

マイクロガスタービンシステムの全体シミュレーションにむけて

Aim to simulate Complete Micro Gas Turbine Systems

神保 紘史 (東大院) 荒川 忠一 (東大情報学環) 飯田 誠 (東大工) 謝 正海 (東大工)
 Hiroshi JIMBO, Chuichi ARAKAWA, Makoto IIDA & Xie Zhenghai
 Dept. of Mech. Eng., The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
 E-mail: jimbo@cfdl.t.u-tokyo.ac.jp

Micro Gas Turbine System is complex with several fluid machineries. If the whole system is simulated numerically, the results must be applied to the process of design. Because not only the whole Micro Gas Turbine System but also each components of it has complex body, few complete simulations of the system have been attempted. In this paper, using Fortified-Solution Algorithm for overlaid composite grid approach and Delta-square form for unsteady analysis, the authors simulated the flow of small radial turbine. And using reformed KIVA-3V, the authors simulated the combustion chamber. Now the authors are trying to simulate the complete Micro Gas Turbine System with those 2 codes.

1. 緒言

近年、京都議定書に代表されるように、地球環境問題に対する世界の関心度は高まるばかりである。現在、様々なエネルギー源に化石燃料が利用されているが、化石燃料は温暖化ガスの代表である二酸化炭素を多量に排出するだけでなく、近い将来に枯渇が懸念されている。将来的には、太陽光や核融合という、二酸化炭素を排出せずまたほぼ無尽蔵に利用できるエネルギー源が利用されることと思われるが、その技術はいまだ開発途中である。こういった背景から、現在の技術を用いてエネルギーを有効利用する一つの方法として、出力が数kWから数十kWのマイクロガスタービンを利用した分散型発電システムへの期待が高まってきている。マイクロガスタービンシステムは、100000rpmという高速回転を行う遠心タービン・圧縮機や燃焼器等、実験による内部解析が非常に困難な流体機械が集まった複合システムである。これらを統合的に数値解析できれば、設計・開発の現場において非常に有効なツールとなるであろう。そこで筆者らはこのシステムの全体・統合シミュレーションを目標として、研究を進めている。

2. 計算手法

遠心タービン内部のような複雑流路を単一格子で表現するのは非常に困難であるため、重合格子法を用い、格子生成の自由度を増やした。この複数格子間の数値情報交換手法として解強制置換法 (FSA) [1]を用いた。さらに、非定常指向の陰解法として δ^2 コレクションスキーム [2]を採用した。圧縮性流体の基礎式にこれら2手法を適用すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} & \left[(I + \tau)(I + \Delta t \chi) + \Delta t \theta D_{\xi} \hat{A}^{n+1(\nu)} - \Delta t \theta \text{Re}^{-1} D_{\xi} \hat{C}^{n+1(\nu)} \right] \delta^2 \hat{Q} \\ & = -\Delta t \left[\frac{1}{\Delta t} \{ (I + \tau)(I + \Delta t \chi) \delta \hat{Q}^{n(\nu)} - \tau (I + \Delta t \chi) \delta \hat{Q}^{n-1} \} \right. \\ & \quad + \{ D_{\xi} \hat{F}^n - \text{Re}^{-1} D_{\xi} \hat{S}^n \} - \chi \left(\hat{Q}_f - \hat{Q}^{n+1(\nu)} \right) \\ & \quad \left. + \theta \left\{ D_{\xi} \hat{A}^{n+1(\nu)} \delta \hat{Q}^{n(\nu)} - \text{Re}^{-1} D_{\xi} \hat{C}^{n+1(\nu)} \delta \hat{Q}^{n(\nu)} \right\} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

右辺側の対流項については3次精度 TVD スキーム、粘性項には Thin-Layer Approximation を採用し、左辺の行列反転には LU-ADI 法を用いた [3]。

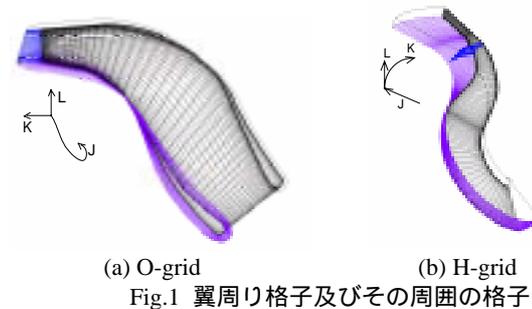
乱流モデルは、場の複雑性や計算安定性を考慮し、Baldwin-Lomax モデルを採用した。

また、KIVA-3V を燃焼器解析用に改良したもの [4] を利用し、燃焼器の解析を行った。乱流モデルは標準 k-モデルを

採用している。

3. 計算条件

103 × 19 × 41 の O-grid でラジアルタービン翼近辺の格子を作成し (Fig.1(a)), これを包み込むように 103 × 33 × 41 の H-grid を作成し (Fig.1 (b)), 30 度の周期境界をとった (Fig. 2) 。



(a) O-grid (b) H-grid
 Fig.1 翼周り格子及びその周囲の格子

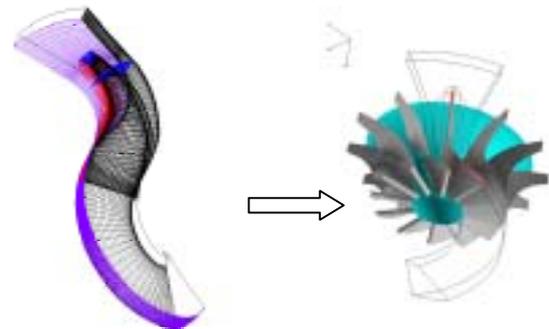


Fig. 2 タービン計算格子

燃焼器では、17 のブロックを組み合わせせて約 11000 点の格子点を有する格子を作成し、0.5 度の周期境界をとった (Fig. 3) 。

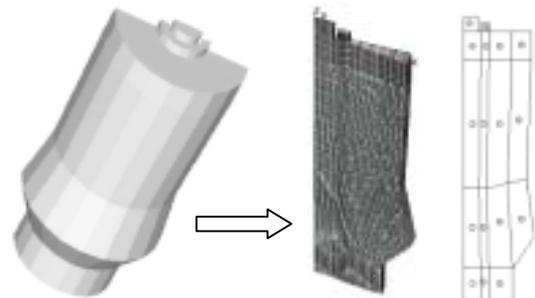


Fig. 3 燃焼器計算格子

諸形状は小型タービンを元に予測し、そのマクロな実験データを元に諸条件を設定した。諸条件を Table 1 に示す。

タービンの流入境界では全温・全圧・速度の方向を与え、静圧は半径方向力の平衡を満たすようにして与えた[5]。流出境界では静圧のみを与え、その他は内点から外挿した。壁面境界はノンスリップ・断熱条件を与えた。

燃焼器入口では、化学種密度を流入空気密度と大気成分により決め、これと質量流量から速度・密度を与えた。乱流スケールは入口幅の 1/4 とし、乱流エネルギーは入口速度から求めた運動エネルギーの 5% とした。圧力・温度には内点の値を反映させている。出口では、圧力および勾配ゼロの流出条件を科した。現在のマイクロガスタービンは通常天然ガスを燃料としているが、本計算では実験に合わせるため、燃料を軽油(JIS-2)としている。

Table 1 諸条件

主軸回転数	100000rpm
タービン入口温度	980
タービン入口圧力	345.4kPa
出口圧力	100.13kPa
タービン圧力比	3.33
タービン入口直径	99mm
タービン出口直径	64.4mm
燃焼器入口温度	178.5
燃焼器入口圧力	356.2kPa
質量流量	0.16kg/s
燃料	軽油(JIS-2)

4. 計算結果及び考察

翼端隙間無しの場合における H-grid 上 J=42 面の二次流れベクトルの計算結果を Fig. 4 に示す。また、タービン翼子午線面中央部の、H 及び O-grid 両計算結果を重ねた圧力分布を Fig.5 に示す。

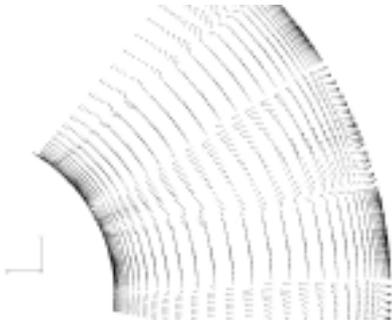


Fig.4 タービン内の二次流れベクトル

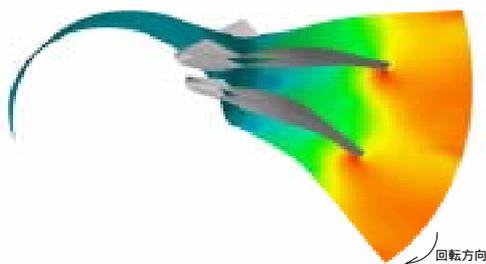


Fig.5 タービン翼周りの圧力分布

信頼できる実験結果がなく比較はできないが、このような流れ場になると思われる。Fig.4 で流れが回転方向に揃っている部分は翼内部であり、計算の際、便宜上この値を入れている。

Fig. 6(a)及び(b)に燃焼器の計算結果を示す。Fig.6(a)は燃焼器内部の流線を可視化したもので、中心軸近くで剛体渦、壁面近くでは旋回強度が弱くなり自由渦の形をとるといふ、旋回流の分布特性が示されている。Fig.6(b)は燃焼器内部の温度分布である。燃焼器出口付近の温度は 1007 と実験値よりも 30 程度高くなっているが、これは輻射や燃焼器の断熱性などを考慮していないためと考えられる。

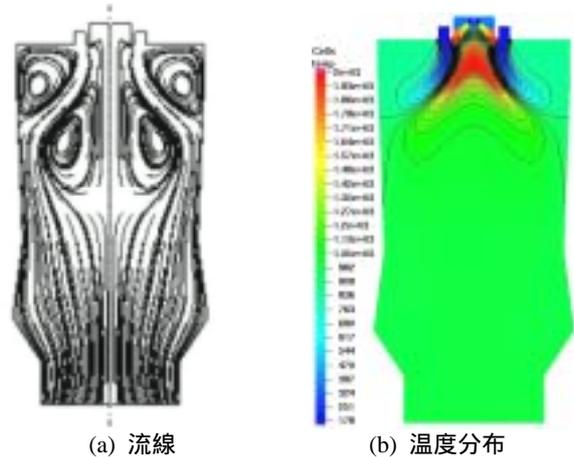


Fig.6 燃焼器内の計算結果

ノズル等によって燃焼器及びタービンの計算結果を繋げば、全体(統合)シミュレーションへの第一歩となると考えられる。

5. 結言

FSA 及び δ^2 コレクションスキームを用いて複雑なラジアルタービン内の数値解析が可能であることを示した。

改良した KIVA-3V を用い、ガスタービン燃焼器の解析が可能であることを示した。

この 2 つのコードを用いて、マイクロガスタービンシステムの全体シミュレーションが可能なコードを構築する予定である。

参考文献

- [1] Fujii, K., Tamura, Y. and Kuroda, S.: Unified Zonal Method Based on the Fortified Navier-Stokes Concept. AIAA paper 91-1558-CP
- [2] Matsuno, K.: An Implicit High-Order, Accurate Upwind Scheme for Unsteady Euler Equations. Theoretical and Applied Mechanics 37(424), pp. 91-99, 1988
- [3] 松尾裕一: 高速ターボプロップ流れの数値解析. 東京大学工学博士論文, 1988
- [4] 謝正海: KIVA による燃焼器解析とその応用に関する研究. 東京大学工学博士論文, 2001
- [5] 土屋直木, 吉識晴夫: ラジアルタービンの動翼内流れの三次元数値解析(第 1 報). 生産研究 50 巻 11 号 pp. 348-351 1998