超小形ガスタービン発電機の現状* (達成点と課題の整理)

田 中 秀 治^{*1}

Current Status of Miniature Gas Turbine Generators (Summary of Achievements and Problems)

Shuji TANAKA^{*2}

^{*2} Department of Nanomechanics, Tohoku University,
6-6-01 Aza Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper briefly reviews researches on miniature gas turbine generators performed to date in the world. Two major approaches; MEMS-based and mechanical-machining-based approaches are described. The first approach was proposed by Massachusetts Institute of Technology (MIT) in 1997. A lot of outstanding outputs were produced by MIT, but the MEMS-based coin-sized engine has not been demonstrated to date. This paper discusses main three challenging issues of this type of engine. The second approach was taken by at least several groups. The main challenging issues are similar to those of MEMS-based engines. In 2007, Tohoku University and IHI with collaborators established the heat cycle of a juice-can-sized engine with a compressor impeller of 16 mm in diameter. This is the world's smallest operating gas turbine engine that has been reported in open literatures.

Key Words: Gas Turbine, MEMS, Gas Bearing, High-Speed Rotation

1. 緒 言

1997年, マサチューセッツ工科大学(MIT)から発表された“The MIT Microengine Project”⁽¹⁾は, MEMS (micro electro mechanical systems) 技術を利用して硬貨大のガスタービン発電機を実現するというもので, MEMS研究者やガスタービン研究者はもちろん, 熱流体やエネルギーに関わる多くの機械工学研究者を驚かせた. この発表は, 単に希望的な構想だけではなく, 予備実験や理論計算を含む詳細な検討内容を含んでいたため, これを基に様々な議論や研究がMIT以外にも大きく広がった. 2000年代前半の最盛期には, 著者が知る限りでも10程度のプロジェクトが世界で行われていた. 研究開始から10年以上が経った現在, これまでの研究開発を総括し, 達成点や課題を整理する.

2. MEMS技術による超小形ガスタービン発電機

The MIT Microengine Projectは, 多大な研究資源を投入して進められてきたが, これまでにおおよそ終了したと思われる. MEMS技術を用いて硬貨大のガスタービン発電機を実現するという非常に挑戦的な目標は, 結局, 未達である. このようなガスタービンエンジン

は自立運転するというのが, 理論検討やシミュレーションに基づくMITの主張であるが, 実施された研究内容⁽²⁾は, それは少なくとも現在の技術水準では諦めざるをえないと結論する程, 網羅的かつ高度なものであった.

多くの成果の中でも最も重要なものの1つは, 2000年に発表された翼径4.2 mmのSiタービンによる140万rpmの達成である⁽³⁾⁽⁴⁾. タービン/圧縮機翼は直径に反比例して高速回転させなくてはならないので, 140万rpmはそれでも定格の60%程度であるが, 世界中の他のグループは, 結局, このような高速回転を実現できなかった. MITと他のグループとでは, 特にDRIE (deep reactive ion etching)⁽⁵⁾⁽⁶⁾, Si直接接合などの微細加工技術の洗練度に大きな差があった. MITが開発した微細加工技術, 特にDRIEとSi直接接合とによる複雑かつ精密な多層構造体の作製技術⁽⁷⁾は, 各種の試験デバイスの試作に共通して用いられた.

文献に基づき, 硬貨大のガスタービン発電機を実現するにあたっての技術的問題を整理する. 発電機を除いたエンジンを熱機関として成立させることは, 最も重要なマイルストーンであったが, これを達成する上で, 1) ロータの高速回転の実現, 2) 圧縮機・タービンの断熱効率の確保, および 3) エンジン内での温度差の確保が難しい.

* 原稿受付 2010年2月26日.

^{*1} 正員, 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01).

E-mail: tanaka@mems.mech.tohoku.ac.jp

1) に関しては、既に述べたように翼径 4.2 mm の Si タービンで 140 万 rpm が実現されているが、エンジンではタービンと圧縮機とを直結した状態で高速回転させなくてはならない。MIT のエンジン構造では、タービン翼と圧縮機翼とは背中合わせの状態で直接接合されているが、このような 2 ピースロータを高速回転させるには、非常に高い加工・組立精度が要求される。この大きさでは、回転バランスを計測して、後から調整することは不可能である。このような 2 ピースロータで実現されている最高回転数は 42 万 rpm である⁽⁸⁾。この回転数は常温で実現されているが、燃焼状態では、たとえば熱膨張で軸受隙間が変化し、高速回転はより困難である。42 万 rpm で回転したものを燃焼状態で回転させたところ、最高回転数は 8 万 rpm であった⁽⁸⁾。上述の研究は全て、文献^{(3) (4)}の成果に基づく静圧空気軸受を用いて行われている。実験室では静圧空気軸受の給気は外部の圧縮空気源から供給できるが、実際の応用では難しい。スラスト軸受に関しては動圧化の報告があるが⁽⁹⁾、ラジアル軸受に関しては有効な動圧化の方法は見出されていない。

2) に関しては、まず、DRIE で加工しうる 2 次元的な翼形状に起因する効率の限界がある。このような翼に関してシミュレーションは多くあるものの、性能の実測^{(8) (10)}は少ない。そもそも翼が小さくなると、効率の計測自体が容易ではなくなる。具体的には、圧縮機出口温度が熱逸散で低めに計測され、結果として断熱効率がよく出る。後述する直径 10 mm の 3 次元翼では、圧縮機シュラウドを熱伝導の小さい樹脂にするなどの工夫がされている⁽¹¹⁾。翼径が小さくなると相対的に大きくなる翼隙間も、実際には効率を低下させる。

3) に関しては、タービンから圧縮機への熱伝導が最大の問題である。普通のエンジン構造では、タービン翼と圧縮機翼とが細長い軸で結合されるが、MIT のエンジン構造では、背中合わせの状態で直接接合されるので、大量の熱がタービンから圧縮機に流れる。その結果、圧縮機の断熱効率が大幅に低下し、熱サイクルが成立しない恐れがある。熱機関として必要な温度差はその大きさによらないので、小形化すると熱勾配が大きくなることが、本質的な問題である。MIT の設計では、タービンから圧縮機への熱伝導が問題としつつも、タービンの冷却をこれに頼り、タービン入口温度をできる限り上げて、効率を確保しようという考え方である。しかし、1) に述べた難しさから、熱流入による圧縮機の断熱効率の低下を実験的に確認できておらず、この考え方の妥当性は実証されていない。

熱サイクルが成立したとしても、エンジンへの発電

機の組込みも非常に難しい。静電誘導発電機⁽¹²⁾と電磁発電機⁽¹³⁾の報告があるが、どちらもエンジン内に設置することが構造的に難しい上、特に後者は高温では動作しない。発電に特化した試験機で実証された出力は、静電誘導式で 108 μ W (24.5 万 rpm)、電磁式で 6.6 mW (39.2 万 rpm) であり、高パワー密度を実現することは容易ではないことがわかる。

3. 機械加工技術による超小形ガスタービン発電機

MIT が MEMS 技術を用いて硬貨大のガスタービン発電機を実現しようと野心的なプロジェクトを進めたのに対して、機械加工技術に基づき、従来のものを超小形化しようとするグループが現れた^{(11) (14) ~ (18)}。研究者の大きな興味の 1 つは、ガスタービンエンジンはどこまで小さくしても成立するのか、たとえば、翼径で 10 mm のエンジンは成立するのかということである。これを明らかにするには、実際に小さな翼を作って、圧縮機またはタービンの断熱効率を実測する必要がある。しかし、機械加工技術に基づいても上述の 3 つの課題はおおよそ同じであり、その 1 つである数十万 rpm 以上といった高速回転を実現することは容易ではない。

スタンフォード大学と本田技術研究所は共同で、玉軸受を用いて翼径 12 mm の圧縮機を 42 万 rpm まで回転させ、圧縮機性能を計測したが、この回転数は定格の半分強に過ぎない⁽¹⁴⁾。ルーベンカトリック大学も玉軸受を用いて、翼径 10 mm の軸流タービンの性能を 16 万 rpm まで計測した⁽¹⁵⁾。東北大学、東北学院大学、および IHI は共同で、高速安定性に優れる慣性気体軸受を開発し^{(19) (20)}、これを用いて翼径 10 mm の圧縮機を 72 万 rpm まで回転させ、圧縮機性能を計測した⁽¹¹⁾。また、CFD (computational fluid dynamics) シミュレーションと実測の結果を比較し、このような大きさのガスタービンエンジンが空力的には成立しうることを示した⁽¹¹⁾。

2007 年、東北大学、IHI、東北学院大学、首都大学東京、および東京大学は共同で、圧縮機翼径 16 mm のガスタービンエンジンを熱機関として成立させることに成功した⁽¹⁸⁾。熱サイクルが成立した回転数は定格の 62 %、36 万 rpm であった。このエンジンでは、発電機はダミー質量に置き換えられ、また、軸受は外部圧縮空気源を必要とする慣性気体軸受である。少なくともエンジンを自立運転させるためには、慣性気体軸受を動圧気体軸

受に交換する必要がある。

ロータはタービンからの熱流入や軸受での摩擦熱によって加熱される。ロータの温度は、発電機用永久磁石の使用可能温度以下に維持しなくてはならない。また、数 μm 程度と狭い軸受隙間を必要とする動圧気体軸受では、軸の熱膨張が問題になる。上述のエンジンでは、冷却効果の高い慣性気体軸受を用いているものの、36 万 rpm での運転時にタービン側軸受部において、直径 8 mm のニッケル基超合金の軸が直径で 48 μm 程、熱膨張した⁽²¹⁾。軸径の変化に寛容な動圧気体軸受にフォイル軸受があるが、直径 8 mm のテーブ型フォイル軸受によって約 78 万 rpm の超高速回転が実現されている⁽²²⁾。

4. 結 言

The MIT Microengine Project に端を発したガスタービン発電機の超小形化は、世界中に研究開発を広げ、多くの研究者がそれぞれの方式で挑戦することになった。MIT は素晴らしい成果を残しつつも、MEMS 技術に基づく硬貨大のガスタービンエンジンは実証できていない。本稿で整理したように、残された課題はどれも重く、新たな挑戦を躊躇させる程であるが、将来、ブレークスルーが生まれることを期待したい。

機械加工技術に基づく超小形ガスタービン発電機については、2007 年に圧縮機翼径にして 16 mm のエンジンで熱サイクルの成立が達成された。公開文献から知りうる限り、これが現在でも世界最小のガスタービンエンジンであると思われる。これを実用的なガスタービン発電機にするには、軸受の動圧化と発電機の搭載が必要であるが、熱の問題を克服する必要がある。

文 献

- (1) Epstein, A. H. *et al.*, Micro-Heat Engines, Gas Turbines, and Rocket Engines – The MIT Microengine Project –, *Proc. 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, 4th AIAA Shear Flow Control Conference* (1997-6), AIAA 97-1773.
- (2) Epstein, A. H., Millimeter-Scale, Micro-Electro-Mechanical Systems Gas Turbine Engines, *J. Eng. Gas Turbine Power*, Vol. 126 (2003), pp. 205–226.
- (3) Fréchette, L. G. *et al.*, Demonstration of a Microfabricated High-Speed Turbine Supported on Gas Bearings, *Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop* (2000-6), pp. 43–47.
- (4) Fréchette, L. G. *et al.*, High-Speed Microfabricated Silicon Turbomachinery and Fluid Film Bearings, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 14 (2005), pp. 141–152.
- (5) Ayon, A. A. *et al.*, Ultra Deep Anisotropic Silicon Trenches Using Deep Reactive Ion Etching (DRIE), *Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop* (2000-6), pp. 339–342.
- (6) Miki, N. *et al.*, Enhancement of rotordynamics performance of high-speed micro-rotors for power MEMS applications by precision deep reactive ion etching, *Sens. Actuators A*, Vol. 104 (2003), pp. 263–267.
- (7) Miki, N. *et al.*, Multi-stack silicon-direct wafer bonding for 3D MEMS manufacturing, *Sens. Actuators A*, Vol. 103 (2002), pp. 194–201.
- (8) Savoulides, N. *et al.*, Fabrication and Testing of a High-Speed Microscale Turbocharger, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 17 (2008), pp. 1270–1282.
- (9) Wong, C. W. *et al.*, A Self-Acting Gas Thrust Bearing for High-Speed Microrotors, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 13 (2004), pp. 158–164.
- (10) Nakajima, A. *et al.*, Fabrication and high-speed characterization of SU-8 shrouded two-dimensional microimpellers, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17 (2007), pp. S230–S236.
- (11) Isomura, K. *et al.*, Experimental verification of the feasibility of a 100W class micro-scale gas turbine at an impeller diameter of 10 mm, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16 (2006), pp. S254–S261.
- (12) Lodewyk Steyn, J. *et al.*, A Self-Excited MEMS Electro-Quasi-Static Induction Turbine Generator, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 18 (2009), pp. 424–432.
- (13) Herrault, F. *et al.*, Ultraminiaturized High-Speed Permanent-Magnet Generators for Milliwatt-Level Power Generation, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 17 (2008), pp. 1376–1387.
- (14) Kang, S. *et al.*, Micro-Scale Radial-Flow Compressor Impeller Made of Silicon Nitride – Manufacturing and Performance –, *Proc. ASME Turbo Expo 2003* (2003-6), GT2003-38933.
- (15) Peirs, J. *et al.*, A Microturbine for Electric Power Generation, *Sens. Actuators A*, Vol. 113 (2004), pp. 86–93.
- (16) Matsuo, E. *et al.*, The Development of the Ultra Micro Gas Turbines, *J. Jpn. Inst. Energy*, Vol. 84 (2005), pp. 192–199.
- (17) Tanaka, S. *et al.*, Turbo Test Rig with Hydroinertia Air Bearings for a Palmtop Gas Turbine, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16 (2004), pp. 1449–1454.
- (18) Tanaka, S. *et al.*, World's Smallest Gas Turbine Establishing Brayton Cycle, *Proc. 7th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, PowerMEMS 2007* (2007-11), pp. 359–362.
- (19) Hikichi, K. *et al.*, Hydroinertia gas bearings for micro spinners, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15 (2005), pp. S171–S178.
- (20) Tanaka, S. *et al.*, Hydroinertia Gas Bearing System to Achieve 470 m/s Tip Speed of 10 mm-Diameter Impellers, *J. Tribology*, Vol. 129 (2007), pp. 655–659.
- (21) Hikichi, K. *et al.*, Hydroinertia gas bearing for super high-speed micro machine gas turbine engine – Influence of operating temperature for characteristic of hydro-inertia gas bearing –, *J. Jpn. Soc. Tribologists*, Vol. 55 (2010), pp. 292–299.
- (22) Hikichi, K., A Study on High-Speed Gas Bearings for Ultra-small Gas Turbine Generator, Ph.D. dissertation, Tohoku University, Sendai, Japan (2010-2).