

ポンプ駆動用 L 形 MFT-8L ガスタービンの開発

Development of Vertical Type MFT-8L Gas Turbine for Pump Drive

高砂製作所 上松 一雄*¹ 益田 将寛*²

技術本部 森 秀隆*³ 東崎 康嘉*⁴

名古屋誘導推進システム製作所 鈴木 理之*⁵

近年、洪水時の河川排水や下水・雨水排水を目的とした排水機場のポンプ駆動用原動機として、冷却水を必要とせず、騒音・振動が小さいガスタービンが採用されつつある。一方、建設費縮減のニーズの高まりから排水機場のコンパクト化が望まれており、ポンプ駆動用ガスタービンの立軸化によりこれを実現する。今回開発された MFT-8 L 形ガスタービンは、MFT-8 形ガスタービンの信頼性の根幹であるガス発生機についてはそのままとし、パワータービンのみを立軸化し、各種解析・モデル試験・要素試験を経た後、実負荷試験確認を行い、MFT-8 同様信頼性の高いものとした。本報ではこの開発内容を述べる。

Gas turbines that require no cooling water and have low noise and vibration have been used in recent years as a prime mover for pump drive to drain water due to floods, sewers, or torrential rain. The need to reduce construction cost by reducing space in drain pumping stations is increasing can be met by using vertical power turbine shafts for pump drive gas turbines. The newly developed MFT-8 L combines the highly reliable MFT-8 gas generator and a vertical power turbine developed through analysis and model, elementary, and full load shop testing to provide the reliability of the MFT-8. This paper reviews this development.

1. はじめに

河川のはん濫による浸水被害を未然に防止すべく建設される排水機場は、洪水時には高い信頼性を要求される。また、この機場の普及のためには建設費用の縮減が重要課題となっており、機器をコンパクト化する必要に迫られている。

こうした動きにマッチしたのが、冷却水系統を必要とせず、かつコンパクトで騒音・振動対策を必要としないガスタービンである。

現在、更なる建設費縮減を目指し、ガスタービンの軸を立軸化して一層のコンパクト化を実現する研究がなされ、こうした研究成果として本報に示す MFT-8 L 形ガスタービンが開発された。

この立軸化による効果は図 1 に示すとおりである。

MFT-8 L 形ガスタービンの開発は、三菱重工全社の技術の粋を集めて実施され、各事業所・研究所が得意分野を受持つことで、信頼性・性能を損なうことなく、かつシンプルさを保たせたものとなった。

2. MFT-8L 形ガスタービンの特徴

MFT-8 L 形ガスタービンは、回転数制御範囲が 20～100 % と広く、起動時間も 3 min と短い、ポンプ駆動用に適した単純開放サイクル 3 軸式ガスタービンである。

図 2 にガスタービン本体断面図を示す。

表 1 に主要目を示す。

構成としては、通常の横軸ガス発生機と今回開発した立軸出力タービン及びこの両者を結合してガス流れを 90°方向転換する中間ダクトから成り、L 字形状となっている。

ガス発生機 (Pratt & Whitney 社製) には、信頼性の高い GG8 (航空機用エンジンとして 15 700 台以上の実績を有する JT 8 D を陸用に転用したもの) をそのまま使用し、出力タービンのみを横軸 MFT-8 ガスタービンの出力タービンに改造を加えて立軸化し

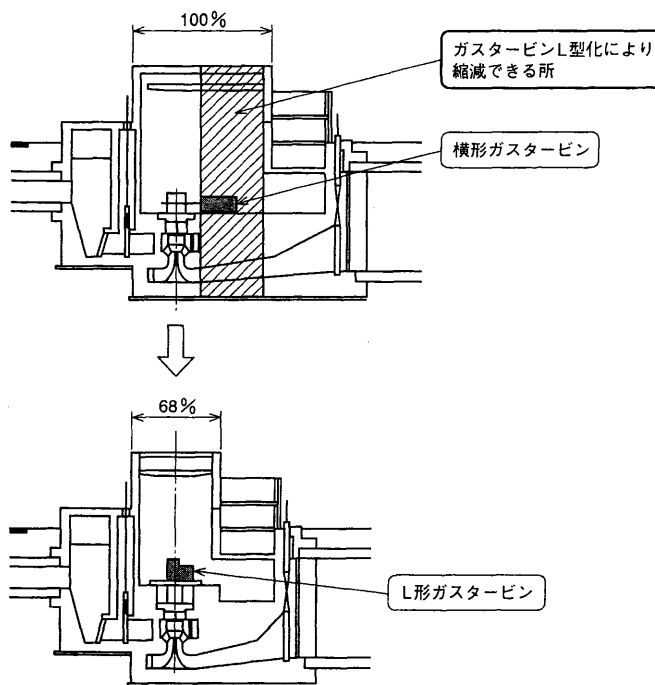


図 1 L 形ガスタービンポンプ場平面積縮減効果
Space reduction effect of drain pump stations by L-shape gas turbine

たものである。

主な開発のポイントは、次のとおりである。

- ① 低損失かつコンパクトな中間ダクトの開発
- ② パワータービンの剛支持や軸受オイルフィルムダンパ採用による振動防止対策
- ③ 予圧式円筒ころ軸受によるスキッピングの防止
- ④ 立軸化による油漏れ防止のためシール構造強化と高真空排油システム

*1 タービン技術部ガスタービン設計課主務

*4 長崎研究所トライボロジー研究室

*2 機械技術部ポンプ装置設計課

*5 エンジン・機器部ガスタービンエンジン設計課

*3 高砂研究所ターボ機械研究推進室主務

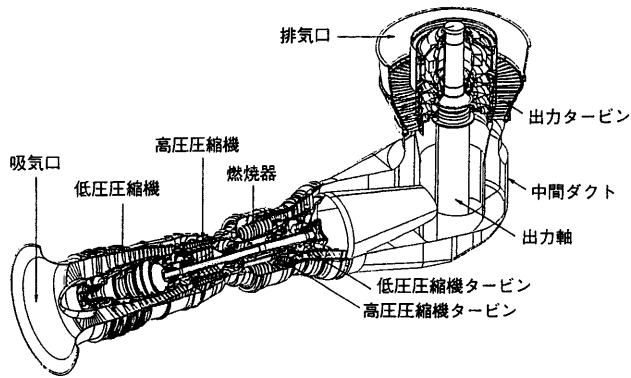


図2 MFT-8L 形本体断面図
Crosssectional drawing of MFT-8L

表1 ガスタービン主要目
Feature of gas turbine

構造	形式 ガス発生機	単純開放サイクル3軸式 圧縮機：軸流式 低圧8段 高圧7段 燃焼器：キャニュラ形 9個 タービン：軸流式 高圧1段 低圧2段
	出力タービン	軸流式 3段
性能	最大出力	23 000 PS
	燃料消費率	約 180 g/PS/h (最大出力時)
	排ガス温度	約 500°C
	定格回転数	4 000 rpm
	使用燃料	灯油, 軽油, A 重油, 都市ガスほか
	適用出力	7 000 PS~23 000 PS
	適用回転数	1 000 rpm~4 000 rpm
出力条件：吸気圧力 920 hPa/吸気温度 37°C 吸気損失 100 mmAq/排気損失 300 mmAq		

3. 開発内容

3.1 低損失中間ダクトの開発

3.1.1 流動解析

ガス発生機出口の燃焼ガスを立形に置かれたパワータービンに導くダクトを中間ダクトと称している。中間ダクトには次の機能が要求される。

- ① 中間ダクトの軸方向距離を極力短くする。(コンパクト化のため)
- ② 中間ダクト部の圧損を極力抑える。
- ③ 中間ダクト出口 (パワータービン入口) での周方向速度分布偏差を極力小さくする。
- ④ 中間ダクト出口部での各周方向位置での半径方向速度分布偏差を極力小さくする。
- ⑤ 中間ダクト出口でのパワータービン一段静翼に対するインシデンス角及びピッチ角を極力小さくする。
- ⑥ 中間ダクト内の流れの乱れを抑える。

これらの設計要求に対してダクト入口は環状ディフューザ部として十分流速を落して、その後流れを直角に偏向させパワータービン入口で様な流れを得られるような中間ダクト形状を7種類設計した。これら7種類の形状について、三次元粘性流動解析を行い流動状況及び圧力損失値 (乱流モデルは K-ε モデルを用いた) を評価して①~⑥の条件を最も満たす形状を最終案とした。

3.1.2 モデル試験

前項で選定された中間ダクトについてモデル試験を行い、解析の裏付けを行うとともに流動状況を確認した。スケール比は実機の 1/3.2 である。

計測項目は中間ダクト入口出口全圧, 同静圧, 流れ角度及び中間ダクトの軸方向壁圧分布である。

供試中間ダクトモデルは内部流動が目視観察できるように外筒部を透明アクリライトで製作した。

試験条件は, 中間ダクト入口のマッハ数を実機と同一とした。図3に供試モデルの写真を示す。また, 図4に試験結果の一例として中間ダクト出口 (パワータービン入口部) のミッドスパンにおける流速分布を示す。

流速の周方向偏差は±13%程度で大きな偏差がないことが分かった。また, 中間ダクトの全圧損失は計画値より小さかった。

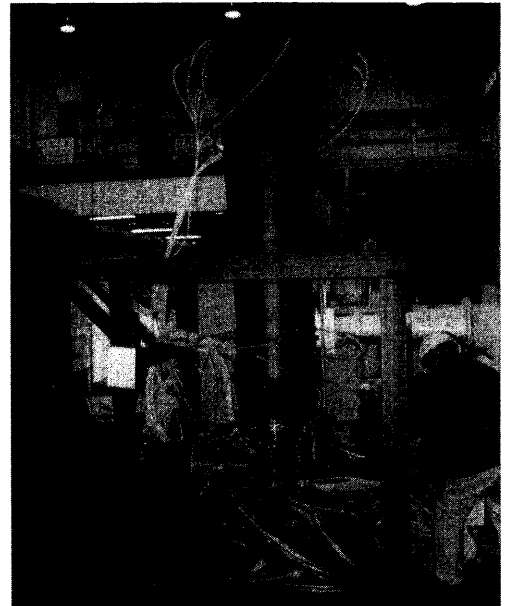
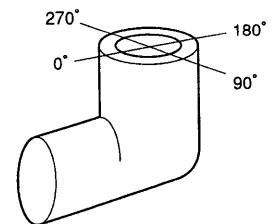


図3 試験装置外観 供試部は透明アクリライトで作られている。
View of test facility



(中間) 50.00%高さ

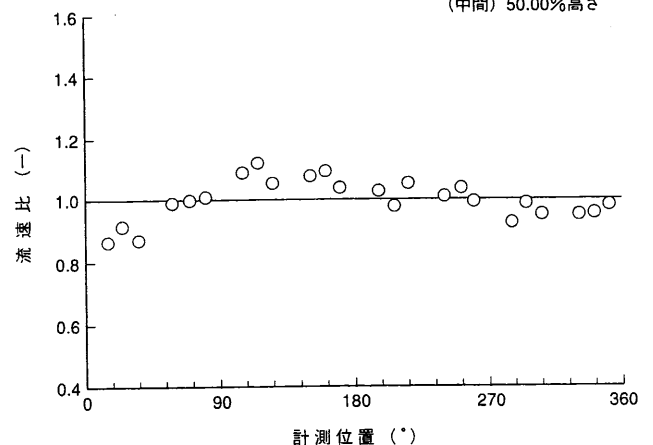


図4 試験結果の一例 中間ダクト出口流速の周方向分布の偏差は問題のないレベルである。
Typical result of intermediate duct flow test

また、タフト（糸片）法により内部流動状況の観察を行なったところ流路内に大きな渦や離域がないことが確認できた。

3.2 振動対策

3.2.1 予圧型円筒ころ軸受

従来横置き（地面に対して主軸が水平）で使用していたガスタービン用主軸を縦置き（地面に対して主軸が垂直）にした場合、横置きの場合に作用していた主軸の自重が円筒ころ軸受に作用しなくなる。

このため、円筒ころ軸受には全く外部荷重が作用しなくなり、ころが軌道輪上を転がらずにスキッピングと呼ばれるころの大滑りが生ずる可能性が非常に高い。

スキッピングが発生すると滑り発熱により潤滑油粘度が低下し、ころと軌道輪間の油膜破断が起る。これにより、ころと軌道輪の金属接触の割合が増加し、転動面に損傷あるいは摩耗を生じ、早期に軸受寿命に至る。

そこで、図5に示すような以下の解析手法を組合せた、スキッピング防止設計手法を用いて予圧型円筒ころ軸受を開発した。

- ① 各種の力
- ② ころと軌道輪間の弾性変形
- ③ 軸受内部すきま分布
- ④ 弾性流体潤滑（Elasto Hydrodynamic Lubrication : EHL）

つまり軸受外輪をわずかに非真円にすることで内部すきまに負すきま分布を与えることにより適切な予圧荷重を強制的に発生させて⁽¹⁾、ころが軌道輪上を転がるようにした。

高速回転試験で本軸受の性能試験を実施したところ、スキッピングは発生しなかった。

さらに実機実証試験（100 h 以上）後に実体顕微鏡で軸受表面を観察した結果、損傷はなくかつ軸受表面粗さを Taylor Hobson 製の Form Talysurf Series 2 で計測したところ、試験前の表面粗さと同等であり、摩耗もほとんど生じていなかった。

3.2.2 軸振動解析

軸振動については、ガスタービンに接続される下部の減速機を含めた軸系にて解析した。

解析結果はパワータービン下部の軸受部が揺れる1次モードが運転範囲内に残るため、横形 MFT-8 にて実績のあるオイルフィルムダンパを設置してこのモードを完全に制振した。また、2次モードは軸長を短くして運転範囲より高くした。

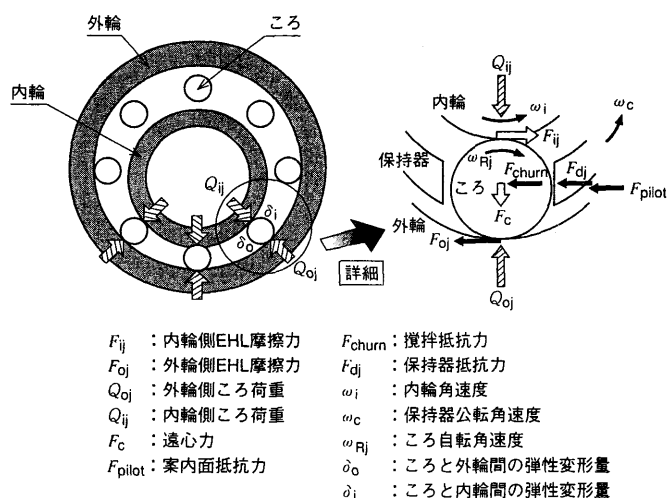


図5 円筒ころ軸受のころに作用する力

Force acting on cylindrical roller bearing

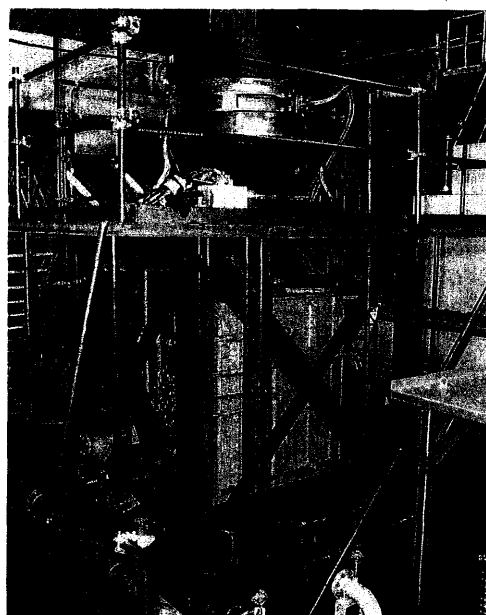


図6 高速回転試験装置外観
View of high speed test equipment

3.3 高速回転試験

図6に高速回転試験装置を示す。

今回のパワータービンの翼形状は横形 MFT-8 と全く同じであり、翼の振動に関し事前検証項目はなく、立軸化に伴う変更項目について検証を実施した。

この試験では、実物のケーシング、軸受、ロータ（ただし、翼はダミーロータ）等を使い、次の各項目の確認を行った。

- ① 軸振動の計測による、実機での振動予測
- ② スキッピング防止対策（予圧型円筒ころ軸受）効果の確認
- ③ 潤滑油シール性の確認

この結果、事前に問題のないことを確認し工場実負荷試験に進むことができた。

4. 実機実証試験

MFT-8 L 形ガスタービンは、1997 年 9 月～10 月に実機実証試験を実施した。

試験設備は、L 形ガスタービンの下に直交軸減速機が設置され、平衡軸増速機を経て2台の水動力計で負荷を掛けている。この直交軸減速機は、本試験設備のために製作したもので、25 000 PS を伝達できる世界最大級の大容量高周速ベベルギヤとなっている。

また、水動力計は、1台 20 000 PS 仕様のものを2台直列に接続している。

図7に試験設備の外観を示す。

実証試験では、まず開発項目の検証として振動・騒音、各部温度、熱変位、中間ダクト出口ほかの速度分布等を計測し、所定の性能が得られていることを確認した。

続いてポンプ駆動用としての適合性を確認するために機能試験を実施した。機能試験の項目は以下のとおりであり、素早い起動、広い回転数制御範囲などのポンプ駆動用に適した性能を有することが実証された。図8に試験結果の例を示す。

- ① 始動特性試験
- ② 停止試験
- ③ 負荷試験
- ④ 過速度試験

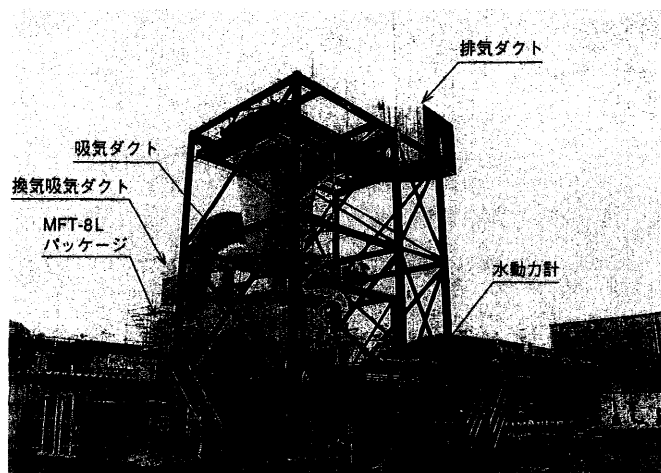


図7 工場試験設備外観
View of shop test facility

- ⑤ 再始動試験
- ⑥ 可変速試験
- ⑦ 耐久試験

5. 立軸ガスタービンのシリーズ化

当社では、MFT-8 L 形ガスタービン以外に、小出力領域に適用すべくガスタービン全体を立軸化し 20～30 % のポンプ場平面積縮減を果す立形ガスタービンも開発している。

表2に示すとおり MGM 500 V 形及び MGM 3000 V 形は、実機実証試験を完了して製品化され、他の型番も近々製品化される。

6. おわりに

当社は、公共の利益を目指してポンプ駆動用立軸ガスタービンシリーズを自主開発してきた。

この成果を反映し、今後河川はん濫の未然防止を目的とする排水機場（ポンプ場）の建設コスト縮減による広い普及と信頼性向上に貢献していきたいと考えている。

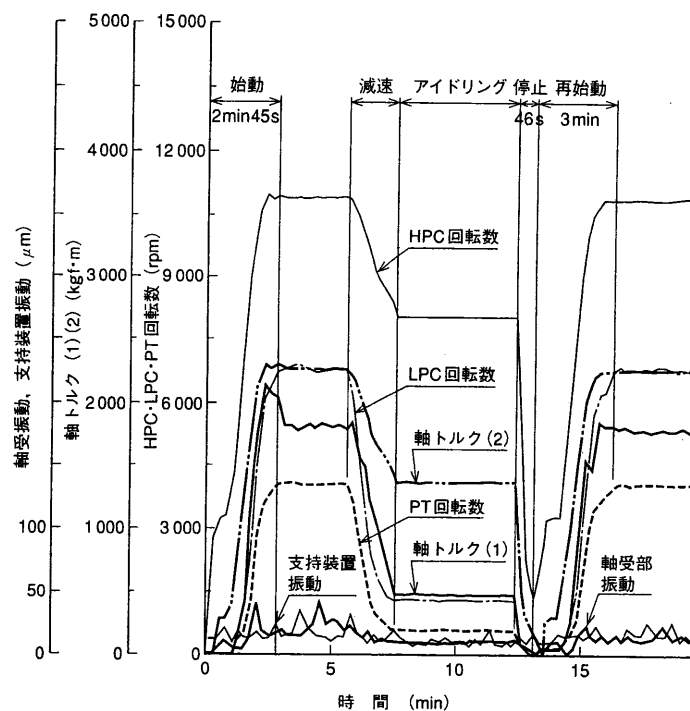


図8 工場試験データ
Data of shop test

表2 ポンプ駆動用立軸ガスタービンシリーズ
Series of vertical gas turbine for pump drive

型番	適用出力 (PS)	製品化時期
MGM 500 V (立形)	100～500	平成10年4月
MGM 1500 V (立形)	500～1200	平成10年11月予定
MGM 3000 V (立形)	1000～2800	平成9年10月
MGM 4000 V (立形)	2500～3600	平成13年3月予定
MFT-8 L (L形)	7000～23000	平成9年10月

参考文献

- (1) 大浦ほか, NSK Technical Journal, No.663 (1997) p.8～17