

講演6 ; 「エネルギー分野のシミュレーション活用について」

三橋 利玄* 秋村 友香* 大須賀 直子**

Lecture on “Utilization of Numerical Simulation in the Problems Related to Energy Engineering”

Toshiharu Mistubishi*, Yuka Akimura* and Naoko Ohsuka**

エネルギー分野における数値シミュレーションの実際の活用例として、2018年11月20日にアドバンスソフト株式会社の主催で実施した技術セミナー “エネルギーで世界を牽引する日本-エネルギーの安定供給に向けたシミュレーションの活用” における講演「エネルギー分野のシミュレーション活用について」の内容について紹介する。

Keywords: 講演, エネルギー分野, 数値シミュレーション, 国土ガスハイウェイ構想, 自動車からの排気ガス環境放出, 原子力発電施設火災

1. はじめに

アドバンスソフトの三橋でございます。私からはエネルギー分野のシミュレーション活用ということで発表いたします[1]。この内容については私とともに名前が記載されている、秋村、大須賀、および社長の松原の4人で実際に行ったシミュレーションについてご報告いたします。これまでの講演でエネルギーについてはいろいろなテーマは比較的大局的な話でありましたが、私の方からはいくつかの個別テーマを基にエネルギー分野でのシミュレーションの活用についてご紹介したいと思います。

先程までいろいろとございましたエネルギーの諸テーマで電力エネルギーや再生可能エネルギーに関するものとは別に、実際に起こりそうな事故への対策や環境問題などのテーマがあります。それに関して流体力学や諸分野の理学・工学、さらにはコンピューターサイエンスを使いまし

*アドバンスソフト株式会社 熱流動エンジニアリングセンター

Thermal Hydraulics Engineering Centre,
AdvanceSoft Corporation

**アドバンスソフト株式会社 第4事業部
Computational Science and Engineering
Division IV, AdvanceSoft Corporation

て大規模、複雑化した諸問題に対して高度な数値シミュレーションが可能になっております。

エネルギー分野における当社の豊富な実績の中から実際の活用例をご紹介しますと思います。

2. 国土ガスハイウェイ構想における流送シミュレーション

1つ目は国土ガスハイウェイの流送シミュレーションと題した活用例ですが、これは最初にご講演いただいた株式会社 国土ガスハイウェイ様からご提供いただいたものになります。国土ガスハイウェイ構想につきましては、先程ご紹介をいただきましたので割愛して国土幹線ネットワークで求められることについてシミュレーションを行った事例をご紹介します。国土幹線ネットワークで求められることとして熱量調整や流送計測などが挙げられておりますが、これらはガス流送システムの開発案件や需要ケースに応じたフィジビリティの評価の必要性があり、その中でシミュレーションが必要であろうということで当社の管路系圧縮性流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ [2]を用いて流送シミュレーションを実施いたしました。

解析を行うにあたってソフトウェアに要求さ

れる機能として、①圧縮性を考慮できること、②定常圧損計算ではなく、過渡計算ができること、③大規模導管網の計算を現実的な時間でできること、④熱量の計算ができること、⑤熱量課金およびラインパック課金計算ができることの5つがごございます[3]。スライド7に Advance/FrontNet/Γ の概要が記載されておりますが、その中の圧縮性を考慮した基礎方程式と数値計算法と時間積分スキームなどこれらの機能でこのシミュレーションが可能であると判断し、必要な機能を追加して今回の流送シミュレーションを行いました。基礎方程式がもともと圧縮性を考慮しているものを使っておりますので、要求機能の①ができるということになります。次に要求機能の②と③ですが、特に③に関して陽解法他、陰解法を導入いたしまして従来の50倍超の高速化が達成されております。スライド8に数値解法を並べておりますが、従来から陽解法がありますが、さらに5つの陰解法を組みまして、それぞれに必要な現象に対して使えるようになっております。

実際にどの程度高速化ができたかについては、スライド9の表に記載されており、規模が全長110kmの管路網、ボリューム総数1,000、ジャンクション総数1,000、総格子数12,000の計算モデルを用いて、40,000秒の解析を実施したときの全タイムステップ数、高速化倍率、それぞれの平均反復回数を記載しております。陽解法ですと約1,000時間かかりおおよそ1カ月も要しますが、半陰解法ですと大幅に短縮します。それでも33時間以上、1日半ほどで計算が完了しますが、準陰解法であれば2時間から5時間なので、これくらいであれば実際に使うのに使い勝手がいいといえるくらいの計算ができるようになっております。陽解法と比較すると最大で500倍くらい的高速化が図られております。

要求機能④の熱量計算ができることに関してはパッシブスカラー方程式を新たに組み込みましたので、熱量計算ができるようになっております。要求機能⑤に関してもラインパック貯蔵時間(ラインパック滞留時間)はパッシブスカラーを利用して貯蔵時間を計算できるようにいた

しました。

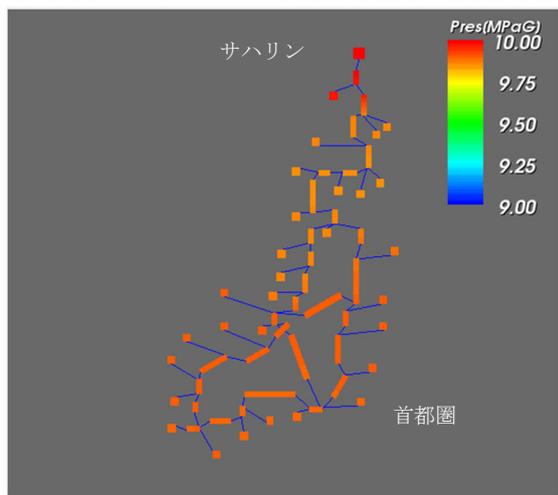
計算範囲は先程、朝倉様にご講演にもごさいました国土ガスハイウェイの構想における北海道、東北、関東から北陸・近畿圏に及ぶ日本列島の東側を計算行い、国土幹線ネットワークの対象領域といたしましてはサハリンを供給源としたときの流送シミュレーションを実施いたしました。実施したケースは3ケースあり想定供給量/消費ケース、想定倍量ケース、途中にあるバルブが事故等で遮断した場合のバルブ遮断ケースの3つについてご紹介いたします。国土幹線ネットワークのモデルはスライド13に記載されており、北海道最北端の北に位置するサハリンが大元のLNG基地であります。日本国内にもLNG基地が12カ所あり、それら基地からの供給(流入)を想定しています。解析手法といたしましては、再現時間100日間の定常計算に対して、準陰解法(弱圧縮性)を適用しました。管路系については総延長4,000kmについて10kmの格子で格子分割を行って計算しました。サハリンについては圧力固定とし、日本国内の消費量と12カ所のLNG基地からの供給量に見合う流量が計算されるようになっております。

まずは日本国内の消費量の想定値ケースと想定値を倍にしたケースをご紹介します。BCM/Y(Billion Cubic Meters by Year)の値を使い消費量、供給量を首都圏2、近畿圏1、中京圏1という単位で想定し、想定値が倍のケースは将来的な都市ガス活性化を見込んで、これら3つの消費量を3倍でその他は供給、消費共に2倍といたしました。スライド16の定常状態後の圧力分布図ですが、1番上にサハリンがございまして、日本国内の基地から供給も合わせて分布した結果です(図1)。想定値のケースは10MPaから遠い所でも9MPa程度にしか圧力降下はありませんでしたが、想定値倍のケースだと遠い所で6MPa程度まで圧力降下が起きました。スライド17は滞留時間分布の図であり、想定値のケースだと長い配管では滞留時間が比較的に長くなりますが想定値の倍のケースだと配管内の流速が速くなるのと消費が想定値に比べて多いため滞留時間

は短くなりました。スライド 18 はサハリン送出ガスの分布でサハリンから送出したガスがどこまで届いているのかというのをみた図になります(図 2)。想定値のケースであると北海道内では

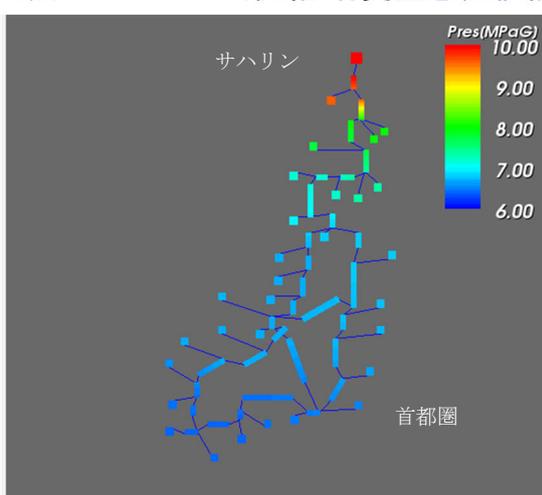
とんどが消費されますが、想定値の倍のケースだと若干ではありますが首都圏にまで届いているようになります。

天然ガスケース (供給/消費量想定値)



9 MPa程度までの圧力降下

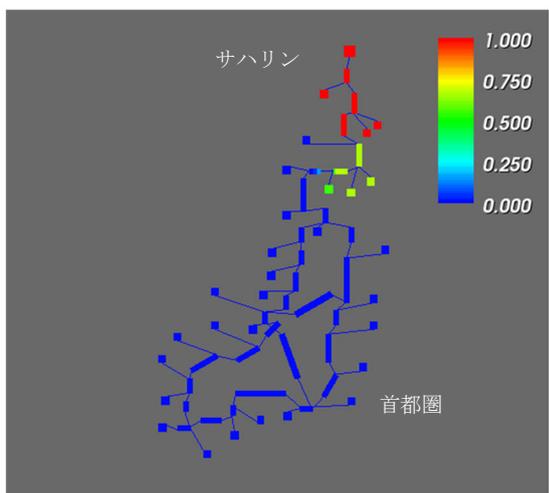
天然ガスケース (供給/消費量**想定値倍**)



6MPa程度までの圧力降下

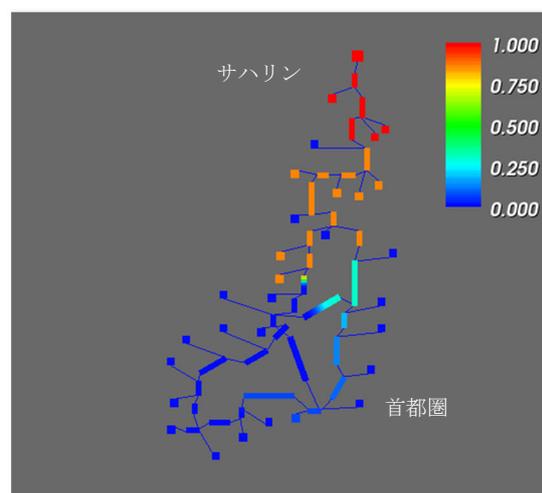
図 1 定常状態後の圧力分布[1]

天然ガスケース (供給/消費量想定値)



北海道内でほぼ消費

天然ガスケース (供給/消費量**想定値倍**)



首都圏まで到達

図 2 定常状態後のサハリン送出ガス分布[1]

3 ケース目は想定値倍のケースにおいて、青森付近で事故によりバルブが遮断し、30日間復旧しないことを想定した計算です。計算で得られた圧力分布からはバルブの遮断の有無で大きく影響はありません(図 3)。流量分布ではバルブ近々のパイプの流量に多小の変化はありましたが、サハリンから供給されなくなった分は他のルートか

ら迂回して各地がまかなうという結果となっています(図 4)。

以上、国土幹線ネットワークを想定したガス流送シミュレーションモデルの構築ができたことを確認でき、それによりガス流速システムの開発要件や需要に応じたケーススタディが可能になり様々な効果を発揮できるものと考えております。

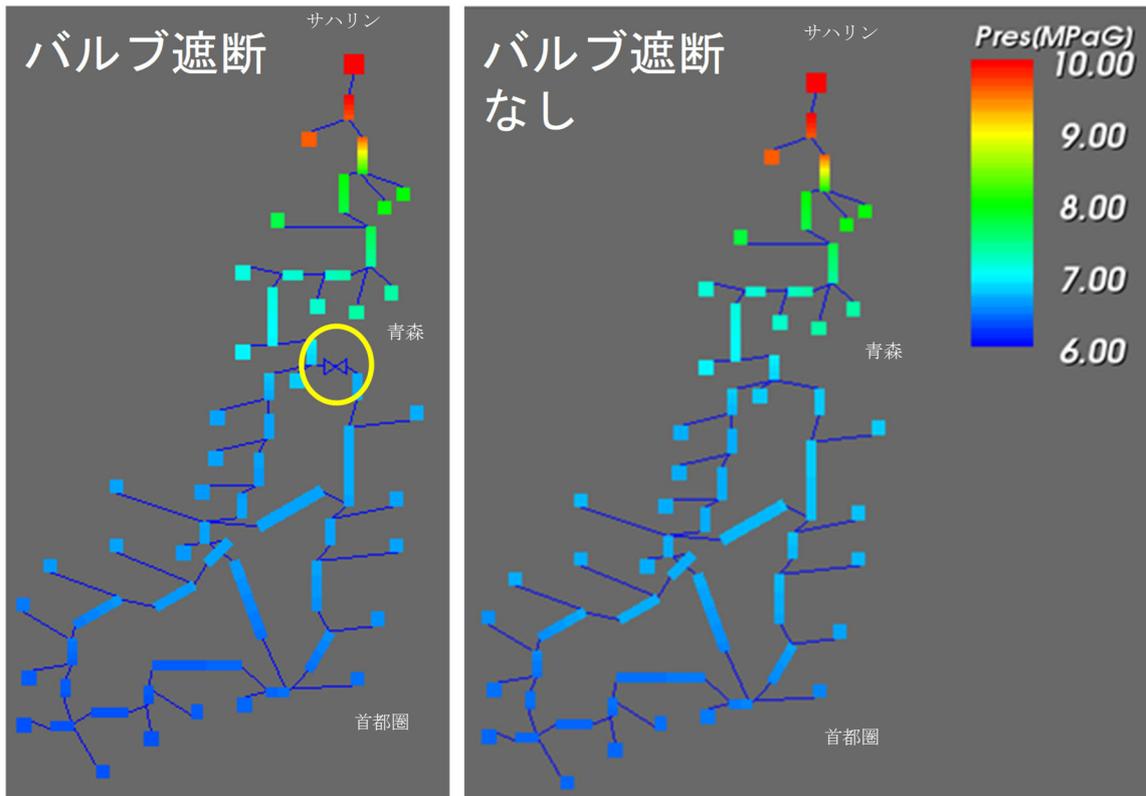


図 3 バルブ遮断有無による圧力分布比較[1]

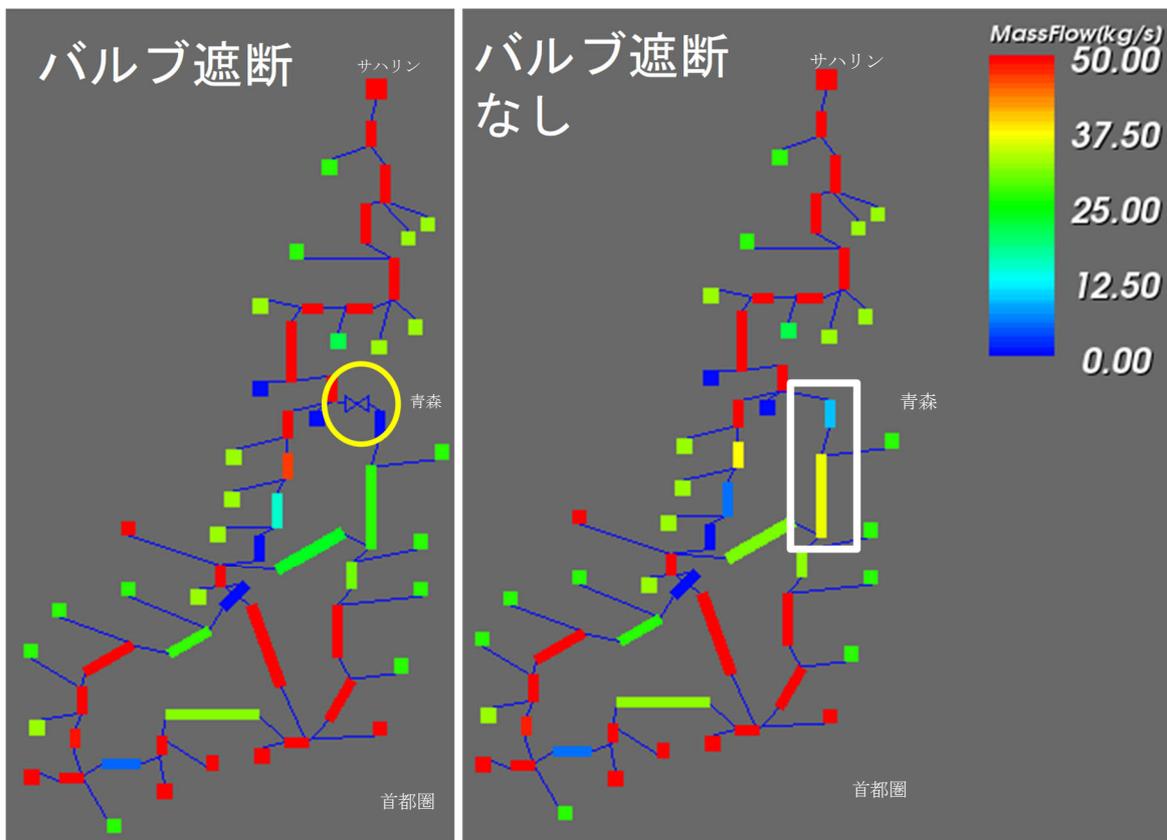


図 4 バルブ遮断有無による流量分布比較[1]

3. 自動車からの排気ガス環境放出シミュレーション

次に Advance/FrontNet/Γ に組み込んだ FAVOR 法[4][5][6]によるポーラス移動物体モデルを用いたトンネル内車両移動に伴う排気ガス環境放出シミュレーションについてご紹介いたします。

まず、ポーラス移動物体モデルの検証目的として高速列車（リニア新幹線）がトンネルを突入退出する際の圧力変動の計算を行い、実測値と比較検討を行いました。計算のモデルと計算条件はスライド 25 に記載しておりますが、これは参考文献 [7] を基に作成したものです。実測値と Advance/FrontNet/Γ による計算結果を比較してみると、最初に突入波があり列車が通過してさらに反射波と退出するときの圧力波が発生するという流れを計算結果は表現できたと思っております（図 5）。スライド 28 は圧力の分布の変化を示したもので、リニア新幹線がトンネルに突入した 10.3 秒では突入波が発生して次にこの突入波

が出口に向かって移動していき、出口までいくとそれが反射するというのを繰り返して最後に退出波が発生しております。（図 6）

新幹線ですと「トンネルドン」と呼ばれているような微気圧差で振動や突発的な音が問題になっていますが、今回の結果を当社独自で開発いたしました Advance/FrontNoise[8] を使って音響解析を試みた結果、300Hz 前後に 60dB 余りのピークがみられますが、60dB は普通の会話程度の比較的静かな音に当たるので車両速度を出口付近にかけて減速していることと緩衝工を設けていることなどにより音圧が抑えられていることが考えられます。

トンネルへの高速列車突入退出シミュレーションを行いまして、圧力については抵抗係数の調整などは行いましたがよく再現できたと思っております。今後は、高速列車の設計や環境騒音対策、防災検討などを本ソフトウェアでの解析が活用できるように開発を進めて参ります。

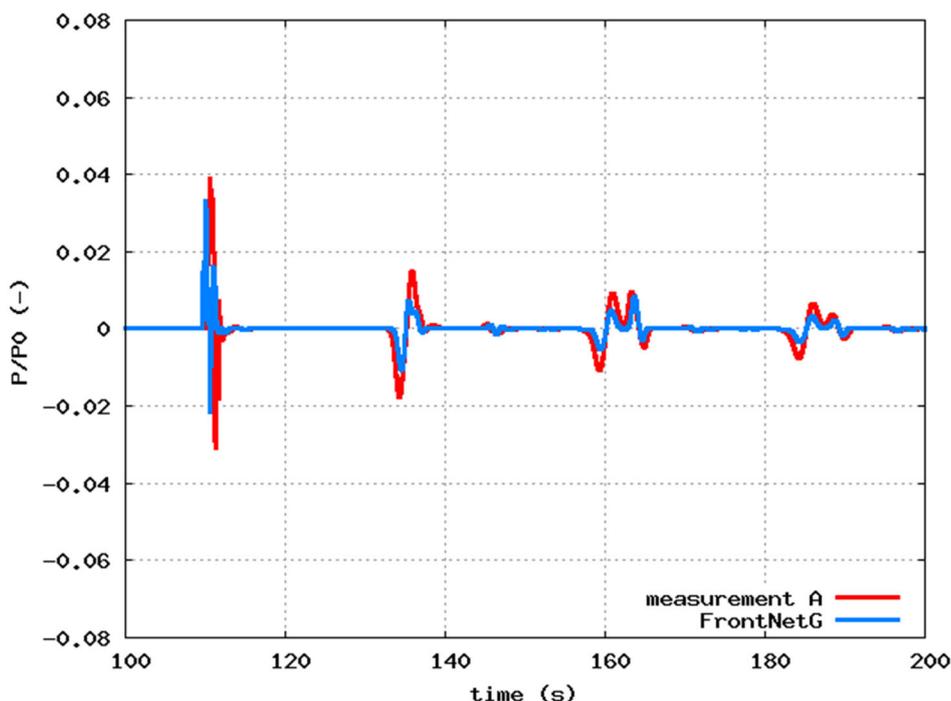


図 5 列車移動に伴う入口付近圧力変化[1]

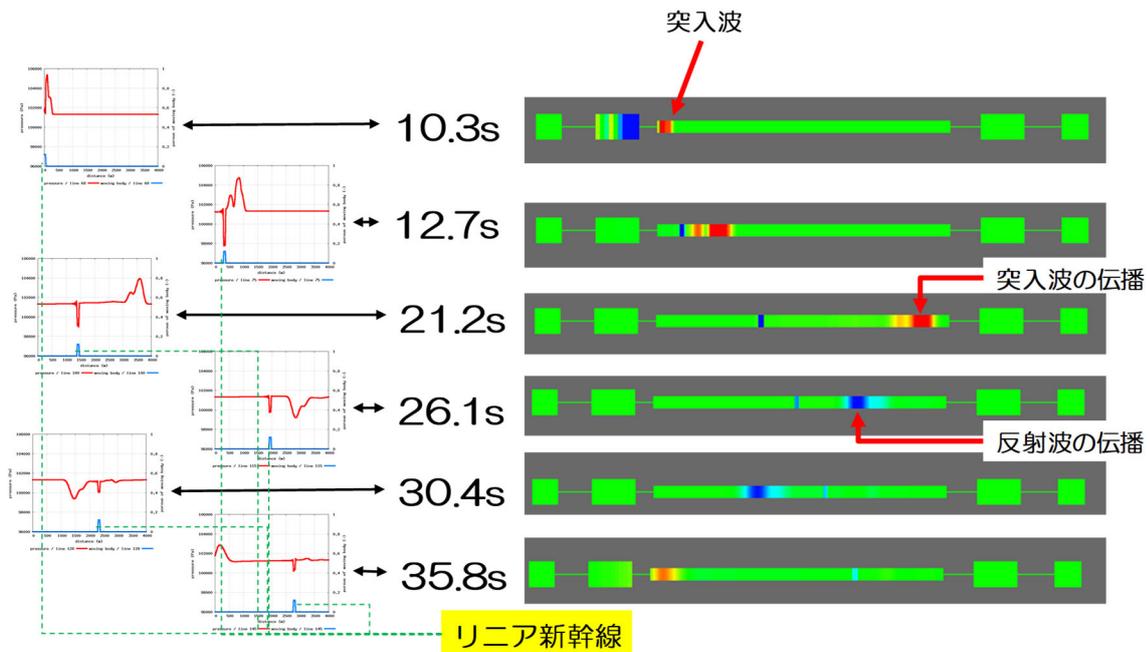


図 6 列車移動に伴う圧力分布変化[1]

次に自動車からの排気ガス環境放出シミュレーションということで、こちらはエネルギーに関連して環境問題ということで取り組んだものになります。トンネル内でトラックが移動したときに排出する一酸化炭素の濃度がどのように変化していくのか、換気塔でどの程度取り込まれていくのかを計算により確認いたしました。今回は2kmのトンネルの真ん中に排気塔があるケースと右寄り、左寄りの3ケースを比較いたしました、トンネル内の一酸化炭素を完全換気できる時間を評価しました。

計算条件になりますが、トラック10台がトンネル内を通過してから通過した後に完全換気される時間を評価し、自動車から放出される排気ガスについては一酸化炭素として $1 \text{ m}^3/\text{h}$ を想定しました。この数値は国土交通省が出している資料[8]から採出したものになりますが、現在の車の性能からみるとかなり厳しめではと思います。トラックは時速 60 km/h の一定でトンネル内を通過するようにしていき、資料[9]を基に換気量についてはノルマル流量 $420 \text{ m}^3 \text{ N/s}$ に設定し、トンネルの寸法や摩擦係数についてもこの資料[9]を参考にしております。スライド34の計算結果ですが、縦棒がトラックであり、トラックの後ろから排気ガスが排出されるため後ろにいくほど濃度が濃

くなってトラックが過ぎても排気ガスはまだ残っていることも分かります。換気塔が中央にあるケースの計算結果では排気が中央の排気塔で行われるため一酸化炭素濃度に関してはトンネル中央が最大になり時間としては約15分でトンネル内の換気が完了しています(図7)。

3ケースの完全換気までの時間を比べると排気塔が中央にあるケースが約900秒、右寄りのケース約922秒、左寄りのケースが約1025秒となり左寄りのケースが完全換気までに最も時間を要しました(図8)。

本シミュレーションではAdvance/FrontNet/ Γ にポーラス移動物体を組み込み、さらに排気ガス濃度変化に対してパッシブスカラーモデルを使用して車の移動と排気塔ブロウ換気に伴う排気ガス濃度変化のシミュレーションを実施しました。このような計算は3次元モデルで行うと時間が大いにかかってしましますが、今回は1次元で行ったために1時間程度で完了いたしましたので使い勝手はかなりよいと思います。今後に関して、実際にはトンネル内は車が対向して走行しておりますが今のところはまだ1方向しかできていませんので、複数路線を扱うモデルを考慮しようと考えております。

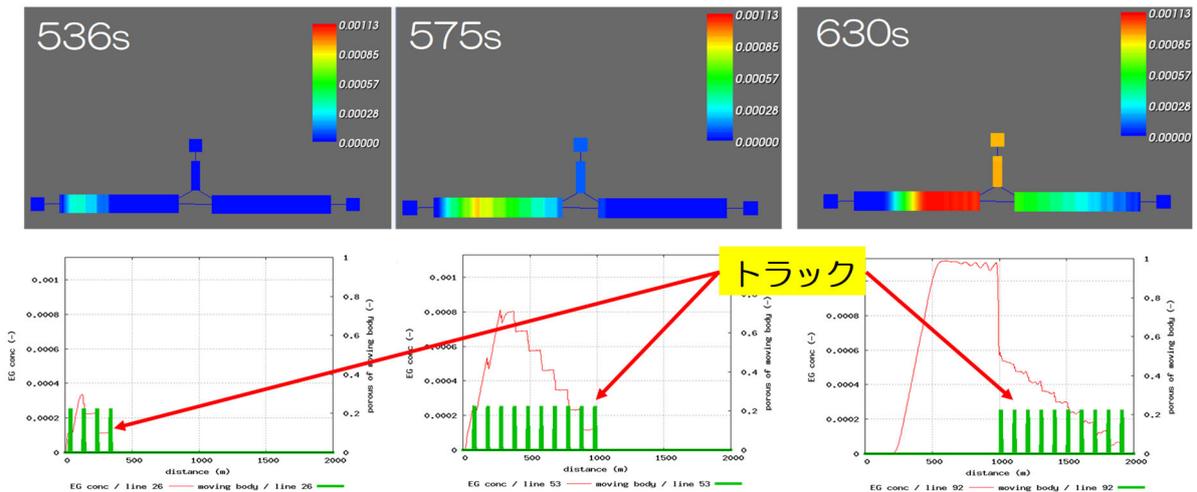


図 7 排気ガス濃度変化比較[1]

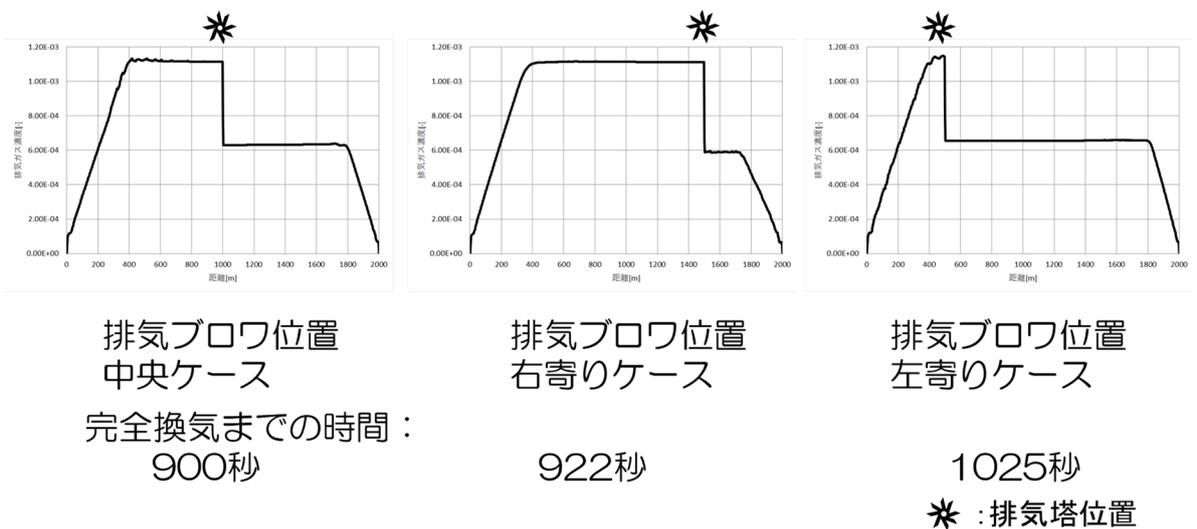


図 8 排気ガス最高濃度分布比較[1]

4. 原子力発電施設の火災試験シミュレーション

最後に原子力発電施設の火災試験シミュレーションについてご紹介いたします。こちらの原子力発電施設は換気系で結ばれた多数の部屋で構成されており、ある部屋で火災が発生したときに酸素割合の低下や壁・ケーブル・配電盤などへの火災延焼が重大事故につながる可能性もございますので火災伝播解析コードを用いて検証解析を行いました。検証解析はフランスで行っている OECD/NEA の PRISME プロジェクト[11]の火災試験を対象にしております。

火災伝播解析コードは3つのコードから構成され、3次元火災解析については FDS[12]、二層ゾーン火災モデルによる 1次元火災解析コードは

EVE SAYFA[13]を、さらには換気系の 1次元流体解析コードに関しましては Advance/FrontNet /Γを用いて、これらを一体として計算できるコードシステムを開発いたしましたので、このコードシステムを用いた試験解析結果をご報告いたします。

スライド 40 は火災試験検証解析モデルの全体図になりますが、火災部屋 (Fire Room) での 3次元火災解析には FDS を、隣の部屋は EVE SAYFA を使用し、換気系については Advance/FrontNet/Γを使用しました。3次元火災解析については約 60,000 格子でモデル化いたしました (図 9)。

スライド 41 のグラフは検証解析によって得られた計算結果と実測値を比較したものの (図 10) に

なりまして、左の図は Advance/FrontNet/Γによって計算された火災室の給排気量変化を表しております。赤色の線が給気量変化、青色の線が排気量変化を示しております。実測値はかなり振動した結果になっておりますが、逆流等の現象が比較的よく捉えられており、振動している範囲は真ん中を通っているのによく一致したものと

と思います。右の図の火災室ガス温度変化についても比較的よく捉えていると思っております。スライド 42 の図は左が火災室酸素濃度変化で、右が火災室二酸化炭素濃度変化ですが、こちら 2 つとも同様に実測値をよく捉えられていると思っております。

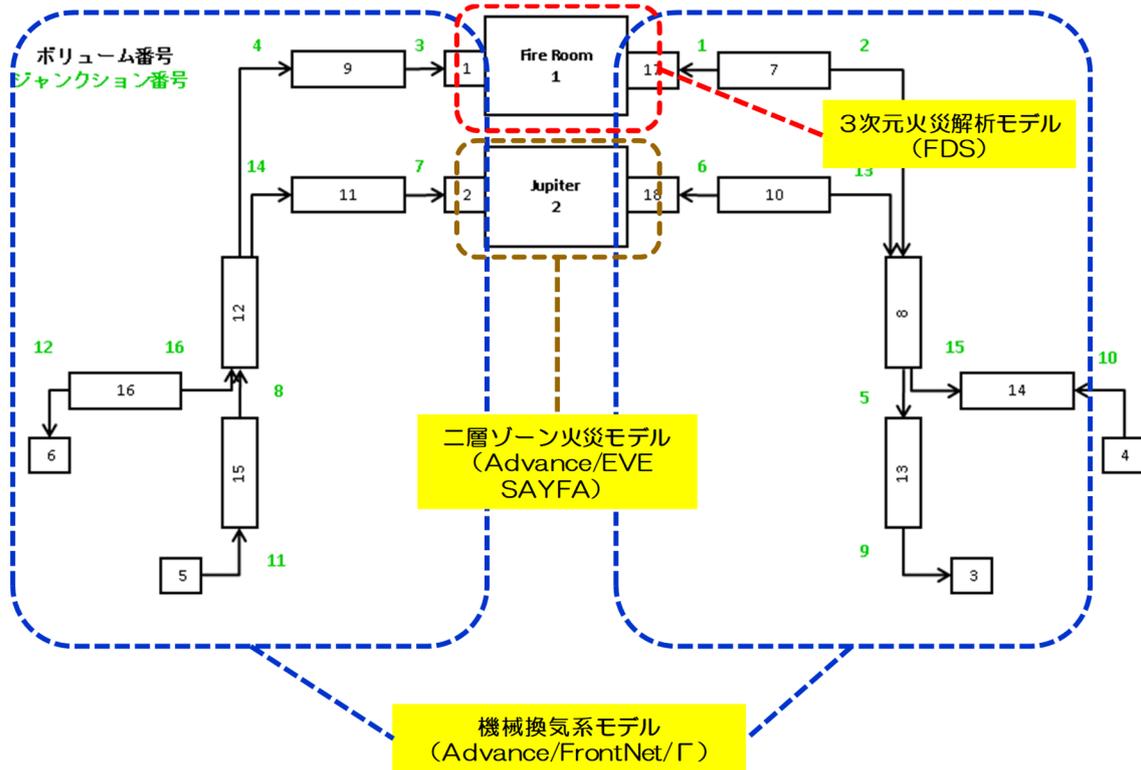


図 9 シングルルーム火災試験解析モデル[1]

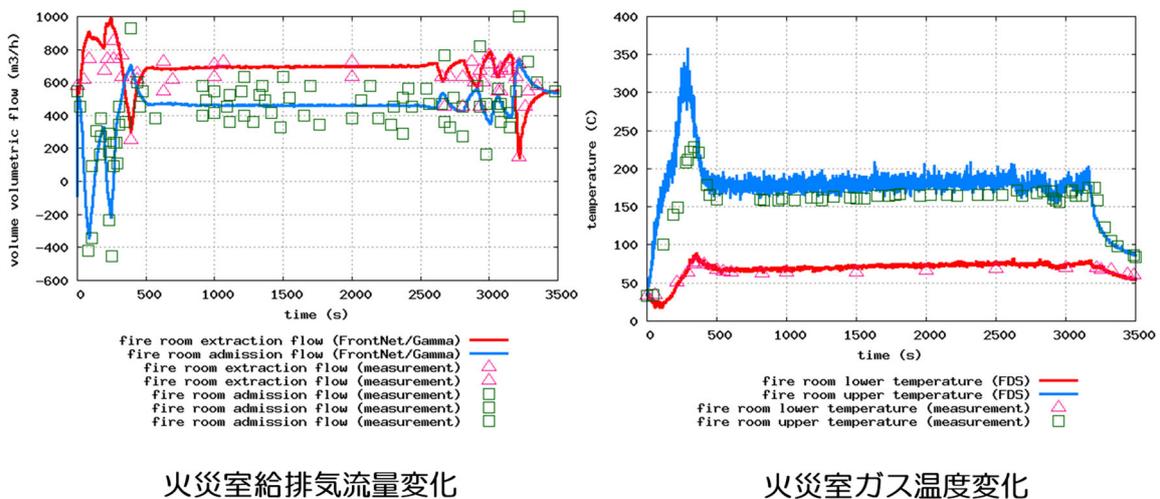


図 10 シングルルーム火災試験解析結果[1]

スライド 43 の図は火災室の 3 次元温度変化を時間に沿って表したのですが、FDS に付属して

あります Smokeview によって可視化したものになります。火災が起きて上部に燃え広がり、段々

と抑えられて最後には火災が収まるという変化を示したものでございます。スライド 44 の図は火災室の 3 次元すす濃度分布変化の図になりますがこちらも **Smokeniew** で可視化いたしまして、温度変化同様に火災によって発生したすすが貯まって全体に広がりほとんど真っ黒な状態になっております。

2 ケース目のマルチルーム火災試験解析では、火災室に隣接している部屋とともに 3 次元モデル化しており、その他については先程の 1 ケース目と全く同じ条件です。3 次元の格子数は約 250,000 でございます(図 11)。スライド 46 は火災室と火災室の隣の部屋の温度変化を実測値と比較した図になりまして、赤色の記号で示されているのが実測値、各種の色で示しているのが検証解析結果を示しており、多少の差異はございますが、

よく捉えられているのが分かります(図 12)。スライド 47 は二酸化炭素の濃度変化を比較した図になります。若干高めに評価されておりますが、全体の傾向は捉えていると思っております。以上が火災試験検証解析でございまして、3 つの解析コードを統合化した火災伝播解析コードを使って解析いたしました。計算結果は試験結果をよく表しており、火災伝播解析コードの有効性を示すことができたと思っております。今後は構成するコードの最新版への移行と 1 次元火災解析コードと 3 次元火災コードを今回はとりあえずつなげた形なので連成機能の強化と避難シミュレーションとの統合強化を図って、より高度で実用性の高い解析コードに仕上げていきたいと思っております。

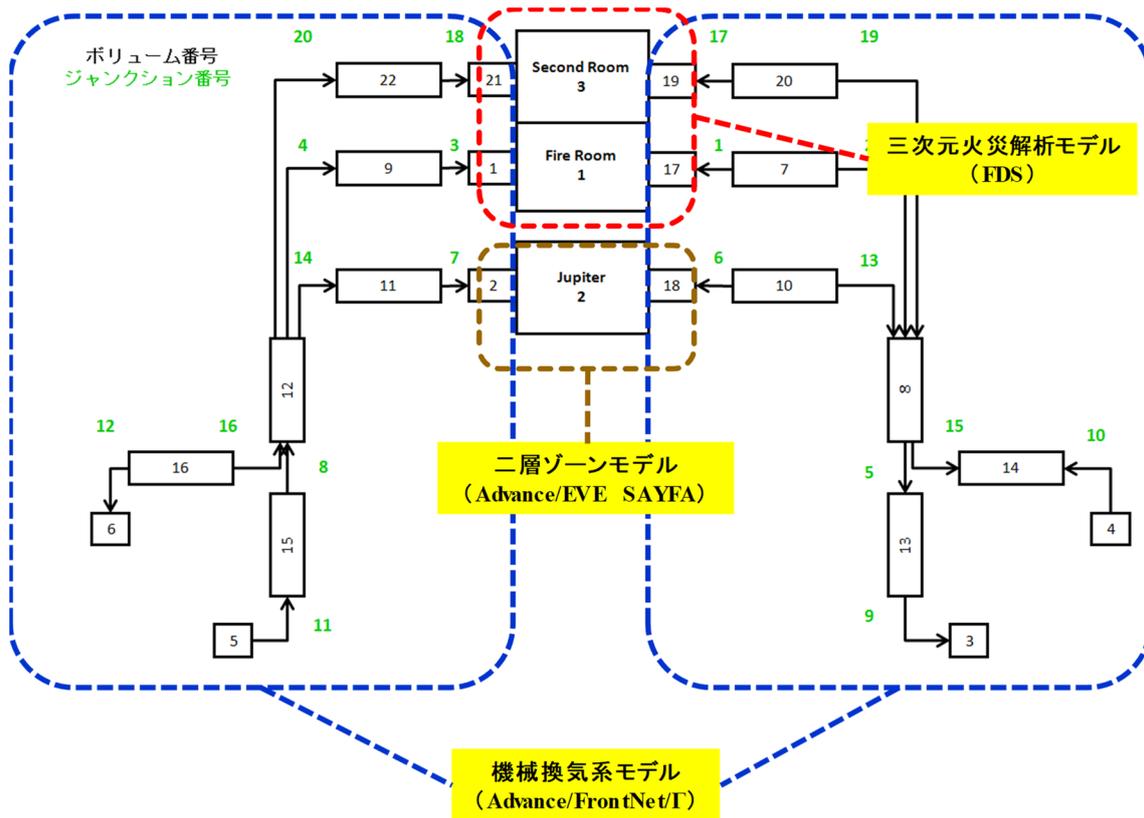
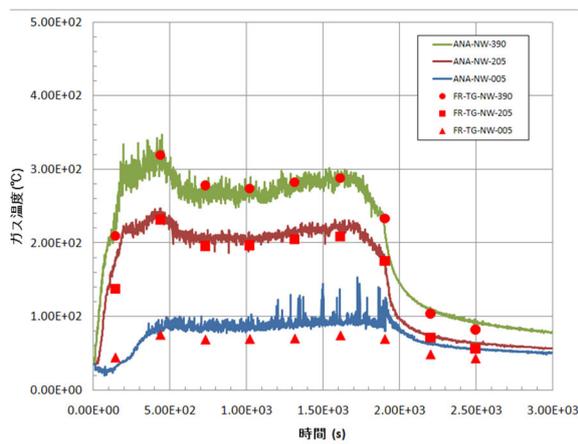
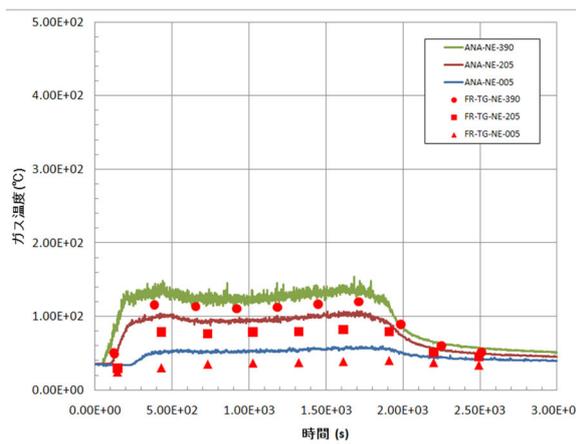


図 11 マルチルーム火災試験解析モデル[1]



Fire Roomガス温度変化



Second Roomガス温度変化

図 12 マルチルーム火災試験解析結果[1]

5. おわりに

最後に、エネルギー分野のシミュレーションの活用例をいくつか紹介いたしましたが、当社は今後も解析ソフトウェアの実用性を高める利便性を追求する等でエネルギー分野に対する数値シミュレーションの発展に貢献したいと思っております。以上です。ありがとうございました。

参考文献

[1] http://www.advancesoft.jp/support/download/28simlib_seminar_20181120_all.html

[2] http://www.advancesoft.jp/product/advance_frontnet/advance_frontnet_02_00.html

[3] 三橋利玄, 秋村友香, 大須賀直子, “管路系流体解析の新しい取り組み”, アドバンスシミュレーション vol.26 (2018).

[4] W. Hirt et al, "A Porosity Technique for the Definition of Obstacle in Rectangular Cell Meshes" 4th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, 1985. Washington DC.

[5] 森川泰成, "移動境界問題に関する気流の数値シミュレーション技術-FAVOR 法の適用例", 大成建設技術研究所報(1990).

[6] 米山望他, "FAVOR 法を用いた陸上遡上津波に伴う漂流物挙動の数値解析", 水工学論文集, 52 (2008).

[7] 山崎他, “超高速鉄道トンネル内に生じる圧力

変動評価”, 土木学会論文集 No. 788/I-64, 171-189 (2003).

[8] http://www.advancesoft.jp/product/advance_front_noise/

[9] 国土交通省, “必要な換気量の算定について”, <http://www.mlit.go.jp/common/001125908.pdf>

[10] 日本機械学会, “管路・ダクトの流体抵抗”, 丸善 (1979).

[11] <https://www.oecd-neo.org/jointproj/prisme.html>

[12] Fire Dynamics Simulator and Smokeview, <http://www.fire.nist.gov/fds/>

[13] http://www.advancesoft.jp/product/advance_evesayfa/

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。また、本講演に用いたスライド原稿 (カラー版) [1]は、ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルとしてダウンロードできます。掲載図はこちらの方が大きく分かりやすくなっております。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)

http://www.advancesoft.jp/support/download/28simlib_seminar_20181120_all.html