

概説；管路系流体解析

浜野 明千宏* 吉岡 逸夫*

Introduction to Fluid Analysis of Pipeline Systems

Achihiro Hamano* and Itsuo Yoshioka*

流体解析手法の1つである管路系流体解析は、1次元流という近似ながら、その特徴を踏まえることで、さまざまな分野に適用できる。本稿では、管路系流体解析の基本的な考え方と特徴を説明し、管路系流体解析の事例を紹介する。事例の紹介では、著者らの経験を踏まえ、原子力プラント、揚水式水力発電、空調配管、不活性ガス消火設備、プラント換気系といった具体的なテーマに対する取り組みを説明し、それぞれに固有の課題と実際の対応策についても紹介する。

Key word: 管路、管路系流体解析、原子力発電、揚水式水力発電、空調配管、不活性ガス消火設備、プラント換気系

1. はじめに

我々の身のまわりにある様々な「流れ」の中で、管路の中の流れが1つの大きな分野を形成している。身近なところでは、台所や水回りの蛇口・排水管やガス栓が思い浮かぶが、その背後にある上下水道やガス管といったインフラも管路の代表例である。部屋を見回せば換気系、思いをめぐらせば工場や発電所の配管、見方を変えて、自動車や機械等の燃料や給排気のパイプや体中の血管系なども管路の好例である。

コンピュータによる流体シミュレーションでは、対象が閉じた領域の場合でも開放空間の場合でも、3次元の形状モデルを用いて3次元の基礎方程式を解くことが行われる。管路系を扱う場合、長手方向の流れが支配的であり、1次元で近似されるので計算量は格段に少なくて済む。ここではそのような解析全般を管路系流体解析と呼ぶことにする。

例えば、工業プラントでの流体の輸送は管路を用いて行うことが多いため、工業的に特に重要な流れの形態である。また、最も単純な流れの1つであるため、長年研究されてきており、その研究成果はハンドブック等の形でまとめられ、設計等に利用され

てきた。近年、コンピュータのパワーの向上につれて、物理的な基礎方程式を扱う管路系流体解析が実用化されてきた。コンピュータによる流体解析の中では、3次元流体解析ほど派手ではないが、長手方向が支配的である管路系内流れの特徴を利用して流れをよく表現でき、3次元に比べて計算量が少ない点で実用的である。

管路系内の流れにもさまざまな形態がある。時間変化に着目して定常流と非定常流（過渡流れ）という分類があり、また流体の種類によって、非圧縮性流体、圧縮性流体、単相流、混相流、非ニュートン流等に分類される。

2. 管路系流体解析の目的

例えば、管路系流体解析を配管に適用する場合の目的には、次のようなものがある。

・定常計算

配管系内の定常状態の圧力分布や流量配分の計算をすることにより、配管系の問題点の摘出、流量の推定、設備の改造や運転条件変更の検討、既設機器・取替部品の評価、運転手順の検討等に利用できる。

*アドバンスソフト株式会社 技術第4部

4th Technical Division, AdvanceSoft Corporation

・流量配分計算

前提として、配管網の各部に要求する流量を設定し、それが得られるようなオリフィスのサイズや制御弁開度やポンプの運転条件等を求める。

・配管部品の検討

前提として、配管内の最大・最小流量、圧力損失等の条件を与え、それを満足するような配管のサイズを決定する。

・配管部品の相互作用計算

バンドやティーズ等が近接して配置されている場合の干渉効果による圧力損失の補正計算を行う。

・過渡計算

配管系内のキャビテーションや水撃等の過渡状態における圧力挙動、流量挙動等を予測する。また、バルブ開度の変更や圧力制御設定変更等の過渡現象や、ポンプトリップといった事故時の挙動を予測する。

・定常／非定常熱伝達計算

熱交換器、配管部等の入熱・放熱、または温度の異なる流体が合流する場合の熱混合に適用し、配管系内の温度分布および温度変化を計算する。

3. 管路系流体解析手法の特徴

3.1. 流体の基礎方程式と数値計算法

管路系内の流れの特徴は、基本的に管路に沿った1次元流として扱えることである。基礎方程式は質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式を、管断面の物理量を積分することにより求めることができる。あるいは、1次元流に関する物理的考察に基づき直接導かれる。

一般的な3次元の運動量保存式は次のように書きあらわされる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau \quad (1)$$

ここで、 ρ は流体密度、 u は流速、 P は流体圧力、 τ はせん断応力、 t は時間を示し、上記の式(1)の左辺第1項は時間項、第2項は対流項、右辺第1項は圧力項、第2項は粘性項を表している。

1次元の運動量保存式において、粘性項は、管路系流体の特徴としての流体摩擦力として表現される。

流体摩擦力は、外力としての接触壁面による外部摩擦力と粘性による内部摩擦力を合わせたものであり、一般に管摩擦係数 f を用いて

$$f \frac{L}{D_e} \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

で表される。ここで、 L は管の長さ、 D_e は等価直径、 u は流速である。 f は Reynolds 数や管壁の粗さ等に依存し、実験に基づく多くの式が提唱されており、直管の場合、Colebrook の式や Churchill の式がよく使われている(本誌掲載「水理学と管路系過渡解析—ポンプトリップ、空気弁と水撃の解析事例—」参考)。また、ダクトや熱交換器等の円柱で囲まれた流路などの場合でも、これらの式が使われているが、この場合、流路断面積 A と流路濡れぶち長さ L_p から、次のようにして等価直径を介して使われる。なお、直管の場合、等価直径は管径と等しい。

$$D_e = \frac{4A}{L_p} \quad (3)$$

ただし、伝熱促進を目的として内面溝を付けた管であるライフル管やリブド管のような特殊な管路では、Colebrook の式や Churchill の式では表しきれないため、場合によっては、別途実験式を用意する必要がある。

管路中にオリフィスや分岐等の管路要素がある場合、流体摩擦力の他に管路要素の抵抗力が外力に加わる。管路要素の抵抗力は損失係数 K を用いて

$$K \frac{\rho u^2}{2} \quad (4)$$

で表される。 K も、 f のようにさまざまな管路要素について実験式がある。

以上から、1次元の運動量保存式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho uu) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{f}{D_e} \frac{\rho u^2}{2} - \frac{K}{L} \frac{\rho u^2}{2} \quad (5)$$

ここで、 z は流れ方向の座標を示している。

エネルギー保存式に関しては、多次元的な項として、温度拡散項があるが、1次元解析では空間を平均して扱うため、特に考慮する必要がないが、高粘性流体のように、流体摩擦力で熱が発生する場合にはモデル化が必要となる。また、管の構造材を通じての伝熱を考慮する場合、管構造剤の熱伝導解析や管と流体間の熱伝達係数に関する構成方程式として必要になる。

流体の基礎方程式の数値計算法として、特性曲線法や1次元の有限差分法などがある。また、時間積分法として、解析対象の特性に応じて、陽解法から、半陰解法、完全陰解法とさまざまあるが、完全陰解法は陽解法に比べて計算の安定性が増す反面、プログラミングが非常に複雑になるという欠点もあり、解析対象の特性を活かして選択する必要がある。アドバンスソフト株式会社では、さまざまな管路系流体解析シミュレータを開発しており、解析目的に合わせて、これらシミュレータでは特性曲線法、有限差分法に基づく陽解法、有限差分法に基づく完全陰解法を採用している。本特集号では、それらの概要を掲載しているので参照されたい。

1次元の運動量保存式を、Euler 半陰解法の有限差分法で、対流項に1次風上差分法を用いて、離散化すると次のようになる。

$$\frac{(\rho u)_j^{n+1} - (\rho u)_j^n}{\Delta t} + \frac{(\rho uu)_+^n - (\rho uu)_-^n}{\Delta z} = -\frac{P_+^{n+1} - P_-^{n+1}}{\Delta z} - \frac{f_j}{D_e} \frac{\rho_j^n (u_j^n)^2}{2} - \frac{K_j}{\Delta z} \frac{\rho_j^n (u_j^n)^2}{2} \quad (6)$$

上記の差分方程式において、損失係数 K が大きいと、計算がうまく行うことができなくて、しばしば計算が破綻してしまうことがある。そこで、流速の2乗の項を次のよう Taylor 展開して、2次以降

の高次の項を省略して、線形化して優対角化を施すことによって計算の安定化が図られることができる。

$$\begin{aligned} [(\rho u)^{n+1}]^2 &= [(\rho u)^n]^2 \\ &+ \frac{d[(\rho u)^n]^2}{d(\rho u)^n} [(\rho u)^{n+1} - (\rho u)^n] \\ &= 2(\rho u)^n (\rho u)^{n+1} - [(\rho u)^n]^2 \\ &= 2\rho^n |u^n| [(\rho u)^{n+1} - \rho^n |u^n| (\rho u)^n] \end{aligned} \quad (7)$$

なお、最終的な式の絶対値は、流体摩擦力と流体抵抗力に対して方向を持たせるためのものである。これを用いて、上記の差分方程式は次のように書きあらわされる。

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{\Delta t} + \left(\frac{f_j}{D_e} + \frac{K_j}{\Delta z} \right) |u_j^n| \right] (\rho u)_j^{n+1} &= \frac{(\rho u)_j^n}{\Delta t} \\ &- \frac{(\rho uu)_+^n - (\rho uu)_-^n}{\Delta z} - \frac{P_+^{n+1} - P_-^{n+1}}{\Delta z} \\ &+ \frac{f_j}{D_e} \frac{|u_j^n| (\rho u)_j^n}{2} + \frac{K_j}{\Delta z} \frac{|u_j^n| (\rho u)_j^n}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

上記の式において、流体摩擦力と流体抵抗力に関する項の符号が左辺、右辺とも正になっていることが重要である。また、左辺のカッコの中が正として優対角化が図られていることが分かる。

さらに発展させれば、対流項も流速の2乗の項と見なせるので、これも同様に線形化することが可能であり、米国で開発された原子力安全解析コード(例えば、文献[2])で採用されている。

3.2. 流体機器のモデル

管路系の中に設置されるさまざまな流体機器の効果を解析に反映するため、それぞれの機器の特性を表現する解析モデルをサブルーチンとして加え、形状モデルでの指定に応じて計算に反映する。

流体機器モデルの考え方を図1に示す。設置位置の配管の状態量(流量、圧力、温度等)を時々刻々参照し、それらや時間を引数とした機器特性によって状態量を変更して当該配管にフィードバックする。このような仕組みを複数の配管列に適用することにより、熱交換器といった複雑な機器の効果も計

算に反映することができる。参照する配管位置と、フィードバックする配管位置は異なって指定することも可能であり、応用すれば制御系を模擬することもできる。

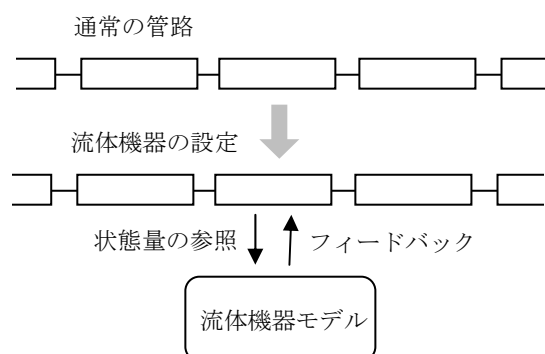


図 1 流体機器モデルの概要

このような方法は、流体機器を任意の位置に設置して管路系全体への効果を検討する実際の考え方と自然に対応している。流体機器モデルとして独立したサブルーチンでプログラムを組み立てることにより、流体機器に関する知見が増えた場合のプログラム改良やモデル追加も比較的容易である。シミュレーションの対象とする実際の体系や事象に応じて、柔軟にプログラムをカスタマイズして適用している。

ただし、数値計算法について、前述したように、陽解法、半陰解法、完全陰解法とあるが、完全陰解法だけは、流体差分方程式の解法で用いる全体行列に、流体機器モデルを組み入れなければならない。陽解法や半陰解法では代数的に計算できることに比べると、改良や追加は容易ではない。特に非線形の強い流体機器モデルであれば、全体行列に組み入れるために線形化の工夫が必要となる。

4. 適用例

著者らが扱った管路系流体解析の事例について紹介する。いずれも各分野での実際の問題を対象としたものであるが、紙数も限られているので本章では概略のみ紹介する。

4.1. 原子力発電プラント

管路系流体解析が発展してきた分野として、原子力発電プラントを対象とした数値シミュレーションがある。

商業用原子炉の主流を占めている軽水炉（軽水型発電用原子炉）は、ウランの核分裂反応で発生した熱により冷却材である軽水（水）を加熱して高温高压の水蒸気に変え、これでタービンを駆動させて発電している。

軽水炉には沸騰水型(BWR)と加圧水型(PWR)があるが、どちらも、原子炉圧力容器、蒸気タービン、復水器、ポンプ、加圧器、バルブ、センサー類等の膨大な数の機器装置で構成され、配管はその主要設備となっている。例えば、BWRの配管系には原子炉格納容器内の主蒸気系、再循環系、冷却水系、非常用炉心冷却系などがある。BWRの一種であるABWRの非常用炉心冷却系の例を図2に示す([1]を参考に作図)。配管部材は主にステンレス鋼、合金鋼、炭素鋼等が用いられている。原子力プラントの心臓部である原子炉圧力容器の構造を図3に示す([1]を参考に作図)。これもABWRの例である。

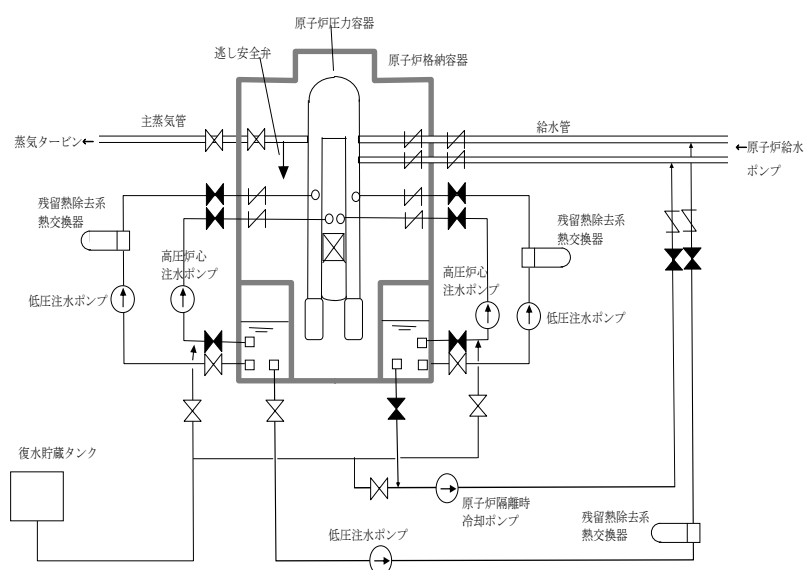


図 2 ABWR 非常用炉心冷却系

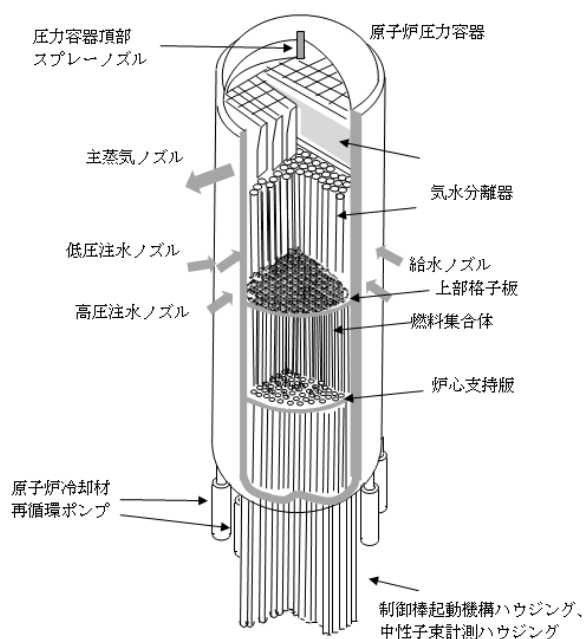


図 3 原子炉圧力容器内構造物例

原子力設備では、機器の破損が重大な事故につながる恐れがあり、腐食、地震、減肉などに対処するための厳格な管理体制が求められている。原子炉の健全性にとって、燃料棒の冷却性能が重要であり、原子炉の安全解析において、この軽水の熱的な流動

の計算が重要である。

例えば、軽水炉の圧力境界である主冷却系配管などが破損したり弁が開いたままになって冷却材が流出し続け、通常の給水系で原子炉内の冷却材量を維持できない事態を冷却材喪失事故（LOCA : Loss of Coolant Accident）と呼んでいる。このような場合、原子炉は自動的に緊急停止（スクラム）して制御棒が炉心に挿入され、炉心出力は急速に低下するが、核燃料に蓄積された核分裂生成物が運転時の数%以下の熱を出し続けるので、非常用炉心冷却系（ECCS : Emergency Core Cooling System）が設けられている。これはポンプや窒素ガスで加圧されたタンクなどで構成され、LOCA が発生して原子炉の圧力や水位が下がると、自動的に低温の水を注入し、炉心の過熱・破損を防ぐことを目的としている。

軽水炉が十分に安全な設計となっていることを確認するためには、このような事故や外乱や故障の想定下で、放射性物質の障壁の健全性の度合いをシミュレーションすることが重要である。例えば、ジルカロイ被覆燃料棒の被覆管の最高表面温度（PCT : Peak Cladding Temperature）が 1200℃ 以下に止まることが、燃料棒が大きく破損して放射性物質が大量に系外に放出されない指針となって

いる。

想定事象の例を表 1、表 2 に示す。注入系、弁、ポンプや制御棒の自動作動により熱流動が変化していく事象となっている。

表 1 主な事象推移 (LOCA)

- ・冷却材放出による減圧、炉内量減少
- ・炉心への注水 (低圧炉心スプレイ LPCS、低圧炉心注入系 LPCI、高圧炉心スプレイ HPCS)
- ・自動減圧系 ADS、逃し安全弁 SRV→減圧
- ・再循環ポンプトリップ RPT→駆動停止
- ・原子炉スクラム (制御棒挿入) →熱出力の停止
- ・燃料棒の出力(核分裂反応)は、ボイド率・温度等により変動

表 2 主な事象 (外部電源喪失)

外部電源喪失 (想定 の 起因事象)

(→給水停止)

(→負荷の喪失)

→蒸気加減弁急速閉止 (→圧力上昇)

タービンバイパス弁急開

インターナルポンプ全台トリップ (炉心への流量減少)

原子炉スクラム (→燃料表面熱流束減少)

(圧力に応じ) 逃がし安全弁開、閉

冷却材の配管系は管路系モデルで表現するのに適しているが、表 1 と表 2 に示す事象をシミュレーションするためには、次のような付加モデルが必要である。

①流体の温度に関わるもの

- ・核分裂反応 (熱源)
- ・構造物の熱伝導
- ・構造物表面熱伝達

②流体の物性、流動に関わるもの

- ・流体の内部エネルギー変化
- ・相変化(蒸発・凝縮)、流動様式
- ・機器の制御系

- ・バルブ特性
- ・ポンプ特性
- ・気液二相流

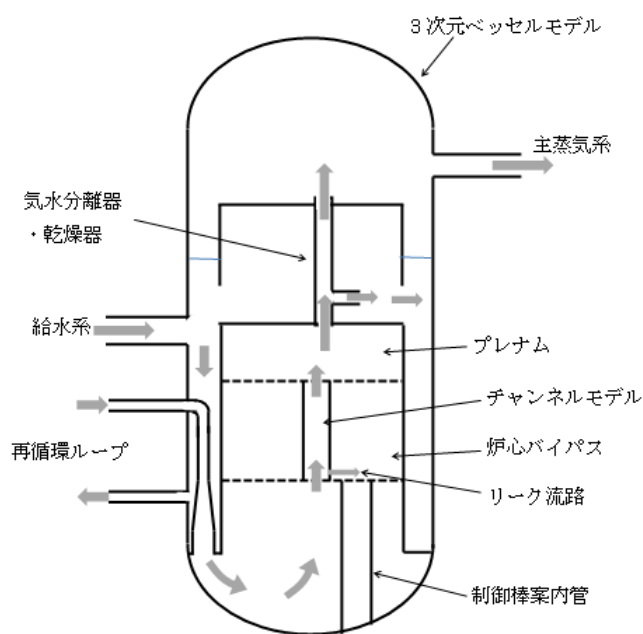
このうち原子力発電プラント固有のモデルが、熱源としての核分裂反応である。軽水炉においては、核分裂反応は、中性子の減速材でもある冷却材の温度やボイド率によるフィードバックがかかる。例えば、BWR (沸騰水型原子炉) では、燃料棒周囲の冷却材のボイド率 (気相の体積割合) が増加すると核分裂反応が抑制される傾向があり、温度の変動によっても反応の度合いが変化するので、シミュレーションでも時々刻々の冷却材の計算結果を反映して、こうした反応度の変化を考慮している。

配管表面伝熱と配管の熱伝導による管温度の計算機能、ポンプや弁および冷却材注入系といった流体機器モデルは、他のプラント系でも利用される管路系シミュレータのモデルである。

原子炉圧力容器の内部は、実際には前掲図 3 のように構造物が多数あって流路としては複雑な形状であるが、管路系シミュレーションでは図 4([2]を参考に作図)のようにモデル化して扱う。すなわち、複数ある流路を少数にまとめ、主流方向にボリュームとして集める。炉心部は多数の燃料棒の間を冷却材が流れるが、これも同様にモデル化する。ただし、局所的に熱的に厳しい箇所に着目するため、一部を並行流路としてボリュームとし、熱的挙動に着目する。流動の 3 次元効果が無視できない場合には、その領域だけ 3 次元の流体解析を適用することも行われている。

以上のモデルにより、さまざまな想定 の 事故や過渡変化が発生した場合の原子炉の安全性を評価することができる。特に、安全設備の起動失敗等の想定に応じた事象の推移、安全性の裕度を定量的に評価することができる。

水-水蒸気系気液二相流では、低圧では液相と気相の密度が 1000 倍異なるため、短時間の急激な変動が生じる。それに対する数値計算の安定化が工夫されている[3]。

図 4 原子炉圧力容器のモデル例^[2]

4.2. 揚水式水力発電所水路系

巨大な管路流の典型的な例として、水力発電所の導水路・排水路がある。水力発電では、落差を利用した多量の水流により水車を回して発電している。中でも流れの向きを切り替える揚水式水力発電では、過渡応答の把握が重要である。

揚水式水力発電は、発電所の上下に貯水池を設け、上部の貯水池より流して発電した水を下部の貯水池に溜め、深夜の余った電力で下部の貯水池から上部の貯水池へと汲み上げて再利用するものである。余剰電力は、火力発電所と原子力発電所によるもの

であり、これらは出力を落とすと効率が極端に落ちてしまうために安易に発電量を絞れないという事情がある。現在、電力会社はピーク時の電力消費への対応に苦勞しており、停止状態からわずか数分で100万キロワット超の最大出力運転に対応出来る揚水式水力発電は有効である。また、揚水式水力発電所は、低負荷時に電力系統を安定させるための負荷としての役割も担っている。

揚水式水力発電所の構成例を図5に示す。上下に貯水池を作り、発電機/モータ兼用のポンプ水車を介して配管で上下の貯水槽を結んでいる。水路の途中には、圧力変動を緩和するためのサージタンクが設けられている。

ポンプ水車には反動水車の一種であるフランシス水車が広く用いられるが、これは有効落差にして数十メートルから数百メートルの範囲の発電で適用されるものである。水車は、高い圧力が加わっている取水口部分と圧力の低い放水口部分との間に設置され、入口部分はらせん状に形成されているケーシング（渦形室）となっており、何枚ものガイドベーン（案内羽根）により水を流入させ、水車の軸を回転させる。ガイドベーンは角度（開度）を変えることができ、使用水量に応じて効率的な運転を

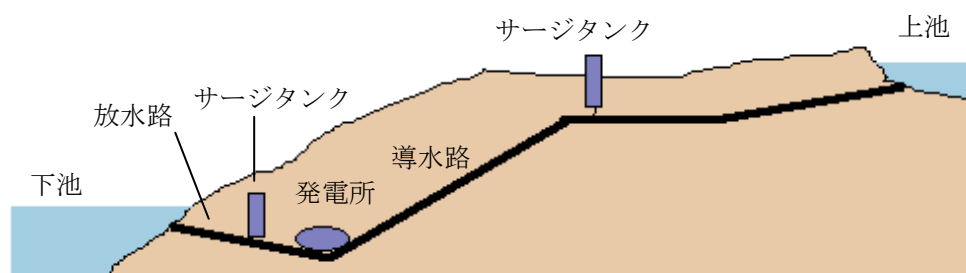


図 5 揚水式水力発電所の模式図

行うための調整をしている。

このような水力発電所で、発電時の負荷遮断や、揚水時のポンプ入力遮断時といった切換え時のガイドベーンの開鎖によって、水路内の圧力は急変し水撃現象が生じる。圧力変動幅には設計上の許容範囲があるので、このような過渡現象を解析により予測し許容範囲との余裕度が定量的に評価される。そして水路の設計および運転時の操作方法を検討することがシミュレーションの目的である。

数値解析による揚水式水力発電所の過渡応答シミュレーションで考慮すべき事項として、次のようなものがある。

・ポンプ水車の特性

管路系流体解析では、長い水路の途中に設けた計算点（節点）にポンプ水車モデルを適用する。これは、ガイドベーン開度も考慮したモデルで、ポンプ水車の完全特性を反映して1節点に圧損（落差・揚程）と流量を設定する。ポンプ水車の特性は、次のパラメータで表現される。

- ・回転速度 n (rpm)
- ・流量 Q (m³/s)
- ・揚程または落差 H (m)
- ・軸トルク M (M・m)

このうち H は、発電運転でポンプ水車が水車として作用する場合は管路流動への落差（水頭の減少）を表し、揚水運転でポンプ水車がポンプとして作用する場合は管路流動への揚程（水頭の増加）を表わす。管路系解析プログラムの計算には、 Q と H が反映される。なお、回転速度 n は、フリーにした場合は、ポンプ水車の特性である回転慣性 $I(=GD^2/4)$ によって次のように変化する。

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{60M}{2\pi I} \quad (\text{rpm/s})$$

シミュレーションでは、初期電気入出力、初期揚程または落差、初期回転速度を条件設定し、ポンプ水車の完全特性に応じてこれらの変数を変化させる。完全特性はいくつかのガイドベーン開度毎に、次の独立変数 m_{11} または K_{u1} の関数 Q_{11} と M_{11} として与えられる。ただし、

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}}$$

$$Q_{11} = \frac{Q}{\sqrt{H}D^2}$$

$$M_{11} = \frac{M}{HD^3}$$

$$K_{u1} = \frac{\pi n D}{60\sqrt{2gH}}$$

である。このうち D はポンプ水車の代表寸法[m]であり、模型に関する完全特性を利用するための乗数である。 $Q_{11}(n_{11})$ の例を図6に示す（[4]を参考に作図）。ガイドベーン開度が時間変化する場合は、この図に描かれたカーブを順次移動していくことになる。

ガイドベーン開度の初期値と時系列テーブルを条件設定することにより、過渡計算ではポンプ水車の特性カーブをたどることで、回転速度を中間変数として、時々刻々の Q と H が求められる。

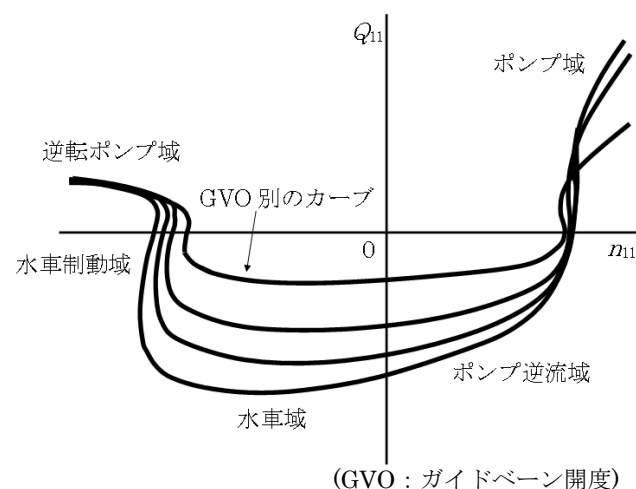


図6 ポンプ水車の特性

・任意形状のサージタンクの水頭変化

圧力変動を緩和するために設置されるサージタンクも、長い水路の途中に設けた計算点（節点）に計算モデルを適用して模擬する。具体的には、水位変動に対応する水頭を与えることで、サージタンクの効果が計算に反映できる。タンクが円筒形であれば、水頭の計算は容易であるが、揚水発電所のサージタンクは、山をくりぬいて建造するため、特殊形状をしている場合がある。このような特殊形状のサージタンクの計算機能も導入し、高さによって水平

断面積がかわる柱体形状のサージタンクとしてモデル化した。具体的には、タンク内径の代わりに図 7 のパラメータを入力し、貯水量と水位の関係を基礎式に反映した。

大規模な水力発電所では、管路の直径も長さも長大になり、水路も 3 列・4 列と並行分岐してそれぞれのポンプ水車・発電機を設置している。

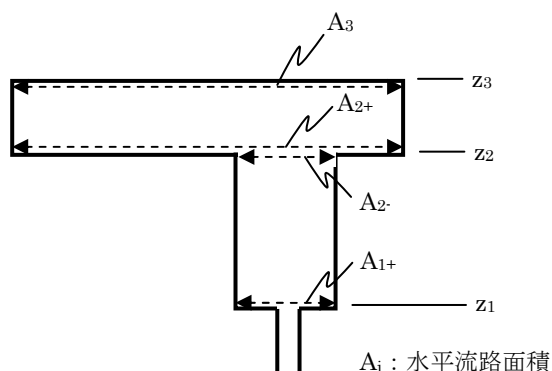
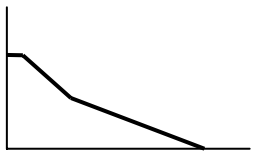
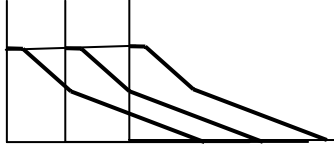
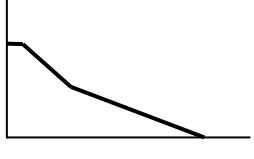
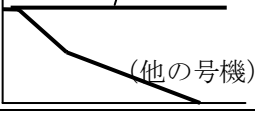
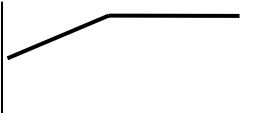
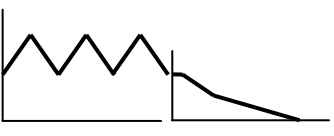


図 7 一般形状サージタンクモデル

表 3 揚水式視力発電所の過渡事象例

解析事象	ガイドベーン操作 (開度時系列テーブル)
全台同時遮断	遮断時刻で全号機 
シリーズ遮断	各号機の遮断時間で遮断 
1 台運転遮断	遮断号機のみ 

1 台ガイドベーン 不作動	(GV 不作動号機)  (他の号機)
全負荷急増	(全号機) 
AFC 遮断 (周波数調整)	(全号機) 

このような管路系を対象に数値シミュレーションを行うことにより、日常的に行われる運転切換えのときの圧力過渡応答を予測することができる。この場合、号機によって遮断時間をずらした場合や、1 台のガイドベーンが不作動だった場合など、想定されるケースも表 3 のように増えてくる。ガイドベーンの閉鎖速度、ポンプ水車が複数台あるときは各号機のガイドベーンの操作の調整によって、系内の圧力衝撃を余裕度をもって許容内におさえ、安全・効率的な運用に資することができる。

ポンプ水車特性は、一部多値関数となるので、グラフに沿って推移するような工夫を要する。極座標系で表現するなどの方法もあるが、著者らはポンプ水車特性のカーブを構成する線分を局所的に追っていくことで、計算の安定化を図った。

水力発電の場合、ほとんどの部分で長手方向の流れが支配的という点では、1 次元流を仮定する管路系流体解析が適当であるが、分岐・合流の部分では 3 次元効果がある。この部分の効果をシミュレーションで予測するのに部分的に 3 次元流体解析を行う必要があるのではないかという議論もあり、検討の余地がある。

4.3. 空調配管系

身近な配管系の例として真っ先に思い浮かぶのが家屋内の空調や水道の配管であろう。管路系モデルの模式図を図 8 に示す。ここでは実際の解析例を一部簡略化して示した。図の左上に水槽とポンプ

があり、ここから空調用の温冷水が各フロアに回り、図では楕円で示した空調機に達した後、再び左上へと循環している。

空調機は、管路系の流れに対して抵抗として作用し、各所に分布した抵抗により流量分布が決まってくる。この抵抗はバルブ操作で変更できるため、各部のバルブの開度設定によって、意図した流量分布に調整できる。

このようなビルの空調用配管系を対象に、管網解析を行った。図面等のデータに基づいて入力データを作成し、ポンプ流量条件を設定して圧力・流量分布を求めた。

・配管

図面データに基づいて配管の接続状態を整理し、各部の長さを整理した。流量係数 C を作成。4 階建てビルの例で、配管数は約 250 になる。

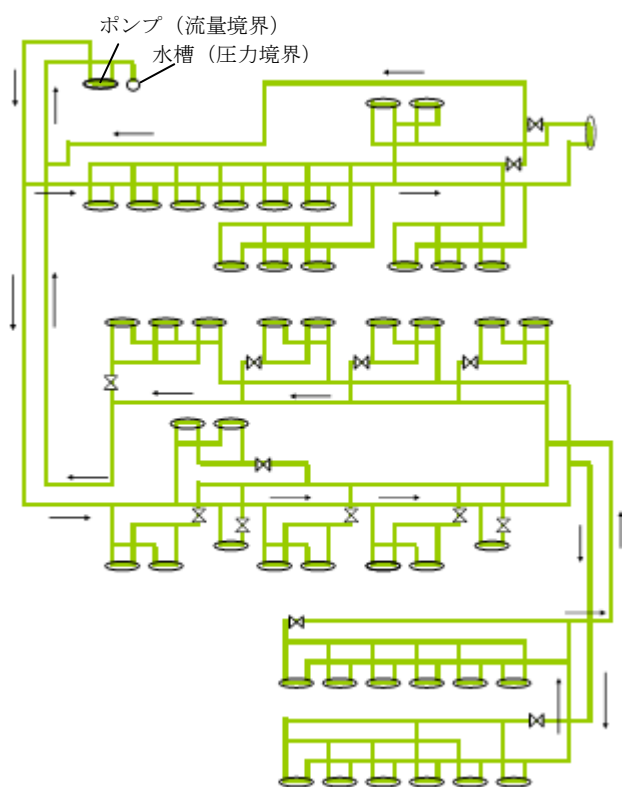


図 8 空調用配管の例の模式図

・送水ポンプ

流量境界で模擬した。流量はバイパスに逃げる分を除いた正味流量として、バルブ閉鎖のケースでは流量を変更した。

・水槽

圧力境界で模擬した。

・空調機の冷温水弁

バルブを設定し、バルブの C_v 値に基づいて、損失係数 f に変換して設定した。空調機の圧損特性（流量・圧損グラフ）は、損失係数 f に変換して設定した。

数値シミュレーションの結果、空調機の冷温水弁の開度を変更した場合の末端流量分布が得られた。各弁の開度設定パターンによって、末端流量分布がどう変わるかの検討に利用できる。

解析作業では、不確定情報が多いため、末端流量を現実近づけるべく、各部の設定を調整した。そのうえで、開度設定パターンの変更によって傾向がどう変わるかの判断に利用した。

4.4. 上下水道

建物内の配管同様に身近な管路の例として、上下水道がある。

上水道の場合、浄水場で浄化された水をポンプで送出し、幹線・支線・末端へと供給する。ごく自然に、これらの配管を管路系流動解析で扱うことができる。水道管は地面に沿って埋設されるため、地形の起伏によって配管も高低差がつく。これを考慮してシミュレーションすることにより、水压と末端各点の供給量が推定される。液柱分離や許容以上の圧力上昇を避けながら所要の供給を確保するためのポンプ能力、弁操作等の検討に利用できる。サージタンク・空気弁といった圧力応答対策の検討もシミュレーションの目的となる。

下水道や河川網の場合は、満水状態（満管）でない部分が多く、これは液面の上下によって管内流体の自由度が増えることを意味するため、解析モデルは複雑になる。例えば、図 9 に示すような堰では、管路系流体解析の要素としては圧力の連続性が途切れる。

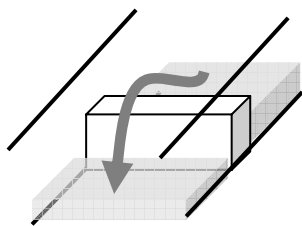


図 9 堰の例

下水道や河川網において、降雨時等の排水能力を確保するためにポンプが設置される。ポンプ容量や立上げのタイミングが適正でないと急激な水位低下が生じ、ポンプの始動停止が繰り返されるため、水路に応じたポンプ容量や制御方法を計画時から検討しておく必要がある。

このような目的のために解析モデルを工夫し、実現にそった結果を得ている。このような解析は、3次元モデルによらない効率的な解析に意義があるので、対象とする現象のどこに着目し、どこまで(例えば、堤防からあふれるまで等)解析するのか、目的に沿って解析技術を使い分けることが大切となる。

4.5. 不活性ガス消火設備

ここでは、管路系流体解析の適用例として、不活性ガス系消火設備について述べる。

ホテル、病院、デパート等の防火対象物に設置される消火設備は、消火器のほか、屋内・屋外消火栓設備、スプリンクラー設備、水噴霧消火設備あるいは動力消防ポンプ設備など水を消火剤として用いるものが一般的である。その他に水を使用しても効果がないか、あるいはかえって支障があるような防火対象物、例えば、コンピュータや電気通信機器あるいは美術品などに対する二酸化炭素消火設備及びハロゲン化物消火設備、ハロン代替ガス消火設備、駐車場やヘリポートなどに対する泡消火設備など特殊な消火設備がある[5]。このうち、二酸化炭素消火設備は、密閉された場所での使用時に高濃度になった場合の人体の窒息危険に注意を要する。1995年12月には、東京池袋の立体駐車場に設けられた二酸化炭素消火設備の誤放出により、3名の死傷者を出す事故が発生した[6]。

また、ハロゲン化物消火剤は、オゾン層破壊物質として1994年に生産等が全廃され、その代替消火剤の開発が米国を中心に行われ10種類以上の物質が提案された。それらを大別すると、不活性ガス(イナート系)とハロゲン炭素化合物(ハロカーボン系)に二分される。

不活性ガス消火剤は、単体または複数のガスの混合物である。現在日本においてシステム評価を受けたものは、窒素(IG-100)、窒素・アルゴンの混合物(IG-55、Argonite)および窒素・アルゴン・二酸化炭素の混合物(IG-541、Inergen)の3種類である。これらの消火剤の消火原理は、空気中の酸素希釈作用と不活性ガスの炎からの吸熱作用によるものである。窒素およびアルゴンは、その気体のみの作用では二酸化炭素のような人体に愛する危険性はないとされている。表4に、不活性ガス消火剤の種類と物性について示した。

不活性ガス消火設備は、ガス圧によって消火剤をそのまま放出するものであるから、消火剤貯蔵容器、起動用ガス容器、消火剤の放出口(噴射ヘッド)およびこれらを接続する配管と各種制御弁から構成されている(図10参照)。

消火剤の所要量は、種類に応じて、窒素の場合、防護区画容積[m³]の0.52倍、窒素・アルゴンの混合物の場合0.4766倍、窒素・アルゴン・二酸化炭素の混合物の場合0.472倍を乗じた量以上である[5]。不活性ガス消火設備に求められる性能の1つに、「容器に貯蔵されている消火剤量の90%を1分以内に放射できること」がある。消火設備は、上述の通り、各種流体機器から構成されているが、消火剤の流路の大部分を占めるのは配管系である。すなわち、管路系流体解析手法を不活性ガス消火設備に適用することで、その性能評価を行うことができる。

具体的には、30MPaに至る高圧力で消火剤を充填している貯蔵容器から、容器弁、オリフィス、選択弁、噴射ヘッドまで、配管を流れるガスの熱流動を計算する。その場合、消火設備の起動初期には、容器弁、オリフィス、噴射ヘッド等で臨界流れの状態であり、起動から数十秒後には低速流れの状態となっていることが想定される。さらに、容器弁の圧

表 4 不活性ガス消火剤の種類と物性

消火剤	化学式	分子量	定圧比熱 (kJ/(mol・℃))	消炎濃度 N-ヘプタン (vol%)
IG-100 (窒素ガス)	N ₂	28	29.1 (16℃)	33.6
IG-541 (Inergen)	N ₂ :52% Ar:40% CO ₂ :8%	34.4	26.6 (16℃)	35.6
IG-55 (Algonite)	N ₂ :50% Ar:50%	34	19.5 (16℃)	37.8

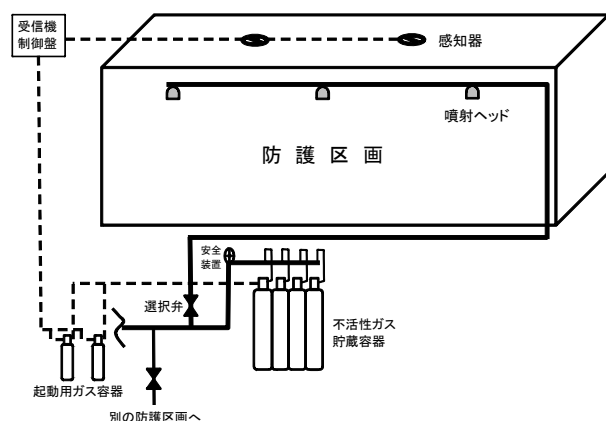


図 10 不活性ガス消火設備の例

力制御機能や噴射ヘッドおよびオリフィスの流動特性を考慮する必要がある。また、場合によっては、計算結果から噴射ヘッドやオリフィスを自動的に選定する仕組みも構築できる。

4.6. プラント換気系

有毒物質や放射性物質等の危険物質を扱う施設では、万一火災や爆発等の異常事象が起こった場合でも、環境に危険物質が漏洩しないように防護設備が備えられていることが多い。グローブボックスのような小規模なものもあるが、セル（部屋）換気系や建屋換気系やといった大規模な換気系を構成するものもある。これらの換気系を構成する流体機器要素としては、セル、ダクト、フィルタ、ブロワ、ダンパー等が考えられ、管路系の一種とみなすことができる。図 11 にプラント換気系の系統概要図の例を示す。

このような換気系を対象とする場合、複数のブロワの起動・停止に伴う影響を評価したり、特性の部屋で火災・爆発等の異常事象の発生を想定し、その影響が換気系内をどのように伝播し、減衰するかを評価する。具体的には、火災・爆発に伴う高温空気の流れを計算するため伝熱解析機能を使用し、生成物質の移流解析機能を使用する場合もある。さらに、制御機能を備えた弁やダンパーを用いたり、フィルタの目詰まり効果を表すモデルを組み込んだりすることで、なるべく詳細に実現象を模擬するような取り組みがなされている。図 12 にプラント換気系の解析モデル図の例を示す。

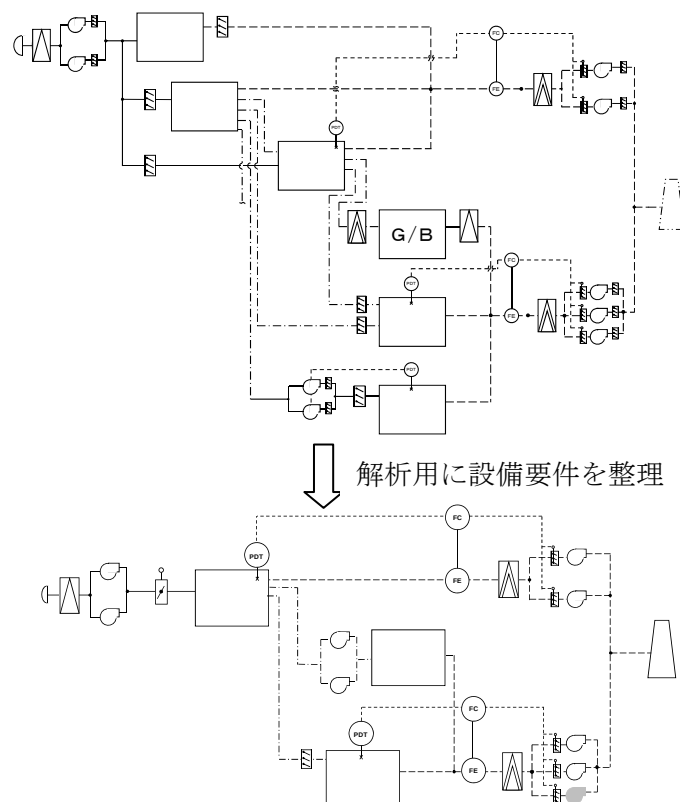


図 11 プラント換気系の系統概要図の例

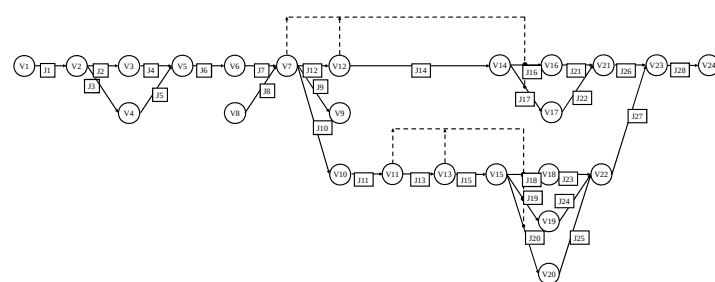


図 12 プラント換気系の解析モデル図の例

5. 今後の展開

管路系流体解析は、管の長手方向の1次元方程式を解くため、3方向の方程式を解く3次元流体解析よりはるかに計算量が少ない。シミュレーションの対象の特徴を踏まえて適用すれば有用である。

計算機や大規模行列解法手法など、ハードとソフトの両面での数値シミュレーションの向上により、3次元流体解析も実用的になってきている。しかし、適用分野によっては、所要時間と手軽さの面で管路系流体解析の有効性は依然としてある。

本稿で紹介した事例も、現在ではハードウェア機能の向上により、PCで手軽に短時間で結果が得られるようになっており、これは多数の条件ケースを容易に比較検討できるということである。

特に環境、防災といったテーマへの活用が見込まれる。環境問題を背景に原子力の有用性が見直されているが、原子力プラントを対象とした熱流動解析について言えば、コンピュータの能力が今と比べ驚くほど低かった時代から研究開発されてきた。限られたメモリ、処理速度を巧みに活用して現実的な時間で有用な結果が得られるように工夫されてきた。例えば、複雑な物理現象の特徴をとらえた近似モデルによって効率よく計算し、限られたプログラム変数に多くの情報を圧縮して保持するといったことである。今ではコンピュータの能力が格段に向上したことを受けて、技術革新による設備改良・運用方法変更に即応できる柔軟性の高いプログラム開発が望まれる。そこではこれまでに蓄えられてきた解析モデル・解析技術を活用しながら、新たな処理能力を取り込むといった見直しが望ましい。しかも従来は、米国産ソフトである、世界的な知財意識の高まりから、コンピュータのプログラムの内容開示も制限される傾向が出ており、国産ソフト整備が望まれる。

防災というテーマに関しては、建物内で有害危険物質が発生した場合の屋内拡散予測や、換気系が設置された施設における火災の解析に管路系流体解析が応用される。複雑な体系に対しても、経時変化を迅速に計算することにより、危険エリアと被害規模の推定に活用できる[7][8]。

参考文献

- [1] 火力原子力発電技術協会(編・刊)「原子力発電所一全体計画と設備一(改訂版)」平成14年6月
- [2] “TRACE V5.0 THEORY MANUAL ; Field Equations, Solution Methods, and Physical Models”, 米 NRC
- [3] 小池秀耀、三橋利玄、浜野明千宏 “管路内の流れのシミュレーションプログラム”, 丸善(1995)
- [4] 横山重吉、細井豊「わかる水力機械」日新出版(昭56)
- [5] 消防科学総合センター: “改訂 消防用設備のしくみとはたらき(消火設備編)”, (財)消防科学総合センター、(2000)
- [6] 自治省消防庁予防課長通知: 消防予第193号、消防危第117号、「二酸化炭素消火設備の安全対策について(通知)」(平成8年9月20日)、(1996)
- [7] 吉岡、浜野「有害危険物質の屋内拡散予測の解析例一Advance/EVE SAYFA 2.0による化学・生物テロのシミュレーション一」アドバンスシミュレーション vol.6
- [8] 秋村、三橋、浜野、吉岡「換気系を考慮した急激火災解析一EVE SAYFAの換気系モデルの機能強化一」アドバンスシミュレーション vol.6