

液体管路系・等温管路系への適用性検討

秋村 友香* 大須賀 直子* 三橋 利玄*

Applicability Study on Liquid Pipeline and Isothermal Pipeline Systems

Yuka Akimura*, Naoko Ohsuka* and Toshiharu Mitsuhashi*

Advance/FrontNet/T は、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たが、実在流体の物性データを使用することにより、ガスの他、液体や超臨界流体も解析可能である。そこで、液体管路系解析の事例を取り上げ、陰解法の導入によって液体管路系の解析時間が飛躍的に向上したことを報告する。また、温度変動が少ない管路系では、等温を仮定して解析を行う方が効率的な場合がある。本誌掲載のレポート「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」で取り上げた解析事例について等温を仮定して解析を行い、等温管路系に対する適用性を確認した。

Key word: 管路系、流体解析、液体管路系、等温管路系、陰解法、高速化、Advance/FrontNet/T

1. はじめに

Advance/FrontNet/T は、管路系流体解析ソフトウェアのひとつで、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ており、実在流体の物性データを有していることから、ガスの他、液体や超臨界流体の解析も可能である。液体の場合、ガスに比べて音速が大きいため、陽解法を実規模の液体管路系に適用すると計算時間が膨大になり効率が悪い。そこで、Advance/FrontNet/T に新しく導入した陰解法を用いて、液体管路系解析に適用し、解析精度とともに計算効率の向上の検討を行った。

また、温度変動が少ない管路系では、等温を仮定して解析を行う方が効率的な場合がある。本誌掲載のレポート「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」で取り上げた解析事例について、等温を仮定して解析を行い、ガス系について等温管路系に対する適用性を検討した。本稿では、液体管路系と等温管路系に対して実施した解析の適用性や計算時間を報告する。

2. 液体管路系解析

液体の場合、ガスに比べて音速が大きいため、陽解法を実規模の液体管路系に適用すると計算時間が膨大になる。例えば、空気や都市ガス 13A(CG13A)の音速は、それぞれ 340m/s、390m/s であるのに対して、液体では、水、液化 CG13A、液体ナトリウムは、それぞれ 1,500m/s、1,000m/s、2,500m/s とガスに比べて 3 倍から 7 倍速い[1][2]。ただし、水素のように、20K の液体水素の音速が 1,100m/s に対して、常温の水素の音速が 1,300m/s とガスの方が大きい物質も存在する[1]。

本誌掲載のレポート「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」にあるように、Advance/FrontNet/T に新しく導入した陰解法の中で、質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解く陰解法は、基本的には圧力・密度・流速の計算とエネルギー・温度の計算を分離した計算方法を採用しているので、液体解析にも向いている。逆にエネルギー保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解く陰解法では、強圧縮性流体にも適用できるようにしていることもあって液体解析に不向きである。

そこで、陽解法と、質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解く陰解法である半陰解法 [1][7]

*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

と準陰解法 1[7]を液体管路系解析に適用して、解析精度と計算効率の向上について検討を行った。本章では、液体管路系解析の検討結果を報告する。

なお、半陰解法 1 と準陰解法 1 を液体管路系解析に適用するにあたって、次の改良を行った。

第一に、圧力ブレンド法をオプション化し、液体管路系解析では圧力ブレンド法を適用しないようにした。

次に、圧力・密度・流速の計算とエネルギー・温度の計算を分離することによって、エネルギー・温度の計算がパッシブスカラーの計算と同様になってしまい、流量が一定で温度変化がある場合では、密度がほとんど変化しないという不具合が生じた。そこで、液体管路系で圧力・密度・流速の計算とエネルギー・温度の計算を結びつけるために、圧力とエネルギーから実在流体の物性データテーブルを用いて密度を求め直すように改良を行った。ただし、この方法は液体管路系に限られ、ガス管路系の解析には不向きであった。

2.1. 単一管路温度輸送解析

単一管路温度輸送解析の管路系モデルと解析条件を図 1 に示す。また、解析ケースの一覧を表 1 に示す。

初期に 20℃の水が管路に存在し、流速 2.0m/s に相当する流量の定常状態であるとし、流入側の境界の温度が瞬時に上昇したときの管路内温度の上昇過程の解析を行った。長さ 1,000m の管路を 1,000 分割し、解析は 500 秒まで行い、200m、400m、600m、800m 地点での温度変化や密度変化の比較検討を行った。

解析は、数値解法を陽解法、半陰解法 1、準陰解法 1 とした 3 ケースに対して実施し、解析に要した計算時間についても比較検討を行った。なお、計算時間は表 2 の計算サーバーを用いて解析を行い測定したものである。

3 ケースの解析に要した計算時間を表 3 に示す。2 つの陰解法による解析では、陽解法の 40 倍以上の速さで計算でき、液体管路系に対する陰解法の計算効率が非常に良いことが分かる。

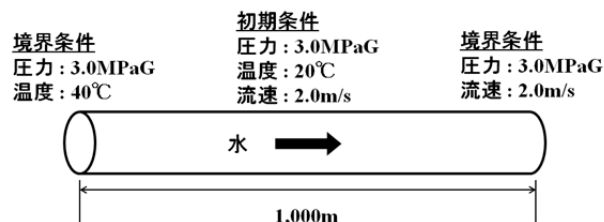


図 1 管路系モデルと解析条件

表 1 解析ケース一覧

No.	ケース名	数値解法	Courant 条件
1	WEXP	陽解法	0.5 (音速基準)
2	WImp2	半陰解法 1	0.5 (流速基準)
3	WImp4	準陰解法 1	1.0 (流速基準)

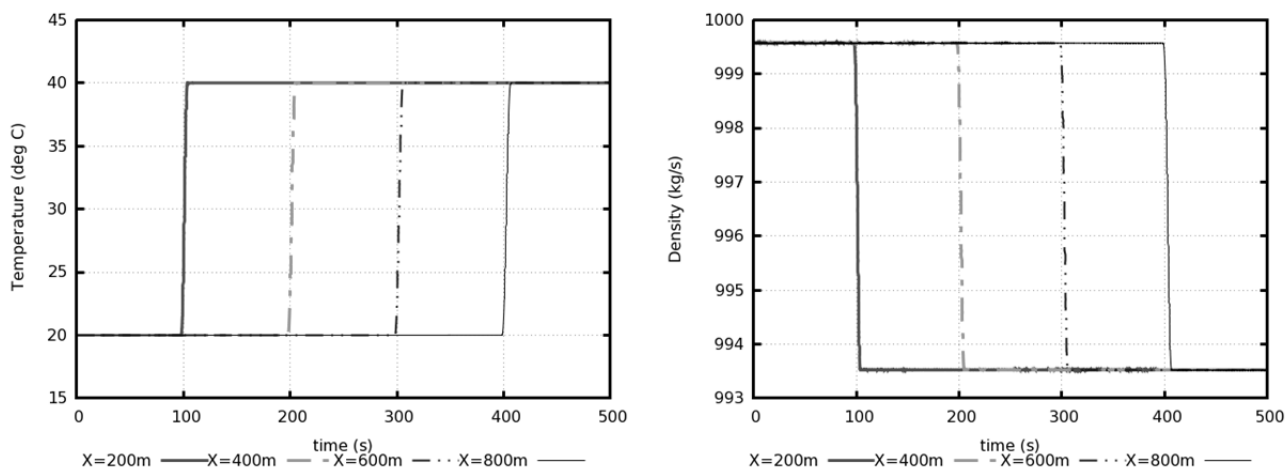
表 2 解析に用いた計算サーバー

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

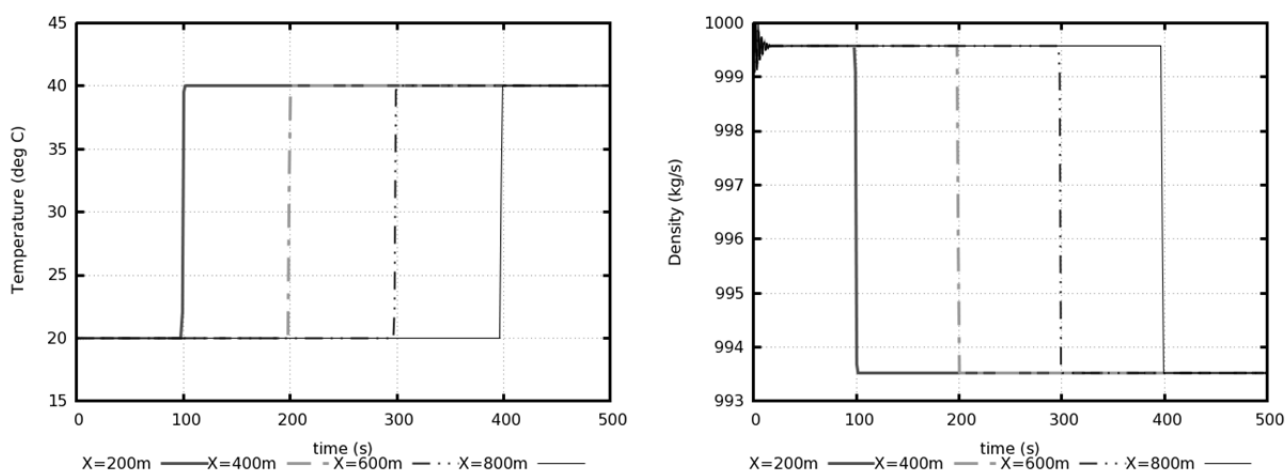
表 3 解析ケースの計算時間一覧

No.	ケース名	計算時間 (s)	陽解法に対する高速化倍率
1	WEXP	4870	—
2	WImp2	121	40
3	WImp4	64	76

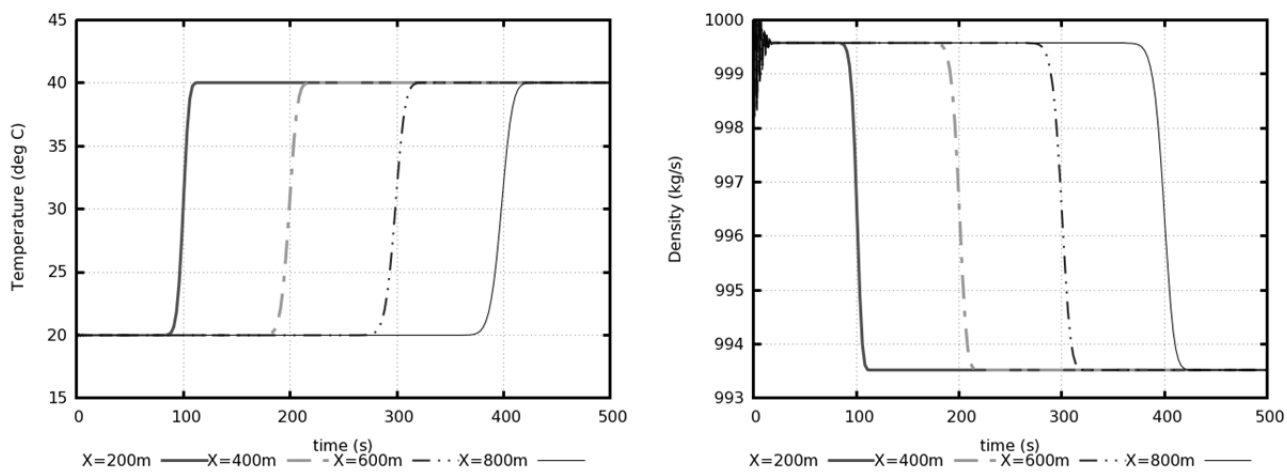
解析結果を図 2 に示す。流速が 2.0m/s なので、温度 40℃の水は 100 秒で 200m 進んで温度が 20℃から 40℃に上昇し、それに応じて密度が減少しており、いずれの解析結果も妥当といえる。半陰解法 1 を用いた解析ケース WImp2 がもつともシャープに変化しており、準陰解法 1 を用いた解析ケース WImp4 は数値拡散によってやや鈍った変化を示している。準陰解法 1 を用いた場合でも、Courant 条件を小さくすれば、陽解法並みのシャープな変化となる解析結果が得られる。



(1)陽解法(WEXP)



(2)半陰解法 1(WImp2)



(3)準陰解法 1(WImp4)

図 2 温度変化と密度変化 (単一管路温度輸送解析)

2.2. 熱交換器を有する液体管路系解析

解析に用いた管路系解析モデルを図 3 に示す。管路系は、2 つのループ状の管路系と 3 つの熱交換器から成り、流体として、水、熱媒体（合成油）[3]、液体ナトリウムの 3 種類を用いた。水の物性は、REFPROP[1]を用いて算定し、液体ナトリウムの物性は文献[2][4]に基づいて算出した。ただし、液体ナトリウムの物性[2][4]は温度のみに依存しているため、体積弾性率 6.3GPa[5]を用いて、密度の圧力依存性を考慮した。2 つの管路系ループの全長は 44m とし、管路系全体で 104m とした。熱交換器の伝熱管の長さを 6m とし、伝熱管の形状については文献[6]に準じた。

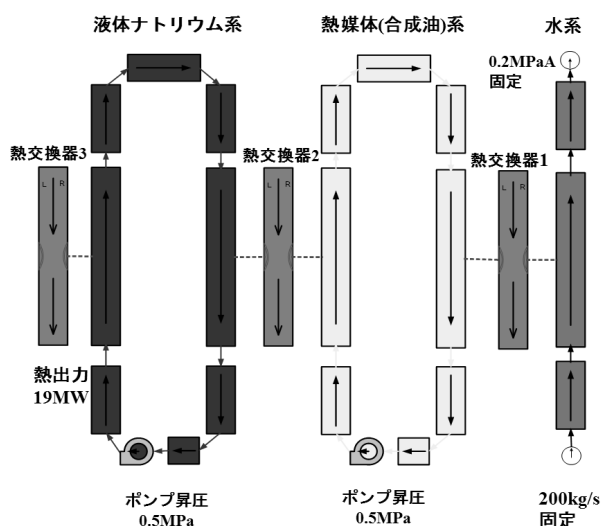


図 3 熱交換器を有する液体管路系解析モデル

熱出力として与えた 19MW は熱交換器 3 を介して液体ナトリウムの管路系ループに与えられ、この管路系ループにあるもう 1 つの熱交換器 2 を介して熱媒体の管路系ループへと熱が伝えられる。最終的には、熱媒体の管路系ループにあるもう 1 つの熱交換器 1 を介して、水管路系に熱が伝えられる。通常運転状態では、水管路系は流量 200kg/s、圧力 200kPa から 240kPa に対して、温度は 280K から 303K に上昇し、熱媒体の管路系ループでは、ループ流量 48.6kg/s、圧力 142kPa から 640kPa に対して、304K から 504K の温度範囲となった。さらに液体ナトリウムの管路系ループでは、ループ流量 317kg/s、圧力 132kPa から 615kPa に対

して、504K から 556K の温度範囲となった。いずれも熱出力 19MW と熱収支は一致している。

解析では、通常運転状態から水管路系の流量が 200kg/s から 50kg/s に異常低下したときの管路系全体の過渡応答の検討を行った。

表 4 主要な解析条件一覧

No.	項目	内容
1	全長	104 [m]
2	配管径	0.2[m]
3	格子分割数	104
4	熱交換器	文献[6]に準じる
5	管摩擦係数	Churchill の式
6	境界条件	図 3 のとおり
7	流体	水、熱媒体（合成油）[3]、液体ナトリウム
8	対流項の差分スキーム	1 次風上差分法
9	数値解法	半陰解法 1 / 準陰解法 1
10	解析時間	-30,000~30,000 秒 (-30,000~0.0 秒は定常計算)
11	Courant 条件	半陰解法 1: 0.5 (流速基準) 準陰解法 1: 1.0-10.0 (流速基準)
12	その他	断熱条件

表 5 解析ケース一覧

No.	解析ケース名	数値解法	Courant 条件
1	LQImp2	半陰解法 1	0.5 (流速基準)
2	LQImp4C01	準陰解法 1	1.0 (流速基準)
3	LQImp4C05	準陰解法 1	5.0 (流速基準)
4	LQImp4C10	準陰解法 1	10.0 (流速基準)

表 6 解析ケースの計算時間一覧

No.	ケース名	Courant 条件	計算時間 (s)
1	LQImp2	0.5 (流速基準)	436
2	LQImp4C01	1.0 (流速基準)	302
3	LQImp4C05	5.0 (流速基準)	95
4	LQImp4C10	10.0 (流速基準)	64

各解析ケースの計算時間を表 6 に示す。なお、計算時間は、2.1 節の表 2 と同じ計算サーバーを用いて解析を行い測定した。解析全体として 60,000 秒を計算しているが、解析に要した計算時間は最大で 436 秒であり、効率よく計算できている。

仮に陽解法を用いて解析を行った場合、2.1 節の実績から計算時間を推定すると、半陰解法 1 に対して 40 倍の計算時間を要し、液体ナトリウムの音速が水の 1.7 倍程度のため、時間刻み幅が 1.7 分の 1 程度となり、都合 68 倍の計算時間を要することになる。これから陽解法では、おおよそ 8.2 時間の計算時間が掛かることになる。

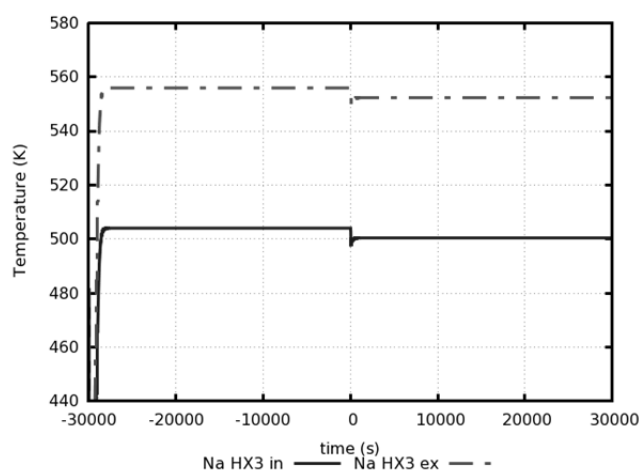
4 ケースの解析結果を比較したものを図 4～図 9 に示す。水管路系の流量が時刻ゼロ秒で 1/4 まで低下すると、熱交換器出口温度は 303K から 372K に上昇し静定する。熱交換器出入口の温度差は 23K から 92K と 4 倍上昇し、流量が 1/4 に低下したのと整合が取れている。なお、水の沸点は 200kPa で 393K 程度なので、沸騰まで至っていない。4 ケースの解析結果では、流量変化は同様であり、熱交換器出入口温度変化は、準陰解法 1 において、Courant 数を大きくすると、初期の温度の立ち上がりがゆっくりとなることや、時刻ゼロ秒での流量低下に伴った温度上昇において、若干オーバーシュートして静定すること以外は全体としては同様の変化を示している。

液体ナトリウム管路系の流量はほとんど変化せず、熱交換器出入口温度は時刻ゼロ秒での水の流量低下に伴って熱媒体温度が若干の温度低下する影響が見られるだけで、全体として時刻ゼロ秒での水の流量低下の影響は小さい。4 ケースの解析結果では、流量変化は同様である。半陰解法 1 と Courant 数を 1.0 とした準陰解法 1 の熱交換器出入口温度変化は、時刻ゼロ秒での水の流量低下後、若干のアンダーシュートが見られ、その後わずかに低下したところで静定する。準陰解法 1 で Courant 数を 5.0、10.0 と大きくすると、時刻ゼロ秒での水の流量低下後、時間遅れを持ってわずかに低下したところで静定する。その他として、準陰解法 1 において、Courant 数を大きくすると初

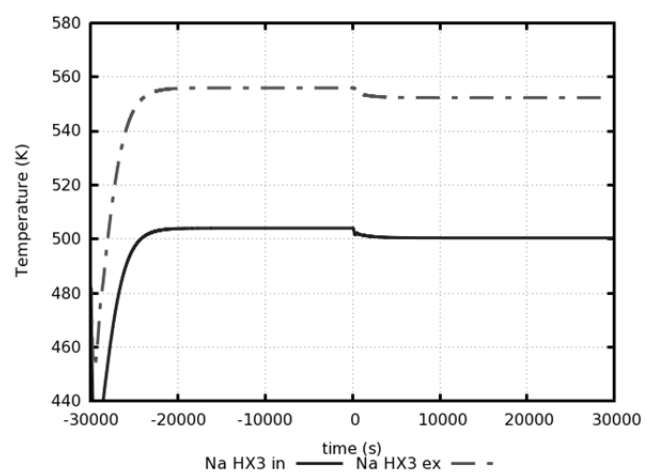
期の温度の立ち上がりがゆっくりとなる違いが見られるが、全体としては同様の変化を示している。

熱媒体の管路系では、水側熱交換器出口と液体ナトリウム側熱交換器出口の温度は、それぞれに接している管路系の温度に支配される。水側熱交換器出口温度は、時刻ゼロ秒での水の流量低下に伴って水管路系温度の上昇に沿って大きく上昇し、液体ナトリウム側熱交換器出口温度は、液体ナトリウム管路系温度変化と同様にわずかに低下するだけに留まる。液体ナトリウム管路系からの伝熱量は変わらないので、温度差が小さくなったことの引換に、熱媒体の管路系流量は大きくならざるを得ない結果となる。4 ケースの解析結果では、流量変化は同様である。初期の温度の立ち上がりや時刻ゼロ秒での流量低下に伴った温度上昇は、水管路系や液体ナトリウム管路系で述べたのと同様に、半陰解法 1 と準陰解法 1 で違いが見られるが、全体としては同様の変化を示している。

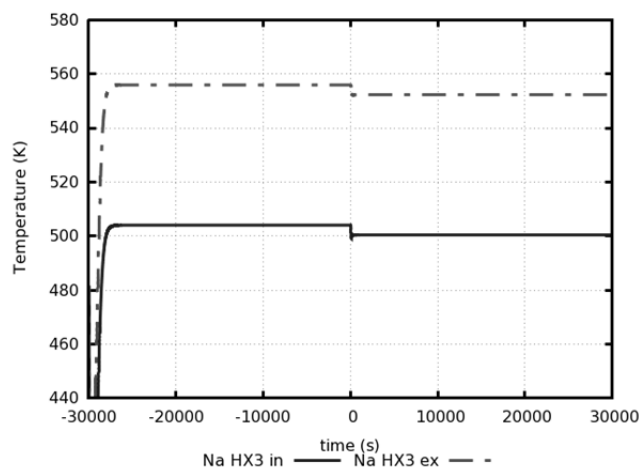
半陰解法 1 を用いた解析で得られた温度分布の履歴を図 10～図 13 にコンター図としてまとめた。異常発生前は図 10 に示したような定常状態となっている。熱交換器 1 は液体ナトリウムによって冷却され、液体ナトリウムは温度が 550K 程度まで上昇している。熱交換器 2 によって液体ナトリウムは熱を奪われ、熱媒体は熱を得ている。熱交換器 2 内の径方向にも温度分布がついていることが確認できる。熱交換器 3 では、熱媒体が熱を奪われ、水は 23K の温度上昇となっている。図 11 は水流量の異常低下が起こってから 36 秒後の温度分布である。水の流量が低下したことにより冷却能力が低下し、熱媒体温度が上昇している。図 12 は水流量の異常低下が起こってから 80 秒後の温度分布である。熱媒体や水の温度は 400K 前後となる場所が増えていることが分かる。図 13 は水流量の異常低下が起こってから 715 秒後の温度分布である。水系と熱媒体系の温度変化は大きく、液体ナトリウム系の温度変化が小さいことが分かる。



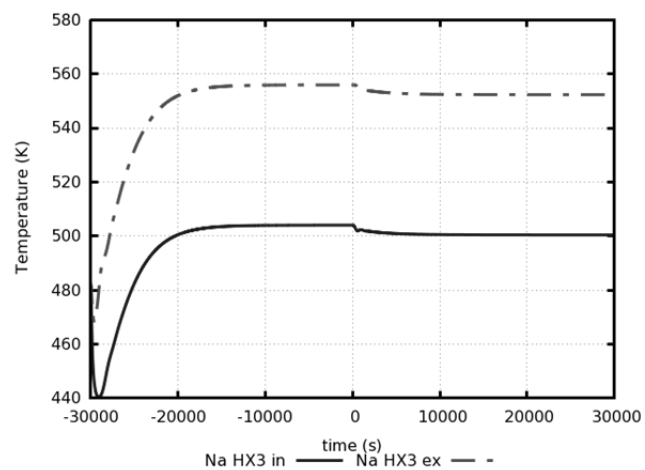
(1)半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3)準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)

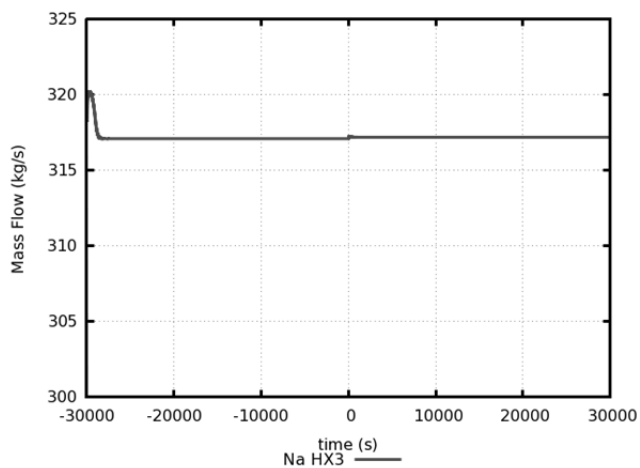


(2)準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)

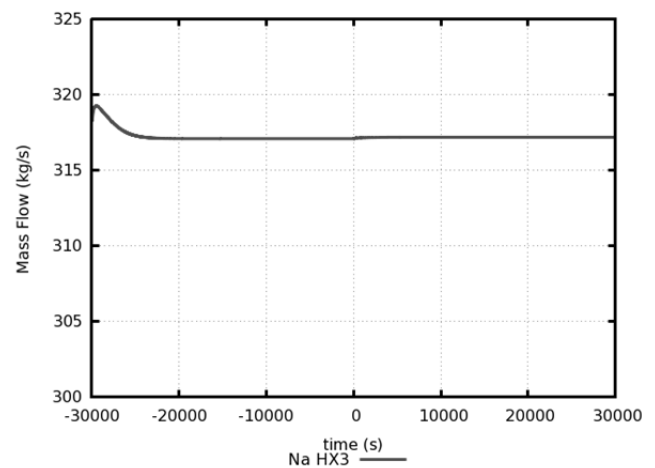


(4)準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

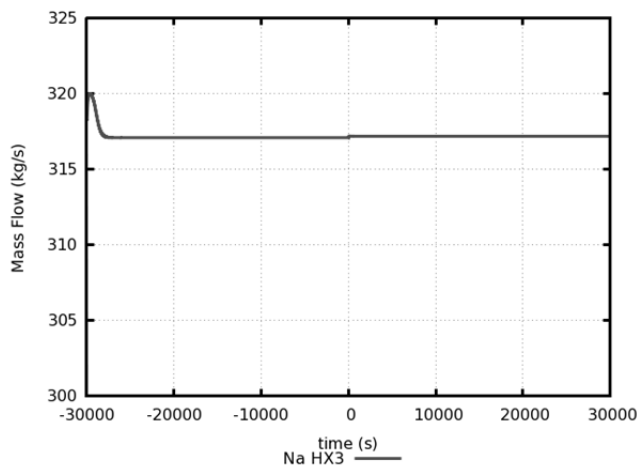
図 4 液体ナトリウム管路系熱交換器 1 出入口温度変化



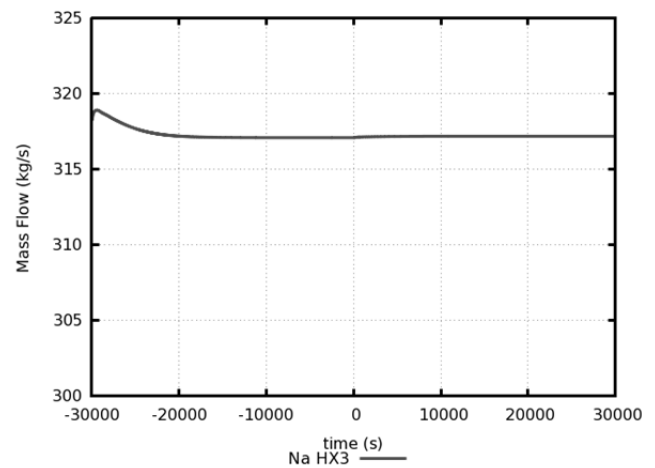
(1)半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3)準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)

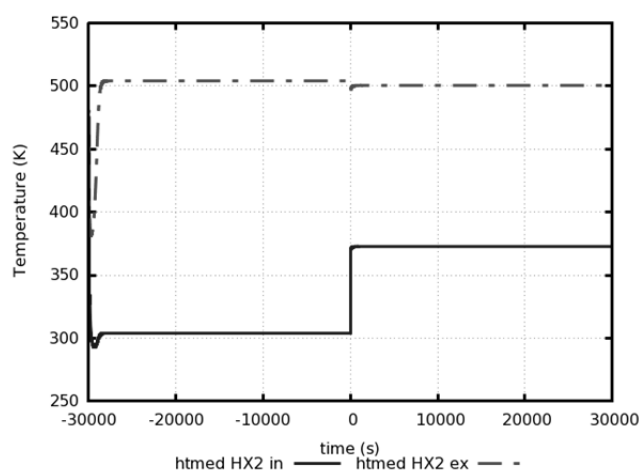


(2)準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)

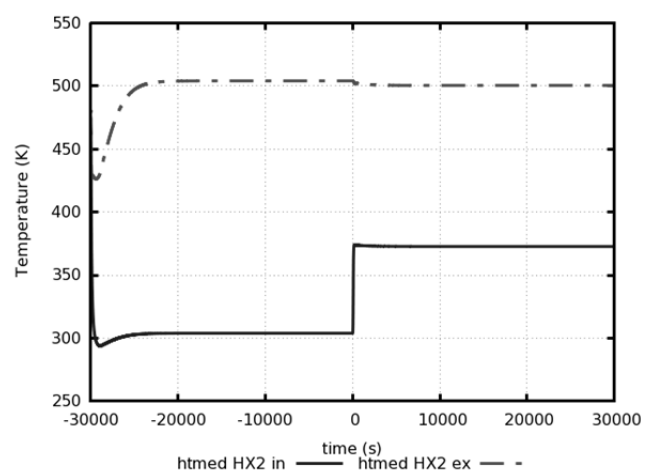


(4)準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

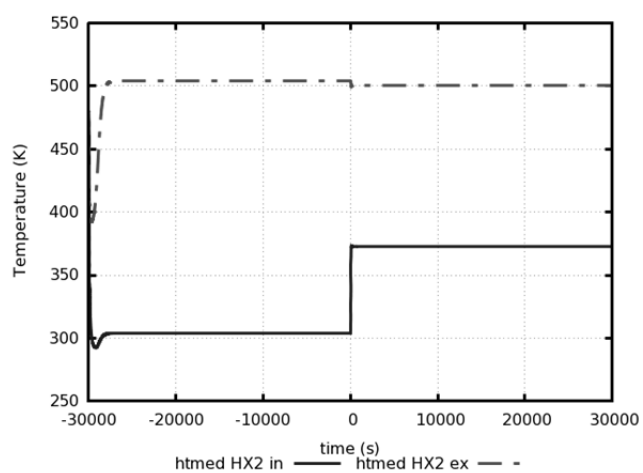
図 5 液体ナトリウム管路系熱交換器 1 出入口流量変化



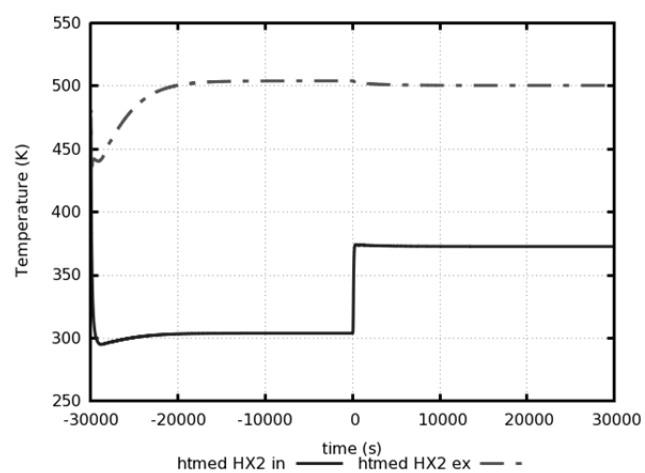
(1)半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3)準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)

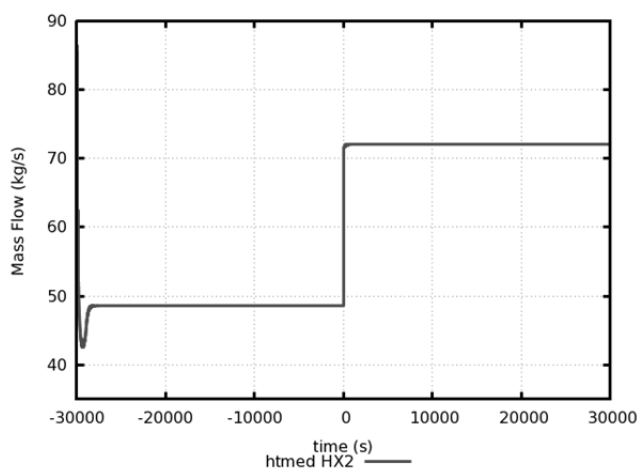


(2)準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)

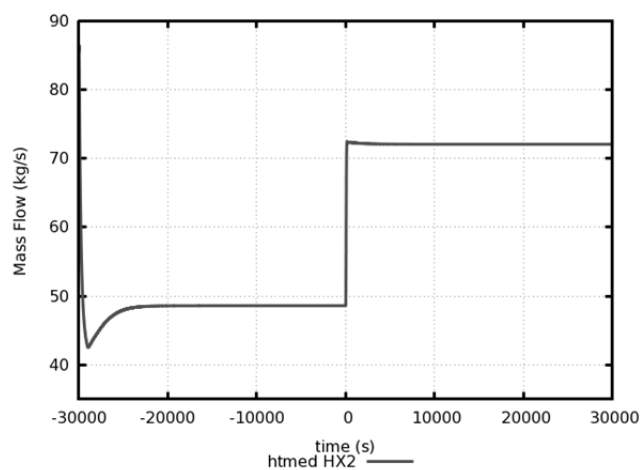


(4)準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

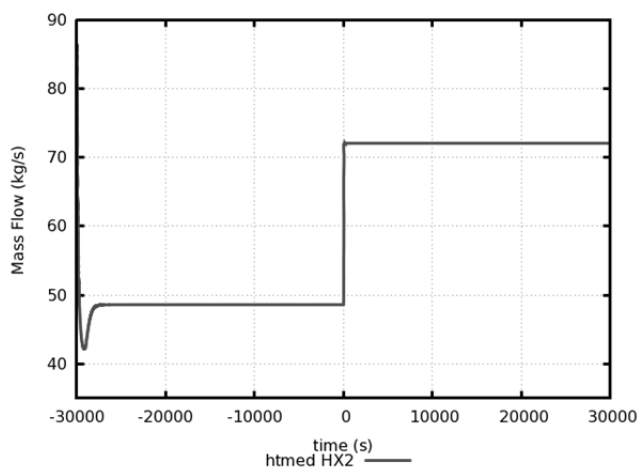
図 6 熱媒体管路系熱交換器 2 出入口温度変化



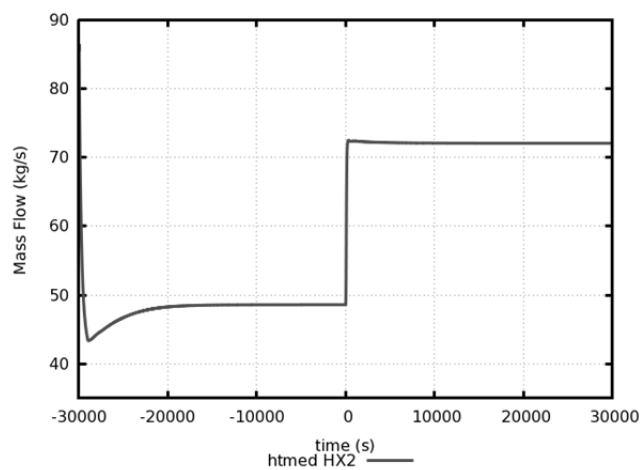
(1)半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3)準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)

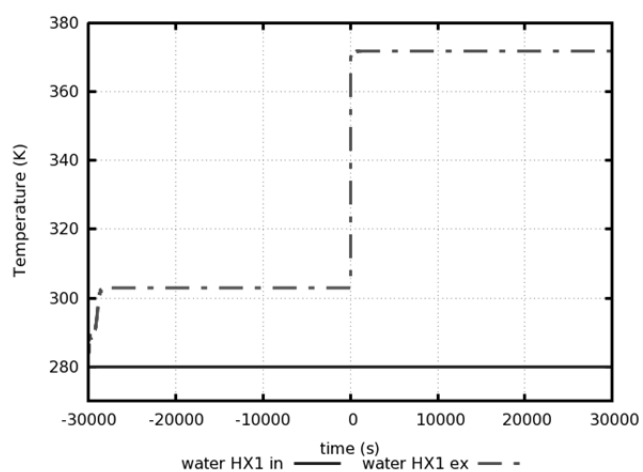


(2)準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)

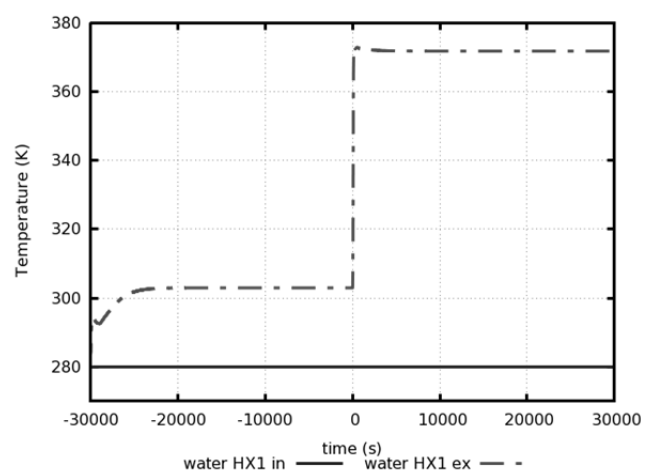


(4)準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

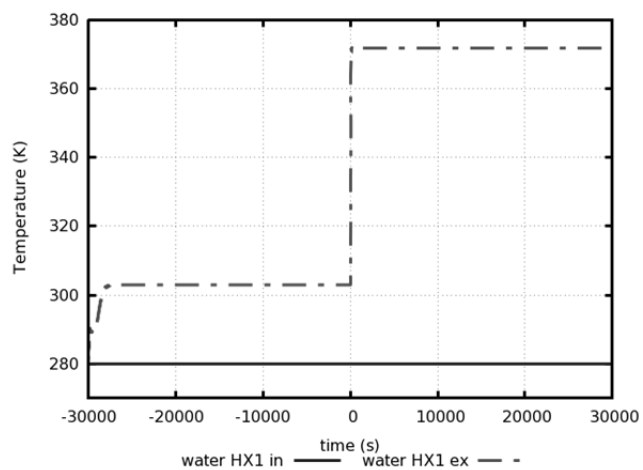
図 7 熱媒体管路系熱交換器 2 出入口流量変化



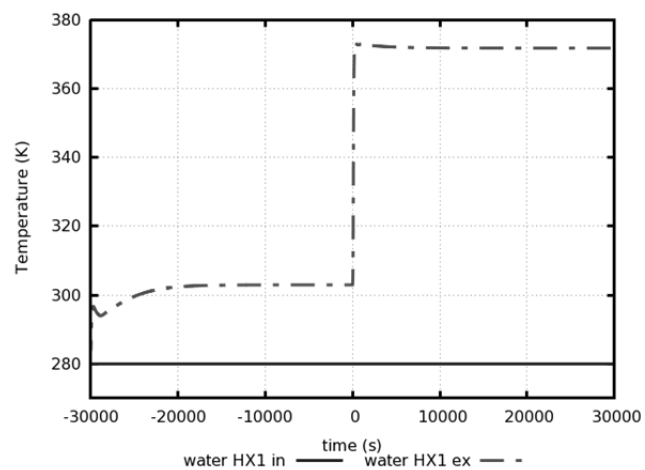
(1) 半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3) 準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)

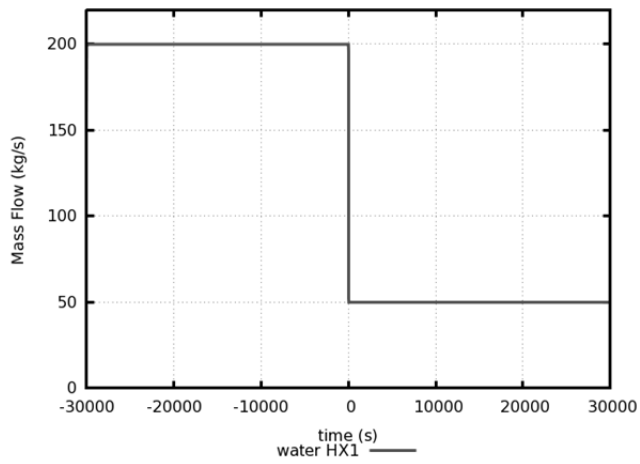


(2) 準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)

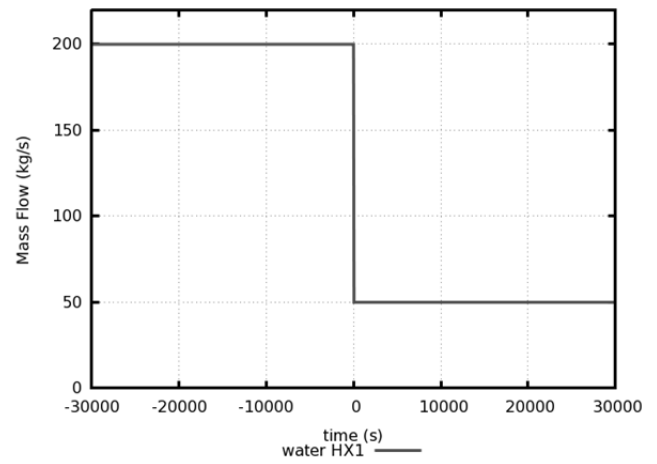


(4) 準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

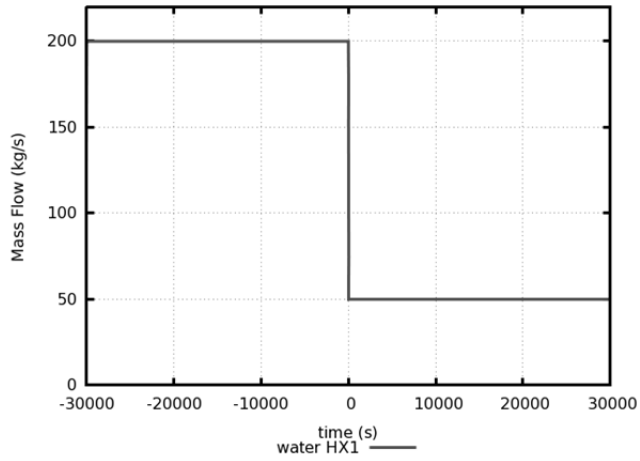
図 8 水管路系熱交換器 3 出入口温度変化



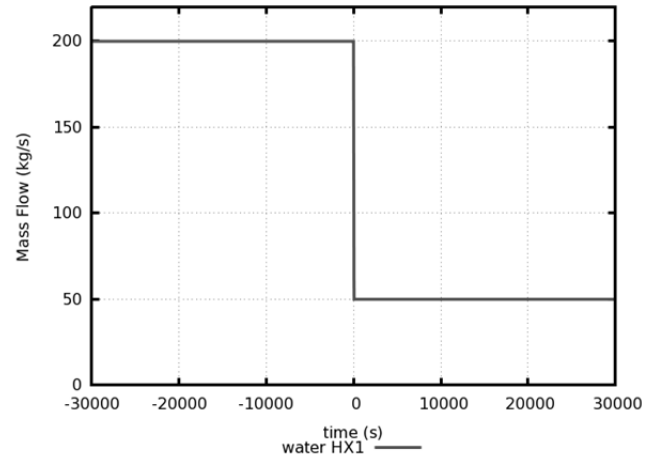
(1)半陰解法 1 (Courant 条件:0.5)



(3)準陰解法 1 (Courant 条件:5.0)



(2)準陰解法 1 (Courant 条件:1.0)



(4)準陰解法 1 (Courant 条件:10.0)

図 9 水管路系熱交換器 3 出入口流量変化

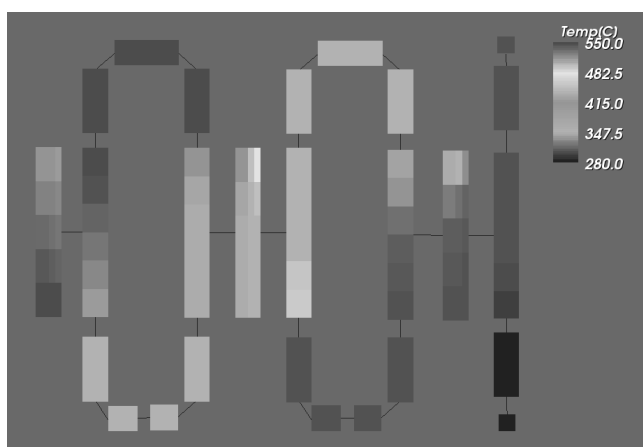


図 10 水流量の異常低下前の温度分布
(半陰解法 1、Courant 条件:0.5)

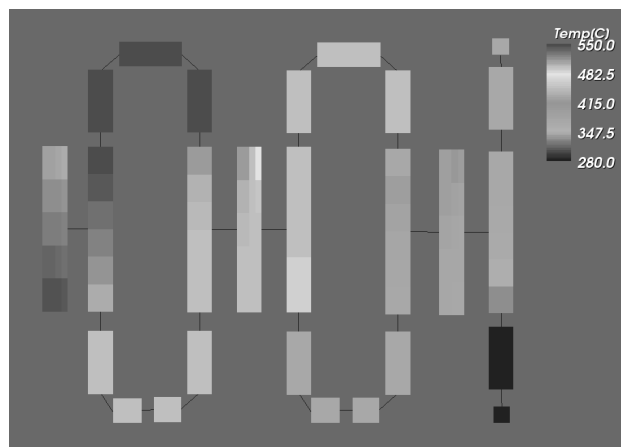


図 12 水流量の異常低下発生から 80s 後の
温度分布 (半陰解法 1、Courant 条件:0.5)

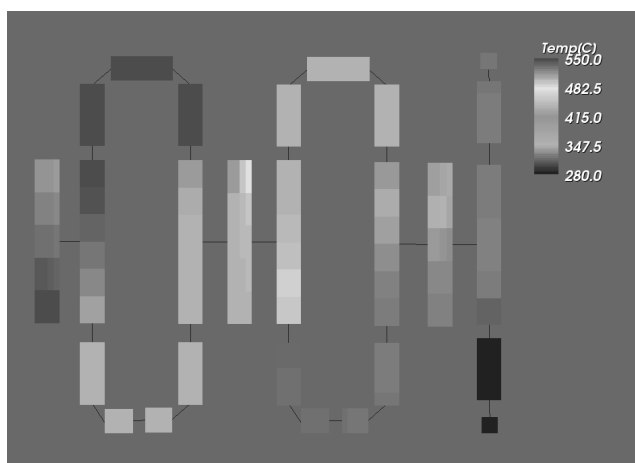


図 11 水流量の異常低下発生から 36s 後の
温度分布 (半陰解法 1、Courant 条件:0.5)



図 13 水流量の異常低下発生から 715s 後の
温度分布 (半陰解法 1、Courant 条件:0.5)

3. 等温管路系解析

Advance/FrontNet/Γ への陰解法の導入によって、解析の適用範囲が大きく広がった。陰解法の中で、質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解く解法は、基本的には圧力・密度・流速の計算とエネルギー・温度の計算が分離した計算方法を採用しているため、エネルギー・温度の計算を省けば、等温仮定の解析が可能である。温度変動が少ない管路系では、等温を仮定して解析を行った方が効率的な場合がある。

そこで、質量保存式ベースの圧力 Poisson 方程式を解く陰解法の半陰解法 1 と準陰解法 1 を等温管路系解析に適用し、解析精度と計算効率性の向上について検討を行った。本章では、等温管路系解析の検討結果を報告する。

なお、半陰解法 1 と準陰解法 1 を等温管路系解析に適用するにあたって、次の改良を行った。単にエネルギー・温度の計算を省くだけでは、圧力の変動に対する密度、エンタルピー、内部エネルギーへの影響が反映されない。計算効率化のために定常計算を等温、過渡計算を非等温と仮定して解析を行ったところ、定常計算から過渡計算に切り替わると、圧力、密度、エンタルピー、内部エネルギーの不整合が生じ計算が破綻することがあった。

そこで、温度を初期値で入力された値で固定し、圧力・密度・流速の計算(圧力 Poisson 方程式の計算)で得られた圧力と密度から、実在流体の物性データテーブルまたは理想気体の状態方程式を用いて、エンタルピー、内部エネルギー、全エネルギーを求める改良を行った。

3.1. 二酸化炭素ガスパージ試験解析

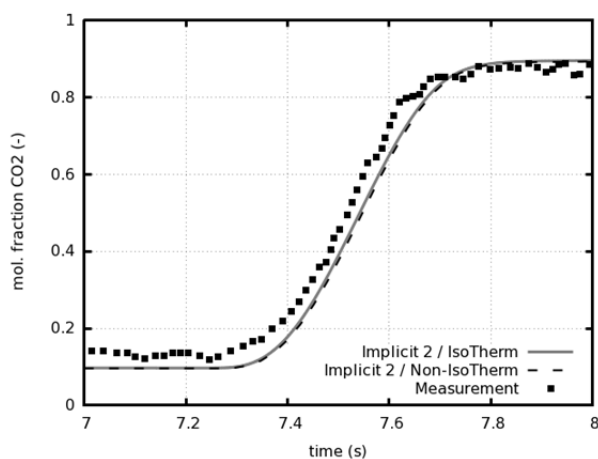
解析に用いた管路系モデルと主要な解析条件は、本誌掲載のレポート「管路系流体解析ソフトウェアへの陰解法導入による計算効率の向上性検討」の 6.1 節で示したものと同一である。

解析は、数値解法として用いた半陰解法 1 と準陰解法 1 に対し等温を仮定した、2 ケースに対して行った。二酸化炭素モル分率変化と密度変化を非等温解析結果と比較したものを図 14 と図 15

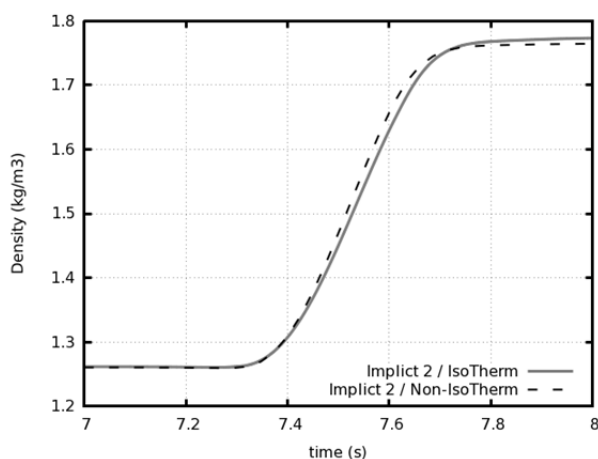
に示す。等温解析結果はグレーの実線で示し、非等温解析結果は黒の実線で示した。また、二酸化炭素モル分率変化の比較には、試験解析結果は■で示した。

図 14 と 図 15 において、二酸化炭素モル分率変化では等温解析と非等温解析の結果は良く一致し、試験結果との一致も良い。密度変化では、若干の差異が見られるものの、解析結果はほぼ同様の変化を示している。

以上より、等温仮定のもとに行った二酸化炭素ガスパージ試験解析では、非等温解析の結果と同等の結果が得られることが確認できた。等温解析機能を導入した Advance/FrontNet/Γ の適用性が示されたといえる。

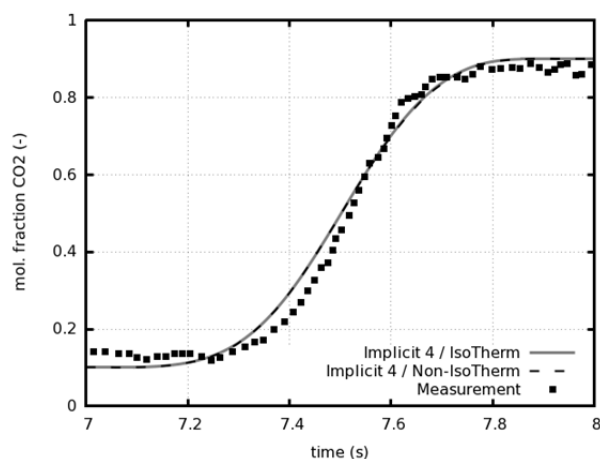


(1)二酸化炭素モル分率変化

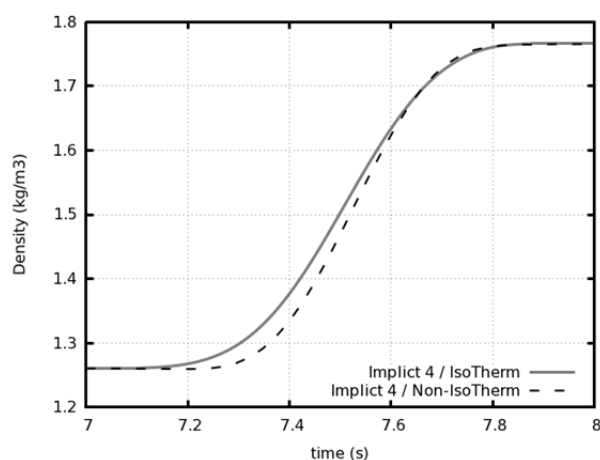


(2)密度変化

図 14 等温／非等温解析の比較（半陰解法 1）



(1)二酸化炭素モル分率変化



(2)密度変化

図 15 等温／非等温解析の比較（準陰解法 1）

3.2. 実規模ガス管路系解析

解析に用いた管路系モデルと主要な解析条件は、本誌掲載のレポート「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」の 6.2 節で示したものと同一である。

解析は、準陰解法 1 を用いて、等温を仮定して 2 ケースの解析を行った。なお、Courant 条件はいずれも 5.0 とした。実施した解析ケースを表 7 に示す。

各解析ケースの計算時間を表 8 に示す。なお、計算時間は、2.1 節の表 2 と同じ計算サーバーを用いて解析を行い測定した。表 8 には、比較のために、同じ解析条件の非等温解析ケースの計算時間も示した。定常計算は等温とし過渡計算は非等温とした解析ケースと、一貫して等温を仮定した解析ケースの計算時間は、ほぼ同じであった。非等温解析と比較すると、等温解析のいずれも 2 割

程度速くなっており、エネルギー保存式の行列計算を省略した効果が見られる。

表 7 解析ケース一覧

No.	解析ケース名	内容
1	Imp4C05IT	定常計算は等温解析、過渡計算は非等温解析
2	Imp4C05ITIT	定常計算、過渡計算とも等温解析
3	Imp4C05	非等温解析

表 8 解析ケースの計算時間一覧

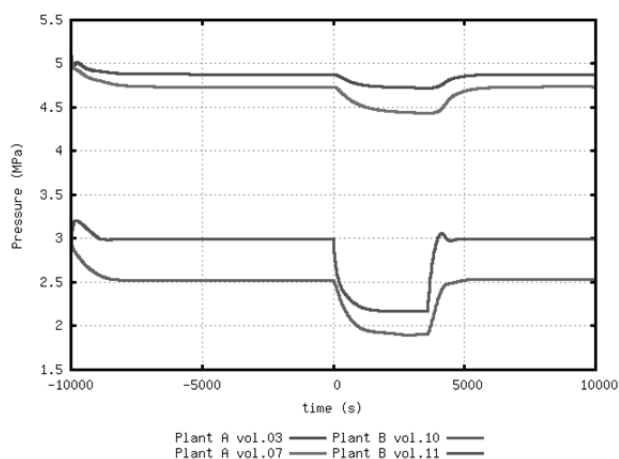
No.	解析ケース名	計算時間
1	Imp4C05IT	2 時間 30 分 50 秒
2	Imp4C05ITIT	2 時間 30 分 42 秒
3	Imp4C05(非等温解析)	3 時間 02 分 41 秒

高压管路系圧力変化と中圧管路系ガバナ下流温度変化について等温解析と非等温解析の比較を図 16 と図 17 に示す。

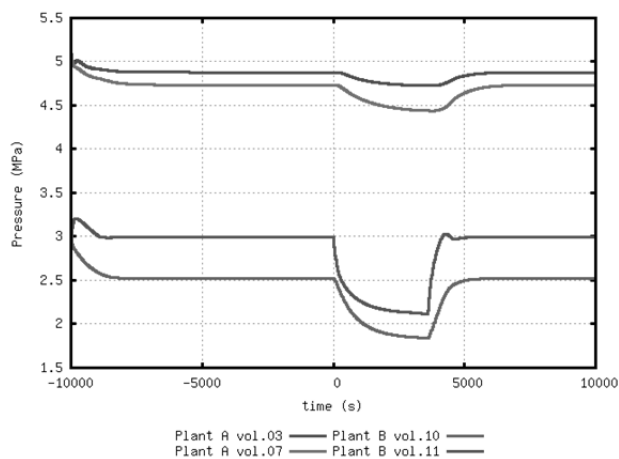
高压管路系圧力変化では、定常計算のみを等温を仮定した解析と非等温解析の結果は良く一致している。一貫して等温を仮定した解析と非等温解析を比較すると、時刻ゼロ秒での基地 B の機能喪失後の基地 B 近傍管路の減圧過程が、等温解析の結果の方がやや大きい傾向がある。その他全体は同等の結果となっている。

中圧管路系ガバナ下流温度変化では、一貫して等温を仮定した解析の温度は一定のままである。定常計算のみを等温を仮定した解析と非等温解析の結果を比較すると、時刻ゼロ秒での基地 B の機能喪失直後は温度変化が異なるものの、その後の変化はほぼ同様の傾向を示している。

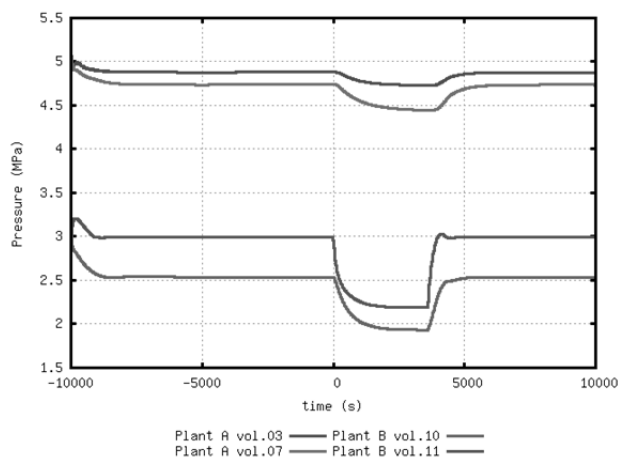
以上により、等温仮定のもとに行った実規模ガス管路系解析では、非等温解析の結果と同等の結果が得られることが確認できた。このことから、等温解析機能を導入した Advance/FrontNet/Γ の適用性が示されたといえる。なお、定常計算のみ等温を仮定した解析結果の方が非等温解析と良く一致し、かつ、非等温解析より効率よく計算できている。



(1)定常計算のみ等温解析 (Imp4C05IT)

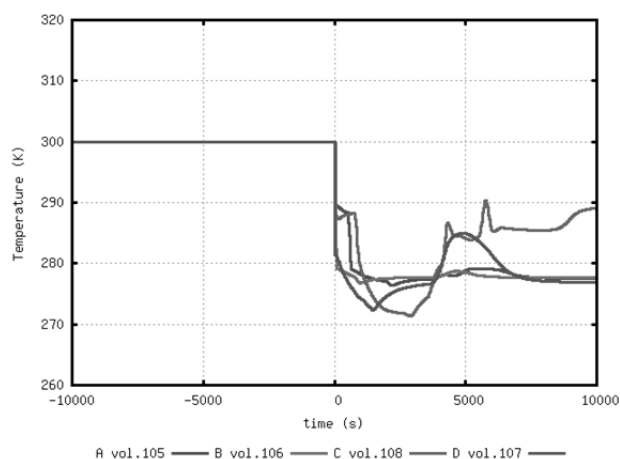


(2)等温解析 (Imp4C05ITIT)

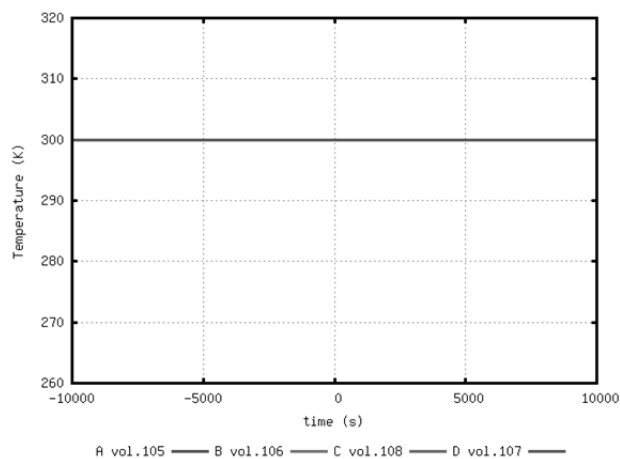


(2)非等温解析 (Imp4C05)

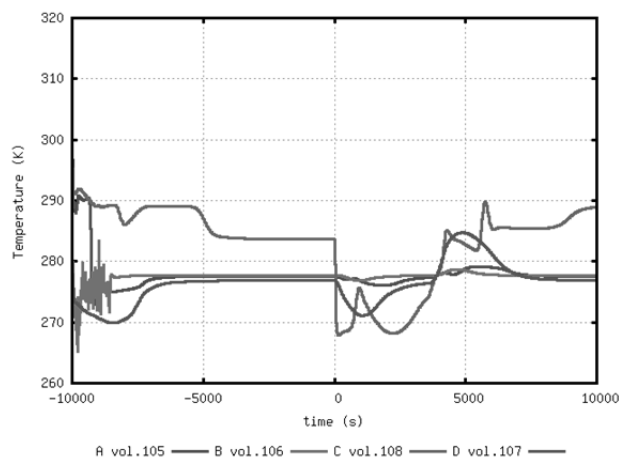
図 16 高压管路系圧力変化 (等温／非等温解析の比較)



(1)定常計算のみ等温解析 (Imp4C05IT)



(2)等温解析 (Imp4C05ITIT)



(2)非等温解析 (Imp4C05)

図 17 中圧管路系ガバナ下流温度変化 (等温／非等温解析の比較)

4. まとめ

Advance/FrontNet/Γ に導入した 4 種類の陰解法のうち、半陰解法 1 と準陰解法 1 の特徴が活かせることから、改良を施して液体管路系と等温管路系に適用できるように行った。

液体管路系、等温管路系それぞれ 2 種類の事例の解析で得られた結果から適用性が確認できるとともに、計算が効率よく行えることを確認した。

今後はさらに幅広い解析を実施し、液体管路系と等温管路系を精度よく、より効率的に解析するための機能を充実させていきたい。

参考文献

- [1] REFPROP, <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- [2] 林田均他, “高速炉主配管用音波温度計のナトリウム試験”, サイクル機構技術, No.5 (1999).
- [3] 私信
- [4] http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=03-01-02-08
- [5] <https://ja.wikipedia.org/wiki/ナトリウム>
- [6] JIS B 8249:1999 多管円筒形熱交換器
<http://kikakurui.com/b8/B8249-1999-01.html>
- [7] 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).

※ 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。)