



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |                                                                                                                         |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 置換換気される室内の機器排熱が室温分布へ与える影響                                                                                               |
| Author(s)        | 劔持, 圭佑; 羽山, 広文; 森, 太郎 他                                                                                                 |
| Citation         | 日本建築学会環境系論文集, 77(677), 591-597<br><a href="https://doi.org/10.3130/aije.77.591">https://doi.org/10.3130/aije.77.591</a> |
| Issue Date       | 2012-06-30                                                                                                              |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/53620">https://hdl.handle.net/2115/53620</a>                                       |
| Type             | journal article                                                                                                         |
| File Information | AIJ.JEE.677.591-597.pdf                                                                                                 |



# 置換換気される室内の機器排熱が室温分布へ与える影響

## THE EFFECTS OF EXHAUST HEAT TO TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A DISPLACEMENT VENTILATED ROOM

劔持圭佑\*, 羽山広文\*\*, 森 太郎\*\*\*, 菊田弘輝\*\*\*\*, 福島 明\*\*\*\*\*

*Keisuke KEMMOCHI, Hirofumi HAYAMA, Taro MORI,  
Koki KIKUTA and Akira FUKUSHIMA*

There had previously been many studies about displacement ventilation systems, but only a few cases mentioned mechanism of heat emitting. Therefore, this study presents the effects of adjusting heights and air volume of heat emitting to the indoor thermal environment by experiments of the model and the factory installed a displacement ventilation system. As results of them, adjusting heights and air volume of heat emitting avoids rise in temperature at the low level in the room. And it was suggested that a normalized temperature can be given as an unique function of the Archimedes number.

**Keywords :** Displacement ventilation, Factory, Model experiment, Temperature distribution, Archimedes number

置換換気, 工場, 模型実験, 温度分布, アルキメデス数

### 1. はじめに

従来、簡易な換気設計の場合では室内の温度や汚染質濃度が一様分布しているという条件のもとで計算が行われる。しかし、それらの分布から求められる換気効率を加味した設計について、SHASE-S102<sup>1)</sup> 等において提案がなされている。その中でも置換換気方式は換気効率の良い方式として注目されている。

置換換気方式はそもそも、1970年代に工場などの労働環境改善を目的として開発、適用され始め、北欧を中心に進展・利用されている方式である。1980年代後半には商業施設などの一般環境でも利用されるようになり、日本でも現在施工事例や研究事例が増え、その用途も工場からオフィス・ホール・病院など様々である<sup>2)</sup>。

換気方式としては、室温よりやや低い温度の空気を低速で空間下部から供給し、居住域より上部で排気を行うものである。搬送は空気の浮力を利用しており、空間上部の高温（汚染空気）領域と、下部の低温（新鮮空気）領域との密度差に基づいている。そのため汚染空気は主たる発生源である機械や人体からのブルームによって効率的に搬送され、居住域は清浄に保たれやすい。また各領域の境界高さは給気量と発熱源からの上昇ブルーム風量の割合によって決定され、理想的な状態では両者が等しくなる高さが境界となる<sup>3)</sup>。

この方式の利点は換気効率の良さであり、汚染質の効率的な除去がなされることで混合空調に比べ居住域で良質な空気質が確保でき

る。また居住域の温度よりもやや低い温度での吹出しでよいと、給気温度を高く設定でき、特に外気冷房と併用した場合は、その適用期間が長く設定できる。一方で、吹出口に設置スペースが必要であり、床面に沿うコールドドラフトにも留意する必要がある。また、工場などで機械が排熱を行う場合、ブルーム以外に排熱風が放出され、居住域空気と混合してしまうために下部の低温領域が形成されず、すぐに温度が上がりきってしまう場合もある<sup>4)</sup>。

これまで、置換換気方式については様々な研究がなされてきた。温度分布性状については、Nielsen<sup>5)</sup> が流れのアルキメデス数を考慮した、異なった熱源における居住域の温度分布モデルの検討を行っている<sup>5)</sup>。また、Nielsen<sup>6)</sup> は壁面設置型吹出口からの気流性状についても検討を行っている<sup>6)</sup>。人体からの発熱と、室内の汚染質の分布についてはMundt<sup>7)</sup> が実験を行っており<sup>7)</sup>、空気交換効率などを用いて人体等発熱源周囲では局所的な熱上昇流が発生し、下部の新鮮空気がそれに沿って搬送される事等を述べている。このようにして、概ねこの換気方式に対する基礎的な研究はなされており、設計方法としてもまとめられている<sup>3)</sup>。

日本国内においても研究事例は増えており、その多くは実大模型実験やCFDによる検討が多い。近年のOA化から、対象建物としてオフィスや一般の室を対象とした場合が多く、加藤ら<sup>8)</sup> はオフィス空間での換気効率を検討するため標準化居住域濃度の解析を行い、

\* 北海道大学大学院工学院 修士課程

\*\* 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)

\*\*\* 北海道大学大学院工学研究院 准教授・博士(工学)

\*\*\*\* 北海道大学大学院工学研究院 助教・博士(工学)

\*\*\*\*\* 北海道立総合研究機構建築研究本部 博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido University

Prof., Faculty of Eng., Hokkaido University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido University, Dr. Eng.

Assistant Prof., Faculty of Eng., Hokkaido University, Dr. Eng.

Hokkaido Building Research Department, Dr. Eng.

また訪問回数(単位時間あたりに汚染質が対称領域に再帰する回数)を指標として用いることで汚染質排出のスムーズさという観点からも検討を行っている。同様に秋元ら<sup>9)</sup>もオフィス空間を対象とした研究を行っており、床吹出での置換換気について、OA化を考慮した複数の熱源種類による検討を行っている。さらに徐ら<sup>10)</sup>は置換換気に際しての壁面からの下降流が汚染物濃度の鉛直分布へ及ぼす影響について研究を行っている。

しかし、上記のような研究はオフィスや居室を対象としている。置換換気は天井高の高い空間への利用にも適しているため、このような空間への研究と適用も望まれる。これまで扱われたものとしては、李ら<sup>11)</sup>による音楽ホールの実測などがある。また工場を対象としたものとしては代表的なものに西岡<sup>12)</sup>の研究があり、模型実験による相似則の検討と共に温度成層を考慮した換気計算法を示している。その他にも飯野ら<sup>13)</sup>により工場空間を対象としたCFD解析の研究が行われ、加えて実施事例の検討として羽山ら<sup>14)</sup>の研究などがある。しかしこれら研究では発熱源からの熱対流による空気流れを考慮しており、機器から冷却ファンによって強制的に排熱がなされている場合について、それが温度分布へ与える影響については検討がない。そこで、本研究ではこの排熱に着目し、以下の検討を行う。

- 1) 置換換気が導入された工場を想定して模型を作製し、排熱高さや風量をパラメーターにした実験によってそれらの温度分布への影響を分析・評価する。
- 2) 排熱の条件から  $Ar$  数を求め、居住域温度との関係を見る。
- 3) 置換換気が導入されている既存の工場を対象にして、工作機械の排熱高さを変え、実際にどの程度温度分布が変化するかを調査し、 $Ar$  数の算出と検討を行う。

## 2. 模型の概要

### 2.1 相似則

縮小模型を用いる際の相似則についてはほぼ確立され、西岡、村上らがこれをまとめている<sup>12), 15)</sup>。また、特に置換換気場に関しては上下温度分布に起因する天井・床間の放射熱移動量を考慮した研究を山中らが行っている<sup>16)・18)</sup>ことから、本研究では主としてこれらの相似則を用いている。その相似条件としては境界条件に関するもの、室内空気分布に関するものの2種類があり。前者に関しては幾何的相似と熱的相似、また後者に関しては力学的相似とエネルギー的相似を考える。

境界条件に関する相似条件に関しては幾何的、熱的な相似を図るが、置換換気される室では上下温度分布が比較的大きいことから、放射の影響は無視できないと考えられるため、伝導、伝達、放射、換気全ての熱流比の一致を相似条件とする。各熱流に関する基本式から縮率の式にすると、

$$\begin{aligned} n_{Q1} &= n_r^{-1} n_l^2 n_{\Delta\theta}^2, \quad n_{Q2} = n_\alpha n_l^2 n_{\Delta\theta} \\ n_{Q3} &= n_\varepsilon^2 n_\kappa n_l^2 n_{\Delta\theta}^2, \quad n_{Q4} = n_u n_l^2 n_{\Delta\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

これら熱流比の一致から、

$$n_{Q1} = n_{Q2} = n_{Q3} = n_{Q4} = n_Q \quad (2)$$

となる。

室内空気分布に関する相似条件に関してはナビエ・ストークスの方程式より得られる無次元数の一致を図る。

置換換気室において吹出気流は強制対流場、発熱源による熱対流は自然対流場となるので、吹出気流の  $Re$  数、 $Ar$  数と、発熱体近傍の  $Gr$  数の一致を条件とする。ただし、壁面近傍の乱流境界層を除く室内気流の大半は十分発達した乱流域であり、ここで渦動粘性係数を用いた乱れのレイノルズ数( $Re_t$ 数)を定義する<sup>19)</sup>。

$$Re_t = UL/v_t \quad (3)$$

このとき、十分発達した乱流域においては以下が成立する事が明らかとなっている。

$$v_t \propto UL \quad (4)$$

そのため、壁面近傍を除いた乱流域での  $Re_t$  数は自動的に一致し、これを近似相似則に用いる。

強制対流場においては乱流域での  $Re_t$  数の自動一致から  $Ar$  数のみを相似条件とする。また、自然対流場においても渦動粘性係数を用いた乱れのグラスホフ数( $Gr_t$ 数)を定義し、これが支配的となる。

$$Gr_t = g\beta\theta L^3/v_t^2 = Re_t^2 Ar \quad (5)$$

式(5)より、近似相似則としては強制対流場同様  $Ar$  数のみを相似条件とする。なお、空気を用いた実験の前提として  $Pr$  数の一致は自明とする。 $Ar$  数の一致条件は以下である。

$$n_{\Delta\theta} n_l / n_u^2 = 1 \quad (6)$$

以上の式 (1) (2) (6)より、置換換気室の近似相似則における各物理量の縮率の関係式を以下とし<sup>注1)</sup>、縮率算定を行う。

$$\begin{aligned} n_u &= n_{\Delta\theta}^{1/2} n_l^{1/2}, \quad n_Q = n_{\Delta\theta}^{3/2} n_l^{5/2}, \quad n_\alpha = n_u, \quad n_\varepsilon = n_u^{1/2} n_\kappa^{-1/2} \\ n_r &= n_{\Delta\theta}^{-1/2} n_l^{-1/2}, \quad n_\kappa = n_{\Delta\theta}^{-1} \frac{(T_M + n_{\Delta\theta}\theta)^4 - T_M^4}{(T_R + \theta)^4 - T_R^4} \end{aligned} \quad (7)$$

本実験では放射率の縮率を1とするよう温度差と長さの縮率を定めた。また  $n_\kappa$  の基準温度は実物・模型とも給気温度として 293[K] を、代表温度差は山中らの研究<sup>17)</sup>より天井床面温度差 1[K]を用いた。

### 2.2 模型の作製

模型の概要を図1に示す。模型はフォームポリスチレン充填の断熱室に、給排気口を設けて換気室とした。給気はほぼ一定の温度を保つようにして模型外の空気を導入している。内部の発熱体(熱源模型)は、排熱高さ・風量の影響をみるため断熱材(フォームポリスチレン、50[mm])を使用し、温度測定点への放射の影響を防ぐため内部はアルミニウムでカバーをした。熱源には電気ヒーターを使用し、電圧を変化させて発熱量を制御した。排熱高さは排熱管(フォームポリスチレン)を用いて変化させた。計測は各測定点へ熱電対を設置し、温度計測を行った。また、事前に換気を行わない状態で実験模型内の加熱を行い、その内外温度差から貫流熱損失を計算した。本実験における総合熱貫流率は 17.5[W/K]であった。

## 3. 模型実験の概要

### 3.1 縮率

前項(7)式より、長さの縮率を 0.5、温度差の縮率を 2.0 として他の縮率を求めた。計算結果は表1に示す。また、この縮率で想定される実験室の寸法を表2に示す。

### 3.2 計測

本研究では垂直温度分布の計測を行った。模型内の垂直温度は、高さ方向に6点、平面方向には4箇所配置し計24点、そのほか室の給排気温度、発熱体の給排気温度(機器冷却ファン部と排熱管内部)の計28点をT型熱電対で計測した。

なお、本研究では工場を対象としているため、実際には汚染質も発生する環境にある。今後より詳細な条件を導入するにあたっては考慮すべき事項と考えられるが、本研究では空調設計に係る温度分布への影響の調査を主目的としているため汚染質等の濃度分布には今回触れていない。ただし、工作機械から発生する汚染質は周辺空気より温度が高く、その場合全ての汚染質は対流によって直接上部へ搬送されと考えられるため<sup>3)</sup>、今回は温度分布に主眼を置き検討を行う。

### 3.3 換気流量比

風量に関しては、換気風量と発熱体からの排熱風量の比で考え、換気風量を排熱風量で除したものを換気流量比（以下  $K_m$ ）<sup>20)</sup>として用いた。式は以下による。

$$K_m = \frac{V}{V_m} \quad (8)$$

### 3.4 パラメーター

発熱量を2水準、 $K_m$ は6水準、排熱高さを9水準とし、それらの組み合わせで実験を実施した。値を表3に示す。ただし表中の  $k_v$  については4.1項、 $Ar$ については4.2項にて述べる。

## 4. 実験結果

### 4.1 規準化温度・温度差比

温度勾配の比較を行うため計測結果から無次元化した規準化温度（以下  $k_v'$ ）をとった。規準化温度は給排気温度差に対する各計測点の給気からの温度上昇を示しており、式では以下ようになる<sup>16)</sup>。

$$k_v' = \frac{\theta_i - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (9)$$

また、置換換気では室内居住域における温度上昇を防ぐ事が肝要である。居住域での温度上昇をみる指標として温度差比<sup>12)</sup>を用いる。

$$k_v = \frac{\theta_a - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \quad (10)$$

温度差比（以下  $k_v$ ）は居住域の温度上昇を示すとともに、置換換気においては換気風量の削減に用いられる指標ともなる<sup>14)</sup>。この値が小さい程居住域は低温に保たれ、風量の削減量は増加する。

居住域については想定する実大の室高さ 2,100[mm]までを居住域とし、模型の室内計測点4箇所の高さ0、550（想定1,100）、1,050（想定2,100）[mm]における温度の平均を居住域温度としている。

また温度勾配の比較と傾向の把握を行う為、パラメーターの組み合わせに風量変化が均等な  $K_m=3.0$ 、1.5、1.0 を用い、排熱高さを6通りとして発熱量 567[W]の際の温度を計測した（表3、実験No.1-18）。

実験結果により温度の指標を求めた結果を図2に示す。グラフは排熱高さ毎に  $k_v$  の垂直分布を表しており、どの場合にも温度勾配がみられる。

顕著な温度上昇がみられる位置、つまり低温領域と高温領域の境界の高さは排熱高さにより変化している。 $k_v'$ でみると  $k_v'$  が0.3から0.9の範囲で温度勾配が顕著となり、その上部が熱だまりとなる。同じ排熱高さの  $K_m$  同士では、その値が大きい程境界高さは上部へ遷移する。これは排熱風量に対する室換気風量が多いためと考えられる。また、給気量と上昇ブルームの量が等しい高さに境界層が形成されるという置換換気方式の傾向<sup>3)</sup>からは  $K_m=1.0$  の時に温度上

昇高さと排熱高さが等しくなると予測されるが、本実験では  $K_m=1.5$  の場合に排熱高さとほぼ同じ高さから温度上昇を始めている。これは、熱源が自然対流ではなく吹出風速をもった噴流のため、気流の乱れ等から排熱気流が一部下方へ再循環した可能性等が考えられる。

表1 縮率

| 縮率計算項目                 | 縮率   |
|------------------------|------|
| 長さ $n_l$               | 0.50 |
| 放射率 $n_e$              | 1.00 |
| 温度差 $n_{\Delta\theta}$ | 2.00 |
| 風速 $n_u$               | 1.00 |
| 放射の線形化係数 $n_k$         | 1.01 |
| 発熱量 $n_Q$              | 0.50 |
| 熱伝導抵抗 $n_r$            | 1.00 |

表2 実験室寸法

| 実験室寸法 | 縮率0.5模型        | 想定実物  |
|-------|----------------|-------|
| 室高さ   | m              | 2.1   |
| 室幅    | m              | 1.5   |
| 室奥行き  | m              | 1.5   |
| 床面積   | m <sup>2</sup> | 2.25  |
| 容積    | m <sup>3</sup> | 4.725 |
|       |                | 37.8  |

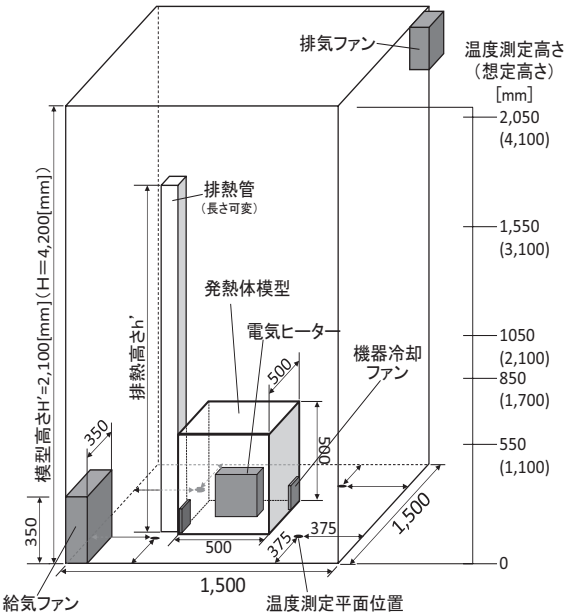


図1 模型概要

表3 パラメーターと結果

| 実験<br>No. | 発熱量                                                 | $h$              | $V$         | $V_m$        | $K_m$       | $k_v$ | $Ar$  |       |
|-----------|-----------------------------------------------------|------------------|-------------|--------------|-------------|-------|-------|-------|
|           | W                                                   | mm               | CMH         | CMH          | -           | -     | -     |       |
| 1         | 567<br>(283.5)<br><br>発熱強度<br>15[W/m <sup>3</sup> ] | 210<br>(105)     | 360<br>(90) | 120(30)      | 3.0         | 0.64  | 0.408 |       |
| 2         |                                                     |                  |             | 240(60)      | 1.5         | 0.72  | 0.083 |       |
| 3         |                                                     |                  |             | 360(90)      | 1.0         | 0.79  | 0.029 |       |
| 4         |                                                     | 1,000<br>(500)   |             | 120          | 3.0         | 0.39  | 0.615 |       |
| 5         |                                                     |                  |             | 240          | 1.5         | 0.45  | 0.088 |       |
| 6         |                                                     |                  |             | 360          | 1.0         | 0.61  | 0.011 |       |
| 7         |                                                     | 1,550<br>(775)   |             | 120          | 3.0         | 0.17  | 0.498 |       |
| 8         |                                                     |                  |             | 240          | 1.5         | 0.27  | 0.078 |       |
| 9         |                                                     |                  |             | 360          | 1.0         | 0.44  | 0.013 |       |
| 10        |                                                     | 2,100<br>(1,050) |             | 120          | 3.0         | 0.16  | 0.520 |       |
| 11        |                                                     |                  |             | 240          | 1.5         | 0.17  | 0.088 |       |
| 12        |                                                     |                  |             | 360          | 1.0         | 0.27  | 0.021 |       |
| 13        |                                                     | 3,200<br>(1,600) |             | 120          | 3.0         | 0.14  | 0.432 |       |
| 14        |                                                     |                  |             | 240          | 1.5         | 0.12  | 0.084 |       |
| 15        |                                                     |                  |             | 360          | 1.0         | 0.25  | 0.022 |       |
| 16        |                                                     | 4,000<br>(2,000) |             | 120          | 3.0         | 0.17  | 0.715 |       |
| 17        |                                                     |                  |             | 240          | 1.5         | 0.17  | 0.130 |       |
| 18        |                                                     |                  |             | 360          | 1.0         | 0.30  | 0.042 |       |
| 19        | 1,134<br>(567)<br><br>発熱強度<br>30[W/m <sup>3</sup> ] | 900<br>(450)     | 360<br>(90) | 372.8(93.2)  | 142.8(35.7) | 2.6   | 0.47  | 0.220 |
| 20        |                                                     |                  |             | 372.8(93.2)  | 372.8(93.2) | 1.0   | 0.57  | 0.017 |
| 21        |                                                     |                  |             | 532.4(133.1) | 372.8(93.2) | 1.4   | 0.54  | 0.051 |
| 22        |                                                     | 1,800<br>(900)   |             | 372.8        | 142.8       | 2.6   | 0.18  | 0.285 |
| 23        |                                                     |                  |             | 372.8        | 372.8       | 1.0   | 0.31  | 0.026 |
| 24        |                                                     |                  |             | 532.4        | 372.8       | 1.4   | 0.19  | 0.063 |
| 25        |                                                     | 2,500<br>(1,250) |             | 372.8        | 142.8       | 2.6   | 0.15  | 0.268 |
| 26        |                                                     |                  |             | 372.8        | 372.8       | 1.0   | 0.24  | 0.033 |
| 27        |                                                     |                  |             | 532.4        | 372.8       | 1.4   | 0.15  | 0.065 |
| 28        |                                                     | 3,200<br>(1,600) |             | 372.8        | 142.8       | 2.6   | 0.14  | 0.269 |
| 29        |                                                     |                  |             | 372.8        | 372.8       | 1.0   | 0.22  | 0.034 |
| 30        |                                                     |                  |             | 532.4        | 372.8       | 1.4   | 0.11  | 0.066 |

※括弧内は模型実寸

$k_v$  は居住域温度が低い程小さくなるため、排熱高さが高く、 $K_m$  が大きいほど小さな値をとる。図 2 では発熱量、室換気風量一定条件での比較を行ったが、表 3 の No.19-30 においても同様の傾向があり、排熱風量が一定でも室換気風量が多ければ  $k_v$  は小さくなった。また、排熱高さが 3,200[mm] で等しく  $K_m$  が近い No.13 と 28、No.14 と 30、No.15 と 29 を比較するとそれぞれほぼ同じ値を示しているため、 $k_v$  に対する発熱量の影響は少ないと考えられるが、これにはさらにパターンを追加して確認する必要がある。

また、排熱高さ 3,200[mm] と 4,200[mm] のグラフでは温度勾配の性状がほぼ変化せず、加えて  $K_m$  が 1.5 と 3.0 で近い温度勾配となる。そのため、排熱高さや  $K_m$  が一定値以上の範囲では  $k_v'$  や  $k_v$  への影響が極めて小さくなる事が分かる。

#### 4.2 アルキメデス数

本研究は、置換換気される室内での鉛直方向に吹き出される排熱気流を扱っている。温度成層ができる室にてこれは非等温噴流となるので、吹出流速による慣性力・粘性力の他に浮力の影響を受ける。また、鉛直方向の非等温噴流については浮力と慣性力の影響が支配的となるため、この 2 つを用い、

$$Ar = \frac{g\beta\theta}{u^2/L} = \frac{g\beta\theta L}{u^2} \quad (11)$$

で定義される  $Ar$  数が室内温度分布へ大きな影響を及ぼす<sup>19),21)</sup>。

本研究においては、排熱に関する諸条件が室内温度勾配へ及ぼす影響を検討する。そのため式(11)における代表温度差を排熱吹出温度差（以下吹出温度差）とし、

$$\theta = \Delta t_0 \quad (12)$$

とする。また代表長さは排熱吹出口有効直径（以下吹出口径）

$$L = d_0 \quad (13)$$

代表風速は排熱吹出平均風速（以下吹出風速）

$$U = v_0 \quad (14)$$

を用いている。

以上の式(11)-(14)を用い、前項の  $k_v$  の傾向を把握するため、 $Ar$  数との関係をとった。パラメータは表 3 の 30 通り全てを用い、それぞれの  $k_v$  と  $Ar$  を計測・計算した。この時の両者の関係は図 3 のようになる。

$Ar$  数は、その式に温度差、速度、長さの項を含んでいるが、先に述べたように本研究では温度差は吹出温度差、速度は吹出風速、長さは吹出口径を用いている。標準化温度分布では排熱高さによる影響が強い傾向が表れたが、 $Ar$  数にはこれが含まれていないため排熱高さによる  $k_v$  の差が大きく現れた。

全体としては程度の違いはあるが  $Ar$  数が大きいほど  $k_v$  は小さくなる傾向にある。式(11)-(14)によれば吹出温度差、吹出口径が大きい程  $Ar$  数は大きくなり、吹出風速が小さいほど  $Ar$  数は小さくなる。

吹出口径、発熱量が一定の場合、排熱風量が少なければ吹出風速は小さく、温度差は大きくなるため  $Ar$  数は大きくなり、これは 4.1 項での  $K_m$  が大きいほど  $k_v$  が小さくなる傾向と一致する。ただし、排熱高さと同様に  $Ar$  数に含まれない室換気風量によっても  $k_v$  は変化し、また反対に  $Ar$  数に含まれる吹出温度差に影響する発熱量が  $k_v$  へ影響しない可能性も 4.1 項で唆された。また、吹出口径に関しても本研究では一定としているため、これら  $Ar$  数以外のパラメータについても今後より検討する必要がある。

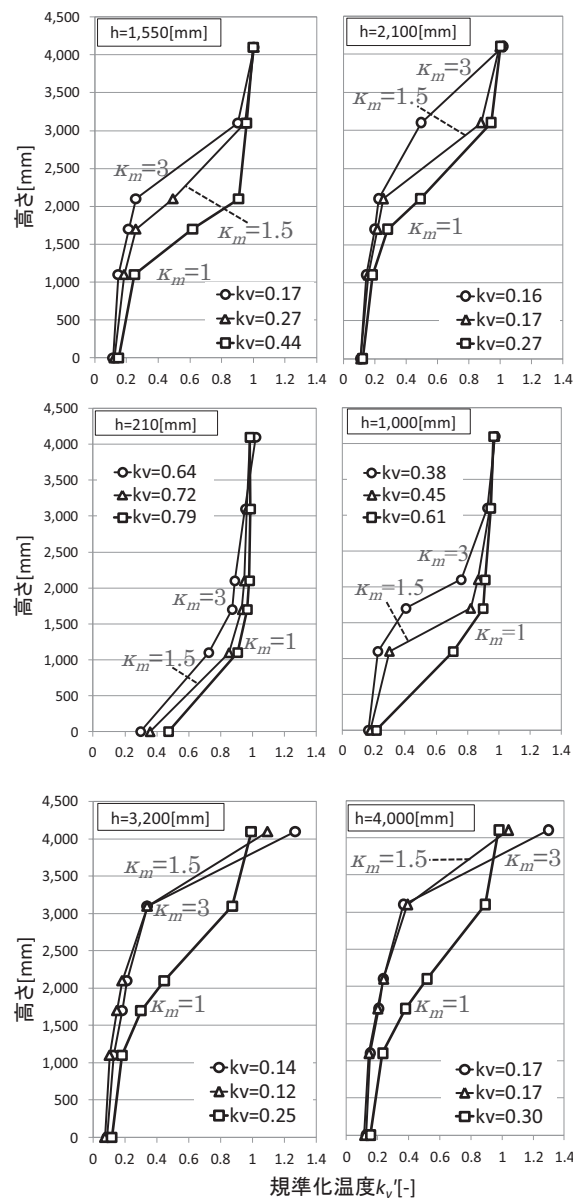


図 2 標準化温度分布 (No.1-18)

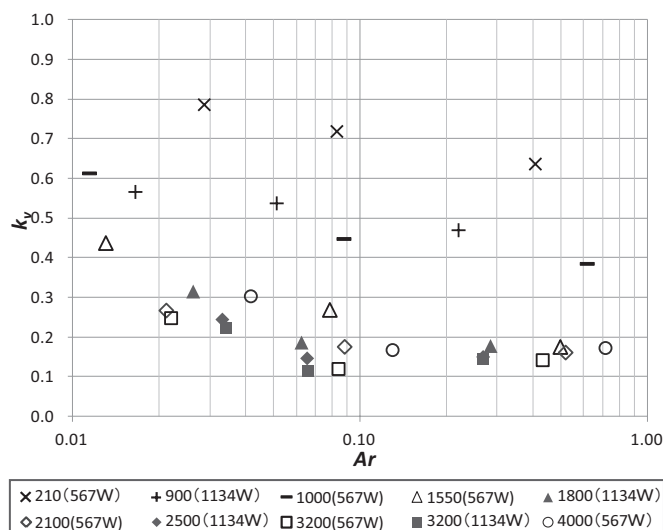


図 3  $k_v$  と  $Ar$  数の関係

しかし、4.1 項の規準化温度分布において排熱高さや  $K_m$  が一定値以上になると  $k_v$  への影響が小さいという傾向が見られたが、これと同様な傾向は図 3 においても確認された。本実験条件においては排熱高さ 1,550[mm]以上で  $k_v$  と  $Ar$  数の関係が近しくなり、 $Ar$  数が 0.1 を超えるあたりから  $k_v=0.1-0.22$  の範囲に値が集中した。

したがって、 $k_v$  の増減と  $Ar$  数の増減に関して一定の関係性は確認されたが、発熱量その他の条件を加味する必要から、定量把握には今後さらに実験パターンを増やす必要がある。

## 5. 既存建物における検証

### 5.1 建物概要

本項では北海道夕張市の S 社工場を対象としている。概要を表 4 に示す。この工場には切削油ミストの出る工作機械が多数設置され、ほぼ 24 時間稼働している。ここでは外気冷房併用型置換換気方式を導入しており、同社の混合換気方式の工場に対し省エネルギーとなっている<sup>22)</sup>。

しかし、現状で工作機械は室内の低位置で排熱を行っているため、この工場内の工作機械に対し排熱高さ制御を行う。これにより居住域でのさらなる温度上昇低減が可能か実験による検証を行った。

### 5.2 工作機械概要

工場内には金属加工用の工作機械が設置されている。排熱位置は 4 箇所あり、うち 3 箇所は低位置（床 270、325、540[mm]）で横方向へ排熱している。実験ではこの 3 箇所へカバーを仮設し、排熱高さを 1,800[mm]に変更した。図 4 にカバーの概要、写真 1 に仮設の様子を載せる。なお、本実験の排熱温度が 30[℃]程度であったためカバーからの貫流は少ないものとみなし、カバーには金属板とアルミのフレキシブルダクトを用いている。

表 4 対象建物概要

| S 社工場 |        | 工場部分容積 | m <sup>3</sup> | 3,775 |
|-------|--------|--------|----------------|-------|
| 建物用途  | 精密金属加工 | 工場部分面積 | m <sup>2</sup> | 755   |
| 階数    | 平屋建て   | 工場部分階高 | mm             | 5,000 |

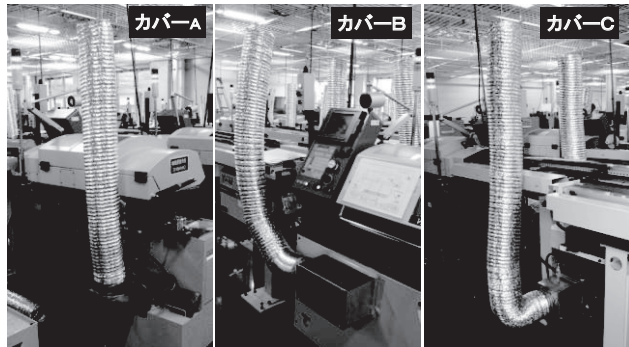


写真 1 排熱カバー設置の様子

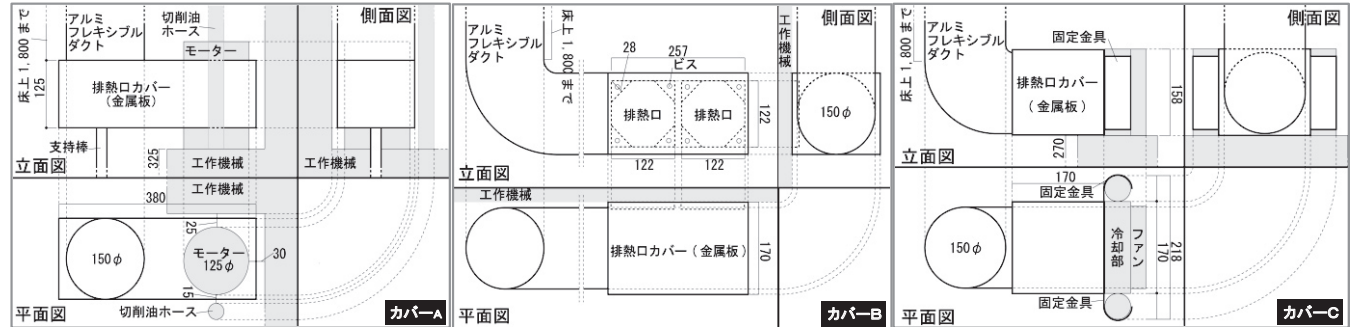


図 4 排熱カバー図

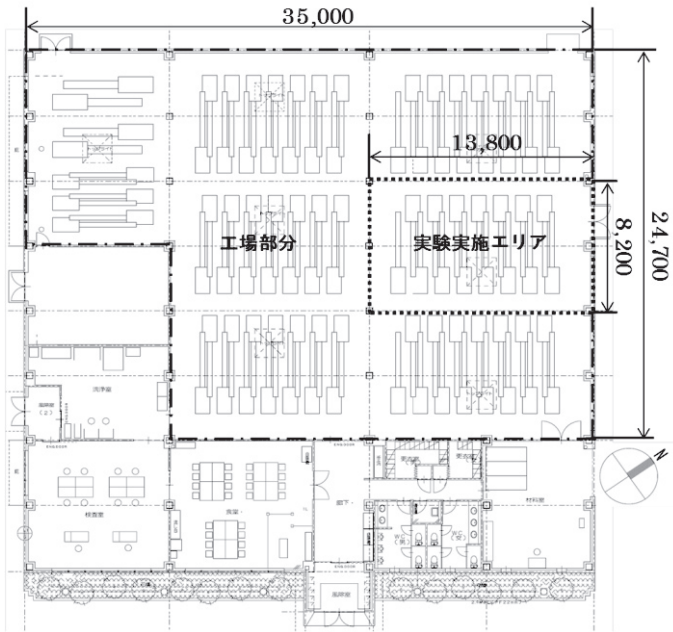


図 5 工場平面図

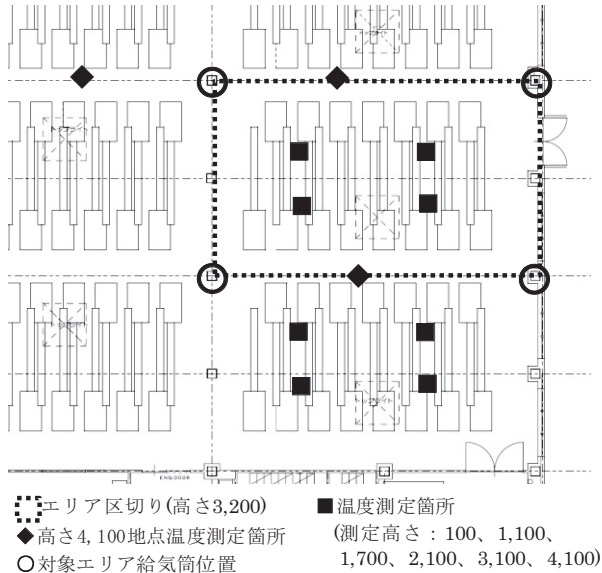


図 6 計測点位置

表 5 対象エリア諸元

|      |                  |       |         |     |       |
|------|------------------|-------|---------|-----|-------|
| 面積   | m <sup>2</sup>   | 113.2 | 換気量     | CMH | 4,980 |
| 機器電力 | kW               | 17.4  | 排熱風量    | CMH | 3,065 |
| 発熱強度 | W/m <sup>3</sup> | 30.8  | → $K_m$ | —   | 1.63  |

5.3 実験概要

実験は工場内の一区画を実験実施エリアとし、天井高さ(3,200[mm])までをビニールシートで囲い、空間を独立させる。エリア内の工作機械 16 台にカバーを設置し、温度分布及を外部の現状の状態と比較した。エリア図及び計測点は図 5、図 6 の通り。なお 4,100[mm]地点はエリアの区切りより上部であるため計測点が異なる。また給気に関しては、エリアの 4 隅に円筒型の給気口が設置されているため、エリアを区切るビニールシートを用いて円筒を区切り、給気を対象エリア分だけ按分した。

5.4 実験結果

エリア内外それぞれの温度計測点 4 点の平均から規準化温度をとった。計測結果を表 6 に、規準化温度の垂直分布を図 7 に示す。

結果から、排熱カバー設置の方が高さ 1,700[mm]より下で温度上昇が少ない。排熱高さ 1,800[mm]よりも上部ではカバー設置の有無に関係なくほぼ値は変化せず、 $k_v'$  の値も 0.9 を超えた状態となる。居住域の値でみると、カバー設置は現状に対して温度上昇が 1[°C] 低く、 $k_v$  にすると 0.1 の差となった。

ただし、本実験での幾何的条件や値の範囲は模型実験に対応しきれておらず、同様な条件での模型実験を行うなど今後の確認が必要である。しかし、排熱高さ変更によって居住域の温度上昇に対し一定の効果が表れる事が既存の工場でも確認された。

6. まとめ

置換換気される工場を想定し、工作機械の排熱が室内の温度分布へ与える影響を検討するため、模型実験と既存の工場での実験を行い、 $k_v$  や Ar 数等の関係を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 置換換気を導入した工場を想定し、縮小模型を作製、実験を行い、温度成層を確認した。温度成層はおおよそ  $k_v'=0.3-0.9$  の範囲で温度勾配が顕著となり、その上昇開始位置より上部が熱だまりとなる。熱だまりの高さは排熱高さが高い程、また  $K_m$  が大きい程上部へ移動する。それに伴い居住域温度は下がり、 $k_v$  は減少する。ただし、排熱高さや  $K_m$  が一定値を超えると減少が軽微になる。
- 2) 排熱条件を考慮するため、排熱吹出条件を用いて Ar 数の算出をし、 $k_v$  との関係を見た。排熱高さといった条件毎に一定の傾向を示したが、発熱量や室換気風量等の影響を加味して定量把握を行うにはより多くの実験が必要である。
- 3) 置換換気方式が導入された既存の工場を対象に、工作機械の排熱高さを排熱カバーの仮設によって床上 1,800[mm]まで持ち上げ、現状との比較を行った。結果、居住域における温度上昇が減少し、 $k_v$  が 0.1 下がったことで、既存の工場においても実際に一定の効果を確認することができた。

以上の結果から、機器排熱を操作することで居住域の温度上昇を抑えられることを確認し、また排熱条件から算出される Ar 数から  $k_v$  を用いて温度分布の予測ができる可能性を示した。

ただし、2) で述べた事に加え、発熱量、換気流量比、排熱高さをパラメーターに用いた今回の模型実験では室自体の高さや排熱する方向や吹出口なども固定している。そのため本研究における Ar 数や  $k_v$  は今回の実験条件のみの適用といえる。一般的な性状として成立するにはそれら項目についても今後検討の余地がある。

表 6 計測結果

| 高さ<br>mm | 温度<br>°C |      | $k_v'$ ( $k_v$ )* |      |
|----------|----------|------|-------------------|------|
|          | エリア外     | エリア内 | エリア外              | エリア内 |
| 4,100    | 28.3     | 28.0 | 1.00              | 1.00 |
| 3,100    | 28.1     | 27.7 | 0.98              | 0.96 |
| 2,100    | 28.0     | 27.8 | 0.97              | 0.97 |
| 1,700    | 28.0     | 27.6 | 0.97              | 0.94 |
| 1,100    | 27.7     | 26.8 | 0.93              | 0.82 |
| 100      | 26.6     | 24.9 | 0.78              | 0.57 |
| SA       | 20.8     | 20.8 | 0.00              | 0.00 |
| 居住域平均    | 27.5     | 26.5 | 0.89              | 0.79 |

\*居住域平均については  $k_v$  となる

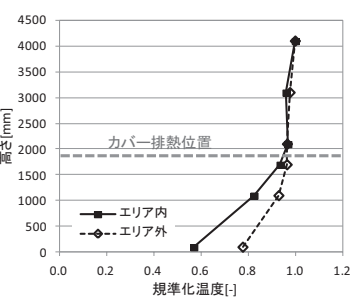


図 7 規準化温度分布

謝辞

本研究においては、恒星設備株式会社の加藤祐一氏、伊崎直人氏の多大なる協力を得て実験を行った。記して感謝する。

記号表

- Ar : アルキメデス数[-]

Gr : グラスホフ数[-]

Gr<sub>t</sub> : 乱れのグラスホフ数[-]

Re : レイノルズ数[-]

Re<sub>t</sub> : 乱れのレイノルズ数[-]

H : 室高さ[m]

H' : 模型高さ[m]

L : 代表長さ [m]

Q : 発熱量 [W]

Q1 : 伝導による熱流[W]

Q2 : 伝達による熱流[W]

Q3 : 放射による熱流[W]

Q4 : 換気による熱流[W]

T<sub>M</sub> : 代表温度(模型) [K]

T<sub>R</sub> : 代表温度(実物) [K]

U : 代表速度 [m/s]

V : 換気量 [m<sup>3</sup>/s]

V<sub>m</sub> : 機器排熱風量 [m<sup>3</sup>/s]

θ : 代表温度差[K]

K<sub>m</sub> : 換気流量比[-]

d<sub>o</sub> : 排熱吹出口有効直径[m]

g : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- $k_v$  : 温度差比 [-]

$k_v'$  : 規準化温度 [-]

$h$  : 排熱高さ[m]

$h'$  : 模型排熱高さ[m]

$l$  : 長さ [m]

$n$  : 縮率(添え字は各々の物理量)

$r$  : 熱抵抗 [m<sup>2</sup>K/W]

$u$  : 風速 [m/s]

$v_0$  : 排熱吹出平均風速 [m/s]

$\alpha$  : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]

$\beta$  : 流体の体膨張率 [1/K]

$\varepsilon$  : 放射率 [-]

$\theta_a$  : 居住域温度 [°C]

$\theta_i$  : 計測点温度 [°C]

$\theta_0$  : 給気温度 [°C]

$\theta_l$  : 排気温度 [°C]

$\Delta\theta$  : 温度差 [K]

$\Delta t_0$  : 排熱吹出温度差 [K]

$\kappa$  : 放射の線形化係数

$\kappa = \sigma \{ (T + \Delta\theta)^4 - T^4 \} / \Delta\theta$

$\nu_t$  : 渦動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会規格 SHASE-S 102-2011 換気規準・同解説, 2012
- 2) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧（第 13 版）3. 空気調和設備編, 2001
- 3) Hakon Skistad, Elisabeth Mundt, Peter V.Nielsen, Kim Hagström, Jorma Railio : 置換換気ガイドブック-基礎と応用-, 空気調和・衛生工学会, 2007
- 4) 舘持圭佑, 羽田広文, 菊田弘輝, 福島明, 加藤祐一 : 大規模印刷工場における換気システムの省エネルギー化に関する研究 第 1 報 置換換気仮設導入実験とシミュレーションモデルの作成, 日本建築学会北海道支部研究報告集(83), pp.223-226, 2010.7
- 5) Nielsen, P.V. : Temperature distribution in a Displacement Ventilated Room, ROOMVENT '96, Vol.3, pp.323-330, 1996
- 6) Nielsen, P.V. : Velocity Distribution in a Room Ventilated by Displacement Ventilation and Wall-Mounted Air Terminal Devices, Energy and Building, Vol.31/3, pp.179-187, 2000
- 7) Mundt, E. : Contamination Distribution in Displacement Ventilation -Influence of Disturbances, Building and Environment, Vol.29, No.3, 1994
- 8) 加藤信介, 伊藤一秀, 村上周三: 換気システムを変化させた場合の規準化居住域濃度, Visitation Frequency, Purging Flow Rate の系統的解析 第 1 報 オフィス空間を対象とした居住域換気効率の評価に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 (78), pp.45-56, 2000.7

- 9) 秋元孝之, 中野淳太, 田辺新一, 木村健一: Experimental Study on Indoor Thermal Environment of Floor-supply Displacement Ventilation System under Various Heat Load Conditions, 日本建築学会計画系論文集, No.507, pp.27-34, 1998.5
- 10) 徐鳴, 山中俊夫, 甲谷寿史, 東本丈明: 置換換気される室内において冷却・加熱壁面が温度及び汚染物濃度の鉛直分布に及ぼす影響, 日本建築学会計画系論文集, 第 544 号, pp.17-23, 2001.6
- 11) 李晟在, 田辺新一, 木村健一, 大高一博, 高山真, 村田敏夫: 置換換気方式を採用した音楽ホールにおける温熱快適性と換気効率の実測, 日本建築学会計画系論文集, No.559, pp.37-44, 2002.9
- 12) 西岡利晃: 高温工場の換気に関する実験的研究 第 1 報・機械換気, 空気調和・衛生工学会論文集, No.18, pp.49-61, 1982.2
- 13) 飯野由香利, 青木健, 倉淵隆: CFD による置換換気・成層空調システムを取り入れた工場内の温熱環境の把握 その 1 工場内の空気温度・気流および換気効率の空間分布の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), D-2, pp.937-938, 1997.7
- 14) 山中圭悟, 羽山広文, 菊田弘輝, 繪田正道, 福島明, 加藤祐一: 寒冷地における外気冷房併用型の置換換気空調システムに関する研究 その 1 発熱密度の高い工場の温熱環境(冬期実測結果), 日本建築学会北海道支部研究報告集 (82), pp.239-242, 2009.7
- 15) 村上周三, 高橋岳生: 熱対流による自然換気に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.279-280, 1980.9
- 16) 劉康, 山中俊夫, 甲谷寿史, 東本丈明: 置換換気室内の温度・汚染物濃度分布における模型実験法(その 1-2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.727-730, 2001.9
- 17) 花野弘行, 山中俊夫, 甲谷寿史, 劉康: 置換換気室内の温度・汚染物濃度分布における模型実験法(その 3) 近似相似則を適用した 1/2・1/4・1/8 縮小模型実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系(42), pp.241-244, 2002.5
- 18) 花野弘行, 山中俊夫, 甲谷寿史: 置換換気室内の温度・汚染物濃度分布予測における模型実験法(その 4) 縮小模型実験における近似相似則に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.649-650, 2002.6
- 19) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧 (第 13 版) 1. 基礎編, 2001
- 20) 羽山広文, 中里秀明, 木下学, 倉淵隆: 強制空冷機器を収容した電算機室の高効率空調方式に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.494, pp.29-6, 1997.4
- 21) 空気調和・衛生工学会: 工場換気の理論と実践, 1995
- 22) 羽山広文, 山中圭悟, 菊田弘輝, 福島明, 加藤祐一: 寒冷地における外気冷房併用型の置換換気空調システムに関する研究 その 3 新旧工場の省エネルギー性能比較とモデル作成, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1173-1174, 2010.7

## 注

- 注 1) 各条件式による相似則の導出過程を以下に示す。  
式(1)、(2)より、  

$$n_r^{-1} n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_a n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_\varepsilon^2 n_k n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_u n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_Q \quad \cdots \textcircled{1}$$
 また式(6)は  

$$n_{\Delta\theta} n_l / n_u^2 = 1 \quad \cdots \textcircled{2}$$
 ・②より  

$$n_u^2 = n_{\Delta\theta} n_l$$

$$\therefore n_u = n_{\Delta\theta}^{1/2} n_l^{1/2} \quad \cdots \textcircled{3}$$
 ・①第 4 辺、第 5 辺より  

$$n_u n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_Q$$
 ③を代入して  

$$n_{\Delta\theta}^{1/2} n_l^{1/2} n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_Q$$

$$\therefore n_Q = n_{\Delta\theta}^{3/2} n_l^{5/2} \quad \cdots \textcircled{4}$$
 ・①第 2 辺、第 4 辺より  

$$n_a n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_u n_l^2 n_{\Delta\theta}$$

$$\therefore n_a = n_u \quad \cdots \textcircled{5}$$
 ・①第 3 辺、第 4 辺より  

$$n_\varepsilon^2 n_k n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_u n_l^2 n_{\Delta\theta}$$

$$n_\varepsilon^2 = n_u n_k^{-1}$$

$$\therefore n_\varepsilon = n_u^{1/2} n_k^{-1/2} \quad \cdots \textcircled{6}$$
 ・①第 1 辺、第 4 辺より  

$$n_r^{-1} n_l^2 n_{\Delta\theta} = n_u n_l^2 n_{\Delta\theta}$$

$$n_r = n_u^{-1}$$
 ③を代入して  

$$n_r = n_{\Delta\theta}^{-1/2} n_l^{-1/2} \quad \cdots \textcircled{7}$$
 ・また記号表から  

$$\kappa = \sigma \{ (T + \Delta\theta)^4 - T^4 \} / \Delta\theta \text{ より}$$

$$n_\kappa = \frac{\kappa_{\text{模型}}}{\kappa_{\text{実物}}} = \frac{\sigma \{ (T_M + n_{\Delta\theta} \theta)^4 - T_M^4 \} / n_{\Delta\theta} \theta}{\sigma \{ (T_R + \theta)^4 - T_R^4 \} / \theta}$$

$$\therefore n_\kappa = n_{\Delta\theta}^{-1} \frac{(T_M + n_{\Delta\theta} \theta)^4 - T_M^4}{(T_R + \theta)^4 - T_R^4} \quad \cdots \textcircled{8}$$
 以上の③-⑧を用い、相似則とした。

(2011年11月9日原稿受理, 2012年3月19日採用決定)