

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月15日現在

機関番号：55301

研究種目：基盤研究C（一般）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560158

研究課題名（和文） 環境負荷低減を指向した微小潤滑歯車の潤滑・冷却効果の検証

研究課題名（英文） Verification of Lubrication and Cooling Effects of MQL System for Gear Transmission

研究代表者

小西 大二郎 (KONISHI DAIJIRO)

津山工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：80186717

研究成果の概要（和文）：

本研究は動力伝達用歯車の潤滑法・設計法を工夫することで、環境汚染の原因となる歯車潤滑油及び極圧添加剤の使用量を低減させ、環境保全に寄与しようとするものである。

本研究により、①提案遠心潤滑法を適用することが、潤滑油量の低減に有効であることを明らかにした。②低すべり率に歯車を設計することで歯車運転にともなう発熱を低減できることを明らかにした。③提案遠心潤滑法と低すべり率に歯車を設計する方法とを併用することで歯車装置の環境負荷低減化が可能であることが検証された。

研究成果の概要（英文）：

From an environmental point of view, a MQL (Minimum Quantity Lubrication) method should be adopted to gear transmission systems. This study aims to find a reliable MQL method and a gear design method under high-speed driving conditions.

The conclusions we have obtained are as follows. First, the application of centrifugal lubrication method is able to pull out the full cooling performance of the lubricant. Second, the operation of gears with 30% specific sliding shows less heat generation than that of gears with 50% specific sliding. Third, combining the centrifugal lubrication method and the gears with 30% specific sliding is effective for reducing an environmental load of gear transmission systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー、冷却、歯車、温度効率、潤滑方法、環境技術

1. 研究開始当初の背景

高速・高負荷条件下で歯車装置を故障なく運転するためには、多量の潤滑油で歯車装置を冷却する必要がある、使用後の潤滑油は廃

油として処理される。しかし、これでは処理コストや環境に対しての問題が顕在化してしまう。そこで本研究は、歯車潤滑法および設計法の視点から工夫を加え、高速・高負荷

条件下で運転される歯車装置の環境負荷低減化を目指す。具体的には以下の2点を目標に研究を行う。

(1) 遠心潤滑法や噴霧潤滑法を適用することで、少ない潤滑油給油量で効果的・効率的に歯車本体温度を低下させることを目指す。

(2) 加えて、歯形形状を意図的に操ることで、極圧添加剤を含まない潤滑油使用条件下で摩擦損失動力を低減させ、耐スカuffing能力を向上させることを目指す。

2. 研究の目的

(1) 微量潤滑法による歯車冷却性能や潤滑状態を実験的に調査すること。

(2) 低すべり率歯車を設計した上で、最大すべり率を約30%と低く抑えることでの熱の発生状況やスカuffing発生状況を実験的に調査すること。

3. 研究の方法

(1) 図1に歯車冷却性能試験に用いた平歯車の概略図を示す。

歯車対を用いた負荷運転実験では歯面のかみあいによって発生する熱量は負荷荷重や運転速度以外にも歯面上の潤滑状態によって変化することになり歯車温度をもって潤滑法のもつ冷却性能の高低を評価できない。

(図1)そこでモジュール4、歯数24、歯幅20mmの平歯車単体を回転させ、熱量一定条件下で歯車を電磁誘導加熱し、潤滑による歯車冷却の効果を調査することにした。鉱油基油ISO VG10を温度 313 ± 2 K一定条件下で給油量 $Q_{oil}=150$ mL/minの割合で給油・冷却した場合の回転速度と歯車温度などの関係を遠心潤滑法、噴霧潤滑法ならびにジェット潤滑法の場合とで調べた。なお、噴霧潤滑法を用いた試験では、噴霧ノズル部で鉱油基油を圧縮空気 $Q_{air}=31$ NL/minと混合させた。また、

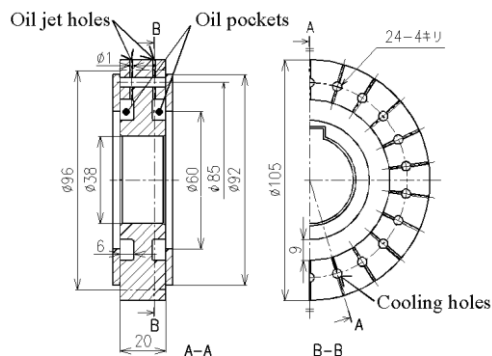


図1 試験対象歯車

ジェット潤滑法と噴霧潤滑法では歯車回転中心に向けて潤滑油を噴出させた。

各潤滑条件下での歯車冷却性能を、以下の式で示される温度効率 η と伝熱特性数(平均ヌセルト数と回転レイノルズ数との関係)により比較することで調査した。なお、回転歯車に対して集中熱容量モデルが成立するとし、平均ヌセルト数の算出をおこなった。加えて、ペルチェ素子(容量:64.8 W)を用いて歯車箱を強制的に冷却する方法が歯車温度に及ぼす影響を調査した。

$$\eta = \frac{\Delta T_{real}}{\Delta T_{ideal}} = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_m} \quad (1)$$

T_0 : 給油前の歯の定常加熱温度

T : 給油後の歯の定常温度

T_m : 給油温度

(2) 図2に負荷試験に用いた試験機の概略図を示す。

冷却性能実験の実施後に、最大すべり率が約30%になるように歯形設計し、かつ確実に歯面に潤滑油を到達させることのできる遠心潤滑法を採用することで歯車温度やスカuffing発生を抑制することができるかを評価・確認するため負荷試験を行った。

用いた試験歯車(表1, 図6参照)は歯直角方式はすば歯車で、歯先での最大すべり率がそれぞれ約30%, 50%になる歯車対を用いた。

(図2)負荷試験は、スカuffing発生の有無と歯車温度の関係を検討するため、図2に示した動力循環式歯車試験機を用いた。

負荷試験は所定の回転速度一定条件の下、歯面法線荷重を1.0 kNから0.5 kNごとに増加させるステップストレス試験とし、各荷重

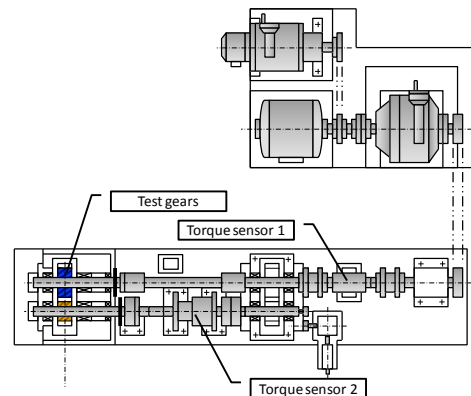


図2 動力循環式歯車試験機

段階の運転時間は 600 s とした。試料油には冷却性能実験同様、*ISO VG10* 鉱油基油を温度 $313 \pm 2\text{ K}$ 一定条件下で給油量 $Q_{oil} = 150\text{ mL/min}$ の割合で給油し、回転速度と歯車温度の関係を遠心潤滑法とジェット潤滑法の場合とで調べた。

ただし、遠心潤滑法の適用は大歯車冷却を主眼としたので、大歯車本体温度を調査対象とした。

4. 研究成果

(1) 冷却性能実験結果を図3から図5に示す。

(図3) 温度効率とは、どの運転速度においても噴霧潤滑法の場合が最も高く、以下遠心潤滑法、ジェット潤滑法を採用した場合の順であった。特に、歯車装置に一般的に採用されるジェット潤滑法では、高速運転になるほど歯車の回転に抗して潤滑油を歯元まで確実に到達させることは難しくなり、これに伴い冷却能も大きく低下することが分かった。一方、提案遠心潤滑法では歯車の歯内部に潤滑穴を半径方向に設け歯先面から潤滑油を噴出する方法であるので、かみあい直前にある相手駆動歯車の作用歯面の歯先から歯元まで噴出潤滑油を確実に到達させることができた。加えて、潤滑油が歯内部を通過するため直接歯車を冷却することができるので、比較的少ない油量で運転歯車温度の上昇を抑制できたといえる。

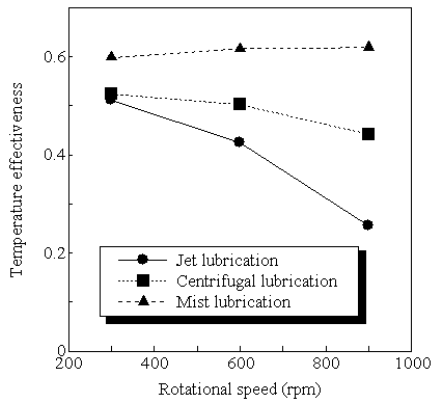


図3 回転速度による温度効率の変化

(図4) 採用する潤滑法によって回転速度が増すほど歯車温度の差が大きくなった。また、高速回転域で噴霧潤滑法の場合よりも遠心潤滑法で歯車箱内雰囲気温度の上昇を抑制している点が注目される。

ペルチェ素子により歯車箱を強制的に冷却する方法を併用しても、歯車箱内空気の熱伝導率が潤滑油のものより低いいため歯車温度・歯車箱内空気温度に及ぼす影響は小さかった。したがって、歯車箱外側にフィンを設けた設計例では歯車箱の冷却は可能であっ

ても歯車箱内に収納される歯車自身の効果的な冷却は困難であることが明らかになった。

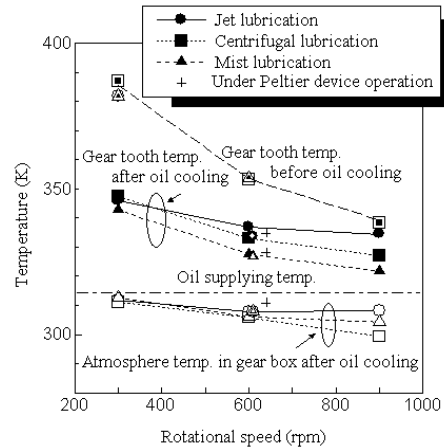


図4 回転速度による歯車温度の変化

(図5) 伝熱特性数の関係曲線において、噴霧潤滑法と遠心潤滑法の場合には回転レイノルズ数増大にともない平均ヌセルト数が単調増加したのに対して、ジェット潤滑法の場合には単調減少する傾向を示した。ジェット潤滑法を用いた場合、回転周速度を噴出潤滑油流速より高くすると伝熱挙動が変化し歯車冷却性能を極端に低減させた。遠心潤滑法の場合では伝熱挙動の変化はほとんどなかった。これらに対して噴霧潤滑法では、回転速度とともに伝熱挙動が向上し、歯車を効果的に冷却できることがわかった。

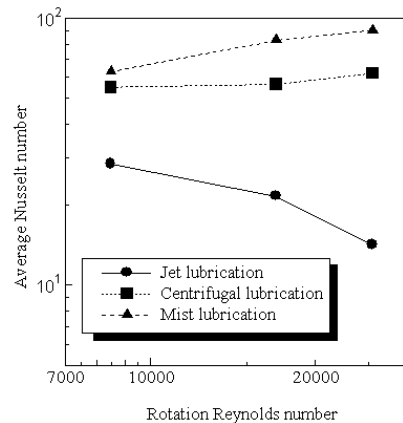


図5 平均ヌセルト数と回転レイノルズ数の関係

以上のことから、潤滑油量が極端に少ない条件下であっても遠心潤滑法と噴霧潤滑法では歯車表面の熱コンダクタンスの低下がなく、高速運転歯車の潤滑法として適していると判断された。しかし、噴霧潤滑法では、ノズルからのミスト噴出音やミスト状の噴出油による環境汚染の問題があり、噴霧潤滑

法を歯車装置に採用することは実用上好ましくないと考えられる。したがって、歯車装置の微量潤滑法として遠心潤滑法を適用することが潤滑油量の低減や耐スカuffing能向上に有効であることがいえる。

(2) 設計した試験歯車の諸元を表1に、試験歯車の写真を図6に示す。また、負荷試験により得られた歯車本体温度と歯面法線荷重との関係を図7に示す。

(表1, 図6) インボリュート転位歯車の歯車形式をはずば歯車とし、かつ歯形を低歯にすることで最大すべり率を設計目標であった30%に低く抑えることができた(表1に示した Gear pair I)。このことは特殊歯形を採用しなくて最大すべり率を低く操作できることを意味する。

表1 試験歯車の諸元

Items	Gear pair I		Gear pair II	
	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Maximum specific sliding on approach contact %	-43.73	+30.43	-96.68	+49.16
Maximum specific sliding on recess contact %	+31.85	-46.73	+50.25	-100.99
Normal module	4			
Helix angle °	19			
Number of teeth	21	24	21	24
Tip diameter mm	86.5	98.6	87.5	99.5
Face width mm	30			
Total contact ratio (transverse / over rap contact ratio)	1.102 (0.325 / 0.777)		1.360 (0.583 / 0.777)	

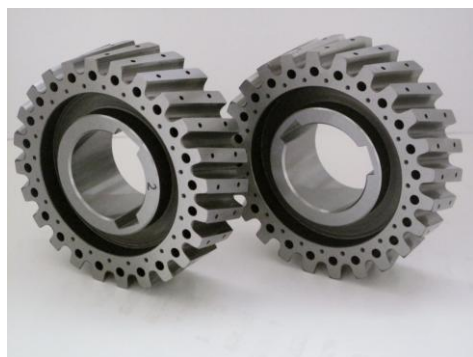


図6 試験大歯車写真

(図7) どの条件下であっても歯面法線荷重が増えるにしたがって歯車本体温度は上昇した。歯車本体温度を上昇させたのは歯車かみあいの際に歯面上で生じた摩擦損失動力によるもので、歯面上の摩擦係数が一定であれば、歯車本体温度上昇と歯面法線荷重増加の関係は比例するはずである。しかし、歯車本体温度が高くなるに従って歯面法線荷重増加割合に対して歯車本体温度上昇割合は低下している。このことは、歯車本体温度が高くなるにしたがって歯面上に酸化膜が形成され、歯面すべり運動による動摩擦係数を低下させたことである結果と推測される。加えて、ジェット潤滑法を採用した場合より

も提案遠心潤滑法を採用した場合の方が、歯車本体温度上昇割合は低く、歯面上に酸化膜がより多く形成された結果であるとも推測される。

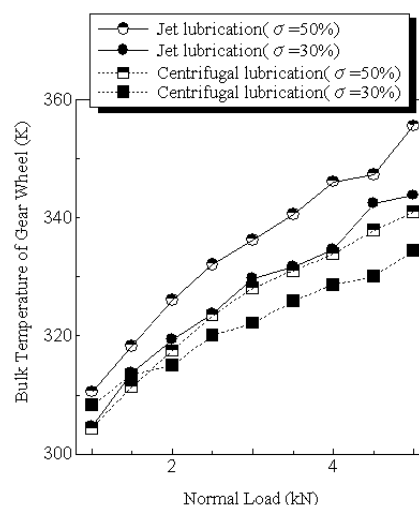


図7 歯車本体温度と歯面法線荷重との関係

以上のように給油量が極端に少ない条件下で、負荷荷重を変化させて負荷実験をおこなった結果、以下のことがわかった。遠心潤滑法を採用し低すべり率に歯車を設計すれば、歯車本体温度を大きく抑制することができる。具体的には、遠心潤滑法を採用した場合では、ジェット潤滑法を採用した場合よりも歯車本体温度および負荷増加による温度上昇割合を抑制でき、最大すべり率を約50%とした場合で最大約15°Cの歯車本体温度の低減が、最大すべり率を約30%とした場合で最大約10°Cの歯車本体温度の低減ができた。

動力伝達用歯車の潤滑に関する従来の国内外の研究をみると、地球環境保全のために歯車への潤滑油及び極圧添加剤の使用量を減少にする具体的な方法を検討した研究例はなく、本研究により地球環境保全を指向した動力伝達用歯車の潤滑法と設計法に対して指針を与えることができたといえる。

ただし、耐スカuffing能力や酸化膜生成の効果についての検証は未達成で、これらについては今後の課題とし、検証を継続したい。

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0件)

[学会発表] (計2件)

- ① Shinich MIYAWAKI, Daijiro KONISHI,
Study of Minimum Quantity Lubrication
Method for Gear Transmission System,
Japan Philippines Joint Student
Conference 2010, 2010, p.35.
- ② 小西大二郎, 環境負荷低減を指向した微少潤
滑歯車の冷却・潤滑性能、計測自動制御学会
中国支部津山地区計測制御研究会, 2012,
p.13-14.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.tsuyama-ct.ac.jp/konishi/P3.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西大二郎 (KONISHI DAIJIRO)

津山工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：80 186717

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者