

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

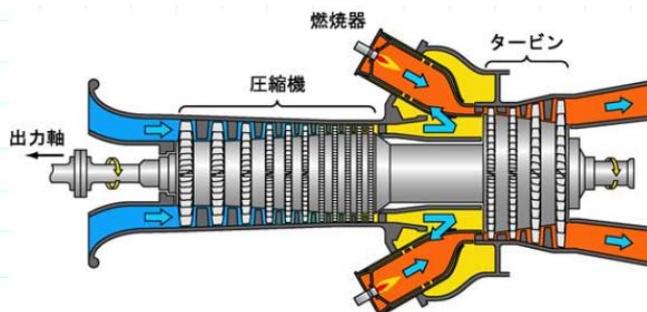
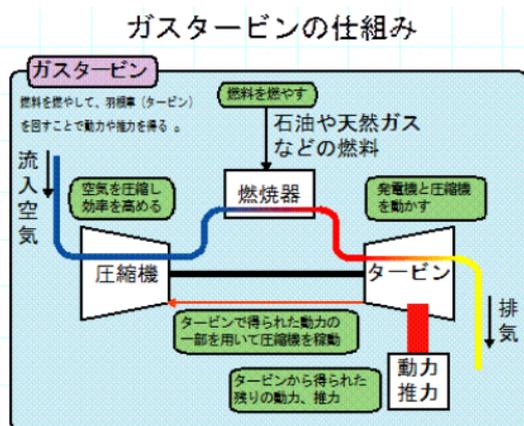
1. ガスタービンの概要
2. ソフトウェアAdvance/FrontNet/Γの機能概要
3. ガスタービンの数値解析モデル
4. 計算事例
5. まとめと今後の課題

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。

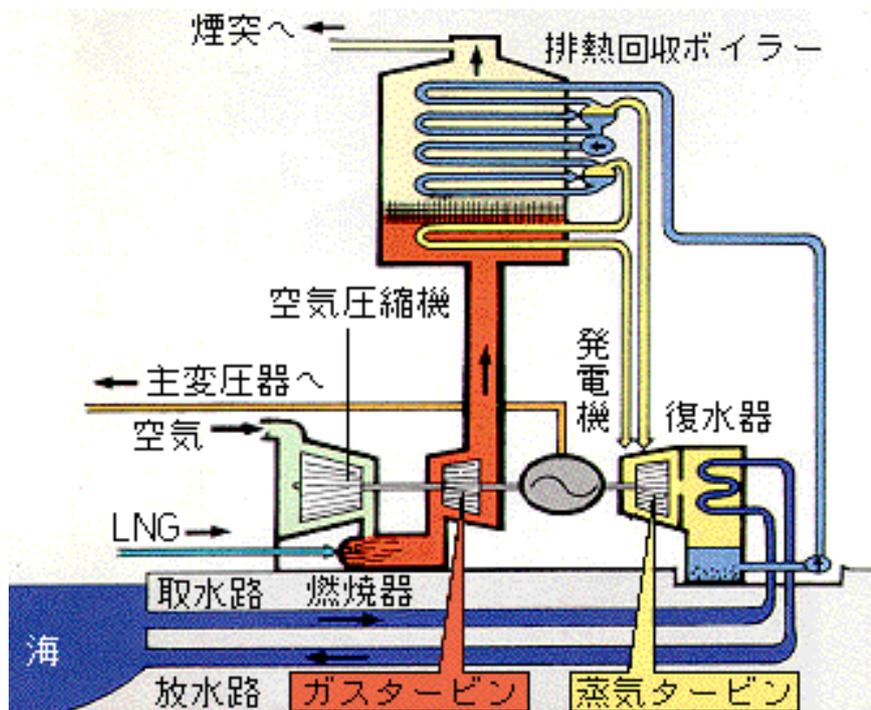
タービンで得られた動力の一部は圧縮機の動力として利用。



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

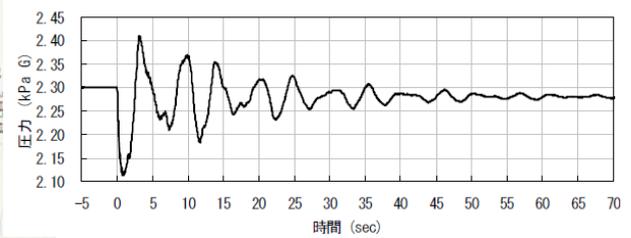
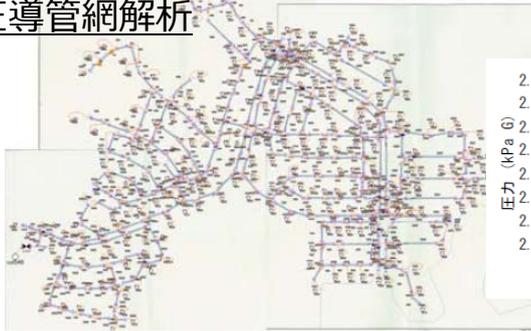
理想気体の状態方程式の他、米国のNIST/REFPROPベースの実流体物性（ファイル読み込み形式）が使用できる。

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

機能一覧

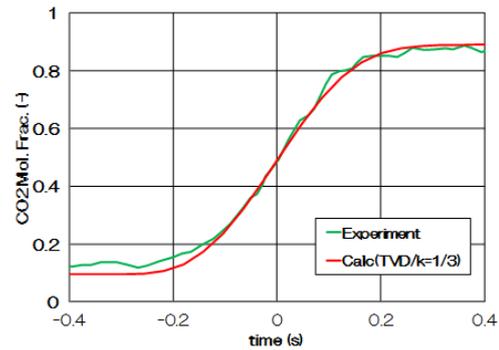
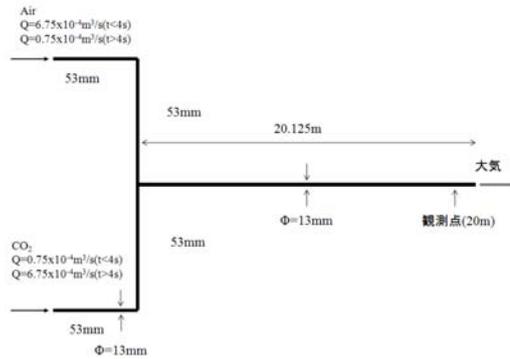
基礎方程式	圧縮性を考慮した質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、状態方程式、多成分ガス質量保存式
計算格子	スタガード格子(格子中心でスカラー量、格子エッジでベクトル量を定義)
時間積分	Euler予測子修正子
対流項	空間1次精度風上差分、minmodまたはsuperbeeによる流束制限関数付きTVD法(空間2次精度または空間3次精度)
流体物性	理想気体（多成分ガス、定圧比熱は温度多項式NASAモデル） NIST/REFPROPベースの物性データ(単成分単相流（液、ガス、超臨界）)
物理モデル	管摩擦モデル（Churchillの式） 臨界流モデル（臨界圧力比によって流速を制限） 熱伝達モデル（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).

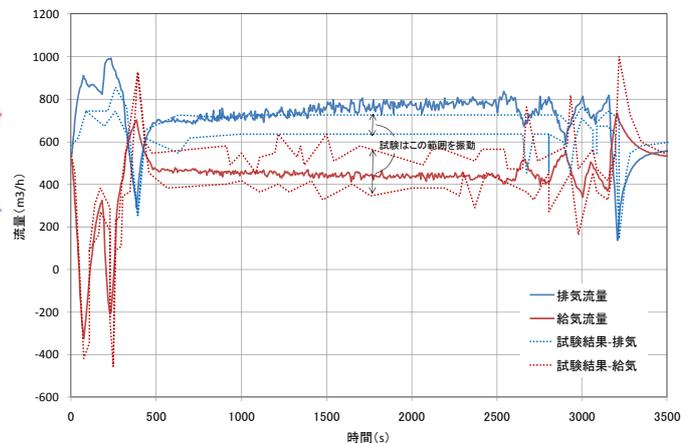
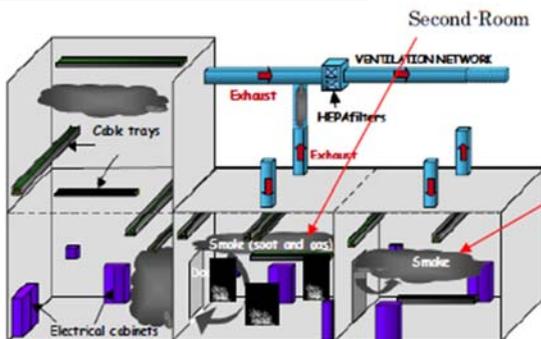
ガスパーズ混合解析



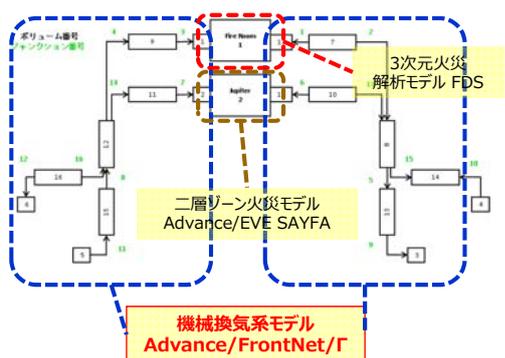
出典：染谷雄史他、"管路内での異種気体混合に関する研究", 日本流体力学学会(2007)

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)

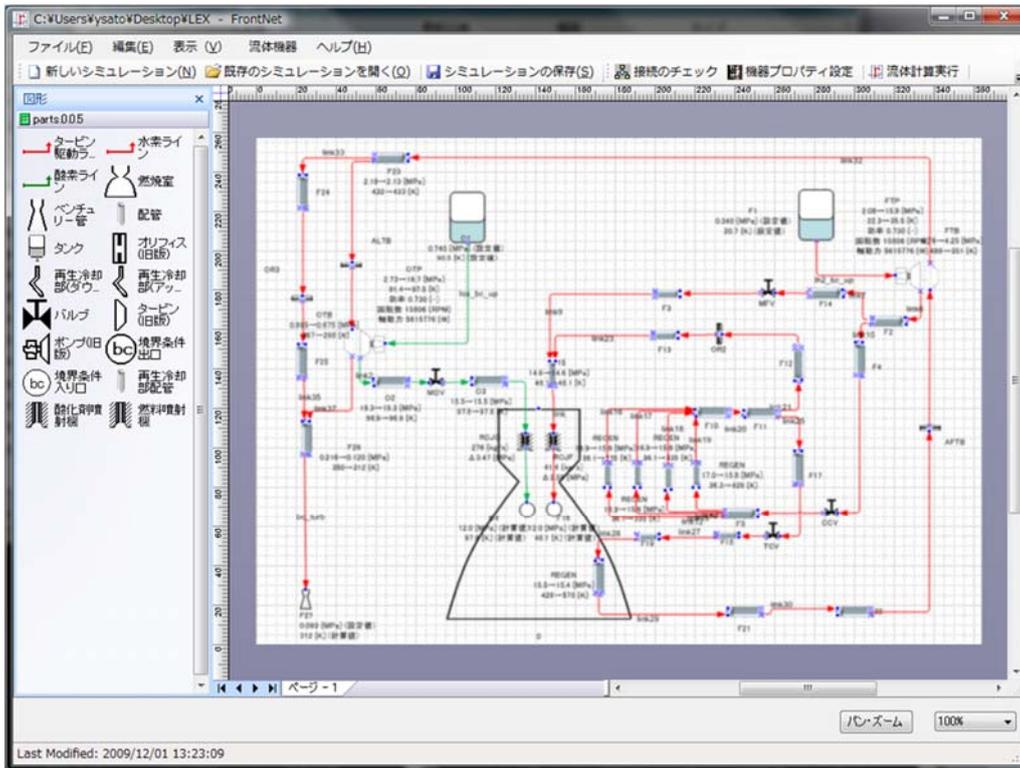


試験結果の出典：JNES成果報告書「マルチルーム体系における火災伝播解析手法の整備」

Copyright ©2016 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

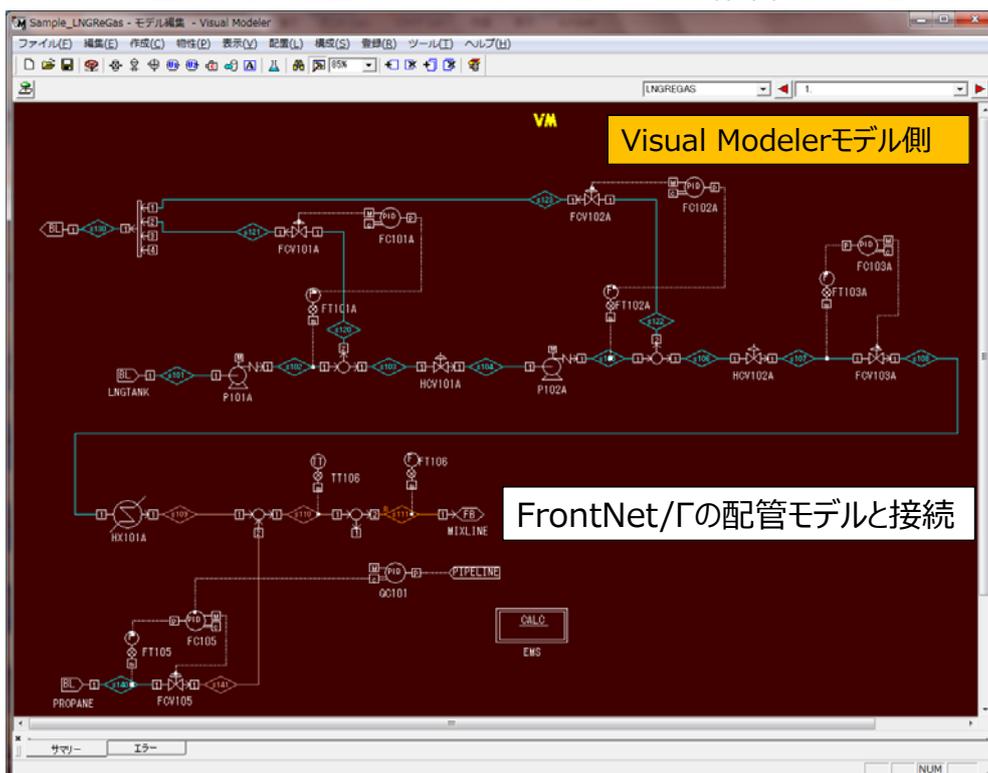
液体ロケットエンジン性能解析

(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)

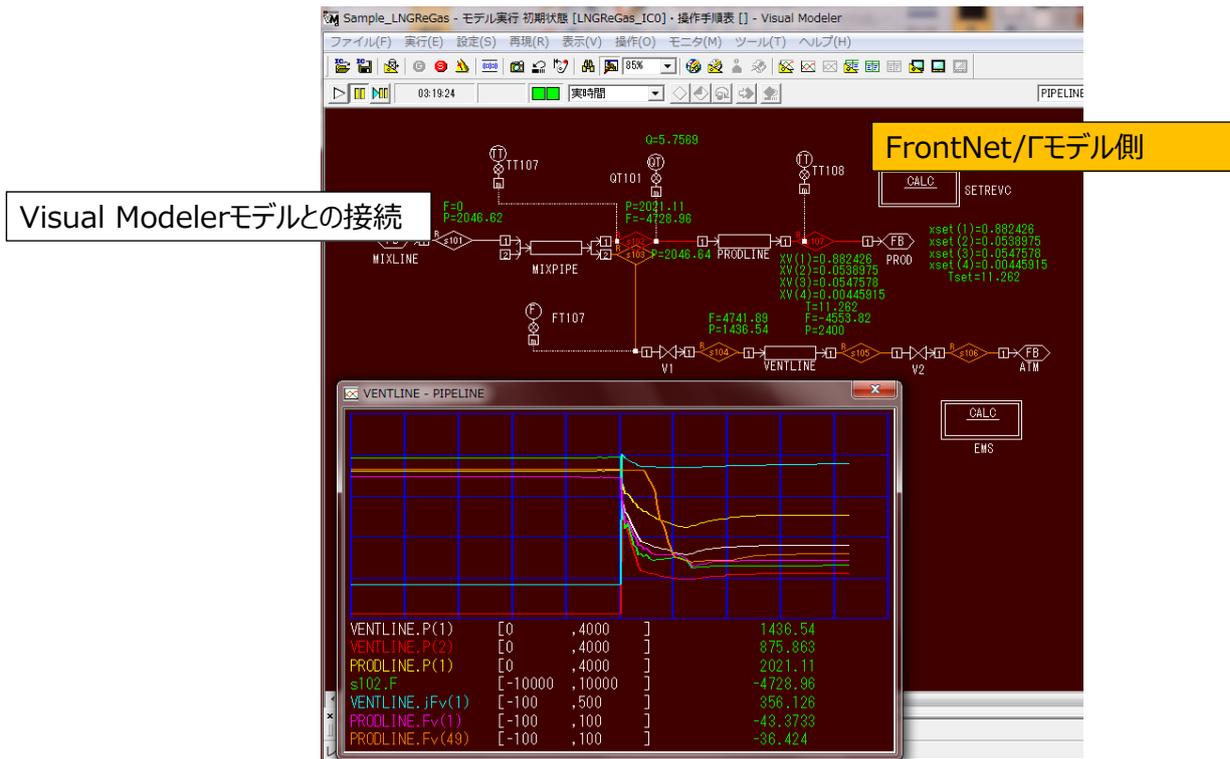


プラントシミュレータ Visual Modelerへの組み込み（株式会社オメガシミュレーション）

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）

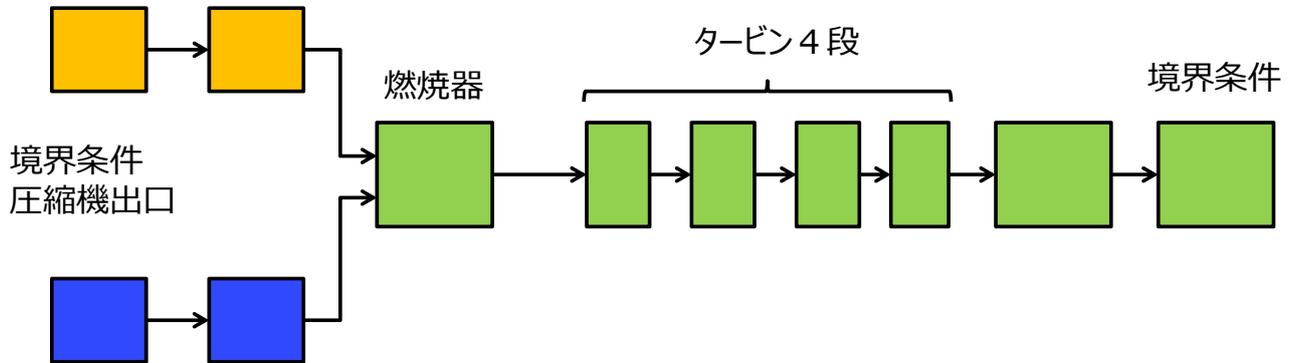
⇒ 3次元CFDで十分検討されている

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



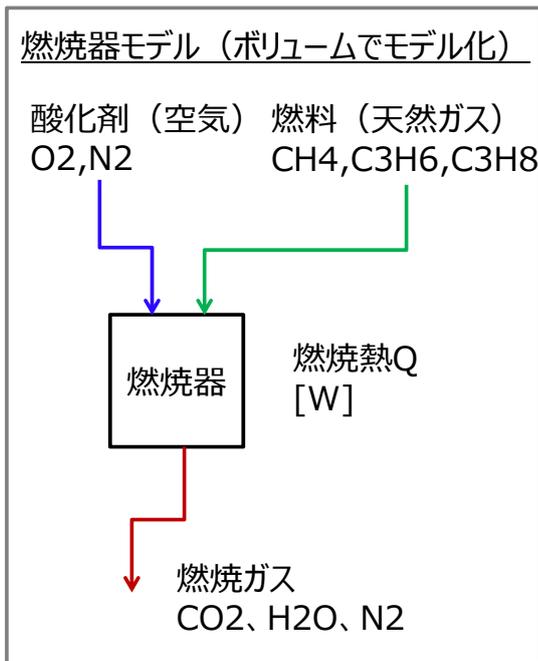
酸化剤系統

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

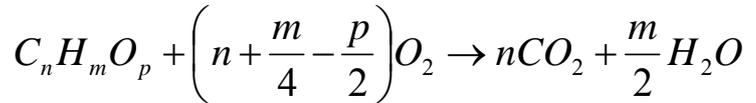
空気の組成	体積分率	ノルマル密度
窒素	0.78	1.25
酸素	0.22	1.429

3. ガスタービンの数値解析モデル – 燃焼器モデル

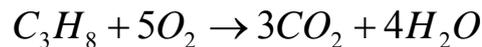
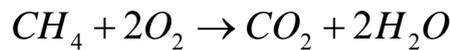


■ 化学種の質量分率

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



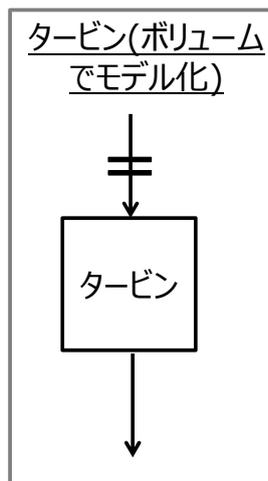
■ 燃焼熱

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)

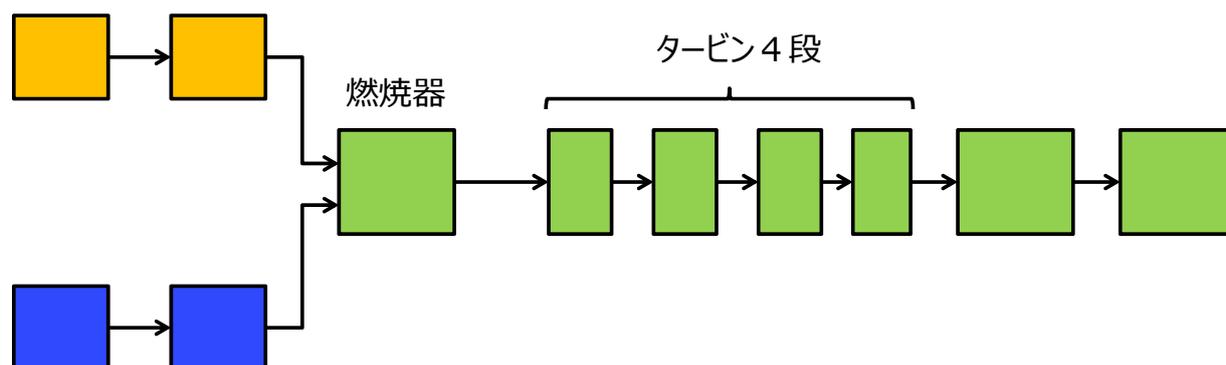
$$\Theta = -\frac{L}{V}$$

■ 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

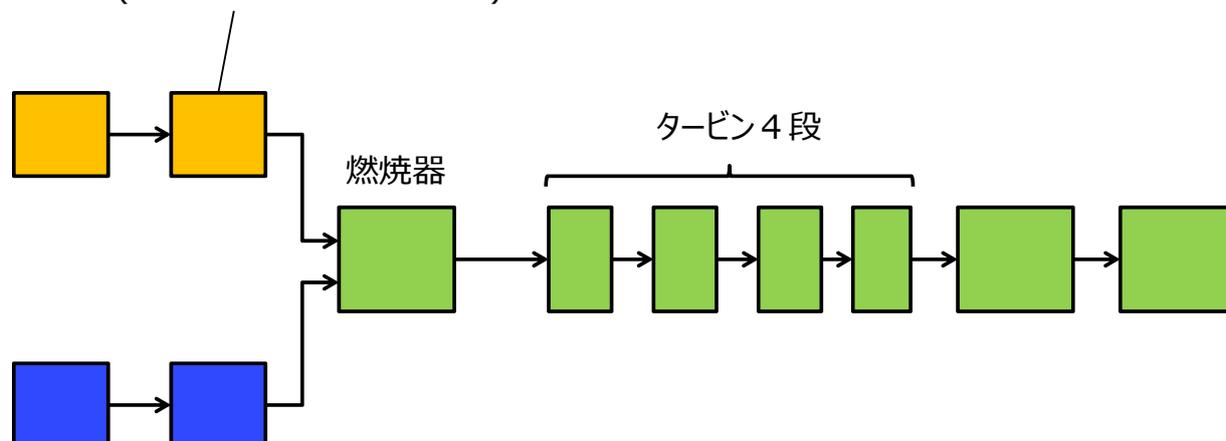
- ① 目標とする圧力、温度等の数字の設定
目標とする数字を再現するパラメータを見つける
形状の推定（長さ、径）
- ② 定常解析を実施して、各部分の物理量を確認
- ③ イベントを発生させて過渡応答を検討



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

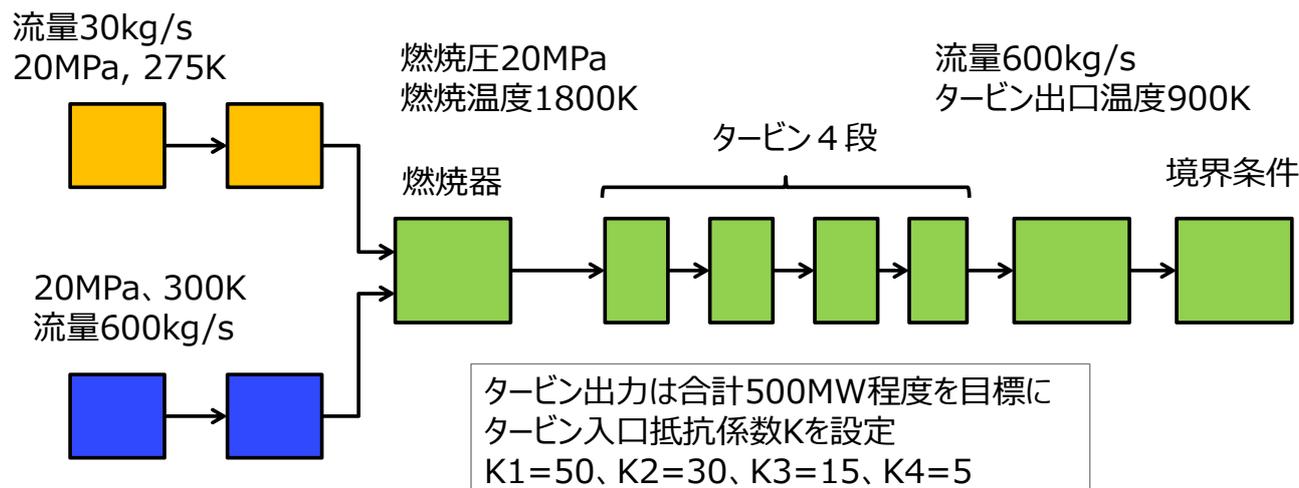
直径0.1m(絞らないと圧力振動が発生)



- 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

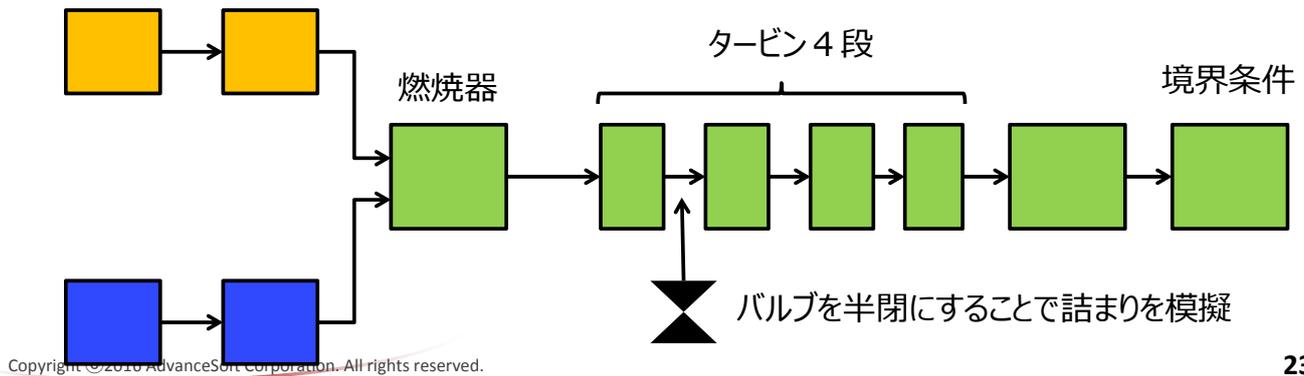
4. 計算事例 - 過渡イベントの想定

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。

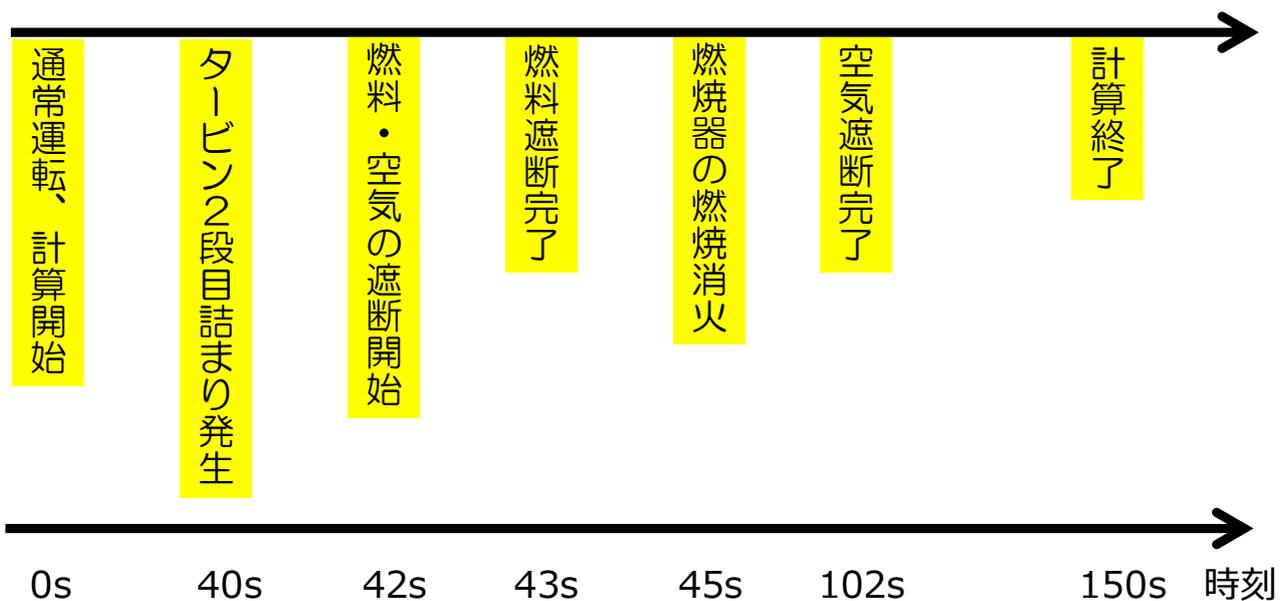
想定事故「緊急停止」

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ト挙動解析
- ・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)