

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560156

研究課題名(和文)高周速ギヤボックスの自己減圧作用による損失低減と自律的潤滑の可能性

研究課題名(英文) Loss reduction of a high-speed gear box with the self-vacuuming configuration and the possibility of autonomous lubrication

研究代表者

北條 春夫 (Houjoh, Haruo)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：40108238

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ガスタービン発電機に用いられる歯車は高い回転数で運転されるため、風損と呼ぶ損失が伝達動力の数%にも達し、無駄として無視できない。これを小さくする1方法として、歯車自身にギヤポンプの機能を付加し、箱内を真空にすることの可能性を検討した。これと同時に潤滑が円滑に行われなければならない。この点も考慮して検討した結果、圧力を低減できるが、外部圧力との差が別の損失を生むことが判明した。空気排出部を小形の真空ポンプで吸引すればよく、また潤滑は、かみ合いの外部からのジェット流を用いれば、箱内の圧力が低いために安定して実現可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In high speed gearing such as used in a power generation, windage loss of gears is one of important issue to be eliminated for energy saving of these days. So called self vacuuming, which is realized by arranging a shrouding assembly around the mesh start region of a pair of helical gears as like a gear pump, was investigated as a simple way to decrease the interior pressure. It is confirmed that the vacuuming is successful to reach about 0.002MPa, which means the windage loss potentially reduced by about 80%. However excess loss, named pressure difference loss alternatively becomes marked and exceed the above loss reduction. It is found that the high pressure (atmospheric pressure) at the air vent should be eliminated by using a small vacuum pump with low power consumption. Furthermore, feasibility of lubrication was confirmed by visualizing the oil jet lubrication because the low pressure brings weaker air turbulence to make the jet stable.

研究分野：機械要素

キーワード：歯車 はすば歯車 風損低減 真空 圧力差損失 断熱圧縮 潤滑方法

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の問題が顕在化する中で、エネルギーの効率的利用が喫緊の課題として重要視されるようになった。その結果、機械システムにおいても、従来は「効率」の名の下にその向上を図ってきたものが、「損失」低減を明示的な目標とするようになった。元来同じものであるが、効率が仮に98%のものが98.2%になったとしても、その改善は目立たないが、これを損失で評価すると残りの2%の部分であるので、10%の損失低減として評価される。歯車装置においてもこれは例外ではない。

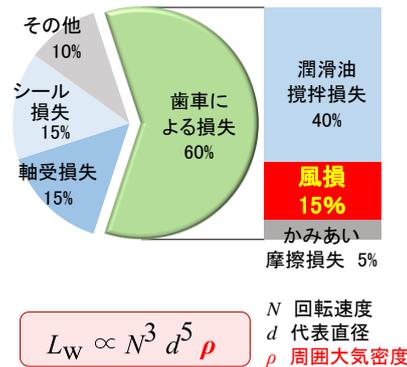


図1 高速歯車の損失割合の例

歯車装置の効率は、歯車の段数などにも依存するが、1対の歯車のすべりによる効率は概ね98%程度とされている。しかし、ガスタービン発電機のように、毎分数万回転にも上る軸を、1,500または1,800回転に減速するような、高速(高周速度)の減速機が用いられる場合、周速度は、概ね毎秒100mを超えるため、歯車内部の空気が攪拌されるために大きな損失が発生し、条件によっては発電機能力の数%が、熱として散逸するといわれている。この損失を風損とよび省資源、経済性の観点からも改善が望まれる。図1は、損失割合の一例であるが、潤滑油は冷却のためにも必須であるので、これによる損失は避けられない一面があるのに対し、風損を減ずることは、運転上の支障は発生しない。

2. 研究の目的

この風損を低減するには、ギヤボックスの内部に密度の低い気体(例えばヘリウムガス)を充填するか、圧力を低減して真空にすることが必要である。ここでは、後者の低圧力化を目指すこととし、その方法を図2のように提案して、その実現可能性を検討することを目的としている。

一般には、ギヤボックスに真空ポンプをつなぎ、内部を真空にすればよいと考えられるが、真空ポンプの要求能力が不確実である。一方歯車は、ギヤポンプという商品があるように、それ自身がポンプとしての作用を持つことができる。歯がかみ合っている領域に適

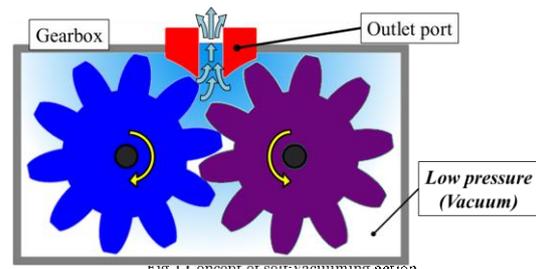


図2 歯車箱内真空化の概念

切に囲いを設ければ、歯の溝にある気体がかみ合いの際に相手の歯が侵入して排除される。これを活用すると、簡便にギヤボックスの内部の圧力を低減できるとの発想にいたった。

また、内部圧力が十分低いので、潤滑油には自ずと圧力がかかり、潤滑油も自律的に供給されるものと期待された。そこで、本研究課題では、圧力が低減できることと、潤滑が成立することの二つの観点から、実現可能性を検討することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

図3に示すように、運転する歯車自身で内部の圧力を低減できるように歯車箱を構成し、運転速度と箱内圧力の関係を計測した。その際に、損失を計測できるように、モータと歯車間にトルクメータを設置している。歯車箱の気密性を持つように、軸受け部分はメカニカルシールを用いている。被動軸の軸端は開放すなわち負荷をかけていない。空気の排出は、かみ合いが始まる領域に、両側面

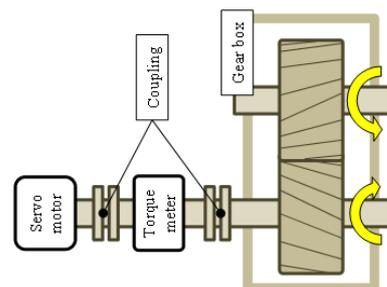
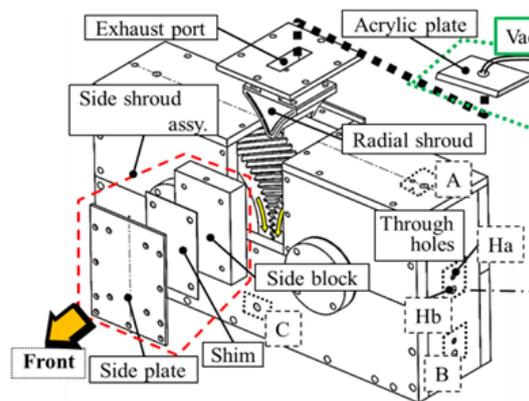


図3 試験用歯車箱概要

表 1 試験歯車主要諸元

Nomenclature	Symbol	Value
Module	m	4 mm
Number of teeth	Z	73
Helix angle	β_0	15°
Pressure angle	α	20°
Face width	B	100 mm

と外周の両方を囲うようにシュラウドと呼ぶ部材を取り付け、歯溝によりかみ合い部に運ばれた空気を外部に導くことを行っている。シュラウドと歯車の間には、隙間が設けてあり、その隙間をパラメータのひとつとして検討を行っている。

実験では、表 1 に示す諸元の歯車を用意し、歯車箱内の圧力と動力損失（損失トルク）を計測した。また、後述するように発熱が認められたため、種々の場所で温度も計測した。

回転速度をまず、4000rpm（歯車外周の速度でおよそ 65m/s）まで高め、内部の減圧状態がほぼ定常とみなせるまで運転し、そのときの諸量を計測する。その後、500rpm ずつ回転速度を下げて、同様の計測を実施する。

これらの実験は、歯車の歯面に固体潤滑皮膜を焼き付け、潤滑油を用いない乾燥状態で行った。当初はねじれ角の違いによる検討も計画したが、ねじれ角を大きくすると、ポンプの機能が低下することから、想定以上に実験の手間がかかることから、検討を加える歯車のねじれ角は 15° の一種類とした。

また、成果に述べるように、歯車単独での低圧化を行うと圧力差損失が発生して、これが風損に比べ著しく大きくなることが判明した。このため、潤滑の成立可能性の検討については、当初の計画とは別に、排気口部も減圧した状態で、密閉型の潤滑システムを構成して潤滑可能性を検討することとした。

4. 研究成果

(1) 圧力低減の効果

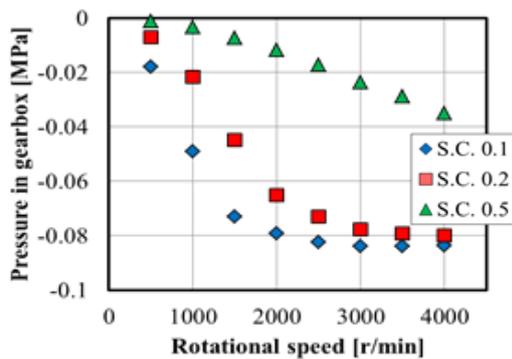


図 4 圧力低減の効果

図 4 に圧力計測結果の一例を示す。圧力低減の見地からは、前述の隙間のときに歯車箱内の圧力を 0.02MPa（ゲージ圧で標記すれば -0.08MPa）以下にすることができていることを確認した。風損は気体密度に比例するので、これにより大気圧中に比べて 80%減となり、概ね良好な値であると判断する。

図では成果の一部として、歯車の両側面をふさぐシュラウドとのすき間を変えたときの圧力低減の様子を、回転速度を横軸にして示している。外周のすき間は、0.2mm であった。すき間の大きさに依存して、圧力低減量が変化することが明らかであり、このとき、すき間は概ね 0.2mm 程度に小さい必要がある。

一方歯車外周に設けるシュラウドとの隙間は、0.5mm 程度でもよいことも明らかにした。

以上から、歯車自身のポンプ作用を具現化すれば、実用上十分な圧力低減ができることを確認した。

(2) 発熱とその損失要因

しかし、実験の最中に著しい発熱が発生して歯車が膨張し、上述のすき間が消滅して焼付きに至る事例が発生した。歯幅方向の膨張量から単純に推定すると、温度上昇は 200°C 近い（100°C、100mm で 100 μ m）ことから、温度の観察にも重点を置き、そのときの損失を把握して、損失発生の詳細を検討した。

図 5 は、温度計測結果をまとめたもので、そのときの速度推移（階段状）もプロットしてある。最も高い温度はシュラウドの先端部分であり、歯車の歯溝から吐き出された空気が、真っ先に接する部分である。種々の結果を総合して、歯車のかみ込みの領域で、歯溝の内部の空気が断熱圧縮されているために強い温度上昇が生じるものと考えた。

また、損失の観点からは、歯車箱の内圧と外圧の差を、歯のかみ合い部分が受けるために、概ね歯の面積と、回転速度に比例する、圧力差損失と呼ぶ損失が発生することを突き止めた。

図 6 は、この損失動力について、歯車箱にあけた小孔を開閉することにより、内部の圧力を調整し、また排気口を大きく開放した初期の条件（A と表示）に対して、端面側に明

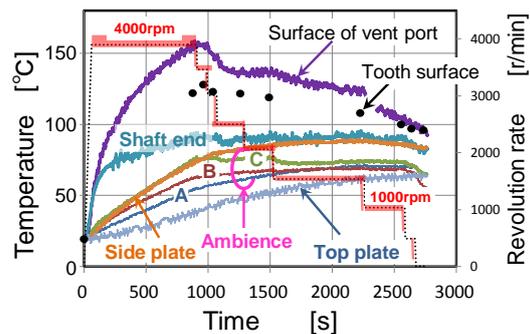


図 5 部位ごとの温度計測結果

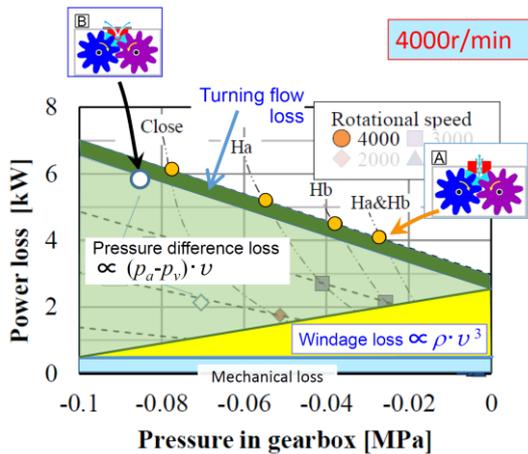


図6 箱内圧力と損失動力の類別

けた小孔を利用して排気を行った (B と表示) 場合について、整理をした結果である。このほかに、真空ポンプを用いた場合の結果などと比較して、いくつかの損失要因を類別している。下から機械損失 (Mechanical loss)、風損 (Windage loss)、圧力差損失 (Pressure difference loss)、そして旋回損失 (Turning flow loss) と色分けしている。なお図の左端は、完全真空を意味する。

機械損失は、軸受部やかみ合いにおける摩擦が主であり、圧力差によらない。風損は、気体密度に比例するため、圧力がゼロでは存在しない。圧力差損失は、内外圧力差に比例し風損とは逆の傾向をもち、どちらも直線的に変化する。そして、旋回損失は、排気口部分が大きく開放されている場合にその部分の気体 (空気) の強い運動を誘発することによって生じている。

損失の大きさは、回転速度にも依存しているが、内圧が十分に低くなると、圧力差損失が著しく大きくなり、所期の損失低減効果を得ることができないことが判明した。また、旋回損失は、排気口の位置を変えて開口を小さくすることによって、その発生を抑制することができる。このとき、排気口からの排気速度は著しく小さくなりほとんど感じないほどになることが分かった。すなわち、この流量分だけのポンプ仕事が、歯車箱を低圧に維持するために必要であり、量的には小さい。

圧力差損失の発生メカニズムを検討した結果、これは、ポンプ (歯車対) に逆らって流入する気体を、低圧部分から高圧部分へ運搬するために生じるものであるが、具体的には気体の断熱圧縮をもたらして発熱し、これが損失となっていることを確認した。

以上から、小開口の排気口を用い、この部分に小さな真空ポンプを取り付けて排気口部の減圧を図った結果、歯車箱内部の圧力と排気口部の圧力差が極めて小さくなり、圧力差損失を低減することに成功した。この排気量は、軸受などの隙間からの漏れ流入量であるので、排気能力は高い必要がないと考えら

れる。ポンプによる付加的な損失増加は小さいといえる。

(3) 潤滑方法の検討

当初は内部の負圧による吸引力が潤滑に活用できると考えていたが、吸引力を活用すると、歯車箱の内圧が高くなり、このためのポンプ仕事が必要となる。すなわち、歯車自体のポンプ作用を積極的に利用する必要が生じ、損失の観点から必ずしも適切ではないと考えた。その結果、真空下に封じられた油圧回路を構成し、潤滑の実現可能性についての検討を行った。

具体的には、歯車のかみ合い開始部分へ潤滑油をジェット供給して、その挙動を小

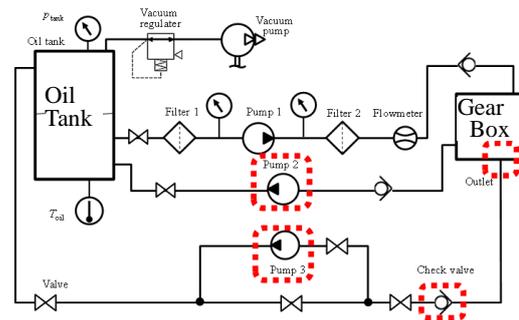


図7 潤滑油循環システム概要



図8 ジェット潤滑の可視化例

形カメラで撮影するという方法をとった。その結果の一例を図8に示す。はすば歯車を運転するとき、歯面の摩擦低減の役を担う油をかみ込み側から供給するが、高速で運転するとき、空気の存在が空気の流れの乱れを誘発し、油の注入の安定性が損なわれる。しかし図で見ると、供給された潤滑油 (ここでは、低粘度の研削液を用いた) は、特に乱れることなく歯車のかみ合っている領域へと素直に運ばれて行くことが明らかになった。

これは、箱内が十分に減圧されているから、流れが乱れにくくなるものと判断できる。また、油圧回路の損失は評価していないものの、単純に潤滑油の運搬をしているのみであるので、真空下だからと言って損失が増えることはないと考えた。

以上から、本提案手法は歯車の風損低減に有効で、かつ潤滑の問題はないと判断した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 松村茂樹, 安孫子直樹, 小板橋亮, 飯野剛, 北條 春夫, 風損低減を目的とした歯車の自己ポンプ作用の実験的評価(箱内の減圧量, 損失および発熱について), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 81, No. 825 (2015)
[DOI: 10.1299/transjsme.14-00701]

[学会発表] (計 3 件)

- ① 歯車の自己ポンプ作用による歯車箱内減圧時の損失および発熱の実験的評価, 安孫子直樹, 小板橋亮, 飯野剛, 松村茂樹, 北條春夫. 日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集 No. 14-1 (2014. 9. 8-10), S1160203 (DVD-ROM), 東京電機大学 (東京都)
- ② 風損低減を目的とした歯車箱内の自己ポンプ作用による減圧における損失の実験的評価, 北條春夫, 小板橋亮, 安孫子直樹, 飯野剛, 松村茂樹. 日本機械学会第 14 回機素潤滑設計部門講演会論文集 No. 14-6 (2014. 4. 21-22), pp. 155-156, 信州松代ロイヤルホテル (長野市)
- ③ Haruo HOUJOH, Shigeki Matsumura and Kai Feng, An Experimental assessment of lowering ambient pressure of a pair of helical gears with their self pumping action for reducing windage loss, Proc. of VDI International Conference on Gears (2013.10), VDI berichte. 2199, pp. 597-608, Technical University of Munich (Garching near Munich, Germany)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北條 春夫 (HOUJOH HARUO)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号 : 40108238