

装置発熱を利用した自然換気システムの 数値シミュレーションによる効果予測と適用

諏訪 好英 和田 貴子
(本社エンジニアリング本部)

A Numerical Study and Application of Natural Ventilation System using Buoyancy caused by Heated Instruments

Yoshihide Suwa Takako Wada

Abstract

This paper proposes a new type of natural ventilation system, prototype of which has been applied to a food company's factory. This system uses buoyancy created by the heating of manufacturing instruments. The ventilation efficiency of this system was simulated using a CFD technique, and the results indicate that the system achieves an air-exchange rate of over 20changes/h. The ventilation efficiency and thermal environment in the factory were precisely measured after the system's construction. Measured and simulated characteristics showed good agreement.

概 要

装置発熱に伴う自然対流効果を利用する自然換気システムを考案し、高温発熱源のある食品工場に適用した。考案したシステムの換気性能を数値シミュレーションにより評価し、換気回数で20回/h以上の能力が得られることを確認した。これを基に設計、施工した食品工場では、十分仕様を満足する換気性能を得た。また、工場竣工後実施した換気性能および温熱環境の測定結果を用いてシミュレーション結果を検証した結果、十分な精度で現象を予測できていることを確認した。

1. はじめに

生産施設として使用する工場建築物では、装置発熱への対策が重要である。工場建築物の屋内は大きな気積を有する 경우가多く、機械式の換気・空調設備による発熱対策は大きな初期コスト、運転コストを必要とする。このような換気・空調コストを削減する方法として、自然換気の適用が考えられる。これまで、重力や外部気流を利用したさまざまな自然換気方式が考案されており、アトリウム等の大空間に広く採用されている^{1),2)}。しかし衛生管理が重要な食品工場などでは、通風抵抗の大きなフィルタや防虫金網を開口部に用いる必要から、一般的な自然換気方式により十分な換気性能を得ることが困難であった。

そこで、装置発熱に伴う自然対流を換気駆動力として利用するシステムを考案し、高温発熱源のある食品工場に適用した。考案したシステムでは、装置発熱そのものを換気駆動力として利用するため、換気動力と空調負荷の削減を同時に達成することができる。

本報では、数値シミュレーションと実測により評価

した本システムの換気性能および屋内温熱環境について報告する。

2. 自然換気システムの概要

考案した自然換気システムの概要をFig. 1に示す。量産工場には運行式の大型生産装置が用いられることが多く、発熱源はこれらの生産ラインに集中する。生産装置を室内の中央部に集中して配置し、その上部に排気口を、また側壁面に間口の大きな開口部を設けると、装置付近に発生する自然対流効果により、天井排気口への排熱と側壁開口部からの外気供給とを同時にまかなうことができる。考案したシステムでは、さらに装置類の床上げにより通風経路を確保し、傾斜天井の採用により高温の上昇流を天井排気口に積極的に導く構造とし、自然対流による換気駆動力を最大限利用するよう配慮した。

3. 数値シミュレーションによる換気性能予測

3.1 対象とした工場と生産ライン

某食品工場への適用を想定し、数値シミュレーションにより本システムの換気性能を予測した。対象とし

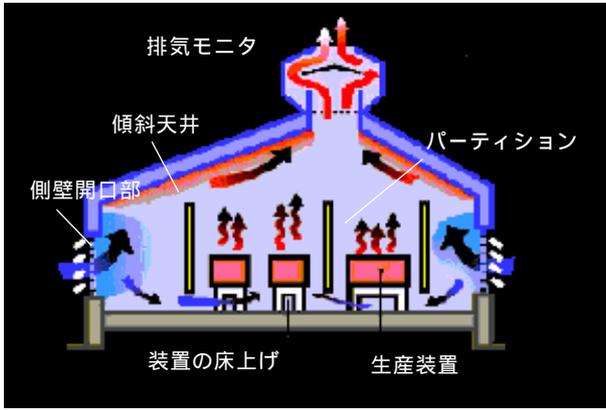


Fig.1 考案した自然換気システムの概要
Scheme of Proposed Natural Ventilation System

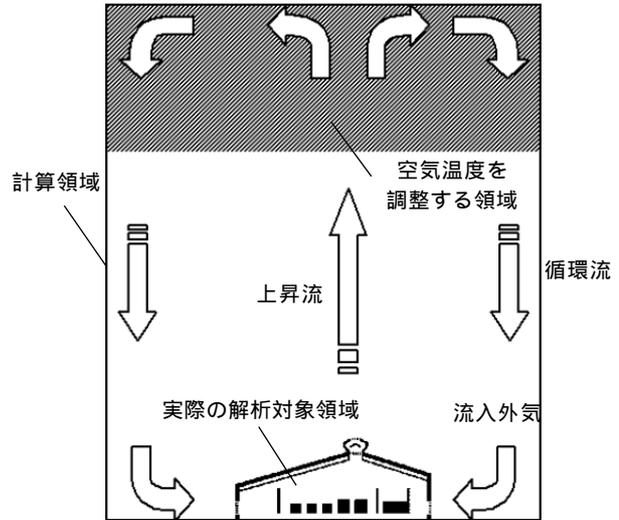
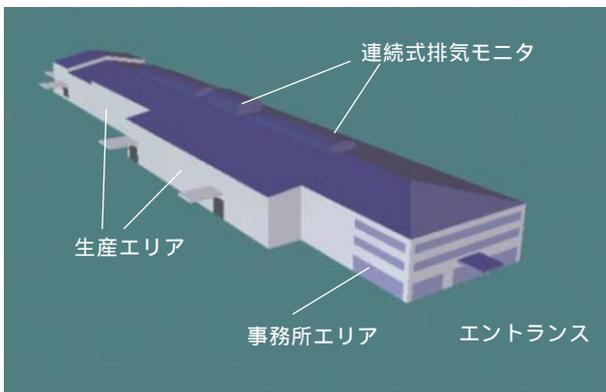
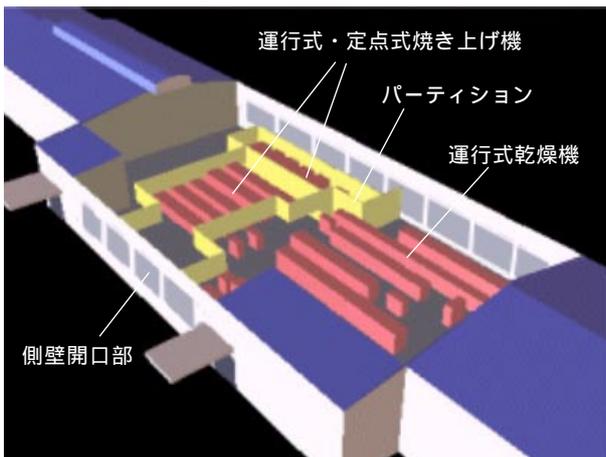


Fig.3 解析に用いた計算領域
Simulated Model Domain



(a) 工場全景



(b) 生産ラインの内部

Fig.2 対象とした工場と生産ラインの概要
View of the Target Building and Indoor Space

工場の概要をFig. 2 に示す。工場建屋は建築面積約5,000m²、地上3階建の建築物である。自然換気システムを適用する部屋は床面積約1,800m²、2～3階吹き抜け構造を持つ最大天井高さ8mの部屋で、内部には、大型の運行式、定点式焼き上げ機、運行式乾燥機等の装置をそれぞれ複数台ずつ設置する。

天井面は屋根勾配に合わせた傾斜天井とし、生産ラ

インの中央に位置する稜部に連続式排気モニタを設置する。またラインに沿った側壁には床上800～1,500mmの範囲で全面にわたり防虫金網、粗塵フィルタ付き開口部を設け、Fig. 1 に示した自然換気システムを構成する。なお、最も発熱量の大きな焼き上げ機周辺には、作業エリアへの輻射の影響を避けるためパーティションを設けたが、主要な生産装置およびパーティションを、通風経路確保のため800mm床上げして設置することとした。

3.2 モデル化とシミュレーションの概要

数値シミュレーションには非圧縮性粘性流体を仮定し、非等温k-乱流モデルを用いた³⁾。境界条件として、開口部には防虫金網、サッシ枠などを考慮した有効開口率と粗塵フィルタの圧損を、またモニタ部にはメーカー仕様値から算出した圧損を与えた。各部圧損のモデル化には、Xieら⁴⁾が用いたフィルタ圧損のモデル化手法を適用した。

ところで、本システムのような自然対流を解析する場合、屋内のみを計算対象領域とすると、すべての流入・流出開口部が自由流入/流出境界となり、安定した解析を実行できない。ここではFig. 3のように屋外を含めた計算領域(水平方向に屋内各辺長さの2.5倍、垂直方向に屋内高さの5倍)を想定し、閉空間内の循環領域として解析を行った。この場合、装置の発熱により加熱された上昇流は、いったん解析領域の上端に達し、その後循環流として再び開口部から屋内に流入する。このため、そのままの形では側壁開口部から流入する外気温度を固定することができない。ここでは、解析領域上部の空気温度から単位時間あたりの総発熱量に相当する熱量を差し引く操作を各時間ステップごとに行うことで、外気温度一定の条件を満足させることとした。

3.3 シミュレーション結果

3.3.1 気流分布および温熱環境 代表的な断面内および床上2mにおける平面内気流分布，温度分布のシミュレーション結果をFig. 4に示す。発熱量の大きな焼き上げ機，乾燥機付近には上昇流が形成され，高温の気流が天井のモニタに排気されることがわかる。またこれに伴って，側面開口部からは外気が流入している。開口部からの流入気流は，床面の通風経路を通り部屋の中央まで達しており，装置床上げによる効果が大きいことを示している。

室内の温度分布は全体的に成層的であり，天井面付

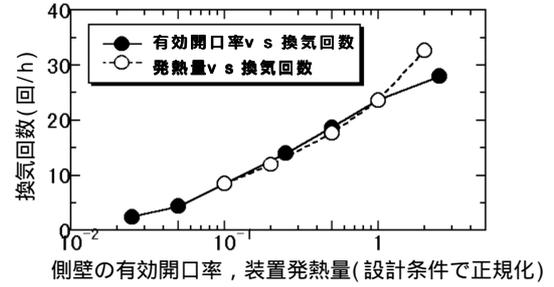
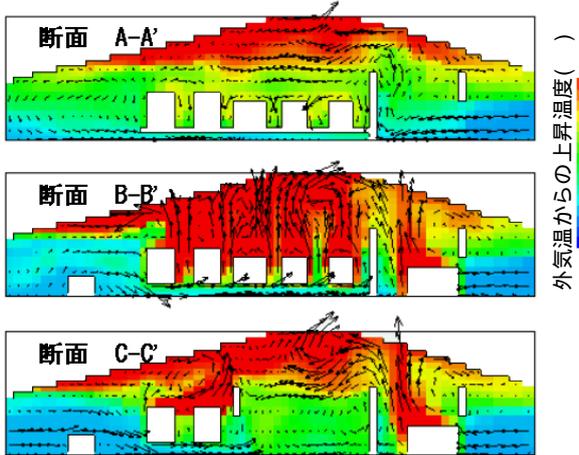


Fig.5 側壁開口部の開口率および装置発熱量を変化させたときの換気回数
Air-exchange-rate of the Room under several different Opening Ratio and Heat generation



(a) 断面内の気流分布，温度分布

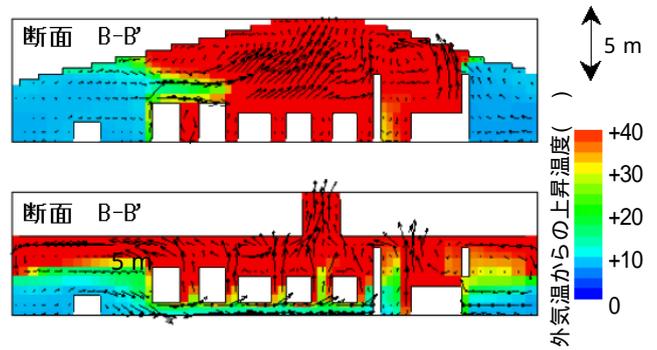
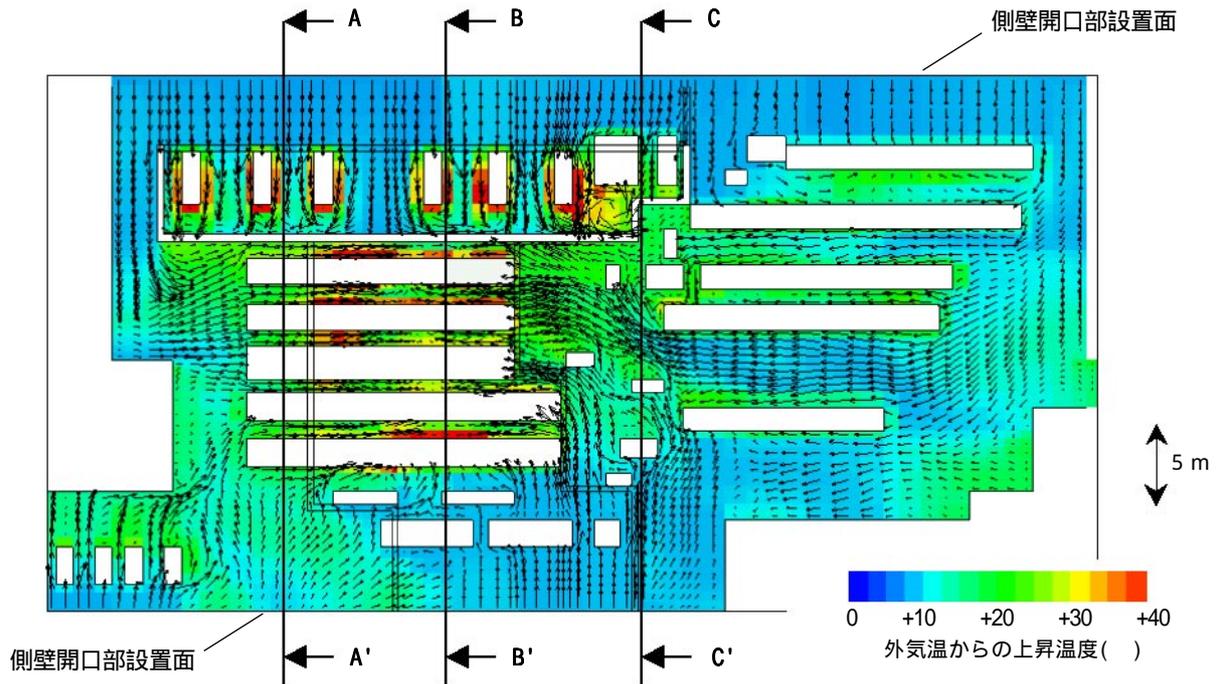


Fig.6 床上げ，傾斜天井を採用しない場合の断面内気流分布・温度分布
Simulated Airflow and Thermal Distribution of the case without Lift-up Setting of Equipment or Sloped Ceiling



(b) 床上2mの平面内における気流分布，温度分布

Fig.4 気流分布，温度分布の数値シミュレーション結果
Simulated Airflow and Thermal Distribution

近は外気温度に対し40 近い温度上昇が認められるものの、作業域として使用する床上2 mまでの範囲の温度上昇は比較的少ない。特に本生産ラインでは、開口部のある側壁近くを主として作業エリアとして使用しており、これらの領域では十分な外気の流入があるため、外気温度が低い場合には冷却効果も期待できる。床上2 mまでを作業域高さと考え、作業エリア内の温熱環境を評価した結果、外気温度に対する上昇温度は5~10 程度、最大でも15 程度以内であった。解析の結果、屋内の温熱環境はある程度の居住性を確保できる範囲にあり、必要に応じてスポットクーラーなどの簡易空調設備を併用することで十分対処できるものと判断した。

3.3.2 換気性能の予測 数値シミュレーションの結果から、本システムにより得られる換気性能を考察した。設計条件に基づき実施したシミュレーション結果から算出した換気回数は23.5回/hであった。この値は、一般の機械換気の屋内に匹敵する換気量であり、本システムにより十分な換気性能を実現できるものと判断できる。

稼働中の生産ラインでは、仕掛品の積み上げ等により側壁開口部を部分的に遮蔽してしまったり、生産装置の稼働状況により発熱量が変化することも考えられる。そこで、側壁開口部の開口率や装置発熱量を変化させた場合について同様のシミュレーションを実施し、このような状況変化に対し、どの程度の換気性能を確保できるかを検討した。

Fig.5に結果を示す。開口率や装置発熱量に対して換気回数は単調な右上がりの傾向を示しているが、シミュレーション結果は、有効開口率や発熱量が設計条件の半分に減少した場合でも15回/h以上の換気回数を得られることを示しており、生産ライン稼働時の状況変化にも十分対応可能であると思われる。

3.3.3 床上げ、傾斜天井採用の効果 本システムでは、通風経路を確保するため、装置の床上げと傾斜天井構造を採用した。数値シミュレーションによりこれらの構造の採用による効果を比較した。Fig. 6にそれぞれの場合の断面内気流分布・温度分布を示す。

装置の床上げや傾斜天井を採用しない場合には、生産装置付近の温度が非常に高くなり、十分な換気が行われないことがわかる。換気性能を比較した結果、装置の床上げ、傾斜天井のいずれか一方を採用しない場合でも、床上げ・傾斜天井ありの場合に比べ、数割程度性能が低下することがわかった。これらの結果から、本システムでは床上げ・傾斜天井の採用による通風経路の確保が重要な要素であり、本システムで採用した方法が妥当であることを確認した。

Table 1 測定項目および測定点数

Tests and Measured Points for the System Evaluation

測定項目	測定点数	測定器
側壁開口部からの流入風速	22箇所	アネモマスター M6021 (KANOMAX)
側壁開口部各部の温度	22箇所	サーモレコーダ TR-72S (T&D)
作業域平面内(床上1.5m)の温度分布	70点	サーモレコーダ TR-72S (T&D)
各部の垂直温度分布	18箇所	DS1820(MAXIM)による1-wireシステム測定回路

4. 実測によるシミュレーション結果の検証

数値シミュレーションの結果に基づき、新設の某食品工場に自然換気システムを適用した。工場の竣工後に生産ライン稼働状態での実測を行う機会を得たので、換気性能および温熱環境の評価を実施し、数値シミュレーション結果と照合した。以下にその結果を示す。

4.1 測定項目と方法

測定した項目、測定点数をTable 1に示す。先述したように、本生産ラインの天井高は最高部で8 mある。このため、各部垂直温度分布の測定には半導体温度センサによる小型回路^{5)・6)}を製作し、測定用支柱に1 m間隔でこれを取り付けて使用した。

4.2 換気性能

開口部における流入気流風速の測定結果をFig. 7に示す。場所により若干のばらつきが認められるが、いずれの個所でも面風速で0.5~1 m/sの流入風速が認められた。実測結果の各部平均面風速から求めた換気回数は21.3回/hであり、実測により求めた換気回数は数値シミュレーションの結果(23.5回/h)とほぼ一致する値であった。

4.3 各部の垂直温度分布

Fig.8は、屋内の各点において測定した垂直温度分布をシミュレーション結果と比較した結果である。3節にも示したように、本システムを採用した屋内は成層的な温度分布を示しており、装置周辺および側壁開口部近傍においてその傾向が顕著であった。数値シミュレーションによる予測結果は、測定結果とよい一致を示しており、現象を定量的に再現できていることがわかった。

5. 温熱環境の考察および改善策の検討

4節での検証結果から、数値シミュレーションにより十分な精度で現象予測可能なことがわかった。考察

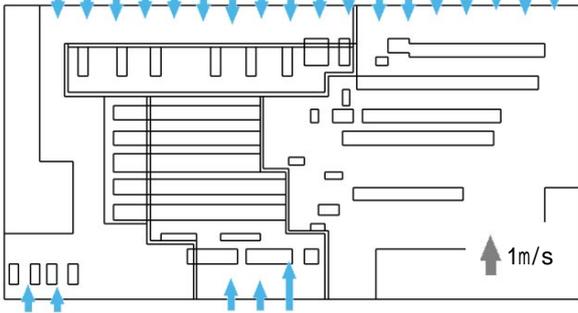


Fig.7 側壁開口部における流入風速の測定結果
Measured Inlet Air Velocity from Side Wall Openings

したシステムを採用した生産ラインでは、仕様を十分満足する換気性能を得たが、さらに温熱環境の改善を図るため、数値シミュレーションにより対策の検討を行った。

先述したように、本生産ラインでは側壁開口部に沿った領域を主な作業エリアとして使用しており、本システムの採用もこれを前提としたものである。しかし、部屋中央部なども一部作業エリアとして使用することから、これらの領域についての温熱環境対策を検討した。

Fig. 9 (a)は、部屋の長手方向中央断面内における気流分布を、各点の気流温度により色分けして示したものである。図の左側には発熱量の大きな運行式焼き上げ機が設置されており、その近傍に強い上昇流を生じている。運行式焼き上げ機の製品投入口および終端部は、パーティションにより作業エリアと隔離されているが、その上部から高温の気流が下降していることがわかる。シミュレーション結果の考察から、部屋中央

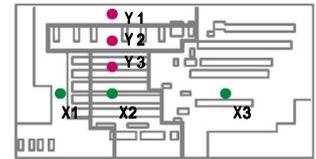
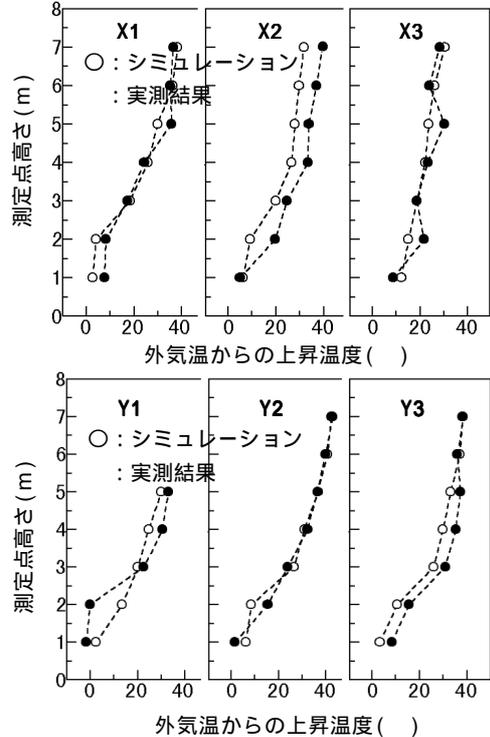


Fig.8 屋内各点における直垂温度分布の実測と数値シミュレーションとの比較
Comparison of Vertical Thermal Distributions between Airflow Simulation and Measurement

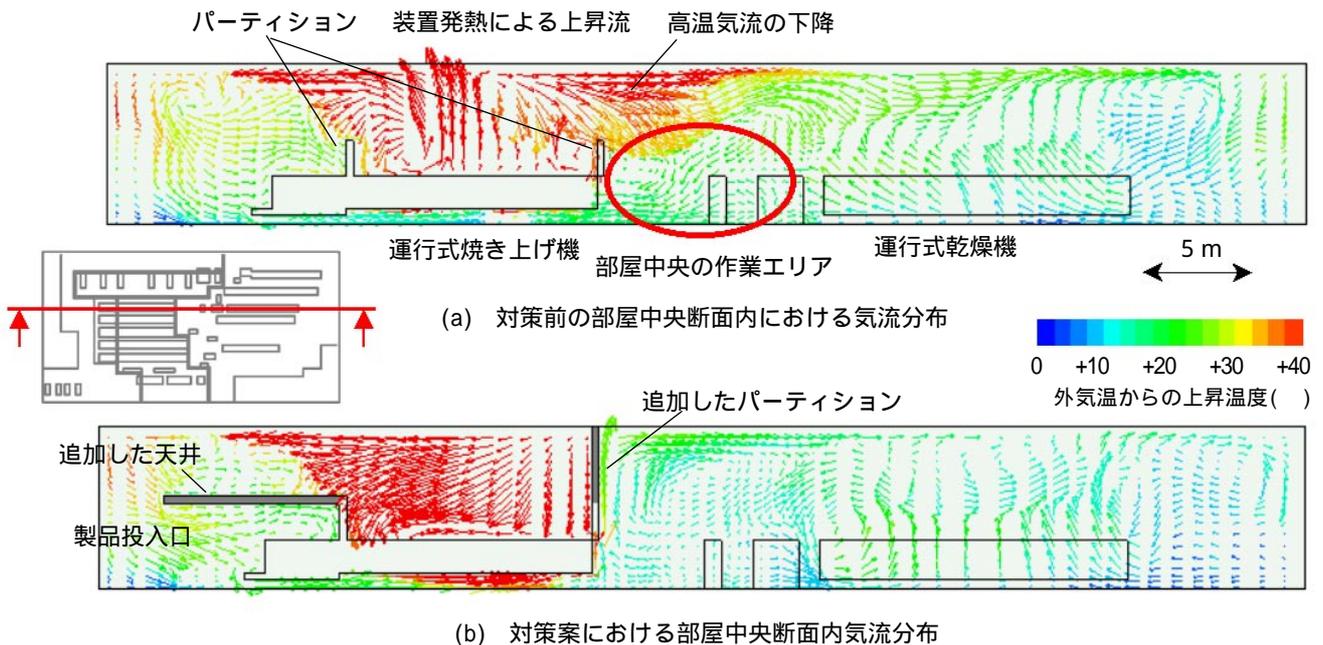


Fig.9 対策前および対策案の部屋中央断面内における気流分布
Comparison of Airflow Distributions before and after the Improvement

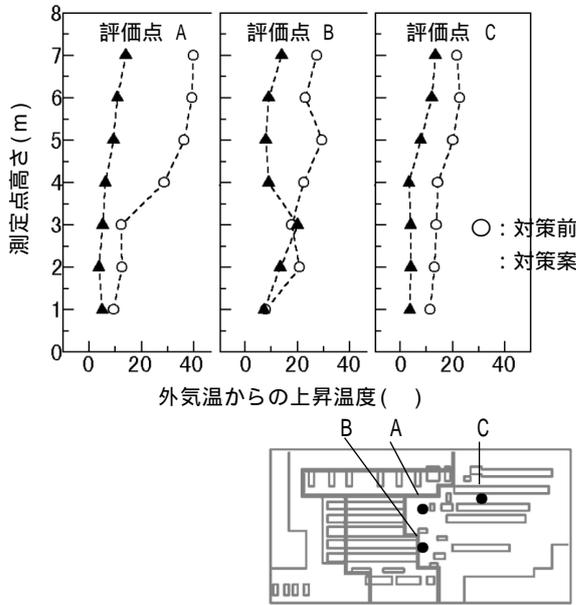


Fig.10 対策前および対策案の屋内中央部作業
エリアにおける垂直温度分布の比較

Comparison of Vertical Thermal Distributions
before and after the Improvement

部などにおいて生じる温度上昇の原因は、この下降流によるものであることがわかった。

対策案についてシミュレーションを行った結果、焼き上げ機周辺のパーティション高さや天井の一部追加により高温の下降流を遮断できることがわかった。

Fig. 9 (b)に対策後の気流分布を、Fig. 10に対策前後の部屋中央付近における垂直温度分布を示す。パーティション等の追加により、部屋中央部における温度上昇は、作業域高さまでの範囲において8~10程度低減が可能と予測できる。

6. まとめ

高温発熱源のある工場建築物に適用可能な、装置発熱を利用した自然換気システムを考案し、某食品工場の生産ラインに適用した場合の効果の数値シミュレーション

により予測した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 考案した自然換気システムにより換気回数23.5回/hの性能が得られると予測し、某食品工場の生産ラインに適用した。
- 2) 工場竣工後に同生産ラインの換気性能および温熱環境を実測し、数値シミュレーションは、十分な精度での現象予測が可能であることを確認した。
- 3) 今回のように実施事例のない方式を具体化していくためには、基本性能の予測から細部の現象にかかわる問題までを一貫して検討することが可能な数値シミュレーションが、重要な設計ツールとなり得ることを確信した。

今後さらに適用事例や活用ノウハウを蓄積し、設計・施工技術の向上につなげていく所存である。

参考文献

- 1) 諏訪, 表ほか: 外部気流を利用した大空間構造物の換気・温熱特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 481, pp.51~60, (1996) .
- 2) 諏訪, 藤井, 湯浅: 開口部を有するアトリウム空間に対応した温熱環境予測モデルの開発, 日本建築学会計画系論文報告集, No.486, pp.17~24, (1996) .
- 3) Launder, B.E. and Spalding, D.B.: Lectures in Mathematical Models of Turbulence, (1972), Academic Press .
- 4) Xie, G. and Suwa, Y. : Effect of Plenum Chamber Configuration on Airflow Uniformity in Uni-directional Flow Cleanrooms, J. of the Inst. of Environmental Sci., Vol.37, No.4, pp.21~26, (1995) .
- 5) DS1820 1-Wire™ Digital Thermometer Data Sheet, 030598(1998), DALLAS SEMICONDUCTOR .
- 6) 吉田, 諏訪: トランジスタ技術SPECIAL No.69, pp.79~131(1999), CQ出版 .