

パッシブスカラー計算の実用性検討

秋村 友香* 大須賀 直子*

Practical Study of Passive-Scalar Calculation in Pipeline Fluid Analysis

Yuka Akimura* and Naoko Ohsuka*

管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ にはパッシブスカラーの基本機能が導入されており、個別モデルの充実が期待されている。本稿では、幅広い分野で使用されているパッシブスカラーの実用例を調査し、応用モデル式をまとめた。また、本誌掲載のレポート「ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体過渡解析（第2報）」で紹介した、高中圧都市ガス導管網で訓練シミュレータとして使用されている、基地由来解析および熱量簡易解析へのパッシブスカラーの適用方法を紹介する。計算事例として、再処理施設におけるプルトニウム燃料の爆発を想定したエアロゾル輸送と HEPA フィルターによるエアロゾル吸着およびフィルター目詰まりによる圧力損失上昇の計算例を紹介する。

Key word: 管路系、パッシブスカラー、エアロゾル、HEPA フィルター、再処理施設

1. はじめに

パッシブスカラーとは、流体の流れ場によって受動的に流されるだけでその存在が流れ場に影響を与えないスカラー場のことである。具体的には、水に落としたインクや、空気中に浮遊する煙、配管や内燃焼機関内の流体に溶けたイオンや混合物の移流と拡散は、パッシブスカラーとしてのシミュレーションが可能な例である。

パッシブスカラーは、流体方程式（質量保存式と運動量保存式、エネルギー保存式から成る）を解いた後で、パッシブスカラーの質量保存式のみを解けば良いため、計算が簡略化され、計算時間も短縮される。

アドバンスソフト株式会社が開発・販売を進めている管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ にはパッシブスカラーの基本機能が既に導入されている。著者らは、1次元管路系におけるパッシブスカラー機能の応用方法を模索しており、本稿の執筆の機会に幅広い分野で使用されているパッシブスカラーの実用例を調査し、モデル式をまとめた。

*アドバンスソフト株式会社 第3事業部

3rd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

本書の構成は以下となる。2章にパッシブスカラーの基礎式と考え方をまとめる。3章にパッシブスカラー計算の応用例として、本誌掲載のレポート「ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体過渡解析（第2報）」で紹介した都市ガス高中導管網の運転員訓練シミュレータ(OTS)における基地由来解析と熱量簡易解析におけるパッシブスカラーの計算方法を紹介する。また、その他の応用例として、ガス中の微量蒸気の解析、粒子の沈着、フィルターモデルの具体的なモデルと式を紹介する。4章では、再処理施設におけるプルトニウム燃料の爆発を想定したエアロゾル輸送をパッシブスカラー機能で計算した事例を紹介する。5章にまとめを記す。

2. パッシブスカラーの基礎式

パッシブスカラーの基礎式は、次の質量保存式1本である。

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u) \phi_k}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \rho (D_{iN}^{mol} + D_{iN}^{flow}) \frac{\partial \phi_k}{\partial x} = S_k \quad (1)$$

ρ は流体の密度[kg/m³]、 ϕ_k はパッシブスカラー

一[—]、 u は流体の流速[m/s]、 k はパッシブスカラーの成分の数を表している。左辺第1項は時間項でパッシブスカラーの時間変化を表わしており、第2項は移流項でパッシブスカラーの移流を表わしている。左辺第3項は拡散項である。ランダムな分子運動（Brown運動）による拡散の寄与の影響は分子拡散係数 D^{mol} で表され、流れ場による拡散の寄与の影響は流れ場の拡散係数 D^{flow} で表される。右辺は、ソース項であり、パッシブスカラー場の生成や消滅がある場合に考慮される。実用的には、蒸発や凝縮などによる物質の生成消滅や、ススやエアロゾルが重力沈降や拡散泳動で消失したり、再浮遊で増加したりする際のモデル化に利用することができる。

パッシブスカラーと聞くと具体的な物理量がイメージできないため分かりにくいですが、次の多成分ガスの質量保存式と比較すると分かりやすい。

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u}{\partial x} = \Gamma_i \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度[kg/m³]、 Y_i は質量分率[—]、 u は流体の流速[m/s]、 Γ_i はソース項でガスの漏洩や湧き出しがあるときに設定される。成分 i はガスを構成する各成分を表す。

パッシブスカラーと多成分ガスの方程式を比較すると、パッシブスカラーは質量ベースの組成割合を表していることが分かる。パッシブスカラーとして体積ベースの量を扱いたい場合は、質量と体積を変換するために「分子量」のような量を定義する必要がある。

3. パッシブスカラーの応用

3.1. 都市ガス導管網基地由来解析

基地由来解析を行う場合、パッシブスカラー成分は基地の数だけ用意し、各基地に境界条件1を設定する。導管網に流れている都市ガスがどの基地から送出されたかが、各基地のパッシブスカラー成分の値を見ることにより直ちに判別する。

図1は本誌掲載のレポート「ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体過渡解析(第2報)」でも紹介した高中圧都市ガス導管網の基地由来

解析の例である。ここで、基地はA, Bの2カ所であるため、パッシブスカラーは基地Aと基地Bの2成分であり、その和は1に規格化しておく。

$$\phi_A + \phi_B = 1 \quad (3)$$

図1では、右半分が基地A由来のガスが流れている導管網であり、この導管網内で $\phi_A = 1$ である。左下の領域は基地B由来のガスが流れておりこの導管網内で $\phi_B = 1$ である。基地Aと基地Bのガスが混合している左上の箇所は、例えばガスの質量割合が半分ずつの場合は $\phi_A = 0.5$ 、 $\phi_B = 0.5$ である。

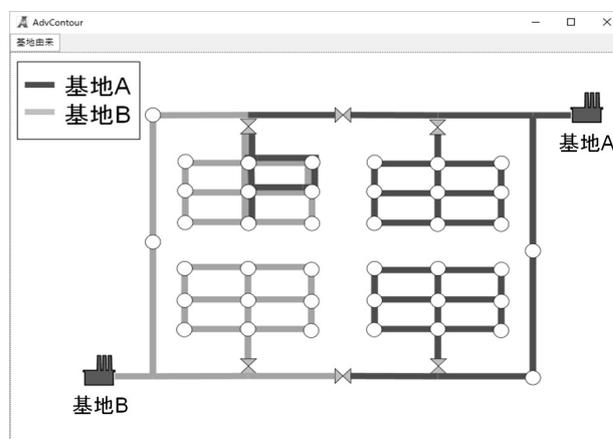


図1 基地由来解析の例

3.2. 都市ガス導管網熱量解析

都市ガスの熱量解析を行う場合、計算を精密に行うのであれば、多成分ガスモデルを用い、都市ガス成分メタン、エタン、プロパン、・・・などの組成を考慮して計算を行う。参考に、都市ガス13Aの組成とモル分率を表1にまとめる。

表1 都市ガス13Aの組成の例[2][3]

| 組成 | モル分率 [—] | 総発熱量 [MJ/Nm ³] |
|------|-------------|-------------------------------|
| メタン | 0.896 | 39.85 |
| エタン | 0.0562 | 70.41 |
| プロパン | 0.0343 | 101.8 |
| ブタン | 0.0035 | 134.0 |

都市ガスの熱量は以下の式により計算することができる[4]。

$$\bar{Q} = \frac{1}{\bar{Z}} \sum_{i=1}^N X_i Q_i \quad (4)$$

$$\bar{Z} = 1 - \left(\sum_{i=1}^N X_i \sqrt{1 - Z_i} \right)^2 \quad (5)$$

ここで、 \bar{Q} は平均熱量、 Q_i は各成分の熱量、 X_i はモル分率、 Z_i は各成分の圧縮係数、 \bar{Z} は平均圧縮係数である。

詳細な熱量解析が不要で、熱量の大まかな変化を知りたい場合、以下のようなパッシブスカラーの応用により、熱量の簡易計算が可能である。

図 2 は本誌掲載のレポート「ダイナミックプロセスシミュレータと管路系流体過渡解析(第2報)」でも紹介した高中圧都市ガス導管網の熱量解析の例である。

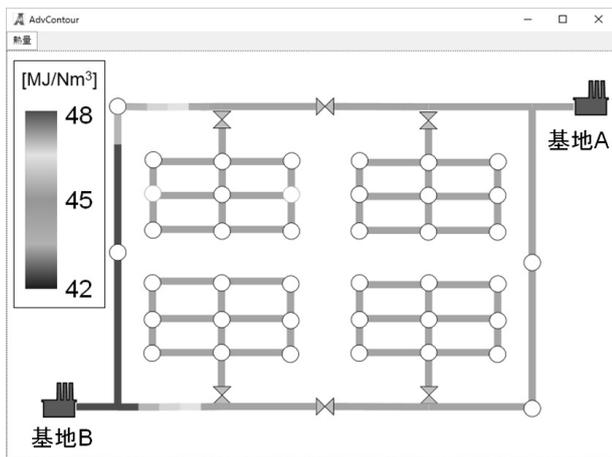


図 2 熱量計算の例

ここで、基地は A, B の 2 カ所であるため、体積ベースのパッシブスカラー ϕ_k は基地 A 熱量と基地 B 熱量の 2 成分であり、パッシブスカラーの重みを w_k として熱量平均値を次のように定義しておく。

$$\Phi = \sum_{k=1}^n w_k \phi_k \quad (6)$$

基地 A の送出ガス熱量が $45 \text{ MJ/m}^3 \text{ N}$ 、基地 B の送出ガス熱量が $48 \text{ MJ/m}^3 \text{ N}$ のとき、重みを $w_A=45$ 、 $w_B=48$ とする。このとき、熱量平均値 Φ はそれぞれの送出ガスの体積割合に応じ変化する。このような扱いにより、パッシブスカラーを使ってガスの熱量の分布を計算することができる。なお、

ガスの熱量は式(4)より体積に依存することから、質量保存式(1)で使用するためには質量分率相当に変換する必要がある。

$$\varphi_k = \frac{\bar{\rho}}{\rho_k} \phi_k \quad (7)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{\sum \phi_k / \rho_k} = \sum \varphi_k \rho_k \quad (8)$$

ここで、体積ベースのパッシブスカラーを φ_k 、質量ベースのパッシブスカラーを ϕ_k 、パッシブスカラーの密度を ρ_k 、パッシブスカラーの密度の平均値を $\bar{\rho}$ とした。

3.3. ガス中にある微量の蒸気

液面がありそこからガス中に微量の蒸気が蒸発し流される場合、液面からの蒸発と蒸気の流れおよび蒸気の凝縮を気液二相流計算で直接解くと、計算負荷が高く、また、蒸気の状態によっては計算が不安定になる場合がある。蒸気が微量でありガスの流れに影響を及ぼさない程度である場合、蒸気をパッシブスカラーで計算すると便利である。

この場合、蒸気の質量割合をパッシブスカラー ϕ とし、液面からの液の蒸発量をソース項 S と置くことにより、ガス中を流れる蒸気を解くことができる。液面からの液の蒸発量は、例えば以下のような式でモデル化できる[5][6]。

$$S_{evap} = \frac{f_{evap} A (P_{sat} - P)}{133.3V}, \text{ for } P_{sat} > P \quad (9)$$

$$f_{evap} = (0.0152u + 0.0178) / 3600$$

ここで、 S_{evap} は液の蒸発速度である。パッシブスカラー方程式(1)のソース項 S として S_{evap} を使用することにより、ガスの圧力に応じた蒸気の蒸発量およびガス内の蒸気の流れを解くことができる。

3.4. エアロゾル粒子の沈着

管内を流れる粒子が管壁へと沈着する現象は、重力沈降、熱泳動沈着、拡散沈着、慣性衝突などに分けられる[7] [8]。以下に、重力沈降と熱泳動沈着の式を紹介する。

(1) 粒子の重力沈降

管内を流体が流れ、粒子が流体の流れ場に乗っているとき、粒子に対する重力の影響が重要になる場合がある。重力の影響を考慮する場合、一般に Stokes の重力沈降速度式が用いられる。沈降速度は次のように表される[9]。

$$v_{grav} = \frac{gd_s^2}{18\mu}(\rho_s - \rho_{fluid}) \quad (10)$$

ここで、 d_s は粒子径、 μ は流体の粘性係数、 g は重力加速度であり、括弧内は左から固体粒子の密度と流体の密度である。

重力沈降モデルは、クリーンルーム内の粒子の解析[10][11]や、火災時の火の粉の飛散の解析[12]、また、放射線粒子群としてのエアロゾルの解析[13][14][15][7]などで使用されている。

(2) 粒子の熱泳動沈着

流体と壁面の間に温度勾配があると粒子は高温側から低温側に熱泳動する。熱泳動による沈着速度としては Jacobsen-Brock の式が一般的に用いられる[16]。

$$v_{therm} = Z_T \frac{dT}{dn} \quad (11)$$

ここで、 v_{therm} は熱泳動沈着速度[m/s]、 Z_T は Jacobsen-Brock の熱泳動係数、 dT/dn は壁面境界層における温度勾配[K/m]である。

(3) 粒子の沈着率

粒子の沈着率 K [1/s]は次の式で表される[17]。

$$K = \frac{A}{V}(v_{grav} + v_{therm} + v_{diff} + v_{coll}) \quad (12)$$

ここで、 A は沈着面の表面積[m²]、 V はコントロールボリュームの体積[m³]であり、括弧内は左から粒子の重力沈降速度、熱泳動沈着速度、拡散沈着速度、慣性衝突速度を表す。このとき、パッシブスカラー方程式(1)のソース項 S は次の形で表される。

$$S_k = -\rho_k \phi_k K \quad (13)$$

ここで、 ρ_k はパッシブスカラー k の密度[kg/m³]であり、粒子が流れ場からなくなる方向（消滅）をマイナスとしている。

3.5. フィルターモデル

HEPA フィルターは空気清浄機やクリーンルームのメインフィルタとして用いられ、JIS Z 8122 によって、「定格風量で粒径が 0.3 μm の粒子に対して 99.97%以上の粒子捕集率を持ち、かつ初期圧力損失が 245Pa 以下の性能を持つエアフィルタ」と規定されている[18]。ここでは文献[7]の HEPA フィルター計算モデルのうち、目詰まりモデルを紹介する。

HEPA フィルターは目詰まりにより圧力損失が増える。新品のフィルターの差圧を ΔP_0 とすると、負荷状況により HEPA フィルターの圧力損失 ΔP は次のように表される。

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = 1 + \alpha M + \beta M^2 \quad (14)$$

ここで、 α [m²/kg]、 β [m⁴/kg²]は目詰まり係数、 M [kg/m²]はフィルター濾材面積 1m² 上に堆積したエアロゾルの重量である。エアロゾル重量はエアロゾル濃度とフィルターを通過した風量の積分で与えられる。

$$M = \int \rho_{aero} \phi u dt \quad (15)$$

例えば、煤煙に対するエアロゾル重量 M とフィルターの圧力損失の関係は目詰まり係数を $\alpha=16$ 、 $\beta=10$ 、 $\Delta P_0=245$ Pa として図 3 のように表される。

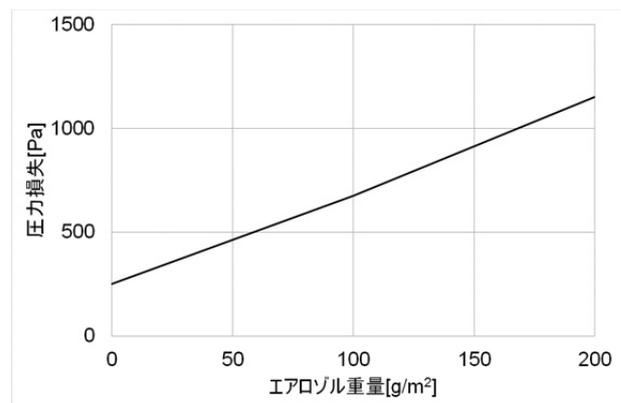


図 3 エアロゾル重量とフィルター差圧

4. 解析事例

文献[7]を参考に、再処理施設のプルトニウム燃料濃縮缶における爆発の状況を想定して計算を実施した。計算対象は、実際の体系のうち洗浄塔

から下流側のフィルター部分を切り出して図 4 の領域とした。ここでは 2 系統のフィルターが 2 段ずつあり、下流側にはブロワがついている。

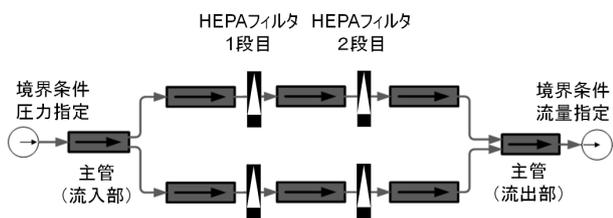


図 4 計算モデル

4.1. 計算条件

爆発を想定した圧力条件を図 5 のような経時変化で与えることとする。時刻 1s まで通常運転で、時刻 1.1s に圧力が 350kPaG まで急上昇し、時刻 2s で通常圧力に戻る。

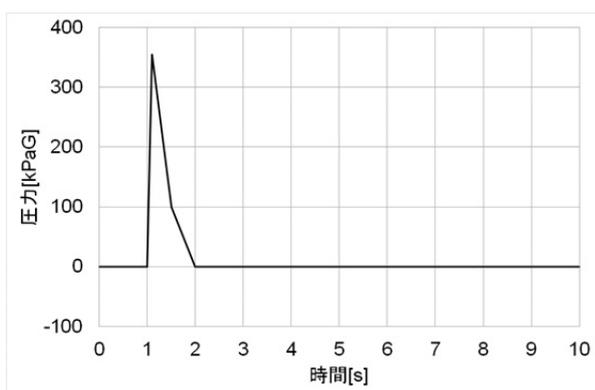


図 5 圧力条件（流入境界）

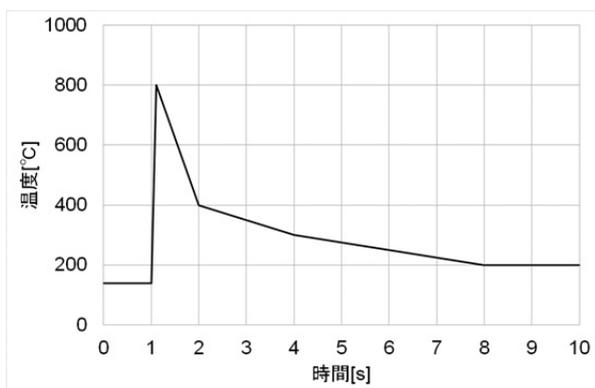


図 6 温度条件（流入境界）

温度条件は図 6 のような経時変化で与える。圧力と同様に時刻 1s まで通常運転であり、時刻 1s に温度が 800°C まで急上昇するが、温度は圧力

とは異なり時刻 8s までゆっくりと降下することとする。

爆発時の煤煙に酸化プルトニウムが付着してエアロゾルの状態にあるとする。エアロゾルをパッシブスカラーで扱うこととして、エアロゾルの濃度変化を図 7 のような経時変化で与える。計算条件を表 2 に示す。酸化プルトニウムの密度は 11500kg/m³ であるが、その量は微量であると仮定して、エアロゾルとしての密度を 1.2kg/m³ とした [7]。フィルター捕集効率を 99.99% とした。フィルターの目詰まり効果は図 3 の条件を使用する。

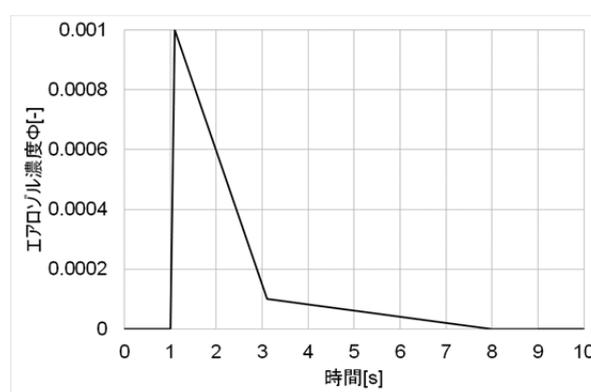


図 7 エアロゾル濃度条件（流入境界）

表 2 計算条件

| 項目 | 条件、数値 |
|------------|--------------------------|
| 管長、管径（主管） | 10m, φ0.4m |
| 管長、管径（分岐管） | 10m, φ0.2m |
| メッシュ幅 | 2m |
| 解法 | 陽解法 |
| 流体物性 | 空気（REFPROP） |
| 管摩擦モデル | Churchill の式 |
| 配管粗度 | 1.6×10 ⁻⁵ [m] |
| ブロワ流量 | 0.05kg/s（一定） |
| エアロゾル密度 | 1.2kg/m ³ |
| フィルター捕集効率 | 99.99% |
| 沈着モデル | 非考慮 |

4.2. 計算結果

計算結果を以下に示す。

(1) 圧力

1 段フィルター出口圧力と 2 段フィルター出口圧力を図 8、図 9 に示す。圧力波の波形が変化しながら下流に伝わっていることが分かる。反射・干渉により 2 段フィルター出口圧力のほうが高くなっていることが分かる。図 10 に爆発から 1 秒後までの圧力のコンター図を示す。時刻 1.11s 圧力が急上昇し、圧力波が出口まで伝搬し、時刻 1.26s (爆発から 0.16 秒) で既に反射が起こっていることが分かる。ここで、初期温度 140°C での空気の音速は約 410 m/s で、入口境界から出口境界までの管長が 50m であるため、手計算では圧力波が約 0.12s で伝わることとなる。圧力波が音速で伝搬していることが確認できる。

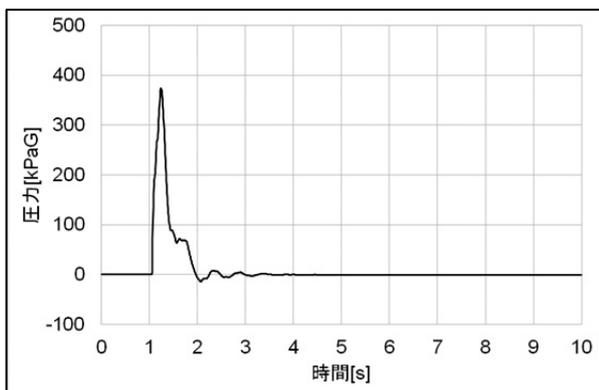


図 8 1 段フィルター出口圧力

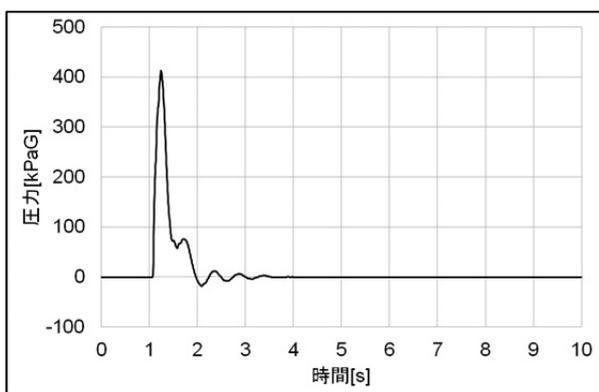


図 9 2 段フィルター出口圧力

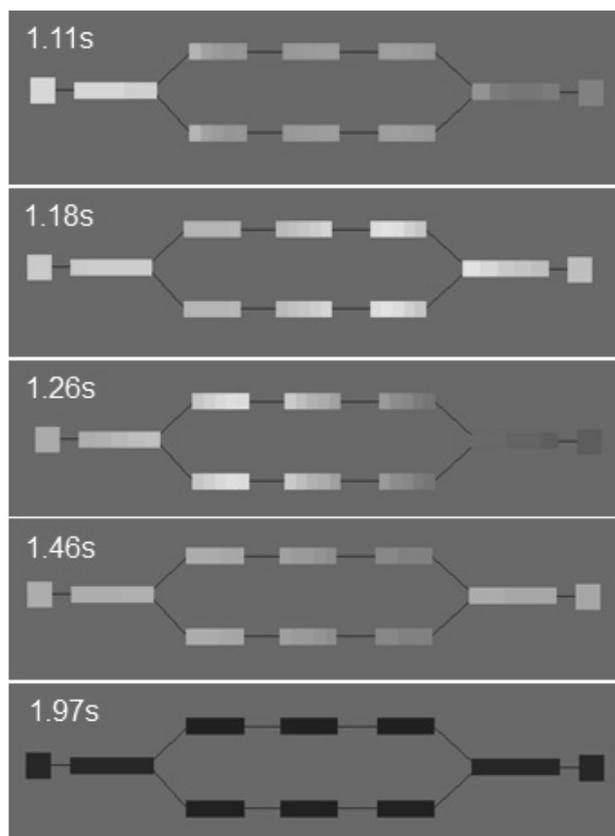


図 10 圧力コンター図 (カラー表示)

(2) 流速

主管の流速を図 11 に示す。爆発による圧力上昇に伴って流速が 300m/s 近くまで上昇していることが分かる。流速がマイナスであるのは逆流が起こっていることを表している。逆流の流速は 150m/s 近くまで出ている。参考のために音速も載せた。流速は音速に至らず、臨界流にはなっていないことが分かる。

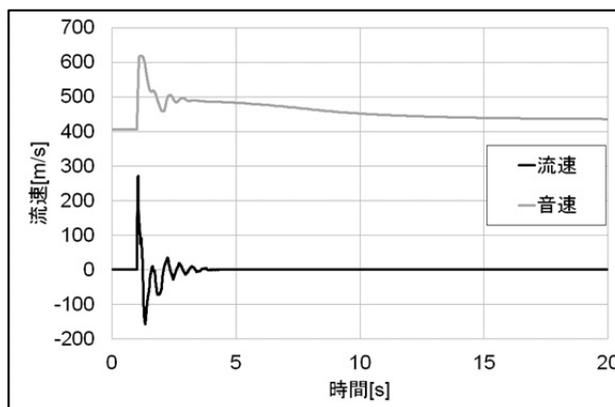


図 11 主管 (流入部) 流速と音速

本計算では重力沈降や熱泳動による沈着を考

慮していないが、速い流れの現象のため、それらの影響は小さいと考えられる。

(3) 温度

1 段フィルター出口温度と 2 段フィルター出口温度を図 12、図 13 に示す。爆発による高温の空気が時間をかけて流れていることが分かる。圧力は音速で伝播するが、温度は流速で伝わっていることが確認できる。時刻 30s あたりで温度が緩やかに上昇しているのは、のちに説明するように密度が低くなるからである。

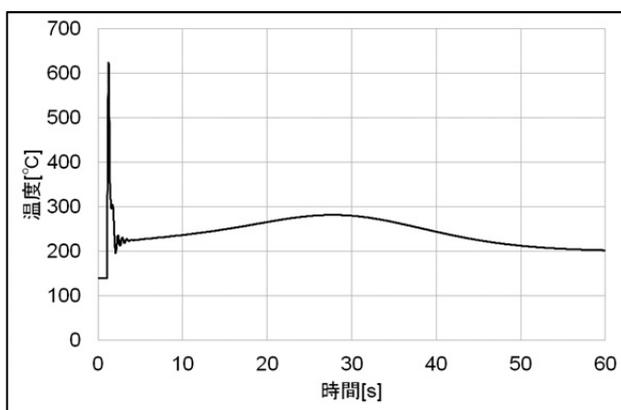


図 12 1 段フィルター出口温度

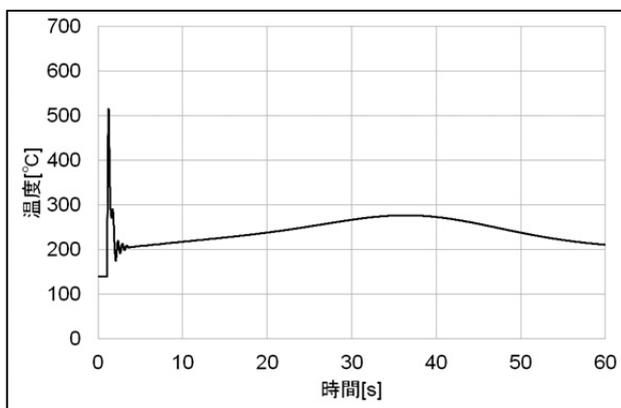


図 13 2 段フィルター出口温度

(4) 密度

1 段フィルター出口密度と 2 段フィルター出口密度を図 14、図 15 に示す。爆発によって圧力波が音速で伝播し、温度は流れによって運ばれるため、密度変化は大雑把に言うとその比を表している。時刻 30s あたりで密度が緩やかに下がっているのは、末端を流量境界で一定流量を引き続けているからであり、その後、供給が追い付いて密度

は回復している。

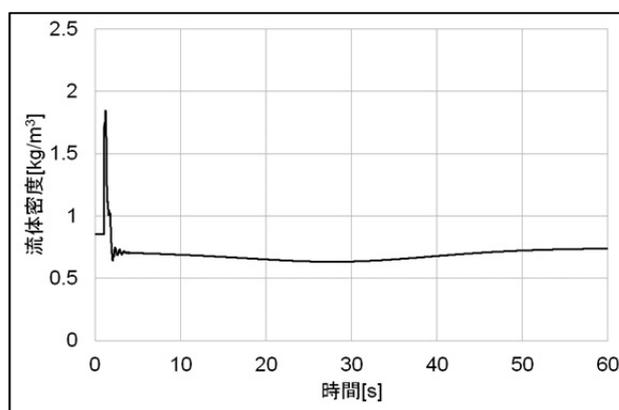


図 14 1 段フィルター出口密度

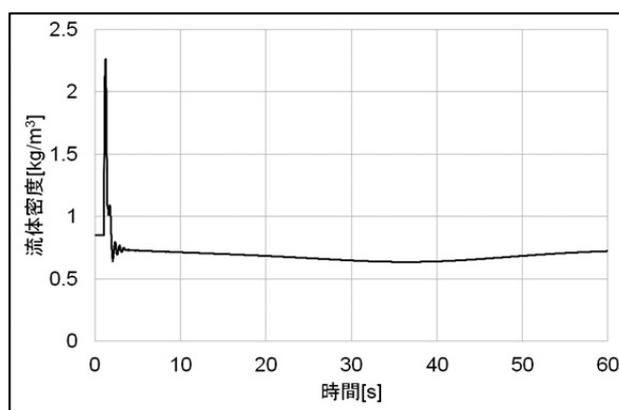


図 15 2 段フィルター出口密度

(5) 流量

流入部の主管の流量、1 段フィルター出口流量と 2 段フィルター出口流量を図 16、図 17、図 18 に示す。各フィルターの流量は、分岐により主管流量の半分の量となっている。爆発が起こって圧力の急上昇が収まってから逆流が起こり、時刻約 4 秒には定常流量に至っていることが分かる。

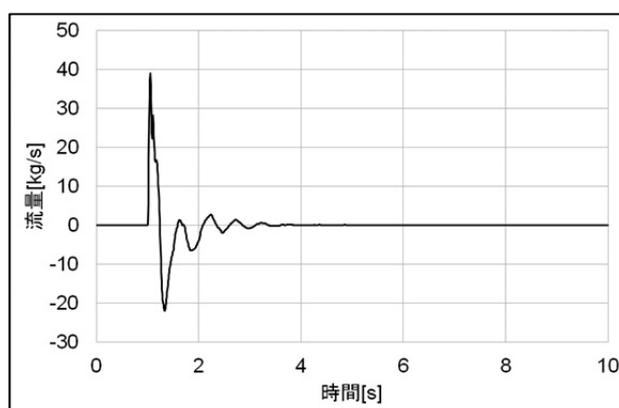


図 16 主管（流入部）流量

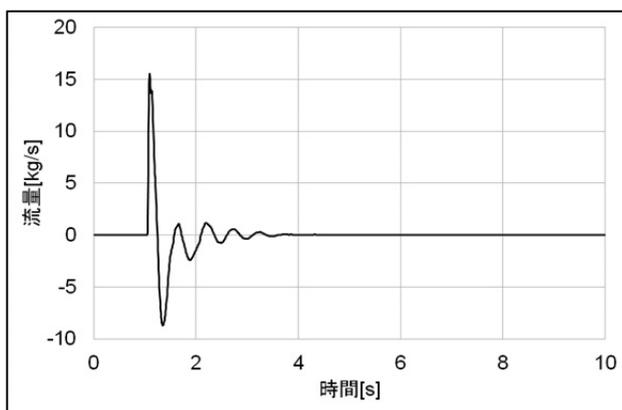


図 17 1 段フィルター出口流量

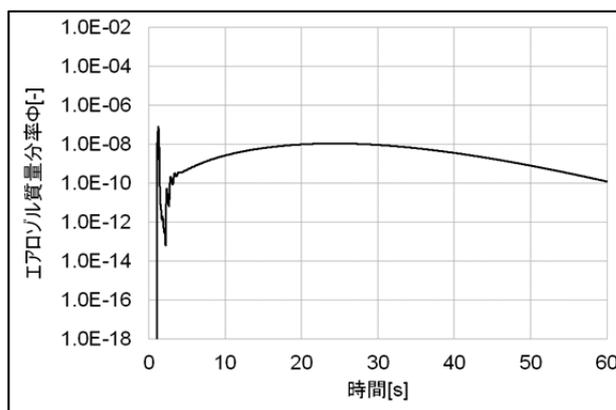


図 20 1 段フィルター出口エアロゾル濃度

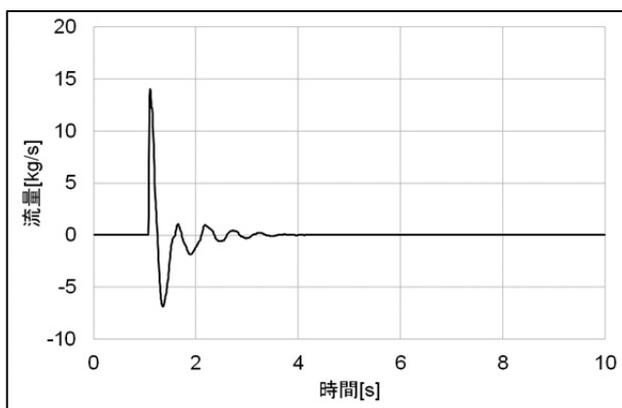


図 18 2 段フィルター出口流量

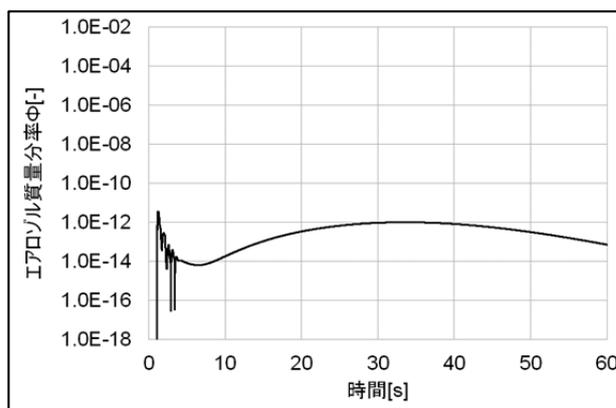


図 21 2 段フィルター出口エアロゾル濃度

(6) エアロゾル濃度

1 段フィルター入口、出口と 2 段フィルター出口のエアロゾル濃度を図 19、図 20、図 21 に示す。縦軸はログスケールである。爆発直後に煤煙と酸化プルトニウムによるエアロゾルが発生し、輸送され、徐々にその量がなくなっている。

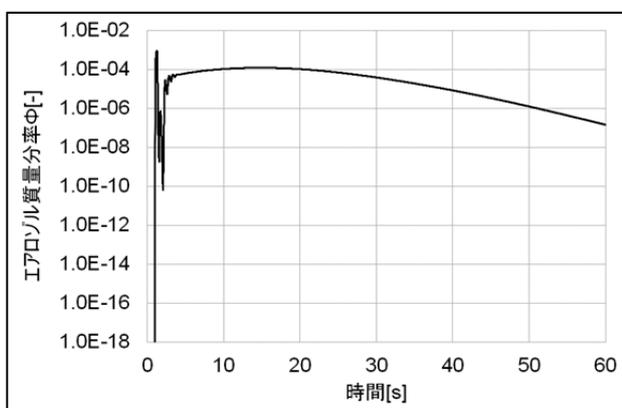


図 19 1 段フィルター入口エアロゾル濃度

フィルターの捕集効率を 99.99%としたため、流入エアロゾル濃度に対し、1 段フィルター出口パッシブスカラー量は 4 桁小さくなっており、更に、2 段フィルター出口パッシブスカラー量は 4 桁小さくなっている。これはフィルターにパッシブスカラーが吸着され、フィルターより下流側には 0.01%しか流出しないことを示している。フィルターは分岐の 2 系統にそれぞれあるが、計算条件が同等のため、2 系統のフィルターは同じ振る舞いを示した。

(7) HEPA フィルター

1 段目のフィルターのエアロゾル吸着量とフィルターの差圧の時間変化を図 22、図 23 に示す。爆発直後に発生したエアロゾルをフィルターが吸着していき、吸着量に従ってフィルターが目詰まりを起こし、差圧が上昇する様子が分かる。1 段目比べて 2 段目のフィルターは流入エアロゾルが少ないため吸着量が少なく、差圧の変化も少なかった。

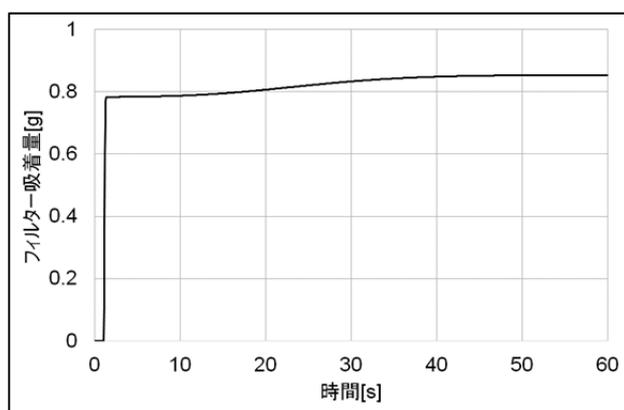


図 22 1 段フィルターの吸着量

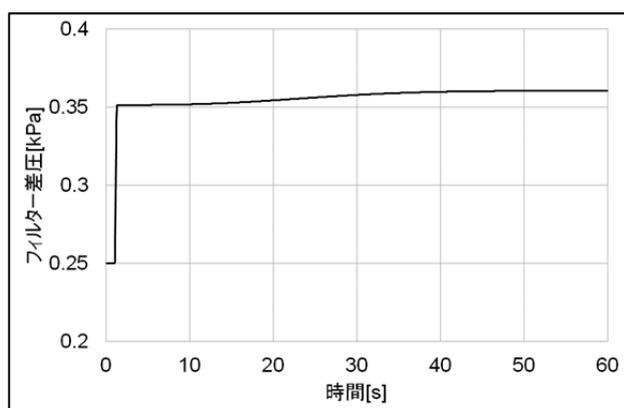


図 23 1 段フィルターの差圧

4.3. 計算結果に対するまとめと考察

再処理施設の排気系を計算対象とし、計算を実施した。爆発の状況を仮定し、煤煙と酸化プルトニウムエアロゾルのエアロゾルをパッシブスカラーで取り扱った。流入境界として圧力と温度の急上昇を与え、下流側は流量境界条件とした。HEPA フィルターモデルを用い、エアロゾルの吸着およびフィルターの目詰まりを模擬した。計算結果として圧力波の伝播、温度の輸送、密度変化、エアロゾルの吸着、フィルター目詰まりによる圧損の上昇が確認された。これらは妥当な結果であると考えられる。

今回はパッシブスカラーの機能確認のために計算を実施したが、実際に再処理施設の爆発時の安全性を評価するには更なるモデルの詳細化が必要と考えられる。例えば、洗浄塔やブロワの考慮、エアロゾルモデルの詳細化などが挙げられ、今後の課題である。

5. まとめ

各分野で使用されているパッシブスカラーの応用モデルをまとめ、紹介した。パッシブスカラーの挙動を数式によってモデル化しソース項で扱うことによって、パッシブスカラーのさまざまな挙動を再現することができることが分かった。

都市ガス分野で訓練シミュレータとして使用されている基地由来解析と熱量解析のパッシブスカラーによる計算方法を紹介した。流動計算だけでなくパッシブスカラーを組み合わせることにより、色々な情報を得ることができ確認できた。

表 3 分野別パッシブスカラー応用例

| 分野、対象 | パッシブスカラー | 物理現象 |
|---------------------|--|-------------|
| 火力プラント 燃焼ガス | 煤 | 付着、沈着 |
| 水力プラント 石油掘削 | 砂利 | 沈降 |
| 上下水道 浄水場 | 不純物 | 沈降、凝集 |
| 空調衛生 クリーン ルーム | 埃、粉塵、アスベスト、臭気、湿気、アレルギー | フィルター吸着 |
| ビル火災 排煙ダクト | 煙粒子 | 凝固、凝縮、蒸発、沈降 |
| 噴射器、付臭、 ミキサー | 噴霧 | 蒸発、凝縮 |
| 吸着装置 | 微量成分 | 吸着 |
| 放射性物質 | セシウム、ラドン | 吸着、反応 |
| テロ | 放射性エアロゾル 散布、炭疽菌、サリン など生物・化学剤 散布 | 吸着、反応 |
| 冷凍 | 霜 | 蒸発、凝縮 |

パッシブスカラーの計算機能を確認するために、再処理施設における爆発を想定した計算を実施した。煤煙と酸化プルトニウムエアロゾルをパッシブスカラーにより輸送し、計算を行った。

HEPA フィルターの目詰まりにより流動が影響を受けた。全体的に妥当な結果が得られた。

本稿で紹介した例の他、パッシブスカラーの応用例としては、種々の化学物質やイオンの移流と拡散現象、汚泥等の重力沈降と拡散泳動、再浮遊等の現象の追跡などが挙げられる。パッシブスカラー解析機能を使用すれば、幅広い分野に応用が可能である。表 3 に、分野別のパッシブスカラーの応用例を示す。

本稿執筆で得た結果や経験を今後の管路系流体過渡解析ソフトウェア Advance/FrontNet/T のパッシブスカラー機能開発に反映させ、機能充実に努めてゆく方針である。

参考文献

- [1] 大江修造著、物性推算法、データブック出版社
- [2] 都市ガス 13A の成分の 1 例
<http://home.tokyo-gas.co.jp/gas/userguide/shurui.html>
(2017 年 5 月アクセス)
- [3] 都市ガス工業概要「基礎理論編」、社団法人日本ガス協会
- [4] JIS K 2310
<http://kikakurui.com/k2/K2301-2011-01.html>
(2017 年 5 月アクセス)
- [5] 本間仁、萩原国宏、田中寿美、織田友恵、李美英著、エクセル河川工学入門、山海堂
- [6] <http://www.qabox.jp/question/qa4708.html>
(2017 年 5 月アクセス)
- [7] 西尾軍治、渡邊浩二、河野浩二、山崎昇、向出恵勇、吉岡逸夫、「再処理施設の火災・爆発時におけるセル換気系の完全性解析コード(CELVA-1D)」、JAERI-Data/Code 98-017 (1998.3)
- [8] 高橋幹二著、「エアロゾル学の基礎」、日本エアロゾル学会編、森北出版 (2003)
- [9] 機械工学便覧「A5 流体工学」、日本機械学会編
- [10] 村上周三、加藤信介、永野紳一郎、「クリーンルーム内の浮遊微粒子拡散性状に関する

研究 (その 9) —沈降速度を考慮した浮遊微粒子濃度分布の数値シミュレーション—」、生産研究 38 巻 1 号、(1986.1)

- [11] 長谷部弥、山田容子、鈴木良延、「クリーンルーム内のダクトなどに体積した微粒子の気流による再飛散に関する検討」、Earozeru Kenkyu, 29 (3), 190-195 (2014)
- [12] 黄弘、加藤信介、大岡龍三、「火の粉の飛散を組み込んだ都市火災伝搬の CFD 解析」、日本流体力学数値流体力学部門 Web 会誌第 12 巻第 2 号 (2004.11)
- [13] 西尾軍治、「原子力施設事故時のエアロゾル挙動」、エアロゾル研究 Vol.4 (1989), No1.
- [14] 吉田一雄、石川淳、「再処理施設の廃液沸騰事故でのエアロゾル移行挙動に影響する気体の熱力学物性値の推定」、JAEA-Research 2013-013
- [15] 日高昭秀、丸山結、芝崎博晶、前田章雄、原田雄平、長嶋利夫、吉野丈人、杉本純、「WIND 計画による配管内 FP エアロゾル挙動解析」、JAERI-Tech 98-026, (1998.7)
- [16] S. Jacobsen, J. R. Brock, J. Colloid Sci., 22, 107 (1966).
- [17] 東芝「MELCOR コードにおけるエアロゾルの重力沈降モデルについて」、(「シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価」特別専門委員会第 10 回会合、資料 No.10-4) , 2008.
- [18] HEPA フィルターとは、
<https://ja.wikipedia.org/wiki/HEPA>
(2017 年 5 月アクセス)

※ 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。(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。)