

1F 廃炉に向けた放射線環境改善に係る デジタル技術の研究開発の進捗

－ 3D-ADRES-Indoor：ダスト環境解析のためのCFD技術開発－ R&D Status of Digital Technology for Remediation of the Radiation Environment toward 1F Decommissioning - 3D-ADRES-Indoor: R&D of CFD Technology for Dust Environment Analysis -

日本原子力研究開発機構

中村 博樹、坪田 陽一、町田 昌彦、山田 進、金 敏植、田中 伶詞
飛田 康弘、岩田 亜矢子、青木 和久、山口 隆司、鈴木 政浩、岡本 孝司

アドバンスソフト株式会社

波田地 洋隆、高橋 淳郎

株式会社アーク情報システム

山口 崇博、橋浦 穰、名古屋 靖一郎、木野 由也

サイバネットシステム株式会社

片岡 平、古口 睦士、松本 陽司、中宮 義貴

高度情報科学技術研究機構

吉田 亨、古立 直也、柳 秀明、長谷川 幸弘

キーワード：福島第一原子力発電所、廃炉、ダスト、CFD、OpenFOAM、RANS、LES、風況、
ダスト発生源、逆推定、LASSO、アンサンブル計算、データ同化、可視化、デジ
タルツイン技術

福島第一原子力発電所（1F）の廃炉作業を円滑に進めるには、原子炉内から漏洩した放射性物質の汚染により生じた高線量の放射線環境を改善し、廃炉作業従事者の被ばくを可能な限り低減するためのデジタル技術の開発が求められている。日本原子力研究開発機構（JAEA）は、この課題解決に貢献するため、経済産業省の「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（原子炉建屋内の環境改善のための技術開発（被ばく低減のための環境・線源分布のデジタル化技術の高機能化開発）」に係る補助事業（国プロ）を受託し、令和（R）5年4月からR7年3月の期間、廃炉対象屋内の放射線環境改善に係るデジタル技術の研究開発事業を進めてきた。当該事業では、前期事業（R3～4年度実施）にて開発した3D-ADRES-Indoor：プロトタイプを発展させ、現場で放射線源の同定が可能な高速デジタルツイン技術から成るFrontEnd、1F事務本館等の居室で放射線環境の詳細解析（被ばく評価の実施等も含む）を行うためのPro、そして、収集したデー

タ及び解析したデータを集中管理するデータベースの役割を果たすBackEndの3つの連携システムの開発を目標としてきた。本報告では、本システムのFrontEnd、Proに組み込むべき新しい機能（ダスト環境解析のための計算流体力学：Computational Fluid Dynamics（CFD）解析機能）について、研究開発を実施した成果と課題について紹介する。1Fでは、漏洩した放射線源が屋内の構造物に付着し分布している他、廃炉工程で発生するダストも放射性物質を含むと考えられ、ダストの発生、その移流拡散、沈着及び再浮遊等の基本的現象の理解とその予測が求められる。ダストは、放射線環境改善の中でも重要な課題の一つであり、構造物表面に付着した静的な放射線源と比較し、動的な放射線源に位置付けられ、より難易度の高い解析技術が求められる。本報告では、上記課題に対し、ダストの移流拡散をシミュレーション可能とするCFD技術をベースに、三つのCFD活用技術の研究開発状況について報告する。一つ目は、建屋内の定常的風況を確認可能とするための定常アンサンブル計算であり、1F2号機モデルへの活用例をもとに議論する。二つ目は、ダスト発生源の逆推定を可能にするための技術である。ダスト発生源は至る所にあると考えられ、その中から発生源を効果的に逆推定する計算法（Least Absolute Shrinkage and Selection Operator（LASSO））について報告する。三つ目は、現場の観測情報をもとに、CFD計算自体を現場環境に適合させ、その後のダスト環境変化を予測可能とするデータ同化手法である。最後に、それらのシミュレーション結果を効果的に可視化する技術及び3D-ADRES-Indoorへの組み込み及びシステム化の状況についても報告し、今後の研究開発の方向性についても議論する。

1. はじめに

2011年に発生した1F事故により、放射性物質の漏洩が発生し、原子炉建屋内には高い放射線量を示す地点が数多く存在し、廃炉作業を進める上で大きな障害となっている。今後、廃炉作業の中核となる溶け落ちた核燃料から成るデブリの取り出しのためには、上記の障害を克服し、炉心への安全なルートを確保すると共に、可能な限り上記作業に携わる廃炉作業員の被ばくを低減することが求められている。

作業員の被ばくを低減し、廃炉作業を加速させるには、高い放射線量を生み出す線源の存在を明確にすることが求められる。もし、高強度の放射線源の位置やその強度を明らかにすることができれば、作業空間内の線量を低減させるための有効な除染・遮蔽等の計画立案が可能となり、廃炉の取り組みを効率良く且つ計画的に進められると考えられる。

上記の高強度放射線源の課題は、構造物表面に強く付着した静的な放射線源が作る放射

線環境の課題と位置付けられる一方、廃炉作業とは、その放射線環境に擾乱を与えることに該当し、ダストの発生と、その移流拡散及び沈着とその後の再浮遊等の現象が起これと考えられ、いわゆる動的な放射線源による放射線環境の課題と位置付けられる。

静的な放射線環境の場合、放射線源の位置及び強度を精度良く推定する技術が求められる。その技術とは、モニタリングに係る被ばく及び労力を極力減らす一方、推定は高精度に実施可能とする技術である必要があり、その早期の確立が求められてきた [1]、[2]。これは、ある意味、情報が不足する中でも、線源の位置や強度を可能な限り精度良く推定可能とすることを意味しており、従来の限界を突破する技術として、LASSO法等の研究開発が実施され [1]、[2]、放射線源推定技術確立へと向けた試験が行われてきた。なお、上記課題は、国プロの中心課題であり、これまで、プロトタイプの開発及び5号機での試験結果をRISTニュースで報告してきた [1]、

[2]。その後、2024年度、2号機、3号機での現場での試験を実施し、おおよそ期待通りの成果を得ることができたが、課題も浮かびあがってきた。これらの成果と課題については、別途報告する [3]、[4]。

本報告では、もう一つの課題である、ダストを中心とする動的な放射線環境の課題に迫るデジタル技術の報告を行う。当該デジタル技術の中心となるのは、CFD技術である。当該技術を用い、流体（ここでは屋内の空気）の動きをシミュレーションすることにより、建屋内の風況を再現し、ダストの発生、その移流拡散と構造物表面への沈着及び再浮遊現象を予測することが可能となれば、極めて有用と考えられる。しかし、その能力は高いが、活用にあたっては、様々な課題があることも知られている。本報告では、ダスト環境改善に向け、三つのCFD活用方法（図1参照）を取り上げ、課題解決に向けた研究開発の取り組み（成果と課題）を紹介する。

一つ目は、ダストの移流拡散の複雑な挙動をどう把握するかという課題に対するCFD活用技術の研究開発である。ダストを動かす空気の流れ（風）は、基本的に乱流に相当し、ダストの移流拡散も複雑な挙動を示すため、その現象をどのように取り扱うかという基本的な課題がある。すなわち、その現象をどのようにシミュレーションし、有用な情報を引き出すかという課題と言える。実際、乱流現象を正確に再現するには、正確な初期及び境界条件を果たす必要があり、この要請に応えることは、ほぼ不可能となる。例えば、1F等の建屋内は大きく、且つ、放射線量も高く、風況測定を綿密にすることは困難なため、上記条件を準備することは、殆ど不可能と言ってよい。そこで、著者らは、Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) [5] と呼ばれる乱流に起因する変動を平均化する手法を用いて平均化した風況の再現を試みた他、さらに、そのアンサンブル計算 [5] を用いる

ことで、どの場所の風況が、初期及び境界条件の変動に対して敏感であるか等を調べ、どの場所でダストの移流拡散が複雑な挙動を示すかを分析することとした（本研究開発の成果と課題は3章参照）。当該手法を採用することで、屋内の大方の風況が確認可能となり、ダストの主流方向への移流・拡散の様子が明らかとなれば、それは、有用な情報になると考えられる（図1参照）。

二つ目は、ダスト発生源の同定という課題に対応するCFD活用の研究開発である。現在、廃炉作業を実施することで、ダスト濃度が高くなり、作業者の被ばく低減という観点から、退避行動をとる等の事象が起これらうと考えられるが、ダスト発生源が不明である場合、ダスト濃度の移流拡散の方向や沈着までの時間等が不明となり、その後の適切な対処を決定するための情報が不足するという課題がある。これに対し、複数のモニタリングスポットでダスト濃度が上昇した際、ダスト源がどの位置にあり、ダストソース源の凡そのインベントリーが予測できれば、CFDを活用することで、その後のダスト挙動が予測可能になると考えられる [6]。しかし、建屋内のあらゆる場所がダスト源になる可能性があるため、その特定は、モニタリング情報が少ない中、建屋内の複雑な構造物からなる発生候補源（巨大な自由度を持つ）の中から推定することは極めて難しい課題と考えられる。但し、実際の現象では、ほんの一部の箇所が、作業による擾乱によりダスト源となり、それさえ精度良く推定すれば良いことが分かる。著者らは、この課題に際し、LASSO法 [1]、[7]、[8] を用い、発生源の逆推定を試み、その効果について研究を行った。その結果、LASSO法を使うと、効率的にダスト発生源を突き止められることが確認できた（図1参照）。しかし、その効果を得るには、更なる課題もあることが判明している（本研究開発の成果と課題は4章参照）。

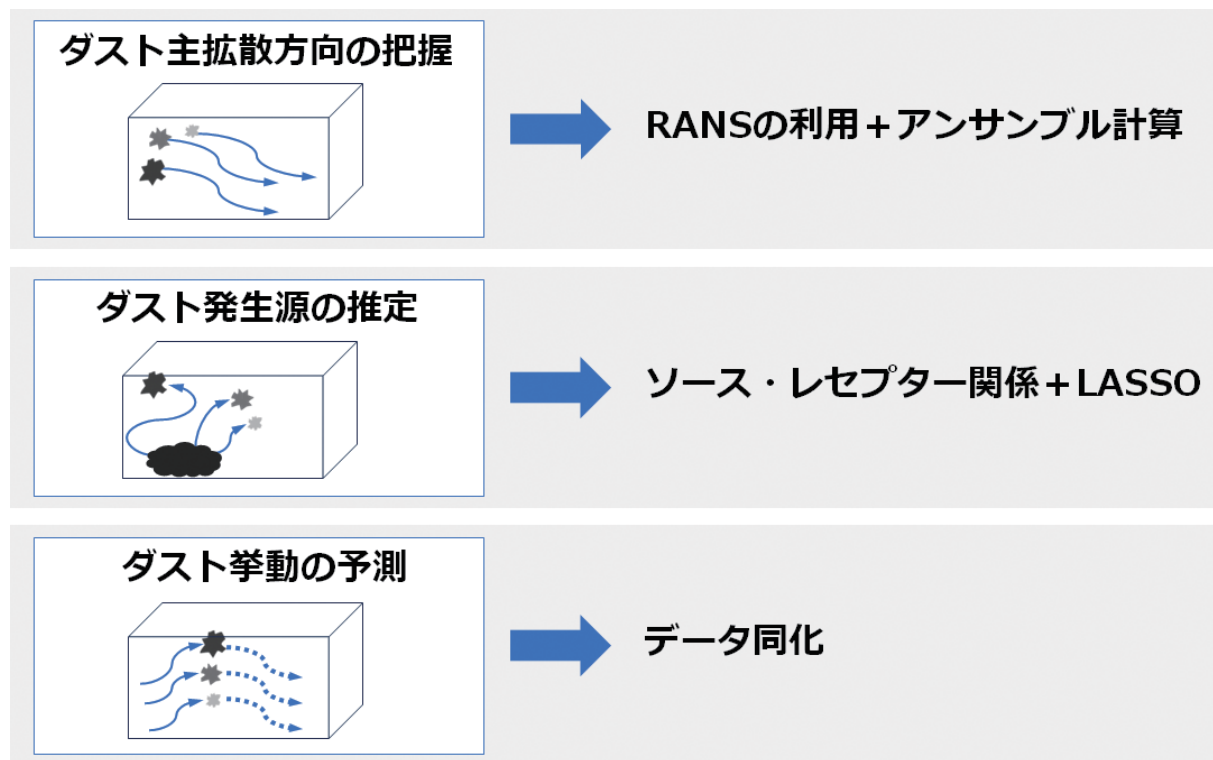


図1 本研究開発で取り組んだ3つの課題とその解決のための方策

三つ目は、1F等建屋内の適切な風況及びダストのモニタリングによって、ダストによる内部被ばくの危険の察知能力を効果的に向上させたいという課題がある。これは、作業環境の変化をできるだけ効果的にモニタリングし、ダスト環境の変化を十分な感度で把握した後、いち早く、廃炉作業者にダスト環境の変化を伝達する必要があるためである。すなわち、ダスト環境等のデジタルツインを構築し、その環境の変化をいち早く作業者に伝達するための技術を開発するという課題である。これは、天気予報と同じで、ダスト濃度予報が定期的に可能となれば、その環境で作業する者にとって有用な情報になることは間違いない。しかし、この目標を実現するには、モニタリングスポットを複数設置し、風況やダスト濃度の変動をモニタリングする必要があるが、それらの情報を基に短時間で危険察知等の予測をいち早く行うためには、モニタリング結果からCFDの初期及び境界条件をアップデートし、一定時間後の予測を迅速に

行うことが求められる。筆者らは、この課題解決に向け、気象予測と同様にデータ同化手法[9]を採用し、1F等建屋内の風況のアップデートに用いると共に、CFDによるダスト濃度の予測可能性について探索することとした（本研究開発の成果と課題は5章参照）。

最後に、CFDを活用した研究開発に対して、重要な支援技術の一つとして、可視化技術の研究開発[10]にも取り組んだことを記す（本研究開発の成果と課題は6章参照）。

以下、2章以降の本報告の構成を記す。2章は、ダスト挙動解析の計算法（用途に応じた使い分け）について記す。3～5章は、上記3つの課題に対する著者らの研究開発の成果についての報告（新たに分かった課題も含む）である。6章は、共通基盤技術としての可視化技術の報告に充て、7章は、本報告全体のまとめと今後の研究開発の方向性の議論とした。

2. ダスト挙動解析の手法

ダストの拡散に対し、CFDシミュレーションを行なう場合、二つの重要な選択肢が存在する。一つは、ダストを粒子として扱うか、それとも、密度分布として扱うかであり、もう一つは、流体（風速）とダストの時間発展を連成するか、しないかである（図2参照）。

はじめに、ダストの取扱について説明する。

一つ目の取扱方法は、ダストを粒子として運動方程式を解き、ダストの拡散を評価する方法である。もう一つはダストの密度分布を連続関数として扱い、拡散方程式から密度分布の時間発展を追う方法である。前者の方法はダスト粒子の拡散を直接シミュレーションすることに相当し、実際の現象との比較が容易である一方、粒子が増えた場合の計算負荷が大きくなる。後者は、粒子数の増大による計算負荷の変動はないが、得られるのは密度分布だけとなる。それぞれメリット、デメリットがあり、実際に評価したい状況に応じて選

択することとなる。

次に、流体計算とダスト拡散計算を連成するかどうかの問題について議論する。ダストの濃度が十分に薄い場合、ダストから風速場への影響は無視できる。この場合、風速場の計算はダストと関係なく実施可能で、ダストの拡散の計算に、ダストと無関係に計算された風速場を用いることができる。この方法では、あらかじめ風速場を計算しておけば、様々なダストの発生状況に応じて、ダスト拡散のみをシミュレーションすれば良いため、計算負荷を抑えることができる。しかし、ダスト濃度が高濃度な場合は、ダストの運動が風速場に影響を与えるため、この方法は使えない。この場合は、流体方程式とダストの時間発展を連成して解く必要がある。

次に続く第3章では、おおよその風況把握を目的としているため、ダストを密度分布として扱い、流体とダストの連成がないケースを扱った。その一方、第4章では、ダストを

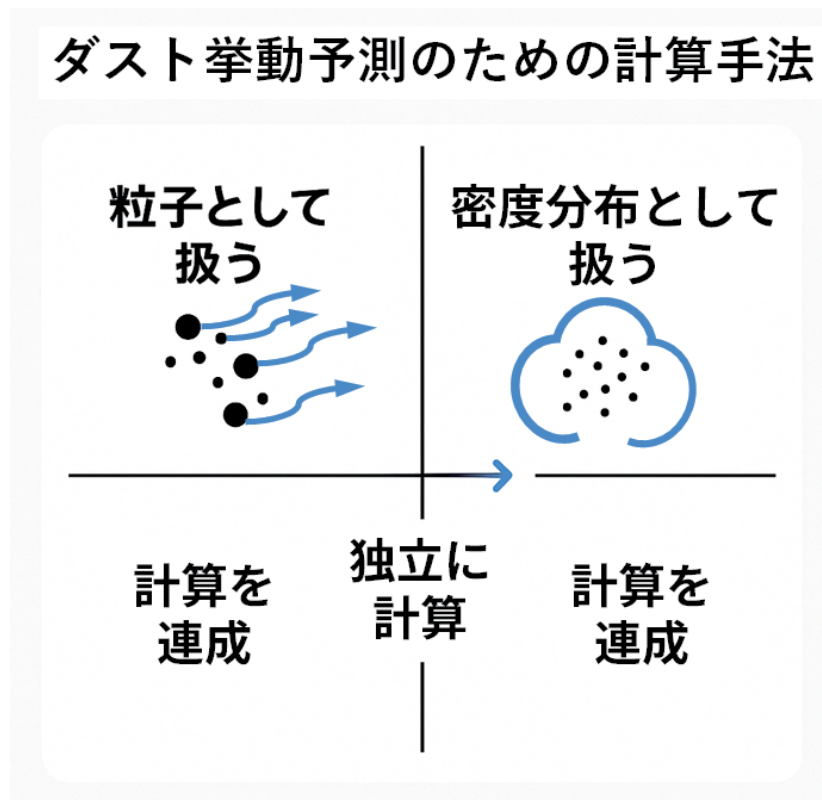


図2 本研究開発で使用するダスト挙動解析の計算手法

粒子として扱い、更に流体とダスト拡散の連成を行った（今般のケースでは、ダスト自身が風速場に見做すことができない寄与を及ぼすことは、殆どないと想定されるが、計算時間が課題とならないことから連成を行った）。なお、本研究開発では、流体コードとしてOpenFOAM[11]を用いた。OpenFOAMは、オープンソースコードであり、多くの利用者が活用し、改変等を自在に実施できる。本事業のように、適宜、研究開発を進め、コードの改良が必要になる場合、利用するメリットが大きい。

なお、乱流の取扱いは、3章ではRANS[5]、4章と5章ではLES[5]を用いた。なお、3章では、ダスト濃度を扱う一方、4・5章では、ダストを粒子として扱い、流体と連成する手法として、MP-PIC法[12]を採用した。

3. アンサンブル計算技術を活用した屋内ダスト環境解析技術

本3章では、アンサンブル計算技術を活用する屋内ダスト環境解析について報告する。CFDコードとしては、OpenFOAM（RANS法）[11]を用いて、風況計算を行い、様々なダスト源からの移流・拡散をアンサンブル計算[5]するシステムの開発を実施した。アンサンブル計算とは、不確かさを持つパラメータを変動させ、それらの計算を多数行うことで、どのパラメータが計算結果に強い影響を与えるのかを調べる一方、平均的には、どの程度の風速があるのか、また、その最大値を求めることで、風速、ダスト濃度等がどこまで上昇する可能性があるのか等が分かる方法である。さらに、アンサンブル計算結果から、平均値からのバラつきを表わす標準偏差も求まり、上記の平均値の確からしさやパラメータの感度が評価可能となる。即ち、どの場所で、環境の変化に対し、風の流れが敏感に応答するか等の情報が得られる他、ダストの空間分布や、その動的挙動を分析する際

の重要な情報が得られる。以上、アンサンブル計算を活用すると、風が定常的に吹いている方向や、その風の強度分布の情報が得られるだけでなく、風の流れが不安定化しやすく、ダストの移流・拡散が複雑な挙動を示す場所が分かり、ダスト要因の被ばく評価を実現するための基本情報が得られると考えられ、そのシステムの構築を進めることとした。

なお、当該開発システムは、PCや原子力機構のスーパーコンピュータ（スパコン）上で並列動作可能なものとした他、可能な限り容易なユーザーインターフェイスやマニュアル等も整備し、廃炉に係る事業者等が容易に計算可能となるよう配慮した（但し、今後の更なる検証等の研究開発やインターフェースの整備が必要であることを記す）。開発したシステムの概要は、下記のとおりである。

- ①アンサンブル計算を行う変数の選択やその変動幅を容易にユーザーが設定できるように、Pythonの標準パッケージであるTkinterを用い、アンサンブル計算のデータ入力とデータ生成を行うGUIを作成。なお、開発環境はLinux OSとし、開発言語はPython（3.6.8）とした。
- ②上記①のGUIで作成するOpenFOAM用入力データセットを用い、ユーザーが指定した同時実行数でOpenFOAMのジョブを流す機能を作成。また、シミュレーションの設定を補助するためのコマンドとシェルスクリプトを整理した。
- ③入力データセット中の指定に従いOpenFOAMジョブを実行させ、各ジョブにより得られる出力（VTK）ファイルから風速の平均値・最大値・標準偏差等の統計量の空間分布を求め出力する機能を作成した。

以下では、まず、アンサンブル計算による簡単な検証計算の結果を示す。図3にpitzDaily解析体系（PitzとDailyが1983年に実施した実験[13]を模擬）での試計算結

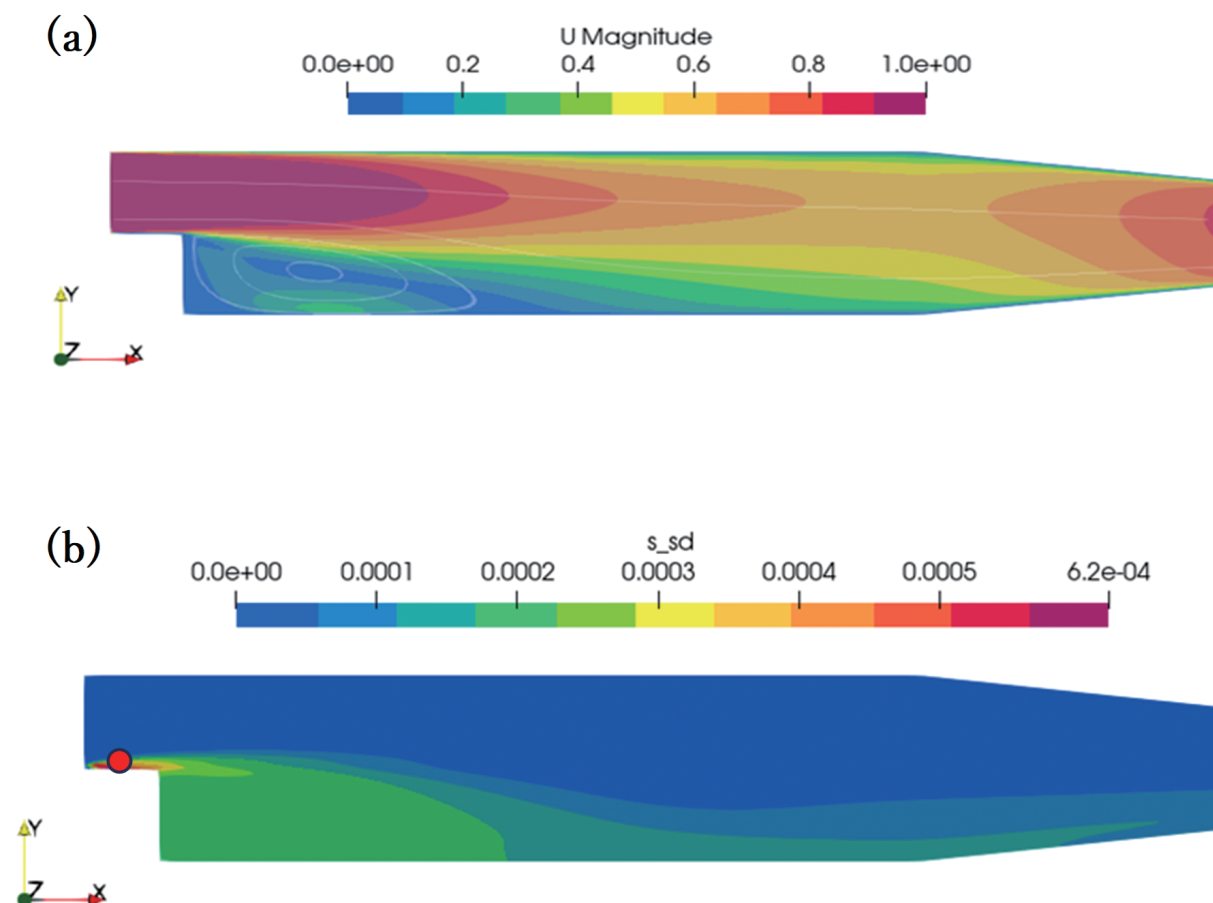


図3 (a) OpenFOAMのpitzDaily解析体系での平均流速値の分布（流入境界 1m/s付与）、(b) ダスト濃度の標準偏差の分布

果を示す。解析体系は、簡単化のため、2次元とし、 x 軸方向負側に流入境界、正側に流出境界を設定し、それ以外の境界は壁境界とした。ダスト源は、流入境界付近に点源として設置した。図3(a)は、定常流の流速分布を示し、単純に流入境界から流入した流体が流出境界から流出している流速分布となっていることが分かる。次にダスト源を図3(b)で示す赤丸地点においた。その位置でのアンサンブル計算の標準偏差は大きい。これは境界条件の変動に敏感であることを示している一方、その後、ダストが拡散する際、直線的流れから下方へと流れが剥離する部分において、標準偏差が大きくなっていることが分かる。これらの例題を通し、どのような地点で、計算と観測の誤差が大きくなるかが推定可能となる一方、観測すべき地点を選ぶ際の

情報も得られることが分かる。

次に、1F建屋内2号機モデルを用いた解析結果を示す。当該モデルは、2号機1階を想定した、およそ $46\text{m} \times 46\text{m} \times 9\text{m}$ の屋内モデルであり、詳細な構造物を取り除き、およそ躯体等のみを考慮した簡略化モデルである(図4参照)。従って、本報告の目的は、2号機1階スケールのモデル体系において、アンサンブル試計算結果を分析し、今後の課題を抽出することにある。

上記作成メッシュモデルにおいて、CFDソルバーとして、OpenFOAM (pimpleFoam)を用いた。計算時間を短縮するため、風況を定常状態まで計算し、その後、風況場を固定し、ダスト濃度の移流拡散計算を行った。乱流モデルはRANSとし、 $k-\omega$ SSTモデルを採用した。なお、メッシュは

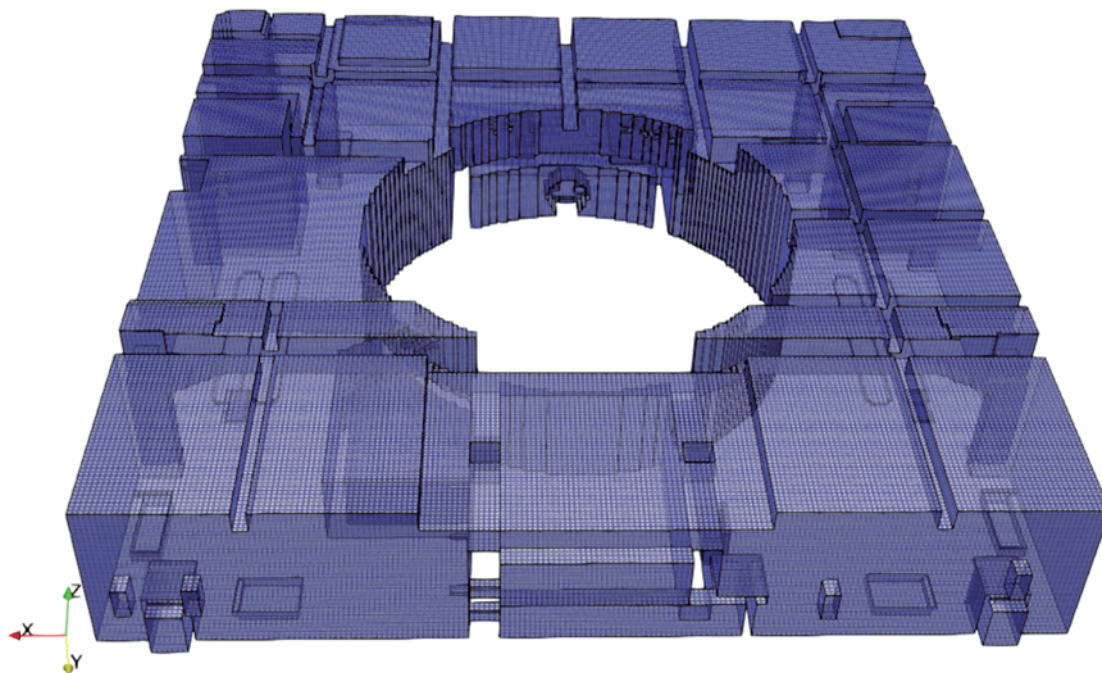


図4 1F2号機1階CFD用简单化モデル（メッシュモデル）

snappyHexMesh [11] による六面体モデルを用いた。

上記解析体系に対して、ダストの初期濃度をゼロとし、流入開口部からダストを流入する解析を実施した。その流入境界条件については、中心部の流入開口部（inlet2）を、ダスト濃度を0.02とし、速度は $-1.5 \text{ m/s} \sim -0.5 \text{ m/s}$ で変化させ、4通りのアンサンブル流入速度で計算した（風況場の例：図5（a）参照）。その他の流入開口部（inlet0、inlet1、inlet3、inlet4）については、ダスト濃度を0.1とし、流入速度を -0.5 m/s で固定した。壁境界条件は、ノンスリップ壁境界条件とし、壁関数を用いた。

1F現場モデルに対する流速分布のスナップショットを図5（b）に示し、アンサンブル計算の結果として、ダスト濃度の平均値、最大値、標準偏差を求めた。図6から図8には、 $Z=12$ （床上3m）のXY断面における各統計量の空間分布を示す。中央の開口部（inlet2）の流入速度が変化する場合、中央開口部前のダスト濃度は、標準偏差値が小さいことからほとんど変化しないことが分かるが、中央開

口部から左右に流体が抜けるため、左右の開口部（inlet0, 1, 3, 4）の手前の標準偏差値が大きく変化していることがわかる。すなわち、この領域は条件の変化に敏感なことを示している。また、inlet0, 1側とinlet 3, 4側の構造物の配置が異なっており、中央の開口部の流入速度が変化した場合、inlet0, 1側とinlet 3, 4側で最大ダスト濃度の空間分布に違いがみられることも、この結果から確認できる。本解析から、一見すると影響が小さいと考えられた左右の区域のダスト濃度は、主流入口の風況の変化により影響を受けることが分かる一方、異なる構造物の配置が、ダスト濃度の変化に対し影響を与えること等が分かった。以上、本計算手法を使用すると、対象となる建屋内の凡その風況、ダストの移流拡散の様子と共に、どの場所で複雑な挙動を示すかについて、有用な知見が得られることが分かった。

4. ダスト源逆推定解析法の研究開発（LASSO活用の効果と課題）

本4章では、ダストの測定結果からダスト

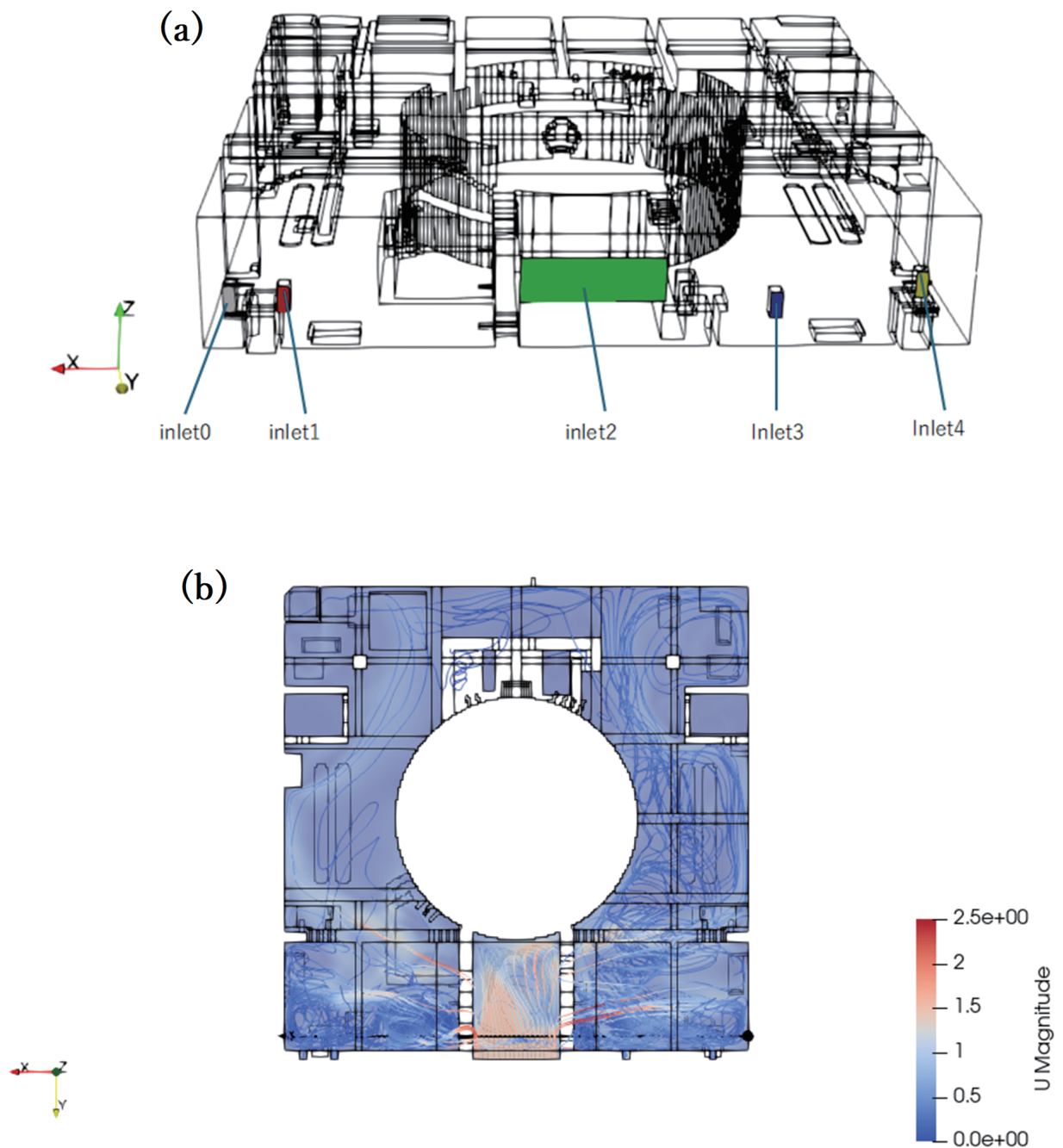


図5 (a) 1F2号機モデルにて設定する流入境界 (inlet0~4) と (b) 風況場の例

源を推定し、さらには、その後のダスト飛散を予測するためのシミュレーション技術を紹介する。基本的な原理としてはソース・レセプター関係 [6] を利用する。この手法ではまず、あらかじめ多数のダスト源候補を設定し、その1つ1つのダスト源に対して、ダストの飛散を事前にシミュレーションし、その

ダストの軌跡を記録しておく。その際、測定点をいくつか適切に設定し、各測定点でのダストの測定値を取得する。次に、実際にダスト飛散の測定を行い、各測定点で観測されるダスト数を測定する。この場合の測定値を y 、あらかじめ行っていた κ 番目のシミュレーションでの測定値を x_κ とする。 y や x_κ は、測

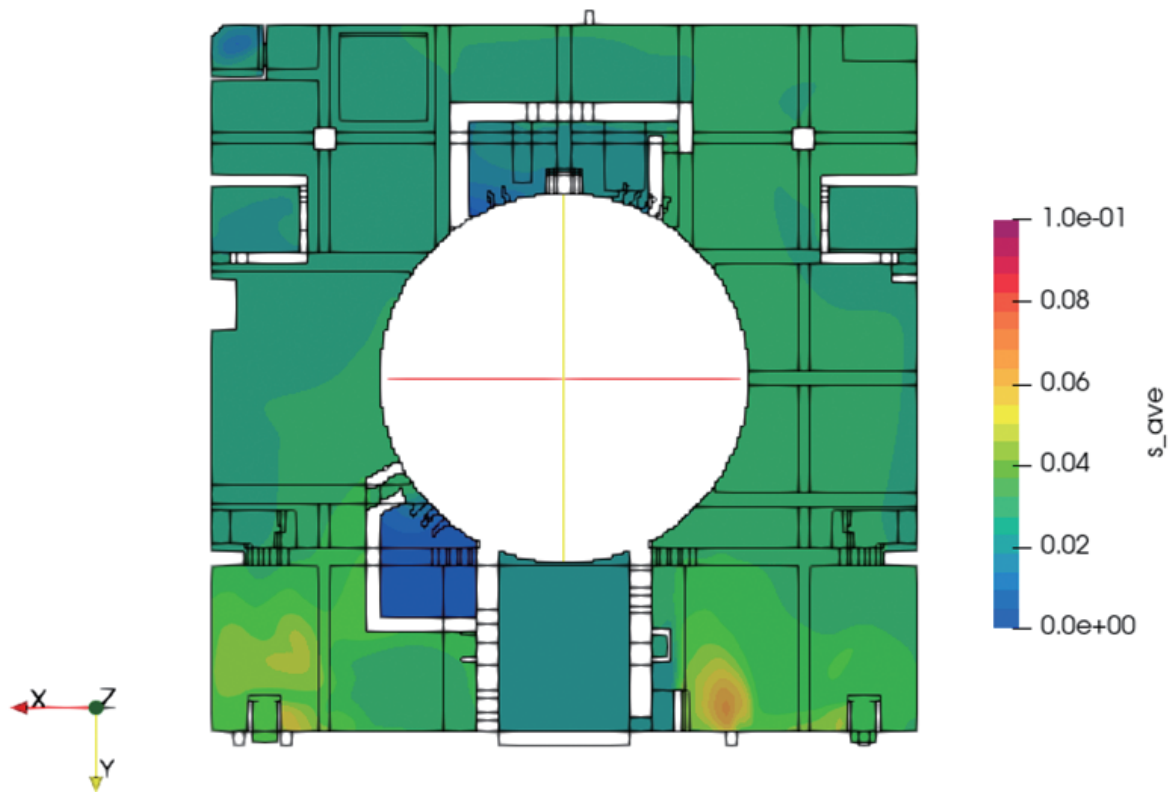


図6 ダスト濃度の平均値分布 (床上3m)

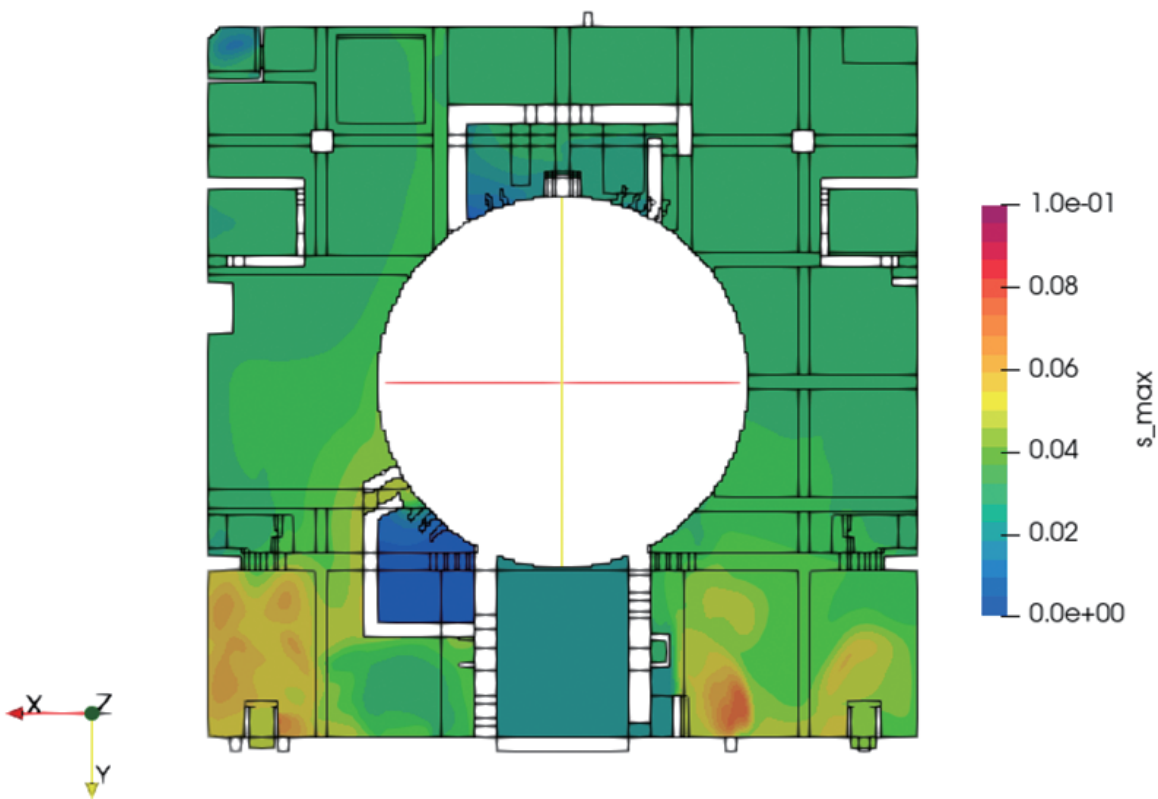


図7 ダスト濃度最大値分布 (床上3m)

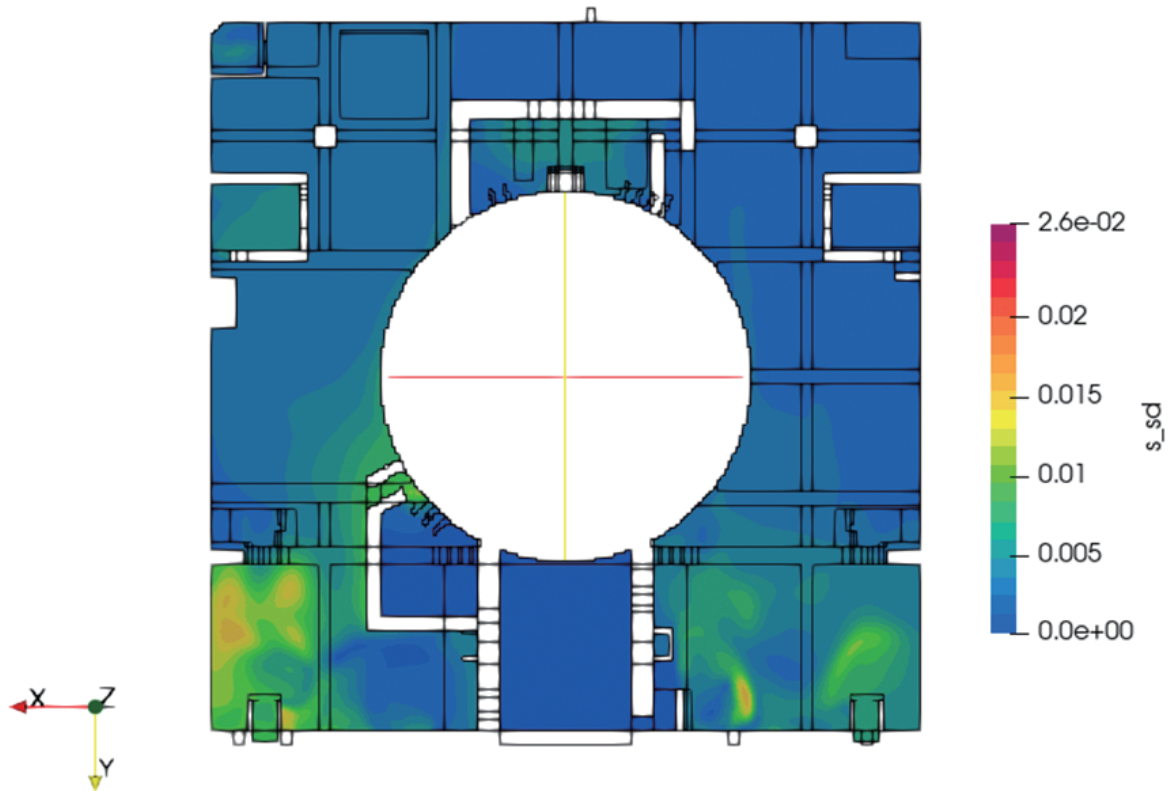


図8 ダスト濃度標準偏差分布（床上3m）

定点の数の次元を持つベクトルである。この場合、 $y = \sum_k A_k x_k$ と表せると仮定し、 A_k を求める。この係数 A_k が大きいところで、ダストが発生したこととなり、逆にもし A_k が0であれば、 k 番目のダスト源では、ダストが発生していないこととなる。これによりダスト源があらかじめ設定したダスト源の領域内にあれば、その位置を推定することができる。さらに、ダストの発生時間を推定できるように改良することもできる。あらかじめ実施しておくシミュレーションでは、ダストを時刻 $t=0$ から時間間隔 Δt で発生させておく。時間をこの時間間隔で離散化し、 $t=j\Delta t$ とあらわすことにする。ここで j は整数である。時刻 j の実測値を y^j 、各シミュレーションでの測定値を x_k^j としたとき、 $y^j = \sum_{k,i} A_k^i x_k^{i+j}$ という関係を持つと仮定し、 A_k^i を求めればよい。もし、 A_k^i が0でない場合は、時刻 i に k 番目のダスト源でダストが発生したことを意味する。測定点が少ない場合は、未知数

(A_k^i) が測定値の数を上回ってしまう場合が多々ある（このような条件が一般的である）。そうした場合は、LASSOなどスパースモデリングを利用することで、ダスト源の推定[1]、[2]、[7]、[8]をすることが有効となる。以上のように、ダスト源が推定できれば、あらかじめ行っていたシミュレーションで記録したダストの軌跡を利用することで瞬時にダスト飛散予測を行うことが可能となる。

上記の考え方を、実際のシミュレーションを用いて検証を行った。本来は、実測値を基にしてダスト源推定を行うべきだが、今回は実測値の代わりにシミュレーションを用いた。つまり、ある設定でダストの飛散シミュレーションを行ない、測定点でのダスト数を観測して、実測値に替える。この測定値からダスト源推定が可能かどうかを検証する。

次に、シミュレーションの設定条件を説明する。シミュレーションを行なった体系を図9(a)に示した。ここでは、簡単のため、

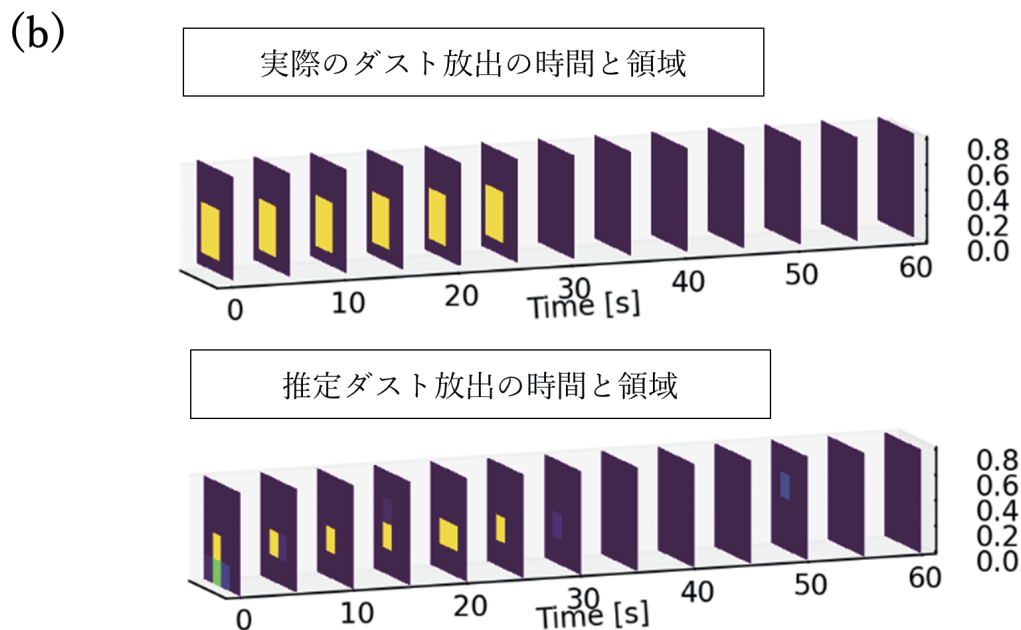
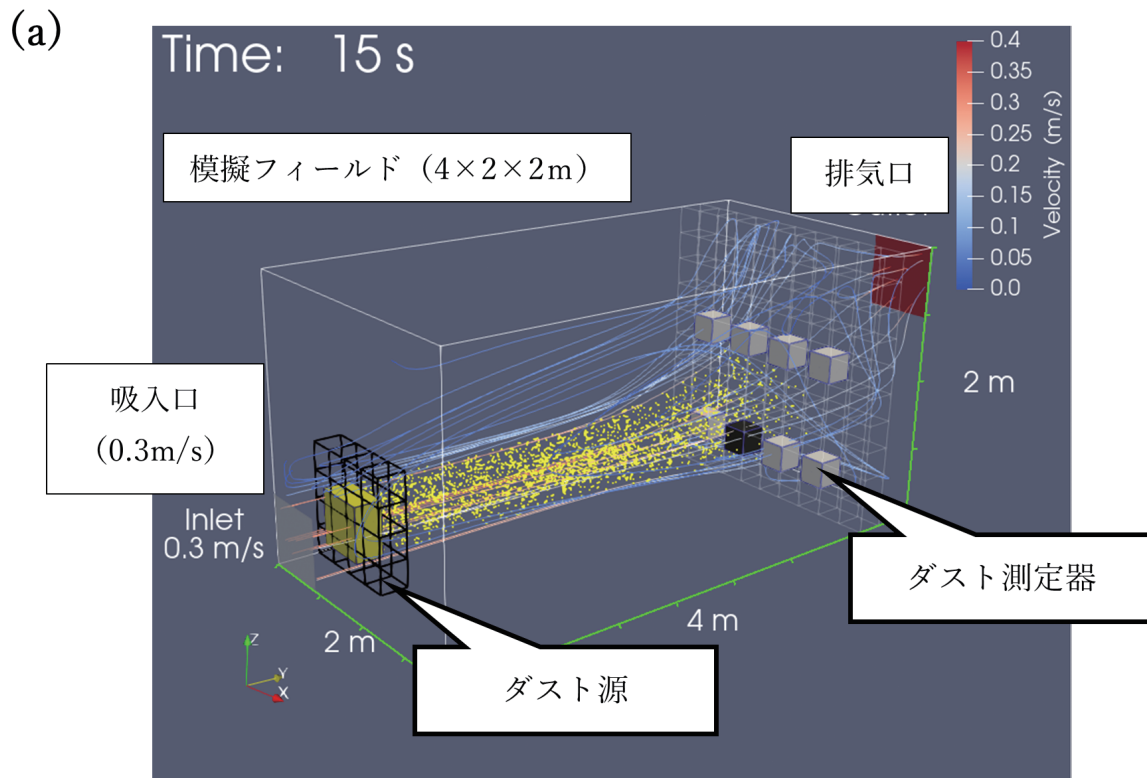


図9 (a) シミュレーションに用いた模擬フィールド。左の面の下部に $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ の吸気口（風速 0.3 m/s ）、右の面の上部に同じ大きさの排気口を設置する。ダスト源は、疑似実測値に対して、黄色の直方体部分が相当する。一方、ダストの軌跡の記録は 4×4 メッシュのそれぞれをダスト源として行った。右の面の手前にある8個の立方体が測定点に相当する。(b) 実際のダスト源と推定されたダスト源の発生時間と領域。四角の部分は (a) に示した 4×4 メッシュのダスト源に相当する。黄色い領域はダストが発生していることを示している。

長さ 4m×幅 2m×高さ 2m の模擬フィールドを作成し、2m×2m の面の左下に、0.5m×0.5m の吸気口を設定し、ここから、風速 0.3m/s で吸気する。その一方、反対側の面の右上に、0.5m×0.5m の排気口を用意する。この境界条件で、10 分間経過した後、ダストを発生させる。ダストの発生源は、吸入口から 0.3m 離れたところに、壁と床から 0.1m 離れたところに 0.2×0.4×0.4m の大きさに設定した。このダスト発生源から 30 秒間ダストを放出する。測定点としては、排気口側の壁の近くに 8 点、設定した。この測定点での測定ダスト数が上記の y^j に相当する。一方、 x_k^j は以下のように決める。まずダスト源として、吸入口から 0.3m 離れた位置に 0.2m の立方体を図のように 4×4 メッシュで 16 個配置する。各ダスト源から 5 秒間ダストを発生させ、ダストを上記の測定点で記録する。この測定値が x_k^j となる。これらを利用してダスト源の推定を行った結果が図 9 (b) である（上図は、実際にダストを発生した様子を示し、推定すべきシミュレーションに相当する。一方、下図は、観測結果から推定したダスト発生の推定結果である）。この図にあるように、推定ダスト源の放出時間は、30 秒間とほぼ再現できていることが分かる。ダスト発生源の位置も今回の設定の解像度の範囲で十分再現に成功したと言える。今回は、非常にシンプルな体系に対し、検証を行ったが、測定点が 8 点と少ないわりには十分の再現度で、ダスト源（発生時間も含む）の予測ができた。この手法がうまくいく条件としては、十分な測定点を適切な位置に設置することと、おおよそのダスト源を予測し、絞り込みが必要である。実際の廃炉作業では、ダストの発生源は、作業を行っている箇所付近と考えられるので、高い予測精度が期待できる。その一方、予想外の位置でダストが発生した場合は、この方法の適用は難しくなる。理由は全ての地点をダスト発生源とみなす必要性

がある場合、選択する自由度が大きすぎるため、精度が落ちるという課題が発生する [7]、[8] ためである。逆推定の精度とこの手法の実効性については、今後も、さらに検証していく予定である。

5. 現場に即した風況シミュレーションを実現するためのデータ同化技術の研究開発

前 4 章では、ダストの飛散に注目し、ダスト源の推定やその拡散予測について説明した。しかし、ダストを予測するには、風況がおおよそ、わかっていることが前提となっている。そこで、本 5 章では、データ同化技術 [9]、[14] を用いて現場の屋内の風況をより良く再現可能とする技術について紹介する。

データ同化とは、観測値に合わせてシミュレーションを修正し同化させていく手法のことである。シミュレーションには、数値誤差や近似による誤差の他に、境界条件や初期条件の不確定性に起因する誤差も生じる。従って、観測値を精密に再現することは非常に難しい。これに対して、データ同化では、観測値にあわせてシミュレーションを修正していくことで、現場の風況の再現性を向上させることができる。データ同化の手法はいくつも提案されているが、本研究開発では、実装が比較的容易なアンサンブル・カルマンフィルターを採用した [14]。通常のカルマンフィルターは、シンプルで応用性が高く、広く使われているデータ同化手法だが、状態の発展が線形で、推定誤差はガウス分布になることが前提となっているため、非線形な問題等に対しては、性能が下がる。そこで、推定誤差の評価を、複数のシミュレーションのアンサンブルから求めることで、非線形問題に対しても、データ同化性能を改善したのがアンサンブル・カルマンフィルターである。この方法は、複数のシミュレーションを並行して行うため、計算負荷は高くなるが、データ同化

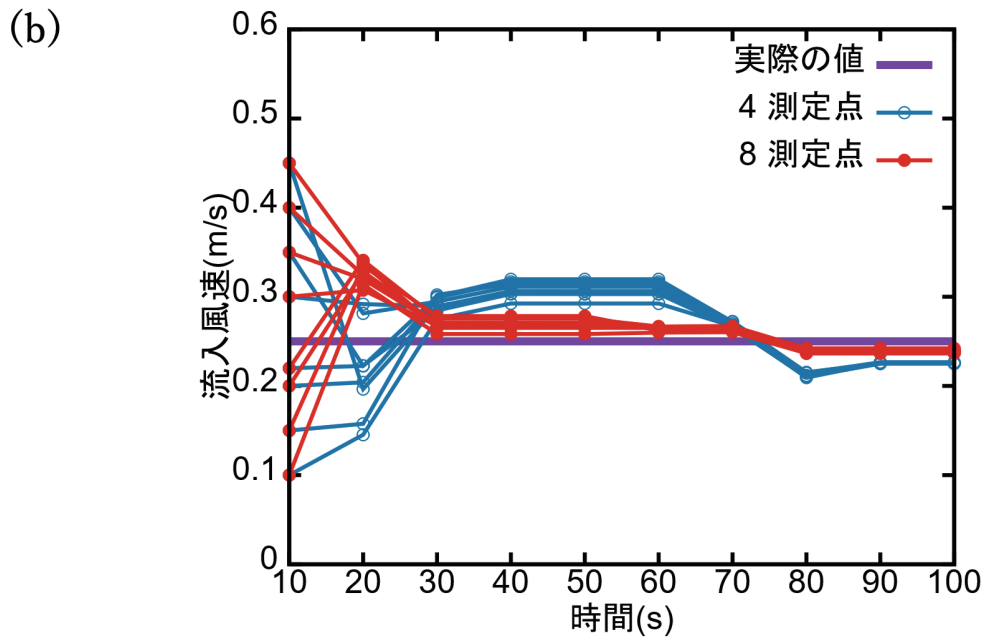
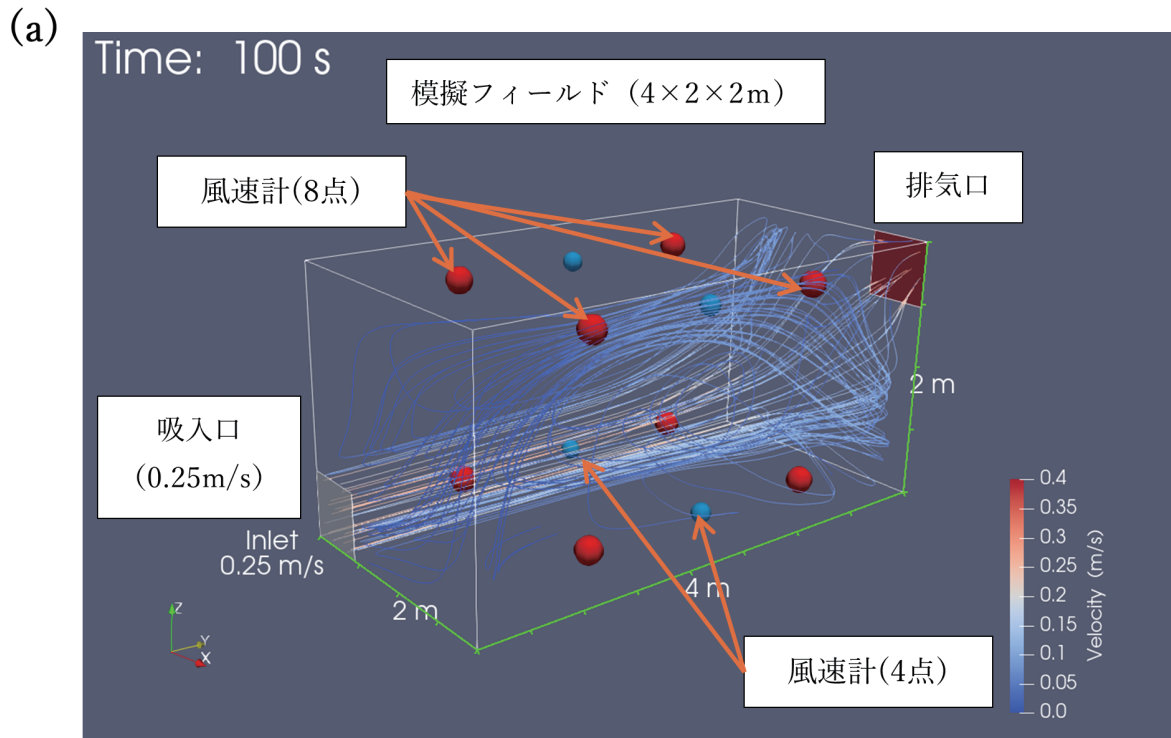


図10 (a) データ同化シミュレーションに用いた模擬フィールド。吸気口と排気口の配置は前図9と同じだが、流入風速は0.25m/sとするシミュレーションを真として観測データを取得する。赤い球は測定点が8点のときの測定点の位置を示し、青い球は4点の場合の位置である。(b) 各アンサンブルでの流入風速のデータ同化による変化。10秒ごとにデータ同化を行うが、同化直前の流入風速の時間変化を示している。

の性能の向上が期待できる。アンサンブル・カルマンフィルタを流れ問題に適用する利点としては、アンサンブルメンバーが連続条件を満足するならば、データ同化後の流れ場も連続条件を自然に満足する点がある。これを詳細に述べると、発散作用素は、流れ場に対して線形であるため、相加平均をとっても連続条件を満足し、カルマンゲインのかかる項は、連続条件を満足するアンサンブルメンバーの張る線形空間に分散共分散行列によって射影されるためである。

本事業の研究開発では、このデータ同化手法の有効性を確認するため、前章と同じ模擬フィールドを用いて検証を行った。前4章同様、実際に観測した測定値を用いるのではなく、シミュレーションで測定値を作成し、それらを利用しデータ同化を行った。シミュレーション体系は、前4章の模擬フィールドと同じものとした。ただし、流入風速は0.25m/sとするが、流入風速は未知であると仮定し、データ同化により、その流入風速を予測できるかどうかを確かめた。すなわち、流入風速が0.25m/sのシミュレーションを真として、そのシミュレーションにより観測値を取得し、異なる流入風速から成る複数のシミュレーションに対し、その観測値に従うようにデータ同化させ、真の流入風速 (0.25m/s) のシミュレーション (対象とする系の風況場) へと近づけることができるかという問題とした。なお、風速の測定は、図10 (a) にあるように、4点の場合と8点の場合の2通りで行い、測定結果を真と設定したシミュレーションから取得する。アンサンブルの数は8とし、それぞれのアンサンブルにおいて、初期の流入速度を0.1m/s~0.45m/sの間で設定し、測定は10秒に1回行うとしてデータ同化を行った。その結果、図10 (b) に示すように、データ同化を行うたびに流入風速は、真の値の0.25m/sに近づいており、測定点が4点でも8点でも80秒程度で十分、設定し

た流入風速値 (真の値) への再現ができていることが分かる。今回のケースでは、不確定要素としては、主に流入速度だけしかないので、少ない観測点で十分良い精度でデータ同化が可能となったが、より複雑な状況の場合は、より多くの測定点を適切に配置する必要があると考えられる。今後は、現場での実用化に向けて、シミュレーションにより、測定点の配置や個数等を最適化する研究開発を実施する必要がある。

6. 効果的ダスト環境解析のための可視化技術の開発とシステム化の現状

CFD解析において、一つの重要な事項に可視化が挙げられることは、これまでの研究開発の歴史を振り返ると理解できる。特に、CFD技術の研究を主目的とするのではなく、それらを利用し、様々な現場での課題解決に活用しようとする著者らにとって、可視化技術は、実際にシミュレーション結果から有用な情報を取得するための重要な技術となる。また、CFDのような先端的シミュレーション技術を実際の課題 (ダストの挙動予測等) に利用し、課題解決に繋げるには、利用しやすい環境構築が必要となる他、利用時の操作は可能な限りシンプルなものではない。

本6章では、この観点に立ち、著者らの開発方針を示し、その成果と課題について記す。まず、本事業の対象が1F屋内の放射線環境改善にあることから、本稿で述べてきたダストのような動的放射線源に対する解析システムも、床や構造物壁面等に付着している静的放射線源に対する解析システムと同一であるべきと考えた。実際、環境改善を目的とするユーザーから見て、その都度、異なるシステムを立ち上げ、インターフェースも異なっていることは、利用に際し、不便であるだけでなく、どちらにも習熟する必要があるため、利活用のハードルが上がることとなる。



図11 3D-ADRES-Indoor外部プログラムメニューとダスト源推定システムの起動メニュー

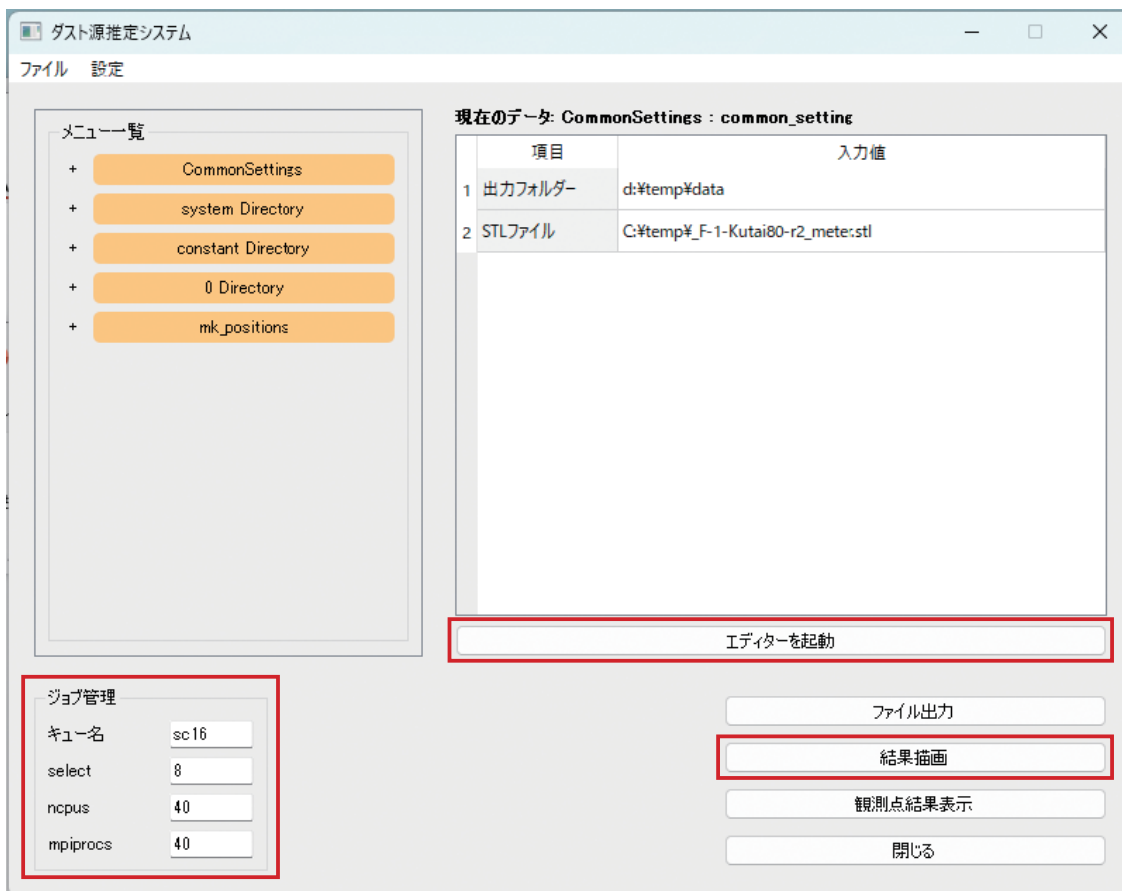


図12 ダスト源推定システムのGUIトップ画面

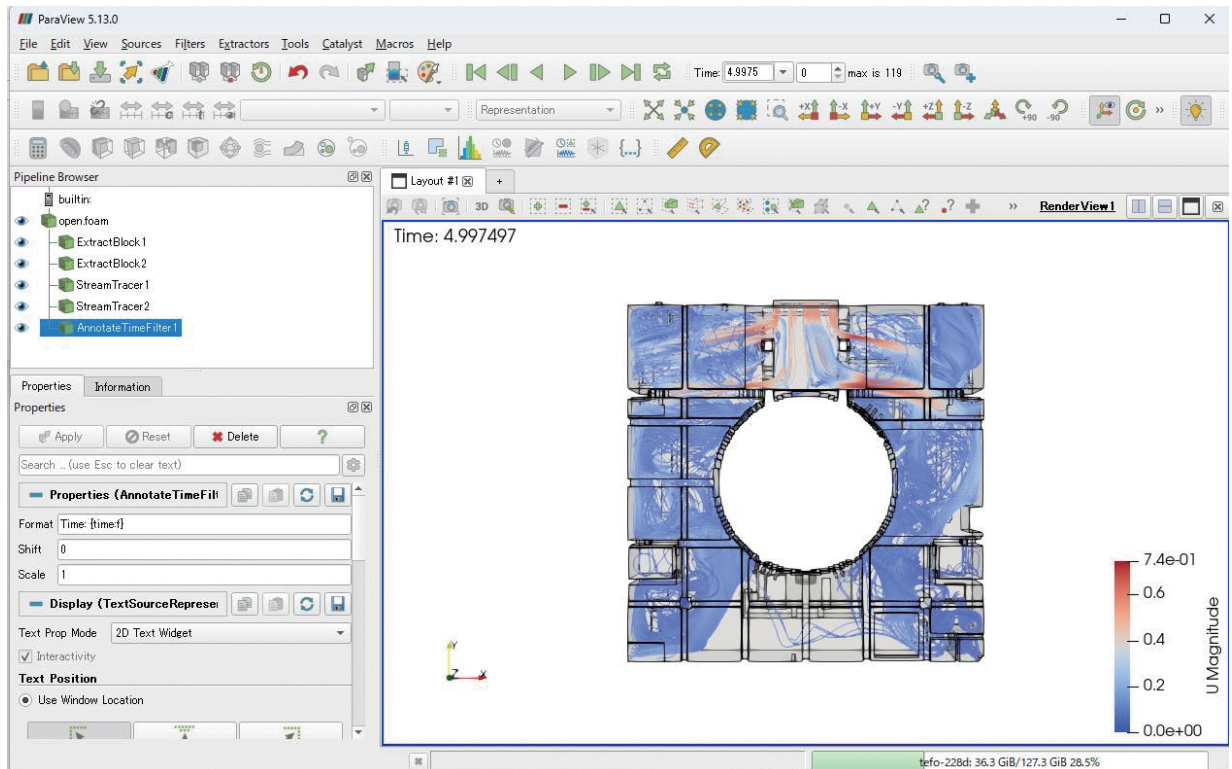


図13 ParaViewによる1F2号機モデルでのシミュレーション結果の表示

以上の事由より、著者らは、プロトタイプがほぼ完成し、実際の1Fの2、3号機にて評価試験を実施するところまで研究開発が進展している、3D-ADRES-Indoor（静的放射線源に対応するシステム）に、2～5章にて説明したOpenFOAM [11] を利用するダスト解析システムを含め、その可視化ツールを組み込むこととした。

3D-ADRES-Indoor [1] [2]は、主にPythonプログラムで構成され、新たなツールやシステムは、外部プログラムとして登録することで簡単にシステム内から呼び出し、利用することができる。その様子を図11に示す。呼び出し後に立ち上がる初期設定画面を図12に示す。図のように、メニュー一覧から選択することで、CFDの環境設定が出来る仕組みとなっている。なお、画面の構成は、3D-ADRES-Indoor本体同様のシンプルなものに準拠している。また、ユーザーがCFD入力条件等を詳細に制御したい場合は、エ

ディターを起動し、入力用のファイル等の設定を直接書き込む等の設定も可能となっている（図12右側の赤枠参照）。さらにCFD解析の計算環境管理（ジョブ管理）も簡単に設定可能となっている（図12左側の赤枠参照）。最後に、結果の可視化だが、ParaView（図13参照）とMicroAVSのどちらかを選択し、それが立ち上がる設定とした。なお、CFDシミュレーション結果の可視化に対しては、これらのソフトウェアの利活用が進んでおり、業界の標準ソフトウェアとなっていることから、シームレスに立ち上げ、結果を表示する方策を選択した（ParaViewは公開ソフトウェアで、MicroAVSは有償だが、安価である）。上記と同様の可視化viewerを開発し実装するには、多大な開発コストがかかる他、上記のソフトウェアの機能は、既に洗練されたもの（ユーザーからのフィードバックが反映）となっているからである。ユーザーは、可視化結果を詳細に調整したい場合、そのま

ま、それらのシステムを制御することができる。以上より、既存の定評あるシステムをシームレスに使えるようにすることとした。

7. まとめ（本研究開発のまとめと今後の1F内活用に向けた研究開発計画）

本報告では、1Fで想定されているダスト環境改善に向けた課題をもとに、その解決のためのCFD活用の方策3つを考案し、その実現に向けた研究開発の状況について記した。3章にて記したRANS法を利用したアンサンブル計算技術については、1F2号機1階の簡単化モデルでの試解析の実施まで至り、今後は、より現実に近いモデルでの試験と、現場での風況及びダスト計測結果をもとにした検証等が求められると考えている。

4章にて記したダスト源の観測結果からの推定については、模擬フィールドでの仮想空間上での検証を終え、開発機能が現実に動作可能であることが分かった。利用したLESを用いるCFDシミュレーションは、複雑な風況（乱流場）を再現することから、時間を遡るダスト源の推定は非常に困難な課題と考えられたが、LASSOを用いることで、ダスト源の候補が複数ある場合でも、精度良くダスト源の推定が可能であることが分かった。もちろん、本機能が成立する限界を1F2号機モデルのような大規模モデルにおいて見定める必要があり、今後の研究開発の進展が待たれる。しかし、LESを用いる1F2号機モデルでの試験にはスパコンが必要と考えられることから、RANS等の乱流モデルの活用を視野に入れた研究開発を進めていく。

次に、5章にて記したデータ同化については、模擬フィールドではあるが、LESを用いても、十分に本開発機能が動作することが分かったことは、価値ある成果と見ている。特に、CFDにおいて重要課題である、境界条件の設定（対象空間の風況を決定する流入口の境界条件）に適用可能であることを確かめ

ることができたことは、重要な成果である。CFDによるダスト解析が成り立つには、風の流入境界条件の設定等が鍵であり、これを現場の計測から設定可能であることが分かったことで、CFD活用の突破口の一つが開拓できたとみている。実際、4章のダスト源の推定を機能させるには、CFD境界条件の適切な設定が必須であり、5章の機能を適用し、境界条件の設定が定まった後に動作する機能であることを指摘したい。もちろん、3章にて記したRANSによるアンサンブル計算の場合も同様であり、データ同化機能を利用して風況を再現する適切な境界条件を定めることができれば、CFD活用の可能性は大いに広がると思われる。

最後の6章にて記した可視化機能の研究開発であるが、これは、CFDシミュレーションの可視化機能の新しい方向性を示すのではなく、既存の可視化システムをどのように簡単に利用するかという観点での成果を示した。今後は、簡単化した1F2号機モデルから更に現実に近いモデルとし、可視化する研究を計画しているが、現場の測定点群等からメッシュを生成することで、モデルの複雑さは大幅に増大する。こうした状況での風況やダストの可視化を実現するには、可視化手法の改良自身も求められると考えており、先端的な可視化システム（例：PBVR [15]）等の利用を将来想定している。

以上、1F現場のダスト環境改善のためのCFD活用という研究開発の状況について報告してきたが、その研究開発は未だ途半ばであり、今後の精力的な研究開発の継続が必須である。しかし、R5年度から2年間という短期間ではあるが、研究開発を進めたことで、今後の方針が明確になったことは大きな進展であったと考えている。1Fは、未だ、屋内線量率が高く、人によるアプローチは制限される中、ダストによる内部被ばくの可能性を極力減らすための作業環境改善に貢献するこ

とは、計算科学の重要な使命であると考えている。関係する諸氏には、今後の研究開発に対する支援を是非ともお願いしたい。

謝辞

本事業を実施するに当たり、本事業の共同実施者である東京電力ホールディングス（東電）とは、定期的にミーティングを行い、情報交換を進めてきた。東電の松浦グループマネージャー、一場氏との議論に感謝する。本事業では、適宜、有識者との会合を持ち、ご意見をいただきながら進めてきた。今期国プロの有識者である東京大学国際高等研究所東京カレッジ浅間一特任教授、東京都市大学河原林順教授、東京大学鈴木俊一上席研究員及び東双みらいテクノロジー(株)石川真澄社長からの適切なご意見に感謝する。更に、今期国プロでは、京都産業大学・小山田教授、福島工業高等専門学校・鈴木教授、川妻教授、(株)東京パワーテクノロジー、(株)富士テクニカルリサーチ、東京ニュークリアサービス、(株)東北エンタープライズの方々のご協力をいただいた。ご協力に感謝する。最後に、本研究開発の実施にご協力いただいたJAEA廃炉安全工学研究所（特にNARREC及びCLADSの方々）とシステム計算科学センター（特にスーパーコンピュータの利用支援の方々）の関係諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] 町田 昌彦他、「1F廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発; 3D-ADRES-Indoor: デジタル技術を集約するプラットフォームの現状紹介」、*RIST News*, no. 69, pp. 2–18, 2023.
- [2] 町田 昌彦他、「1F廃炉に向けた放射線源逆推定及び線源対策に係るデジタル技術の研究開発; 3D-ADRES-Indoor FrontEnd: 廃炉現場で用いるファストデジタルツイン技術」、*RIST News*, no. 70, pp. 3–22, 2024.
- [3] M. Machida, “Performance Demonstration of Radiation-source Inverse-Estimation Techniques based on LASSO and Related Tools in 1st/2nd floors of Unit 2 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants; Validation Tests of Accuracy and Functions of the Developed System Software, 3D-ADRES-Indoor in Real Decommissioning Fields of Nuclear Power Plants Influenced by Severe Accidents” (in preparation).
- [4] S. Yamada and M. Machida, “Performance Demonstration of Radiation-source Inverse-Estimation Techniques based on LASSO and Related Tools in 1st floor of Unit 3 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants; Test of Accuracy Improvement and Related Issues of the Developed System Software, 3D-ADRES-Indoor in Real Decommissioning Fields of Nuclear Power Plants Influenced by Severe Accidents” (in preparation).
- [5] J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications (Third Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. doi: 10.1016/B978-0-08-099995-1.00007-5.
- [6] 柿花諒太郎、松尾智仁、嶋寺光、近藤明、「熱源と観測温度の線形関係を仮定するデータ同化法を用いた室内熱源分布の逆推定」、空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, vol. 2019.6, pp. 361–364, 2019, doi: 10.18948/shasetaikai.2019.6.0_361.
- [7] W. Shi, M. Machida, S. Yamada,

- T. Yoshida, Y. Hasegawa, and K. Okamoto, “Inverse estimation scheme of radioactive source distributions inside building rooms based on monitoring air dose rates using LASSO: Theory and demonstration”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 162, p. 104792, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.pnucene.2023.104792.
- [8] W. Shi, M. Machida, S. Yamada, and K. Okamoto, “Uncertainty analysis of the inverse LASSO estimation scheme on radioactive source distributions inside reactor building rooms from air dose rate measurements”, *Progress in Nuclear Energy*, vol. 184, p. 105710, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.pnucene.2025.105710.
- [9] 大林茂、三坂孝志、加藤博司、菊地亮太、照井伸彦、『データ同化流体科学：流動現象のデジタルツイン』。共立出版, 2021, pp. xv, 254p.
- [10] 平野博之、『流れの数値計算と可視化：Tecplotで見る流体力学』。丸善、2001.
- [11] *OpenFOAM*. [Online]. Available: www.openfoam.com
- [12] M. J. Andrews and P. J. O’Rourke, “The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particulate flows”, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 2, pp. 379–402, Apr. 1996, doi: 10.1016/0301-9322(95)00072-0.
- [13] R. W. Pitz and J. W. Daily, “Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward-facing step”, *AIAA Journal*, vol. 21, no. 11, pp. 1565–1570, Nov. 1983, doi: 10.2514/3.8290.
- [14] 中村和幸、上野玄太、樋口知之、「データ同化：その概念と計算アルゴリズム」、統計数理、vol. 53, no. 2, pp. 211–229, Dec. 2005.
- [15] *PBVR*. [Online]. Available: <https://ccse.jaea.go.jp/software/PBVR/>