

# 粉塵拡散解析技術を基本とした新しいエンジニアリング技術の展開

## Development of Newly Engineering Technology Based on Computer Analysis for Dust Diffusion

石井 和利<sup>\*<sup>(1)</sup></sup>  
Kazutoshi ISHII

村橋 喜満<sup>\*<sup>(2)</sup></sup>  
Yoshimitsu  
MURAHASHI

川上 寛明<sup>\*<sup>(3)</sup></sup>  
Hiroaki  
KAWAKAMI

田中 和夫<sup>\*<sup>(4)</sup></sup>  
Kazuo TANAKA

### 抄 録

新日本製鐵では、電気炉建家を対象にして“空気の流れ”と“粉塵の動き”を予測し制御できる粉塵拡散解析技術の開発を完了した。それによって、製鉄工場における換気問題から半導体工場における乱流問題まで、広範囲の種類のある工場空間に的確に対応できる空間環境設計技術の集大成を行ってきた。ここでは、まず粉塵拡散解析技術確立の基本的な考え方と課題克服に向け具体的に取り組み、空気の流れと粉塵の動きを予測した。そして目的に応じてそれらの新たな流れと動きを創り出すことで設備費を削減できた。これらの成果に基づき、計測と制御の考え方を取り入れた新しいエンジニアリング技術によって課題解決の方法を変革した過程を詳細に述べた。

### Abstract

Nippon Steel has made a comprehensive survey of the space environment designing technology that can precisely cope with the needs required for a space in a plant in a very wide range from the ventilation problem in steel mill to the turbulence problem in semiconductor plant, through accomplishing the development of computer analysis technology for dust diffusion that can estimate and control "air flow" and "dust movement" in an electric furnace plant. This paper describes the basic concept for establishing the computer analysis technology for dust diffusion and the concrete measures to solve accompanying problems, and further enters into details how the new engineering technology has innovated technical measures to solve problems, the new engineering technology which introduces a concept of both estimation and control to attain objects such as to curtail the equipment cost and so by estimating the "air flow" and "dust movement" to create both a new flow and movement depending on needs.

### 1. 緒 言

新日本製鐵では、生産現場の3K(きつい、汚い、厳しい)イメージからの脱却や、製鉄所周辺環境対策の社会的ニーズの高まりに対応するため、鉄の生産プロセスで発生する大量の熱と粉塵の問題を中心に種々の検討と対策を実施してきた。これらの検討や対策の中で特徴的なことは、技術検討の幅を広げ、その中から優れた最適解を的確に見つけ出すことを目的に、1985年からいち早く大型コンピュータによる気流解析技術を導入し、空間環境設計技術という高度なエンジニアリング技術の確立を目指してきた点である<sup>1)</sup>。

特に熱の問題については、建家内全体の空気を入れ換えて温度調整を図ってきた従来の換気設計法から、建家内に効果的な空気の流れを作り出すことで、良好な温熱環境を創出する革新的な換気設計技術の開発とその実用化を図ってきた。

一方、粉塵の問題については、環境改善への重要性は十分認識しつつも、空気中の粉塵粒子の動きなど解決すべき技術課題が多く存

在していたため、従来の換気設計法と同様に建家内全体の空気を入れ換えを行うことで、粉塵を建家外に排出する設計法のままでとどまっていた。

本報では、電気炉建家をモデルに高度な気流解析技術を応用し、浮遊粉塵の動き、つまり、粉塵の拡散経路が予測可能な粉塵拡散解析技術の開発と、それを生かした新しい視点でのエンジニアリング技術の確立に挑戦してきたことについて報告する。

### 2. 粉塵対策に関する技術開発の着眼点

前章で述べた革新的な換気設計技術を例に、粉塵対策に関する技術開発の着眼点を明らかにしていく。

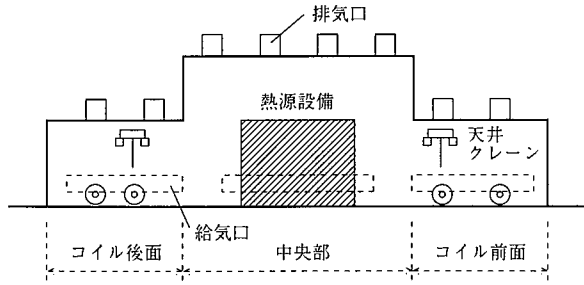
図1に代表的な圧延工場の設備配置と建家形状を示す。この圧延工場は大きく三つのエリアに分かれており、中央部の軒高の高い建家は大きな発熱量を有する設備が配置され、前後面の軒高の低い建家はそれぞれ材料と製品を天井クレーンでハンドリングするための

<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 技術開発本部 設備技術センター 土木建築技術部

<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 建材開発技術部 部長代理

<sup>\*<sup>(3)</sup></sup> 技術開発本部 設備技術センター 土木建築技術部 掛長

<sup>\*<sup>(4)</sup></sup> ステンレス事業部 光製鐵所 設備部 掛長



代表的な圧延工場の設備と建家概要

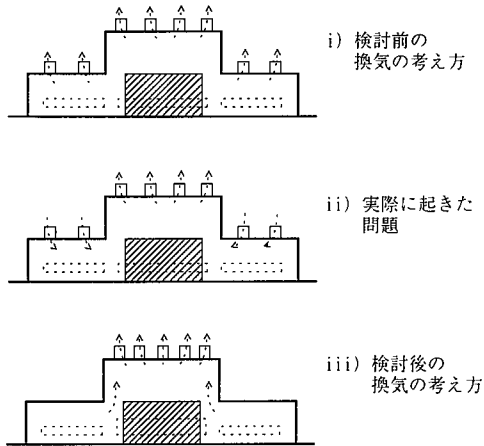


図1 圧延工場における新しい換気設計の考え方

スペースとなっている。従来の建家では各エリアごとに給排気口を設けて空気の入替えを行う設計法を採用してきたが、雨天の日に前後面建家の屋根面についている排気口から雨滴が侵入してコイルに付着し、錆を引き起こす問題などがしばしば発生していた。長い間、この問題は排気口の構造上の問題として片づけられてきたが、原因を究明するためにコンピューターを使った気流解析を実施した結果、中央部の発熱量が前後面より極端に大きいため、建家中央部に近づくにつれて壁面の給気がらりだけでは建家全体としての給気能力が不足することになり、前後面の排気口から給気してしまうことが判明した。

そこで問題解決を図るために、雨滴侵入を引き起こす前後面の排気口をすべて塞ぎ、代わりに発熱量が大きい中央部に排気口と給気口を集中配置することを考案し、気流解析によりその効果を検証した。その結果、中央部には換気のためのより強力な空気の流れが形成できることと、前後面の排気口をすべて塞いでも従来と同等の温熱環境を保てることが明確になった。

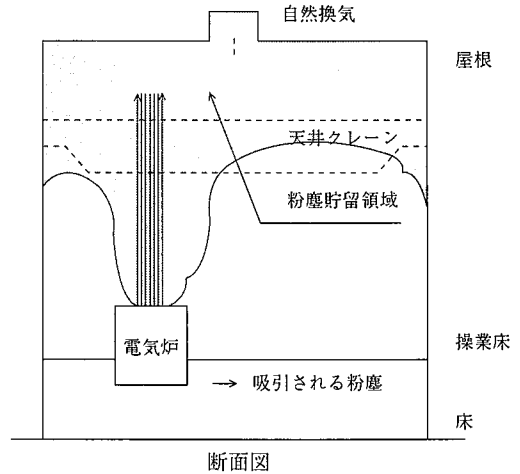
これが、“空気の流れ”を正しく解明(予測)し、最も効率の高い流れを意図的に作り出す(制御する)、革新的な換気解析技術の骨格となる考え方である。この考え方を応用して、空気の流れと同様に“粉塵の動き”を高精度で予測し、意図的に粉塵の動きを制御することができれば、現在、粉塵拡散経路が予測できず懸案となっている問題の解決が一挙に図れるのではないかと考えた。

### 3. 電気炉建家の特徴と設備課題、及び粉塵拡散解析技術の構築に向けた基本的な考え方

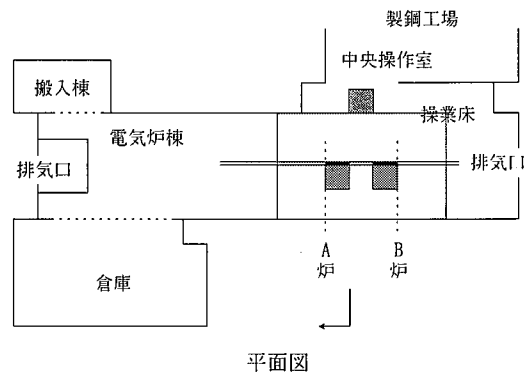
#### 3.1 検討対象となる電気炉建家の特徴と設備課題

現在、集塵方式の改造が計画されており、検討対象に採用した電

気炉建家の概要を図2に示す。電気炉はA、Bの2基あり、操業パターンとして、図3に示すように原料装入→予熱→溶解→出鋼の4工程を繰り返しながら稼動している。現状は電気炉からの発塵を電気炉周辺で直接集塵する直接集塵方式と、直接集塵では捕捉できなかった粉塵を自然換気を利用して建家外に排出する方式との併用構造になっている。



断面図



平面図

図2 検討対象工場

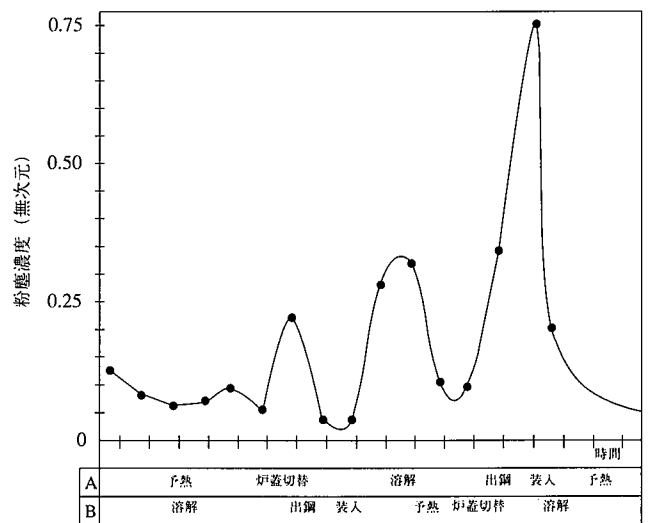


図3 X月Y日の電気炉操業パターンと粉塵濃度変化(排気口)

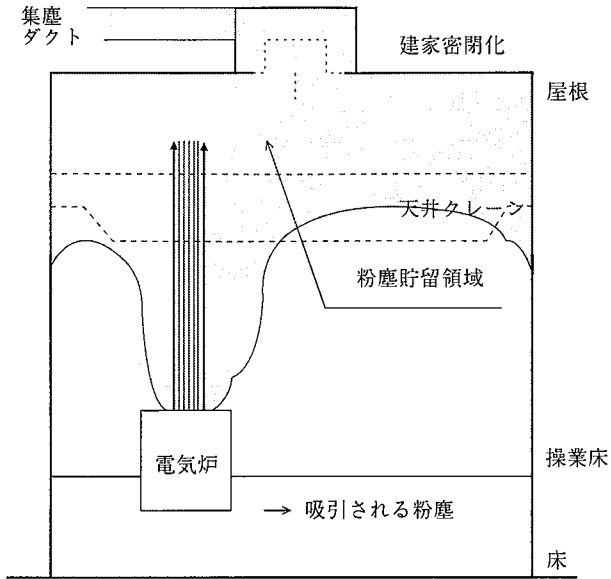


図4 建家集塵方式

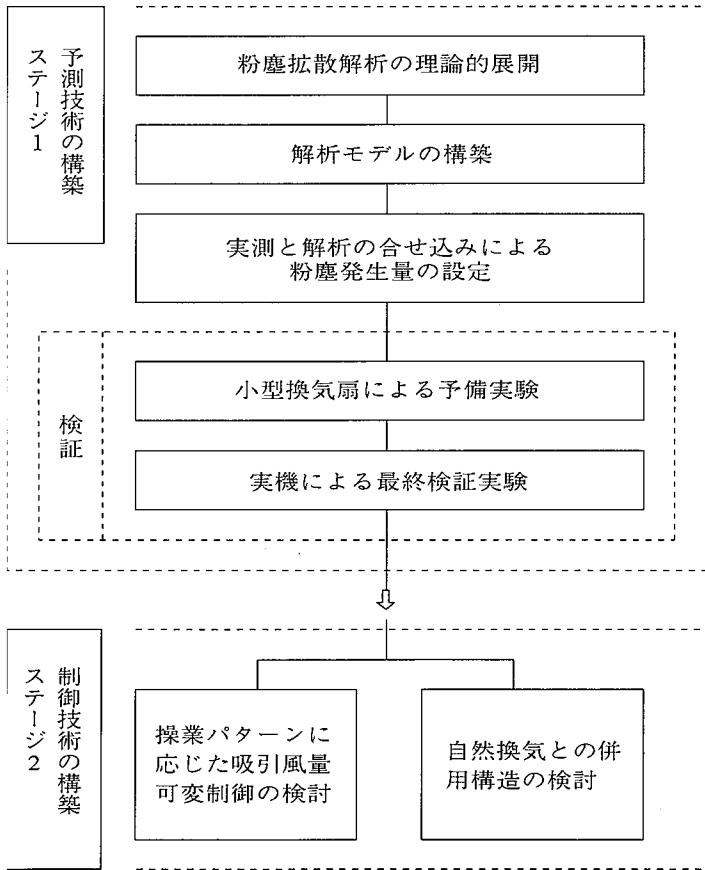


図5 技術確立の検討フロー

この改造計画の内容は、周辺地域への配慮の観点から、図4に示す現状の併用構造を“建家集塵方式”へ全面切替えを行うものである。具体的には、まず建家を密閉化し、電気炉から熱ガスとともに発生してくる粉塵を上昇気流(ドラフト効果)によって屋根面に貯め、次に屋根面付近に貯留した粉塵混じりの空気を機械排気設備で徐々に吸引して集塵、排出する方式である。建家集塵方式とするこ

とで最も懸念されることは、建家を密閉化し、粉塵を建家内の屋根面に一旦貯留することによる建家内の環境悪化である。この改造計画を実施するにあたっての設備課題としては、空気の流れと同様に“粉塵の動き”を事前に予測し、粉塵拡散経路を明確にした上で、現状以上の建家内環境が作り出せる機械排気設備の位置や能力を決定することが挙げられる。

### 3.2 粉塵拡散解析技術の構築に向けた基本的考え方

設定された設備課題に対して、先に述べた換気の基本的な考え方を参考に以下の二つのステージに分けて、目標とする粉塵対策に関する技術開発を段階的に推進する。

#### [ステージ1]

まず、粉塵対策に関する基本を空気の流れと粉塵の動きに設定し、これらの流れと動きを正確に予測し得る粉塵拡散解析技術を開発する。

#### [ステージ2]

次に、ステージ1で確立した粉塵拡散解析技術を適用して、最小コストで建家内環境が確保可能な空気の流れと粉塵の動きを創り出せる(制御する)技術を構築する。

特に、ステージ1の粉塵拡散解析技術については、高度な解析技術とともに実験や実測等での解析結果の検証が不可欠なことから、図5に開発のフローチャートを示すように、更に五つのステップにブレイクダウンした取組みを行う。

## 4. 空気の流れと粉塵の動きを同時に解明しうる粉塵拡散解析技術の構築

### 4.1 粉塵拡散解析の理論的な展開

粉塵拡散の予測・制御技術を確立するためには、まず粉塵粒子の動きを理論的に解明する必要がある。

粉塵粒子の動きを理論的に解く方法として、一つ一つの粒子の動きを運動方程式によって解明していくラグランジュ的手法が一般的に知られている。この手法を使って粉塵粒子の動きを一つ一つ解明していくこともできるが、電気炉建家のように非常に高濃度粉塵を取り扱う場合、粉塵粒子の数が莫大となるため、数値解析上多大な時間を費やすことから実用的な方法とはいえない。しかも、この技術開発では、まずは建家内空間における空気の流れと粉塵の動きを全体的に把握することが重要になることから、一つ一つの粒子を追跡する微視的な手法で、空間全体の粉塵拡散状況が的確に把握できるかどうか疑問が残る。

そこで、現実的に粉塵の動きの特性をマクロ的な視野から捕えるために、炉から発生してくる粉塵の粒径分布と密度を実測した結果、表1に示すように粉塵粒径は1~100 $\mu$ mの範囲にあることが判明した。従来<sup>2,3)</sup>の知見では、この範囲の粉塵粒子は空気の粘性力(摩擦力)の影響を強く受け、ストークスの沈降式で表される限界沈降速度より空気の上昇速度が大きい場合は、粉塵粒子は空気に乗って拡散を続けるが、逆に、空気の上昇速度が限界沈降速度より小さい場合には、重力と釣り合いながら一定速度で沈降していく特性を持っている。

$$W_s = \frac{g \cdot d_s}{18\nu_g} (\rho_s - \rho_g)$$

$W_s$ : 重力沈降速度 (cm/s),  $g$ : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>),  $d_s$ : 粉塵粒子の粒径 (cm),  $\rho_s$ : 粉塵粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho_g$ : 空気密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $\nu_g$ : 空気の粘性係数 (g/cm/s)

表1 炉から発塵している粉塵の粒径分布

粒径 ( $\mu\text{m}$ )	代表粒径	重量比 (%)
75~	75.0	37.5
50~75	62.5	12.3
25~50	37.5	19.3
20~25	22.5	6.8
15~20	17.5	22.9
10~15	12.5	0.6
5~10	7.5	0.2
2~5	3.5	0.2
~2	2.0	0.2

すなわち、粒径1~100 $\mu\text{m}$ 程度の粉塵粒子であれば、空気中の粉塵拡散に関して運動エネルギーの増減は無い。粒子一つ一つの運動方程式を解く代わりに、粉塵とその周辺空間を包括して粉塵混じり空気として捕え、その粉塵混じり空気の濃度を、拡散方程式を用いて流体力学の基本式とともに展開すれば、粉塵拡散の状況が非常に簡単に把握できると考えた。

解析的には図6に示すように、空間内の物質の流入量と流出量は等しいとの“化学種の保存則”を満たす拡散方程式の中に、ストークスの沈降式を取り込むことで粉塵拡散の状況が解析で解明できることになる。このような拡散方程式を用いる解析は、粉体工学の分野ではオイラーの手法と呼ばれている。これら一連の具体的な数値解析手法としては、移流拡散方程式を有限体積法にて離散化して空気の流れとその温度を解く、英国CHAM社の三次元熱流体解析プログラム“PHOENICS”をベースとし、その中にストークスの沈降式を取り込んだ拡散方程式を、図7に示す気流解析ルーチンの最後に連結させる対応を図る。参考までに述べると、今回採用した乱流モデルは0方程式モデル、温度分布はブジネスク近似モデルである。

4.2 解析モデルの設定とその考え方

4.2.1 設備及び建家モデルの設定

電気炉建家では電気炉本体はもとより、原料や溶鋼鍋を移動させるための天井クレーン、原料を予熱するためのバーナー台車、操業を監視、制御する中央操作室など数多くの設備があり、更に倉庫や搬入ヤード、連続铸造棟などの他の工場建家が連棟でレイアウトされている。その中で例えば、取鍋や図8に示すバーナー台車などは電気炉本体に近接し、大きな空間を占有することから、ドラフトなど

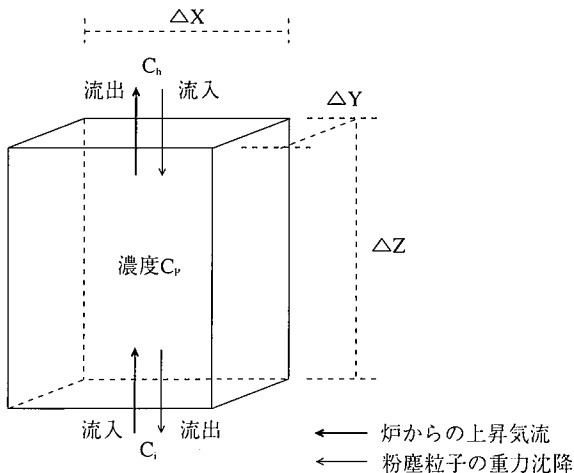


図6 単位空間での粉塵拡散モデルの考え方

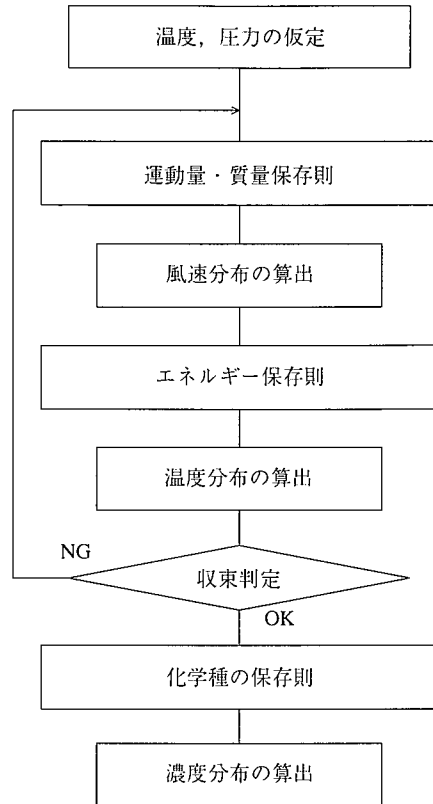


図7 粉塵拡散解析のフローチャート

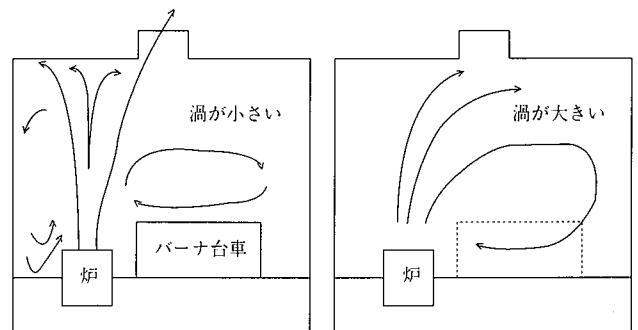


図8 工場内設備の気流性状への影響

の空気の流れに大きな影響を与えている。また解析での試行錯誤の結果、図9に示す操業床の隙間や床開口などからの上昇気流も、建家内の気流性状に影響を与えていることを明らかにした。このように補助的な設備や、隙間、開口なども現実に即して詳細に解析モデルに折り込む必要がある。

また、原料や資材の搬出入のために図10に示す合計8か所の出入り口が、その時々に応じて開閉され、外部気象条件や工場の操業状態に応じて空気が自由に入出入りしている。このため、例えば風の強い日などは、炉から発生した粉塵まじり空気が風により押し流されることがある。解析では各出入り口での風向、風速と温度を実測し、その値を境界条件として用いることとする。

以上より、設備や建家形状を適切にモデル化するために必要なメッシュ分割数は、図11に示すように42×26×19=20,748メッシュとなる。

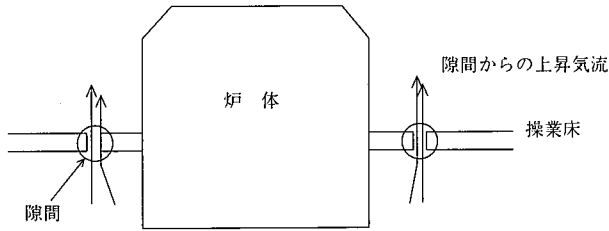


図9 床の隙間からの上昇気流

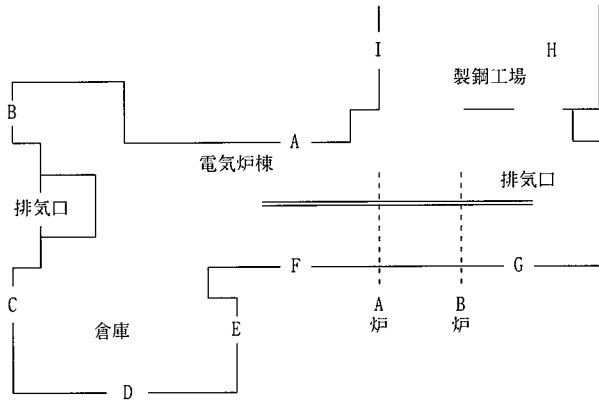


図10 出入口配置図A~H(15~20m<sup>2</sup>/箇所)

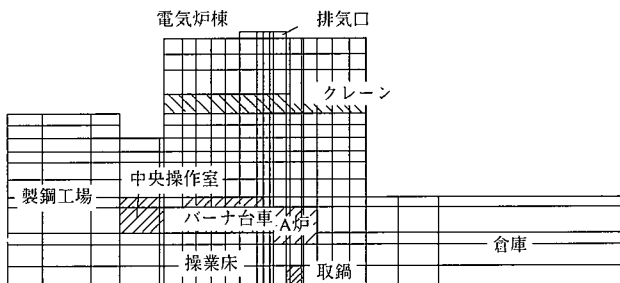
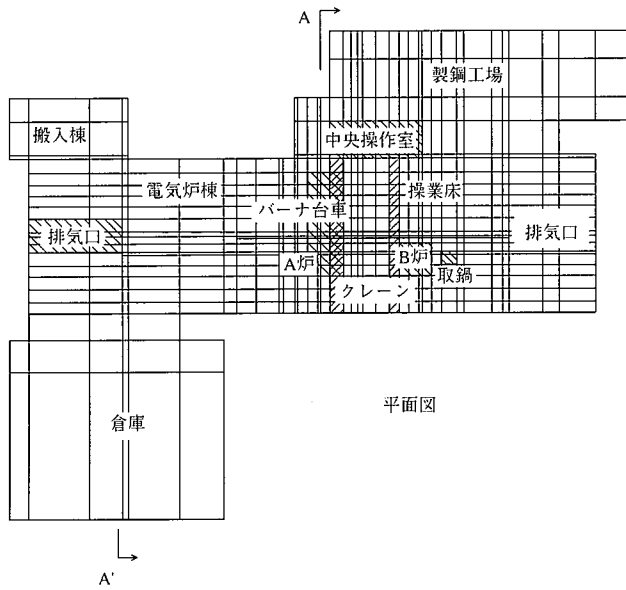


図11 解析モデル図

4.2.2 発熱量の設定

電気炉建家においては大きく二つの熱源を考慮する必要がある。一つは電気炉表面からの発熱であり、もう一つは炉蓋や出鋼時の出鋼口から吹き出してくる熱ガスである。発熱量の算定に当たっては、まず原料予熱入熱と消費電力、炉内での化学反応発生熱などの総入熱量から、溶鋼とスラグの顕熱や、炉体保護のための冷却水による熱損失など、製造過程で失われていく出熱量(全体の約95%位)を差し引き、先の二つの熱源の和を導き出した。次に電気炉表面からの発熱量を、炉の表面積や表面温度、輻射率などをパラメータに対流と輻射の関係式から求め、残りを熱ガスによる発熱量として類推することとする。検討の結果を表2にまとめる。

4.2.3 粉塵粒度分布の設定

発生してくる粉塵の粒径分布については先に述べた表1の通りであるが、解析上は実用的に表3に示す四つの代表粒径に絞り込むものとした。解析では各代表粒径毎に拡散解析を行い、その四つの解析結果をすべて足し合わせて最終的な粉塵拡散分布として表示し評価する。

4.3 発塵量の設定と粉塵拡散解析技術の精度検証に関する基本的な考え方

これまで述べてきた考え方をベースに解析モデルを設定し、実際の電気炉建家における粉塵拡散状況をコンピュータ上に再現する場合、最もノウハウ性が高く重要な課題は、電気炉からの発塵量をいかに設定するかである。

発塵量は理論値若くは実測値を使って正しく設定されるべき値でありながら、実際には非常にばらつきが多く、その上、その量の多さと高温雰囲気が障害となり、計算で求めたり直接測定したりすることがほとんど不可能である。実際に粉塵がどれくらいばらつきを持って発生しているのか、粉塵が舞い上がってくる炉直上部のモニタ面の粉塵濃度を実測してみると、図12に示す通り、発塵量は平均値(図示)に対して数分の1~数倍の範囲で大きなばらつきを持っていることが分かる。参考までに炉から出る発塵量を各工程ごとに測定し、平均値を求めたものを表4に示す。

この技術課題を解決する手段として、発塵量をパラメータとする逆解析を考案した。これは、適切な基準点を定め、発塵量を変化させながら解析結果と実測結果の合せ込みを行い、最も近似性の高い値を発塵量として設定するものである。なお、基準点としては、粉塵の動きの乱れが少なく、最も安定した場所と考えられる炉直上部のモニタ面と天井クレーン面を採用する。

表2 入出熱量内訳の推定結果(溶鋼)

内訳		熱量	
入熱量		100%	
溶鋼顕熱, 設備損失量		95%	
出熱量	建家内	炉表面からの放熱	4%
	放熱量	炉内からの発生ガス	1%
合計		100%	

表3 粉塵の解析モデル

粒径 (μm)	代表粒径	重量比 (%)	沈降速度 (cm/s)
75~	75.0	37.5	41.7
50~75	62.5	12.3	29.0
25~50	37.5	19.3	10.4
15~20	17.5	30.9	2.3

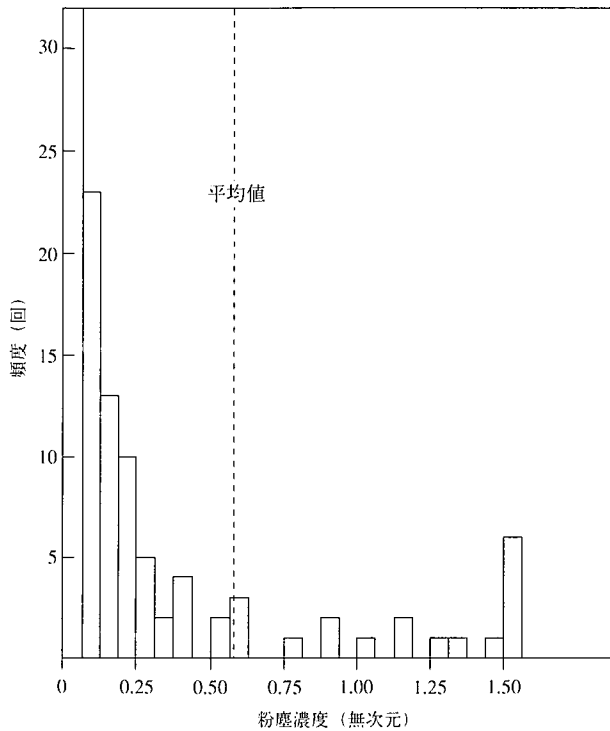


図12 排気口での粉塵濃度-頻度の実測結果(溶解時)

表4 各工程でのモニタ面濃度 (無次元)

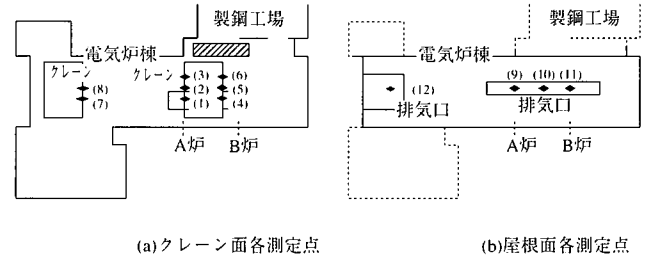
操業条件		モニタ面濃度	
A炉	B炉	A炉	B炉
予熱	溶解	0.51	0.58
出鋼	予熱	0.24	0.59
装入	予熱	0.36	0.43

この方法による解析精度を確認するにあたり、電気炉建家内の粉塵拡散状況を実測し、そのデータを基に解析を実施し検証していくこととする。まず、主要な操業条件として表5に示す3ケースを選びだし、基準点として図13に示す炉上(1),(4)、その他天井クレーンや建家屋根部10か所を解析精度の評価点として、建家内の粉塵拡散状況を実測する。測定機器としては、炉上の基準点には時系列で粉塵濃度が捕えられるデジタル粉塵計を、10か所の評価点には単位時間当たりの平均濃度が測定できるハイボリュームサンブラを用いる。また、同時に建家内に8か所ある出入り口での気流の向きと風速、温度も測定する。

次に解析では先に述べた通り、基準点における解析値と実測値の粉塵濃度がほぼ一致するように発塵量を設定し、その時の10か所の評価点での解析値と実測値の比較を行う。結果は図13に示すように、評価点(12)など一部で差異は認められるものの、自然換気を主体とする従来の電気炉建家内空間において、発塵量設定の妥当性ととも、空気の流れと粉塵の動きを高い精度で再現し得る解析モデルの確立が図れた。

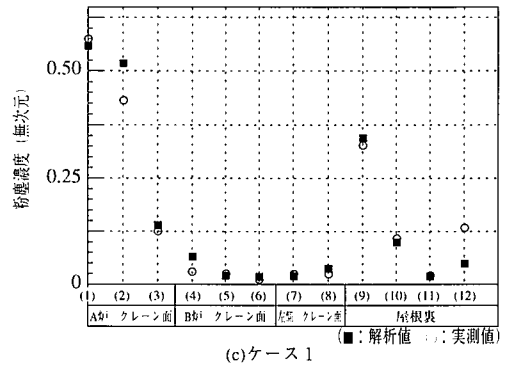
表5 実験ケース

	A炉	B炉
ケース1	予熱	溶解
ケース2	出鋼	予熱
ケース3	装入	予熱

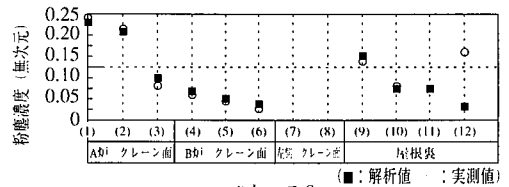


(a) クレーン面各測定点

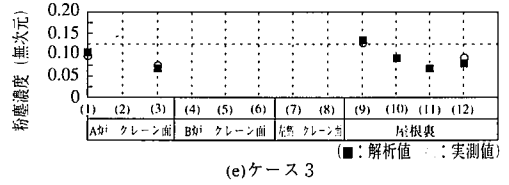
(b) 屋根面各測定点



(c) ケース1



(d) ケース2



(e) ケース3

図13 従来の操業条件での実測と解析

#### 4.4 改造前電気炉建家における小型換気扇での予備的検証

本電気炉建家が建家集塵方式に改造された後、解析で予測した集塵効果が確実に得られるかどうかについて、図14に示すような機械排気設備を想定した計画仕様の1/10程度の小型換気扇をA炉直上の屋根面に設置し、これまで述べてきた解析モデルによる解析値と実測値を比較することで解析精度の検証を行った。測定点は前節と同じく基準点となる炉上(e)と、評価点を天井クレーン上など5か所に設け、各出入り口での気流の向きと風速も測定した。なお、電気炉の操業条件としては、換気扇能力と発塵量のバランスを考慮し、A炉のみの操業で意図的に発塵を起こしB炉は休止させた。

図15によると、換気扇をOnにした場合の建家内の実際の濃度分布は、換気扇の吸引効果と炉のドラフト効果によって基準点には高濃度の粉塵混じり空気が集中しており、評価点の粉塵濃度は相対的に低下していることが分かる。Offにした場合は、基準点と評価点の粉塵濃度がほぼ同じ値となり、粉塵が建家内空間に均等に拡散している状況が分かる。換気扇の作動に応じた建家内の粉塵濃度の変化は、解析によってもほぼ正確に再現できており、本解析モデルが建家集塵を設置した工場空間に対しても十分に実用に供することが明らかになった。

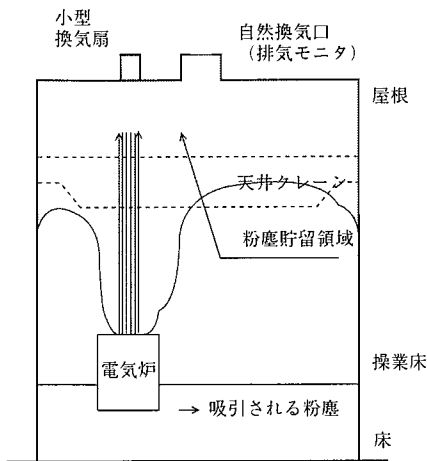


図14 小型換気扇の設置位置

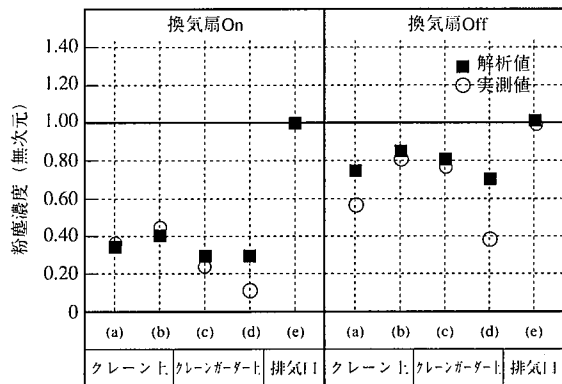
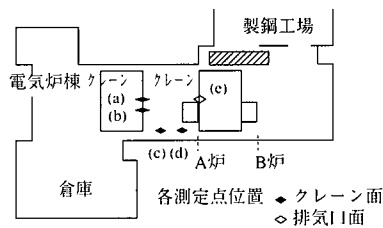


図15 小型換気扇による実験と解析

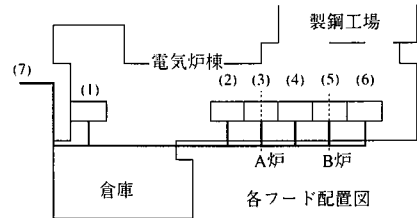
4.5 改造後電気炉建家における実地検証

粉塵拡散解析技術に関する総仕上げとして、電気炉建家に実際に集塵設備を設置した後、最終的に実測値と解析値との比較検証を行った。図16に、建家に6か所設けた集塵フードの配置と、それぞれの集塵風量の配分を示す。検証の対象となる操業条件としては表6に示す2ケースを選び出し、測定点は電気炉からの発塵量設定の基準点となる炉上(b),(e)、評価点については天井クレーン上、操業床に計8点設ける。

実測値と解析値の比較結果を図17に示す。ケース1では評価点d、ケース2では評価点gを除いて、その他の評価点では非常に一致している。なお、詳細な数値は割愛するが、この建家集塵方式により従来と同等以上の建家内環境の改善が図られた。

4.6 まとめ

これまでの取組みをまとめると、大きく次の三つの成果に集約できる。



	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
風量	0.20	0.16	0.13	0.20	0.19	0.12	1.00

図16 フード配置と風量配分

表6 実験ケース

	A炉	B炉
ケース1	溶解	出鋼
ケース2	予熱	溶解

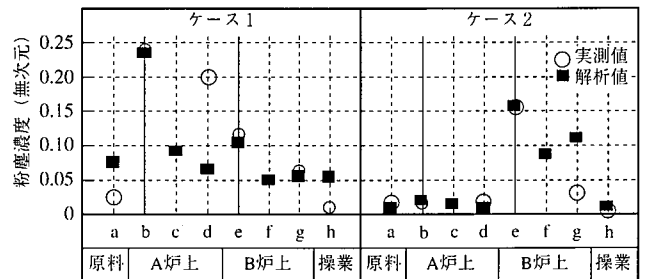
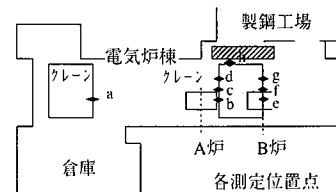


図17 実験と解析の結果比較

- (1)ある速度では空気の流れと同じ動きを行い、ある速度以下では空気の流れから離れ沈降を始めるという、粉塵拡散の過程がコンピュータで正確に追跡できるようになった。
- (2)電気炉など、設備が複雑に配置され、かつ、操業条件が時々刻々と変化する建家空間においても、空気と粉塵の流れがほぼ正確に解析で再現できるようになった。
- (3)建家集塵設備設置後の粉塵拡散の過程や濃度分布など、建家内における環境改善効果についても高い精度で予測できるようになった。

5. 粉塵拡散解析技術による新しい空気の流れと粉塵の動きの創出

具体的な二つの事例の検討を通して、最終課題である、“最小コストで建家内の環境確保が可能な空気の流れと粉塵の動きを創り出す(制御する)技術構築”を行う。

5.1 改造後の建家集塵方式における機械排気能力の更なる削減に向けた検討

建家内環境について改造後のレベルを維持しながら、機械排気能力の更なる削減に向けた検討を行う。この検討で最も大切なことは、建家内において環境を悪化させる原因となる空気の流れと粉塵の動きを事前に特定することである。

建家集塵方式に改造した後の電気炉建家モデルで解析した結果、電気炉直上の集塵フードから漏れた粉塵は建家内に対流する空気の流れに乗って拡散すること、この粉塵の拡散が建家内の環境悪化の原因となっていること、更に、集塵フードから漏れた粉塵を極力抑制することが建家内の環境改善につながることを、が判明した。

次に機械排気能力の更なる削減を目的に、電気炉直上のフードの(3)と(5)だけは表7に示すように風量を4割程度増加させるが、全体風量は2割削減する解析を行ってみる。図18に示すように、電気炉直上に吸引風量を集中させることで集塵フードから漏れる粉塵の流れが制御でき、全体機械排気風量を2割削減しても現状とほぼ同等の建家内環境が確保できる結果が確認できる。

まとめると、これらの一連の検討は、環境悪化の原因となっている空気の流れと粉塵の動きを解明し、電気炉直上の吸引風量を増加させ、それらの流れと動きが極力発生しないように制御することで、全体機械排気風量の削減などの所期の目的が達成できることを意味している。

5.2 自然換気と機械排気設備の併用方式による機械排気能力の最小化に向けた検討

自然換気による空気と粉塵の流れを有効活用し、機械排気設備と効果的に組み合わせることで機械排気能力削減と省エネルギー化が達成できると考えられる。自然換気と機械排気設備を併用した方法は、ハイブリッドベンチレーション方式(以下、HV方式と称す)と呼ばれ、これまで述べてきた建家密閉型の建家集塵方式より更に効率的な集塵方式との見解が一般的である。

しかし、この方式は図19に示すように、熱の排出は自然換気で行い、粉塵の排出は機械排気設備で行うことが基本となっているため、熱を自然換気で建家外に排出する際に、機械排気設備から漏れた粉塵が自然換気の空気の流れに乗ってそのまま建家外に出る可能性がある。HV方式の実現には、機械排気設備の能力により建家外に出る粉塵濃度を制御する必要があるが、本方式の効果は広く認められているものの、技術的な困難性から実用化した例はこれまでは

ほとんど皆無であった。

図20に機械排気能力を同一にして解析した建家密閉型の建家集塵方式と、HV方式の粉塵濃度分布を示す。HV方式では、機械排気設備から漏れ建家外に排出される粉塵濃度を、非常に希釈された自主規制値以下に収められるよう、機械排気設備の能力を制御しながら解析した結果、炉周辺部へ拡散していく粉塵濃度に着目すると

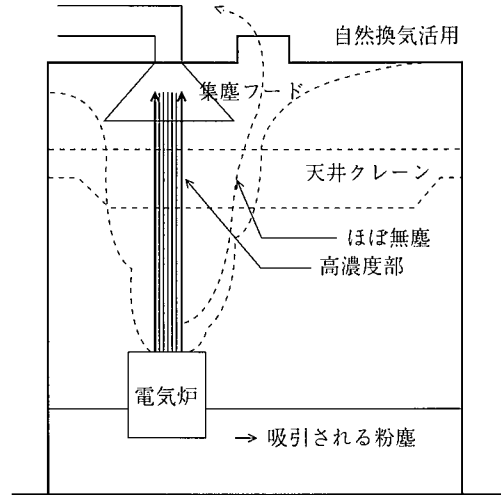
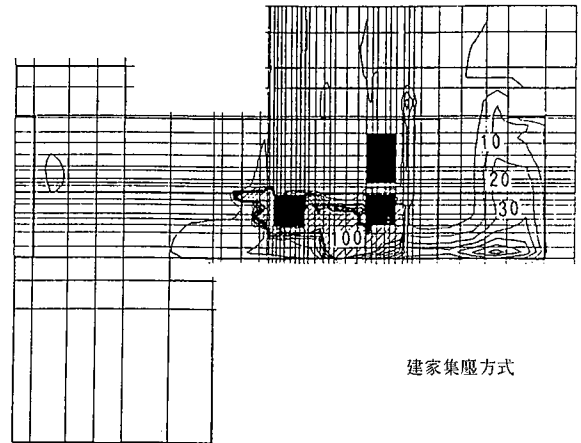
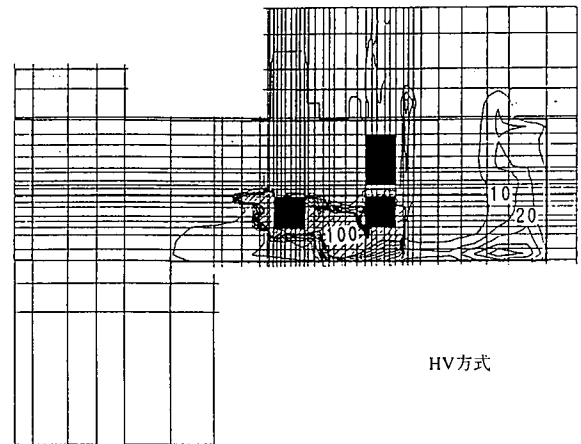


図19 機械排気と自然排気の併用



建家集塵方式



HV方式

図20 粉塵拡散解析による粉塵濃度分布(炉直近を100とする)

表7 風量配分(無次元)

フード	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
変化前	0.20	0.16	0.13	0.20	0.19	0.12	1.00
変化後	0.15	0.07	0.22	0.07	0.22	0.07	0.80

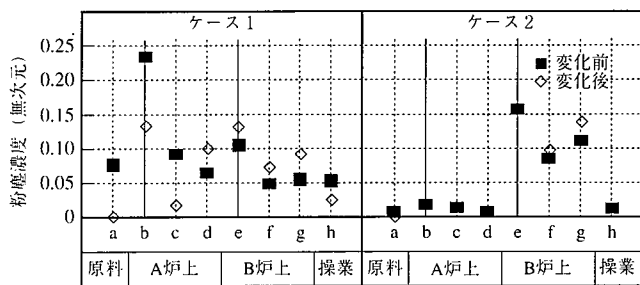


図18 風量配分と総風量の変化前後の解析結果(a~hは図17参照)



HV方式の方が明らかに環境改善が図られていることが分かる。

環境問題への意識が高まってきている現在，“建家集塵方式”については以下の二つの問題点が一般的に認識されている。

(1) 機械排気設備の大型化

機械排気設備の仕様決定要因は、これまで述べてきたように快適な作業性を確保しうる建家内温度と粉塵濃度の二つである。一般的には双方を満足するために、1時間当たりに建物容積の数回～数十回分の空気の入替えを可能とする大風量の排気設備が必要で、設備投資の大規模化が問題になっている。

(2) ランニングコストの膨大化

電気炉からは連続的に大量の熱が発生しているため、常に換気して熱を建家外に排出しないと、空気の流れなどのドラフト効果の低下によって集塵効率が悪化する。このことから、機械排気設備は連続運転が不可欠となり、膨大なランニングコストが必要になる。

HV方式によって目的に応じた空気の流れと粉塵の動きが自由に創り出せることになり、現状問題化している“機械排気設備の大型化”と“ランニングコストの膨大化”に関する課題解決の切札になるものと期待できる。

6. 新たなエンジニアリング領域への展開

粉塵拡散解析技術の確立によって、表8に示すすべての開発を完了し、製鉄工場における換気問題から半導体工場における乱流問題まで、幅広い工場空間ニーズに対応できる一連の空間環境設計技術として集大成を図ることができた。本技術はまた、粉塵を水蒸気に置き換えて、その動きを予測、制御することによる熱間圧延工場での水蒸気拡散問題や、空間を屋内から屋外へと展開し、大気の流れを予測、制御することによる石炭ヤードから周辺地域への粉塵飛散問題など、製鉄所における種々の環境問題の解決にも十分応用が可能であると考えられる。

一方、これまで本技術をアルミニウム精錬工場やごみ処理工場の換気問題、形鋼工場冷却床の冷却効率問題に適用するなど、従来定量的な解決策が見い出せなかった設備やプロセス課題に対しても広く適用が図られてきており、具体的な成果に結びついている。このように、空気の流れを中心にその予測と制御を可能とする本設計技術は、新しいエンジニアリング領域での重要な設備技術課題の解決にも対応できるものである。

表8 空間環境設計技術の内容と構築ステップ

第1ステップ		
適用空間	大規模自然換気空間	大規模圧力空間
評価項目	気流の風向と温度	建家屋の圧力性状
技術の内容	給排気面積と配置をパラメータとし、空間任意点の室温と気流の予測制御技術	屋根と壁材の隙間率をパラメータとし、空間任意点の圧力の予測制御技術
基本方程式	空気量、温度、気流速の保存側	
応用方程式		
第2ステップ		
適用空間	クリーンルーム空間	建家内粉塵空間
評価項目	完全垂直層流	粉塵拡散の性状
技術の内容	マイクロフローシミュレーション技術による床面積開口率をパラメータとした垂直層流予測制御技術	機械集塵能力をパラメータとし、空間任意点の粉塵濃度の予測制御技術
基本方程式	空気量、温度、気流速の保存側	
応用方程式	乱流モデル基本方程式	ガス拡散基本方程式

7. 結 言

粉塵問題に関しては、従来、発塵点と集塵点との一対一の量的関係について検討がなされてきた。今回の技術確立の最大の要点は、発塵点と集塵点の関係に、新たに、その間にある目に見えない粉塵拡散経路を組み込み、空間全体の任意の点で定量的な予測と制御を可能にしたことである。更に、この取組みにより、集塵設備は機械技術、建家換気は建築技術とする既成概念を打破し、粉塵拡散解析技術という共通の設計環境を作り上げ、各々のエンジニアリングノウハウを的確に發揮し合えるようにしたことは、より高精度な解を導き出せる新たなエンジニアリングの展開を可能にしたといえる。

今後、この技術を多くの案件に積極的に適用することで、環境改善を図り得る安価な設備仕様の具現化を図るとともに、まだ解決されていない環境問題や新たなエンジニアリング領域にも広く目を向け、様々な空間環境問題の解決に貢献していきたいと考える。

参考文献

- 1) 豊若, 川上: 新日鉄技報. (359). 39(1996)
- 2) 日本機械学会: 機械工学便覧. 新版. 東京, 日本機械学会, 1988, p.A5-150
- 3) 越後亮三: 機械工学辞典. 初版. 東京, 朝倉書店, 1988. p.637