

圧力伝播解析への数値解析モデルの適用性検討

大須賀 直子* 秋村 友香* 三橋 利玄*

Applicability Study of Numerical Calculation Model to Pressure Propagation Analysis

Naoko Ohsuka*, Yuka Akimura* and Toshiharu Mitsuhashi*

Advance/FrontNet/Γ では、従来の陽解法に加えて、高速化を目的として導入した陰解法を使用した数値解析が可能となった。ここでは、厳密解の存在する衝撃波管問題と、実際の管路系における圧力伝播試験の結果を取り上げ、従来の陽解法と陰解法を使用した数値解析の適用性の検討を行った。また、陰解法において、流体物性に理想気体の状態方程式を使用した場合や、圧力ブレンド法を使用しない場合の解析結果の比較を通じて、これらの数値解法の妥当性についての検討を行った。

Key word: 管路系、流体解析、圧力伝播解析、衝撃波管、1次元流れ、陰解法、高速化、Advance/FrontNet/Γ

1. はじめに

Advance/FrontNet/Γ は、管路系流体解析ソフトウェアのひとつであり、主にガス管路の圧力伝播や熱流動の過渡応答解析への適用を目的として開発され、都市ガス、原子力、航空宇宙等の分野において実績を重ねてきた。これらの分野の管路系においては、弁遮断や供給停止、需要量の急変化によって生じる、圧力変動の大きさや影響範囲の評価が必要となる。従って、これらの問題を数値解析によって解く際には、圧力伝播現象を如何に精密に再現できるか、また、現実的な計算時間によって求められる精度の解が得られるかが重要となる。本稿では、Advance/FrontNet/Γ を使用した数値解析によって、衝撃波管問題の厳密解や、実際の管路系における圧力伝播の試験結果の再現性について検討し、これらの問題に対する、数値解析の適用性を調べた結果について報告する。

2. 衝撃波管解析

2.1. 解析条件と解析ケース

衝撃波管を長さ 0.5m、内径 1mm の 2 本の配管で模擬した。図 1 と表 2 に、管路系モデルと主

要な解析条件を示す。配管は空気で充填しているものとし、それぞれの配管を 10,000 分割とし、高圧側配管の初期値は、1.0MPa、350K とし、低圧側配管の初期値を 0.1MPa、280K とした。解析は 6.3×10^{-4} 秒まで行った。

実施した解析ケースを表 2 に示す。解析に用いた陰解法は、衝撃波管解析が強圧縮性の解析のため、解析が可能な半陰解法 2[1]と準陰解法 2[1]とした。Courant 条件として 2 種類の方法を用いた。音速基準は、Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)条件における特性速度を音速と流速の和とする方法であり、流速基準は、CFL 条件の特性速度を単に流速とする方法である。Courant 数は、陽解法と半陰解法では 1.0 を超えてはならないが、陰解法では 1 以上の値を設定することができる。また、陰解法は、従来からある密度ベースの陽解法とは異なり、圧力ベースの数値解法を採用しており、時間刻み幅に対する音速による制限を取り除くことができる。なお、格子数は 20,000 と多めに設定しているが、これは格子数が多い場合の計算性能を評価することを目的としたことによる。

*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

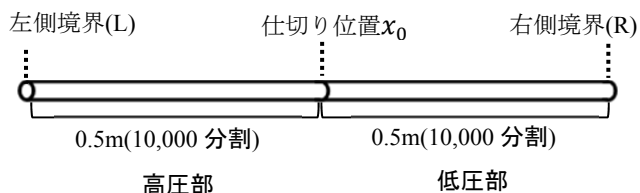


図 1 衝撃波管問題における管路系モデル

表 1 衝撃波管解析の主要な解析条件

No.	項目	内容
1	全長	1.0 [m]
2	配管径	1.0×10^{-3} [m]
3	格子分割数	20,000
4	管摩擦	考慮しない
5	境界条件	(i)圧力、温度、密度:勾配ゼロ (ii)流速:ゼロ
6	初期条件	(i)高圧部 1.0MPa、350K、流速ゼロ (ii)低圧部 0.1MPa、280K、流速ゼロ
7	充満気体	理想気体の空気
8	対流項の差分スキーム	1次風上差分法
9	解析時間	6.3×10^{-4} 秒

表 2 衝撃波管解析の解析ケース

No.	ケース名	数値解法	Courant 条件
1	Exp	陽解法	0.5 (音速基準)
2	imp3	半陰解法 2	0.5 (音速基準)
3	imp3.2	半陰解法 2	0.5 (流速基準)
4	imp3.3	半陰解法 2	1.0 (流速基準)
5	imp5	準陰解法 2	0.5 (音速基準)
6	imp5.2	準陰解法 2	1.0 (流速基準)
7	imp5.3	準陰解法 2	2.0 (流速基準)
8	imp5.4	準陰解法 2	3.0 (流速基準)
9	imp5.5	準陰解法 2	5.0 (流速基準)
10	imp5.6	準陰解法 2	10.0 (流速基準)
11	imp5.7	準陰解法 2	20.0 (流速基準)

2.2. 衝撃波管の厳密解

衝撃波管では、高圧部と低圧部を仕切る膜が、瞬間的に取り去られた後、衝撃波、接触不連続面、膨張波が発生することによって、5つの異なる流動状態の領域が出現することが知られている(図2)。図3は、ある時刻における衝撃波管内の5領域にわたる密度分布を表している。

以下に、衝撃波管の厳密解を示す[2]。時刻を t [s]、管路系モデルの流れ方向の位置 x [m]、圧力を P [Pa]、密度を ρ [kg/m³]、流速を u [m/s] として表す。また、高圧部の初期圧力 P_L [Pa]、初期密度 ρ_L [kg/m³]、低圧部の初期圧力 P_R [Pa]、初期密度 ρ_R [kg/m³]、高・低圧部流速初期値 $u_L = u_R = 0$ [m/s]、衝撃波管で生じる5つの領域における各物理量を下付き文字 1~5 の数値で、低圧部から高圧部にかけて示している。

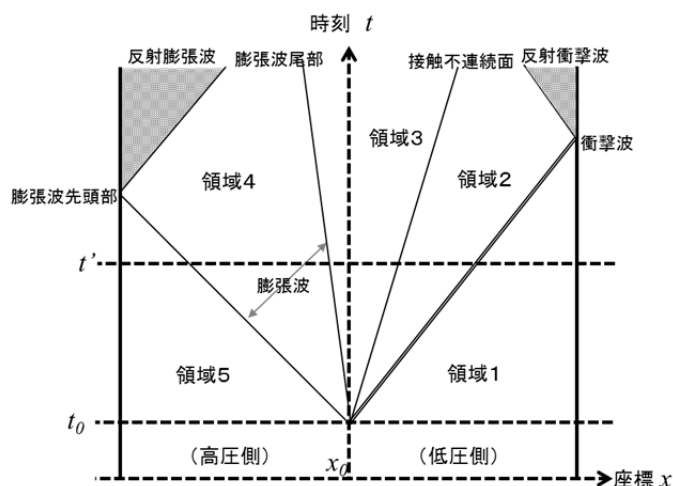


図 2 衝撃波管における5領域

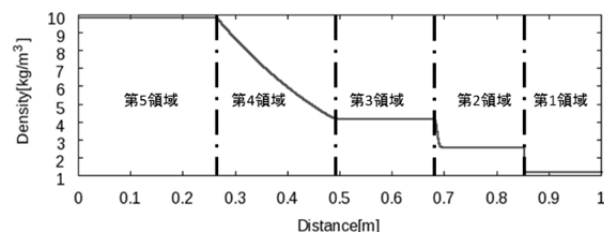


図 3 衝撃波管の密度分布と5領域の関係

① 領域 1 ($x > x_0 + V_s t$)

$$P_1 = P_R, \quad (1)$$

$$\rho_1 = \rho_R, \quad (2)$$

$$u_1 = u_R. \quad (3)$$

② 領域 2 ($x_0 + V_{CD}t < x \leq x_0 + V_s t$)

$$P_2 = P_R P, \quad (4)$$

$$\rho_2 = \rho_R \frac{\gamma - 1 + (\gamma + 1)P}{\gamma + 1 + (\gamma - 1)P}, \quad (5)$$

$$u_2 = u_R + \sqrt{\frac{2}{\gamma} \frac{P - 1}{\gamma - 1 + (\gamma + 1)P}}. \quad (6)$$

③ 領域 3

$$(x_0 + \left(\frac{\gamma + 1}{2} V_{CD} - c_L - \frac{\gamma - 1}{2} u_L\right)t < x \leq x_0 + V_{CD}t)$$

$$P_3 = P_2, \quad (7)$$

$$\rho_3 = \rho_L \left(\frac{P_3}{P_L}\right)^{1/\gamma}, \quad (8)$$

$$u_3 = u_2. \quad (9)$$

④ 領域 4

$$(x_0 + (u_L - c_L)t < x \leq x_0 + \left(\frac{\gamma + 1}{2} V_{CD} - c_L - \frac{\gamma - 1}{2} u_L\right)t)$$

$$P_4 = P_L \left(\frac{c_4}{c_L}\right)^\alpha, \quad (10)$$

$$\rho_4 = \rho_L \left(\frac{P_4}{P_L}\right)^{1/\gamma}, \quad (11)$$

$$u_4 = \frac{2}{\gamma + 1} \left(\frac{x - x_0}{t} + c_L\right). \quad (12)$$

⑤ 領域 5 ($x < x_0 + (u_L - c_L)t$)

$$P_5 = P_L, \quad (13)$$

$$\rho_5 = \rho_L, \quad (14)$$

$$u_5 = u_L. \quad (15)$$

ここで、領域の境界を決める t は 6.3×10^{-4} [s]、衝撃波の流速 V_s と衝撃波背後のジェット流速 V_{CD} は次のように表される。なお、衝撃波背後のジェット流速 V_{CD} は第 2 領域と第 3 領域の流速と等しい。

$$V_s = u_R + \frac{(P - 1)c_R^2}{\gamma(u_2 - u_R)} \quad (16)$$

$$V_{CD} = u_2 = u_3 \quad (17)$$

ここで、 γ は空気の比熱比であり、 $\gamma = 1.40242$ である。また、低・高圧部の音速 c_R, c_L は、次のように表される。

$$c_R = \sqrt{\frac{\gamma P_R}{\rho_R}}, \quad (18)$$

$$c_L = \sqrt{\frac{\gamma P_L}{\rho_L}} \quad (19)$$

さらに、パラメータ α は、次のように表される。

$$\alpha = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \quad (20)$$

P は次の方程式の解であり、厳密解を得る際に、Newton 法を用いた収束計算により求められる。

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{2}{\gamma} \frac{P - 1}{\gamma - 1 + (\gamma + 1)P}} \\ &= \frac{2}{\gamma - 1} \frac{c_L}{c_R} \left[1 - \left(\frac{P_R}{P_L} P \right)^{1/\alpha} \right] \\ &+ \frac{u_L - u_R}{c_R}. \end{aligned} \quad (21)$$

2.3. 計算時間と解析結果のまとめ

表 3 に各ケースの計算時間と解析結果のまとめを示す。

以下に、解析の実行時間の測定を行った計算機サーバーの仕様を示す。

(a)OS : CentOS release 5.9
(b)CPU : Intel(R) Xeon(R) Processor X5660 12M Cache, 2.80 GHz
(c)Memory : 99GB

準陰解法 2 を用いた解析は総じて良好であるが、行列解析を最低 4 回行っていることから、計算時間が多くかかっている。計算結果から、準陰解法 2 の場合、衝撃波管解析では、Courant 条件として 5.0 程度までが妥当な計算といえ、Courant 数をそれ以上大きくすると、物理量に見られるスパイクが大きく、また、計算結果が鈍る傾向が強く、解析結果の信頼性が損なわれている。

表 3 衝撃波管解析の計算時間と解析結果

No.	ケース名	計 算 時 間 (s)	平均時間 刻み幅(s)	入力 Courant 数	音速基準と見 立てた時の最 大 Courant 数	解析結果のまとめ
1	Exp	1067	3.05×10^{-8}	0.5 (音速基準)	0.5	良好
2	Imp3	1327	3.31×10^{-8}	0.5 (音速基準)	0.5	良好
3	Imp3.2	615	8.29×10^{-8}	0.5 (流速基準)	1.27	良好
4	Imp3.3	467	14.74×10^{-8}	1.0 (流速基準)	2.33	良好、衝撃波面にスパイクあり
5	Imp5	8599	3.31×10^{-8}	0.5 (音速基準)	0.5	良好
6	Imp5.2	2405	16.91×10^{-8}	1.0 (流速基準)	2.53	良好
7	Imp5.3	1484	27.30×10^{-8}	2.0 (流速基準)	4.37	良好、衝撃波面にスパイクあり
8	Imp5.4	898	34.69×10^{-8}	3.0 (流速基準)	5.76	良好、衝撃波面にスパイクあり
9	Imp5.5	718	45.06×10^{-8}	5.0 (流速基準)	7.89	全体として良好であるが、衝撃波面のスパイクと膨張波領域後面から膨張波面の間で小さな振動あり
10	Imp5.6	632	59.04×10^{-8}	10.0 (流速基準)	13.04	全体として良好であるが、衝撃波面のスパイクと膨張波領域後面から膨張波面の間で小さな振動あり
11	Imp5.7	549	70.16×10^{-8}	20.0 (流速基準)	25.74	衝撃波面のスパイクのスパイクが大きく、膨張波領域に入るところで不自然なところもあり、解析結果としての信頼性に欠ける

2.4. 解析結果

解析結果として各ケースの圧力分布、密度分布、流速分布を示す。以下では、図中の実線の「Calc.」は Advance/FrontNet/Γ による解析結果を表しており、点線の「Exact」は衝撃波管の厳密解を表している。

2.4.1. 圧力分布

衝撃波管解析で得られた圧力分布を図 4 から図 14 に示す。いずれの解析結果は、全体として厳密解と良く一致しており、半陰解法 2 および準陰解法 2 の衝撃波管解析に対する適用性が確認できる。

Courant 数が比較的大きい半陰解法 2 の No. 4 と準陰解法 2 の解析ケース Nos. 7～11 では、衝撃波面でスパイクが見られ、また、解析ケース Nos. 9～11 では、このまま計算を続けると計算が破綻する危うさを持っている。そのため、準陰解法 2 の衝撃波管解析への適用においては、流速基準の Courant 数は 3.0 程度が限界といえる。なお、流速基準の Courant 数 3.0 は解析結果から音速基準と見立てた時の Courant 数は 6.0 程度に相当する。

2.4.2. 密度分布

衝撃波管解析で得られた密度分布を図 15 から図 25 に示す。圧力分布と同様に、いずれの解析

結果は、全体として厳密解と良く一致している。

Courant 数を大きくすると、圧力分布と同様に衝撃波面でスパイクが見られる。準陰解法 2 では、数値拡散による影響のため、接触不連続面で密度分布が鈍る傾向がある。

2.4.3. 流速分布

衝撃波管解析で得られた流速分布を図 26 から図 36 に示す。圧力分布や密度分布と同様に、いずれの解析結果は、全体として厳密解と良く一致している。

Courant 数を大きくすると、圧力分布と同様に衝撃波面でスパイクが見られ、解析ケース Nos. 8～11 では顕著である。これからも、陰解法では、流速基準の Courant 数は 3.0 程度が限界であることが分かる。

2.5. 衝撃波管解析のまとめ

衝撃波管の解析を実施し、厳密解との比較を行った。Advance/FrontNet/Γ を使用した解析では、陽解法、陰解法ともに厳密解を良く再現する結果が得られた。しかしながら、Courant 数が大きくなるについて衝撃波面における圧力や密度、流速分布のスパイクや、微小な振動が生じ、精度が低下する傾向が強く見られた。

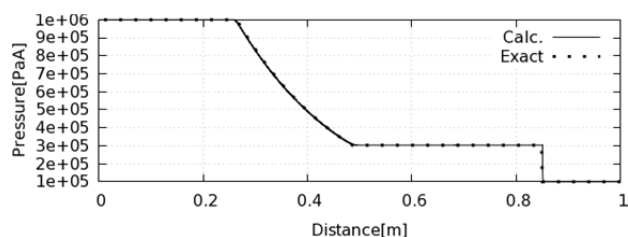


図 4 No1.Exp 圧力分布

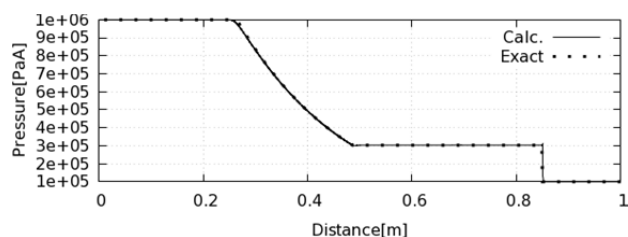


図 10 No7.Imp5.3 圧力分布

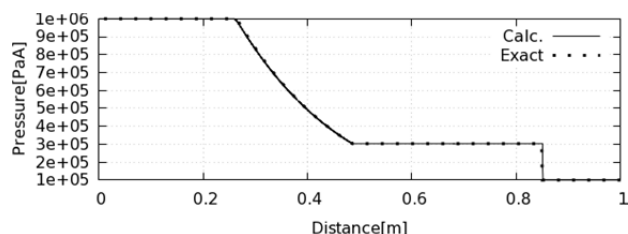


図 5 No2.Imp3 圧力分布

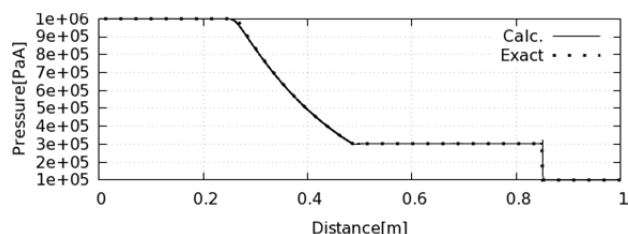


図 11 No8.Imp5.4 圧力分布

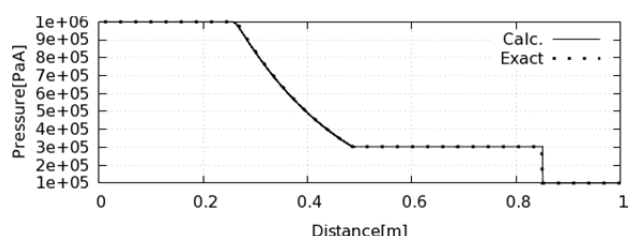


図 6 No3.Imp3.2 圧力分布

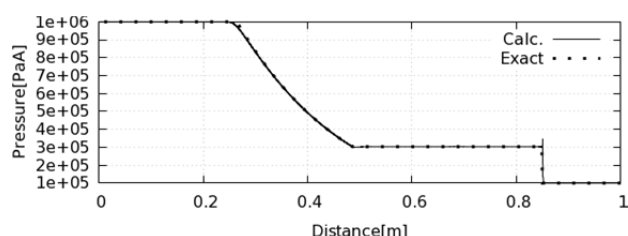


図 12 No9.Imp5.5 圧力分布

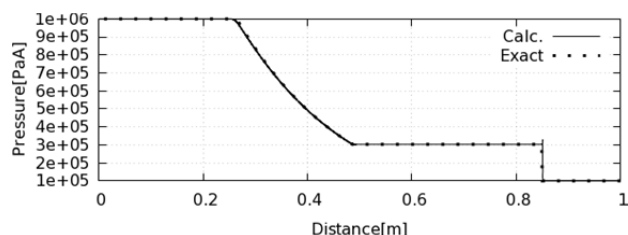


図 7 No4.Imp3.3 圧力分布

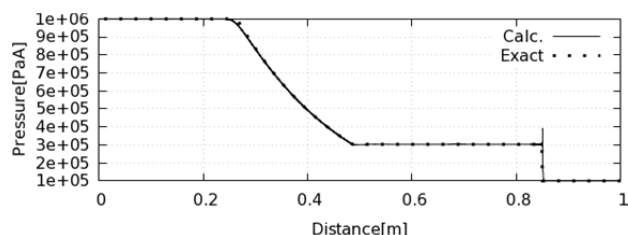


図 13 No10.Imp5.6 圧力分布

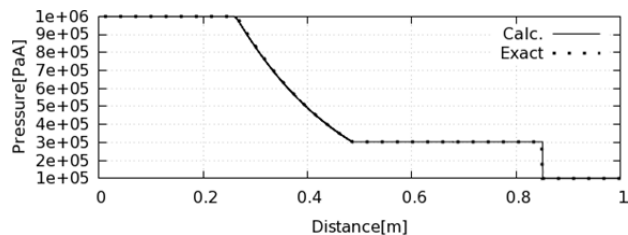


図 8 No5.Imp5 圧力分布

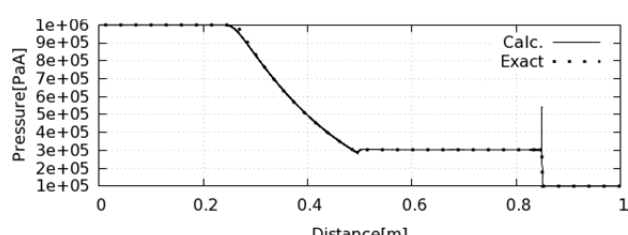


図 14 No11.Imp5.7 圧力分布

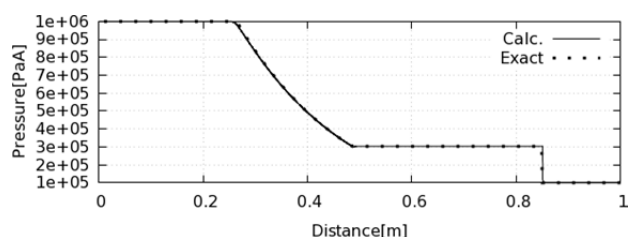


図 9 No6.Imp5.2 圧力分布

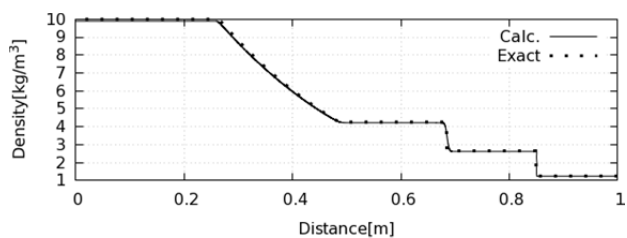


図 15 No1.Exp 密度分布

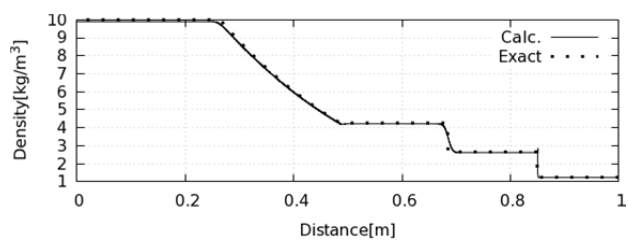


図 21 No7.Imp5.3 密度分布

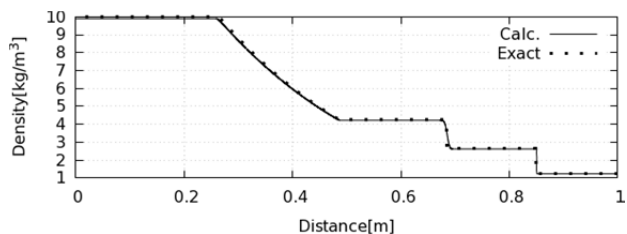


図 16 No2.Imp3 密度分布

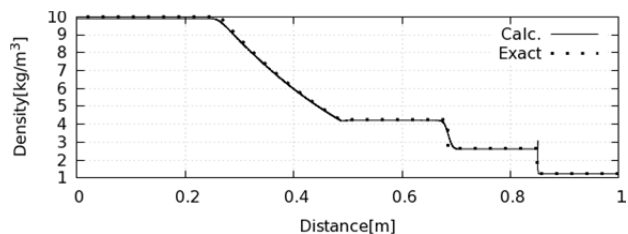


図 22 No8.Imp5.4 密度分布

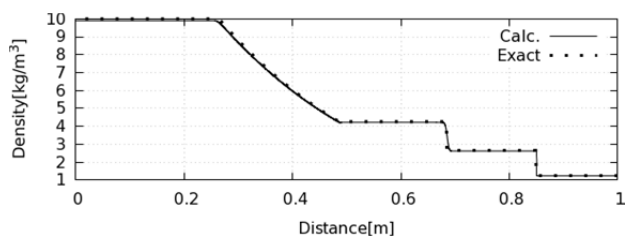


図 17 No3.Imp3.2 密度分布

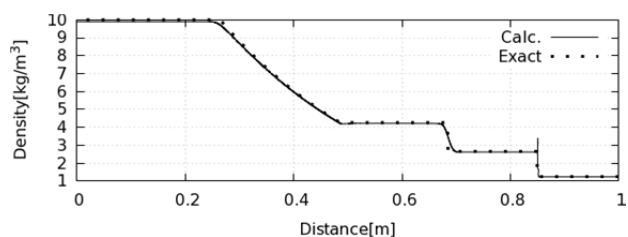


図 23 No9.Imp5.5 密度分布

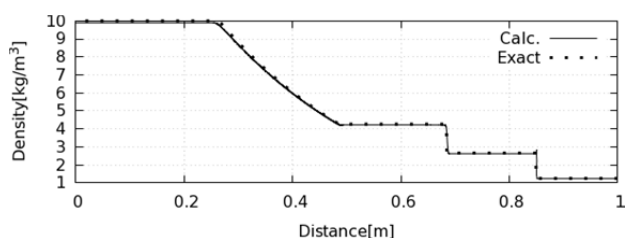


図 18 No4.Imp3.3 密度分布

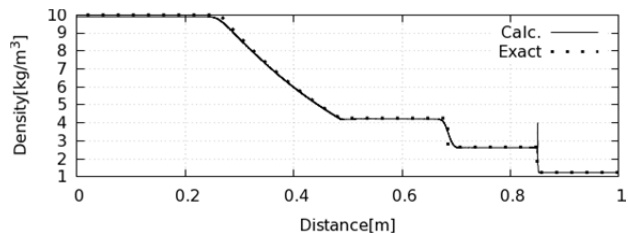


図 24 No10.Imp5.6 密度分布

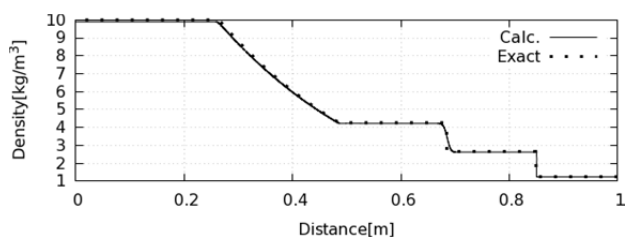


図 19 No5.Imp5 密度分布

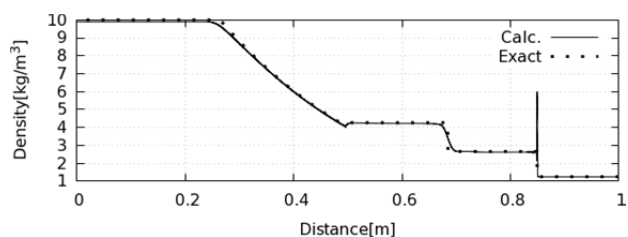


図 25 No11.Imp5.7 密度分布

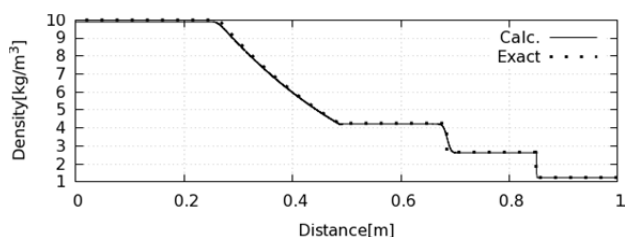


図 20 No6.Imp5.2 密度分布

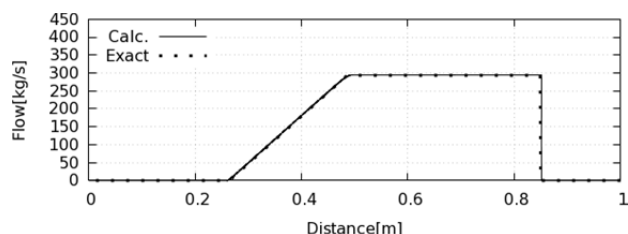


図 26 No.1.Exp 流速分布

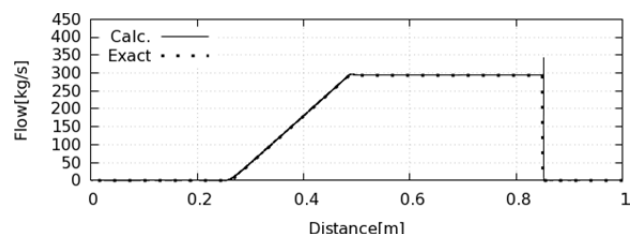


図 32 No.7.Imp5.3 流速分布

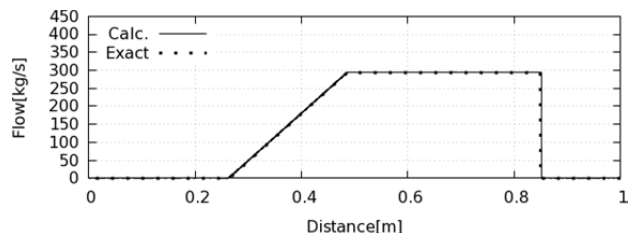


図 27 No.2.Imp3 流速分布

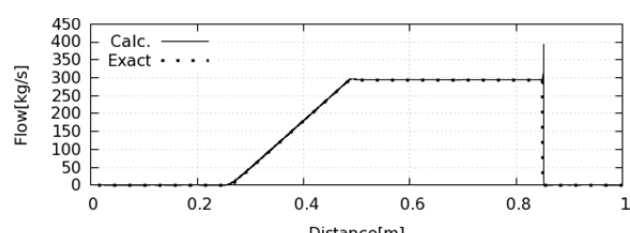


図 33 No.8.Imp5.4 流速分布

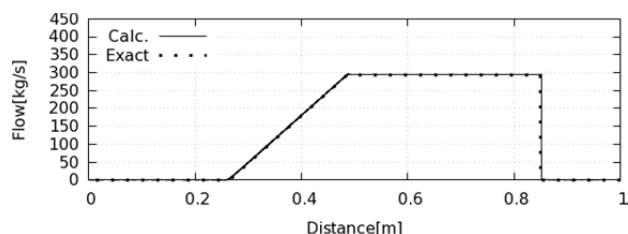


図 28 No.3.Imp3.2 流速分布

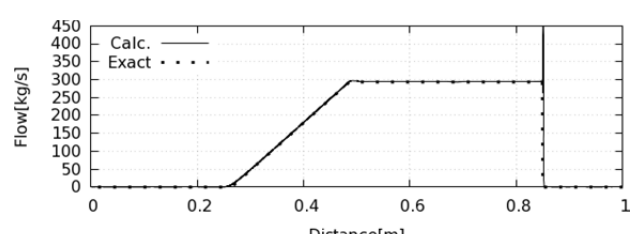


図 34 No.9.Imp5.5 流速分布

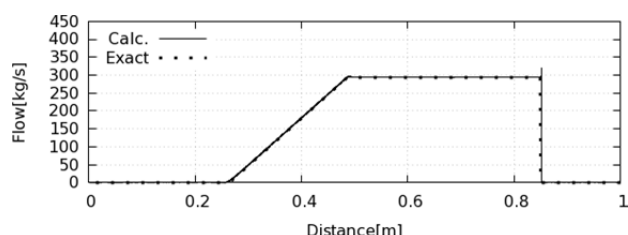


図 29 No.4.Imp3.3 流速分布

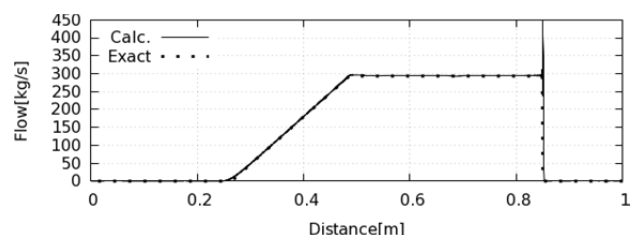


図 35 No.10.Imp5.6 流速分布

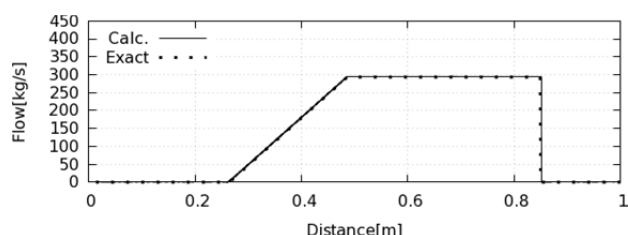


図 30 No.5.Imp5 流速分布

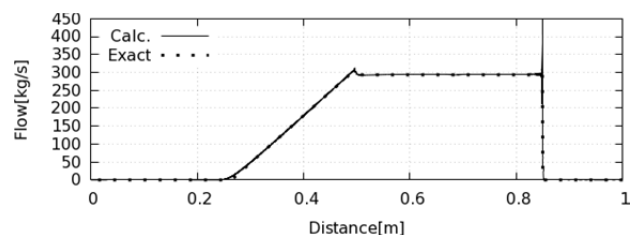


図 36 No.11.Imp5.7 流速分布

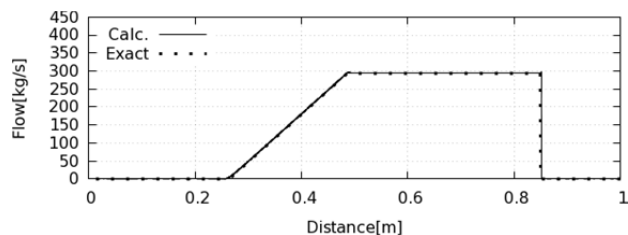


図 31 No.6.Imp5.2 流速分布

3. バルブ閉鎖時の圧力伝播試験解析

3.1. 解析条件と解析ケース

図 37 に示す試験装置（重工業メーカー様提供）に対する管路系解析モデルに、質量保存式ベースとエネルギー保存式ベースの半陰解法と準陰解法の 4 種類の陰解法を適用し、各々で得られた解析結果を試験結果と比較して、陰解法の妥当性を確認した。

試験では、圧縮機で空気を供給し、開放端から空気を噴出させた定常状態後、電動閉止弁を 0.05 秒で急閉止させて、観測点 P1～P5 での変動圧力を測定している。Advance/FrontNet/T による解析では、図 37 の青い部分、タンク以降からバルブ直下の開放端と閉止端までの管路系を対象とした。

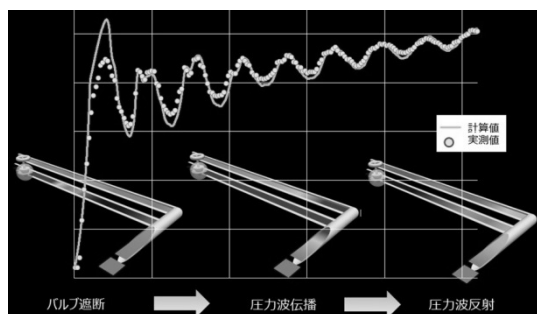
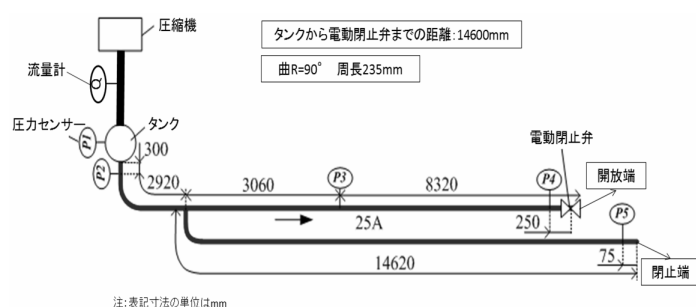


図 37 バルブ閉鎖時の圧力伝播試験解析の概要

表 4 に主要な解析条件を示す。扱う気体は空気単成分であるが、流体物性は実在流体の混合流体として、表 4 に示した成分比に基づいて REFPROP[3]を用いて算定した。なお、感度解析として理想気体（空気単成分と 3 成分からなる空気）として扱う解析も実施した。

境界条件は、タンクに接続する流入部では、圧力はタンク圧による固定（Dirichlet）条件とし、温度は 20℃の Dirichlet 条件、流量は計算値とした。

バルブ直下の大気開放端では、大気圧による Dirichlet 条件とし、温度は勾配ゼロの Neumann 条件、流量は計算値とした。また、閉止端では、流量ゼロの Dirichlet 条件とし、圧力と温度は勾配ゼロの Neumann 条件とした。

定常計算 10 秒後に、末端のバルブを 0.05 秒で閉鎖させ、その後の圧力伝播挙動の解析を行った。

実施した解析ケースを表 5 と表 6 に示す。表 5 は質量保存式ベース（以下、質量ベースともいう）の陰解法[1]を用いた場合であり、ケース No.0 からケース No.9 までは数値解法と Courant 条件について、ケース No.10 と No.11 は理想気体について、ケース No.12 は圧力ブレンド法について感度解析を行い、Courant 条件、流体物性の計算方法、および圧力ブレンド法が圧力伝播挙動に与える影響と計算時間の検討を行った。

表 6 はエネルギー保存式ベース（以下、エネルギーベースともいう）の陰解法[1]を用いた場合であり、ケース No.0 からケース No.9 までは数値解法と Courant 条件について、ケース No.10 と No.11 は理想気体について感度解析を行い、Courant 条件や流体物性の計算方法が圧力伝播挙動に与える影響と計算時間の検討を行った。

なお、表 5 と表 6 のケース No.0 の EX は陰解法と比較するために行った陽解法による解析であり、質量ベースやエネルギーベースとの分類とは異なる数値解法によるものであるが、便宜的に表に示している。

表 4 圧力伝播試験解析の主要な解析条件

No.	項目	内容
1	全長	32.22 [m]
2	配管径	0.0276[m]
3	格子分割数	292
4	管摩擦係数	Churchill の式
5	境界条件	(i)タンク：圧力と温度を試験結果に基づいて固定 (ii)バルブ側：大気開放の圧力と温度固定、バルブは時刻 10 秒で閉鎖 (iii)閉止端：流速ゼロ、圧力と温度は勾配ゼロ
6	初期条件	0.0PaG、20℃、流速ゼロ
7	気体	空気(実在気体または理想気体) モル分率は、N ₂ :0.7812、 O ₂ :0.2096、Ar:0.0092
8	対流項の差分スキーム	1 次風上差分法
9	解析時間	12.0 秒(定常計算 10 秒を含む)

表 6 エネルギーベース陰解法による解析ケース

No.	解析ケース名	数値解法	Courant 条件
0	EX	陽解法	0.99(音速基準)
1	ImpEng-CEX	半陰解法 2	0.99(音速基準)
2	ImpEng-C001	半陰解法 2	0.1
3	ImpEng-C005	半陰解法 2	0.5
4	ImpEng-C01	準陰解法 2	1.0
5	ImpEng-C03	準陰解法 2	3.0
6	ImpEng-C05	準陰解法 2	5.0
7	ImpEng-C10	準陰解法 2	10.0
8	ImpEng-C20	準陰解法 2	20.0
9	ImpEng-CEXC10	準陰解法 2	10(音速基準)
10	ImpEng-Ideal	半陰解法 2	0.99(音速基準)
11	ImpEng-Ideal-multi	半陰解法 2	0.99(音速基準)

(注)ケース No.11 と No.12 は理想気体に対する感度解析

表 5 質量ベース陰解法による解析ケース

No.	解析ケース名	数値解法	Courant 条件
0	EX	陽解法	0.99(音速基準)
1	ImpMas-CEX	半陰解法 1	0.99(音速基準)
2	ImpMas-C001	半陰解法 1	0.1
3	ImpMas-C005	半陰解法 1	0.5
4	ImpMas-C01	準陰解法 1	1.0
5	ImpMas-C03	準陰解法 1	3.0
6	ImpMas-C05	準陰解法 1	5.0
7	ImpMas-C10	準陰解法 1	10.0
8	ImpMas-C20	準陰解法 1	20.0
9	ImpMas-CEXC10	準陰解法 1	10(音速基準)
10	ImpMas-Ideal	半陰解法 1	0.99(音速基準)
11	ImpMas-Ideal-multi	半陰解法 1	0.99(音速基準)
12	ImpMas-CEXNB	半陰解法 1	0.99(音速基準)

(注)ケース No.11 と No.12 は理想気体、No.12 は圧力ブレンド法に対する感度解析

3.2. 計算時間と解析結果のまとめ

各ケースの計算時間と解析結果のまとめを表 7 と表 8 に示す。なお、計算時間は 2.3 節で示した計算サーバーを用いて解析を行った時に測定したものである。

表 7 質量保存式ベースの陰解法による解析結果のまとめ

No.	解析ケース名	数値解法	Courant 条件	計算時間(s)	陽解法に対する倍率	解析結果のまとめ
0	EX	陽解法	0.99(音速基準)	250	—	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
1	ImpMas-CEX	半陰解法 1	0.99(音速基準)	181	1.4	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
2	ImpMas-C001	半陰解法 1	0.1	254	1.0	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
3	ImpMas-C005	半陰解法 1	0.5	71	3.5	圧力振動がやや鈍る傾向あり
4	ImpMas-C01	準陰解法 1	1.0	35	7.1	圧力振動が鈍る傾向あり
5	ImpMas-C03	準陰解法 1	3.0	20	12.5	圧力振動が鈍る傾向あり
6	ImpMas-C05	準陰解法 1	5.0	14	17.5	圧力振動が鈍る傾向あり
7	ImpMas-C10	準陰解法 1	10.0	9	26.5	圧力振動が鈍る傾向あり
8	ImpMas-C20	準陰解法 1	20.0	6	41.9	圧力振動が鈍る傾向が強い
9	ImpMas-CEXC10	準陰解法 1	10(音速基準)	22	11.5	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
10	ImpMas-Ideal	半陰解法 1	0.99(音速基準)	160	1.6	圧力振動周期が徐々にずれてゆく傾向あり
11	ImpMas-Ideal-multi	半陰解法 1	0.99(音速基準)	222	1.1	圧力振動周期が徐々にずれてゆく傾向あり
12	ImpMas-CEXNB	半陰解法 1	0.99(音速基準)	169	1.5	圧力振動周期がずれる傾向が強い

表 8 エネルギー保存式ベースの陰解法による解析結果のまとめ

No.	解析ケース名	数値解法	Courant 条件	計算時間(s)	陽解法に対する倍率	解析結果のまとめ
0	EX	陽解法	0.99(音速基準)	250	—	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
1	ImpEng-CEX	半陰解法 2	0.99(音速基準)	170	1.5	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
2	ImpEng-C001	半陰解法 2	0.1	242	1.0	圧力振動がやや鈍る傾向あり
3	ImpEng-C005	半陰解法 2	0.5	116	2.2	圧力振動が鈍る傾向あり
4	ImpEng-C01	準陰解法 2	1.0	90	2.8	圧力振動が鈍る傾向あり
5	ImpEng-C03	準陰解法 2	3.0	36	6.9	圧力振動が鈍る傾向あり
6	ImpEng-C05	準陰解法 2	5.0	8	32.9	圧力振動が鈍る傾向あり
7	ImpEng-C10	準陰解法 2	10.0	4	55.7	圧力振動が鈍る傾向が強い
8	ImpEng-C20	準陰解法 2	20.0	3	86.0	圧力振動が鈍る傾向が強い
9	ImpEng-CEXC10	準陰解法 2	10(音速基準)	21	12.0	観測点 P3,P4 における試験データとの一致良好
10	ImpEng-Ideal	半陰解法 2	0.99(音速基準)	157	1.6	圧力振動周期が徐々にずれてゆく傾向あり
11	ImpEng-Ideal-multi	半陰解法 2	0.99(音速基準)	222	1.1	圧力振動周期が徐々にずれてゆく傾向あり

計算時間に関しては、質量保存式ベース、エネルギー保存式ベースの陰解法ともに、Courant 数が大きくなるにつれて、より高い高速化率が得られている。しかしながら、解析結果に関しては、後述(図 44, 図 45)のように、陰解法では、Courant 数が大きくなるにつれて、圧力振動鈍る傾向が強くなる。その中でも、質量保存式ベース、エネルギー保存式ベースの 2 つの準陰解法において、Courant 条件を 10.0(音速基準)とすることで、陽解法と遜色のない計算結果が得られ、かつ、計算時間が陽解法の 10 倍以上の高速化率が達成できた。以下、3.3.1 項では、Courant 条件を 10.0(音速基準)として準陰解法を使用したふたつのケースと陽解法(EX)との比較を示す。3.3.2 項以降では、流速基準の Courant 条件を使用した陰解法を基本とした結果の考察を行うために、試験結果と良く一致するケースとして、半陰解法を使用し流速基準の Courant 条件 0.1 としたケース(ImpMas-CEX, ImpEng-CEX)をその他のケースとの比較に使用する。

3.3. 解析結果

3.3.1. Courant 条件 10.0(音速基準)とした準陰解法と陽解法による解析結果と試験結果との比較

Courant 条件を 10.0(音速基準)として準陰解法を使用したふたつのケースでは、陽解法と遜色のない計算結果が得られ、かつ、計算時間が陽解法の 10 倍以上の高速化率が達成できた。図 38 に質量保存式ベースの準陰解法 1(ImpMas-CEXC10)と陽解法(EX)による解析結果、試験結果との比較を示す。太線は準陰解法 1(ImpMas-CEXC10)、細線は陽解法(EX)、四角のマーク(□)で試験結果を表している。全体的に、陰解法、陽解法ともに、解析結果は圧力伝播試験結果をよく再現していることが確認できる。バルブ遮断後の、観測点 P2、P5 における圧力の定常値は、解析と実験で結果が異なっている。これは解析のモデル化において、タンク出口や計測器における流路形状などの影響を、簡略化しているために生じているものと考えられる。

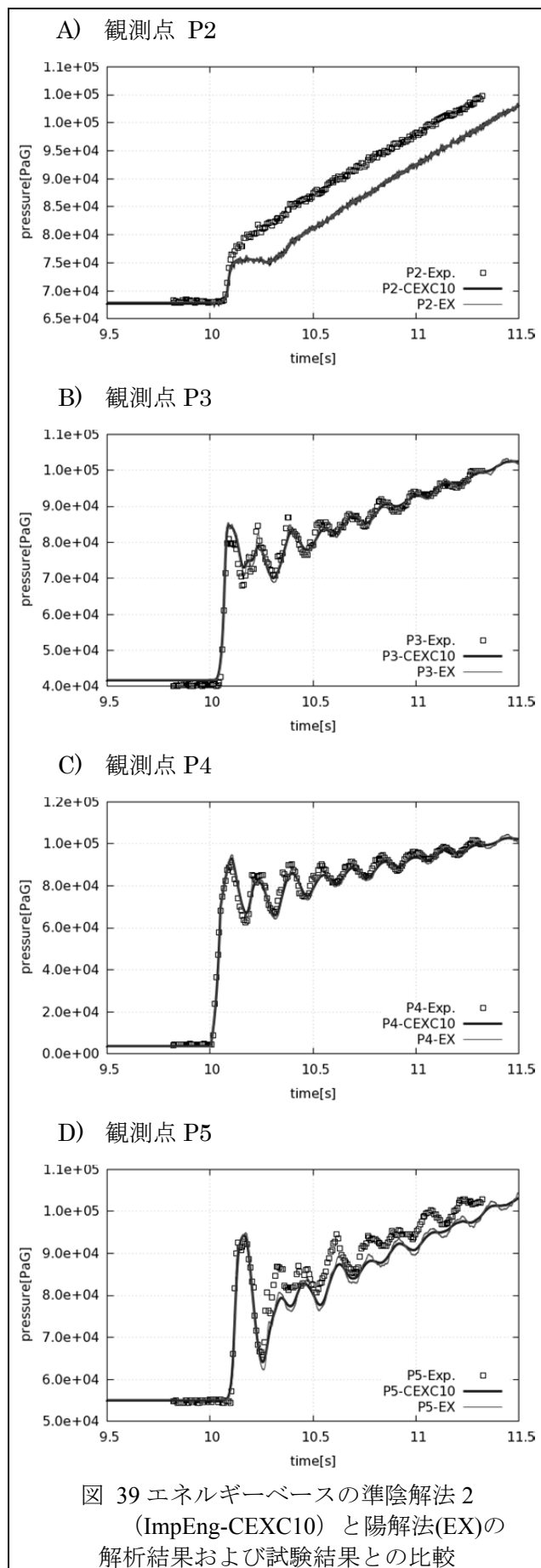
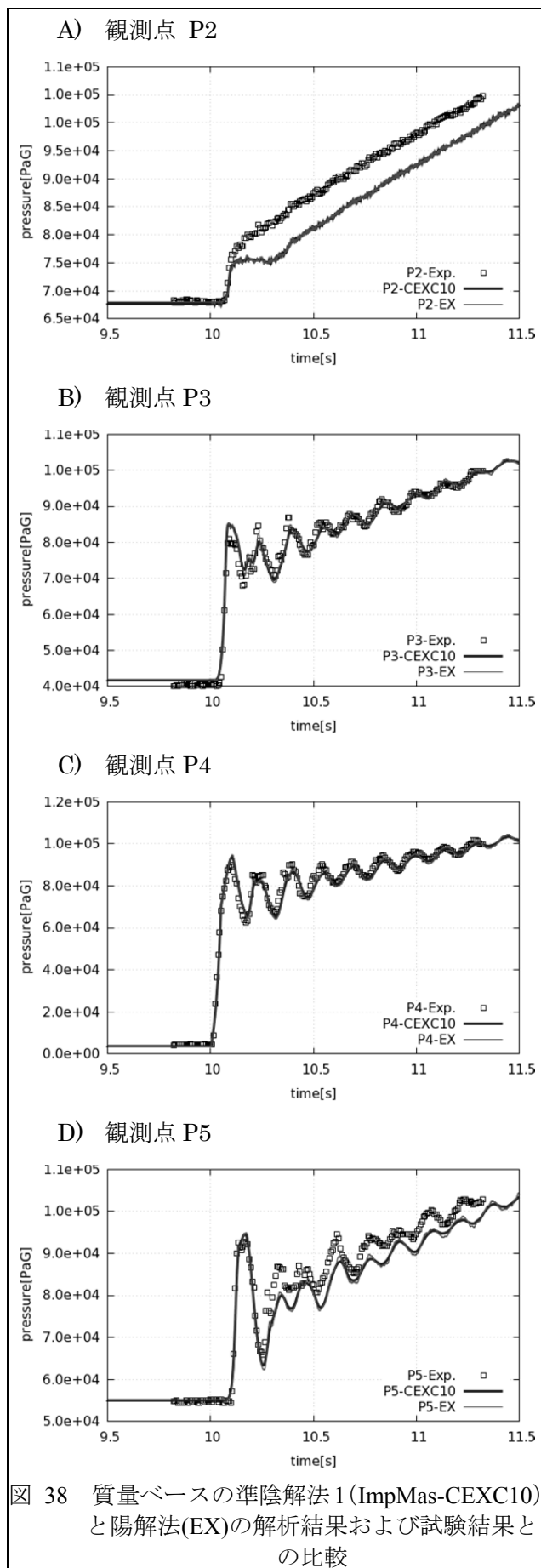
図 39 にエネルギー保存式ベースの準陰解法

2(ImpEng-CEXC10)と陽解法(EX)による解析結果、試験結果との比較を示す。太線は準陰解法 2(ImpMas-CEXC10)、細線は陽解法(EX)、四角のマーク(□)で試験結果を表している。全体的に、陰解法、陽解法ともに、圧力伝播試験結果をよく再現していることが確認できる。

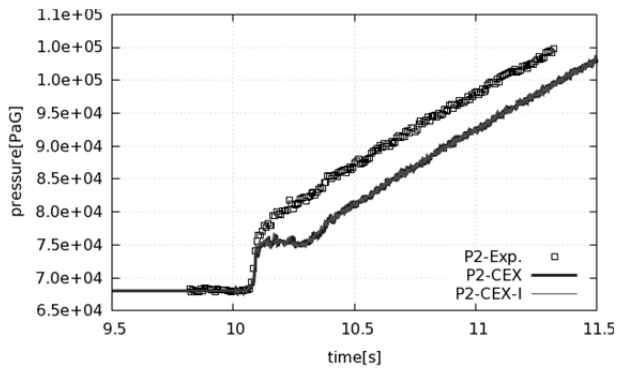
3.3.2. 流体物性の取り扱いの違いによる解析結果の比較

これまでは、流体物性を実在気体とした場合の解析結果について示した。ここでは、流体物性を理想気体の空気として取り扱った場合(ImpMas-CEX_I)と、モル分率で窒素 78.12%、酸素 20.96%、アルゴン 0.92%の成分比の混合気体とし、それぞれの気体は理想気体の状態方程式に従うとして取り扱った場合(ImpMas-CEX_IM)と、実在気体(ImpMas-CEX)とした場合の比較を行った。Courant 数は、いずれのケースでも 0.99(音速基準)とした。以下、理想気体の空気、もしくは窒素・酸素・アルゴンの理想気体の混合気体として取り扱った場合の解析結果は太線、流体物性を実在気体とした場合の結果は細線、試験結果は四角のマーク(□)で表している。

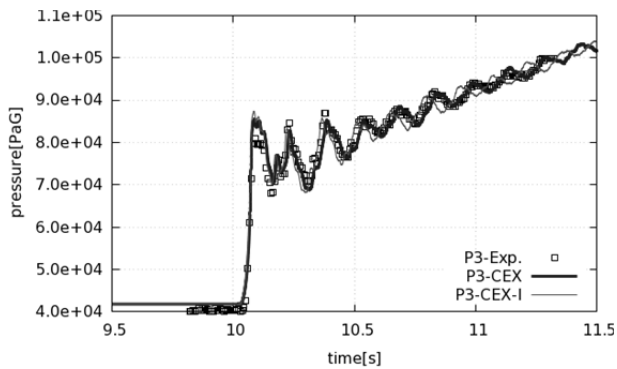
図 40 に理想気体の空気の状態方程式を使用した解析(ImpMas-CEX)と実在気体の空気物性を使用した解析(ImpMas-CEX)との比較、図 41 に窒素・酸素・アルゴンの理想気体の混合気体として取り扱った場合の解析(ImpMas-CEX)と実在気体の空気物性を使用した解析(ImpMas-CEX)との比較を示す。理想気体として取り扱った場合 ImpMas-CEX_I と ImpMas-CEX_IM は、観測点 P3～P5 における圧力の振動周期に、実験とのずれが認められるのに対し、実在気体の物性を使用した解析 ImpMas-CEX では、振動周期は実験とよく一致している。



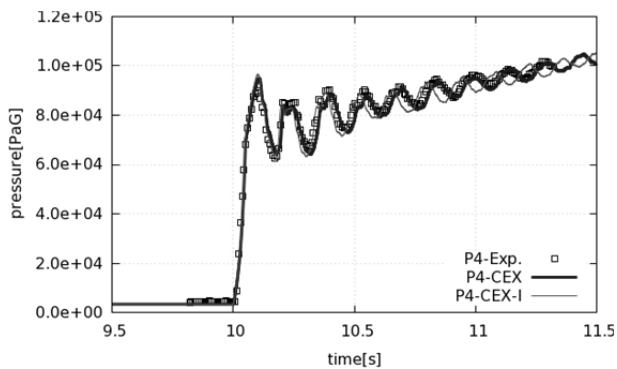
E) 観測点 P2



F) 観測点 P3



G) 観測点 P4



H) 観測点 P5

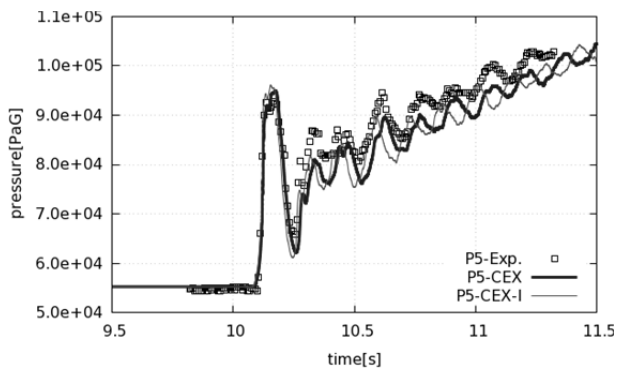
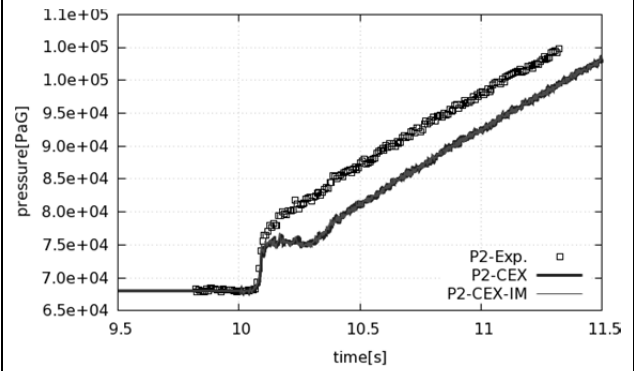
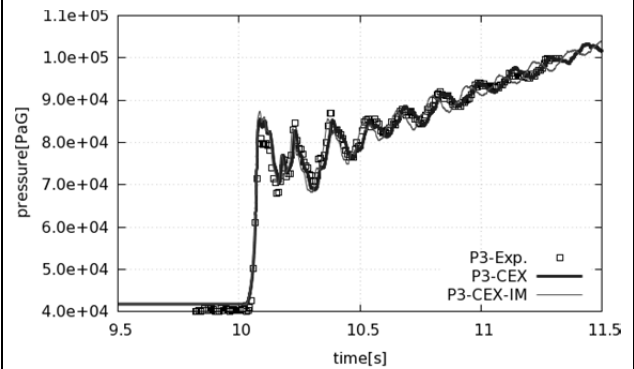


図 40 流体物性が実在気体(ImpMas-CEX)と理想気体(ImpMas-CEX_I)の場合および試験結果との比較

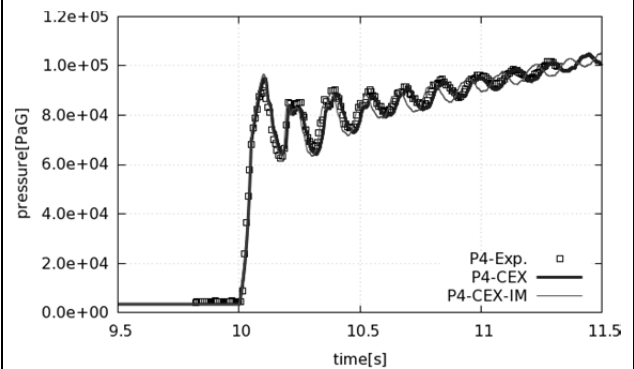
D) 観測点 P2



J) 観測点 P3



K) 観測点 P4



L) 観測点 P5

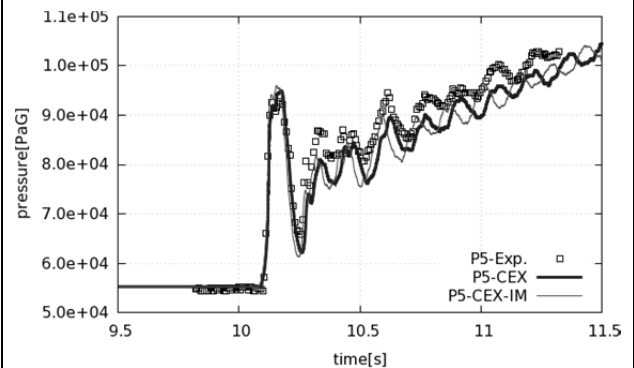


図 41 流体物性が実在気体(ImpMas-CEX)と混合理想気体(ImpMas-CEX-IM)の場合および試験結果との比較

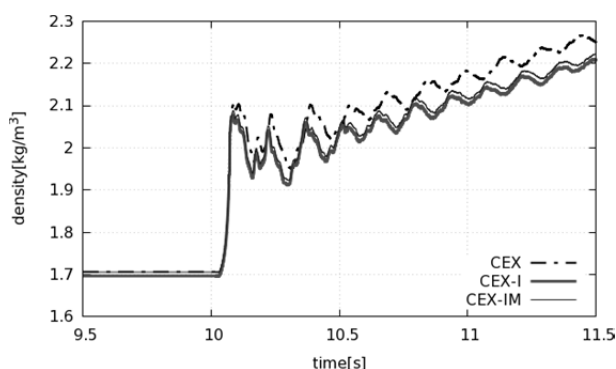


図 42 流体物性が実在気体(ImpMas-CEX)、理想気体(ImpMas-CEX_I)、混合理想気体(ImpMas-CEX_IM)の場合の観測点 P3 における密度変化の比較

図 42 に観測点 P3 における、ImpMas-CEX、ImpMas-CEX_I、ImpMas-CEX_IM の密度変化の比較を示す。実在気体の物性を使用した解析 ImpMas-CEX に比べて、理想気体として計算している ImpMas-CEX_I、ImpMas-CEX_IM とともに密度は小さく、時間が経つにつれて差が広がっていることが分かる。密度が小さいので、音速が速くなり、圧力伝播が速くなるため、圧力伝播の振動周期が小さくなっていることは、図 40 と図 41 の比較から分かる。このことは、数値解析において、流体物性に実在気体の物性値を使用することの重要性を示唆している。

ここでは、質量保存式ベースの半陰解法 1 の計算結果を取り上げたが、エネルギー保存式ベースの半陰解法 2 の計算結果 (ImpEng-CEX, ImpEng-CEX_I, ImpEng-CEX_IM) でも同様の傾向を確認している。

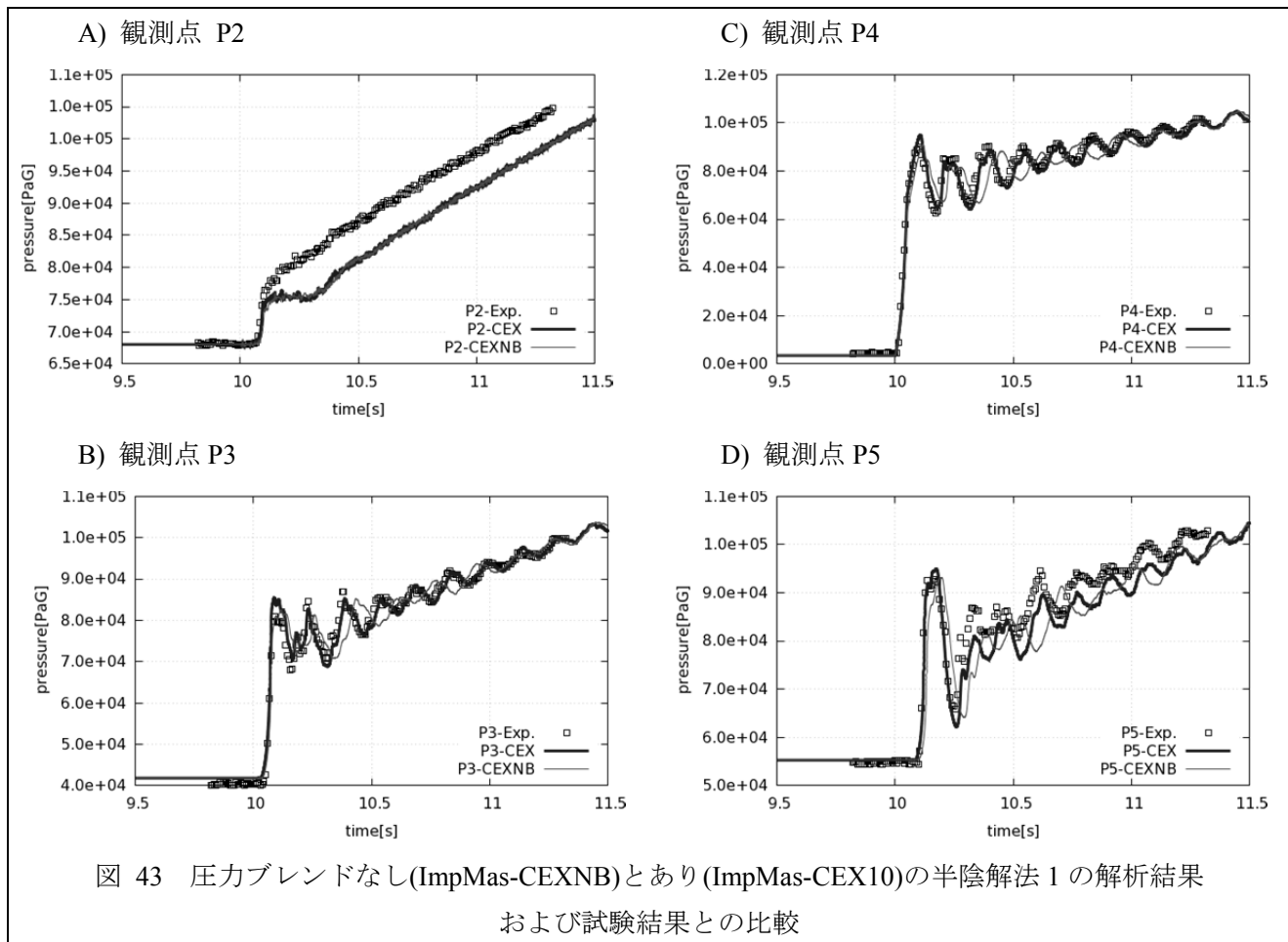
3.3.3. 陰解法における圧力ブレンド法を使用しない場合の解析結果

陰解法は、質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解くことにより、時間刻み幅の音速制限を取り除いて、圧力、密度、流速を求める方法である。この場合、エネルギー保存式は、圧力、密度、流速を求めた後に個別に解かれるため、圧力、密度とエネルギーの結びつきが弱く、圧力や温度の変化が実際と異なる結果となる場合が見受けられる。圧力ブレンド法は、圧力、密度とエネルギーの結びつきを強くしつつ、計算精度を高めるた

めに開発された方法であり、圧力 Poisson 方程式を解いて得られた圧力と状態方程式から得られた圧力をブレンドして、その時刻の圧力とする方法である。なお、圧力ブレンド法については、本誌掲載のレポート[1]を参照されたい。

本解析では、半陰解法や準陰解法を使用する場合、圧力ブレンド法を標準的に使用している。圧力ブレンド法を使用しない半陰解法 1 (ImpMas-CEXNB) と、圧力ブレンドを使用した半陰解法 1 (ImpMas-CEX)、および試験結果との比較結果を図 43 に示す。

太線は圧力ブレンド法を使用しない半陰解法 1 (ImpMas-CEXNB)、細線は圧力ブレンドを使用した半陰解法 1 (ImpMas-CEX)、四角のマーク(□)で試験結果を表している。圧力ブレンド法を使用しない場合は、振動周期のずれが顕著であるのに対し、圧力ブレンド法を使用した半陰解法では、振動周期が試験結果と良く一致している。



3.3.4. 質量保存式ベースの陰解法による解析結果と実験結果との比較

図 44 に、質量保存式ベースの陰解法による解析結果と試験結果の圧力変化を、観測点 P3 で比較して示す。解析結果は実線、試験結果は四角のマークで示されている。Courant 数が音速基準の CEX では、試験結果が良く再現されている。Courant 数が流速基準の場合 (ImpMas-C001、ImpMas-C005、ImpMas-C01、ImpMas-C03、ImpMas-C05、ImpMas-C10、ImpMas-C20) を見ると、Courant 数が大きくなるにつれて、圧力振動が鈍る傾向があることが分かる。ただし、Courant 数を大きくとった解析においても、圧力振動が鈍くなり振れ幅は小さくなる傾向があるものの、バルブ遮断後の全体的な圧力変化の傾きは試験結果と良く一致していることが分かる。

3.3.5. エネルギー保存式ベースの陰解法による解析結果と実験結果との比較

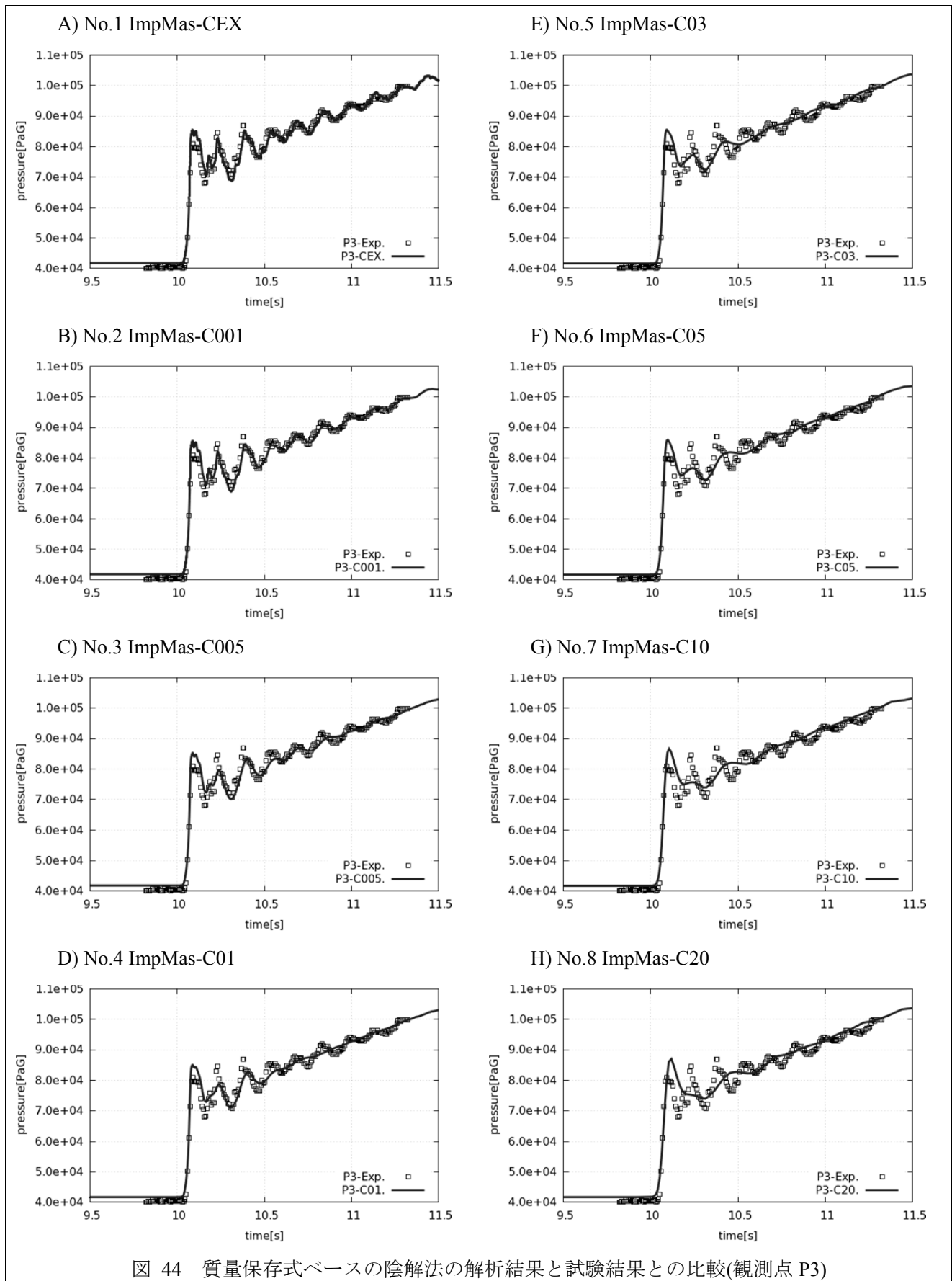
図 45 に、エネルギー保存式ベースの陰解法による解析結果と試験結果の圧力変化を、観測点 P3 で比較して示す。解析結果は実線、試験結果は四角のマークで示されている。Courant 数が音速基準の CEX では、試験結果が良く再現されている。Courant 数が流速基準の場合 (ImpEng-C001、ImpEng-C005、ImpEng-C01、ImpEng-C03、ImpEng-C05、ImpEng-C10、ImpEng-C20) を見ると、Courant 数が大きくなるにつれて、圧力振動が鈍る傾向があることが分かる。また、質量保存式ベースと比べて、圧力振動が鈍る傾向が強いことが分かる。ただし、エネルギー保存式ベースの陰解法においても、前節と同様に、Courant 数を大きくとった場合に、圧力振動が鈍くなり振れ幅は小さくなる傾向があるが、バルブ遮断後の全体的な圧力変化の傾きは試験結果と良く一致していることが分かる。

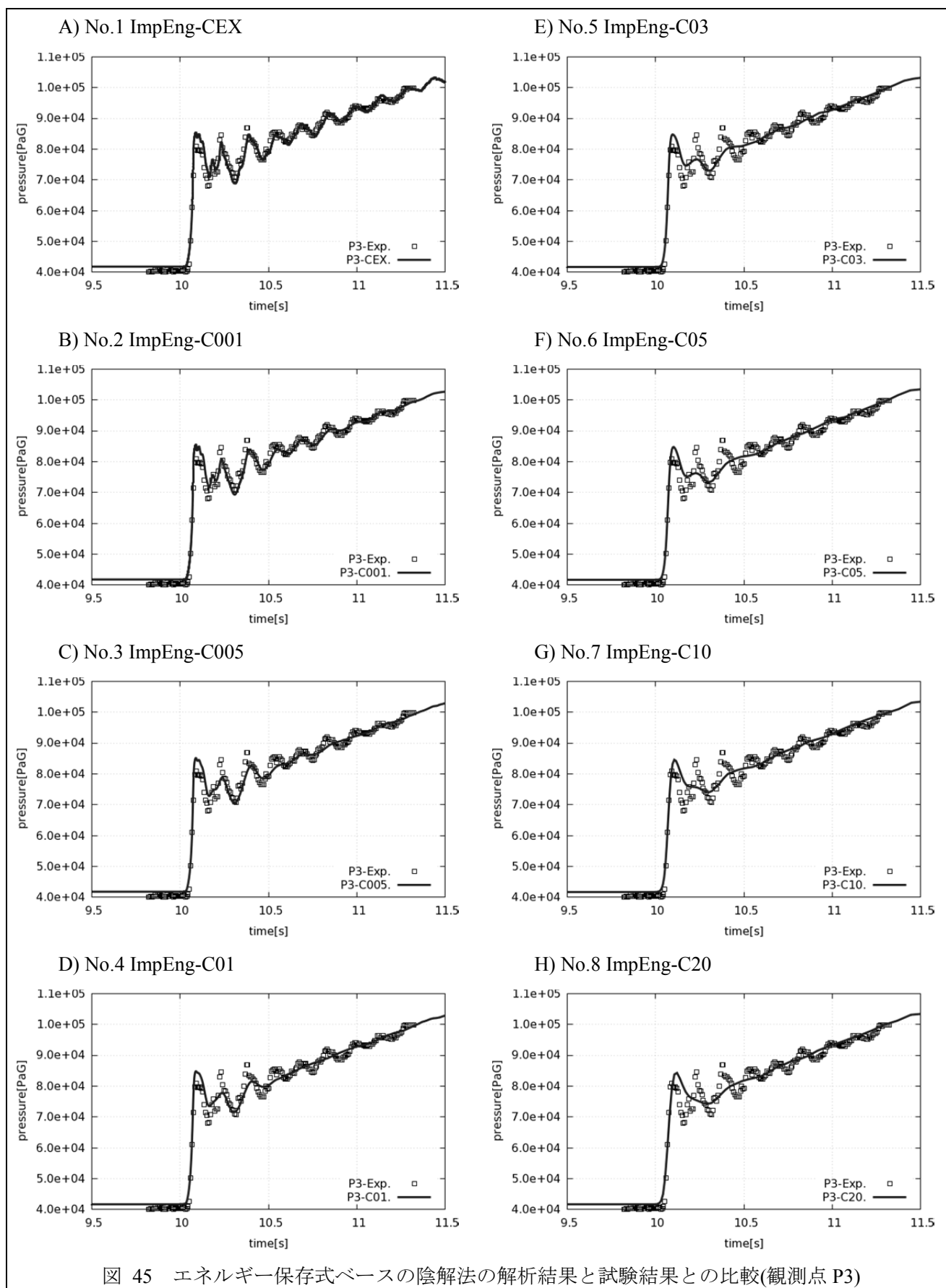
3.4. バルブ閉鎖時の圧力伝播試験解析のまとめ

Advance/FrontNet/T を使用して、陽解法、陰解法による圧力伝播試験解析を行った。質量保存式ベース、エネルギー保存式ベースの2つの陰解法で Courant 条件を 10.0(音速基準)とすることで、陽解法と遜色のない計算結果が得られ、10 倍以上の計算時間の高速化が達成できた。

理想気体の状態方程式を使用した解析では、圧力振動周期が試験結果より小さく計算されることが明らかになった。これは、理想気体の状態方程式を使用した解析において、密度変化が過小評価されることに起因している。一方、実在気体の物性値を使用した解析では、実際の圧力伝播試験の圧力振動周期が良く再現されることが分かった。

圧力ブレンド法を使用しない解析との比較では、圧力ブレンド法を適用することで、実際の圧力伝播試験の圧力振動周期と良く一致することが確認できた。





4. まとめ

本稿では、衝撃波管問題や実際の管路系における圧力伝播試験の結果を取り上げ、従来の陽解法と陰解法を使用した数値解析を行った。

2つの例題における同様の傾向として、陰解法を使用した解析では、陽解法に比べて高速に解析ができることが分かった。これは、Courant 数を大きくとれ、かつ、Courant 数の特性速度を流速基準とすることができることに起因している。また、陰解法で Courant 数を大きくしていくと、圧力振動が鈍る傾向が見られた。陰解法を使用した数値解析では、計算時間の高速化を図りながら、問題に応じて、要求される精度を確保することが要となる。

また、圧力伝播試験解析の結果から、実際の試験結果を再現するためには、流体物性に実在気体の物性を使用することの重要性や圧力ブレンド法の適用の妥当性が確認できた。

本稿では、陰解法を使用した解析において、実在気体の物性、圧力ブレンド法を用いることで、厳密解のある衝撃波管問題や、実際の圧力伝播試験解析を、高精度により高速に解析できるようになることを示した。これらの方法を使用して、プラントや、ビル等の施設における実際の解析も同様に行うことができるものと考えられる。また、Advance/FrontNet/T は、制御バルブや送風機などの流体機器や、固体の熱伝達解析との連成機能も備えており、複雑な分岐や合流、ループのある管路系の解析にも適用が可能である。今後、流体機器モデルや、固体熱伝達解析が含まれる、より大規模な数値解析が必要とされる問題にも、適用してゆきたい。

参考文献

- [1] 秋村, 大須賀, 三橋, “管路系流体解析ソフトウェアへの陰解法導入による計算効率の向上性検討”, アドバンスシミュレーション vol.24 (2017).
- [2] Hirsch, C., “Numerical Computation of Internal and External Flows (Vol.2: Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows)”, A

WileyInterscience Publication (1992).

- [3] REFPROP, <https://www.nist.gov/srd/refprop>

※ 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。)