

気流解析技術を基軸とした新しい空間環境設計技術の構築

New Design Concept for Space Environment Based on Numerical Heat Transfer and Fluid Flow Technology

豊 若 和 利⁽¹⁾
Kazutoshi
TOYOWAKA

川 上 寛 明⁽²⁾
Hiroaki
KAWAKAMI

村 橋 喜 満⁽²⁾
Yoshimitsu
MURAHASHI

抄 録

新日本製鐵では、近年、鉄事業分野において製品の高品質化、高付加価値化を目指すとともに、新規事業ではエレクトロニクス、新素材、化学事業など、戦略的に経営の多角化を図ってきている。これらの事業分野に共通的にいえることは、設備建設において、精密な生産設備のための運転環境の向上や工場全体の空気の清浄度確保など、これまで以上に生産空間に対する厳しい仕様が要求されるようになったことである。1985年から新日本製鐵では、このような厳しい要求を最小仕様で実現するために、生産空間における“空気の流れ”に着目し、熱流体解析技術を駆使した高度なエンジニアリング技術の開発と実用化に取り組んできた。本報では、その技術構築の考え方を中心に述べた。

Abstract

In recent years, Nippon Steel has engaged in diversified enterprises in various fields and tried to bring new products to effect. However, construction sites for the internal projects have started to inquire of the designers about severe requirements such as the maintaining of operational environment for precision apparatuses, the improvement of yield, 3 K problems in workshop, the countermeasure for the protection of environment inside and outside the workshop, and so. Nippon Steel paid attention earlier to the technology of "predicting and controlling of fluid flow" which is common to all of these requirements, and has buckled down to establish engineering technology of a high order which makes the most use of fluid flow analysis. In this paper, parts of its development are outlined.

1. 緒 言

製鉄土木建築設備のエンジニアリングでは、従来、大荷重、高熱、振動といった一般建築物と異なる技術課題を克服しながら、徹底した低コスト化、短工期化、そして品質向上に取り組んできた。

一方、表面処理鋼板などの製品の品質・高付加価値化や、精密自動設備周辺の運転環境の確保、粉塵が多い職場での環境改善要求の高まりなどから、製鉄所を含む工場内の空気そのものの質の改善が、エンジニアリング上の新たな課題として浮かびあがってきた。

具体的には、熱による精密設備の故障・誤動作を防止するための設備周辺に対する局所的な許容温度の設定や、微細な塵埃(異物)の付着による製品歩留の低下を防ぐための工場内における許容塵埃量の規定(クリーン度)である。高炉、原料、転炉など、特に粉塵が多く発生する職場では、作業範囲内の浮遊粉塵量を低減するよう改善要求が出されるようになってきた。

新日本製鐵では1985年頃から、このような空気の質の改善要求に対応するため、“空気の流れ”に着目してあらゆる環境問題に対処できる高度な設計技術の構築を目標に掲げ、エンジニアリングと建設

の場をうまく活用しながら、効果的に技術のスパイラルアップを図ってきた。

以下、鉄事業からエレクトロニクスなどの新規事業まで、幅広いニーズに応えるために取り組んできた空間環境設計技術について、技術構築の考え方を中心に述べる。

2. 新しい空間環境設計技術の着眼点と技術展開の基本方針

空間環境設計技術を代表する換気設計では、従来、重力換気理論などに基づき、工場全体の空気を入れ換えることで、温度条件などの要求仕様を満足させる設計法を採用してきた。

この方法では、建家内の小空間ごとに要求仕様が設定されても、空間ごとのきめ細かな設計対応ができないため、現実的には最も条件の厳しいところに合わせて全体の換気設計を行っていた。すなわち、従来の設計法では温度条件の厳しくない場所まで必要以上に換気されていたことになる。

そこで、まずは目に見えない空気の流れに着目し、空気の流れを

⁽¹⁾ 技術開発本部 設備技術センター 土木建築技術部

⁽²⁾ 技術開発本部 設備技術センター 土木建築技術部 掛長

知った上で効率的な空気の流れを意図的につくり出すことができれば、小空間毎のきめ細かな“温度条件”や“クリーン度”などの要求仕様に対応できるのではないかと考えた。つまり、きめ細かな設計要求への対応と最小仕様の生産空間を提供するためには、工場空間の局所にわたる気流性状の予測と、目的に応じた気流制御技術が不可欠となる。

このような考え方を基本に、新しい設計技術の骨格として“熱流体解析技術の実用化による工場内の任意点における気流性状の詳細な予測(解析)と制御技術の確立”を位置づけ、以下に示す技術展開の方針を策定した。

- (1) 熱流体解析技術の実用化開発のステップは2段階とする。
- (2) 熱流体解析の基本方程式である空気の流れ・温度・気流速の保存則のみを展開し、マクロ的な気流を追跡する工場建家の換気解析や大規模な圧力空間の解析技術の確立を第1ステップで取り組む。
- (3) 空気のマクロ的な流れを追跡する乱流解析技術や、空気中の粒子の動きを追跡する粉塵拡散解析技術は空気の流れ・温度・気流速の保存則を基本とした応用技術として捕らえ、第2ステップで取り組む。

図1に示すようにスパイラルアップ的な技術開発を繰り返しながら、解析技術を軸とする設計技術の高度化に努めてきた。以下、3章から6章にわたり、換気解析技術、圧力空間解析技術、乱流解析技術、粉塵拡散解析技術の確立に向けた取り組みについて述べる。

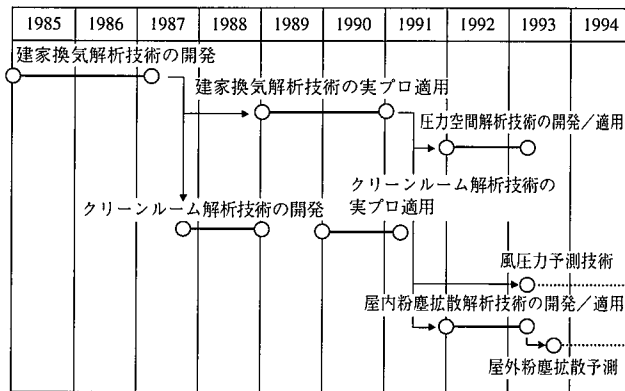


図1 空間環境設計技術の構築年表

3. 大規模工場における換気設計技術の構築

3.1 経緯

一般に工場や倉庫では建家全体の空気の入れ換えを目的に、建家内の温度と圧力分布は一定という仮定で換気設計が行われている。

しかし、連続亜鉛めっき設備や焼鈍設備に代表されるような大規模な熱源が不均一に配置されている製鉄工場建家では、建家内の温度と圧力分布に大きなばらつきがある。よって、それらを一定と仮定した従来の設計法では、例えば設計上仮定した排気設備が給気設備となって雨や雪の吹き込みの原因になるなど、技術的な限界があることが指摘されてきた。

3.2 技術構築の基本的な考え方

建家内の温度と圧力分布を一定と仮定する従来の設計法では、熱量、給気設備、排気設備の大小の関係は考慮できるが、雨や雪の吹き込み場所などの位置関係は全く考慮できない。

表1 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	建家内の圧力性状
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・気流速の保存則	
応用方程式	

第2ステップ

適用空間	クリーンルーム空間	建家内粉塵拡散空間
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・気流速の保存則	
応用方程式	乱流モデル基本方程式	ガス拡散基本方程式

これに対し今回提案する設計法は、熱量や給排気設備が3次元上の任意の空間に配置されていることを考慮し、大規模空間内における立体的な空気の流れを解き明かすことを基本とする。この設計法が構築できれば、従来法の限界を一気に解決できるとともに、これまで以上に効率的に設備仕様の最小化が図れると考えた。

3.3 具体的な技術展開

3.3.1 3次元換気シミュレーション技術の確立

3次元の熱と空気の流れはナビエ・ストークスの方程式によって表され、数学的に厳密解を求めることは非常に困難であるといわれてきた。しかし最近では、計算機の発達によって今回採用したようなはん用熱流体解析コードPHOENICS(英・CHAM社)^{2,3)}などを用いて、数値解析的に解を求めることが可能になってきている。

したがって、現実の工場建家の換気状態を精度よく再現するための課題は、換気口の実開口率や抵抗係数・外装材からの日射熱量など建家固有の定数設定や、対流と輻射を考慮した設備発熱量などを、いかにナビエ・ストークスの方程式の中に反映させるか、ということになる。

従来の換気設計のノウハウを利用して建家や熱源に関する定数の1次絞込みを先ず行い、最終的には解析と実際の建家での実測値との比較検証を繰り返しながら、数理最適化技術に用いる感度解析を応用した手法で、順次、定数設定を行った。その結果、図2に示すように温度については±1℃、風向についてはおおむね実測と一致する再現性の高いシミュレーション技術を確立することができた。

また、図3に示すように雨や雪の吹き込みは、熱源容量が圧倒的に大きい高層棟の影響を受け、低層棟のモニターから空気が逆流し

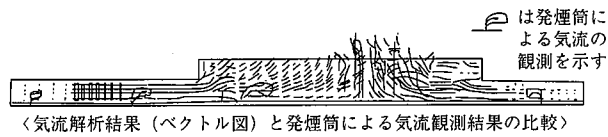
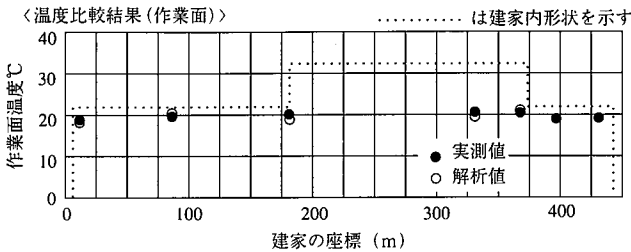
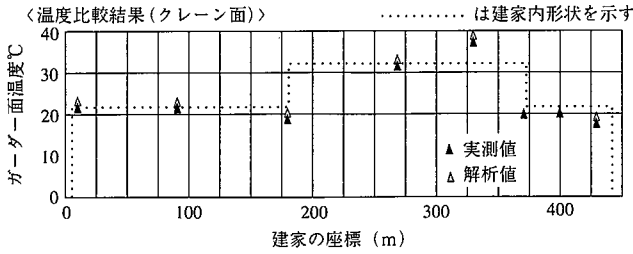


図2 3次元換気シミュレーション技術の検証結果

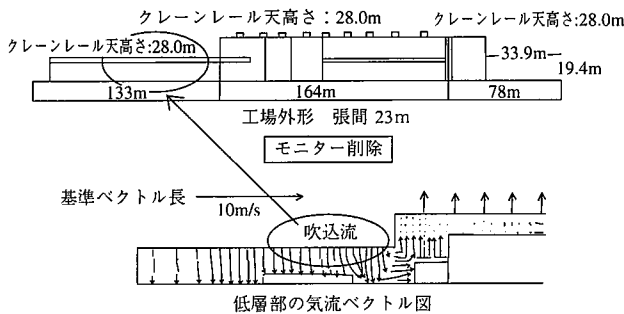


図3 解析結果の標準モデルへの反映

ていることが原因であることを解析によって突き止め、このモニターを中止することで、換気性能の向上と設備費削減という一石二鳥の成果を生み出すことができた。

3.3.2 換気設計の業務効率化に向けた提案

熱流体解析は、一般的に解析モデルの作成に多くの労力を要するとともに、ナビエ・ストークス方程式の解析にあたっては収束計算の開始点、すなわち初期値の与え方がコンピュータの計算時間を大きく左右する。

効率的な解析を行うためには、解析を着手する前に建家形状・熱源分布・発熱量に応じて、求めようとする最適解にできるだけ近づけた設計条件の初期値をいかに設定できるかが鍵となる。

そこで、例えば圧延工場建家では、建家形状・熱源分布・発熱量等が三つの分類に大別できることに着目し、分類毎に換気設備の配置を設定した標準モデルを作成し、更に、図4に示すように、基準発熱量と室温分布、機器や換気設備面積と室温分布の関係をノルマライズした諸因子の影響度特性も明らかにした。

これにより、熱流体解析を活用した換気設計が、建家の標準モデルをベースとした初期値のマイナー修正を行うだけで非常に効率的に行えるようになった。

1) 基準発熱量 (1.0×10^7 kcal/h)での室温分布
基準給排気面積
モニター 285 m^2
ガラリ 142 m^2



2) 機器発熱量と室温の関係

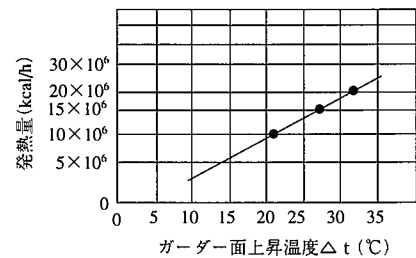
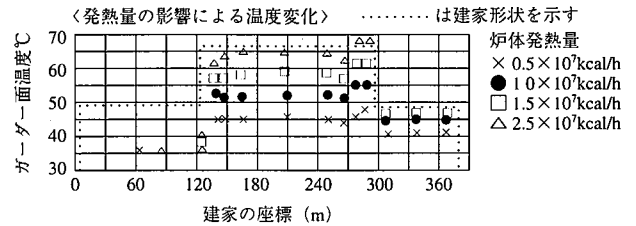


図4 建家換気に係わる諸因子の影響度分析図

3.4 まとめ

製鉄工場の換気設計においては、基本的にすべての建家で熱流体解析を使った換気設備の最小仕様化の検討を実施している。これは、複雑で膨大な時間を要する熱流体解析技術を、実用的な換気設計技術まで高めてきた成果であると考えている。

4. 大規模工場におけるクリーン化設計技術の構築

4.1 経緯

鋼板に塗装やラミネートを施す製造プロセスでは、空気中の塵埃が鋼板上に巻き込まれると、鋼板の品質や歩留を低下させる要因となるため、工場内部をクラス100 000程度のクリーン空間にすることが要求されている。この100 000程度の仕様は半導体工場などに比べるとローグレードといえる。よって、一般のクリーンルーム仕様(クラス1~10 000)の設計技術を使って、フィルターや内装材などを設計すると大幅なコスト増につながってしまう。

技術構築にあたっては、これまで世の中が追いかけてきたクリーンルームのアプローチとは全く視点を変え、金属屋根・壁で覆っただけの製鉄工場建家をベースに最小限の工夫を加えることで、クリーン度をどこまで上げられるかについて、その限界に挑戦した。

4.2 技術構築の基本的な考え方

一般のクリーンルームでは、塵埃量が多い外部からの塵埃侵入に対しては内外装材で遮断し、比較的塵埃量が少ない内部発塵に対してはフィルターを通して塵埃を除去するという対策を講じている。

今回のクリーン度は一般のクリーンルームに比べて低い。よって、換気などに伴って侵入してくる外部塵埃に対策の重点を絞って検討すれば、クリーン化の要求が達成できると考えた。

具体的には、まず、製鉄工場の一般仕様である金属の屋根・壁に最低限の仕様を追加することで建家の密閉化を行い、次に、建家の内部空間を正圧化するという、新しい視点に基づくクリーン化技術の構築に取り組む。

4.3 具体的な技術展開

4.3.1 屋根・壁の密閉度の定量的把握

低コストで建家内の正圧を得るため、厚さ1mmにも満たない鉄板を重ね葺きした従来の金属屋根・壁をベースに、その重ね部にシールゴムを設置するだけの簡易密閉構造を考えた。密閉構造の実現にあたっては、図5に示すモデルルームで送風量と室内正圧値の関係を実験によりまず把握し、次に解析によって、その関係を再現しうる屋根・壁面積に対する隙間面積の比率(以下、隙間率と称す)を導き出した。

図6に示すように、従来の金属屋根・壁の重ね部にシール材を施しただけで隙間率が0.46%から0.01%と小さくなり、極めて高い密閉度が得られることが確認できた。

4.3.2 機械換気能力の適正化による建家内正圧化の検討

屋外塵埃が建家内に侵入しない最低条件とは、開口部から屋外に向かう空気の流れを確実に確保することである。

図7に示すように実際の建家では、製品の搬出入のためのシャッターや隣接棟との連絡地下ピットなど、密閉度を低下させる原因となる開口部を配置しなければならず、計装品の保証温度を確保するための換気口も設けなければならない。

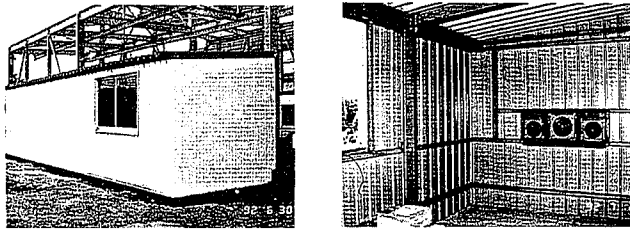


図5 隙間率評価モデルルーム

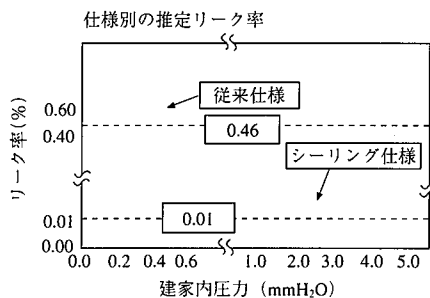
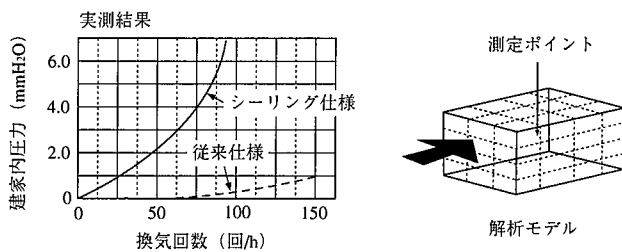


図6 実験と解析による隙間率評価結果

これらの条件を加味した上で、先に求めた隙間率を用いて、建家内部の正圧化に必要な給気風量の検討を行った。図8に示すように、最小の換気風量を給気3000m³/min(右上の下向気流)、排気890m³/min(屋根換気口)とすれば、テンションリール(TR)用ピットとベイオフィール(POF)用ピットの4ピットとも屋外に向かう風が確保でき、また、クレーン計装品の保証温度50℃も満足できることが判明した。なお、この解析結果は、開口部風速を含めて精度よく一致することが実測結果から確認できている。

4.4 まとめ

“隙間率”という考え方を解析技術に導入し、屋根と壁の密閉度と建家内部の正圧化に必要な給気風量との最適な関係を定量的に導き出すことで、他社には類を見ない新しい視点でのクリーン空間が実現できたと認識している。

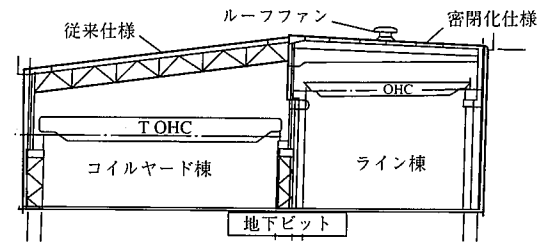
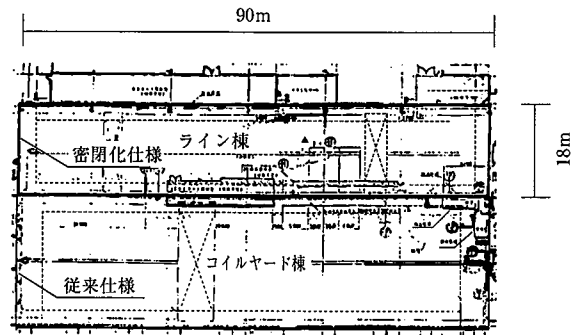


図7 建屋概要

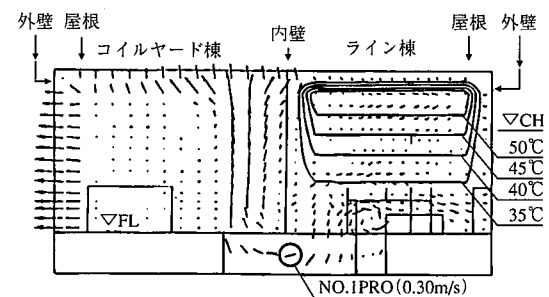
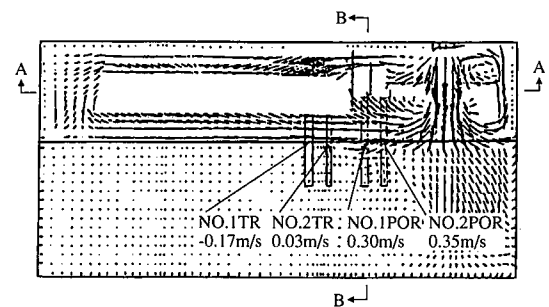


図8 気流解析結果(夏期 33℃時)

5. スーパークリーンルーム設計技術構築

5.1 経緯

エレクトロニクス分野における事業成否の鍵は商品開発における先発性にある。電子部品、半導体メーカーは秒進分歩のスピードで研究開発を行っているが、その内容は一般に公開されていない。したがって、スーパークリーンルーム設計技術は新日本製鐵独自で開発し、技術を担保していく必要がある。

5.2 技術構築の基本的な考え方

スーパークリーンルームでは、表2に示すデザインルールの通り、対象粒径 $0.1\mu\text{m}$ の塵埃粒子が 1ft^3 の空气中に1個以下というほぼ完璧な無塵空間が要求される。

表2 スーパークリーンルーム設計技術の構築

エリア名称	クリーン度 (個/ft ³)	対象粒径 (μm)
バック	クラス10000	0.5
作業域	クラス100	0.3
プロセス域	クラス1	0.1

このような超高精度なクリーン空間を達成するためには、建家外部からの塵埃の侵入防止はもとより、建家内部に発生した塵埃を堆積させない工夫が不可欠となる。この技術構築には、室内に層流、厳密に述べると鉛直下方への垂直層流(偏流角 14° 以下⁴⁾)の流れをいかに安定して作り出すかが鍵となる。

技術構築にあたっては、効率的な2段階の進め方を考え、まず、壁面や装置表面等の粘性抵抗により発生する乱流渦の影響を詳細に把握できるマイクロフローシミュレーション技術を確立する。次に、確立した解析技術を駆使して、安定した垂直層流を作り出すための空気吹出口や排出口の設定条件などのクリーンルームに必要な詳細仕様を絞り込んでいくこととする。

5.3 具体的な技術展開

5.3.1 マイクロフローシミュレーション技術の確立

従来のナビエ・ストークス方程式に乱流渦の影響を把握するための方程式を組み込んだ $K-\epsilon$ 型乱流方程式を以下に示す。下式のうちモデル定数は $\sigma_1, \sigma_2, C_1, C_2, C_D$ である。

乱流エネルギー K の輸送方程式

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \frac{\partial KU_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{V_t}{\sigma_1} \frac{\partial K}{\partial X_j} \right\} + V_t S - \epsilon$$

乱流逸散 ϵ の輸送方程式

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon U_j}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left\{ \frac{V_t}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right\} + C_1 \frac{\epsilon}{X} V_t S - C_2 \frac{K \epsilon}{V}$$

乱流渦動粘性係数 V_t と乱流エネルギー K 、

乱流逸散 ϵ との関係式

$$V_t = K^{1/2} L = \left\{ C_D \frac{X^2}{\epsilon} \right\}$$

モデル定数のうち乱流渦の発生に大きな影響を与えられとされる σ_1, σ_2, C_2 に関し、パラメトリックスタディによる解析値と実験値との合わせ込みを実施した。合わせ込みの結果を図9に示すが、 $\sigma_1=0.9, \sigma_2=1.3, C_2=1.92$ の場合に乱流性状は実験結果とよく一致することが判明した。

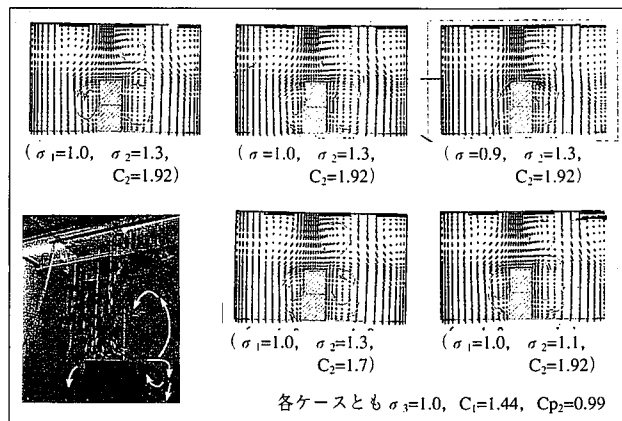


図9 乱流性状の分析

5.3.2 安定した垂直層流創出への挑戦

前述したように、作業員や装置からの発塵が室内に堆積すると、塵埃は乱流の発生により室内に巻き上げられ、クリーン度が著しく低下する。このため、スーパークリーンルームでは天井全面からクリーンな空気を垂直に吹き出し、塵埃と室内空気は床面のグレーチングを経由して非常に速やかに地下に設置した空気吸込口から排出させる必要がある。空気吸込口は一般的には設備的な制約から地下の壁面に設置されるため、空気吸込口付近の空気の流れは水平となり、このことが完全層流形成を阻害する要因となっていた。

そこで、グレーチングの開口率の違いによる圧力抵抗の変化に着目しながら、マイクロフローシミュレーション技術を用いて垂直層流を安定して形成できる条件を求めた。その結果、図10に示すように吸気口周辺のグレーチング開口率を25%とすれば、吸気口の影響により発生する偏流を最小化でき、安定した垂直層流が作り出されることが判明した。

現地実測の結果、図11、12と表3に示すように一部では 15° の偏流角が確認されたものの、その他の部分はすべて 14° 以下の完全垂直層流が実現でき、ほぼ完璧な無塵空間を創出することができた。

5.4 まとめ

従来のクリーンルーム建設では、開度調整機能付きの高価なグレーチングを採用し、試運転調整段階における開口率の調整に多大なコストと手間を要してきた。

今回、高精度で完全垂直層流を予測・制御できる技術を確立したことで、開度調整機能付きグレーチングなどの余分な設備や試運転調整段階での作業が省力化でき、新日本製鐵独自のスーパークリーンルーム設計技術が短期間に構築できた意義は大きいと考えている。

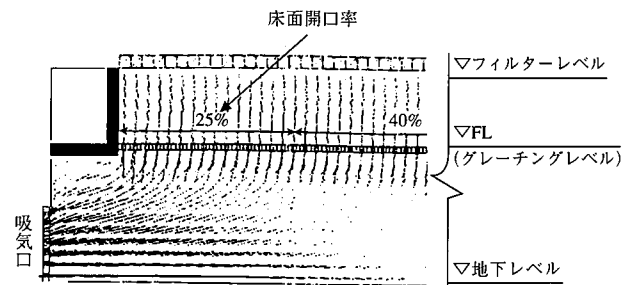


図10 ベイエリアの気流解析結果(初期段階)

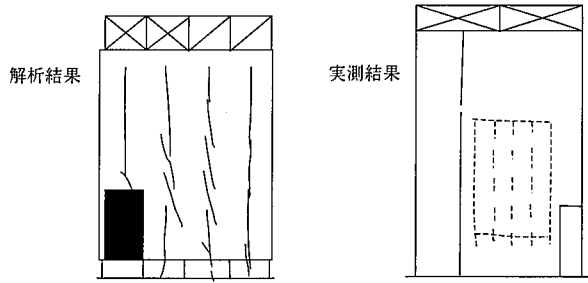


図 11 バイエリアの気流性状検証(最終段階・横断面)

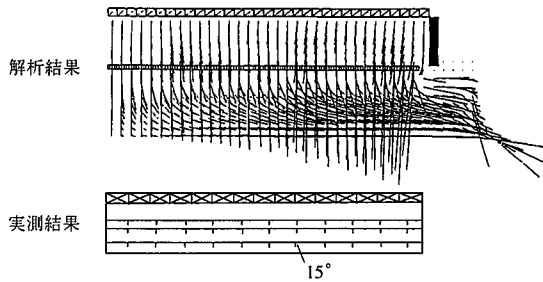


図 12 バイエリアの気流性状検証(最終段階・縦断面)

表 3 クリーン度評価結果

エリア名称	対象粒径 (μm)	測定 No.	粒子濃度(個/ ft^3)				備考
			1回	2回	3回	平均	
ベイ プロセス域	0.1	1	0	0	0	0	≤ 1
		2	0	0	0	0	
		3	0	0	0	0	
		4	1	0	0	0.3	
		5	0	0	0	0	

6. 工場建家内の粉塵拡散解析技術の構築

6.1 経緯

高炉や転炉・電気炉の粉塵対策においては、従来、炉から出た粉塵を建家の小屋裏にいったん貯留し、その後、少しずつ屋外に粉塵を排出する方法をとってきた。この方法は建家内に粉塵を貯留させることから作業環境の悪化を招き、更に、建家全体に拡散している粉塵を集塵することから膨大な機械集塵能力を必要としていた。

従来方式を改善するために、図13、14に示すように発塵源からの自然換気による強い上昇気流を利用しながら高濃度の粉塵を局所的に機械集塵することで、作業環境の改善と機械集塵能力の削減を同時に達成できる新しい換気システムの検討にチャレンジした。

6.2 技術構築の基本的な考え方

今回検討する換気システムの実現には、建家内の自然換気と局所機械集塵の組み合わせによって刻々と変化する気流(風向と風速)と、粉塵拡散の状況を把握する必要がある。

具体的には、前章までに述べてきた“空気の流れ”以外に、空気の流れの影響を受けながら空気中を浮遊する粉塵(粒子)拡散を定量的に予測・評価できる高度な解析技術を確立する。次に、これまで機械技術者と建築技術者が別々に設計してきた機械集塵設備と自然換気設備の二つの設備を、粉塵拡散解析技術という共通の土俵に乗せ、最も効率的に粉塵除去が実現できる換気システムを検討することとする。

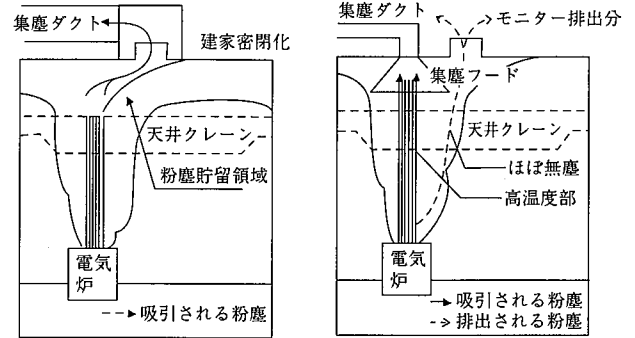


図 13 従来の建家集塵方式

図 14 今回提案の集塵方式

6.3 具体的な技術展開

6.3.1 粉塵拡散解析技術の確立

粉塵拡散を予測する場合、最も重要なことは、対象とする粉塵が建家内の気流に沿って拡散するか、又は気流と違った挙動を示して拡散するか、という粉塵の粒径と密度、及び気流との関係をまず明らかにする必要がある。

調査の結果、検討対象とした粉塵の多くは粒径 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ の範囲にあり、これらの粉塵は沈降に際し空気の粘性の影響を大きく受けて一定速度で沈降する特性のあることが判明した。すなわち、粉塵の重力沈降に関しては運動エネルギーの変化はなく、粉塵の拡散に関しては複雑な運動方程式を解く代わりに、図15に示すように単位空間における物質の移流-拡散の保存則さえ展開すれば粉塵拡散状況を把握できることを突き止めた^{5,7)}。

図16、17に示すように、ある工場の複数の操業状態においても粉塵拡散の現状をほぼ正確に再現でき、しかも、空気の流れを解析する場合とほぼ同じ解析時間で解析することができた。

6.3.2 効率的な換気システムの検討

構築した解析技術を用いて、図16に示すように自然換気と局所機械集塵の組み合わせた最適な建家換気システムを見出した。

この工場の例では、機械集塵風量を従来の8割程度に低減しても高濃度の粉塵を局所集塵で建家内に拡散する前に吸引することから作業者の常駐する作業床レベルでは現状濃度を1/5にも改善できた(図18、19参照)。また、自然換気で屋根面モニターから建家外に排出される粉塵も、近隣地域や遠方からも目視確認できない状態に抑えられたことも明らかになった。

更に機械集塵位置を操業やクレーンの走行等の障害とならない位置、すなわち、炉と屋根面との間に設置できれば、機械吸引風量

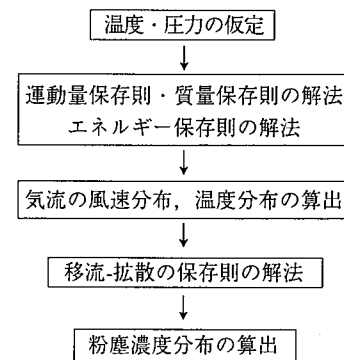


図 15 粉塵拡散解析のフローチャート

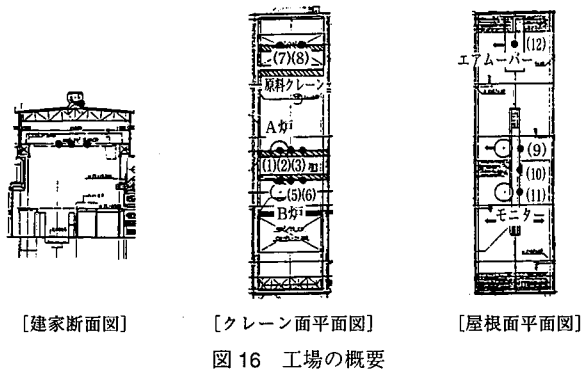


図 16 工場の概要

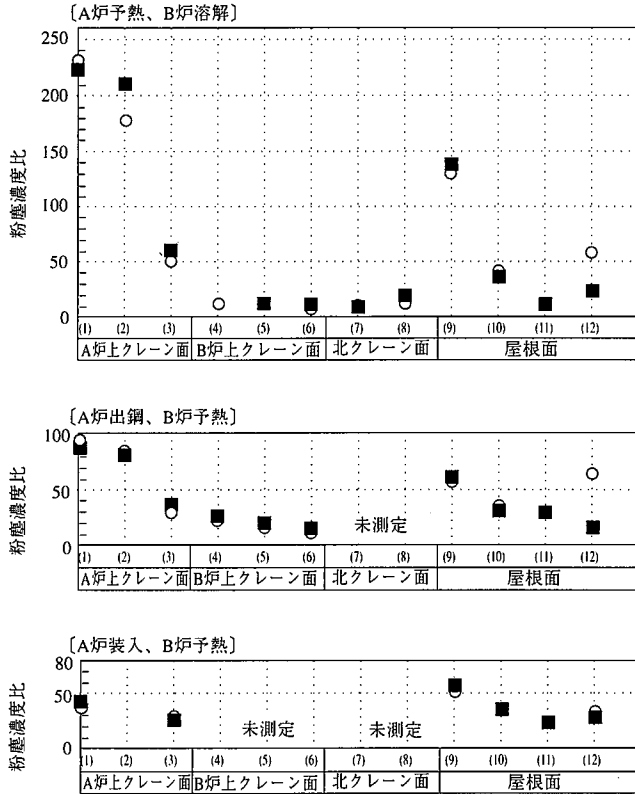


図 17 粉塵拡散状況の再現結果(■:解析, ○:実例)

を6割程度まで低減でき、設備費削減とともに電力費用などのランニング費用も大幅に削減できることが分かった。

6.4 まとめ

今回の取り組みにより、従来の空気の流れだけでなく、空気とともに拡散していく粉塵の流れが追跡できる技術を確立することで、自然換気と局所機械集塵を組み合わせた新しい環境改善の方法を定量的な数値をもって提案することができたと考えている。

7. 結 言

今回のような空間環境設計技術が体系的に確立できたのも、気流制御技術の基本を空気の流れの正確な予測制御技術と位置づけ、エ

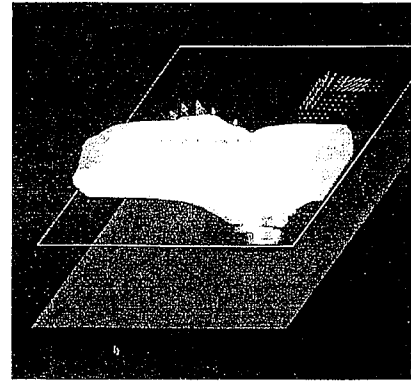


図 18 自然換気のためのシミュレーション結果

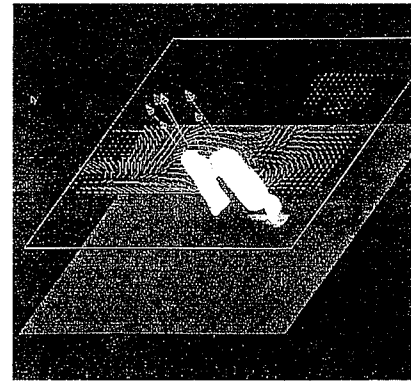


図 19 自然換気と局所機械集塵を組み合わせたシミュレーション結果

ンジニアリングと建設の場を有効活用しながら、地道に実験・解析・実測・評価を繰り返してきた成果であるといえる。

今後は、例えば、これまで対象としてきた屋内空間から屋外空間に目を向ければ、製鉄所からの近隣地域への粉塵飛散対策のニーズがある。また、空気中の浮遊物質と空気の流れの関わりに目を向ければ、水蒸気による結露や雨滴の侵入(建家への降り込み)など、空気に関するあらゆる自然現象の解明も必要となる。

これからも“空気の流れ”を基本に、空間環境設計技術のメニュー拡大と適用拡大に向け、地道な努力を繰り返していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本建築学会：換気設計。彰国社、1980
- 2) スミスV(水谷、香月訳)：コンピューターによる熱移動と流れの数値シミュレーション。森北出版、1985
- 3) PHOENICSに関する一連のマニュアル。CHAM社
- 4) 日本空気清浄協会：クリーンルームハンドブック。第1版、オーム社、1989
- 5) 日本空気清浄協会クリーンルーム性能評価法専門委員会：クリーンルームの性能評価指針。空気清浄、1989
- 6) JIS B 9920：クリーンルーム中浮遊微粒子の濃度測定方法およびクリーンルームの空気清浄度の評価方法。
- 7) 香月正司、中山顕：熱流動の数値シミュレーション。森北出版、1991
- 8) 田中幹也、平岡正勝：移動現象論。朝倉出版、1986
- 9) 谷下一松：熱工学ハンドブック。山海堂