

プラント防災とシミュレーション セミナー

2016年4月26日(火)開催

プログラム

13:30~13:40 (10分)	主催者あいさつ アドバンスソフト株式会社のご紹介	技術第7部長 松澤 邦裕
13:40~14:40 (60分)	招待講演 「プラント防災とシミュレーションの役割」 株式会社 FPEC 代表取締役社長 加藤 義幸 様	
14:40~15:10 (30分)	建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA の機能紹介と事例紹介	主任研究員 富塚 孝之
15:10~15:20 (10分)	休憩	
15:20~16:20 (60分)	管路系流体解析ソフトウェアの機能紹介と事例紹介 ・発電プラントにおけるポンプトリップ解析の事例 ・ガスタービンのある管路系の過渡解析の事例	主任研究員 秋村 友香 主事研究員 大須賀 直子
16:20~16:30 (10分)	各種ソフトウェア及び関連サービスについて	営業部 水野 穰

memo

プラント防災とシミュレーション

- 消防車等の配置計画
 - タンク火災
 - プロセス地区火災
- ボイルオーバーの危険性
- 火災からの輻射熱の推定と対応
- 危険物の漏洩とガス拡散
- 消火配管の経年劣化

株式会社 FPEC (エフベック)

消防車等の配置計画

シミュレーションを使った計画

タンク火災

タンク火災

- タンク火災の上昇気流(タンクの中心ほど大きく、周辺ほど小さくなる)
- 炎の高さ
- タンク周辺の輻射熱→消防活動上の安全確認
- **ボイルオーバーの可能性チェック(後述)**

泡放射

- 泡の飛散損失
- 泡の放射軌跡→風の影響を反映した放射軌跡→消防車等の配置
- 泡が上昇気流により吹き飛ばされる
- スウィートスポット方式(推奨)とフットプリント方式

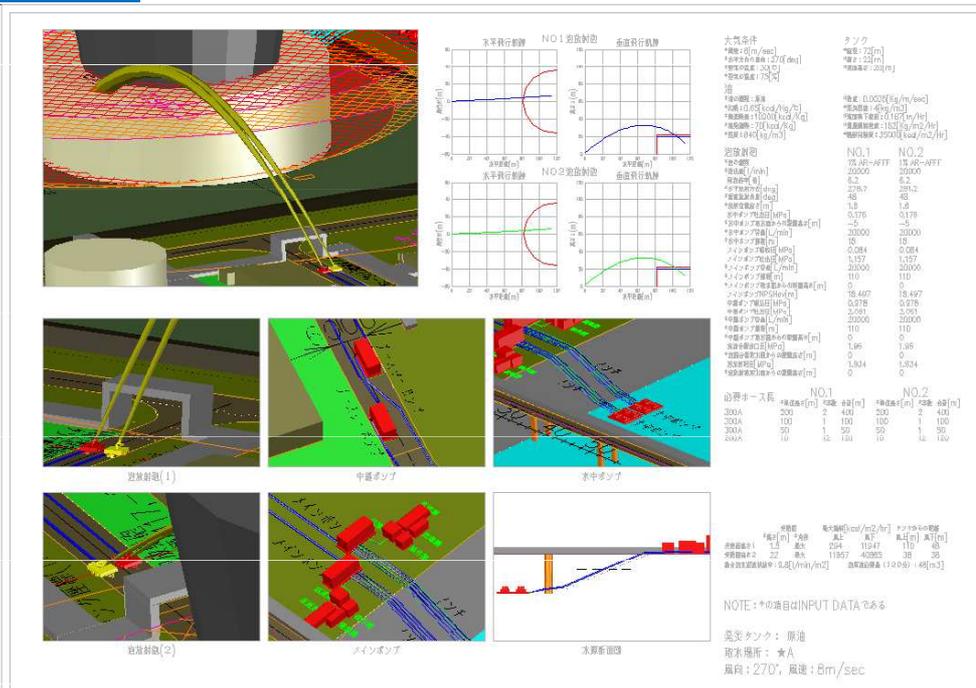
消火

- 泡が燃焼面に着地→蒸発→更なる泡投入→泡の橋頭保確立
- 泡の展開→消火

消防車等の配置計画

業務実績 (例)

タンク火災警防計画

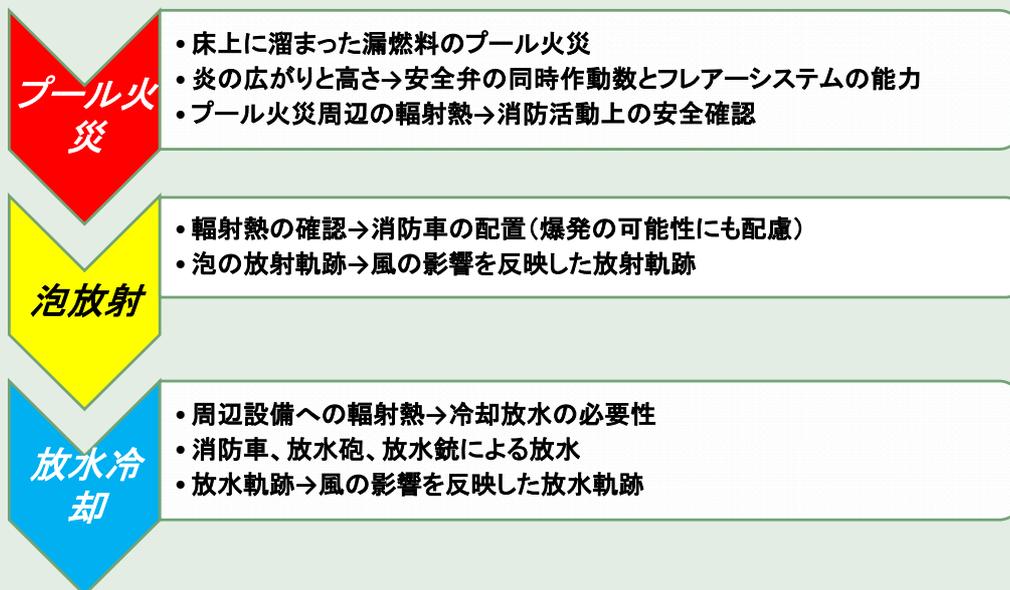


当社のシミュレーションプログラム、FRT モジュールを使用し、風速8m/sの時、直径72mの原油タンク火災が起こったとして、大容量泡放射2万L/min、2基で消火する場合についてシミュレーションした結果。

消防車等の配置計画

シミュレーションを使った計画

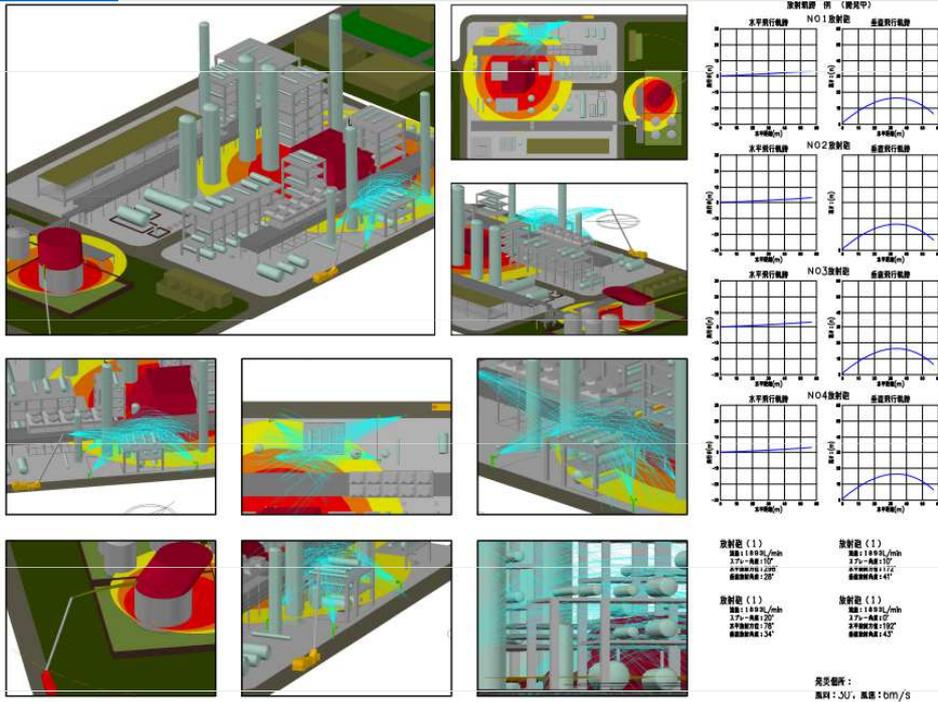
プロセス地区火災



消防車等の配置計画

業務実績(例)

プロセス地区火災警防計画



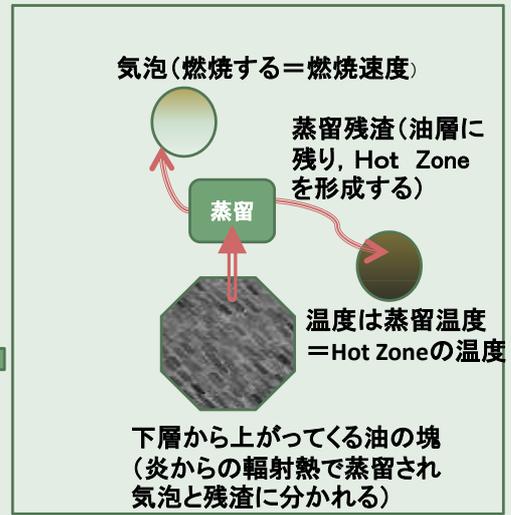
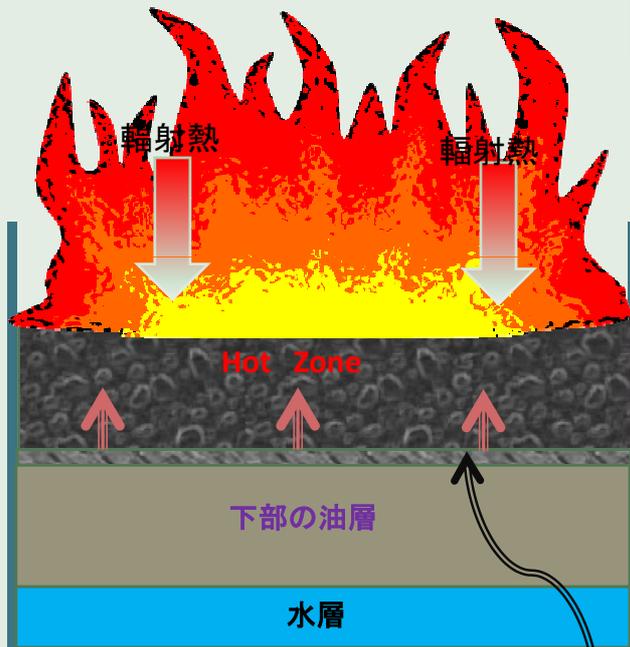
当社のシミュレーションプログラム、泡、水、輻射熱の3つのモジュールを使用し、タンク火災や漏洩火災が起こったとして、大型化学消防車や放水砲などで消火、放水冷却などの活動をシミュレーションした結果。

ボイラーオーバーの危険性

ボイラーオーバー発生のメカニズム
(原油など多成分の場合)

火災における伝熱の特徴

上から加熱→対流が起こらない→
熱伝導のみ→極めて遅い下方への伝熱



Hot Zoneと下層油の接する界面で加熱され油の塊が上昇して行く

ボイloverの危険性

ボイlover発生メカニズム (原油など多成分の場合)

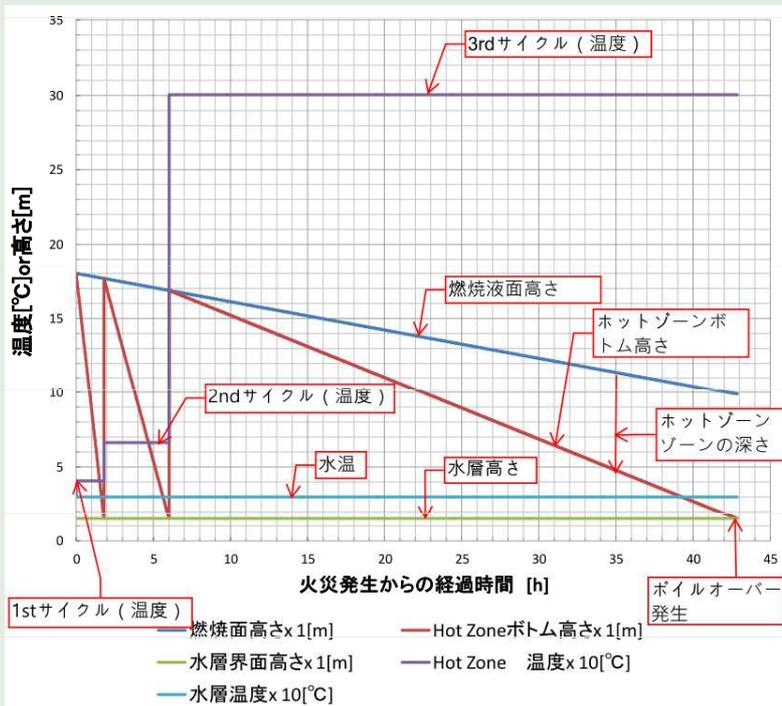
(原油2のシミュレーション結果)

計算条件		原油-2	
列番号 漏洩物質名	6		
タンク直径	Dt	80.0	[m]
タンク高さ	Ht	22.0	[m]
初期液面高さ	Lt	18.0	[m]
定圧比熱 (Hot Zone)	CpLTz	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (下層oil)	CpLTo	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (水層)	CpLTw	1.000	[Kcal/kg/°C]
熱伝導率 (Hot Zone)	λLTz	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (下層oil)	λLTo	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (水層)	λLTw	0.5236	[Kcal/m/hr]
計算時間刻み	Δθ	1.0	[sec]
最大計算時間	θmax	6000.0	[min]
表示時間刻み	δθ	1.0	[min]
計算結果			
Boilover時の:			
Hot Zone 温度	Tz	300.4	[°C]
燃焼液面高さ	Hsf	9.9	[m]
発生時間		42.9	[h]
発生時間		1.8	[day]

タンク内燃焼前温度	Tinit	30.0	[°C]
燃焼前水層温度	Twint	30.0	[°C]
大気温度	Tatm	30.0	[°C]
燃焼速度	Vb	162	[kg/m ² /hr]
蒸発潜熱@Tz	ΔHvTz	70	[kcal/kg]
初期水層高さ	Lw	1.5	[m]
密度 (Hot Zone)	ρLTz	855.8	[kg/m ³]
密度 (下層oil)	ρLTo	855.8	[kg/m ³]
密度 (水層)	ρLTw	1,000.0	[kg/m ³]
計算精度	Acc	1.0	[%]
Boilover 発生温度	TwB	120.0	[°C]
蒸留カーブ最大温度	Tzmax	500.0	[°C]

液面降下速度	Vsf	-0.19	[m/h]
Hot Zone 成長速度	Vhzc	0.00	[m/h]
Cycle数	cycle	3	[—]

FPEC



ボイloverの危険性

ボイlover発生メカニズム (原油など多成分の場合)

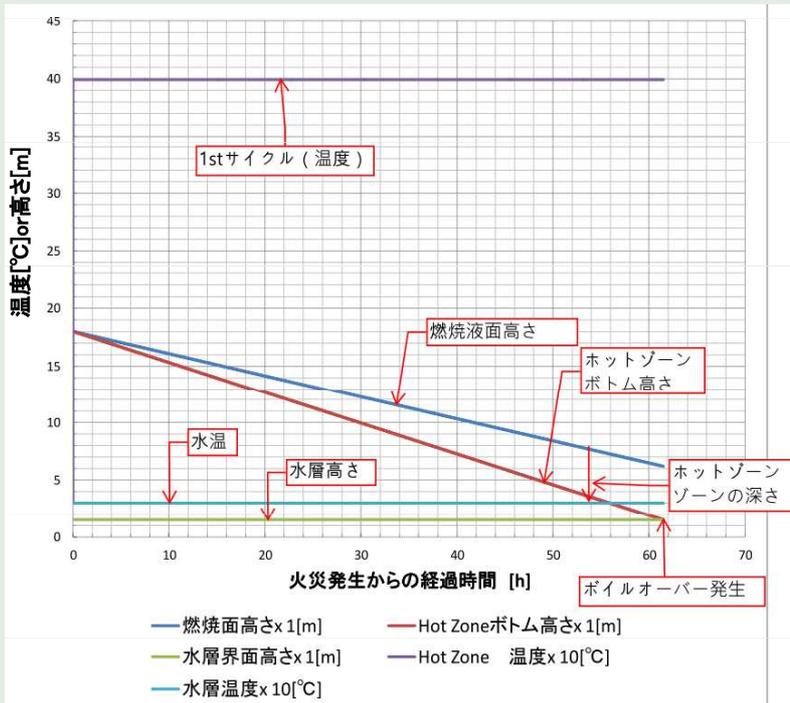
(原油8のシミュレーション結果)

計算条件		原油-5	
列番号 漏洩物質名	9		
タンク直径	Dt	80.0	[m]
タンク高さ	Ht	22.0	[m]
初期液面高さ	Lt	18.0	[m]
定圧比熱 (Hot Zone)	CpLTz	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (下層oil)	CpLTo	0.650	[Kcal/kg/°C]
定圧比熱 (水層)	CpLTw	1.000	[Kcal/kg/°C]
熱伝導率 (Hot Zone)	λLTz	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (下層oil)	λLTo	0.1290	[Kcal/m/hr]
熱伝導率 (水層)	λLTw	0.5236	[Kcal/m/hr]
計算時間刻み	Δθ	1.0	[sec]
最大計算時間	θmax	6000.0	[min]
表示時間刻み	δθ	1.0	[min]
計算結果			
Boilover時の:			
Hot Zone 温度	Tz	399.1	[°C]
燃焼液面高さ	Hsf	6.2	[m]
発生時間		61.5	[h]
発生時間		2.6	[day]

タンク内燃焼前温度	Tinit	30.0	[°C]
燃焼前水層温度	Twint	30.0	[°C]
大気温度	Tatm	30.0	[°C]
燃焼速度	Vb	162	[kg/m ² /hr]
蒸発潜熱@Tz	ΔHvTz	70	[kcal/kg]
初期水層高さ	Lw	1.5	[m]
密度 (Hot Zone)	ρLTz	844.2	[kg/m ³]
密度 (下層oil)	ρLTo	844.2	[kg/m ³]
密度 (水層)	ρLTw	1,000.0	[kg/m ³]
計算精度	Acc	9.0	[%]
Boilover 発生温度	TwB	120.0	[°C]
蒸留カーブ最大温度	Tzmax	565.0	[°C]

液面降下速度	Vsf	-0.19	[m/h]
Hot Zone 成長速度	Vhzc	0.08	[m/h]
Cycle数	cycle	1	[—]

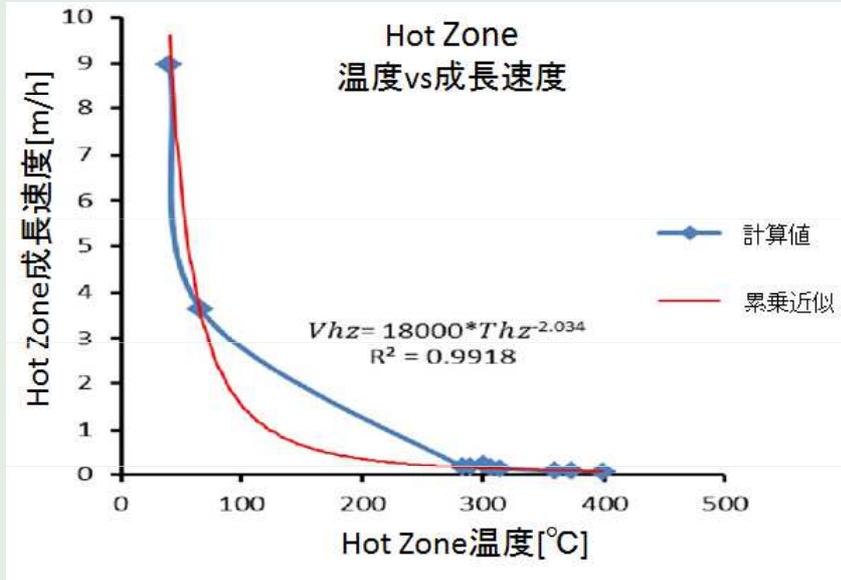
FPEC



ボイルオーバーの危険性

ボイルオーバー発生のメカニズム
(原油など多成分の場合)

Hot Zoneの成長速度



$V_{hz} = 18,000 * T^{-2.034}$

ここで、

V_{hz} ; Hot Zoneの成長速度 [m/hr]

T ; Hot Zoneの温度 [°C]

$T = 120^{\circ}\text{C}$ とすると,
 $V_{hz} = 1.06$ [m/h]と
なる。
この結果はLastFire
の提言と一致する。

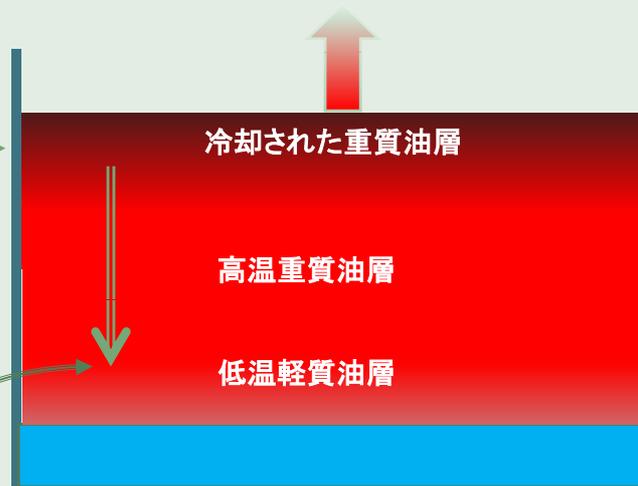
ボイルオーバーの危険性

消火後油温の変化に伴う現象
(鍋蓋現象)

風による対流伝熱及び輻射熱による熱放散によってタンク液面から冷却されていく。

重質油層なので温度低下と共に密度が下層油よりも大きくなる、逆転現象が拡大する。所謂、鍋蓋がタンク液表面にあるような状態になっている。

油温は主として熱伝導により、非常にゆっくりと表面からボトムに向かって降下していく。



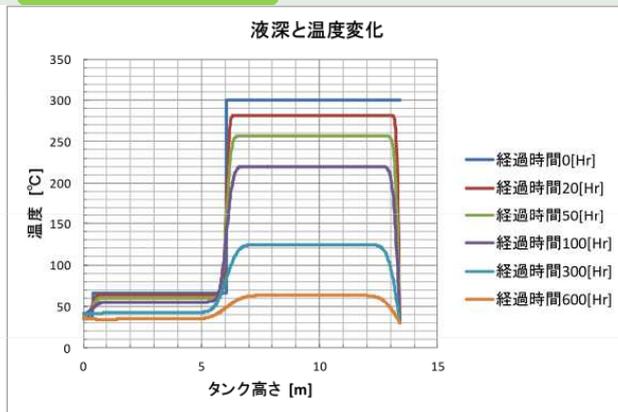
この部分は元々Hot Zone部分であり重質油層である。

ボイラーオーバーの危険性

消火後の温度変化 (計算モデル)

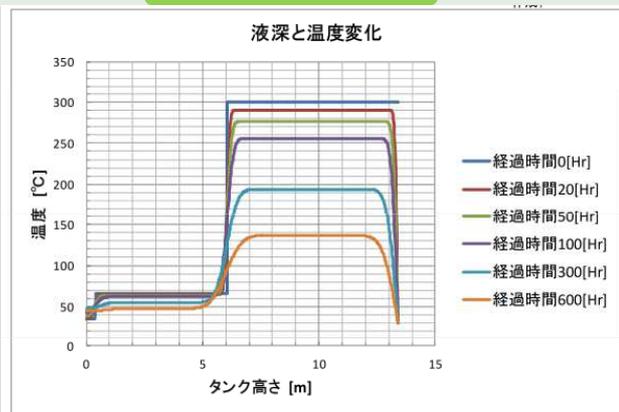
消火後の油の冷却時間(計算結果)

放水冷却



高温HotZone	液面高さ	13.4	[m]	油の物性	密度	840	[kg/m ³]
	初期温度	300	[°C]		比熱	0.65	[kcal/kg/°C]
低温HotZone	頂部高さ	6.03	[m]		熱伝導率	0.129	[kcal/m/h/°C]
	初期温度	66	[°C]	水の物性	密度	996	[kg/m ³]
水層	頂部高さ	0.4	[m]		比熱	0.998	[kcal/kg/°C]
	初期温度	35	[°C]		熱伝導率	0.5279	[kcal/m/h/°C]
環境条件	大気温度	30	[°C]	液表面	熱伝導率	8.6	[kcal/m ² /h/°C]
				タンク外壁熱伝導率	150	[kcal/m ² /h/°C]	
	タンク直径	82	[m]	タンク内壁熱伝導率	50	[kcal/m ² /h/°C]	
計算時間	最大時間	600	[hr]	タンク側壁からの熱損失	算入する	—	
	時間刻み	30	[min]	高さ方向	高さ刻み	0.025	[m]

風のみによる自然冷却



高温HotZone	液面高さ	13.4	[m]	油の物性	密度	840	[kg/m ³]
	初期温度	300	[°C]		比熱	0.65	[kcal/kg/°C]
低温HotZone	頂部高さ	6.03	[m]		熱伝導率	0.129	[kcal/m/h/°C]
	初期温度	66	[°C]	水の物性	密度	996	[kg/m ³]
水層	頂部高さ	0.4	[m]		比熱	0.998	[kcal/kg/°C]
	初期温度	35	[°C]		熱伝導率	0.5279	[kcal/m/h/°C]
環境条件	大気温度	30	[°C]	液表面	熱伝導率	8.6	[kcal/m ² /h/°C]
				タンク外壁熱伝導率	10	[kcal/m ² /h/°C]	
	タンク直径	82	[m]	タンク内壁熱伝導率	50	[kcal/m ² /h/°C]	
計算時間	最大時間	600	[hr]	タンク側壁からの熱損失	算入する	—	
	時間刻み	30	[min]	高さ方向	高さ刻み	0.025	[m]

ボイラーオーバーの危険性

消火後の温度変化 (計算モデル)

消火後の油の冷却時間(計算結果)

直径80mを超えるような大型タンクの場合、風速6~8m/secの時、消火後600時間(25日間)かかって、ようやく約140°Cまで油温が下がる計算結果となった。

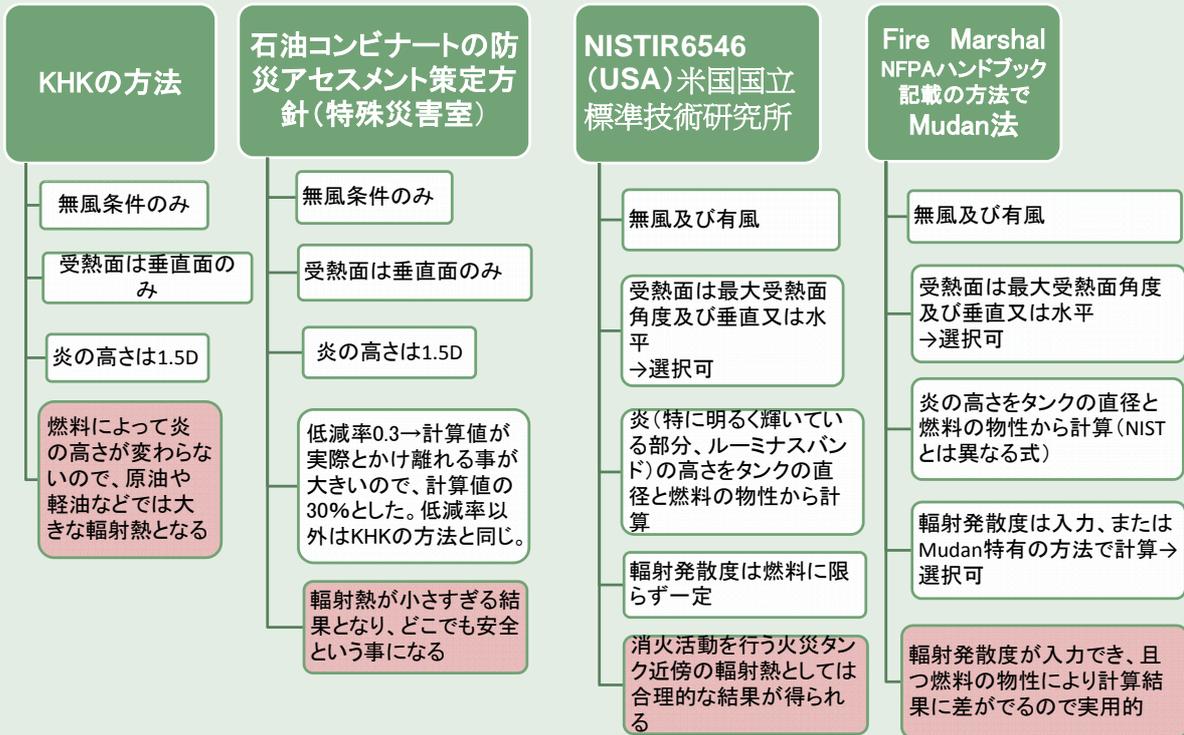
やはり大型タンクだけに、火災後タンク内に滞留する油の冷却には一月近い時間が必要であり、その間の防災対策も充分に考えておく必要がある。

尚、タンク全周に対して連続して放水冷却した場合、消火後300時間(12.5日間)で約125°Cまで冷却できる計算結果が得られている。

放水の効果は大きく、風の場合に比べて、約半分の時間で冷却出来る事がわかる。

火災からの放射熱の推定と対応

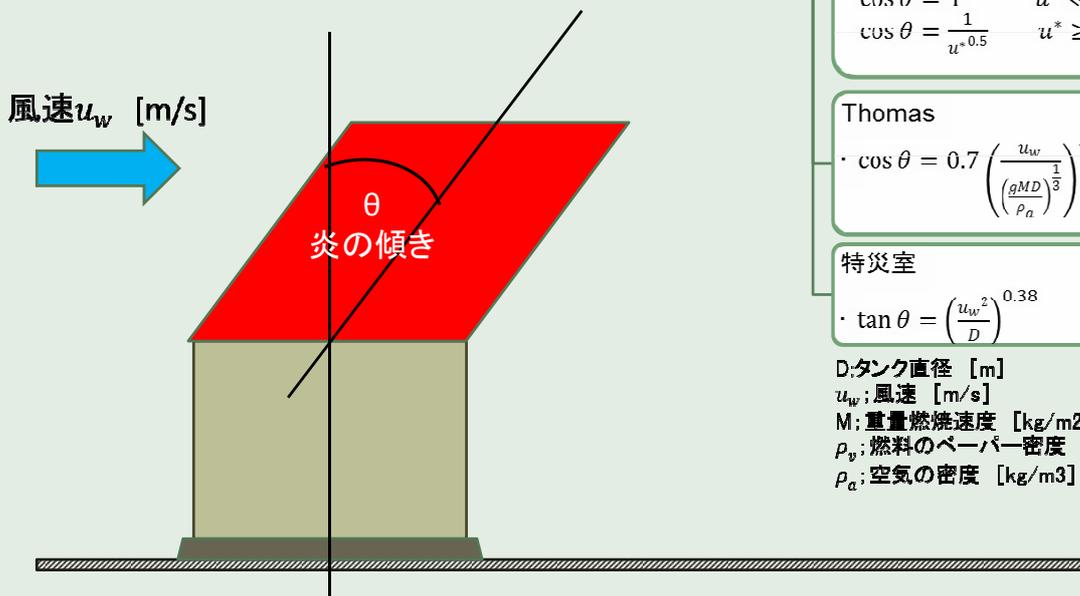
様々な計算方法



火災からの放射熱の推定と対応

風の影響(炎の傾き)

炎の傾きは風速に比例して大きくなり、タンク直径に反比例する。



炎の傾き

AGA

$$u^* = \frac{u_w}{\left(\frac{gMD}{\rho_v}\right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$\cos \theta = 1 \quad u^* \ll 1$$

$$\cos \theta = \frac{1}{u^{*0.5}} \quad u^* \geq 1$$

Thomas

$$\cos \theta = 0.7 \left(\frac{u_w}{\left(\frac{gMD}{\rho_a}\right)^{\frac{1}{3}}}\right)^{-0.49}$$

特災室

$$\tan \theta = \left(\frac{u_w^2}{D}\right)^{0.38}$$

D:タンク直径 [m]

u_w : 風速 [m/s]

M: 重量燃焼速度 [kg/m²/s]

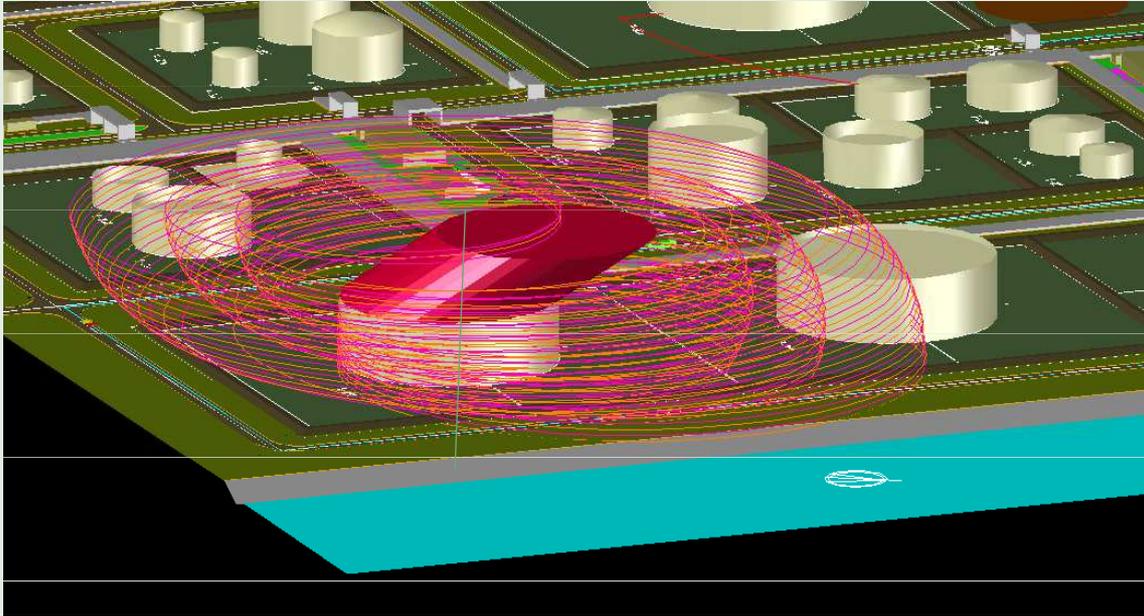
ρ_v : 燃料のペーパー密度 [kg/m³]

ρ_a : 空気の密度 [kg/m³]

火災からの輻射熱の推定と対応

受熱面の高さによる変化と三次元表示

受熱面の高さを地上から炎の高さまで変化させたもので、高さ方向の輻射強度の変化を表示
下の例は輻射強度の等値面を3段階で立体的に表示。



危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

漏洩のタイプ



危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

漏洩液体の広がり

KHK-E-007で採用されている方法

LNGなど低温液体に使用

USA. EPAで採用されている方法

液体の厚さを一律 1cm として計算する。
(米環境保護庁)

USA.FEMAで採用されている方法

液体の広がり面積は漏洩液体量の約1/2乗に比例する。
(米連邦緊急事態管理庁)

ALOHAプログラムで採用されている方法

KHKで作用されている方法と似た方法であり、広がり速度が早い。(米商務省, 海洋大気局)

漏洩液体の蒸発

KHK-E-007で採用されている方法

LNGなど低温液体に使用されるもので、地面からの熱吸収のみ考慮している。

で採用されている方法
USA. EPA

液表面近くの風速により、蒸気圧に応じたガスが運ばれて行くという計算方法

USA.FEMAで採用されている方法

液体の燃焼速度から推算する方法

USA Air Forceで採用されている方法

ヒドラジンの実験データとの比較計算方法

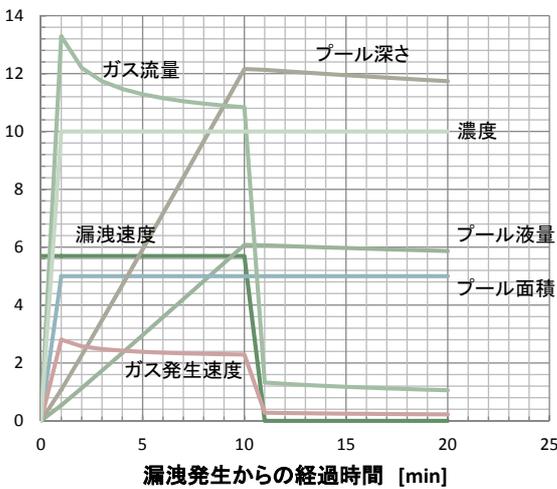
ALOHAプログラムで採用されている方法

太陽光からの入熱、大気との熱交換、地面からの熱吸収など全ての熱バランスから蒸発速度を求める方法

危険物の漏洩とガス拡散

漏洩・液の広がり・蒸発

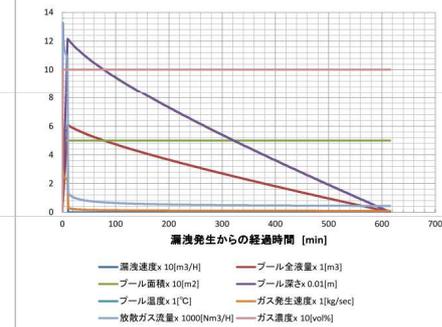
アンモニア液の漏洩と蒸発速度



- 漏洩速度 x 10[m³/H]
- プール面積 x 10[m²]
- プール温度 x 1[°C]
- 放散ガス流量 x 1000[Nm³/H]
- プール全液量 x 1[m³]
- プール深さ x 0.01[m]
- ガス発生速度 x 1[kg/sec]
- ガス濃度 x 10[vol%]

作成 平成28年02月17日

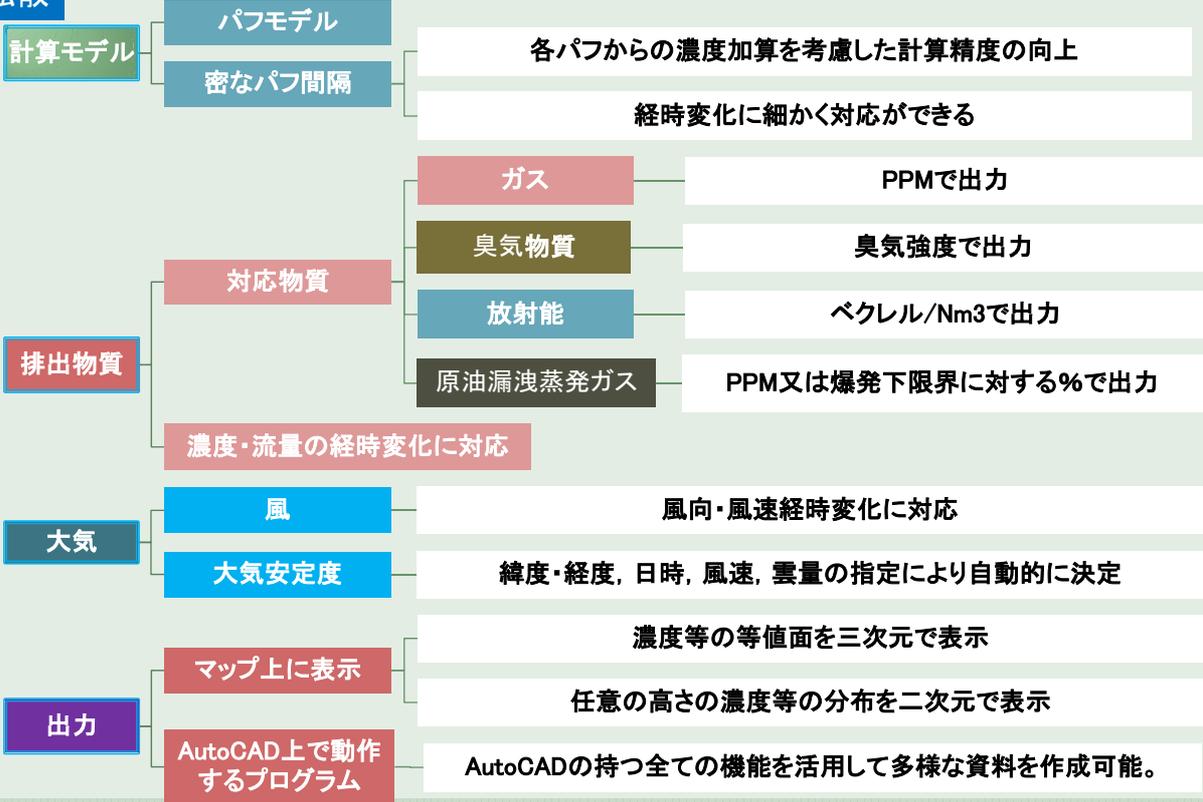
液の漏洩と蒸発速度



計算条件		CND3	
列番号	20	アンモニア	タンク型式
分子量	M 17.03	—	タンクの直径
大気圧に於ける沸点	T _{boil} -33.3	[°C]	タンクの高さ(長さ)
液の密度@T _s	ρ _l 584.5	[kg/m ³]	タンク初期液面高さ
ガスの密度@T _s , P _s	ρ _g 7.79	[kg/m ³]	漏洩口の直径
ガスの密度@T _{atm} , P _{atm}	ρ _g 0.69	[kg/m ³]	漏洩口の長さ
蒸気圧@T _s	P _{ET} 11.755	[kg/cm ² A]	流出係数
蒸気圧@T _{atm}	P _{ET_{atm}} 11.755	[kg/cm ² A]	タンク貯蔵温度
液の粘度@T _{boil}	μ 0.0	[kg/m·s]	防炎壁の耐火面積
ガスの粘度@T _{boil}	C _g 0.5	[kg/cm ²]	防炎壁の風下長さ
蒸発潜熱@T _{boil}	ΔH _{ev} 327	[Kcal/kg]	漏洩時間
真熱量	Δ _{comb} 4.443	[Kcal/kg]	表示時間間隔
引火点	FP -123.0	[°C]	計算時間間隔
燃発下限界	EPL 16.0	[%]	タンク貯蔵圧力
燃発上限界	UPL 25.0	[%]	—
配管内径	Dp 0.000	[m]	配管長さ
計算方法	4	ALOHA Method	漏洩面積計算方法
大気湿度	T _{atm} 30.0	[°C]	風速(at 10m)
湿度	RH 50	[%]	露量
地面の温度	T _{grd} 30	[°C]	西暦
地面の種類	soil	concrete	日時(月, 日, 時刻)
プール表面上の風速	v _w 1.5	[m/sec]	緯度/経度
計算結果			
最大漏洩速度	56.9	[m ³ /H]	漏洩プール最大面積
漏洩停止時のタンク液面高さ	2.23	[m]	上記に達するまでの経過時間
全液量	9.5	[m ³]	フルプール最大液量
放散ガスの平均濃度	100.0	[Vol%]	上記に達するまでの経過時間
最大放散ガス流量	13,262.4	[Nm ³ /H]	漏洩物質の最大ガス発生速度
上記に達するまでの経過時間	1.9	[Min]	上記に達するまでの経過時間
平均放散ガス流量	717.5	[Nm ³ /H]	プールの完全蒸発経過時間
大気安定度	C	フラッシュ率	FlashX
プール平均温度	T _{pav} -33.300	[°C]	液の密度@T _{pav}
蒸気圧@T _{pav}	P _{ET_{pav}} 1.045	[kg/cm ² A]	ガスの密度@T _{pav} , P _s
蒸気圧@T _{atm}	P _{ET_{atm}} 11.755	[kg/cm ² A]	ρ _g
蒸発潜熱@T _{pav}	ΔH _{ev} 327.171	[Kcal/kg]	ρ _g

危険物の漏洩とガス拡散

拡散

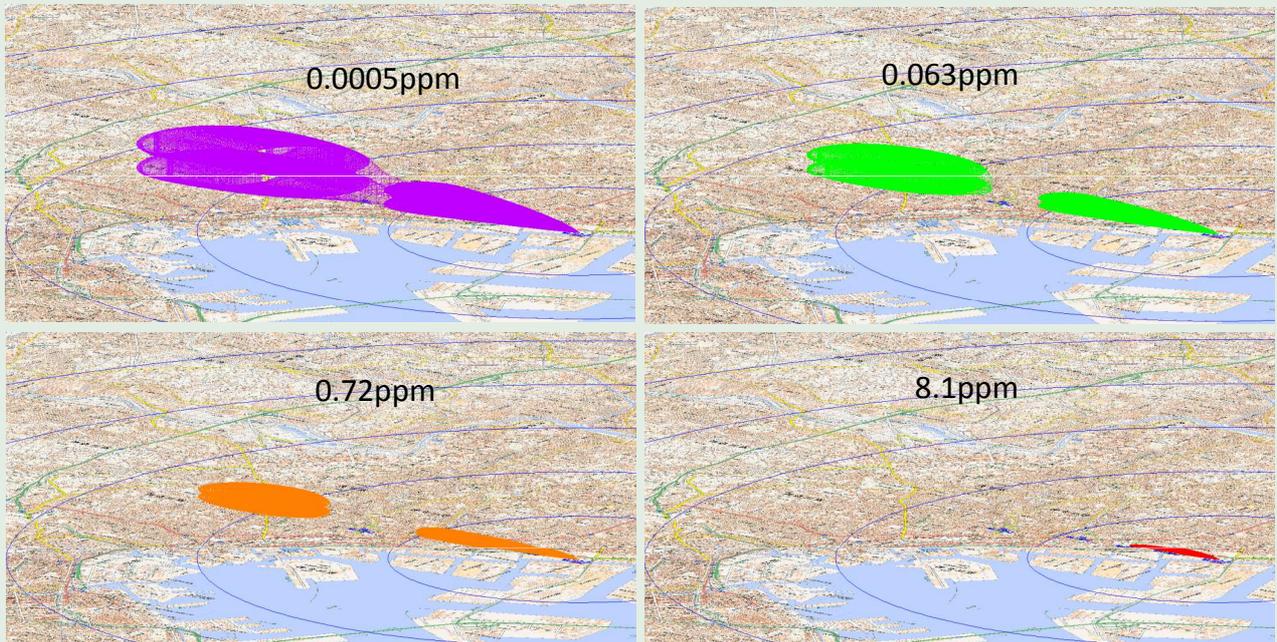


危険物の漏洩とガス拡散

拡散

三次元表示

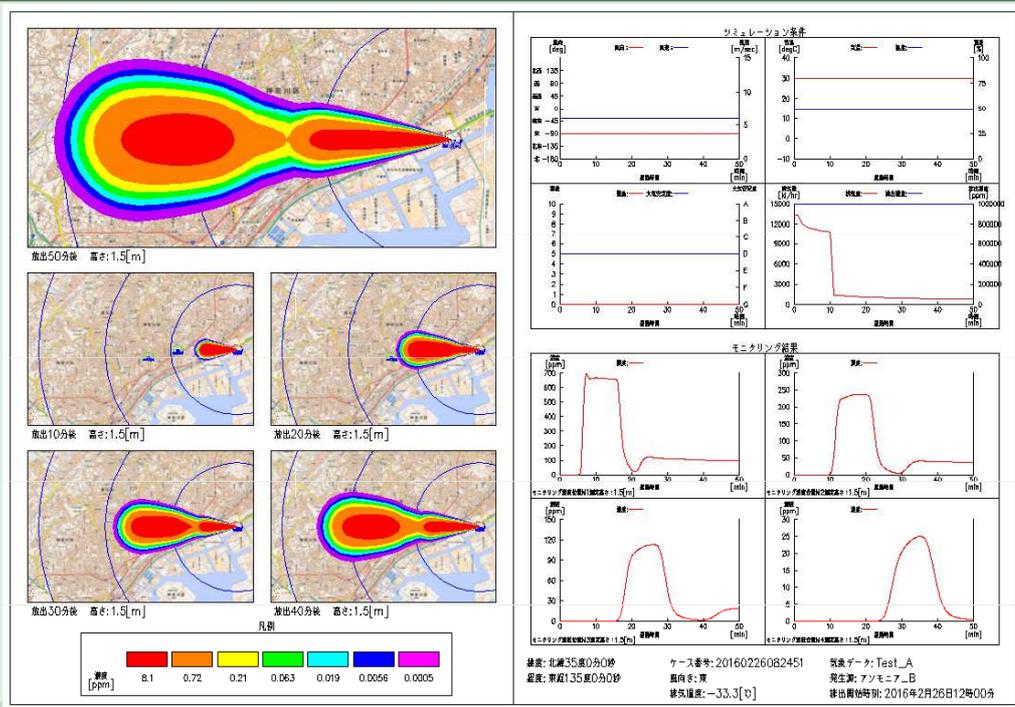
濃度の薄い範囲から濃い順に並べたものです



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

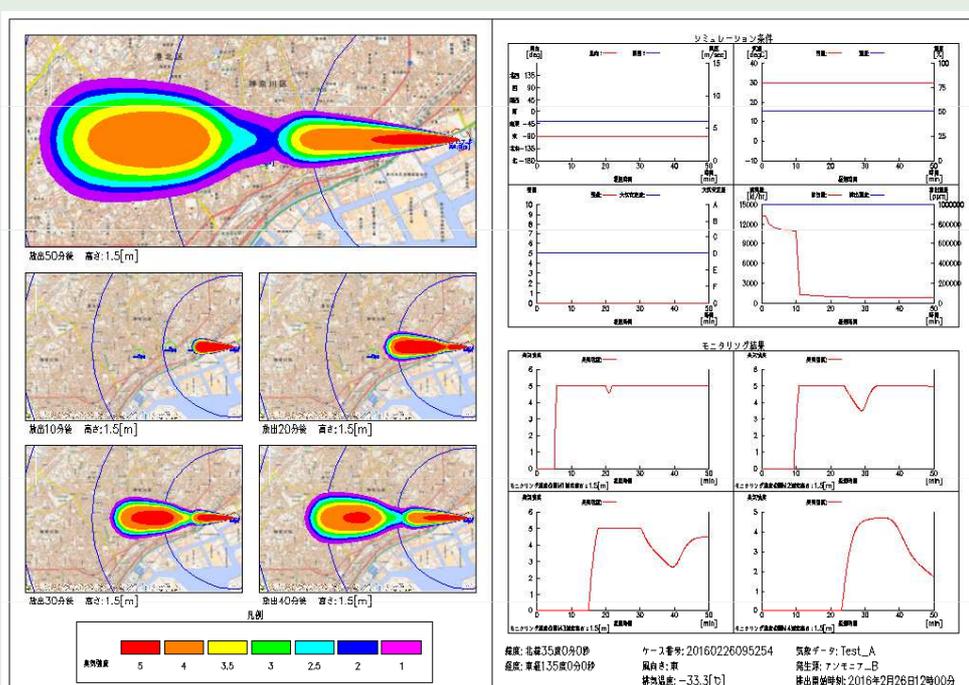
二次元表示



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

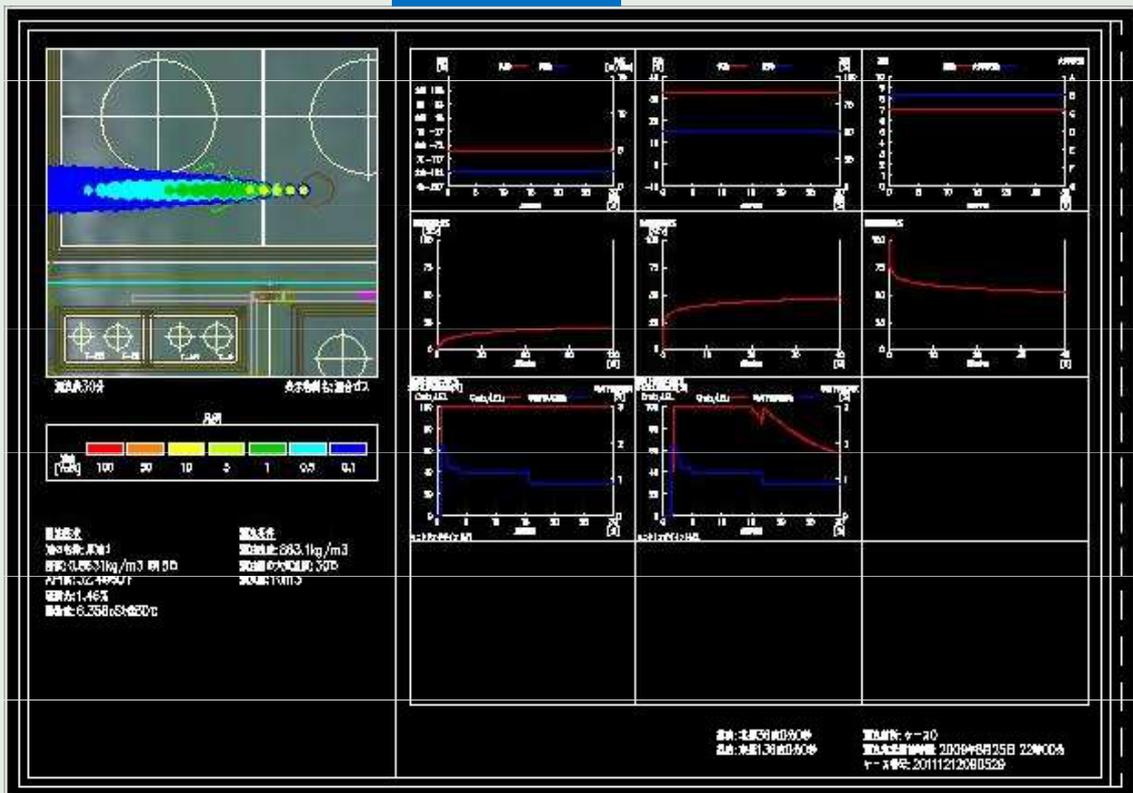
二次元表示(臭気強度表示)



危険物の漏洩とガス拡散

拡散

原油蒸発拡散



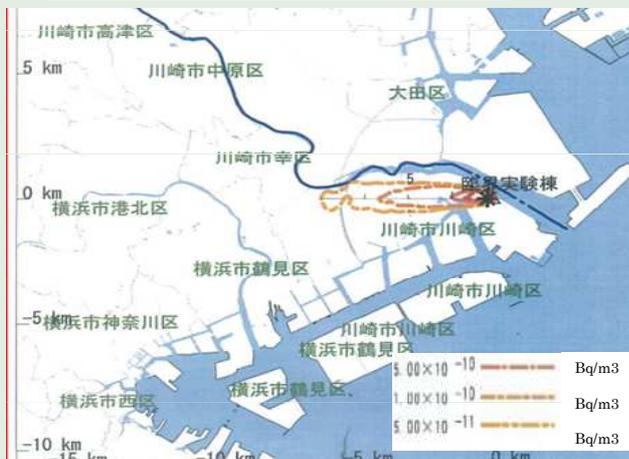
危険物の漏洩とガス拡散

拡散

放射能拡散

SPEEDIIによるシミュレーション結果
(原子力規制委員会HPより)

当社拡散プログラムによる
シミュレーション結果



シミュレーション条件《上記何れも同条件》

日時: 2012.12.18 15:00 気温: 10°C 湿度: 50% 風速5m/s 風向き 270度(東)

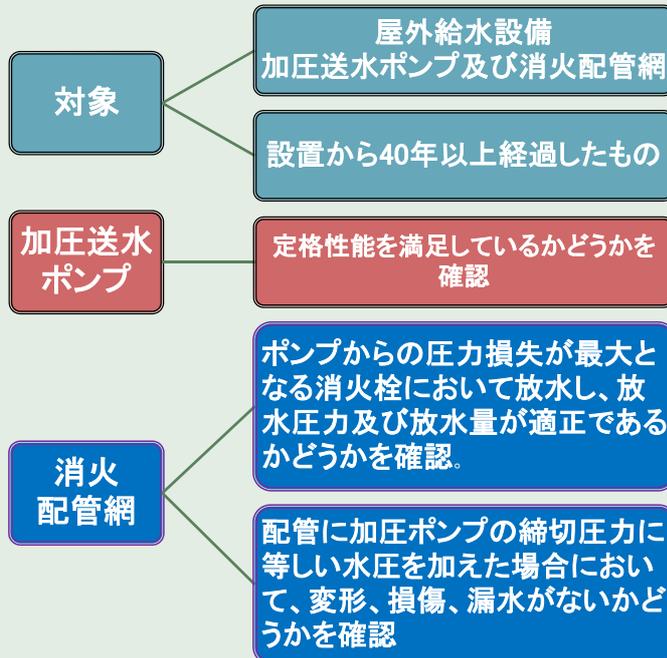
緯度 35.3146 経度 139.4628 測定高さ: 14m

放出条件:ヨウ素 1Bq/h 総放出量:1Bq(1時間放出)

消火配管の経年劣化

石災法通達の内容

通達



実際必要となるデータと作業

- 1) 性能曲線
- 2) 運転試験

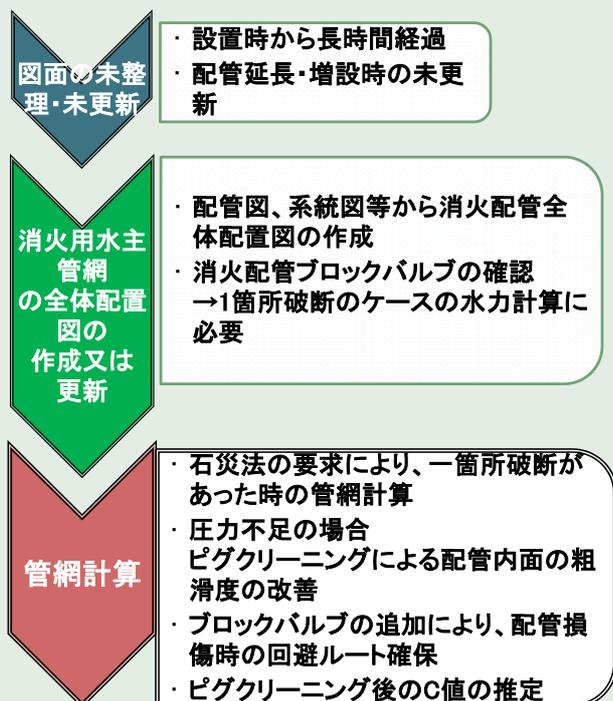
- 1) 1箇所の火災時に必要な水量
(実際は複数箇所在る)
- 2) 各供給ポイントにおける供給必要圧力
- 3) 水力計算書による確認
- 4) 最大水量火災のケースについて放水試験

- 1) 安全弁の作動試験
- 2) 耐圧試験

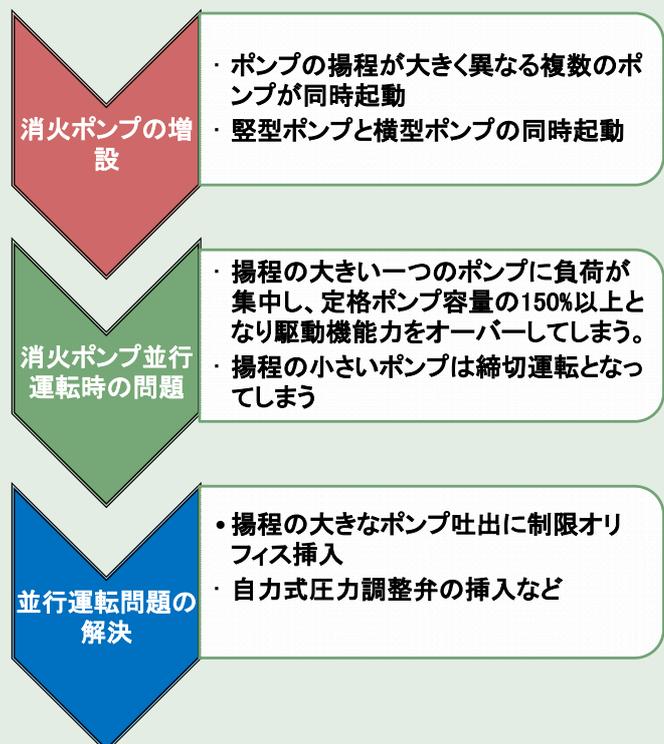
消火配管の経年劣化

推奨する見直し検討

図面の見直しと管網計算



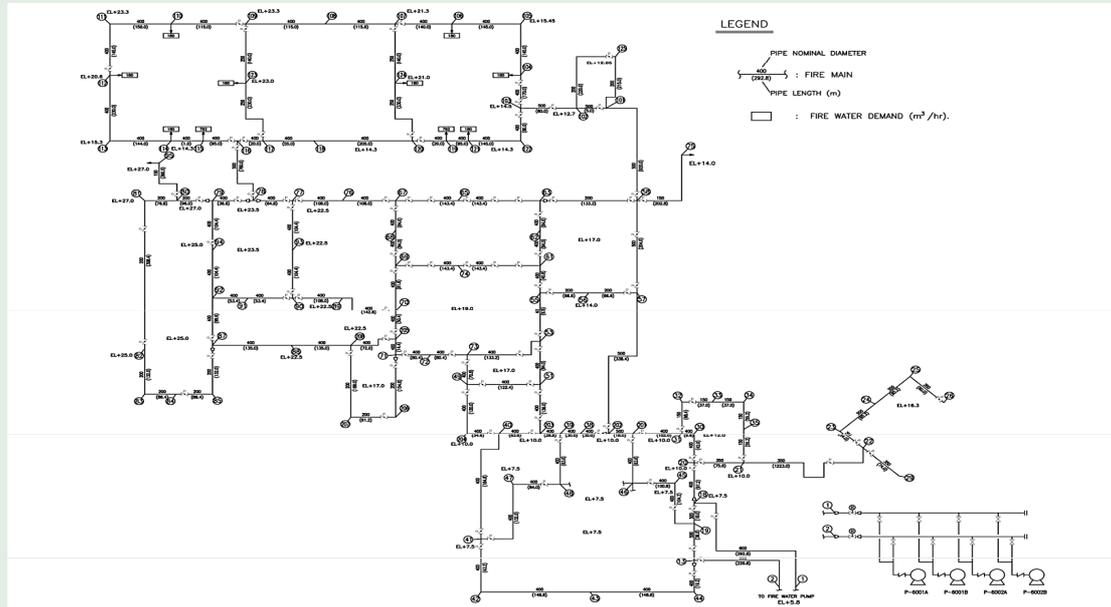
消火ポンプの見直し



消火配管の経年劣化

管網計算

実際は、PIPE NET プログラムを使用して、管網計算により消火主管の圧力損失を計算します。



アドバンスソフト株式会社のご紹介

アドバンスソフト株式会社
第3事業部 技術第7部
松澤 邦裕

プラント防災とシミュレーションセミナー
2016年4月26日（火）
アドバンスソフト株式会社

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

会社概要

名称 アドバンスソフト株式会社
(英文社名 AdvanceSoft Corporation)

本社 〒101-0062
東京都千代田区神田駿河台4-3
新お茶の水ビル17階
TEL: 03-6826-3970
FAX: 03-5283-6580

設立 2002年(平成14年)4月24日

資本金 3,724万円

社員数 86名(2016年4月25日現在)

事業部	部	課	業務概要
-	総合企画部	コンサルティンググループ	アドバンス/スーパーコンピューティングサービス・防災シミュレーション・コンサルティングサービスの提供など
		解析グループ	解析サービスの提供など
第1事業部	技術第1部	第2課	ナノ材料の第一原理計算、量子化学計算やモノ領域の開発など
		第5課	プリポスト・可視化システム・連成システム開発、構造解析エンジニアリングなど
	技術第2部	第10課	次世代TCADシステムの開発など
第2事業部	技術第4部	第8課	混相流に係わる次世代流体システム開発など
第3事業部	技術第3部	第4課	乱流、燃焼、化学反応等に係わる次世代流体システム開発など
		第6課	J-PARCIに係わるプロジェクトの実施等
	技術第7部	商品販売推進課	発電・化学プラントやライフライン等の管路系流体解析エンジニアリング業務、次世代流体解析システム保守・販売サポート
第4事業部	技術第5部	第11課	原子力・エネルギー利用に係る安全性解析など
		第12課	原子力・エネルギー利用に係るソフトウェア開発など
営業本部	営業部	営業第1課	お客さま窓口
		営業第2課	お客さま窓口
		営業第3課	お客さま窓口
東海事業所			お客さま窓口

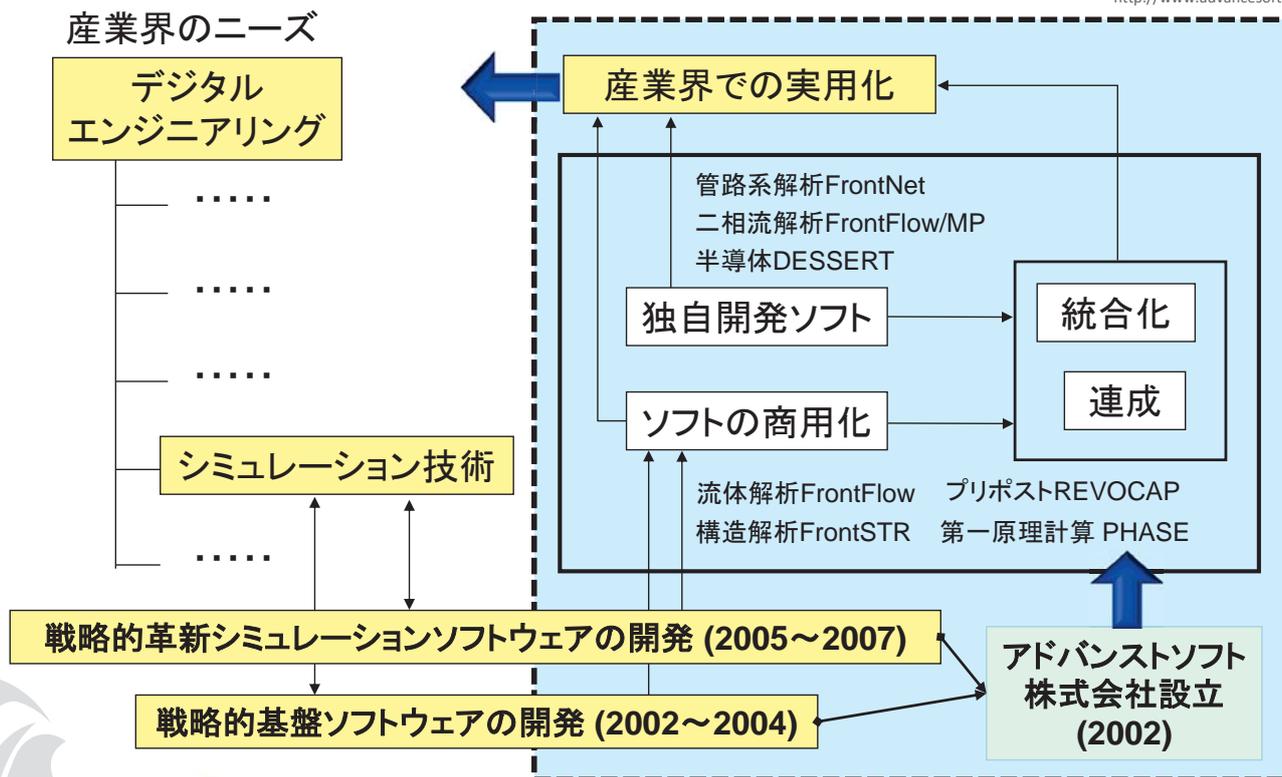
Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

(2016年4月1日現在)

アドバンスソフトとは



<http://www.advancesoft.jp/>



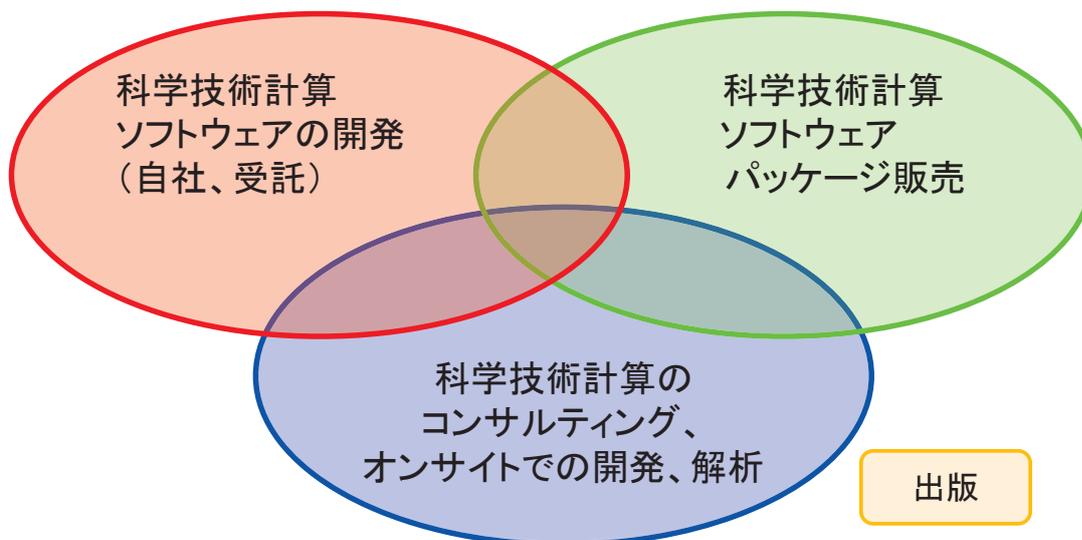
Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事業内容



<http://www.advancesoft.jp/>

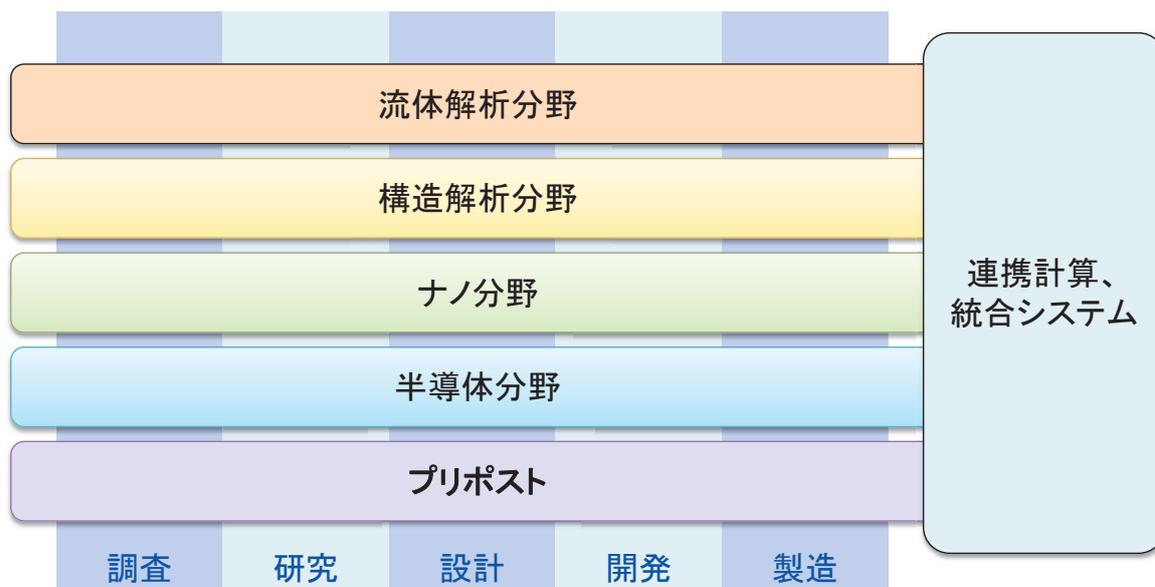
アドバンスソフトがご提供するサービス



科学技術計算ソフトウェアの開発を基礎とした、科学技術計算に関する様々なソリューションをご提供します。

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

事業分野



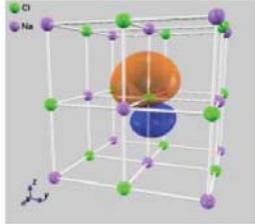
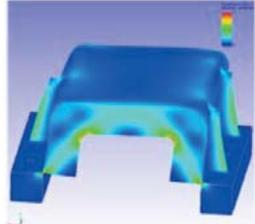
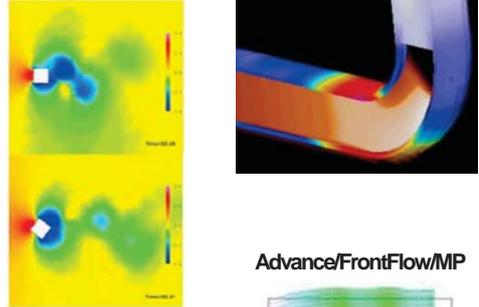
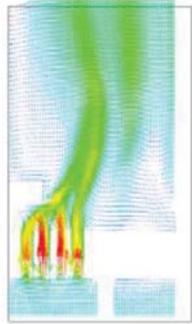
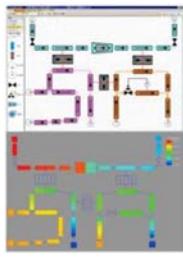
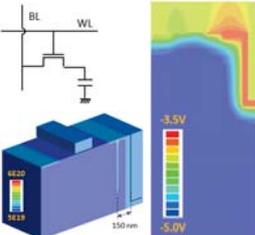
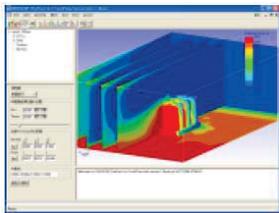
産業の主要な分野のあらゆるフェーズで直面する課題に対し、
科学技術計算によるソリューションをご提供します。

アドバンスソフトが開発販売するソフトウェアパッケージ

種類	ソフト名
第一原理計算ソフトウェア	Advance/PHASE
汎用プリポストプロセッサ	Advance/REVOCAP
流体解析ソフトウェア	Advance/FrontFlow/red
気液二相流解析ソフトウェア	Advance/FrontFlow/MP
構造解析ソフトウェア	Advance/FrontSTR
管路系流体解析ソフトウェア	Advance/FrontNetシリーズ
3次元デバイスシミュレータ	Advance/DESSERT
音響解析ソフトウェア	Advance/FrontNoise
都市安全・環境シミュレータ	Advance/EVESAYFA
ソフトマテリアル統合シミュレータ	Advance/OCTA
大規模固有値ソルバー	Advance/NextNVH
非定常渦電流解析プログラム	Advance/MAGNETIC
高速流解析ソフトウェア	Advance/FrontFlow/FOCUS
LSI設計用CADシステム	Advance/TCAD

アドバンスソフトのパッケージソフトウェア



<p>ナノ</p> <p>Advance/PHASE</p> 	<p>構造</p> <p>Advance/FrontSTR</p> 	<p>流体</p> <p>Advance/FrontFlow/red Advance/FrontFlow/FOCUS</p>  <p>Advance/FrontFlow/MP</p>  <p>Advance/FrontNetシリーズ</p> 	
<p>半導体</p> <p>Advance/DESSERT</p> 	<p>プリポスト</p> <p>Advance/REVOCAP</p> 		

※上記は主要パッケージを掲載しています。詳細は弊社HP(www.advancesoft.jp)をご参照ください。

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

アドバンス/スーパーコンピュータ・サービス



- 日本を代表するフラッグシップのスーパーコンピュータ
 - ・スーパーコンピュータ「京」
 - ※利用申請先: 一般財団法人高度情報科学技術研究機構様
 - ・地球シミュレータ(大規模共有メモリスistem SGI UV2000)
 - ※利用申請先: 国立研究開発法人海洋研究開発機構様

・ 第一原理計算ソフトウェア	Advance/PHASE
・ 流体解析ソフトウェア	Advance/FrontFlow/red
・ 構造解析ソフトウェア	Advance/FrontSTR
・ 音響解析ソフトウェア	Advance/FrontNoise
・ 気液二相流解析ソフトウェア	Advance/FrontFlow/MP (※1)
・ 3次元デバイスシミュレータ	Advance/DESSERT (※2)

※1: スーパーコンピュータ「京」のみ提供
 ※2: 地球シミュレータ(大規模共有メモリスistem SGI UV2000)のみ提供

□ Advance/PHASE、Advance/FrontFlow/red、Advance/FrontSTRは、東京大学生産技術研究所計算科学技術連携研究センターが実施した文部科学省ITプログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクト、および、文部科学省次世代IT基盤構築のための研究開発「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」プロジェクトの成果(ソフトウェア)をアドバンスソフト株式会社が商品化したものです。アドバンスソフトはこれらのプロジェクトに参加し、ソフトウェアの開発を担当しましたが、その成果を独自に改良して商用パッケージソフトウェアとし、販売保守を行っております。

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

facebook、YouTubeでも関連記事を掲載中



<http://www.advancesoft.jp/>

<http://www.facebook.com/advancesoft.jp>

<http://www.youtube.com/user/advancesoft>



建物内の火災安全・防災 のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA の機能紹介と事例紹介

第3事業部 富塚 孝之

プラント防災とシミュレーションセミナー
2016年4月26日（火曜日）
アドバンスソフト株式会社

目次

1. 背景
2. 火災シミュレーションモデル
3. Fire Dynamics Simulator (FDS)
4. 建内火災安全・防災のためのシミュレータ
Advance/EVE SAYFA
5. EVE SAYFAとFDSの連成解析機能
6. 連成解析事例

背景

- 近年の数値シミュレーション技術の進歩とともに、火災安全分野に対してCFDを用いた火災シミュレーションが盛んになってきたが、超高層建築物、大型船舶、大規模プラントなどを丸ごとシミュレーションするには無理
- リスク評価の観点から、多数の火災シミュレーションを実施する必要性があるため、マクロモデルに基づく方法とCFDを併用するシミュレーションモデルに着目
- 一方、火災実験は費用面、安全面、環境面などで負荷が大きく、実施が困難
- 火災数値シミュレーションの役割は防火対策を考慮した安全設計の支援、消火方法、延焼を防ぐ方法を検討するための支援
- 火災被害で考慮すべきは現象は多岐に渡り、複雑
 - 燃焼
 - 煙の流動性
 - 火炎からの放射熱
 - 爆発

背景

- 建物火災
- トンネル火災
- 市街地火災
- 車両火災
- タンク火災



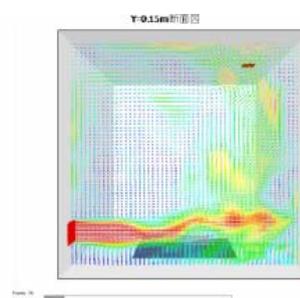
■写真1 兵庫県南部地震直後の神戸市街の火災の様子
(神戸山手大学都市交流学科 小林郁雄教授提供)

火災シミュレーションモデル

- ゾーン(Zone)モデル
 - 建物区画の煙流動性状をマクロな観点から単層もしくは二層とみなして、気体の質量や熱的なバランスから記述した実用的モデル



- フィールドモデル(CFDモデル)
 - 建物区画を多数のセルに分割、熱・煙流動をミクروسケールから予測するモデル



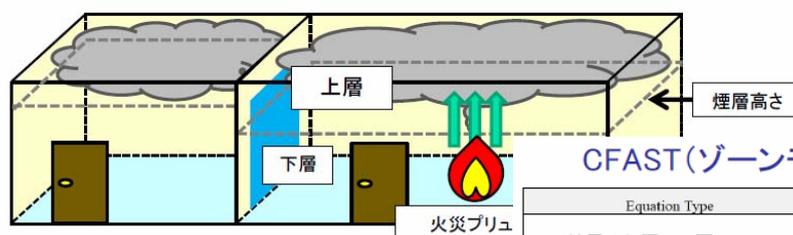
火災シミュレーションモデル

世界の主要な火災解析コード

解析コード	CFAST	SYLVIA	FDS	ISIS
開発主体	米国NIST	仏IRSN	米国NIST	仏IRSN
数値解法	Zone	Zone	CFD	CFD
最大火災室数	30	多数	少数	少数
壁面熱伝達	有	有	有	有
低層ガス温度計算	有	有	3D温度計算	3D温度計算
火災源(発熱源)	有	有	有	有
ガス濃度計算	有	有	有	有
火災検知モデル	有	有	有	有
スプリンクラー	有	有	有	有

火災シミュレーションモデル

・ゾーン(Zone)モデル[CFAST]



CFAST(ゾーンモデル)基礎式

Equation Type	Differential Equation
質量(上層・下層)	$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_i$
圧力(部屋内一様)	$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma-1}{V} (\dot{h}_L + \dot{h}_U)$
エネルギー(上層・下層)	$\frac{dE_i}{dt} = \frac{1}{\gamma} (\dot{h}_i + V_i \frac{dP}{dt})$
層体積(上層)	$\frac{dV_U}{dt} = \frac{1}{\gamma P} (\gamma - 1) \dot{h}_U - V_U \frac{dP}{dt}$
ガス密度(上層・下層)	$\frac{d\rho_i}{dt} = -\frac{1}{c_p T_i V_i} (\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) - \frac{V_i}{\gamma-1} \frac{dP}{dt}$
ガス温度(上層・下層)	$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_p \rho_i V_i} (\dot{h}_i - c_p \dot{m}_i T_i) + V_i \frac{dP}{dt}$

*Walter W. Jones, et. al "CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 5) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1030, 2004

- ・建物内の空間は煙層(高温部)と空気層(常温部)の均質な上下の層(ゾーン)に区分される。
- ・上下層は水平な境界面(煙層高さ)で区分される
- ・上層・下層間の質量・エネルギー移動は「火災ブリューム」「開口流」等によって生じる。

Fire Dynamics Simulator (FDS)

・CFDモデル[FDS(Fire Dynamics Simulator)]

- 米国商務省標準技術研究所/建築火災研究所(NIST/BFRL)にて開発。ベースとなるCFDモデルのBF3Dコードに改良を加えるとともに、火災現象をPC上で容易に可視化再現できるSmokeViewと呼ばれる後処理を充実させたもの。2000年に公開。
- 火災研究者・技術者の間で、2000年以降急速に普及してきている。火災のCFDプログラムとしては、デファクトスタンダード的な存在
- 世界中で実験との比較検討を通じて火災現象予測の妥当性の検証が充実してきているのも安心して使える理由の一つ。

Fire Dynamics Simulator (FDS)

- 低マッハ数近似に基づく弱圧縮性流体3次元モデル
- 乱流モデルとしてLES (Large Eddy Simulation) モデルを採用、サブグリッドスケール (SGS) モデルはSmagorinskyモデル
- 対流項スキームは擬似的な空間2次精度中心差分法
- 時間積分には予測子-修正子法による時間2次精度の半陰解法
- マルチブロック構造格子でスタaggerド格子を採用
- 渦消散モデルと酸素消費法を組み合わせ、換気支配火災や消炎にも対応可能な独自の乱流拡散燃焼モデル
- 燃焼反応モデルとして、多成分化学種を一段階反応で取り扱えるように混合分率 (Mixture Fraction) モデルを採用

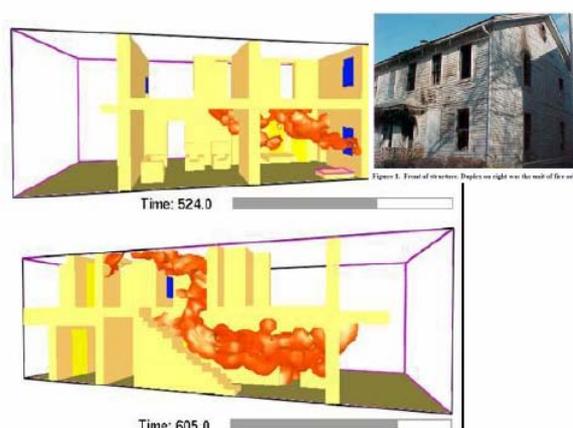
Fire Dynamics Simulator (FDS)

事例1. ラック式倉庫火災時のスプリンクラーによる燃焼抑制を含むCFDシミュレーション



Baum H. R. Large Eddy Simulations of Fires: "From Concepts to Computations", *Fire Protection Engineering*, No. 6, 36-38, 40, 42, Spring 2000.

事例2. 火災調査へのCFDシミュレーション適用事例

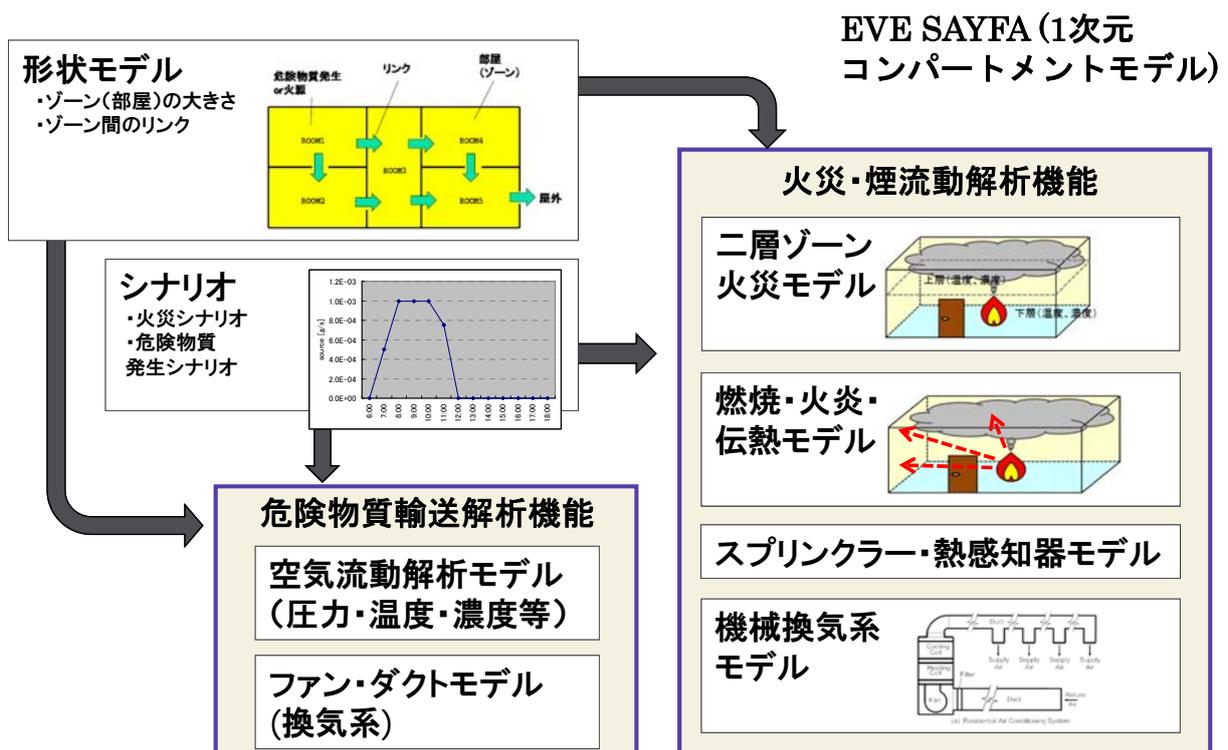


D. Madrzykowski, G. P. Forney, W.D. Walton, "Simulation of the Dynamics of a Fire in a Two-Story Duplex - Iowa, December 22, 1999" NISTIR, (2002 Jan)

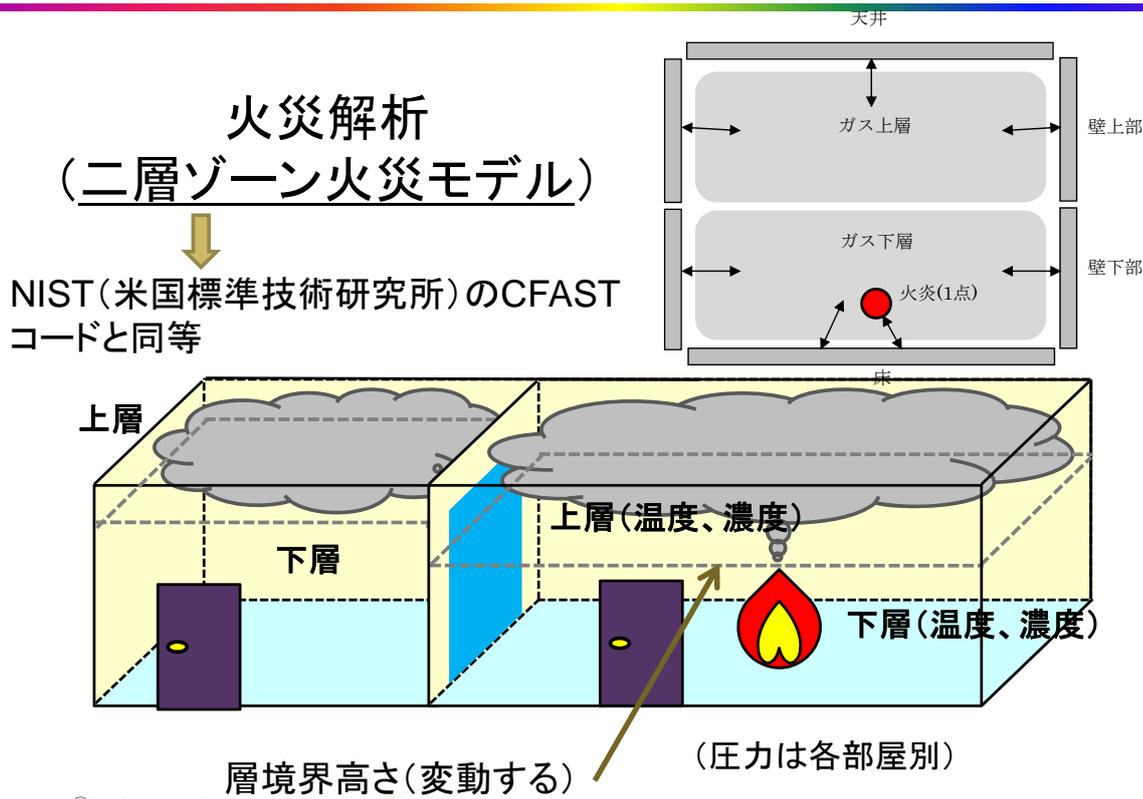
建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA

- 文部科学省の国家プロジェクトとして開発したプログラムを、アドバンスソフト株式会社が改良整備した火災・有害物質拡散解析ソフトウェア
- 二層ゾーン火災モデルの採用
- 急激な火災に対応可能な換気モデル

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA



建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA



建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA

機能一覧

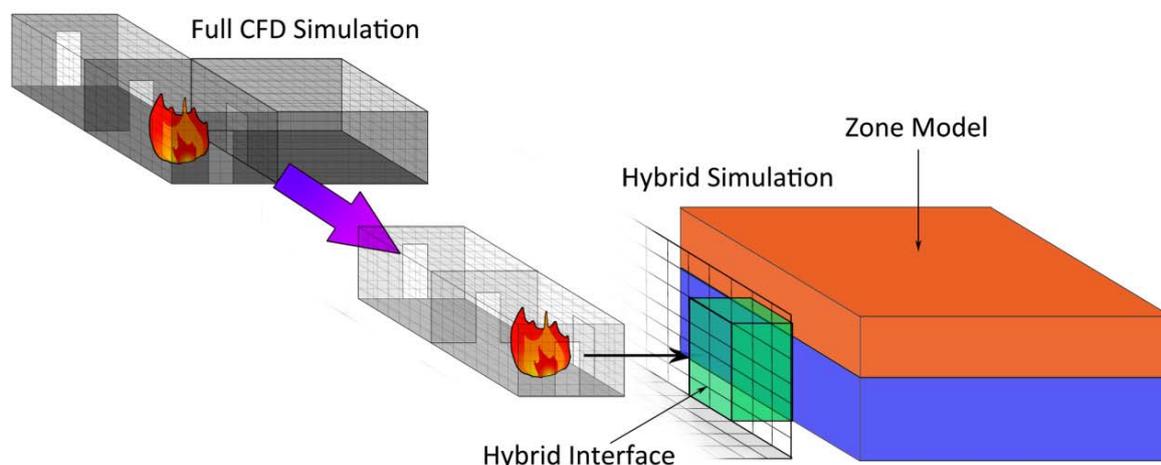
基礎方程式 (マクロモデル)	二層の質量保存式 二層の化学種保存式 二層のエネルギー保存式 状態方程式(理想気体) 開口部に対する運動方程式
時間積分法	完全陰解法
伝熱モデル	対流伝熱モデル 放射伝熱モデル (ガス吸収とすすの影響を考慮)
煙流動モデル	二層ゾーンモデル
換気モデル	圧縮性を考慮した管路モデル (Advance/FrontNet/ Γ)
機器コンポーネント	開口部、隙間、ファン
火災室数	制限なし

建物内の火災安全・防災のためのシミュレータ Advance/EVE SAYFA

Advance/EVE SAYFA 2.0とCFAST6.0の機能比較

項目		EVE SAYFA 2.0	CFAST 6.0
建物内ガス流動モデル	隙間モデル	○	○
	垂直・水平開口部モデル	○	○
	2方向流	○	○
	煙突効果	○	○
換気系モデル	熱流体モデル	圧縮性を考慮した管路モデル (Advance/FrontNet/Tを実装)	非圧縮性流体を仮定したモデル
	合流・分岐	○	○
	ダンパ	○	×
	ファン	○ (高送風圧のプロワも可)	○
化学種	O ₂ 、N ₂ 、H ₂ O、CO、CO ₂ 、C(煤)、Fuel	O ₂ 、N ₂ 、H ₂ O、CO、CO ₂ 、C(煤)、Fuel、HCL、HCN	
火災解析モデル	二層ゾーンモデル	二層ゾーンモデル	
放射・対流熱伝達	○	○	
可燃物(家具等)	×	○	
燃焼モデル	混合分率燃焼モデル	混合分率燃焼モデル	
防火設備モデル	防火戸・シャッター	○	×
	消火モデル (スプリンクラー)	○	○
	熱感知器	○	○
シナリオ設定機能	実装	実装	
危険物質輸送計算モデル	実装	×	

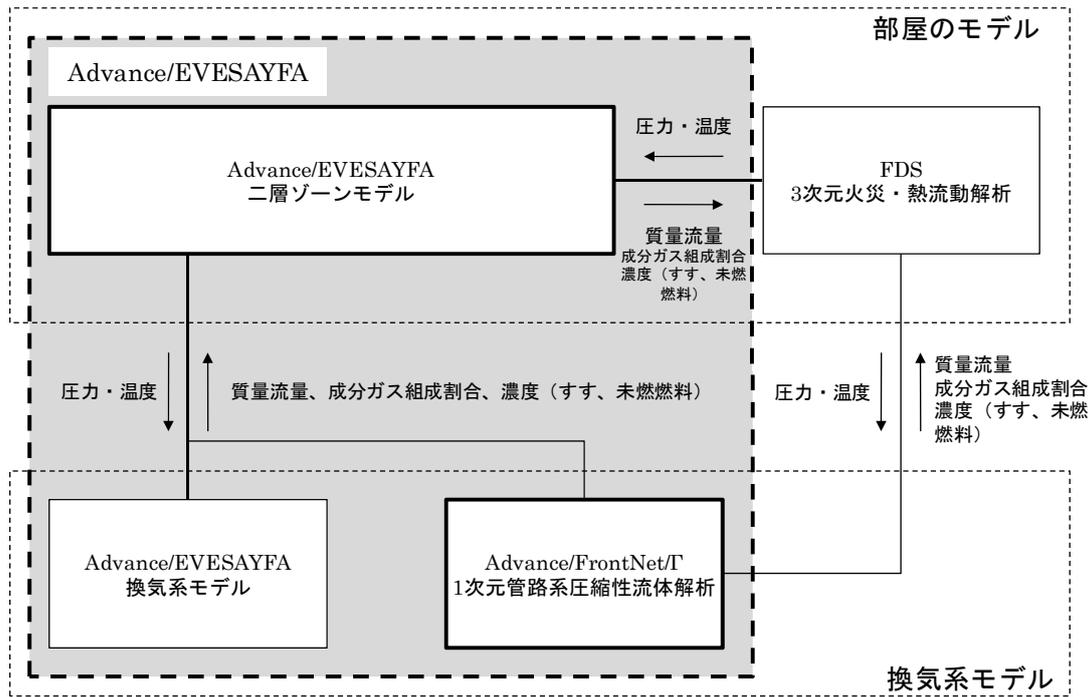
EVE SAYFAとFDSの連成解析機能



EVE SAYFAとFDSの連成計算の概念図

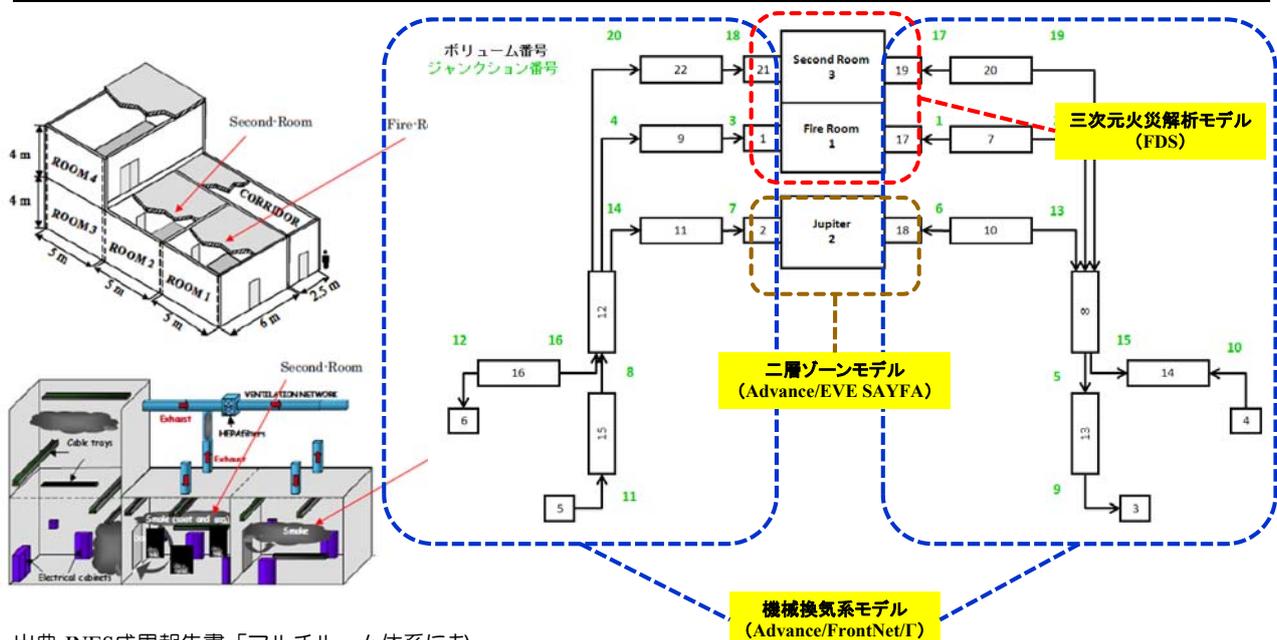
Pauling, R., Grandison, A., "The Development of Modelling Methods and Interface Tools Supporting a Risk Based Approach to Fire Safety in Ship Design", International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, Berlin, (2012).

EVE SAYFAとFDSの連成解析機能



EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

原子炉施設火災試験解析(マルチルーム試験解析) Advance/EVE SAYFA&Advance/FrontNet/TとFDSの連成解析

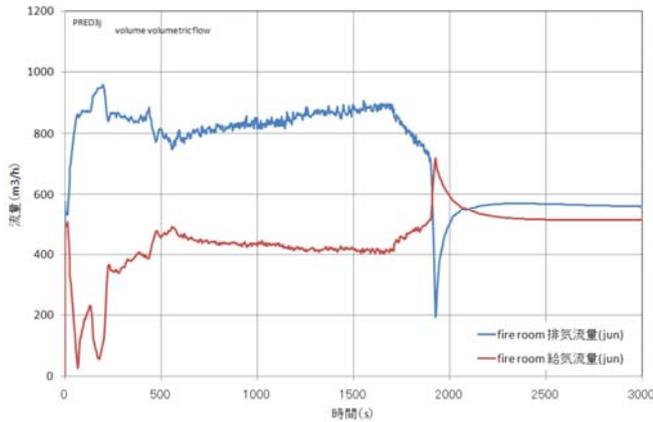


出典:JNES成果報告書「マルチルーム体系における火災伝播解析手法の整備」

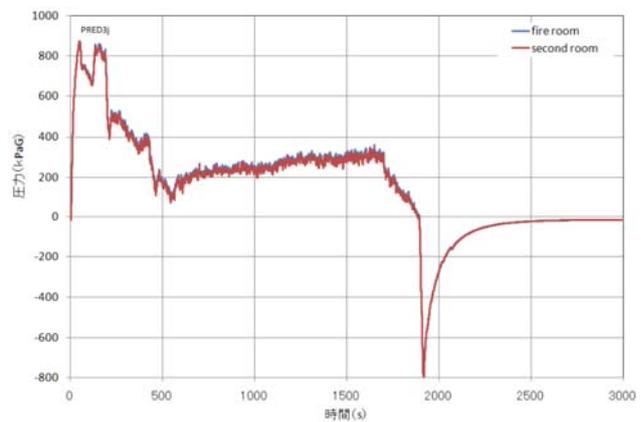
火災試験解析モデル(Advance/EVE SAYFA&FDS)

EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

原子炉施設火災試験解析(マルチルーム試験解析) Advance/EVE SAYFA&Advance/FrontNet/ΓとFDSの連成解析



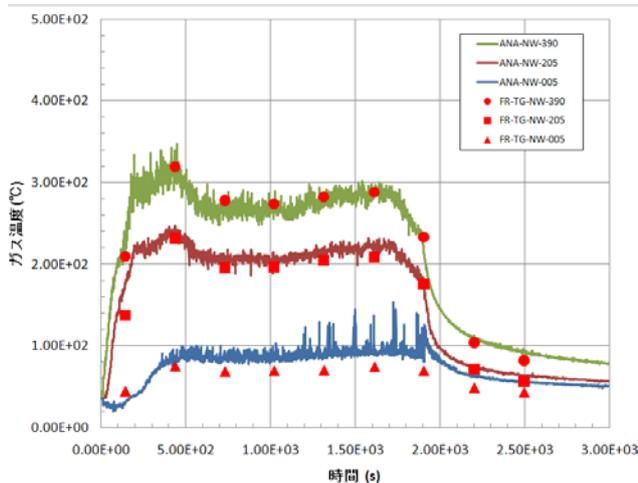
Fire Room給排気流量変化
(Advance/FrontNet/Γ)



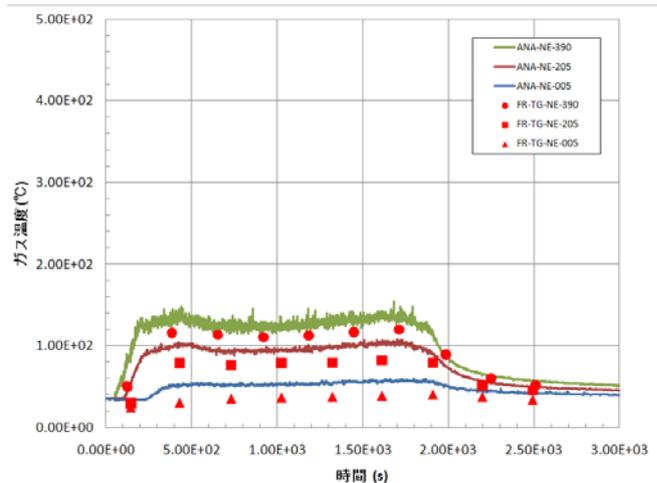
Fire Room/Second Room圧力変化
(FDS5)

EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

原子炉施設火災試験解析(マルチルーム試験解析) Advance/EVE SAYFA&Advance/FrontNet/ΓとFDSの連成解析



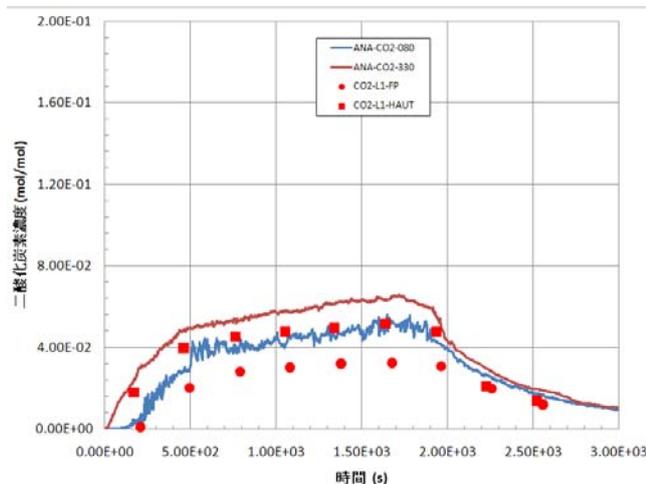
Fire Roomガス温度変化
(FDS5)



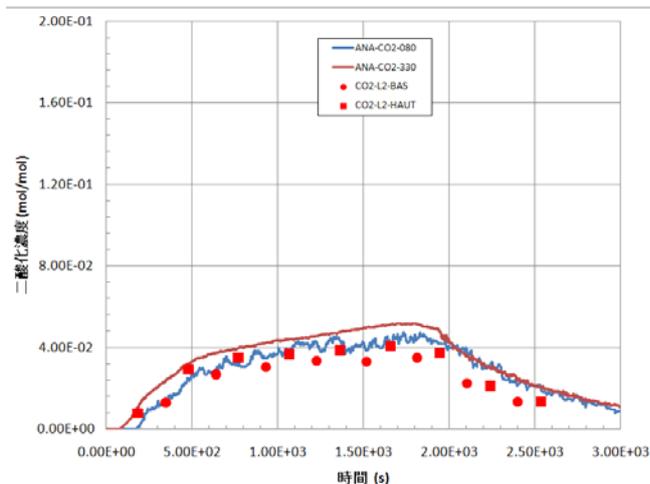
Second Roomガス温度変化
(FDS5)

EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

原子炉施設火災試験解析(マルチルーム試験解析) Advance/EVE SAYFA&Advance/FrontNet/ΓとFDSの連成解析



Fire Room二酸化炭素濃度変化
(FDS5)



Second Room二酸化炭素濃度変化
(FDS5)

出典:JNES成果報告書「マルチルーム体系における火災伝播解析手法の整備」

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

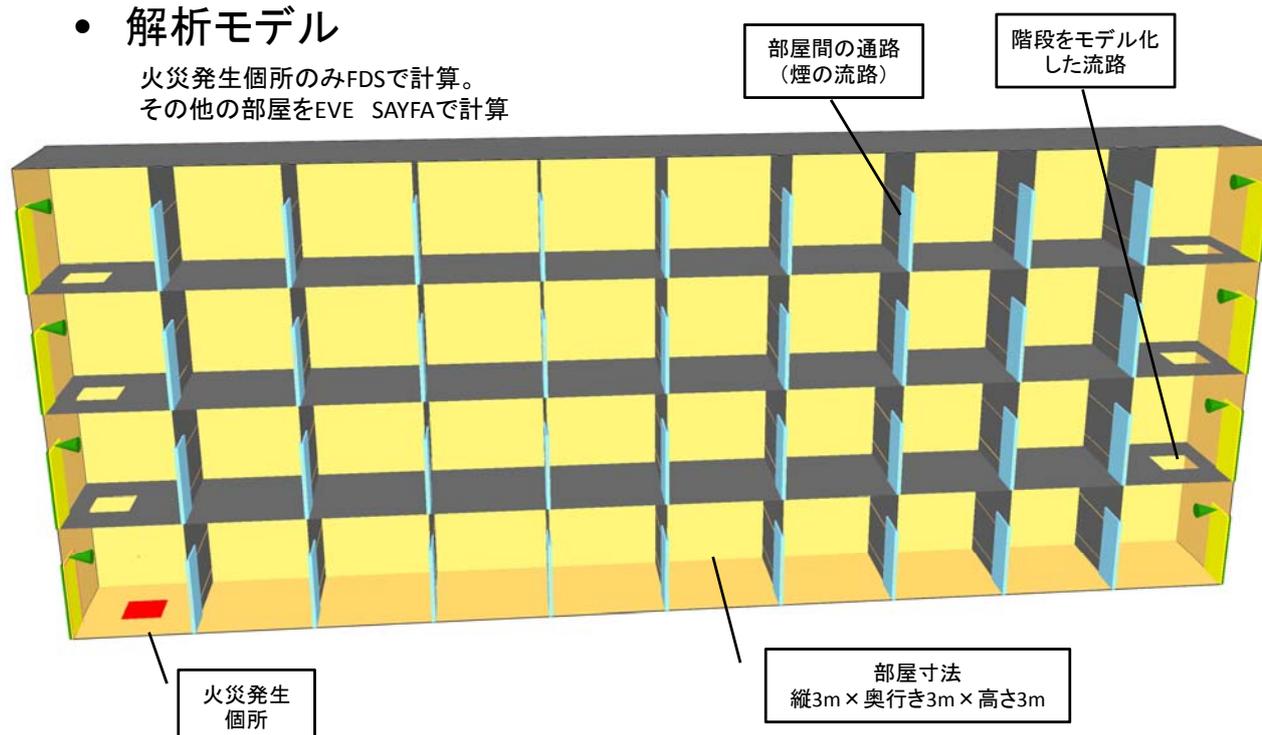
EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

- ビル火災解析事例
 - 4階建て、区画数(部屋数)40
 - ある1室で火災が発生し、階段を通して他の区画に煙が流動
- 連成解析方法
 - 火災が発生した部屋をFDSで解析
 - 他の部屋や通路の煙流動はEVESAYFAで計算

EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

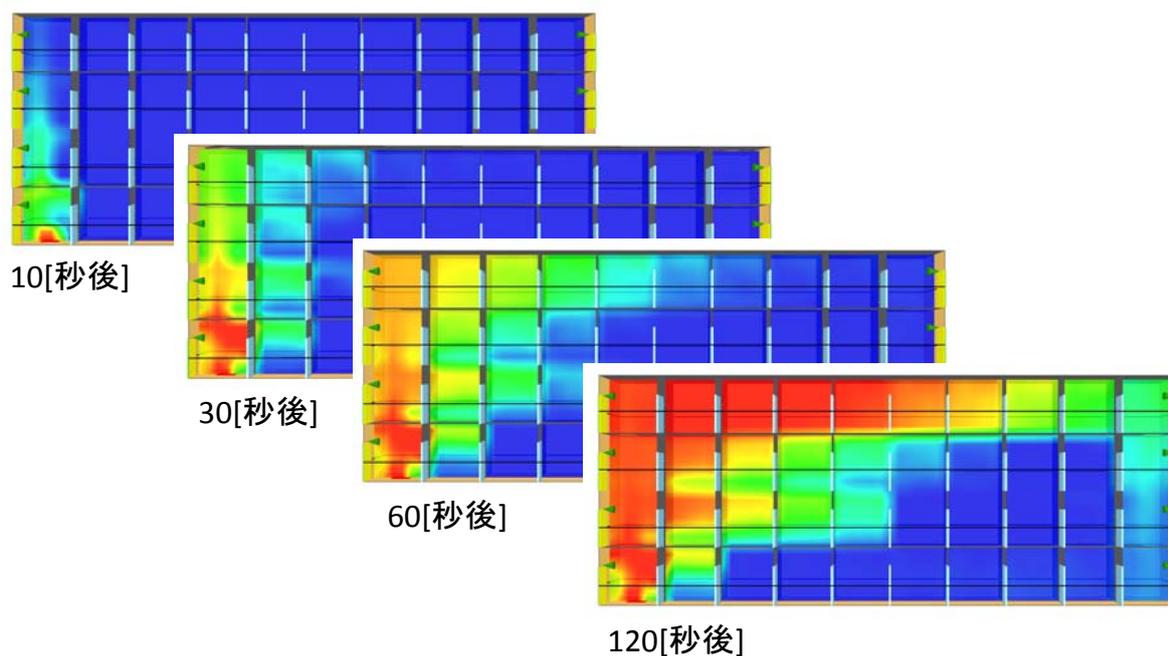
• 解析モデル

火災発生個所のみFDSで計算。
その他の部屋をEVE SAYFAで計算



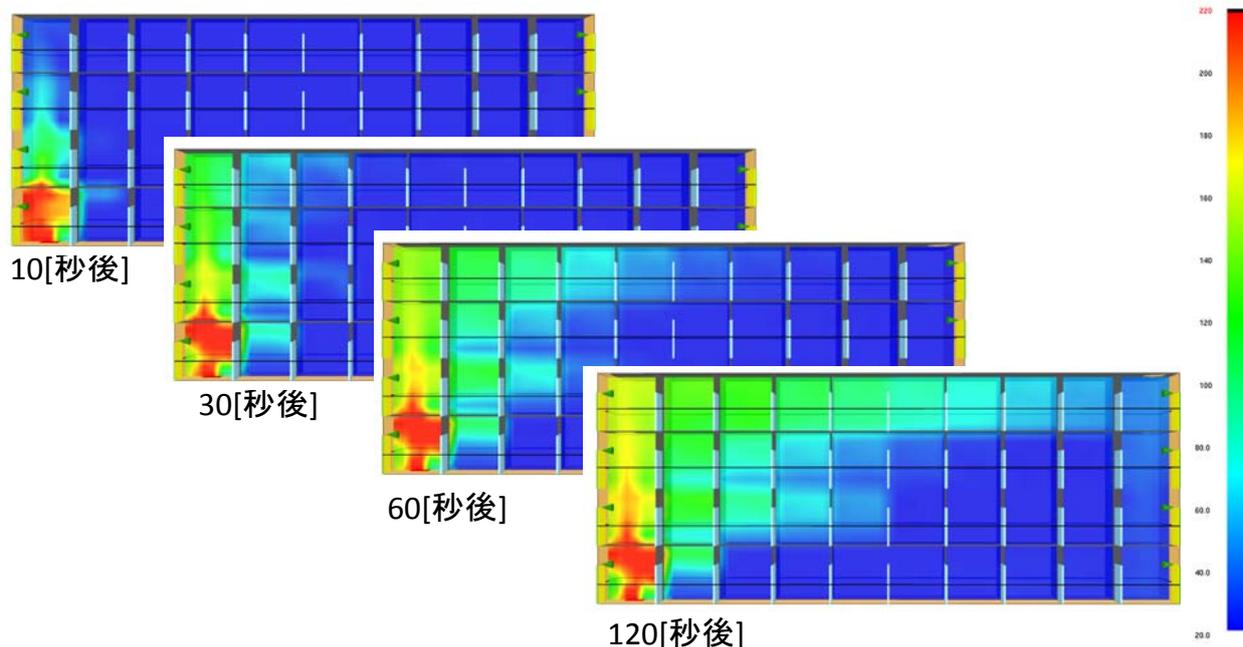
EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

• 煙濃度分布 (FDSのみ)



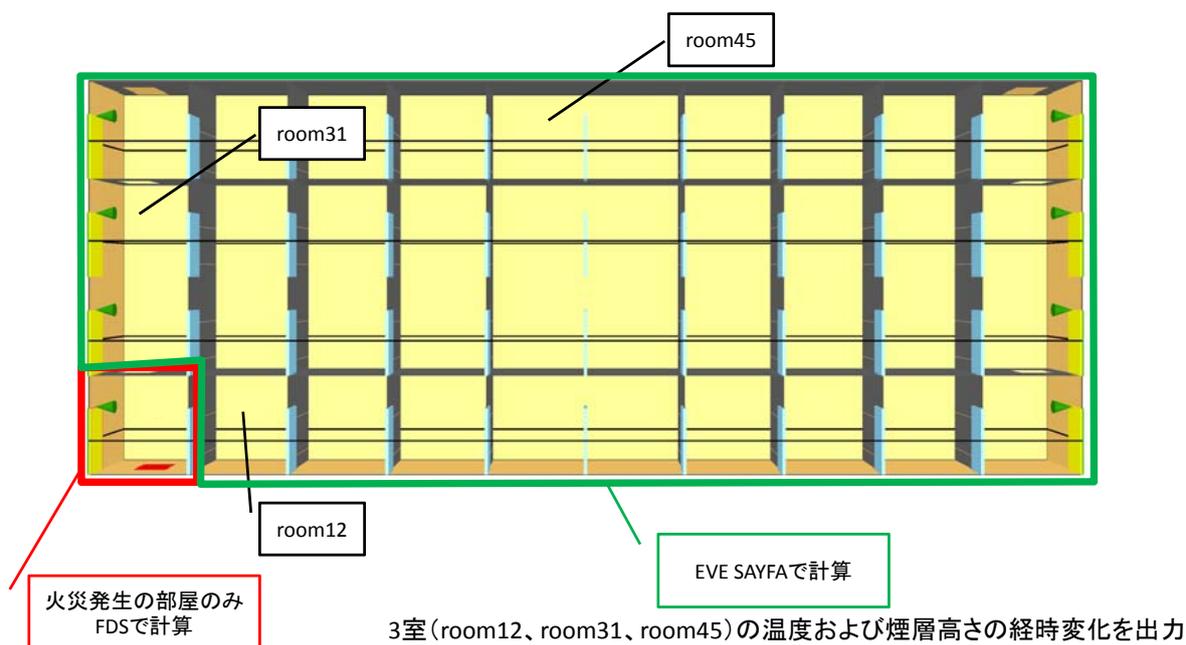
EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

- 温度分布 (FDSのみ)



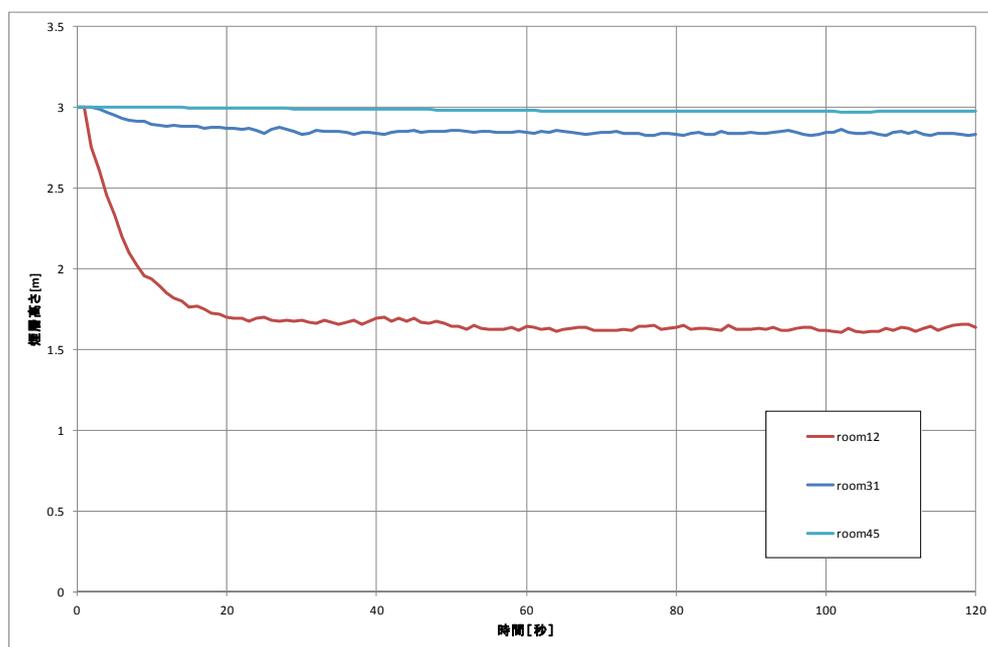
EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

- 連成解析結果



EVE SAYFAとFDSの連成解析事例

- 煙層高さ



「デジタルエンジニアリングのアドバンスソフト」

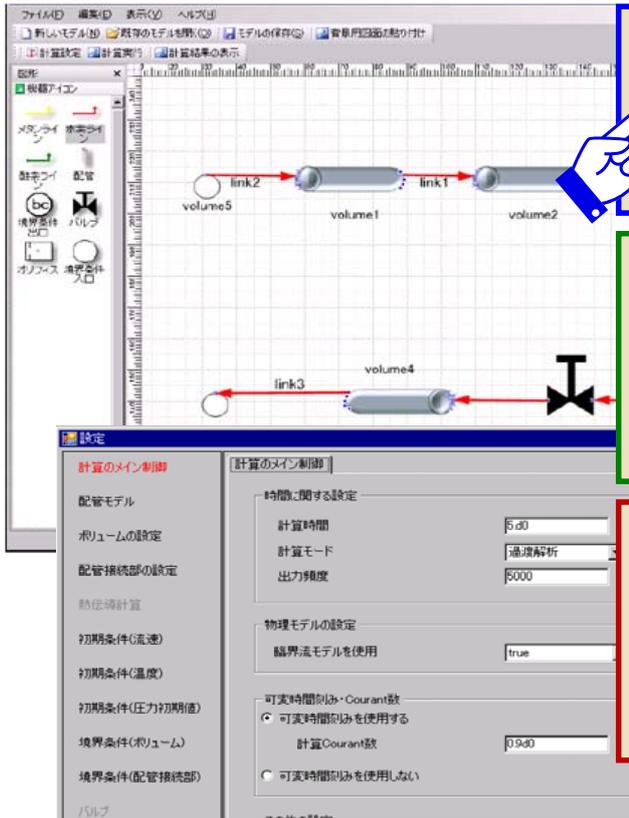
液体管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/ Ω 解析事例

第3事業部 大須賀直子

プラント防災とシミュレーションセミナー
2016年4月26日（火）
アドバンスソフト株式会社

アジェンダ

- 管路系流体解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/ Ω
- 水撃現象
- 水撃対策
- Advance/FrontNet/ Ω の数値計算法および計算モデル
- 解析事例紹介
 - ✓ LNGローディングラインの水撃解析
 - ✓ 発電プラントにおけるポンプトリップ解析
- まとめと今後の課題
- Advance/FrontNet/ Ω の関連実績



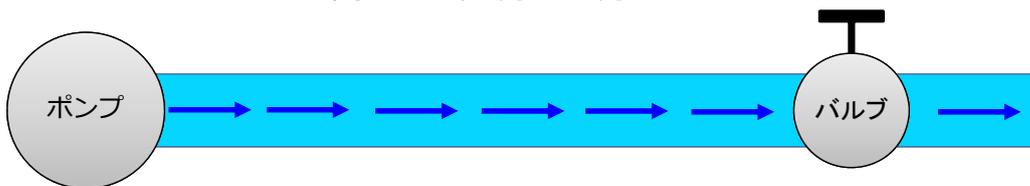
Advance/FrontNet/ Ω
 液体管路系非定常解析ソフトウェア
 温度変化の小さい液体管路の一次元流体解析
 圧カサージ、水撃、液柱分離

Advance/FrontNet/ Γ
 ガス管路系非定常解析ソフトウェア
 ガス管路の一次元流体解析
 実在流体物性関数により液体および超臨界流体も取り扱える
 (米国NIST提供の実在流体物性値関数を利用)

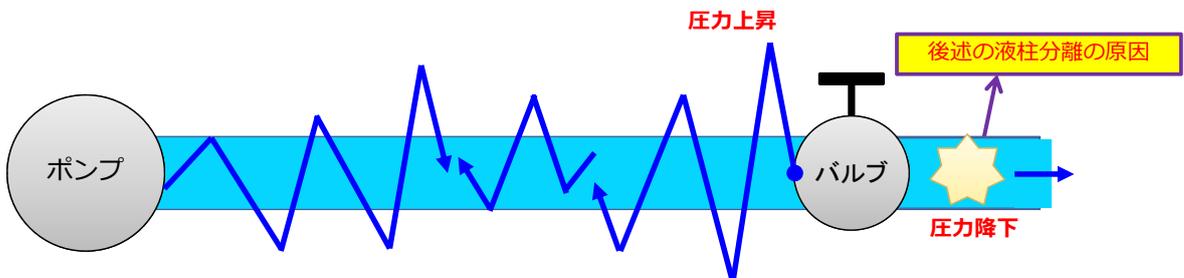
Advance/FrontNet/ Λ
 管路系準定常流体解析ソフトウェア
 運動量保存式を圧力損失関係式に単純化した定常解析
 温度等のスカラー量は非定常解析
 圧力・流量・温度などの1日の変動解析向け

水撃現象(Water Hammer)

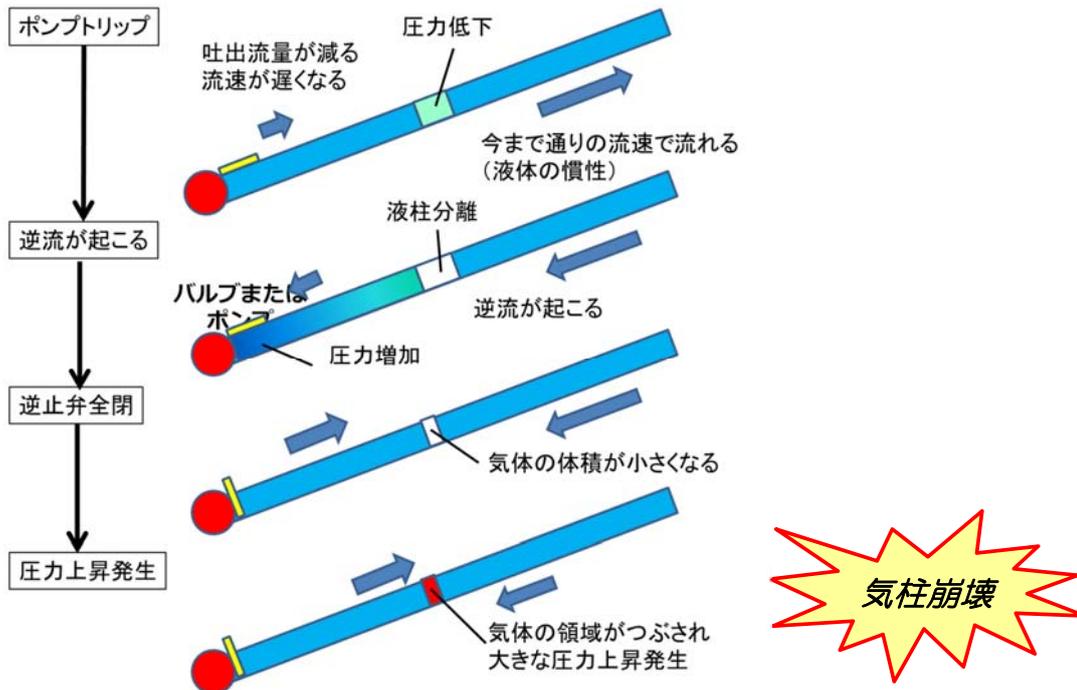
バルブが開いて一定流量が流れているとき



バルブを急閉すると流れがせき止められ水撃現象が生じる



バルブを急閉した際に、流速の急激な変化で、水の持っていた運動エネルギーが圧力変化に転換され、管内に衝撃と高水圧が発生する現象。水に限らず、液体を輸送する配管で生じる。



ポンプトリップ時などに管の一部で水の圧力が低下し、飽和蒸気圧に至ったとき、水は蒸気となる。この現象は液柱分離と呼ばれ、圧力回復によって蒸気の空洞が消滅するとき、大きな圧力上昇が起こる。

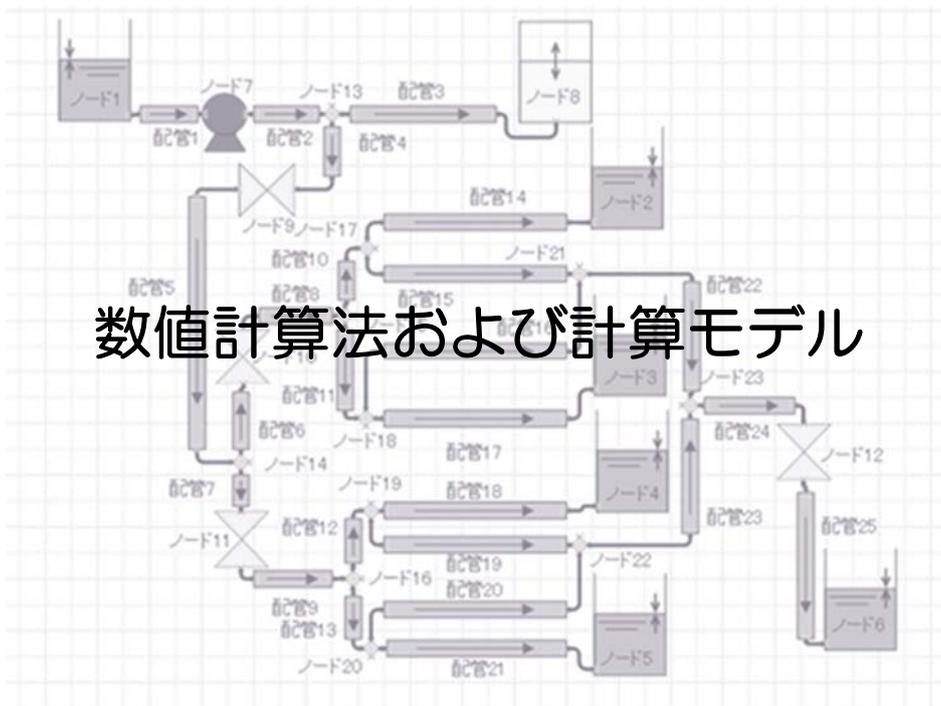
水撃対策

水撃現象は、管路のポンプ、配管、バルブ、継手、配管支持などの破損に繋がる。一般的には、次のような対策が取られる。

- 適切な管径の設定（流速が遅くなる）
- フライホイールの設置（流速の急変防止）
- サージタンクの設置（圧力の急変化を緩和）
- アキュムレータの設置（圧力の急変化を緩和）
- 空気弁の設置（負圧回避）

サージタンクは土地などの費用がかかる、空気弁は空気が排出されるときに圧力上昇を伴う場合がある等のデメリットがある。

液体管路系解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/Ωでは、複雑なパイプラインの解析を対象に、バルブの急閉鎖による圧力上昇に伴った水撃現象や、減圧によって生じた気泡または気柱が崩壊した際に生じる急激な圧力上昇を伴う液柱分離現象を解析することができる。



数値計算法および計算モデル

基礎方程式	質量保存式と運動量保存式	
数値解法	特性曲線法	
音速の取り扱い	配管材質から算出	
流体機器モデル	管	直管、テーパ管
	接続	分岐および合流
		異径管接続、 曲がり継ぎ手(エルボ)
	弁	弁(制御モデルと連動)、オリフィス
	ポンプ	ポンプ
タンク	リザーバタンク、サージタンク	
物理モデル	液柱分離モデル(キャビテーションモデル)	
	摩擦損失係数モデル(層流から乱流までを統一的に取り扱う円管に対するChurchillモデル、その他、Hazen-Williamsモデル、入力値も使用可)	
工学モデル	制御系モデル (PID、一次遅れ、進み遅れ等の制御要素を実装)	
入力	パイプラインデータ及びモデルパラメータ、 計算パラメータ	
出力	指定部分の圧力、流量の時系列データ すべての配管の平均流量と両端の圧力データ すべての配管の流量と圧力の最大・最小値とその時刻	

基礎方程式

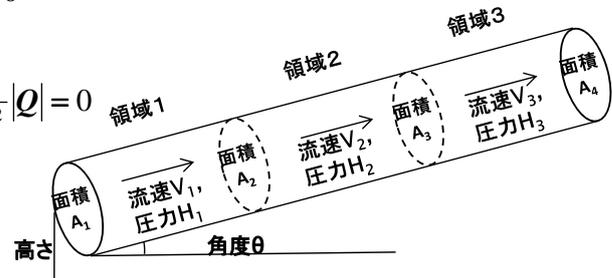
液体管路系の基礎方程式は質量保存式と運動量保存式から成り立つ。

(導出の参考；富士総合研究所編 「管路内の流れのシミュレーションプログラム」、丸善株式会社)

質量保存式
$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + V \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin \theta \right) = 0$$

運動量保存式
$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \left(V \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right) + \frac{\lambda Q}{2gDA^2} |Q| = 0$$

音速の式
$$a = \frac{\sqrt{K}}{\rho} / \sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}$$



H : Piezo水頭[m], V : 流速[m/s], A : 流路断面積[m²], $Q=AV$: 体積流量[m³/s],

θ : 管勾配[rad], g : 重力加速度[m/s²], K : 液体の体積弾性係数[Pa], D : 管直径[m],

e : 管壁厚さ[m], E : 管路構造材のヤング率[Pa], λ : 管摩擦係数[-], a : 音速[m/s].

音速の式は、液体の圧力変化による管路構造材のたわみを考慮した式となっている。

Advance/FrontNet/Ωでは、これらの質量保存式と運動量保存式を特性曲線法を用いて解く。

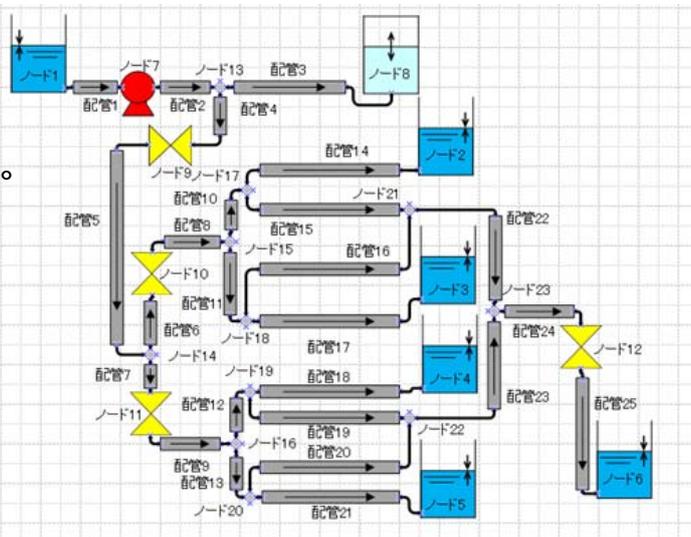
Advance/FrontNet/Ω1.0

FNΩの管路系構築ルール・入力仕様

特性曲線法では、圧力 H と流速 V が同じ位置に定義されている。

これにより、次のようなルールで管路系を構築する。

- ① 「配管」と「ノード」を定義する。
- ② 配管の両端には必ず「ノード」がある。
- ③ 配管には長さや管径、体積などが定義される。配管内部はメッシュ分割される。摩擦損失は配管で考慮される。
- ④ ノードには体積が定義されない。
- ⑤ ポンプ、弁、流体抵抗はノードに定義し、それぞれの機器の特徴を考慮する。



液注分離モデル

●液体圧力が飽和蒸気圧よりも小さくなった場合、体積流量収支に差が生じた場合、蒸気空洞が発生したとみなし、液柱分離が生じる。

●分離した液柱が逆流してきて、蒸気空洞が喪失したとみなされた場合、次のモデルで圧力上昇 ΔH が生じるものとみなす。

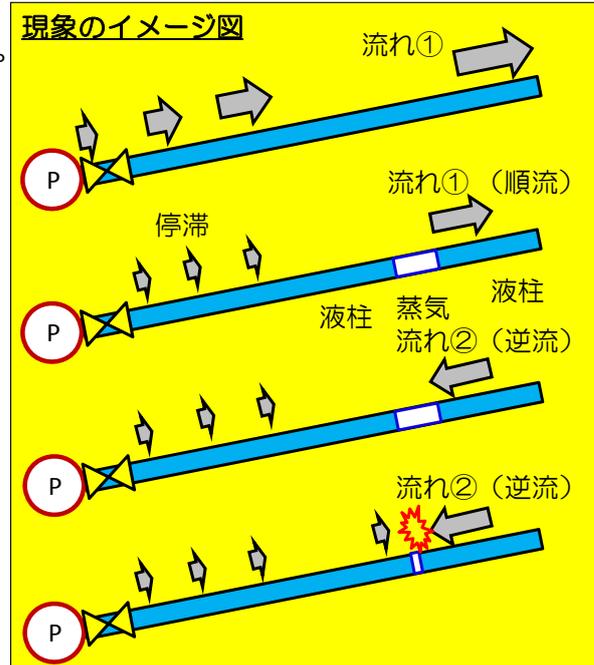
$$\Delta H = (a/2g)\Delta V \quad (\text{Joukowsky式})$$

a : 音速

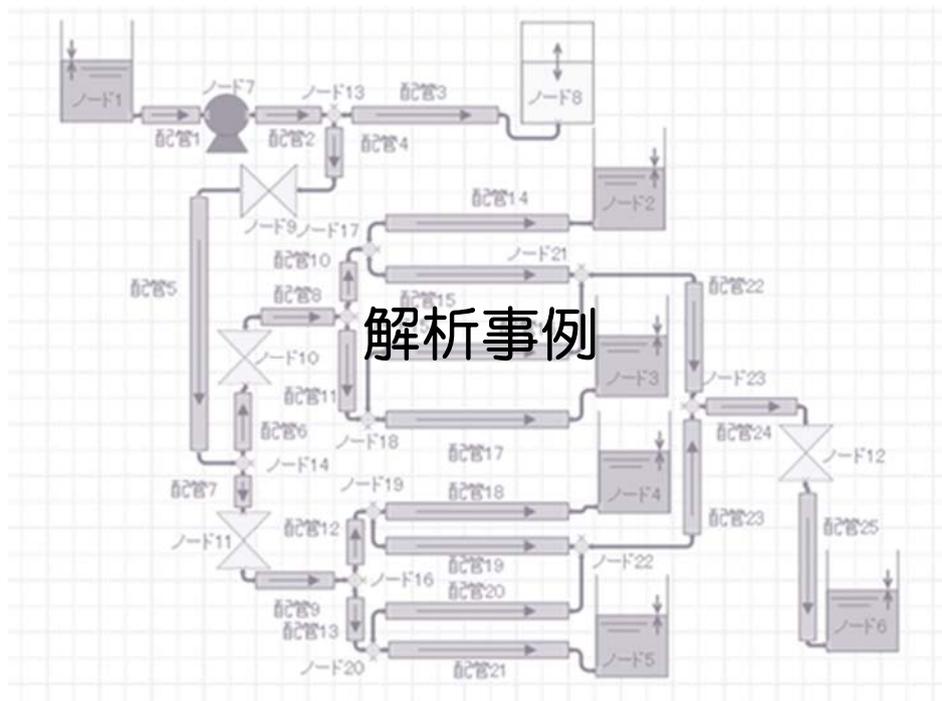
g : 重力加速度

ΔV : 蒸気空洞喪失時の流速変化

●液柱分離は、ポンプトリップ時の他、バルブ急閉時のバルブ下流側や地震時などに起こる。



Advance/FrontNet/Ω



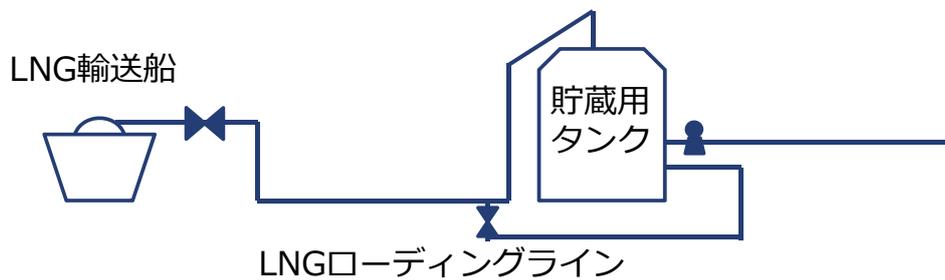
液化天然ガス（LNG）や液化石油ガス（LPG）等の液体燃料を、タンカから陸上の貯蔵用のタンクまで送る輸送ライン。



Port Lavaca - Point Comfort Calhoun County, Texas, USA

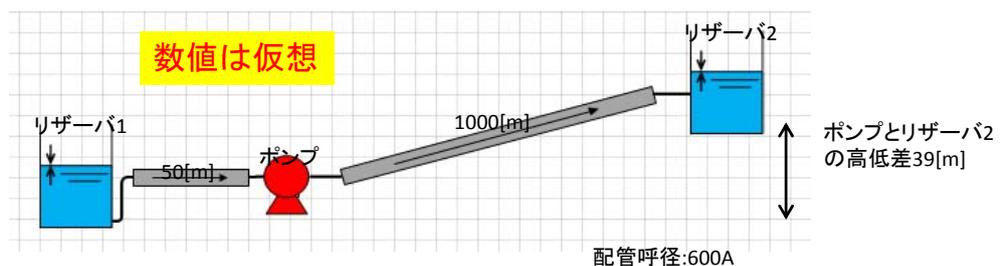


出典: http://www.tge-gas.com/



LNGローディングラインの水撃解析

◆ FNΩのモデル：



◆ 流体物性値：都市ガス13Aとし、NIST/REFPROPを用いて、以下の値を設定。

密度[kg/m ³]	粘性係数[Pa·s]	音速[m/s]	飽和蒸気圧[Pa]
453.53	156.04e-3	1415.2	104990 (3665[PaG])

◆ 時間刻み幅：

クーラン数 0.9 で自動調整 (dt ≒ 5.0E-04 s)

◆ 計算設定：

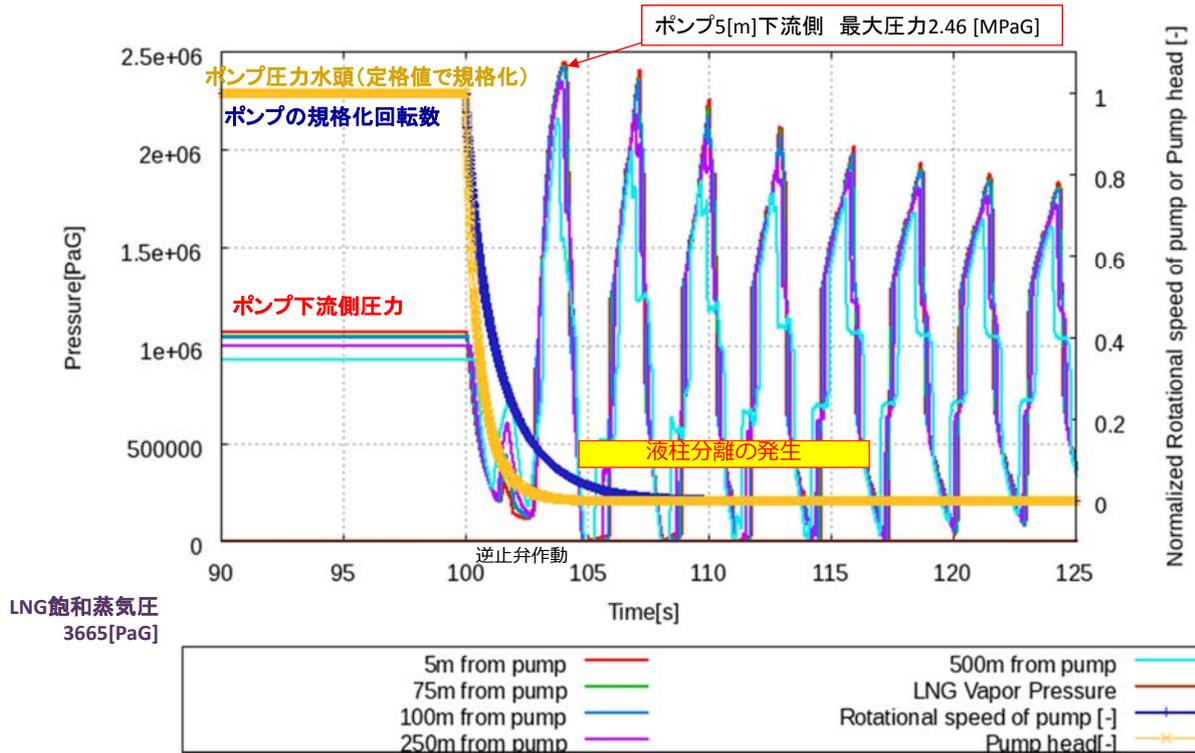
100[s]までNull Transient解析
100[s]にポンプトリップ発生として解析を実施。
ポンプトリップ後、1秒後に逆止弁作動。

大気圧より大きい！
参考値：20℃水の飽和蒸気圧2339[Pa]

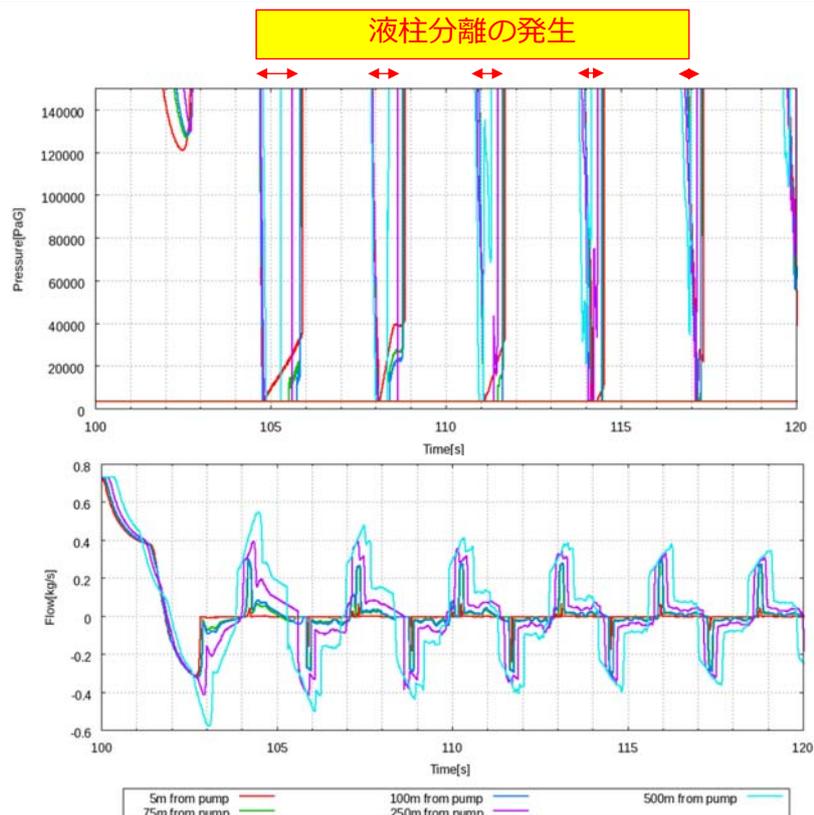
LNGは沸点が高く気化しやすい

液柱分離から気柱崩壊が生じやすい

LNGローディングライン液柱分離 解析結果



LNGローディングライン液柱分離 解析結果拡大図

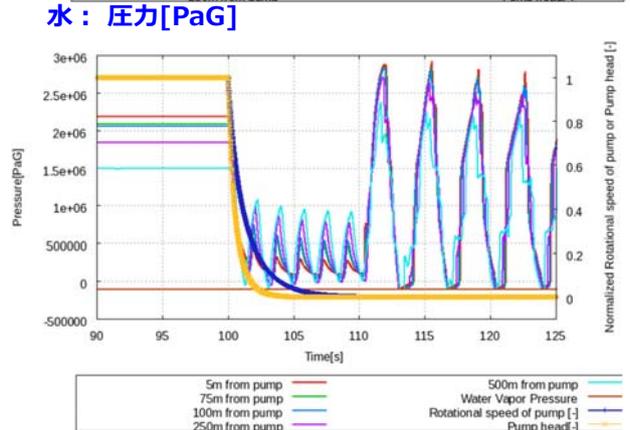
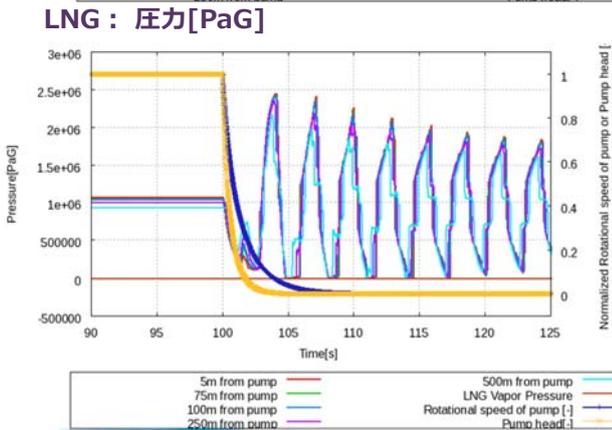
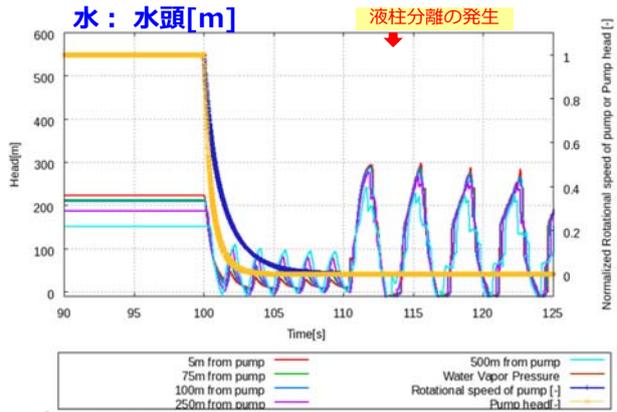
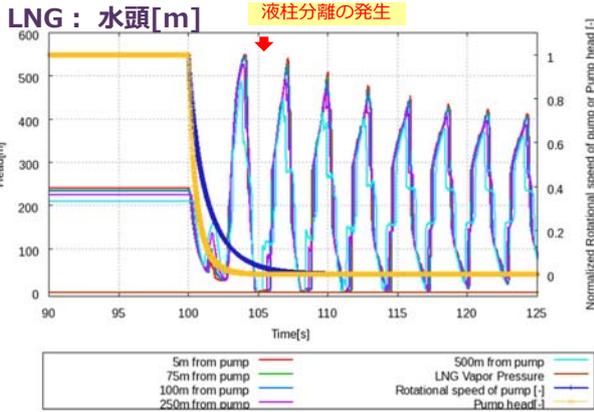


LNGと水との比較

水の場合、物性以外の解析モデル、
計算条件はLNGと同じ。
<http://www.advancesoft.jp/>
AdvanceSoft

逆止弁作動後、液柱分離が発生

ポンプの回転が止まってから、液柱分離が発生

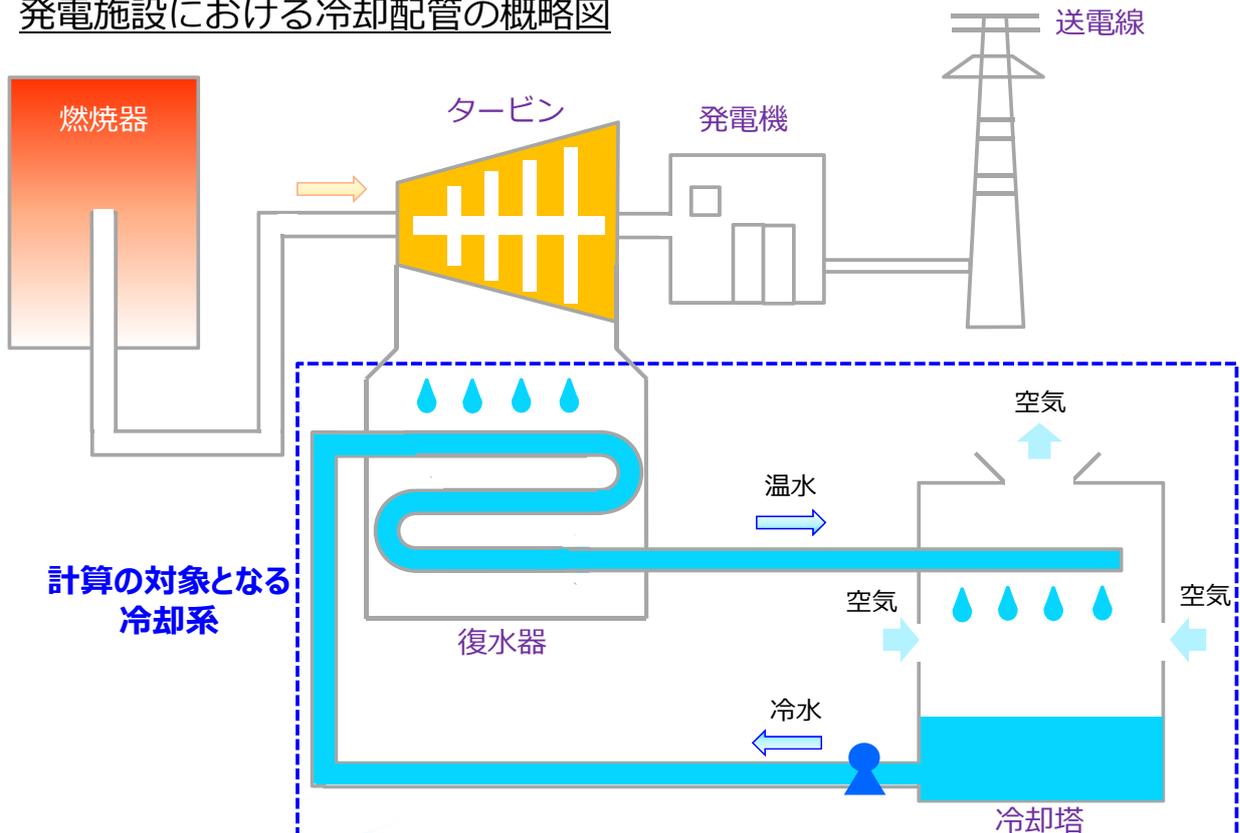


17

発電プラントにおけるポンプトリップ解析

<http://www.advancesoft.jp/>
AdvanceSoft

発電施設における冷却配管の概略図



1次元流体解析モデル図

復水器
(圧損のみ模擬)

冷却塔に入る

計算条件:

ポンプ
 定格揚程 25m
 定格流量 170m³/min
 定格回転数 500rpm
 定格効率0.8
 慣性 (モーター+原動機)
 2000kgm²
 逆止弁閉速度 2秒

過渡イベント
 ポンプ2台同時トリップ

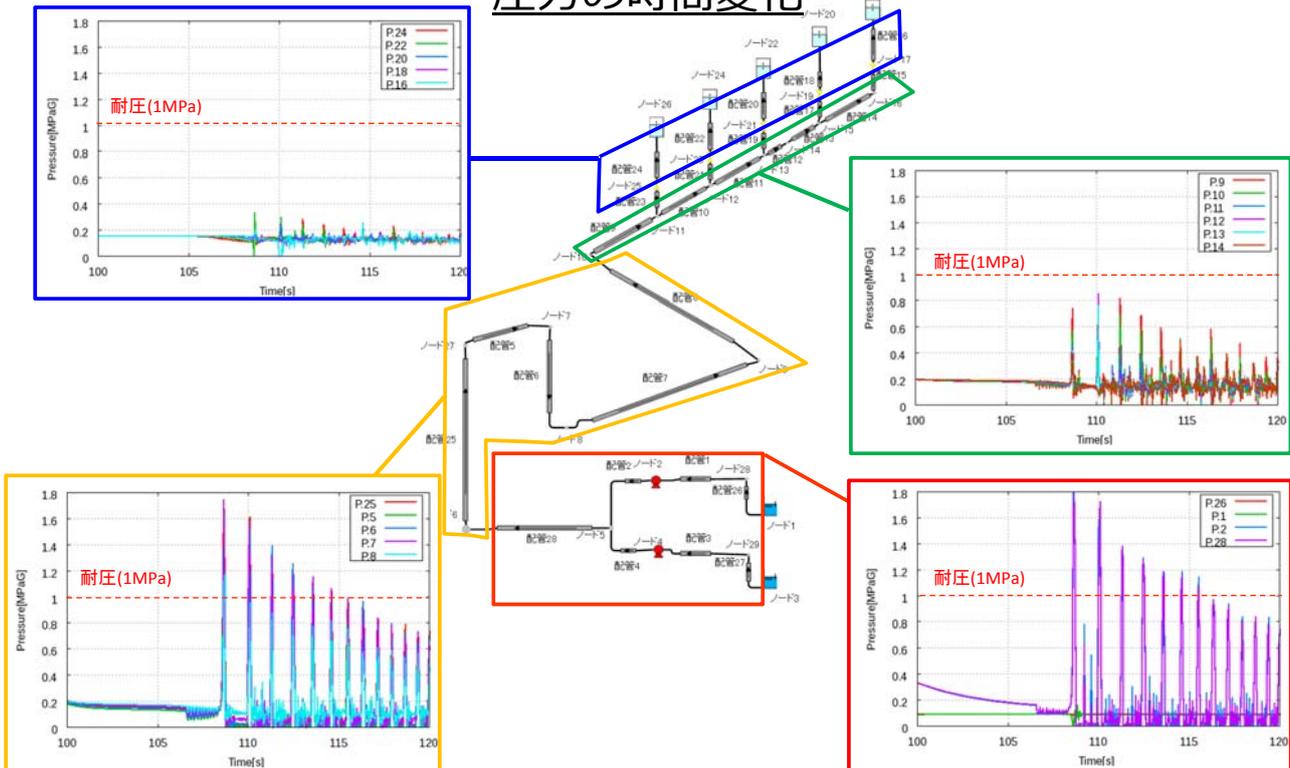
1500A
 冷却塔へ入る配管は
 トリップ時に水位を持つ可
 能性があるため
 タンクモデルで模擬

流体種類
 水(31℃)

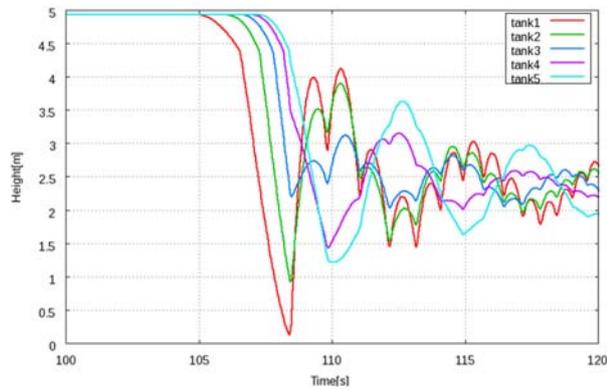
冷却塔から
くみ上げ

発電プラントポンプトリップ解析結果 (対策前)

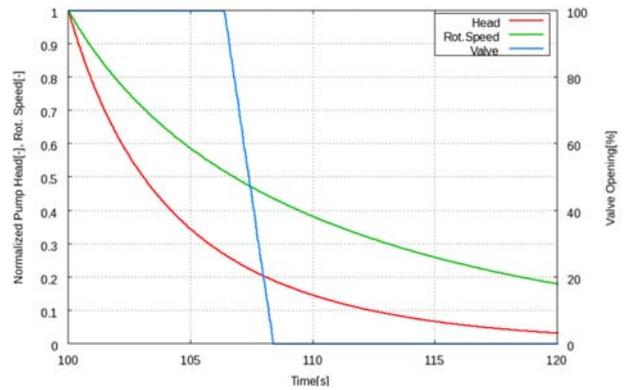
圧力の時間変化



タンク水位の変化

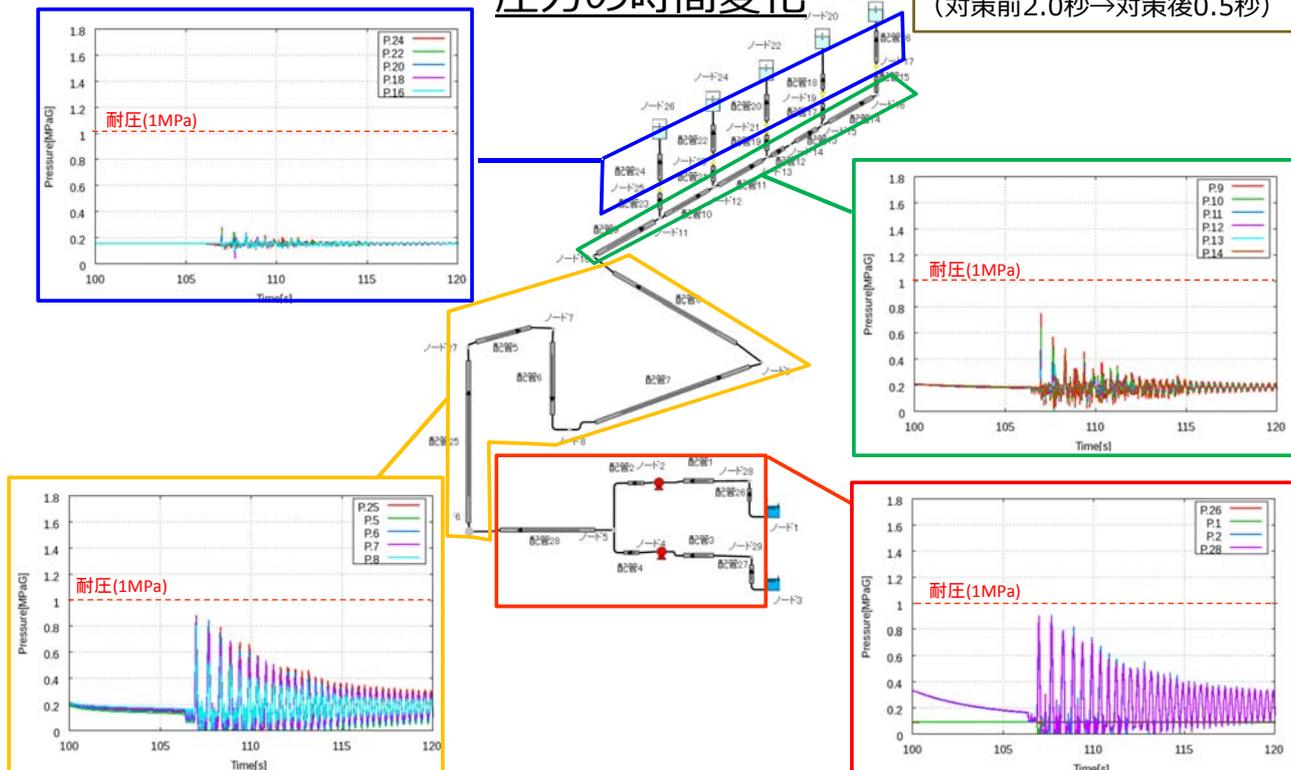


ポンプの揚程と回転数の時間変化

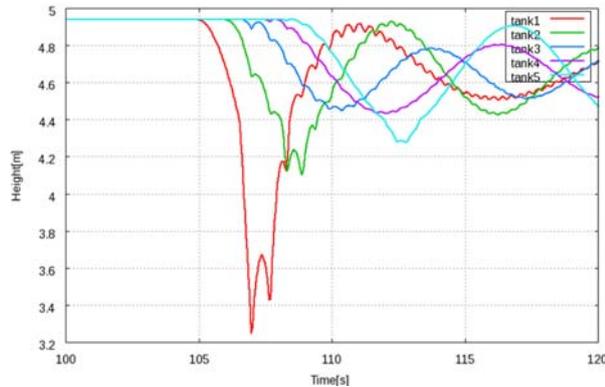


圧力の時間変化

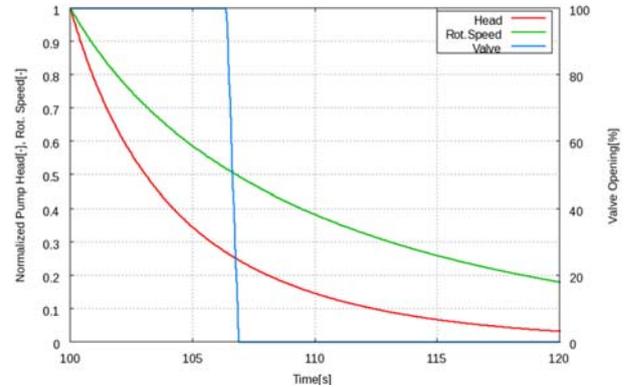
対策：閉速度が速い逆止弁の使用
(対策前2.0秒→対策後0.5秒)



タンク水位の変化



ポンプの揚程と回転数の時間変化

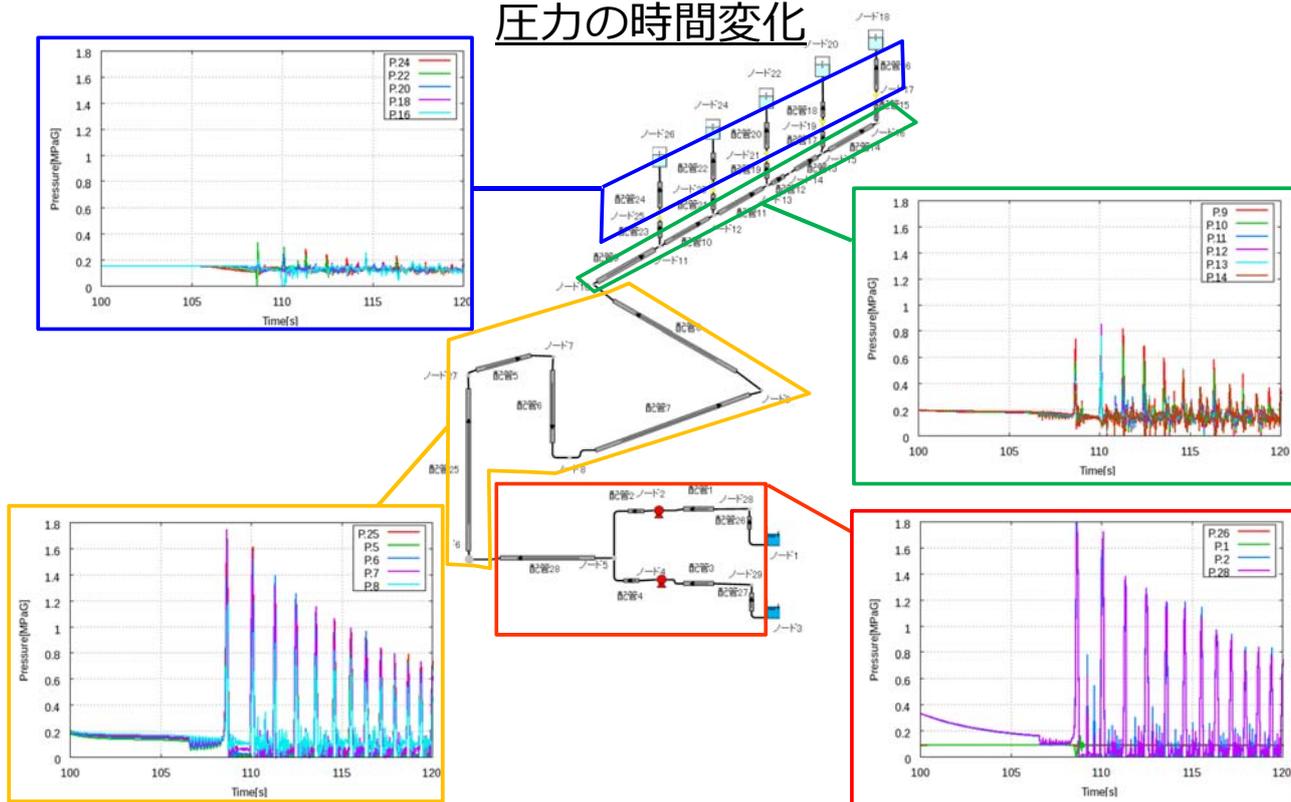


まとめと今後の課題

- まとめ
 - LNGローディングラインのポンプトリップ解析を行い、液柱分離現象について水の場合の解析との比較を行った。
 - 水とLNGの解析を比較して、LNGの方が液柱分離が生じやすく、LNGの方が圧力（水頭）上昇が大きいことが分かった。
 - 発電プラントにおけるポンプトリップ解析を行った。
 - 水撃が発生したときの配管における圧力振動、タンク水位の時間変化について検討した。

- 今後の課題
 - 温度変化を伴う流体の水撃解析
 - パッシブスカラー解析機能
 - 固液二相流解析機能
 - Windows版のGUIの機能充実（流体機器モデルの追加、制御系を自由に構築できる機能、etc..）

圧力の時間変化



まとめと今後の課題

- まとめ
 - LNGローディングラインのポンプトリップ解析を行い、液柱分離現象について水の場合の解析との比較を行った。
 - 水とLNGの解析を比較して、LNGの方が液柱分離が生じやすく、LNGの方が圧力（水頭）上昇が大きいことが分かった。
 - 発電プラントにおけるポンプトリップ解析を行った。
 - 水撃が発生したときの配管における圧力振動、タンク水位の時間変化について検討した。
- 今後の課題
 - 温度変化を伴う流体の水撃解析
 - パッシブスカラー解析機能
 - 固液二相流解析機能
 - Windows版のGUIの機能充実（流体機器モデルの追加、制御系を自由に構築できる機能、etc..）

適用領域：等温とみなせる液体管路系非定常一次元流体解析、水撃・圧力過渡変動・液柱分離などの流体過渡現象、制御系・ポンプ・バルブなど

1. LNG関連実績

- ・ LNG輸送システム緊急遮断弁閉鎖時水撃解析
- ・ LNGパイプライン最適制御解析
- ・ LNGパイプラインポンプ起動解析

3. 農業用水関連実績

- ・ 農業用パイプラインポンプ停止時水撃解析
- ・ 農業用パイプラインバルブ閉止時間検討解析
- ・ 農業用パイプライン水槽形状検討解析
- ・ 農業用樹枝状パイプライン水撃解析

5. その他実績

- ・ 深海探査用情報伝送システム圧力応答解析
- ・ 大規模建築物の給排水衛生設備配管ポンプトリップ時水撃解析

2. 発電・エネルギー関連実績

- ・ 地熱発電所配管網ポンプトリップ時過渡解析
- ・ 地熱発電所冷却システムONOFF弁過渡応答解析
- ・ 火力発電所海水冷却系ポンプトリップ時の過渡解析
- ・ 核融合炉液体リチウムターゲット施設管路網水撃解析

4. 上水道関連主要実績

- ・ 浄水場配管網ポンプトリップ時過渡解析
- ・ サージタンクがある浄水場配管網過渡解析
- ・ 浄水場配管網流量制御時の流量変動解析

ガスタービンのある管路系の 過渡解析事例

第3事業部 秋村 友香

プラント防災とシミュレーションセミナー
2016年4月26日（火曜日）
アドバンスソフト株式会社

アジェンダ

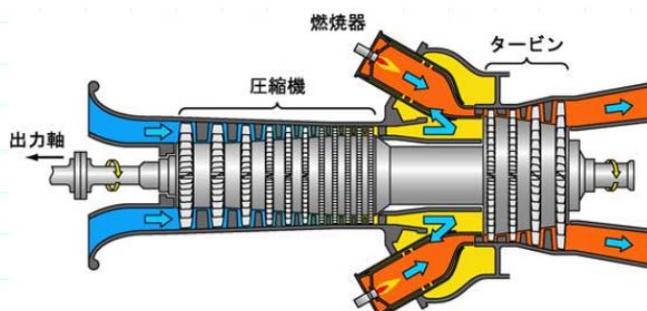
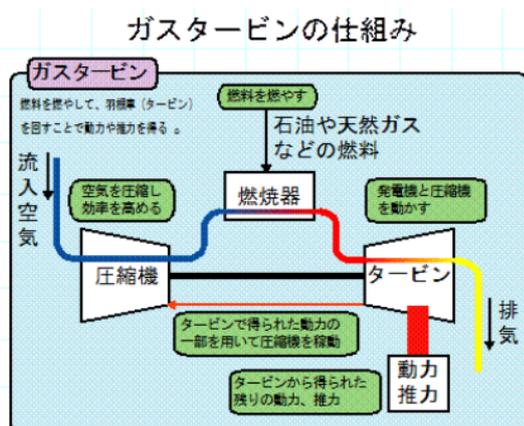
1. ガスタービンの概要
2. ソフトウェアAdvance/FrontNet/Γの機能概要
3. ガスタービンの数値解析モデル
4. 計算事例
5. まとめと今後の課題

1. ガスタービンの概要 - 仕組み

ガスタービンは「圧縮機」「燃焼器」「タービン」から成る内燃機関のひとつで、圧縮、燃焼、膨張が異なる場所で連続的に行われる。

すなわち、圧縮機で圧縮された空気、および燃料を燃焼器に流入し、燃焼器で高温の燃焼ガスを作成し、タービンで膨張させて動力を発生する。

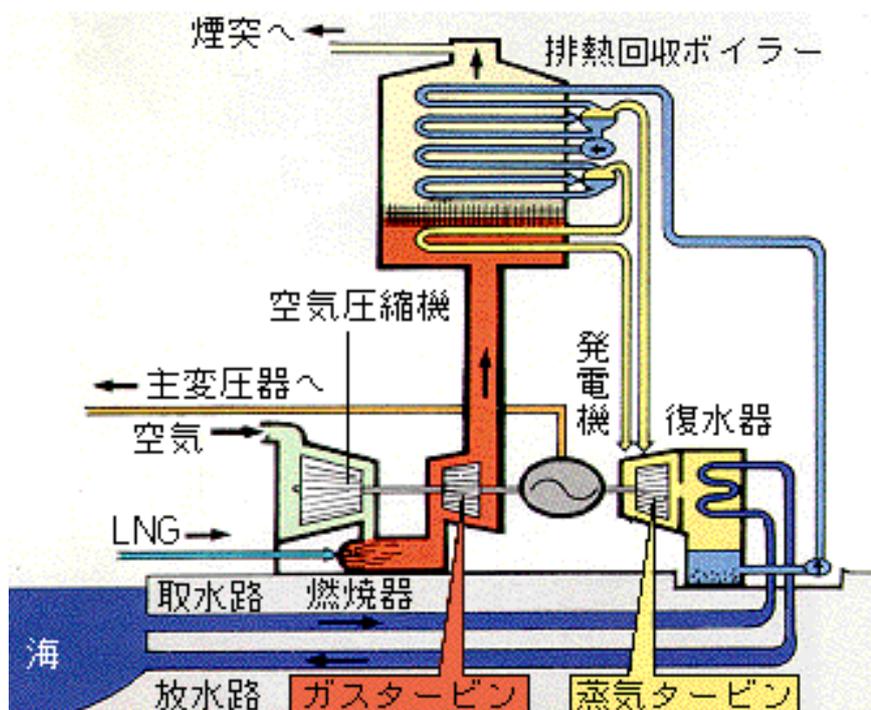
タービンで得られた動力の一部は圧縮機の動力として利用。



出典：東京大学ホームページ <http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/jetlab/gtsj/>

1. ガスタービンの概要 - 発電

近年は火力発電などで大型のガスタービンを使った発電がなされている。下記の例は燃料をLNGとした場合のガスタービン発電の概念図である。



コンバインドサイクル
ガスタービンを回した熱で水を蒸気に変え、さらに蒸気タービンを回転させる。

出典：電気事業連合会ホームページ http://www.fepc.or.jp/enterprise/hatsuden/fire/combined_cycle/sw_index_01/

1. ガスタービンの概要 – 保守・運用

ガスタービンの動作

- (1) 起動： 補機機器類が順次起動、回転が始まる。
燃料噴射，着火確認を経て加速
自立回転数に到達判断後，発電機と電力系統網との同期投入。
- (2) 定常運転： 発電同期により電力系統網と接続された後，負荷を上げて定常運用に入る
- (3) 停止： ガスタービン出力を減少させる。
電力系統網と切り離す
冷却運転に入り，燃料を遮断して停止に至る。

このような動作のうち各ユーザーの運用は，毎日あるいは週ごとの起動／停止，もしくは24時間連続運用など様々。

いずれの運用でも，設備の故障は即，工場操業，採算性に影響を与える。
以上のような状況下では，何より故障時の即応体制および故障予防保全整備の充実が望まれている。

1. ガスタービンの概要 – 流体シミュレーション視点

天然ガス燃料のガスタービンのシミュレーションは難しい要素がたくさんある。

- ①タービン→ チョーク流れ、膨張
- ②圧縮機→ 圧縮空気、圧縮ガス
- ③燃焼器→ 燃焼、高温ガス流れ、反応熱
- ④天然ガス燃料→ 熱量調整（天然ガスとプロパンの混合）

今回のセミナー用にこれらの要素をモデル化し、フィジビリティスタディとして1次元管路系流体過渡解析を適用した。

自社開発の管路系流体過渡解析ソフトウェアAdvance/FrontNet/Γ（Ver2.2）のソースプログラムに上記ガスタービンモデルを組み込んだ。

（パッケージリリース版にはまだこの機能がありませんのでご注意ください）

圧縮性流体の基礎方程式を有限差分法で解く

質量保存式	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0$	ρ : 密度, u : 流速
運動量保存式	$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = f(u, \rho)$	e : 内部エネルギー k : 運動エネルギー
エネルギー保存式	$\frac{\partial (\rho e + k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho e + k + p)u}{\partial x} = q$	T : 温度, p : 圧力
状態方程式	$p = g(\rho, e) \quad T = g(\rho, e)$	f : 流体抵抗 g : 状態方程式
多成分ガス	$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho Y_i u}{\partial x} = \Gamma_i$	q : 加熱または除熱 Y_i : i 成分の質量分率 Γ_i : i 成分の生成消 t : 時間, x : 座標

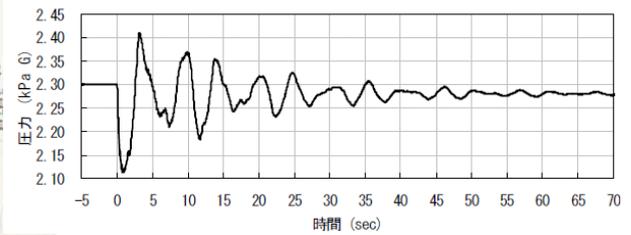
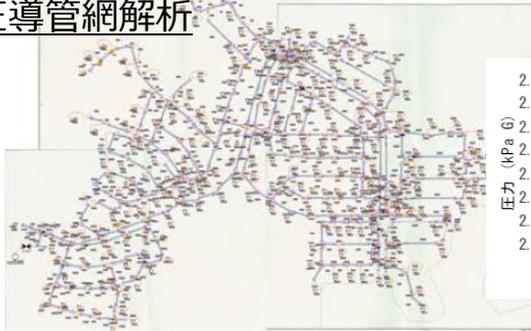
理想気体の状態方程式の他、米国のNIST/REFPROPベースの実流体物性（ファイル読み込み形式）が使用できる。

(参考)<http://www.nist.gov/srd/upload/REFPROP9.PDF>

機能一覧

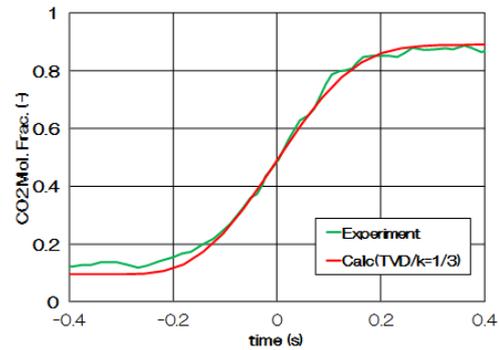
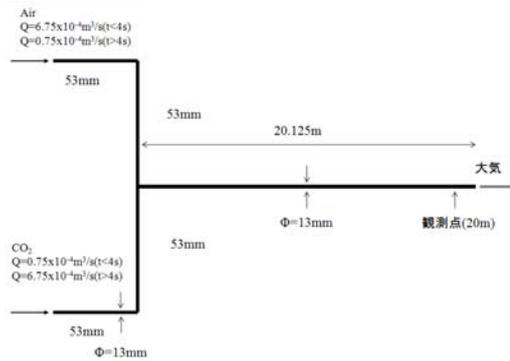
基礎方程式	圧縮性を考慮した質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式、多成分ガス質量保存式
計算格子	スタガード格子(格子中心でスカラー量、格子エッジでベクトル量を定義)
時間積分	Euler予測子修正子
対流項	空間1次精度風上差分、minmodまたはsuperbeeによる流束制限関数付きTVD法(空間2次精度または空間3次精度)
流体物性	理想気体（多成分ガス、定圧比熱は温度多項式NASAモデル） NIST/REFPROPベースの物性データ(単成分単相流（液、ガス、超臨界）)
物理モデル	管摩擦モデル（Churchillの式） 臨界流モデル（臨界圧力比によって流速を制限） 熱伝達モデル（Dittus-Boelter式） 構造物熱伝導モデル(一次元、板型と円筒型に対応) 制御系モデル（一次遅れ、進み遅れ、PIDなど） パッシブスカラー輸送モデル
流体機器	バルブ、オリフィス、ポンプ、送風機、タービン、テーパ管、分岐合流

都市ガス低圧導管網解析



出典：富永他、"地震時の供給停止に伴うガス導管網内の圧力振動解析", 土木学会予稿集(2010).

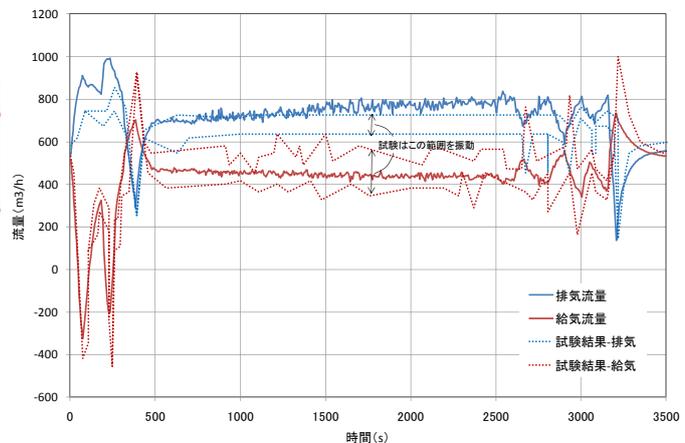
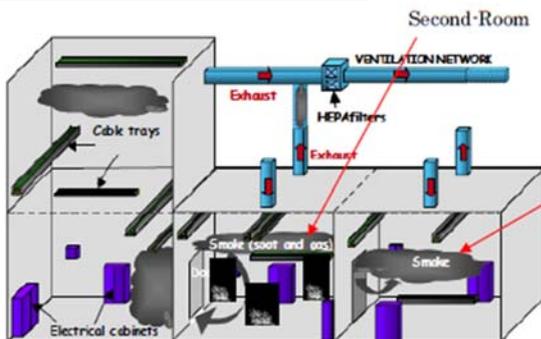
ガスパーズ混合解析



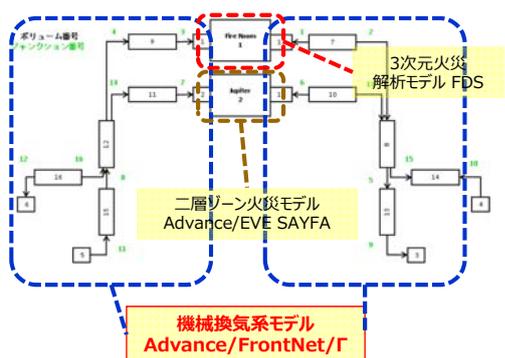
出典：染谷雄史他、"管路内での異種気体混合に関する研究", 日本流体力学学会(2007)

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

原子炉施設火災試験解析（給気ダクト、排気ダクトをAdvance/FrontNet/Γでモデル化）



火災室給排気流量変化
(火災により急激な圧力・温度変化がある)

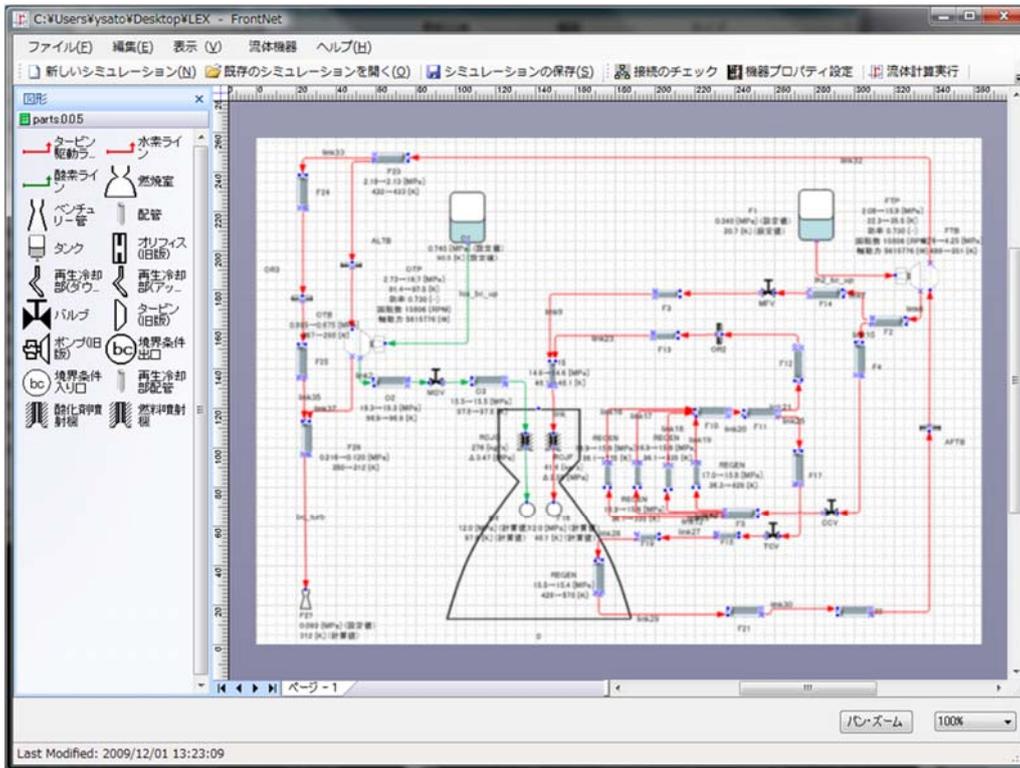


試験結果の出典：JNES成果報告書「マルチルーム体系における火災伝播解析手法の整備」

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

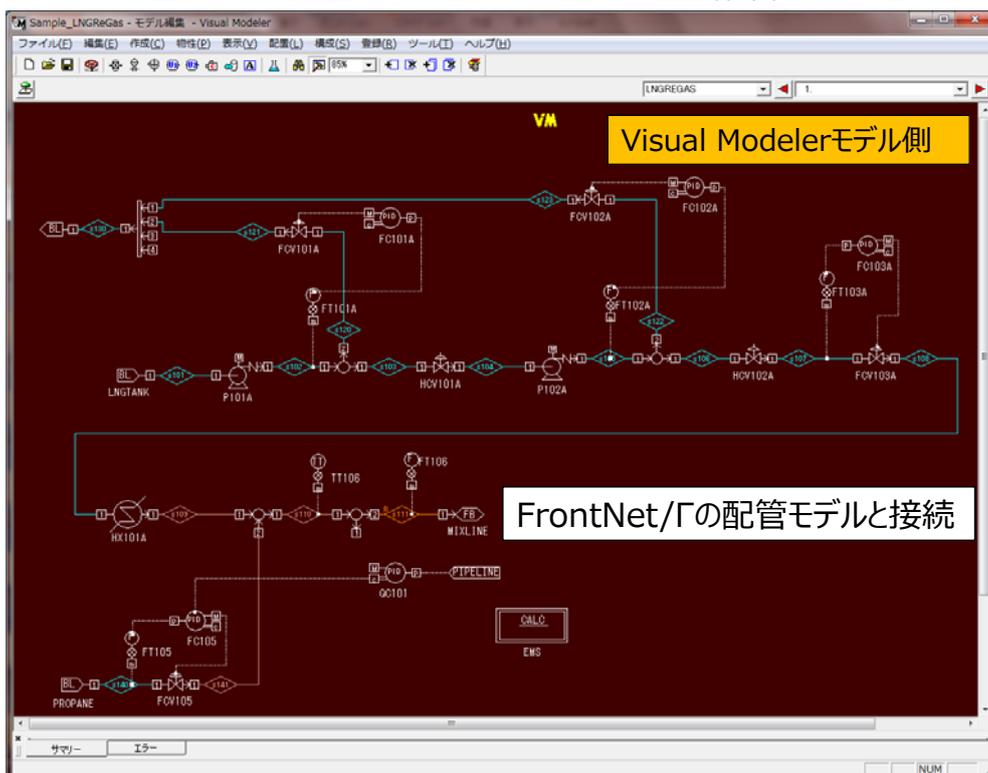
液体ロケットエンジン性能解析

(極低温のLO2/LH2の燃焼、ターボポンプ、再生冷却の熱流動バランス計算)

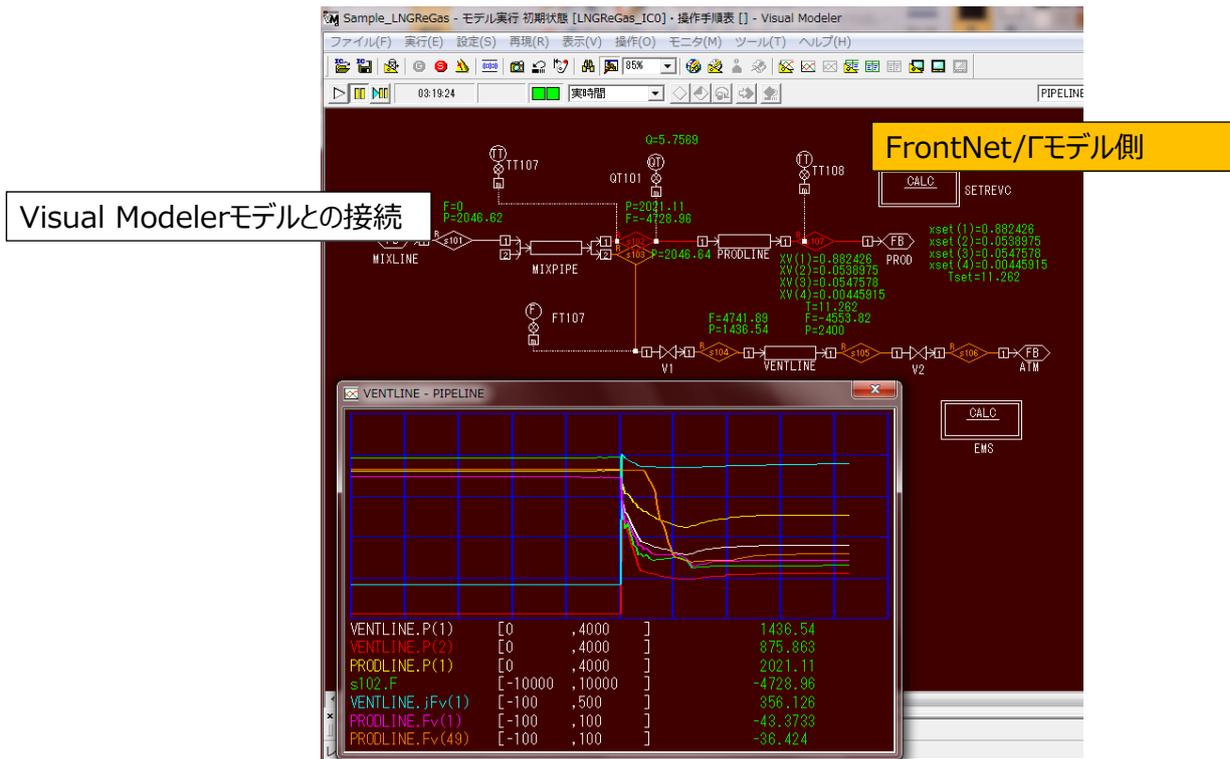


プラントシミュレータ Visual Modelerへの組み込み (株式会社オメガシミュレーション)

LNG気化基地からの熱量調整後のガスの送出・放出配管部分に適用



Visual Modelerによる気化プラントモデル・制御系ロジックモデルとの一体シミュレーション 熱量調整異常により緊急放出・送出ガスの引き戻しを実施



3. ガスタービンの数値解析モデル－目的とモデル化の視点

ガスタービンの各要素（圧縮機、燃焼器、タービン）

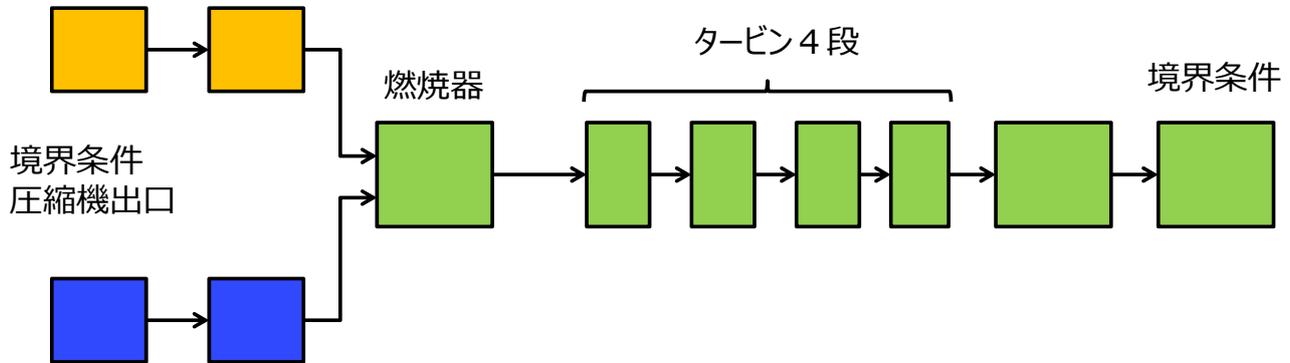
⇒ 3次元CFDで十分検討されている

本発表では

- ガスタービンの各要素は集中定数系でモデル化
管路系システムの全体の過渡現象を把握することが目的。
- なるべく簡単なモデルを想定
フィジビリティスタディの位置づけ
機器の情報が分からない、特に形状はメーカーの秘密情報
現象が複雑
- 流動に着目し、冷却や外部との熱交換は今回は非考慮
(蒸気タービン系も非考慮)

圧縮機出口～燃焼器～タービン～境界条件の系を
“一次元ボリューム・ジャンクション法”でモデル化

燃料系統



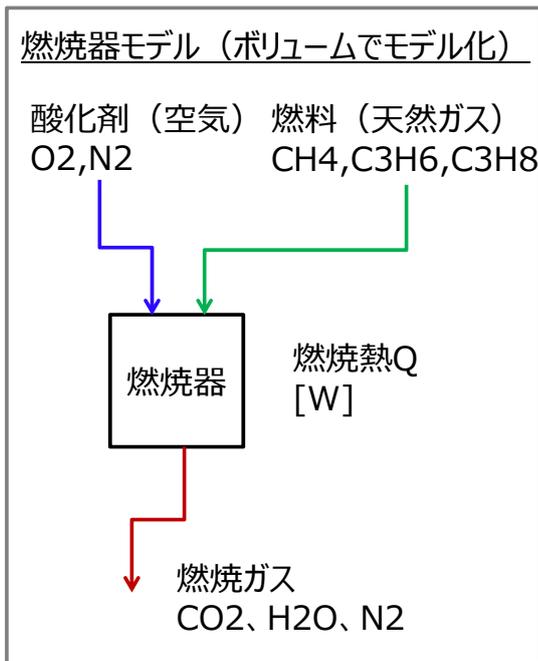
酸化剤系統

燃料は熱量調整されたNG
酸化剤は空気

燃料の組成	体積比率	ノルマル密度	成分熱量 [MJ/Nm3]	熱量 [MJ/Nm3]
CH4	0.88	0.717	39	34.32
C2H6	0.044	1.356	70	3.08
C3H8	0.076	2.010	100	7.6
				燃料熱量45

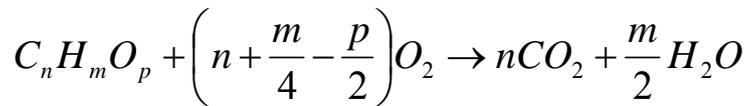
空気の組成	体積分率	ノルマル密度
窒素	0.78	1.25
酸素	0.22	1.429

3. ガスタービンの数値解析モデル – 燃焼器モデル

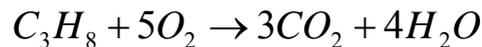
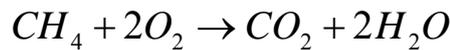


■ 化学種の質量分率

Mixture Fractionモデル(混合分率燃焼モデル)



メタン、エタン、プロパンと酸素の反応



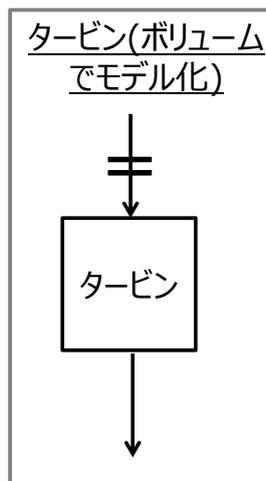
■ 燃焼熱

第一近似で完全燃焼と仮定してしまう。
窒素は高温ガスの一部として素通りする。

(Mixture Fractionモデルの出典) :

Mell, W. E., McGrattan, K. B. and Baum, H. R., "Numerical Simulation of Combustion in Fire Plumes", 26th Symposium (International) on Combustion (1996),1523-1530.

3. ガスタービンの数値解析モデル – タービンモデル



- ①タービン入口に抵抗を与え、圧力降下を模擬
- ②タービンでのエンタルピー降下を考慮
- ③タービン軸動力を計算
- ④膨張は流体方程式の計算で自動的に考慮

■ 圧力降下(抵抗係数Kは定格値より算出)

$$\Delta P = \frac{K}{2} \rho u^2$$

■ エンタルピー降下 (Lは軸動力、Vは体積)

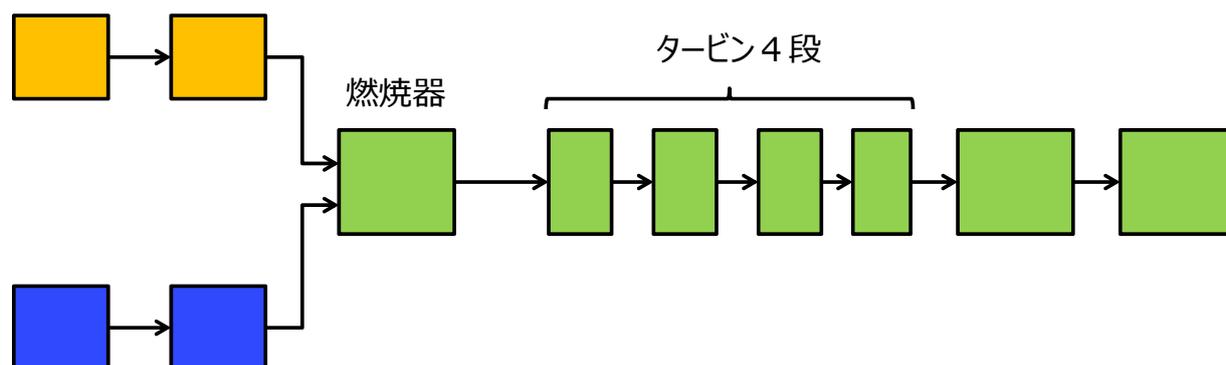
$$\Theta = -\frac{L}{V}$$

■ 軸動力 (断熱仕事、流体がタービン軸にする仕事)

$$L \equiv \eta W C_p T_{0in} \left[1 - \left(\frac{P_{0in}}{P_{0out}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right]$$

4. 計算事例 – 計算手順

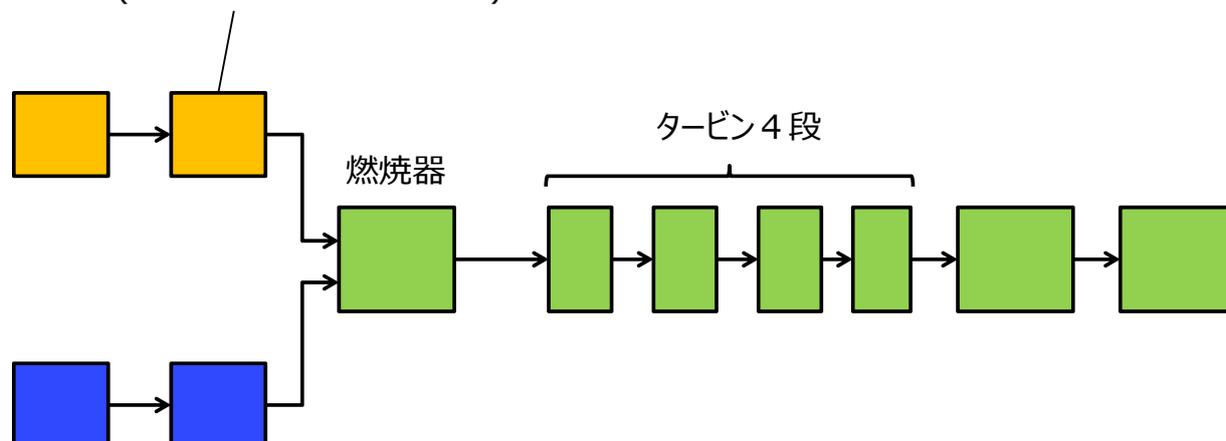
- ① 目標とする圧力、温度等の数字の設定
目標とする数字を再現するパラメータを見つける
形状の推定（長さ、径）
- ② 定常解析を実施して、各部分の物理量を確認
- ③ イベントを発生させて過渡応答を検討



4. 計算事例 – 形状の設定

形状を仮想的に以下のような数字を計算で使用

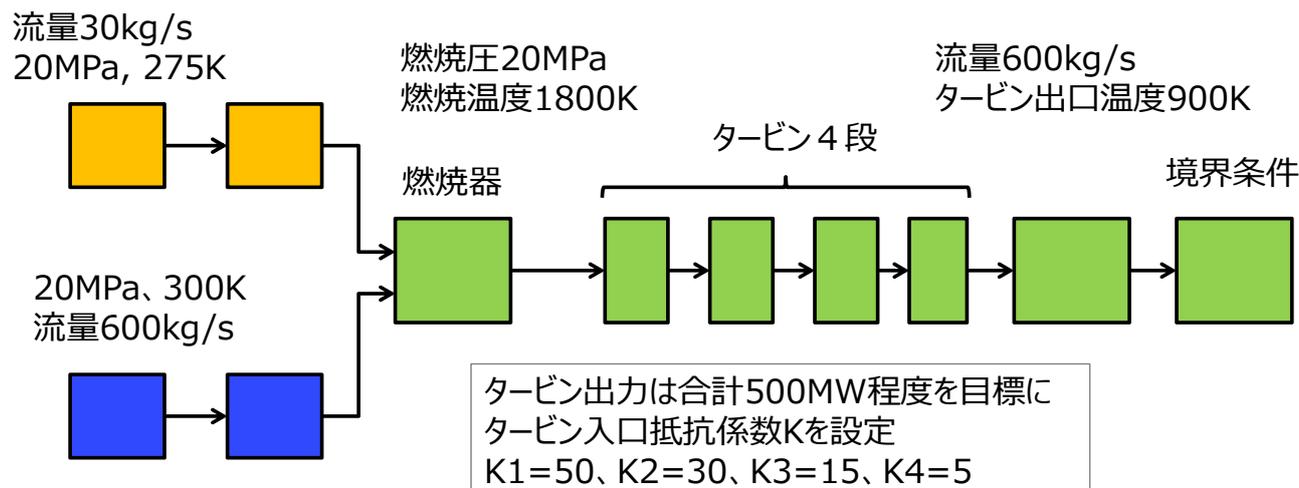
直径0.1m(絞らないと圧力振動が発生)



- 空気系統と燃焼ガス系統のボリューム直径を0.5m
- 燃料系統のボリューム直径を0.1mに絞った
- 各ボリュームの長さを1m

4. 計算事例 – 目標数値の設定

目標とする数字を設定して、パラメータを調整



各数値は以下を参考とした。

池上壽和、「産業用大型ガスタービンの技術系統化調査」、国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第13集、2009
 池田忠司、「コンバインドサイクル発電設備」、富士時報Vol.78 No.2 2005
 社団法人 火力原子力発電技術協会 火原協会講座31、「タービン・発電機および熱交換器」
 HIH Saravanamuttooら著、藤原仁志訳、「ガスタービンの基礎と応用」、東海大学出版

4. 計算事例 – 一定常計算結果

発表資料にて

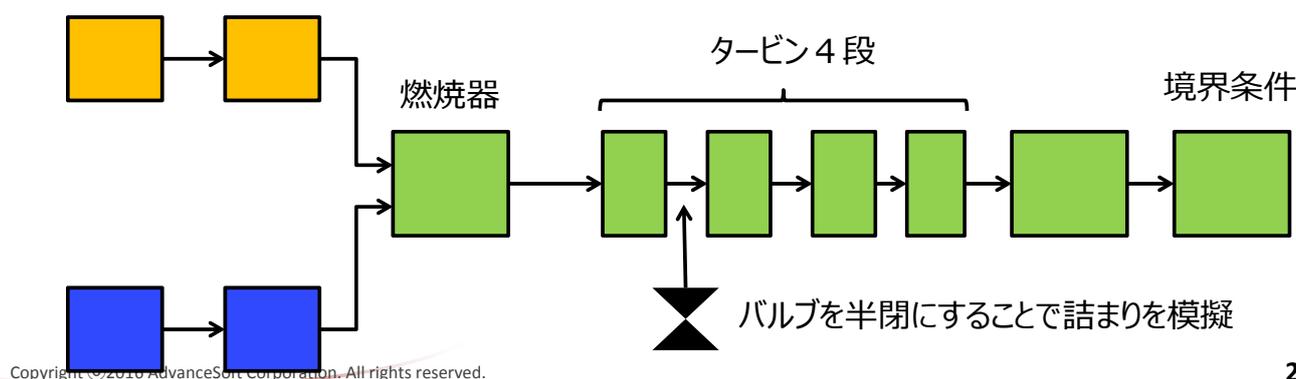
4. 計算事例 – 過渡イベントの想定

ガスタービンで事故が起こったことを想定し、タービンや配管などを構成する材料の破損リスクを検討したい。

通常、保護インターロックが働いているはず。
危険側の検討⇒全ての保護インターロックが効かないことを想定。

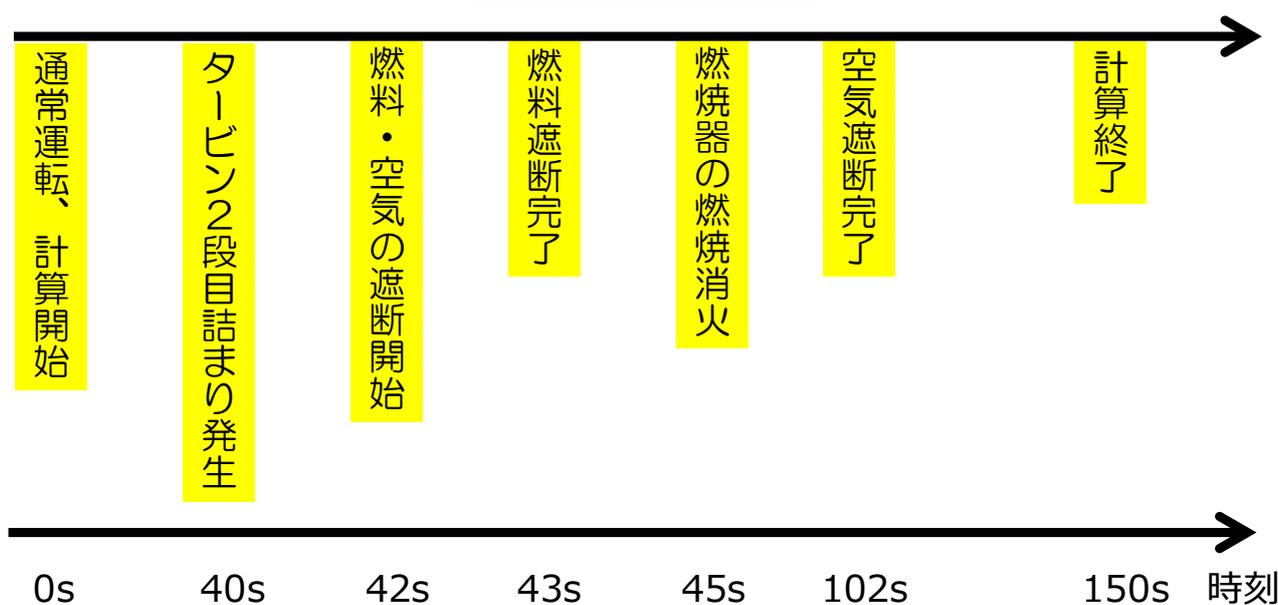
想定事故「緊急停止」

タービンの翼に、なんらかの破損機器が詰まり
流路断面積が50%まで低下したことを想定して過渡解析を実施



4. 計算事例 – 事故シーケンス

想定事故シーケンス



発表資料にて

付録. Advance/FrontNet/Γ主要実績

主要実績一覧

■ 天然ガス(都市ガス)

- ・都市ガス管路網地震時の供給停止に伴う圧力振動過渡解析
- ・低圧・中圧・高圧導管網の過渡応答解析
- ・都市ガス導管網模擬試験解析
- ・都市ガス漏洩時の過渡解析
- ・都市ガスパーシステンス解析
- ・熱量調整設備の外乱時制御系応答解析
- ・都市ガス管路内水分量推定解析

■ 原子力

- ・原子炉施設火災試験解析・実規模原子炉施設火災解析
(火災解析シミュレータAdvance/EVE SAYFA&FDSとの連成)
- ・高温ガス炉の冷却材流量挙動解析・炉心温度挙動解析
- ・液体金属冷却施設の冷却挙動解析

■ 宇宙

- ・極低温流体パイプライン予冷解析
- ・液体燃料エンジンシステム熱流動バランス解析
- ・液体燃料エンジンシステム再生冷却部配管閉塞時の過渡解析
(3次元熱伝導解析・3次元構造亀裂進展解析シミュレータとの連成解析)



警告

このレポートに収録されている文章および内容については、ご自身のために役立つ用途に限定して無料配布しています。このレポートを、販売、オークション、その他の目的で利用するには、著作権者の許諾が必要になります。このレポートに含まれている内容を、その一部でも著作権者の許諾なしに、複製、改変、配布を行うことおよびインターネット上で提供する等により、一般へ送ることは法律によって固く禁止されています。