

大深度地下施設における火災ガス挙動に関する研究 STUDY ON BEHAVIOR OF THE FIRE GAS IN THE DEEP UNDERGROUND STRUCTURE

畠山 信也¹・山崎 雅直²・井上 雅弘³・坂井 哲郎⁴
Nobuya HATAKEYAMA・Masanao YAMASAKI・Masahiro INOUE・Tetsuo SAKAI

Construction of the underground facility in which the depth is planned to reach to 500m under ground level, is ongoing at the Horonobe Underground Research Center, a division of the Japan Atomic Energy Agency(JAEA). This facility will be consisted of three shafts and drifts at the completion of construction, so it is very important to secure the workers security in case of fire in the underground. However, it is known that the fire gas shows a complicated behavior such as draft effect, and very difficult to predict its behavior, even if under enforced ventilation.

In order to develop new prediction method of fire gas behavior, the model scaled experiments were conducted for several years by using the basic shaft model which consists of shafts, drifts and exhaust fan. And a new fire gas behavior analysis system has been designed and a prototype system has been developed which is able to simulate the phenomena noted above.

In this paper, we describe outline of the model scaled experiments and a prototype system which consists of mainly mono-dimensional ventilation network analysis named AVENT and simplified computational fluid dynamics program named M-CFD.

Key Words : fire gas, underground fire, effect of buoyancy, experimental study using a scaled vertical shaft model, ventilation network analysis, M-CFD

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構と称す）は北海道幌延町において、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発を目的とした最終的には深度約500mにおよぶ地下施設を建設中である。建設地点の地質は新第三紀の堆積岩に属し、メタンを主成分とした水溶性の可燃性ガスを賦存している。当施設は、完成時には複数の立坑と水平坑道から構成され、坑内火災等発生時の入坑者の安全確保のために、非常時においても地上まで避難可能な坑内構造及び防災システムの構築が重要な課題である¹⁾。

火災発生時には、立坑など高低差の大きい坑道における火災ガスは浮力効果等により複雑な挙動を示し、強制換気の下でも予期しない場所まで火災ガスの影響が及ぶ可能性がある。しかし、このような火災ガスの挙動に関する研究はこれまでほとんど実施されておらず、地下施設のような立坑周辺の火災ガスの挙動は明らかにされていない²⁾。そのため、火災時の防災対策の向上を目的として、地下施設を模擬した立坑火災実験を実施し、火災で発生する浮力による火災ガスの逆流現象や通気主流の逆転現象、水平坑道の風門を開閉した場合の通気挙動を把握した。また、把握した諸現象をある程度再現可能で計算時間が現実的な解析手法を検討し、プロトタイプの解析システムを構築し、火災実験と同様の条件でシミュレーションを実施した結果、実験で把握した諸現象を再現できた。本稿では、その概要を報告する。

キーワード：火災ガス、坑内火災、浮力効果、立坑模型実験、通気網解析、M-CFD

¹ 非会員 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター 施設建設課

² 正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット 堆積岩工学技術開発グループ

³ 非会員 工博・九州大学大学院准教授 工学研究院地球資源システム工学部門

⁴ 正会員 工博・株式会社地層科学研究所（元 三井鉱山エンジニアリング株式会社）

2. 立坑火災実験

鉱山のように大規模かつ複雑に坑道が配置される地下空間内では、火災ガスの挙動予測に数値解析による手法が用いられてきたが、高低差が大きい立坑主体の地下施設では、従来の一次元流れで計算する通気網解析手法による予測が難しい。これは、下向きに通気されている場合は、火災による浮力効果で通気を抑制する方向に力が働くため、一つの坑道内に上昇流と下降流が共存し、場合によっては通気方向が逆転することから、立坑間を連絡する水平坑道を経由して、入気側に火災ガスが流動する可能性があるためである^{2), 3)}。つまり、一般的に安全と考えられる火災箇所の風上側でも、必ずしも安全性が確保できないことを意味する。また立坑以外でも、同様に高低差がある斜坑では、降下する入気に逆らって高温のガス（煙）が火源から天井際に沿って流動（上昇）することがわかっている⁴⁾。

地下施設の安全対策を検討する上で、坑内火災時の避難誘導等の信頼性を向上するためには、複雑な火災ガスの挙動をできるだけ短時間で的確に把握し、予測しなければならないが、そのような手法は今のところ世界的にも見当たらない。このため、地下施設を模擬した火災実験を行い、種々の実験パターンにおける気流挙動を定量的に把握し、その結果に基づいて従来の解析手法に代わる新しい解析手法の構築を目指した。

(1) 実験の概要

まず、火災ガスの挙動の定性的な現象を把握するために、立坑1本の場合および立坑2本の場合で火源位置や換気条件を変えて、浮力による火災ガスの逆流現象と通気主流の逆転（通気の主要な流れの方向が逆転すること）の基本的な挙動を把握した。次に、定量的な現象を把握するために、実験に用いる材料の熱物性やファンの周波数変化に伴う実験模型の風量・圧力特性曲線を求め、水平坑道に設置した風門の開閉および火源位置の違いにともなう火災ガスの挙動を把握した。

(2) 実験装置の概要

実験装置の概要を図-1に示す。実験装置は、一辺0.2mの矩形断面を有する高さ3.4m、幅2.2mの立坑模型であり、2本の立坑を上中下3本の水平坑道で連結し、各水平坑道には通気制御のために開閉可能な風門を設置した。そして、坑道の前面はビデオにて記録できるよう耐熱ガラスを用い、他の3面は立坑との熱伝達の相似性⁵⁾を考慮して内面をベニヤ張りとした（一部全面ベニヤ張り実験も実施）。また、火災の熱源として、熱量3.6MWに相当する750Wの電気ヒーターを水平坑道内に配置し、可視化のためのトレーサーとして線香の束の煙を使用した。さらに、換気条件は周波数変換で風速を制御可能な、定格 $7.0\text{m}^3/\text{min} \times 104\text{mmAq}$ (1.02kPa)の小型ファンを用い、立坑内の初期風速は相似性を考慮して、2本とも下向き0.15m/secに設定した。

火災ガスの挙動はレーザーシート光を照射してビデオ撮影し、風速と温度は坑道内に設置したサーミスタ風速計と熱電対にて測定した。

(3) 実験結果例

実験は立坑1本の場合、立坑2本で水平坑道2本の場合、立坑2本で水平坑道3本の場合について実施した。また、各水平坑道の風門を開閉することにより通気制御を行った。ここでは代表例として、a)立坑1本モデルにおける火災ガス挙動の例、および、b)立坑2本水平坑道3本モデルで通気制御を行わない場合と、c)行う場合の実験結果の例を示す。

a) 立坑1本モデルの例

当初予想した通気の挙動は、図-2の左側に示すように、火源で発生した火災ガス（煙）が、入気主流に逆らって立坑の壁面に沿って上昇し、壁面で冷却されながら主流に吸収されて減衰するイメージであった。しかし、立坑1本モデルによる現象は、図-2の右側に示すように火災ガスの挙動は極めて複雑

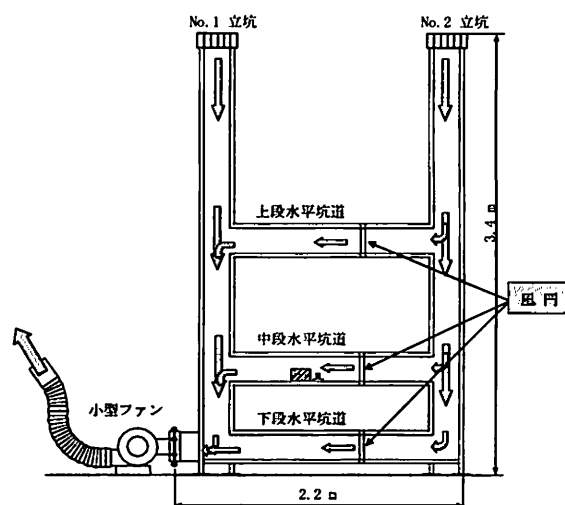


図-1 立坑模型実験装置概要

で、立坑のヒーター側反対壁面に衝突して上下に対流を起こし、上昇流は多彩に渦を作りながら上昇、徐々に減衰している。また、通気主流に流されて下降する部分もあり、その一部は入気と混合し水平坑道下部から火源側に流入する現象を確認した。このとき、逆流到達高さは、3面ベニヤ貼り（平均熱伝導率 $0.3090 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）では $1.0\sim 1.2\text{m}$ であり、全面ベニヤ貼り（同 $0.1627 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ）では 2.44m であり、熱伝導率の相違を反映している。なお、相似則から内径 6.5m の立坑の逆流到達高さは約 72m となる。

立坑内風速を変化させた場合は、入気風速が小さくなると上昇高さは大きくなり、一部の火災ガスが立坑坑口から大気に放出され、ついには主流の逆転に至っている。

b) 立坑2本水平坑道3本モデルで通気制御を行わない場合の例

立坑2本水平坑道3本モデルで通気制御を行わないケースでは、火災ガスは逆流して各水平坑道へ流入する現象が確認されているが、その挙動は実験ケースによって異なる。火源を下段水平坑道に配置した場合は、図-3に示すように主としてNo.2立坑側で逆流（逆転）するが、火源を中段水平坑道に配置した場合は、図-4に示すようにNo.1立坑側で通気主流が逆転する。これらの挙動は模型内の温度分布測定結果でも確認されている（図-5、図-6参照）。また、No.2立坑の上段水平坑道より下方および下段水平坑道で急激に温度が低下する（図-7、図-8参照）。このとき、No.2立坑で初期風速（ 0.15m/sec ）の倍以上の 0.34m/sec を測定した。すなわち、入気風速の増加により冷却されたと考えられる。

図-3に示すNo.2立坑の火災ガスの逆流は周期的挙動であり、同様に水平坑道でも気流挙動が周期的に変化している。この原因は明らかでないが、少なくとも安定的な現象ではなく、わずかな条件の変化で挙動が変化することを示し、本実験モデルで構造上最も自由度が大きいことに起因していると考えられる。ここで自由度とは、火災ガスの流動経路を制御する際に選択できる通気制御方法（風門の数）の数としている。この

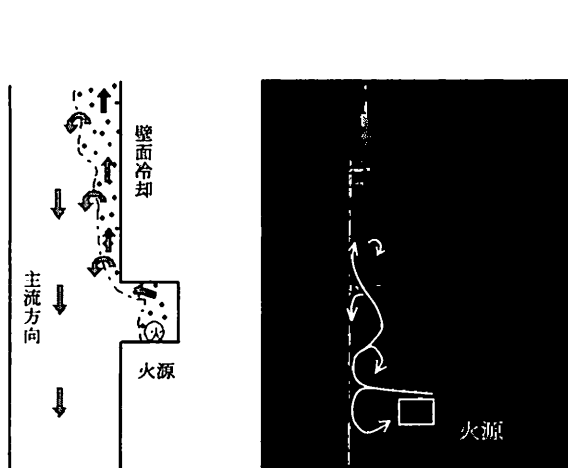


図-2 当初予想火災ガス挙動
および実験結果の一例

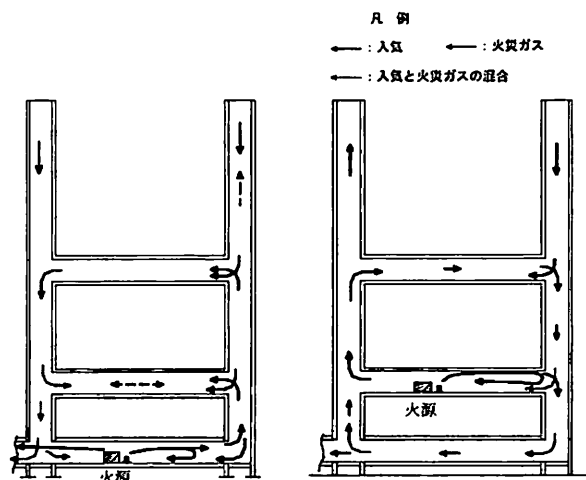


図-3 No.2立坑側へ
逆流する例

図-4 No.1立坑側へ
逆流する例

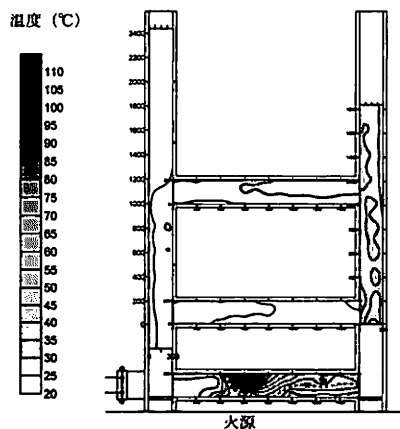


図-5 立坑および水平坑道内温度分布
(No.2立坑側へ逆流する例)

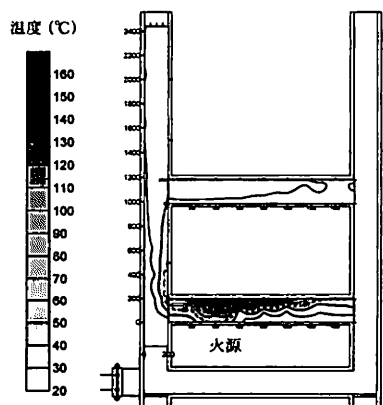


図-6 立坑および水平坑道内温度分布
(No.1立坑側へ逆流する例)

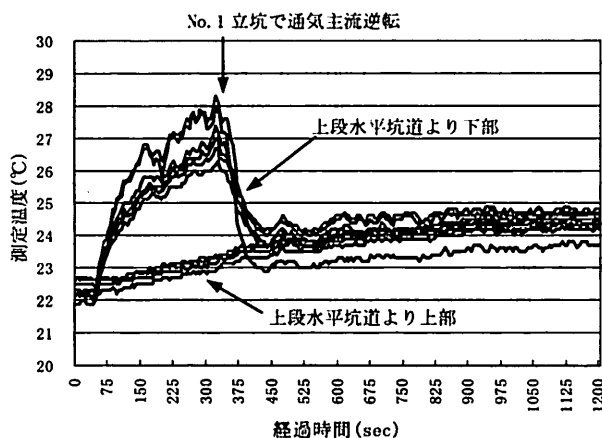


図-7 No. 2 立坑内温度変化

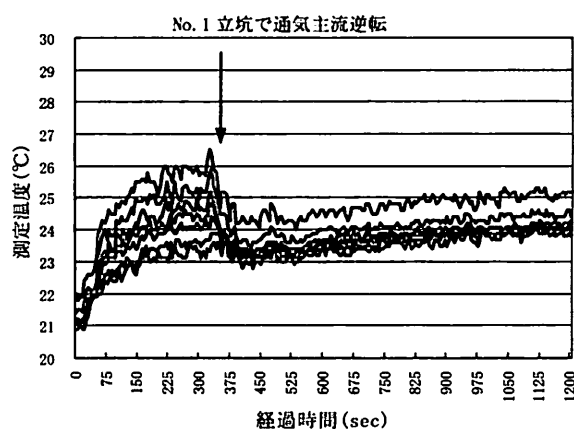


図-8 下段水平坑道内温度変化

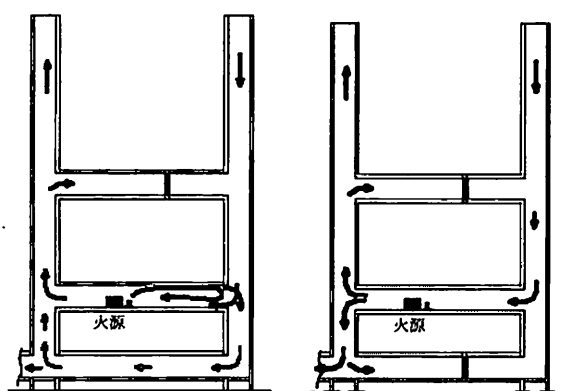


図-9 火源を配置した坑道の風門開放

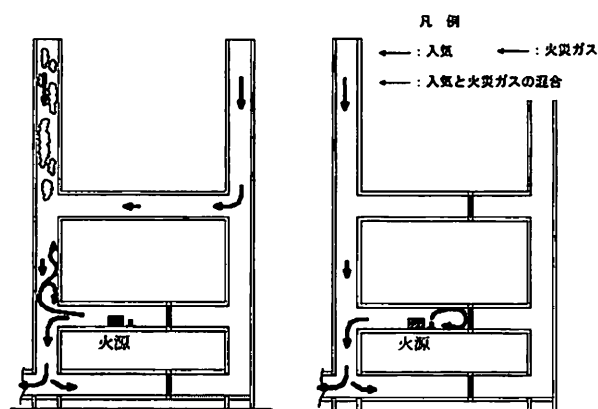


図-10 通気主流が逆転しない例

ように大きな自由度を持つ構造で火源が深部にあり、通気制御を行わない場合は、火災ガス挙動は不安定で予測し難く、火源が上方の水平坑道に移動すると安定性が増すと考えられる。

c) 立坑2本水平坑道3本モデルで通気制御を行う場合の例

本実験は、上記b) 項の実験パターンを初期状態とし、通気制御方法（風門の閉鎖順序）の違いによる火災ガスの挙動変化を把握した。その結果、火源をどの水平坑道に配置しても、火源を配置した水平坑道の風門を開放すると、火災ガスは上部および下部の水平坑道に流動することが判明した。その例を図-9に示す。また、風門を閉鎖した上段および中段水平坑道に火源を配置した場合は、それ以深の水平坑道風門を閉鎖すると、通気主流は逆転しないことが判明した（図-10参照）。

3. 解析手法の構築

先に実施した立坑火災実験から、火災シミュレーションでは1つの坑道における少なくとも二つの向きの流れを考慮できる解析方法、例えば数値流体力学（以下、CFDと称す）を使用しなければ満足できる結果は得られないと考えられた。一方、CFDを通気回路全体に適用することは、現状では解析時間やメモリ容量、データ作成の作業量などの観点から、不可能ではないがかなり負荷が大きいこと等の課題があった。火災ガスの逆流がない場所、あるいはその流れが無視できるほど小さい坑道では、1次元流れの解析方法を使う方がはるかに容易である。そこで、火源周辺の火災ガスの流れが無視できない坑道ではCFDを、それ以外の箇所では従来の1次元流れに基づく解析手法（通気網解析）を用い、それらを組み合わせた新しい解析システムを構築した。

構築に当たっての要件は、①地上避難を念頭に置いた火災ガスの流動がシミュレートできること、②平常時には実際の風量や風向と空間内気流挙動を表示し、火災時には火災ガスフロントまたは影響範囲の経時変化を表示できること、③短時間（分単位）で解析結果が得られるプログラムであることの3点である。解析システムは、1次元の風量計算を行う通気網解析プログラム（風丸）と、空間内の気流の2次元挙動と温度計算を行う簡易なCFDから構成し、相互の連成解析を実施する。

さらに、短時間での解析を可能にするため、CFD解析は2次元とし、トンネル空間の組み合わせに対応できるように複数領域の同時解析が可能なMulti-CFD（以下、M-CFDと称す）を開発する。解析手法の概念および年度毎の開発項目を図-11に示す。

なお、計算理論や解析手法の詳細については省略する^{6),7)}。

(1) 開発した解析システムの概要

a) 連成解析機能

1次元風量計算を行う風丸については、連成解析に対応させるため、M-CFD解析モデルとの節点情報共有ファイル読み込み機能、および計算結果の書き出しと読み込み機能を追加した。またM-CFD計算の終了を認識し、計算結果を読み込み、風量計算を行い、計算結果を書き出し、画面表示を更新し、指定サイクルまで一連の動作を繰り返す自動実行機能を開発した。

2次元気流挙動と温度計算を行うM-CFDについては、複数の解析領域の同時計算、風丸解析モデルとの節点情報共有ファイル読み込み機能、および計算結果の書き出しと読み込み機能を開発した。また、風丸による計算の終了を認識し、計算結果を読み込み、気流挙動および温度計算を行い、計算結果を書き出し、画面表示を更新し、指定サイクルまで一連の動作を繰り返す自動実行機能を開発した。

解析の流れは図-12に示す。まず、風丸で全体モデルを作成して、1次元流れの解析を行う。次に、火災ガスの影響が大きい部分を予測して、M-CFDブロックを作成し、風丸全体モデルと重ね合わせることで、風丸とM-CFDでの連成解析を行うものである。このとき、M-CFDは刻み時間 ΔT 毎の非定常計算を行い、風丸はその時点時点における定常の風量計算を行い、計算は指定時間まで行って終了する。

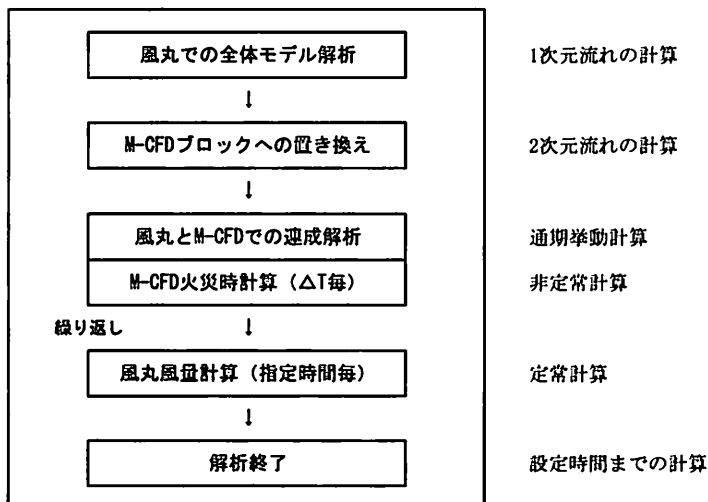


図-12 解析の流れの概念

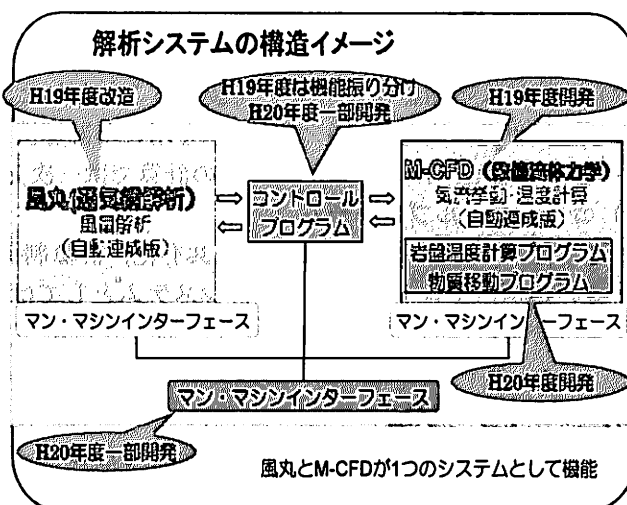


図-11 解析手法の概念

b) 温度計算機能

M-CFDの温度計算は、19年度は暫定的に境界領域に大気温度を設定し、壁面冷却効果を反映した。20年度は差分法による岩盤温度計算を実装することとした。風丸の従来の火災時解析プログラムでは、壁面冷却による火災ガス温度計算としてK値式⁹⁾を用いた計算機能を有している。ただし、本解析システムでは、火源をM-CFD計算領域内に限定して、風丸の計算では一次元流れとなった気流の計算だけを取り扱った。

c) コントロールプログラム

当初は、風丸およびM-CFDの情報共有化、計算制御等を行わせる機能を持った独立プログラムを念頭に置いていたが、プロトタイプの解析システムとしては、それぞれの機能を風丸およびM-CFDに担わせる方がシンプルであるため、当初の目的とした機能を解析プログラムに分散させた。

(2) プログラム検証

構築した解析システムの機能評価を目的として、実験結果例をシミュレートした。具体的には、モデル作成機能、およびシミュレーションにおける収束性、解析時間、エラーの有無等新解析手法の作動状況、ならびに火災ガス挙動再現性などである。以下に、シミュレーションを実施した例を述べる。

a) 風丸とM-CFDの担当範囲

模型実験において火災ガスが1次元流れでは表現できない挙動を示した範囲は、模型の構成や火源の位置、風門制御の有無等によって異なるものの、No.1立坑およびNo.2立坑の全域、火源を配置した水平坑道を含む3本の水平坑道全域が該当し、この範囲をM-CFDの担当範囲とした。連成解析モデルの概念を図-13、図-14に示す。

b) 連成解析

立坑2本水平坑道2本の解析結果の例を図-15に示す。平常時の解析においては、M-CFDの計算結果は1次元な流れで定常状態であったことを確認し、連成解析結果は風丸単独計算結果と同一の結果を得た。火源を中段および上段水平坑道に配置した場合は、計算時間は8分程度で収束性は良好であった。また、経時的な気流挙動は、No.1立坑の主流逆転や火源を配置した坑道の逆流など、モデル内に発生する右回りの流れを良く再現し、火源を配置した坑道内の通気状態も再現できた。

c) プロトタイプシステムの検証結果

自動連成解析は、風丸とM-CFDによる繰り返し計算を行い、計算所要時間は分単位で当初の目標を満足した。また、解析結果は、M-CFD単体の解析結果と同様、逆流現象や主流逆転現象などの模型実験結果が示す特徴的なケースの気流挙動を再現できた。これにより、本研究で開発したプロトタイプの解析システムは、模型実験結果を十分シミュレートできる機能を有し、定性的な解析精度を有するものと考えられる。

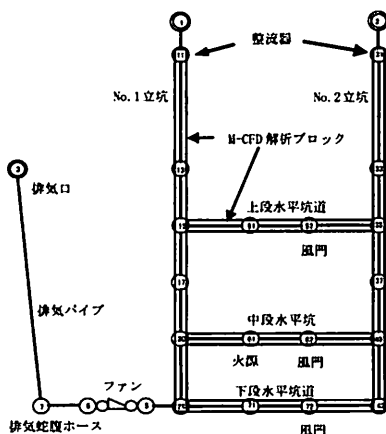


図-13 立坑2本水平坑道3本連成解析モデル概念

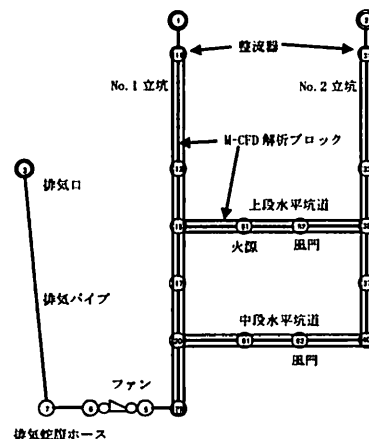


図-14 立坑2本水平坑道2本連成解析モデル概念

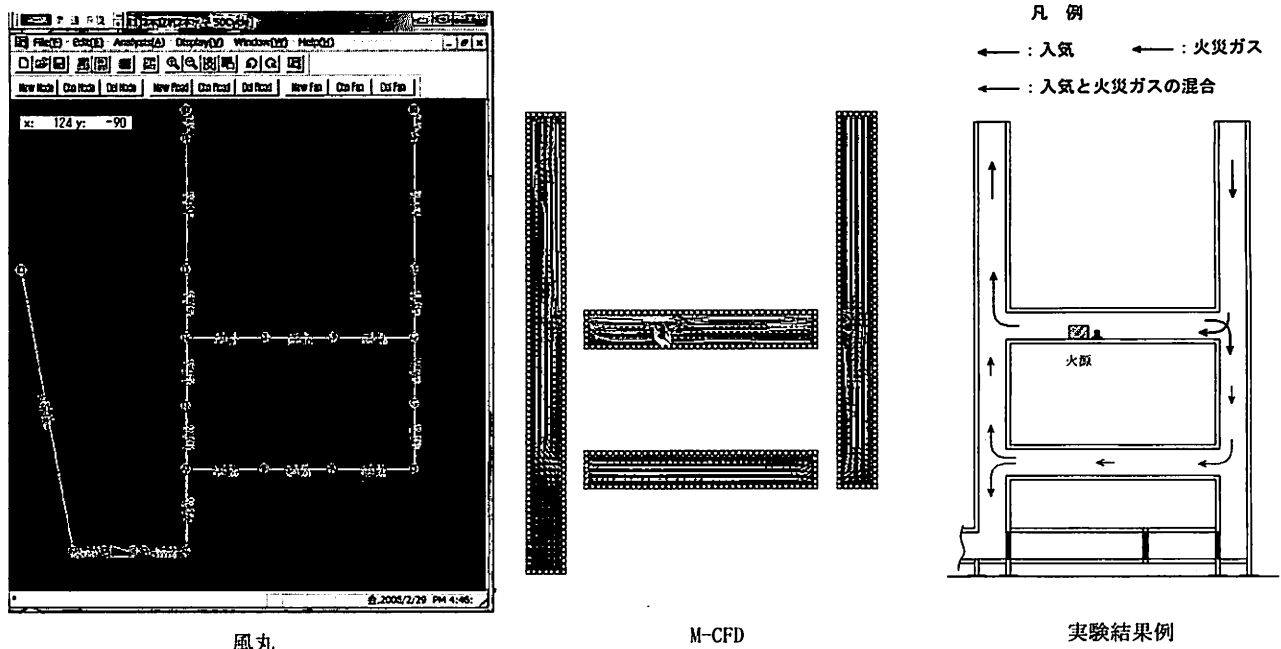


図-15 立坑2本水平坑道2本（火源：上段水平坑道）の連成解析結果の例

4. まとめと課題

立坑のように高低差の大きい地下施設における火災時の気流挙動はよく分かっておらず、数値解析の手法についても確立していない。このため、地下の重要な災害である坑内火災の防災対策の向上を目的として、地下施設を模擬した立坑火災実験を実施し、火災で発生する浮力による逆流現象や通気主流の逆転現象、水平坑道の風門を開閉した場合の通気挙動を把握した。また、把握した諸現象を再現可能で計算時間が短い解析手法を検討し、プロトタイプの解析システムを構築し、火災実験と同様の条件でシミュレーションを実施した。これらより得られた知見は、以下のとおりである。

(1) 実験結果

- ・立坑 1 本モデルでは、火災時に当初予想したより複雑で非定常的な通気挙動を示し、1 次元流れでは表現できないことが明らかになり、また、主流の逆転現象の定量化ができた。
- ・立坑 2 本モデルの場合は、全ての実験ケースで通気主流の逆流が生じた。これは、複雑な構造になるほど自由度が増し、火災ガスの流動が容易になったものと考ええる。
- ・多くのパターンで通気制御をする場合としない場合の実験を比較した結果、通気制御は火災ガスの流動制御に効果的で現場対策上重要である。

(2) 解析システム

- ・実験結果を基に、1 次元流れを担う風丸と、2 次元流れと温度計算を担う M-CFD を連成させるプロトタイプの解析システムを構築した。このシステムは複数の CFD ブロックを同時計算できること、3 次元の解析に比べて計算時間の大幅短縮が可能となったこと、境界条件に外気温等を与えることで壁面冷却を考慮できること、等の特徴を有する。
- ・構築したプロトタイプの解析システムの検証を目的として、模型実験で特徴的な通気挙動を示した例についてシミュレーションを行った。その結果、模型実験で得られた通気挙動の再現を確認し、本プロトタイプシステムの定性的な解析精度は評価できるものと判断した。また、計算所要時間についても、現場対応に必要な現実的時間（分単位）であり、当初の要求仕様を満足した。

本システムが地下施設における火災時の通気挙動予測ツールとして実用的と評価できるシステムとするための今後の課題は、以下の通りである。

- ・ 定量的解析精度の向上：M-CFD の温度計算機能や物質移動計算機能など、予測ツールとして定量的解析精度を得るために必要な機能の開発
- ・ 環境整備機能：使用環境とメンテナンス環境の整備、および表示機能の整備
- ・ 高機能化対応設計・開発：普遍性が高く信頼性に富み、ユーザーフレンドリーでメンテナンスが容易なソフトにするための設計と開発

今後は、本研究で開発したプロトタイプの解析システムに基づき、これらの課題を解決してより使いやすく実用的で普遍性の高いプログラムを開発していく予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：幌延深地層研究計画 地下施設基本設計—設計報告書—, JNC TJ5410 2004-011, pp8. 1-1-8. 1-6, 2004.
- 2) 井上雅弘, 内野健一: 坑内火災ガス温度の予測について —坑内火災のシミュレーションに関する研究(1)—, 資源と素材, Vol. 119, No. 12, pp. 727-733, 2003.
- 3) 井上雅弘, 内野健一: 坑内火災の影響を考慮した通気網解析 —坑内火災のシミュレーションに関する研究(2)—, 資源と素材, Vol. 120, No. 2, pp. 112-118, 2004.
- 4) 内田早明・木下道明・田中誠・鹿田則光: 坑内火災による煙の逆流現象(その 3) —斜坑における煙の流れ—, 資源・素材学会九州支部春季例会講演要旨集 (1994)
- 5) 辻本誠, 奥宮正哉, 長岡勉, 梶山隆史: 一部に開口のある空間での煙流動に関する模型実験(第一報), 日本建築学会構造系論文集, 第 488 号, pp153-160, (1996)
- 6) 水谷幸夫, 香月庄司: コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, (1985)
- 7) 平野博之: 流れの数値計算と可視化, 丸善(株), (2001)
- 8) 柳本竹一, 内野健一: 乾燥した坑道における通気温度計算(第 1 報), 日本鉱業会誌, 第 90 巻, 1039 号, pp583-587, (1974)