

非平衡凝縮を含む蒸気流解析プログラム“MATIS-SC^{*1}”の開発

背景

発電プラントでのトラブルによる停止事象の内、約半数は振動による疲労など機械系の原因によるものである。その内の流れによる構造物の振動(流力振動)に起因する事象は、国内原子力プラントにおいては約 1/3 を占めており、その原因の解明と対策の立案は重要課題である。

蒸気系配管の蒸気加減弁やオリフィス、蒸気タービン等の蒸気系は、局所的に音速に近い高速蒸気流が発生し、圧力変動や騒音、振動疲労・減肉等の原因となる可能性があるが、高速な 3 次元流れでは圧力・温度などの状態量の計測や可視化が困難なため、実験のみによる事象の把握は難しく、数値計算技術による研究が重要となっている。しかし、広い蒸気状態の範囲に適用でき、実現象で見られる蒸気の凝縮を考慮できる流動解析プログラムは、現状ではほとんどなく、新たな解析プログラムの開発が望まれている。

目的

火力・原子力発電における蒸気の使用範囲を含む広範囲の蒸気状態において、圧力や温度などの状態量を高い精度で計算でき、平衡凝縮²だけでなく、実現象で見られる凝縮現象である非平衡凝縮³も取り扱える流動解析プログラム“MATIS-SC”を開発する。

主な成果

1. 広い適用範囲で高精度計算が可能な手法の開発

既存の蒸気用流動解析プログラムの計算に用いられている手法はそれぞれに長所・短所がある(表 1)。そこで、それぞれの長所を組み合わせさせた手法を新たに構築して“MATIS-SC”に組み込み、図 1 に示すような火力・原子力発電所における蒸気の使用範囲を含んだ広範囲の蒸気条件において、高精度な非平衡凝縮計算を可能とした。

2. “MATIS-SC”の検証

プログラムの検証として、大気圧程度の低圧条件におけるノズル内の蒸気流れ試験結果(Binnie ら⁴による)と比較を行い、良い一致を見た(図 2)。また、蒸気表を利用する手法と新たに開発した手法を用いて計算を実施した結果、蒸気表を利用する手法では圧力や湿度・速度の急変動を捉えられないが、新たに開発した手法では実現象である実験でも見られた湿度の急激な変化(非平衡凝縮)を正確に捉える事が出来た(図 3)。

以上より、広範囲な蒸気条件において、既存の流動解析プログラムよりも高精度な計算が可能で、非平衡凝縮を考慮できる流動解析プログラム“MATIS-SC”を開発した。

今後の展開

高圧条件での蒸気実験を実施し、より高圧条件での“MATIS-SC”の精度を検証する。また、蒸気加減弁やオリフィス・タービンなどの蒸気系機器に生じる現象に対して適用し、現象の把握に基づいた対策を立案する。

主 担 当 者 原子力技術研究所 発電基盤技術領域 主任研究員 森田 良

関連報告書 「蒸気非平衡凝縮を考慮できる 3 次元流体数値計算コード“MATIS-SC”の開発」 電力中央研究所報告:L04002(2005 年 2 月)

*1 Multi-dimensional Accurately Time Integration Simulation for Steam with Condensation

*2 平衡凝縮: 蒸気が飽和温度に到達した瞬間に凝縮が始まると仮定する凝縮現象。

*3 非平衡凝縮: 蒸気が一度飽和温度以下の状態(過飽和状態)になった後に急激に凝縮が始まる現象。温度や圧力などの状態量に急激な変動を起こす。実現象はこれに近い。

*4 Binnie, A.M., Green, M.A. et al., Proc. Roy. Soc., A, 181, plate 3, pp. 134-154, (1943)

表 1 従来の手法と新たに開発した手法の比較

計算手法	蒸気表を利用	状態方程式を利用	新たに開発した手法 (MATIS-SC に用いた手法)
長所	広い適用範囲において 状態量の高精度計算が可能 (誤差オーダー: $\sim 10^{-7}$)	非平衡凝縮を取扱える	非平衡凝縮を取扱える 広い適用範囲において 状態量の高精度計算が可能 (誤差オーダー: $\sim 10^{-7}$)
短所	非平衡凝縮を取扱えない	状態量の計算精度が あまり高くない (誤差オーダー: $\sim 10^{-1}$)	

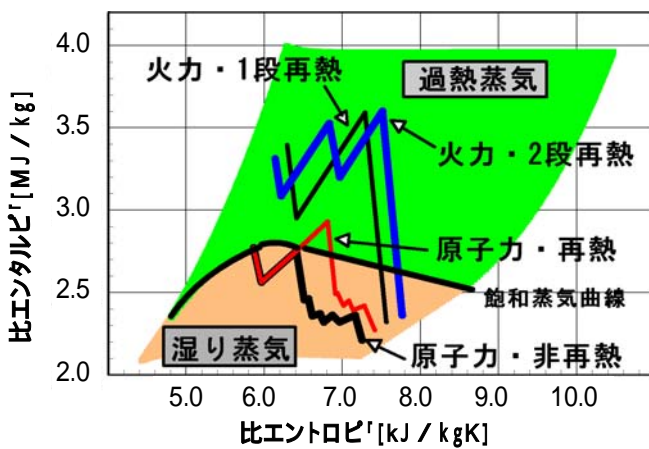


図 1 一般的な発電用蒸気タービンの蒸気状態と MATIS-SC の適用範囲(色付き部分)
(比エンタルピ: 単位質量あたりの物質の持つ総熱量
比エントロピ: 単位質量あたりの物質の乱れを表す量)
MATIS-SC の適用範囲は、原子力や火力発電所で用いられる蒸気状態をカバー出来ている。

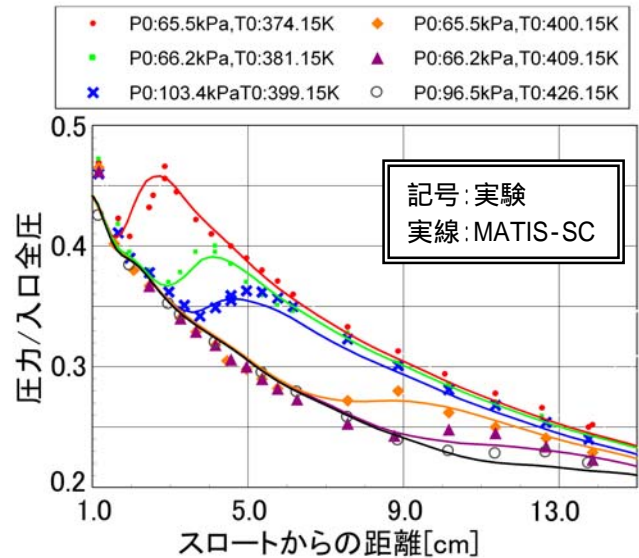


図 2 Binnie らの実験値⁴との静圧分布の比較
(P0: 流入圧力, T0: 流入温度
スロート: ノズルの最も狭くなる部分。図 3 参照)
MATIS-SC による計算はノズル内の蒸気流れ試験の結果をよく再現出来ている。

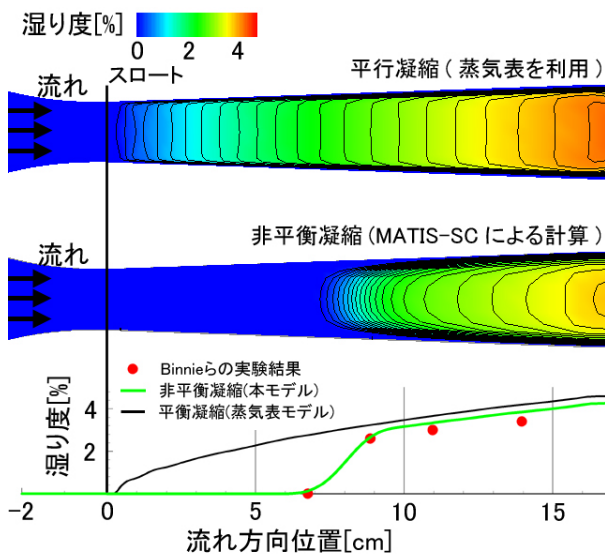


図 3 超音速ノズル内の湿度の可視化図(上・中図)と流れ方向の湿度分布(下図)
(流入圧力 65.5kPa, 流入温度 400.15K)
MATIS-SC の結果は、ノズル内での急激な湿度の変化(非平衡凝縮)が発生しており、実現象である実験と良い一致を見ている。蒸気表を利用した計算では湿度が徐々に変化しており、実験と合わず実現象を捉えられていない。