および4タイプの豚

房位置を組み合わせて、模型実験を行なった。その結果、一次気流は吸気口と排気口を結ぶ直線で形成される。そして吹出気流が噴流となる場合、吸気口の位置および形状の影響が大きい。さらに小さな障害物でも、その流れの形状を変えることになる。また、家畜からの発熱が気流分布に大きく影響することも報告している。

Boon(1978)⁹⁾は実物大模型を用いて、舎外環境を一定に維持し、舎内で実際に豚を飼育した。そして、豚房の配置、吹出気流方向による気流分布への影響を検討し、報告した。

Randallら(1979)⁵⁶⁾はアルキメデス数による気流分布の評価を行なった。その結果、吸気口の位置および形状が気流分布形状に最も影響するが、排気口はあまり影響しない。吹出気流と家畜発熱により生じる対流との間で形成される循環流は舎内気流の形状を形成する。また、舎内外温度差によって舎内気流分布形が変化する。そしてアルキメデス数が30未満であると吹出気流は水平に吹出し、75より大きくなると吹出気流は降下すると報告している。

山口ら(1979)⁷⁷⁾は、無窓鶏舎内気流を層流、二次元流で、かつ、等温流と仮定して数値解析を行ない、その結果を測定結果と比較した。その結果、舎内吹出気流速が、ある一定値を越えると、舎内気流は乱流域を形成する。また、数値解析によって気流分布の予測が可能であると報告している。

山口ら(1980)⁷⁸⁾は、1/3スケールの無窓鶏舎を用いて、模型実験を行なった。アルキメデス数の値を実物と模型とで一致させれば、舎内気流分布形と舎内無次元気流速分布は一致すると報告している。

山口ら(1981)⁷⁹⁾は、アルキメデス数一致の相似則を適用し、非等温条件で模型実験を行なった。アルキメデス数の値が変化すれば基準温

度に対する舎内温度分布が変化すると報告している。

Timmonsら(1984)⁶⁵⁾は、片側の側壁から吸気し、反対側の側壁から排気するタイプの3/10および1/8スケール模型を用いて、レイノルズ数と気流分布の関係を明らかにした。これから小縮尺での模型で気流分布の予測が可能であること、二次的に発生する渦の大きさは、排気口位置の幾何学的相似によって、予測できると報告している。

池口ら(1986)²⁸⁾は、吹出気流方向および吹出気流速と舎内気流分布との関係を明らかにした。また、豚房柵と豚が舎内気流分布におよぼす影響について報告している。

池口ら(1988)^{29,30)}は、夏期舎内気流分布を、有限要素法を用いて、予測した結果と模型実験から得た結果を比較し、気流分布形状は一致するが、気流速は一致しないと報告している。

Ikeguchiら(1988)³¹⁾は冬期条件で模型実験を行なった。そして、吹出気流方向、換気量および吹出気流と舎内代表点との温度差と舎内気流分布および舎内温度分布との関係を明らかにした。

(3) 畜舎の数学モデルに関する研究

畜舎を設計する上で、収容頭数やその地域の気象条件から、最適な畜舎の寸法、断熱性能および換気扇能力等を推定しなければならない。比較的簡易な方法で、なおかつ、厳密に畜舎設計を行なう方法にシミュレーションが挙げられる。また、シミュレーションの結果、計算値と測定値とが一致すれば、シミュレーションを通して畜舎の改善すべき点をもみつけることが可能である。畜舎の数学モデルに関する研究には次のようなものがある。

Chistianson(1977)¹¹⁾らは、気象条件、畜舎構造、環境調節方法

および経済性を考慮したモデルを作成し、牛舎で必要な壁体の熱抵抗値、飼育密度や経営費用などを求めている。

Diesch(1988)¹⁵⁾らは、強制換気の豚舎で舎内気温および水分移動速度を求めるモデルを作成し、シミュレーションによる検討を行なった。その結果、モデルから算出した必要換気量はMidwest Plan Serviceの値と異なると報告している。

Timmons(1991)⁶⁾らは、52週間サイクルの鶏卵生産での収益におよぼす気象条件や畜舎構造の影響を、シミュレーションから、検討している。

奈良(1989)⁴⁶⁾らは、熱環境では熱容量の大きい土壌のみを非定常な役割として、温室内気温予測モデルを作成し、シミュレーションを通して太陽熱ハウスや地熱利用ハウス等の加温システムの検討を行っている。

これらの研究をみると、シミュレーションが気象条件等の畜舎環境への影響などを知る有効な手段であるといえる。

3. 本研究の目的

豚の生産に影響する舎内環境に温度、気流およびエアロゾルなどがある。なかでも、豚の生産に温度および気流が大きく影響することが、従来の研究から明らかにされている。したがって、豚舎の評価を行う上で、この両者が特に重要となる。無窓豚舎において、それらに直接影響し、人為的に制御できるものに換気がある。しかし、この換気に関する研究は、すでにその成果はみたが、陰圧換気法が中心で、陽圧換気法に関するものはほとんどない。また、豚舎は重装備化する方向へ進みつつあり、これにともなってその費用が生産費に響いてしまう

という問題が生じている。そこでこの問題を乗り越えるには、あらたに、豚舎の低コスト化が必要となる。

豚の生産に影響する換気は、気温および気流速の二面から解析される必要がある。その方法として舎内での温度分布および気流分布が研究対象となる。

そこで陽圧換気無窓豚舎を対象として、舎内環境を豚の生産に良好な状態に保ち、かつ、低コストで豚舎を設計・建設するための基礎問題の解明を行なうことを目的とした。

この目的を達成するために次の方針を立てた。

- 1.従来型無窓豚舎について、舎内温度環境および舎内気流環境を解明する。
- 2.低コスト型無窓豚舎について、基本的な熱特性、舎内温度環境および舎内気流環境を解明する。
- 3.数学モデルを用いてのシミュレーションから、モデルの有効性、さらには低コスト型無窓豚舎の構造が各地域気象条件に対して適用するか検討する。

第二章 陽圧換気方式無窓豚舎の空気分布に関する研究

1. はじめに

無窓豚舎において、豚の生産に直接影響している換気についての、研究のほとんどが陰圧換気に関するものである。これに対して、新鮮空気を積極的に吸入し舎内換気を行なう陽圧換気に関するものの研究は少なく、それ故、陽圧換気にともなう舎内環境状態については解明されていない。そこで、無窓豚舎について模型実験を通して、陽圧換気の基礎的研究を行なった。

本章では、栃木県宇都宮市にある、経営状態が良く地域のリーダー的存在となっている農家の陽圧換気無窓豚舎の模型実験を通して、舎内の空気分布について調査した。豚舎の換気システムは小屋妻面に設置された3台の換気扇から屋根裏空間に空気を圧送し、天井にある2列のスロットから豚舎内に空気を噴流させ、豚舎内空気を両側壁下部のスリットから排気する陽圧換気方式である。その特徴は屋根裏空間をエアバンクとして利用している点である

2. 実験方法

(1) 相似則

噴流理論(Hellickson、1983)²²⁾では、舎内気温と噴流入気温との温度差が5K以内であれば、噴流を等温吹出しとして扱うことができることとされている。本実験は、夏期および冬期の換気条件を想定して非等温吹出しの相似則を採用した。前田ら(1959、1960)^{40、41)}および勝田ら(1967)³⁵⁾によれば、非等温吹出しの相似則には、外気温を基準とする相似則と吹出温度差を基準とする相似則の2方法がある。外気温を基準とする相似則の場合、周壁の熱抵抗についての模型値の実物値に対する縮率を正確に求めることが

必要であるが、この縮率を求めることは非常に困難である。したがって、本章では吹出温度差を基準とする相似則を適用することにした。

この相似則においては、舎内の各温度は、吹出温度差を基準とした、相対的な無次元温度として表す。周壁近くの極めて薄い層を除けば、空間の大部分は完全な乱流域と見なすことができる。この乱流域での気流分布を模型実験で相似にするための条件は、アルキメデス数 A_r 、レイノルズ数 R_e 、ペクレ数 P_e を実物と模型とで等しくすることが必要である。勝田(1967)³⁵⁾、土屋(1969)⁷⁴⁾、正田(1969)⁶³⁾によれば、乱流域では R_e 、 P_e はそれぞれ一定となるので、 A_r のみを一致させれば気流分布は相似となるとされている。

A_r は次式で表される。

$$A_r = \frac{g \beta L \Delta \theta}{U^2} \quad \text{----- (1)}$$

g : 重力加速度 L : 代表長さ U : 代表気流速

β : 空気の体積膨張係数 $\Delta \theta$: 代表温度差

ここで添字 p 、 m は実物、模型を表す。

いま、実物と模型の A_r を一致させれば次のようになる。

$$A_{rp} = A_{rm} \quad \text{----- (2)}$$

(1)、(2) 式より

$$\frac{U_m^2}{U_p^2} = \frac{\beta_m \Delta \theta_m L_m}{\beta_p \Delta \theta_p L_p} \quad \text{----- (3)}$$

空気の体積膨張係数は実物および模型で同じであると仮定できるの

で、(3) 式は気流速の縮率: $\zeta U = \frac{U_m}{U_p}$ 、および代表温度差の縮率:

$\zeta \theta = \frac{\Delta \theta_m}{\Delta \theta_p}$ で表すことができる。したがって、(3) 式は次のように書

き換えられる。

$$\zeta U = \zeta L^{0.5} \zeta \theta^{0.5} \quad \text{----- (4)}$$

換気量の縮率 ζG は(4) 式の右辺に代表長さの縮率 ζL の2乗を乗じて求めることができる。

$$\zeta G = \zeta U \zeta L^2 = \zeta \theta^{0.5} \zeta L^{2.5} \text{ ----- (5)}$$

また、換気回数の縮率 ζN は (5) 式の右辺を ζL の 3 乗で除して求めることができる。

$$\zeta N = \zeta \theta^{0.5} \zeta L^{-0.5}$$

内部熱源からの舎内供給熱量 H_h の縮率 ζH_h は、正田 (1969)⁶³⁾ によれば、次のように表すことができる。

$$\zeta H_h = \zeta U \zeta L^2 \zeta \theta = \zeta \theta^{1.5} \zeta L^{2.5}$$

また、空気圧の縮率 ζp は、空気密度が実物と模型とで同じであると仮定できるので、ベルヌーイの定理から次のように表すことができる。

$$\zeta P = \zeta U^2 = \zeta \theta \zeta L$$

以上のことから気流速 U 、換気量 G 、換気回数 N 、内部熱源からの舎内供給熱量 H_h および空気圧 P の縮率は、すべて代表長さの縮率 ζL と温度差の縮率 $\zeta \theta$ で表すことができた。本章では、測定精度および実験装置の性能を考慮し、 ζL を 1/3、 $\zeta \theta$ を夏期 1、冬期 2/5 とした。実物と模型の関係式をまとめて次に示す。

$$\zeta U = \zeta L^{0.5} \zeta \theta^{0.5}$$

$$\zeta G = \zeta \theta^{0.5} \zeta L^{2.5}$$

$$\zeta N = \zeta \theta^{0.5} \zeta L^{-0.5}$$

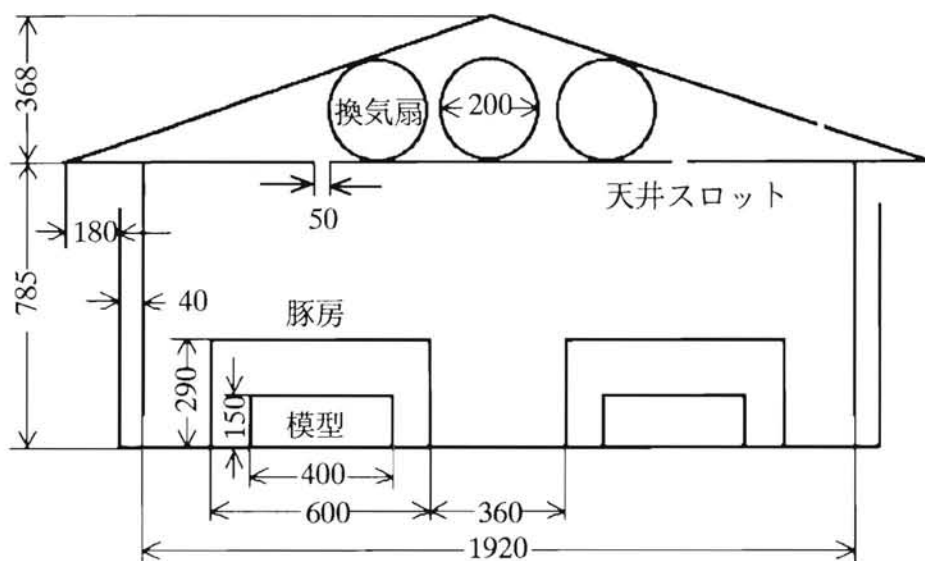
$$\zeta H_h = \zeta \theta^{1.5} \zeta L^{2.5}$$

$$\zeta P = \zeta \theta \zeta L$$

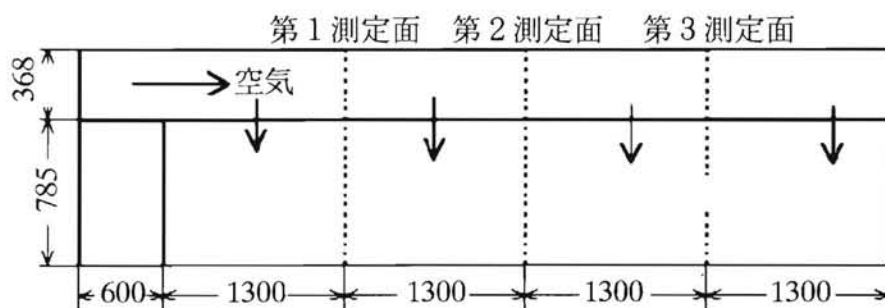
(2) 模型豚舎

模型豚舎は実在する陽圧換気方式の無窓育成豚舎の 1/3 で、これを用いて実験を行なった。この模型豚舎の概略を図 2-1 に示す。壁体にはウレタンフォーム断熱材を使用し、接合部には布テープを貼った。天井スロットの開度は外部から調節できるように工夫した。豚

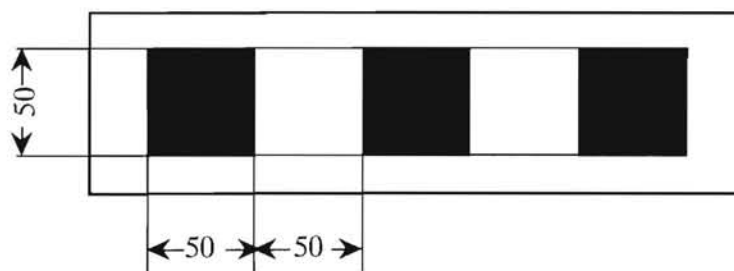
の模型は幅200×長さ400×高さ150(mm)の直方体とし、その上面に面発熱体を付け、豚体からの顕熱発生量に合わせて、発熱させた。天井の吹出スロットは豚房中央部分の真上に位置し、一辺50mm正方形の孔が50mm間隔に開けられている。



横断面寸法 (mm)



縦断面寸法 (mm)



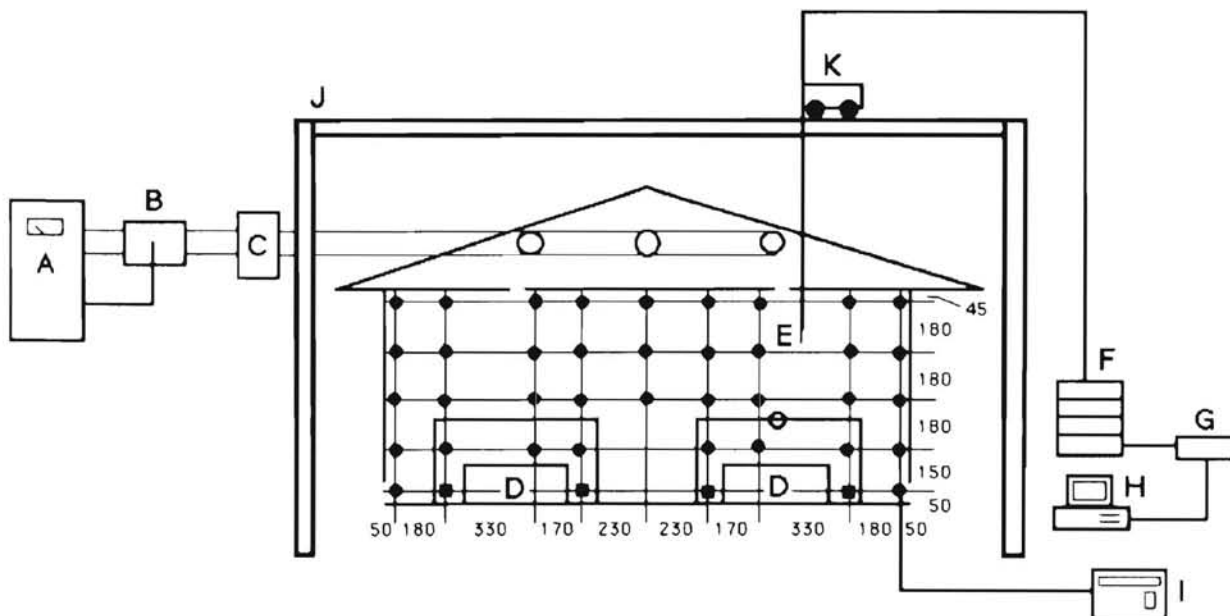
天井スロット寸法(mm)

図2-1 模型豚舎の概略

(3) 実験装置

実験装置および気流・温度測定点を図2-2に示す。模型の屋根および天井に気流センサーを差し込めるようスリットを設けた。また、センサーは、アングルに取り付けた測定車に連結させ、測定のための移動を容易にした。なお、各測定時にはスリットは密閉状態にした。

実験装置は、インバータ制御機能を備えた風量コントローラ(S4401型、日本科学工業製)、ダクト中央部の熱線風速計(24-6111型、日本科学工業製)、1本のダクトからの送風空気を3本のダクトに等配分するエアボックス、二次元熱線風速計(1011、1020、1013、1017型、日本科学工業製)、およびデータ集計のためのデータローガとパソコンから構成されている。温度測定には0.3mm径のT型熱電対を使用した。圧力の測定はベッツ型マノメータ(F-213、理科精機工業製)を用いて行なった。



- | | | |
|--------------|-------------|--------------------|
| A : 風量コントローラ | G : ADコンバータ | ● 温度及び気流速測定点 |
| B : 熱線風速計 | H : コンピュータ | ■ 温度測定点 |
| C : エアボックス | I : データローガ | ○ 室内代表温度測定点(第2測定面) |
| D : 模型豚 | J : アングル | |
| E : 気流速センサー | K : 移動車 | |
| F : 二次元熱線風速計 | | |

図2-2 実験装置概略及び測定点位置

(4) 実験条件

夏期の換気回数は実物での50回/hおよび65回/hに対応させた。この換気回数にスロット開度の半開および全開の2種類を組合せた4通りの条件で、模型豚舎内の気流分布を測定した。

冬期の場合は実物での換気回数を5回/hおよび10回/hに対応させ、これに、冬期においては速い吹出気流速が適していないことから、スロット開度の半開および全開の2種類を組合せ、さらに舎内代表温度と給気温との差である吹出温度差を20K、25Kおよび30Kの3種類を組み合わせた計12通りの条件での測定を行なった。

換気回数は舎内空間と屋根裏空間とを合わせた豚舎全体でみた換気回数である。表2-1には屋根裏空間と舎内空間に分けた各々の換気回数を、実物の場合での値で示した。豚1頭当りの発熱量は、体重を約8kg/頭とし、35W/頭とした。これから1豚房当り、6頭収容されているとすれば、210W/豚房となる。実物は、13豚房2列の合計26豚房であるので、舎内の全発熱量は5400Wとなる。なお、豚の発熱量は夏期および冬期条件とも同じとした。以上のことから、模型における豚の発熱量は夏期350W、冬期88Wとなる。所要の吹出温度差に適合する温度差を出現させるには、上記の夏期および冬期の豚の発熱量の他、床面からの発熱量を調節することが必要となる。

表2-1 屋根裏空間および室内の換気回数

換気回数 回/h	屋根裏空間換気回数 回/h	舎内換気回数 回/h
5	20.3	6.6
10	40.6	13.3
50	202.9	66.4
60	243.4	79.4
65	263.7	86.3

(5) 測定方法

図2-1に示すように、舎内を奥行き方向に4等分して、換気扇側に近い方の断面から第1、2、3測定面とし、1測定面当り、図2-2に示すように、温度43点、気流速39点で測定を行なった。なお、舎内代表温度は第2測定面で、図2-2の、○印（豚房直上）の位置での温度測定値とした。また、床面近くでの模型豚と豚房との間の4点（■印）は気流速の測定が困難なためこれを除外した。

温度と気流速の測定は別々に行なったが、それぞれ熱的に定常状態になった時点で開始した。温度の測定は、1分間隔で、3分間の平均値、気流速の測定は各測定点において、0.5秒間隔で、10秒間の平均値を採用した。

3. 結果および考察

ここで表してある長さ、温度、気流速、静圧差などの数値はすべて実物に換算したものである。

(1) 夏期豚舎内換気の特徴

1) 屋根裏空間と舎内空間との静圧差

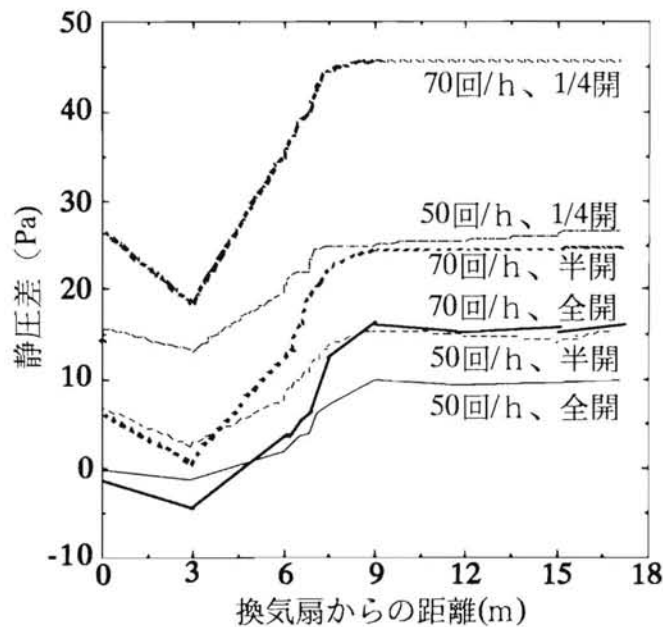


図2-3 換気扇からの距離と静圧差

屋根裏空間と舎内空間との静圧差によって吹出気流速が生じることから、奥行き方向の静圧差分布を測定し、その結果を図2-3に示す。図2-3は換気扇からの距離と静圧差の関係を換気回数とスロット開度のパラメータで示してある。

静圧差は、当然のことながら開度に関係し、スロット開度を小さくすると大きくなる。スロットは換気扇から1.8m離れた位置から設けられているが、約8~9mまでは、換気回数と開度に関係なく、換気扇から遠ざかるにつれて静圧差が大きくなり、それを越えるとほぼ一定値になる。これは、換気扇から約9mまでの間は、動圧の減衰する区間であり、それに伴って静圧が高まる区間であるといえる。しかし、9mを越えると空気が運動状態から静止状態に移るとみられ、それによる一定静圧差になったと考えられる。このことを明らかにするため、換気扇から6mおよび15m離れた2点において、吹出気流速および静圧差の測定値とベルヌーイの定理で求めた静圧差の計算値とを比較した。図2-4に測定値と計算値との関係を示す。

換気扇から6m離れた点では測定値と計算値は一致しない。これは、図2-3にみられるように、換気扇から約8~9mまでの間のスロット部分には動圧が直接吹出気流に影響しているためと考えられる。これに対して、15mの点では実験値と計算値が一致している。このことから静圧差が一定になる部分では、吹出気流速はこの静圧差から求められるが、静圧差が変化している部分では、吹出気流速は屋根裏への吹込みによる動圧に影響され、静圧差のみからでは求められない。したがって、この豚舎の場合には、奥行きの約半分程が動圧の影響を受けていることが分かった。

静圧差だけで吹出気流速が生じていればそれを制御することが比較的容易であることから、静圧差一定の領域を拡大する方式について検討することが、今後、必要である。さらに、図2-3より換気扇

から3mないし5mまでは、屋根裏空間に吹き込まれた気流の誘導により舎内空気が屋根裏空間に逆流する可能性があるように見える。このような現象もみられることから、吹出気流を奥行き方向で均一にすることは容易ではないが、舎内環境調節の上で重要である。

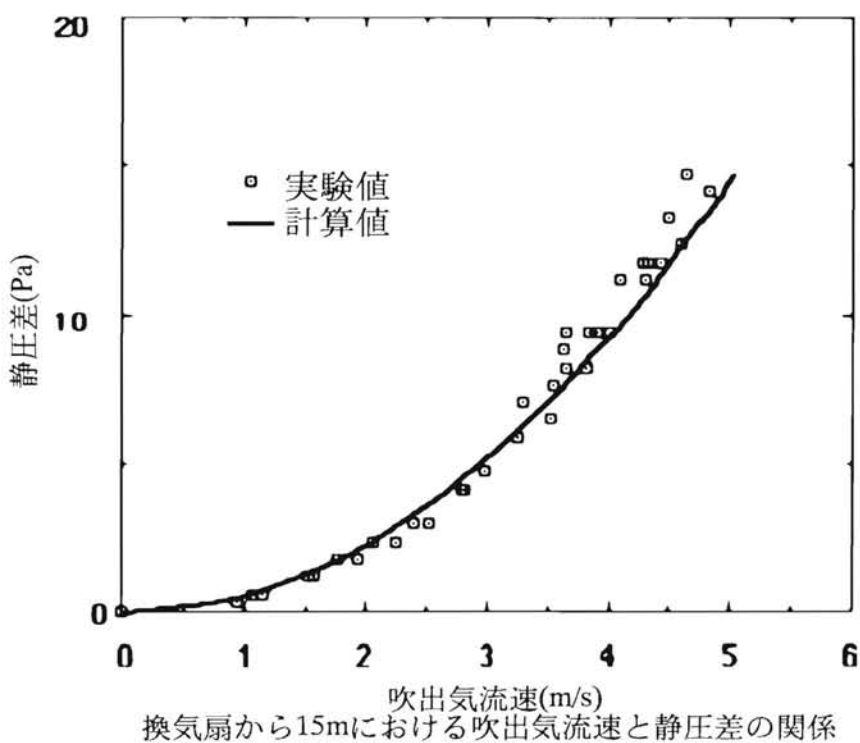
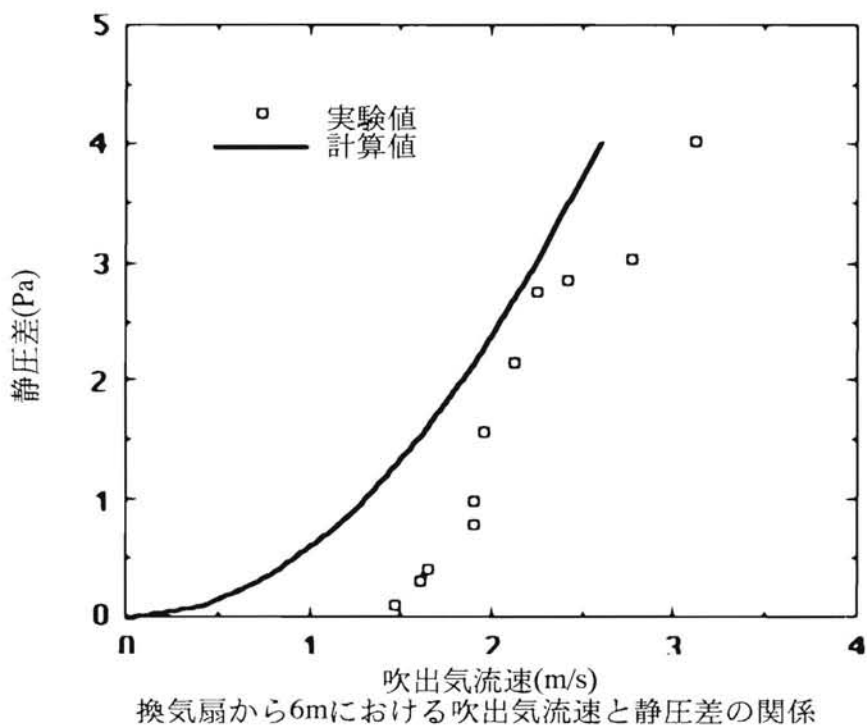


図2-4 吹出気流速と静圧差の関係

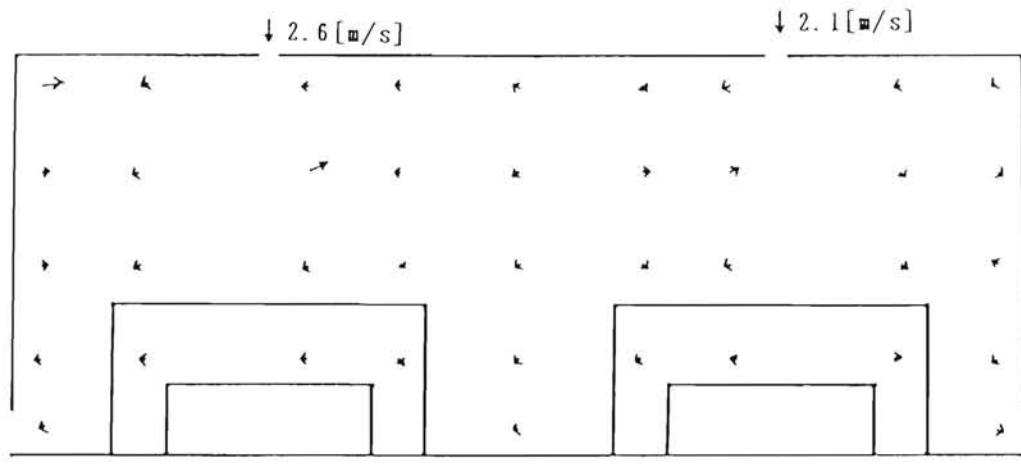
例えば、山口(1977)⁷⁶⁾によれば、屋根裏空間の代わりに円管ダクトを用いた場合、吹出気流速を均一にするには内外静圧差を20Pa、ダクト断面積に対する吹出口全面積との比を示す開口比を1にすれば良いとされている。本実験では、先のダクトに当たるものが屋根裏空間となるので、開口比にあたる数値はスロット全開時2.8、半開時1.4、1/4開時0.7になる。このようにスロット開度、すなわち開口比、を変化させても静圧差の分布パターンは同じであることから、スロットからの吹出気流速の均一化を図るための方策として、スロット開度を奥行き方向で変化させる、屋根裏空間を狭める、あるいはダクトを利用する等が考えられる。このことから、屋根裏空間をエアバンクとして用いるには、その空間体積をなるべく狭くして、静圧を高める必要があるといえる。

2) 舎内気流分布

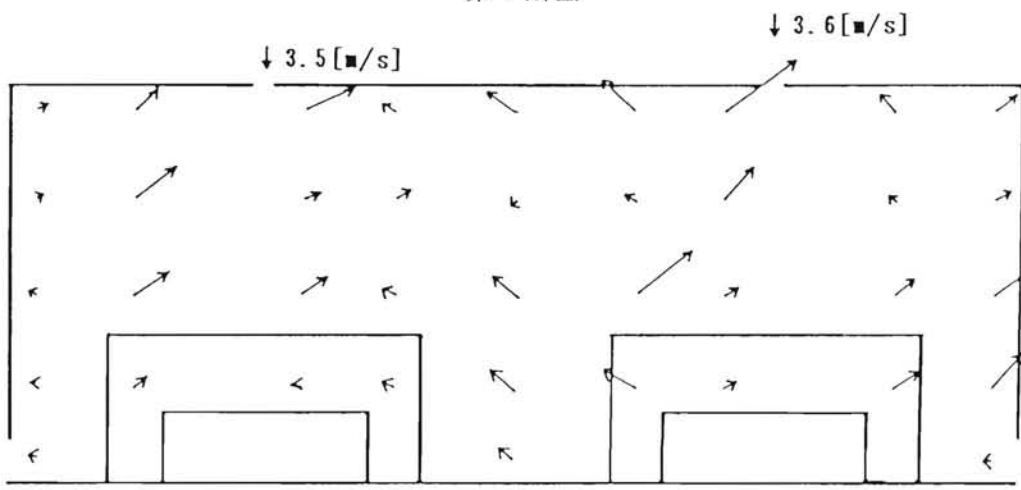
舎内気流速分布の均一性に影響する因子を明らかにするために、換気回数、スロット開度および測定面位置を因子とした、気流速の変動係数について分散分析を行なった。しかし、各因子に有意差が認められる結果は得られなかった。

図2-5に換気回数50回/h、スロット半開での舎内気流分布を気流ベクトルで示してある。

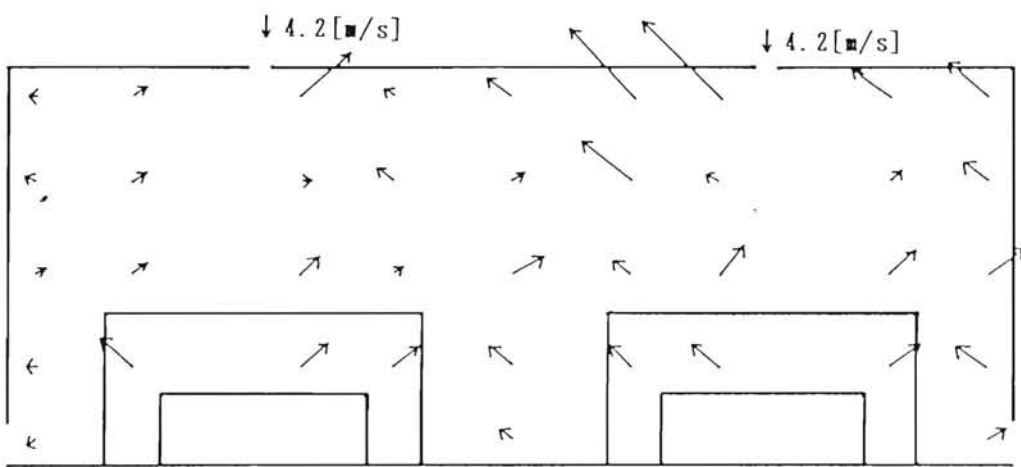
左右吹出気流速の平均は第1測定面で2.4 m/s、第2測定面で3.6 m/s、第3測定面で4.2 m/sであった。換気扇から離れるにつれて吹出気流速は大きくなり、第1測定面と第3測定面では1.8 m/sの差があった。これに対して左右スロットからの吹出気流速の差は、最も大きい第1測定面で0.5 m/sであり、奥行きの差ほど大きくない。このことから奥行き方向での吹出気流速を均一にすることが重要であるといえる。



第1断面



第2断面



第3断面

1 [m/s] →

図2-5 換気回数50回/h、スロット半開での舎内気流分布

気流ベクトルの平均値は第1測定面で 0.02 ± 0.02 m/s、第2測定面で 0.10 ± 0.07 m/s、第3測定面で 0.12 ± 0.09 m/sであった。この平均の差の検定を行なった結果、第2測定面と第3測定面とでは有意差は認められなかったが、第1測定面と第2測定面、また第1測定面と第3測定面との間には1%水準で有意差が認められた。このことから、気流ベクトルの平均値は第1測定面 < 第2測定面 = 第3測定面となる。これは吹出気流速の大きさに直接関係しているのではないかと思われる。

気流ベクトルの平均値が小さい第1測定面では、図からもわかるように、舎内空気が全体的に停滞している。これに対して、第2測定面および第3測定面では吹出された空気が、舎内で局所的に、渦状の気流を形成する傾向がみうけられる。分散分析の結果および図より、吹出口と排気口の位置関係が固定されているときには、舎内気流分布は吹出気流方向によっても左右されるものと考えられる。これはRandall(1975)⁵⁵⁾とほぼ同じ結果が得られた。理想的な舎内での気流は断面全体の空気が、スロットから排気口へと均一な速度で流れ停滞しないことであるがこの渦状の気流形成がおこることは、舎内環境にとって不都合であり、そのようなことがないように工夫が必要である。

(2) 冬期豚舎内換気の特徴

1) 吹出気流速

各測定面における吹出口からの鉛直距離と鉛直方向の気流速との関係を、換気回数10回/h、スロット全開、吹出温度差30Kの場合について図2-6に示した。

吹出気流速、すなわちスリットからの鉛直距離0cmでの気流速は、第1測定面で0.34m/s、第2測定面および第3測定面で0.62m/sとなっ

ている。Esmayら(1986)¹⁸⁾によれば、主気流速が0.2 m/s程度となる点が吹出気流の到達点とされている。この速さになる位置は第1測定面では天井面から約60 cm、第2測定面および第3測定面では約120 cmとなっている。吹出気流の到達点よりも離れた点で気流速が大きくなっているのは、豚および床からの発熱によって暖められた空気の、上昇気流の影響が生じているためである。したがって、その点における気流方向は吹出気流とは逆の上向きである。このように第1断面と第2断面、第3断面とで吹出気流速および吹出気流の到達距離に違いが生じてしまうことが、この豚舎の環境を考える上での問題点である。この原因は屋根裏空間の奥行き方向における静圧分布の不均一性、つまり屋根裏空間が広すぎることから、一定静圧部分が少なくなったためとみられる。

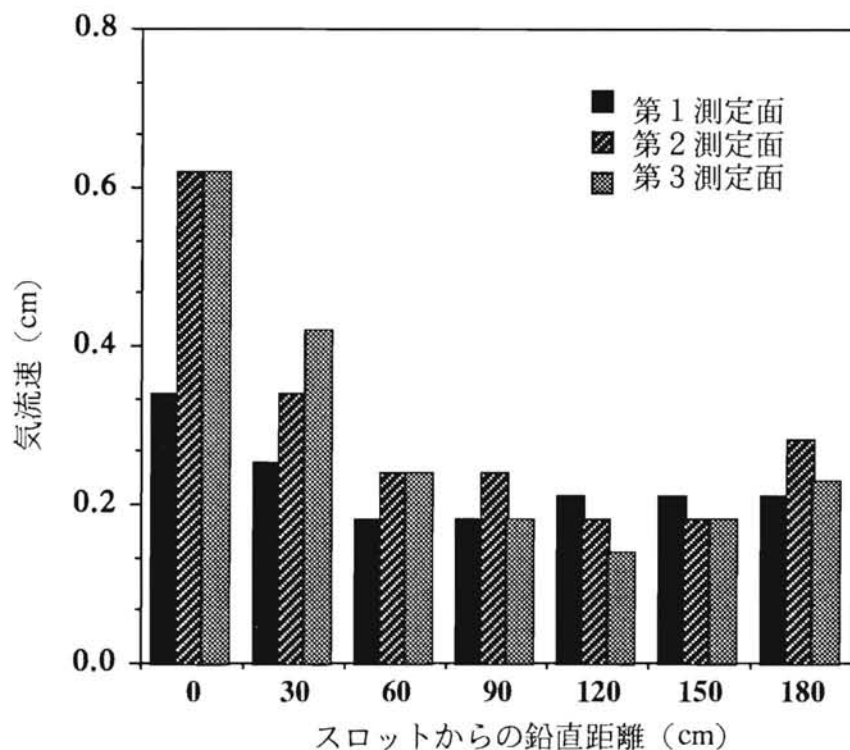


図2-6 換気回数10回/h,スロット全開,吹出温度差30K
における吹出気流速の減衰

2) 冬期舎内無次元温度分布

ここでの無次元温度は、舎内代表温度と吹出気温との差（以下、吹出温度差という）を分母として、次式で示されるもので定義した。

$$t' = \frac{t - t_0}{t_i - t_0}$$

t : 測定点温度 t_i : 舎内代表温度 t_0 : 吹出気温 t' : 無次元温度

2-1) 舎内無次元温度分布におよぼす因子の影響

舎内無次元温度分布の均一性に影響する因子を明かにするため、換気回数、スロット開度、吹出温度差および測定面位置（換気扇からの奥行き距離）を因子とした無次元温度の変動係数の分散分析を行なった。その結果、換気回数および測定面位置については1%水準、吹出温度差は5%水準で有意差が認められた。また、換気回数と測定面位置の相互作用は1%水準で認められた。

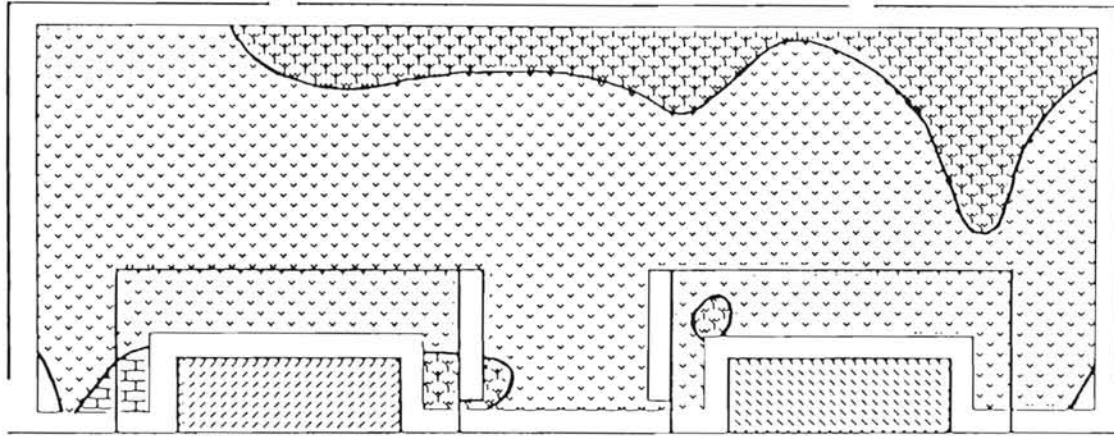
次に、豚の生活空間の無次元温度分布を検討するため、豚房内の測定点、計10点の無次元温度についての変動係数を求め、その分散分析を行なった。しかし、換気回数、スロット開度、吹出温度差、測定面位置による有意な差は認められなかった。このことは、豚の生活空間では、豚体および床からの発熱が無次元温度分布に大きく影響するためであるといえる。

2-2) 舎内無次元温度分布への各因子の影響

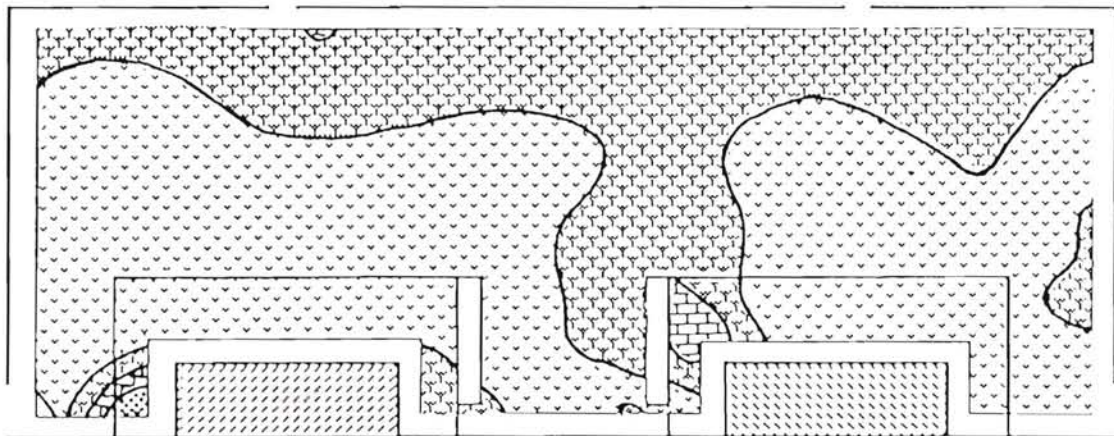
i. 換気回数の影響

分散分析の結果、換気回数に有意差が認められたので、換気回数5回/hと10回/hにおいて、平均変動係数についての差の検定を行なった。その結果、換気回数5回/hの平均変動係数は、換気回数10回/hの平均変動係数より0.031小さく、換気回数が少ないほど舎内の無次元温度分布は均一になるといえる。そこで、換気回数5回/hと10

回/hにおけるスロット全開、吹出温度差30K、第3測定面について比較した。



換気回数 5 回/h



換気回数 10 回/h

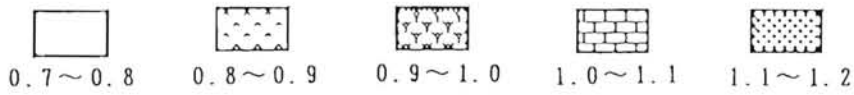


図2-7 スロット全開、吹出温度差30K、第3測定面の無次元温度分布

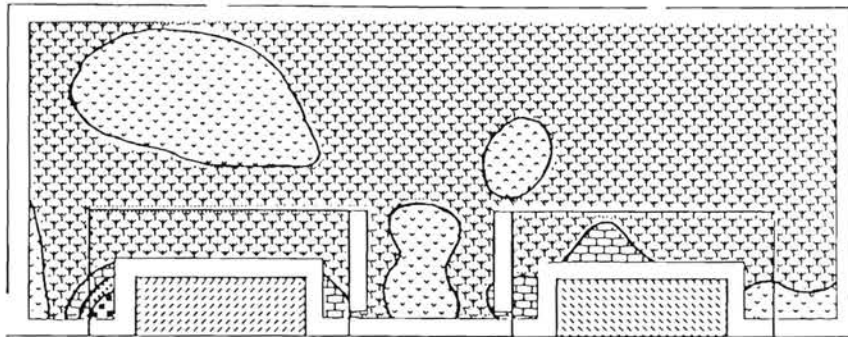
無次元温度分布を図2-7に示す。換気回数5回/hおよび10回/hとも0.8から0.9の無次元温度が測定面の大部分を占め、また、天井付近には無次元温度0.9から1.0の高温域が広がっている。この高温域は、冬期吹出気流速が小さく、吹出気流量も少ない、さらに豚体および床からの発熱量が多いために、暖められた空気が、浮力によって天井付近に上昇して、停滞することから形成されている。なお、換気回数10回/hの方が、5回/hよりも、その高温域が下方に及んでいるが、これは床からの発熱量が、5回/hの場合より、約1.2倍と多くなっているからで、高温域の分布状況は両者とも同じような形をしている。ただ、無次元温度の変動係数は換気回数5回/hで0.057、10回/hで0.066であったことから、分布の均一性は、上の変動係数の数値からも分かるように、5回/hの方が優れている。したがって、冬期にはできるだけ換気回数を少なくすることが必要であると温度分布からはいえる。

ii. 吹出温度差の影響

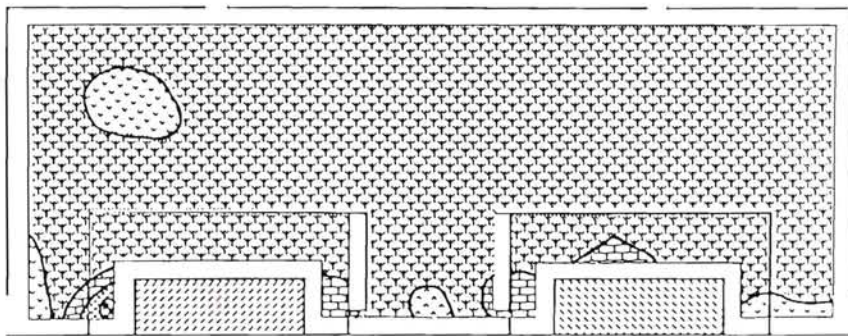
分散分析の結果、吹出温度差に有意差が認められた。しかし、吹出温度差毎の平均変動係数の差の検定を行なったところ、そこには有意な差を認めるにはいたらなかった。ただ、分散分析から有意差があったことから、換気回数5回/hかつスロット全開の場合について、第2測定面での、吹出温度差毎の、無次元温度分布を比較検討した。

無次元温度分布を図2-8に示す。平均無次元温度は、吹出温度差20K、25K、30Kの順に、 0.940 ± 0.075 、 0.956 ± 0.065 、 1.010 ± 0.104 であり、変動係数は0.080、0.068、0.103である。吹出温度差20Kでみられる左側スロットの下部の無次元温度0.8台の低温域は、吹出温度差が大きくなるにしたがって小さくなり、

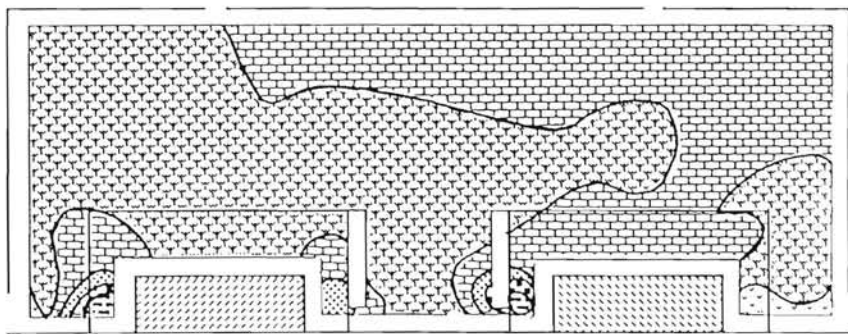
30Kになると無次元温度1.0台の高温域が右側豚房から天井まで達するようになる。豚房付近は発熱による高温域が形成される。吹出温度差が大きくなると、すなわち発熱量が多くなると当然のことながら、豚房付近はより高温になる。しかし、分散分析の結果および図より舎内全体に対する影響は小さなものであるといえる。



吹出温度差20K



吹出温度差25K

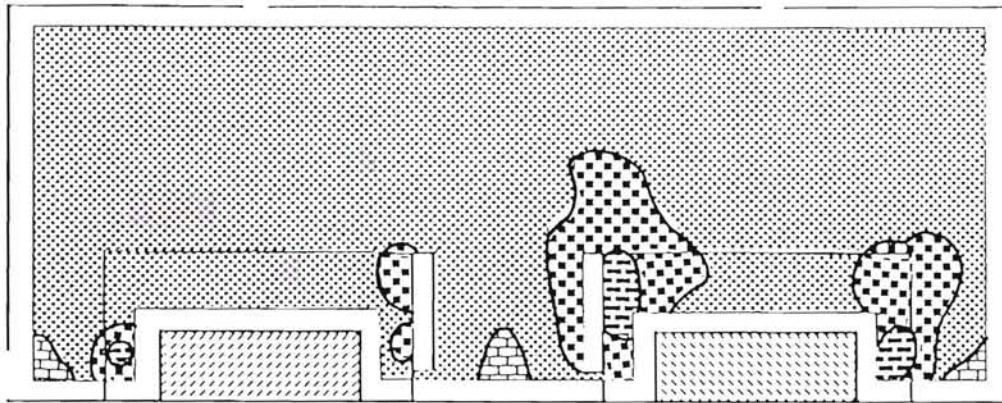


吹出温度差30K

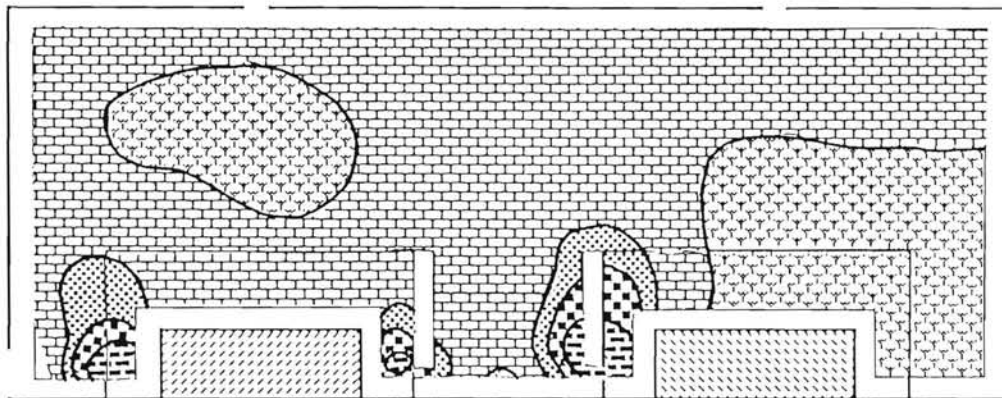


図2-8 換気回数5回/h、スロット全開、第2測定面の無次元温度分布

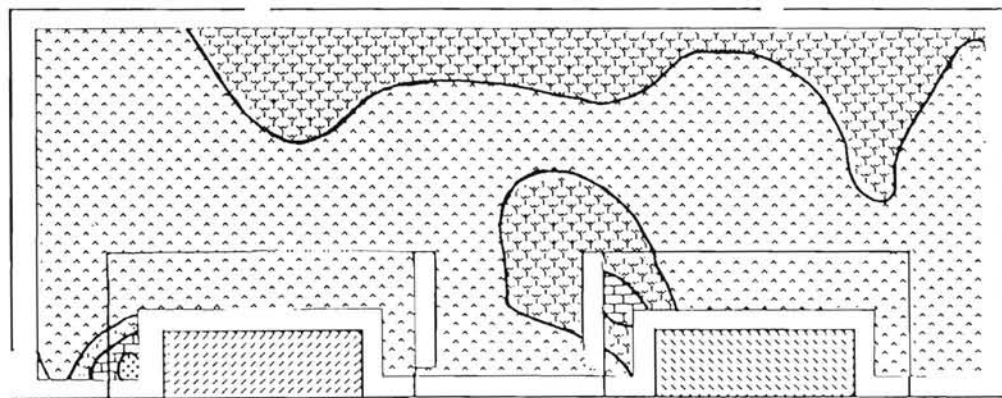
iii. 測定面位置の影響



第1断面



第2断面



第3断面

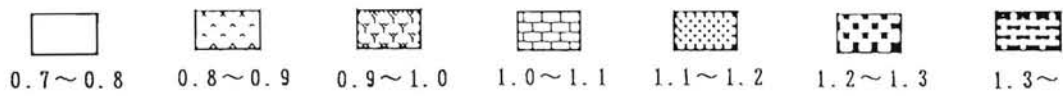


図2-9 換気回数10回/h、スロット半開、吹出温度差25Kの無次元温度分布

分散分析で測定面位置に有意差が認められたので、各測定面内における無次元温度の平均変動係数の差の検定を行なった。その結果、第1測定面と第3測定面の間には差がなかったが、第2測定面での数値0.110は第1測定面および第3測定面のそれより0.061および0.052大きい値を示した。したがって、第1測定面 \approx 第3測定面 $<$ 第2測定面の関係であり、第2測定面では他の測定面と比べて温度分布が不均一であるといえる。

換気回数10回/h、スロット半開、吹出温度差25Kについて、各測定断面の無次元温度分布を図2-9に示した。第1測定面では平均無次元温度は 1.176 ± 0.060 、同じく第2測定面で 1.056 ± 0.133 、また第3測定面で 0.897 ± 0.055 となった。これから、測定面位置が換気扇から遠ざかるにつれて、測定面での無次元温度は低くなるといえる。これは換気扇から遠ざかるにつれて、舎内よりも低温の空気が多く舎内に送入されるためである。なお、無次元温度の変動係数は第1測定面0.051、第2測定面0.126および第3測定面0.061であることから、第2測定面で最も大きく、第3測定面、第1測定面の順であった。

測定面のいずれも豚房柵付近に高温域が形成されているが、第1測定面および第2測定面ではそれが顕著にあらわれている。このうち第1測定面では空気の攪拌がほとんど行われなことから、豚体および床からの発熱により暖められた空気が測定面全体に停滞している。第2測定面では豚体とスロットの間に低温の吹出気流と発熱による暖かい上昇気流との平衡域が見られる。なお、この面での天井付近の1.0から1.1の領域は第1測定面の空気が天井に沿って、第2測定面に移動して来たものと考えられる。第3測定面では吹出気流速が大きいために、上昇気流とで形成される平衡域が形成されず、また、豚体付近まで吹出気流が到達することから、天井付近を除い

て無次元温度0.8から0.9で占められている。なお、ここでの天井付近の高温域も、第2測定面側から暖められた空気が天井沿いに移動して停滞するためと考えられる。無次元温度分布は第1測定面では内部発熱、第3測定面では吹出気流、第2測定面ではその両者によって影響を受けている。このことから第2測定面が最も不均一な無次元温度分布を示しているといえる。

冬期の理想的な温度分布とは、均一に排気口へと空気が流れ、かつ、豚房付近が暖かいことである。天井付近に暖かい空気が停滞することは、床面付近まで降りてきた汚染空気が上昇するということである。よって、床面付近まで降りてきた空気を、速やかに排出する気流分布を作り出す必要がある。