

プラスチック歯車の動力伝達時 歯面温度分布の計測

西田 知照*・小林 洋一*
扇谷 保彦*

Measurement of Temperature Distributions on Plastic Gear Tooth Flanks Transmitting Power

by

Noriteru NISHIDA*, Youichi KOBAYASHI*
and Yasuhiko OUGIYA*

In regard to plastic gears which are used for power transmission, their tooth temperatures have been thought as the most important factor. Because tooth temperature have a great influence on tooth stiffness, brakage, wear, vibration and so on.

In this study, the temperature distributions on tooth flanks are measured by a radiation pyrometer. From 40 to 56 points per one tooth flank are selected as measuring points. By using the temperature data got from these measuring points, temperature distribution maps on tooth flanks are drawn. Steel drivers and plastic followers are engaged. Their pitch diameters are 135 mm and modules are 3 and 5. Under running conditions of 300 rpm to 1200 rpm and 19.6 Nm to 78.4 Nm, the following are resulted: (1) Tooth flank temperatures in module 3 are lower than that in module 5. (2) In constant-power transmission, tooth flank temperatures in a combination of high-speed and low-torque are lower than that in a combination of low-speed and high-torque.

1. 緒 言

プラスチック歯車 (MCナイロンMC-901¹⁾) を動力伝達用として、鋼歯車と組み合わせて使用し無潤滑で運転する場合、プラスチック歯の内部温度は一般に室温より20~50°C上昇する。発熱の原因としては、歯面での摩擦熱とプラスチック歯車歯面の接触部の局部変形に基づくヒステリシスロスとがある。プラスチック歯車の歯の温度上昇は歯車材の強度を低下させるばかりでなく、歯の膨張による歯形の変化や歯のたわみ量の増加を招き、静的及び動的かみあい状態に大きな影響を及ぼす。その結果、歯元部に異常摩耗が生じる²⁾。

また、歯面における摩擦係数は歯面温度によって大きく変化するとの報告もあり³⁾、この報告に従うと、歯面温度によって歯面での摩擦熱の発生量そのものが影響を受けることになる。

プラスチック歯車では、鋼歯車のように歯の折損位置が歯元隅内部であることはほとんどなく、ピッチ点近傍から歯元部の噛み合い起点(終点)の間での折損がほとんどである⁴⁾。歯の折損原因は十分には解明されていないが、歯の温度上昇に伴って生じる熱応力、歯面における接触応力、歯面摩擦に伴うせん断応力などが歯面に亀裂を発生させる原因となっていると考え

平成3年4月30日受理

*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

ることができる。何れにしても、プラスチック歯車に関しては、歯の温度が損傷（折損）の発生位置を決める重要な因子の一つであることは一般に広く認識されている。しかし、実際に運転中の歯車の歯面温度を計測するというのは簡単なことではない。

歯車の歯面温度の推定は歯の内部に埋めた熱電対による方法やサーモペイントを裏歯面や端面に塗って得た結果から作用歯面の温度を推測するなどの方法がとられてきたが、いずれも作用歯面温度そのものではない。直接運転中の作用歯面温度を計測できる赤外線映像装置もあるが、高価であるとともに、幾枚かの歯が同時に視野に入り、前後に重なって見えるため、一枚の歯の境界の確認が難しいなどの難点がある。

本報では、歯全体の温度分布を推定するための第一歩として行った放射温度計による歯面温度の計測結果について報告する。今回採用した方法は計測に長時間を要するなどの欠点はあるが、作用歯面ばかりでなく、裏歯面、端面を含め歯の表面全体の温度情報を得ることができた。この計測結果を基に、動力伝達用プラスチック歯車の歯面温度とモジュールの大小の関係、負荷条件すなわち低速・高トルク運転と高速・低トルク運転での差異、潤滑の有無の影響などについて考察を行った。

2. 放射温度計による歯面温度の計測

使用した放射温度計はミノルタ製IR-0506C（測定温度範囲 -50~600°C，測定距離 170mm，測定径 φ2mm，焦電素子）である。歯車の回転を止めずに歯面温度を測るのが理想であるが、今回は放射温度計の応答速度の制約などのため、測定ごとに歯車の回転を止めた。具体的には、歯の内部中央に埋め込んだ熱電対で、運転開始と共に常時内部温度を監視し、定常温度に達した時点（約2時間後）から歯面温度の計測に入った。歯面温度計測のたびごとに歯車の回転を約10秒間（放射温度計の位置変更，温度計測，温度データのマイクロコンピュータへの転送・処理などのため）停止した。運転再開後約3分で歯車は再び定常温度に達した。定常温度に達したことを確認後，再び運転を停止し，次の点での測定を行った。歯車の停止から温度計測までの時間的遅れ（約5秒間）による歯面温度の低下は1~2°Cであった。

歯車試験機は軸間距離135mm（固定）の動力循環式である。その概略をFig. 1に示す。負荷は試験歯車と循環歯車の間の駆動軸にねじりを与えることによってかけられる。駆動用モータはインバータ制御による可変速モータである。

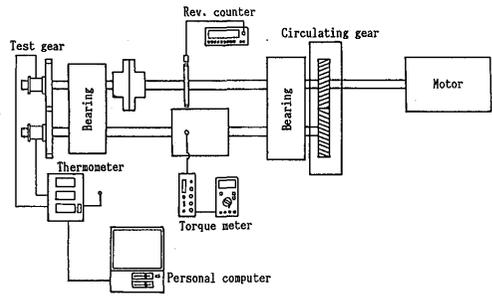


Fig. 1 Gear tester and measurement system

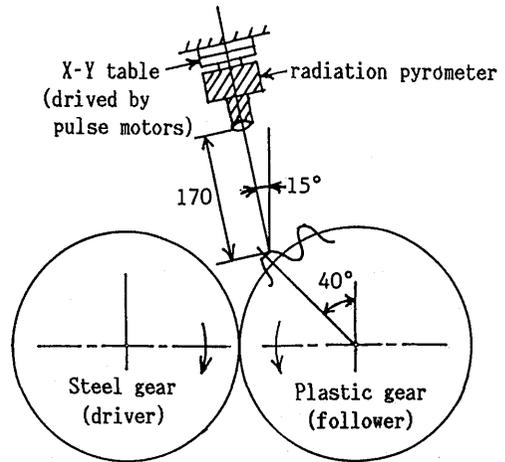


Fig. 2 Setting position of radiation pyrometer

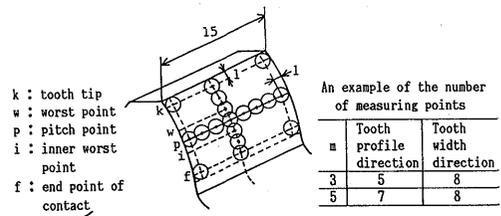


Fig. 3 An example of measuring points on gear tooth flanks

放射温度計と測定歯面との位置関係の概略をFig. 2に、測定点の位置の例をFig. 3に示す。放射温度計は小型X-Yテーブル上に固定され、このX-Yテーブルの軸はステッピングモーターで駆動される。放射温度計を位置決めするためのステッピングモーター駆動用のパルスは、Fig. 4に示されるように、マイクロコンピュータ（MZ-80B）からの出力指示信号によって入

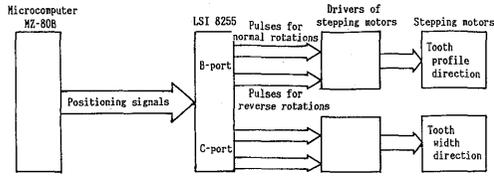


Fig. 4 Generation of pulses to drive the X-Y table on which the radiation pyrometer is mounted

Table 1 Gear specifications

	Units	Steel gear		Plastic gear		
Materials		S45C		MC-901		
Modules	m	mm	3	5	3	5
Number of teeth	Z		45	27	45	27
Pressure angle	α_c	deg	20			
Tooth width	b	mm	12	10		
Finishing	Hobbing					
Grade			JIS 4	JIS 6		
Backlash	mm		0.2	0.4		

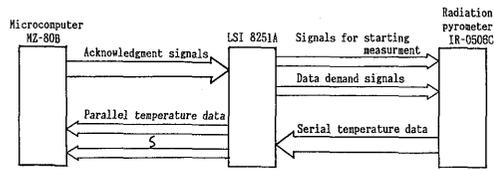


Fig. 5 Signal-flows between the radiation pyrometer and the microcomputer

Table 2 Items and conditions of experiments (Room temperature: 24°C±1°C)

Items	Conditions	Module mm	RPM rpm	Torque Nm	Remarks
Modules		3	600	19.6	Fig. 6
		5	600	19.6	Fig. 7
(Low speed)×(high torque) and		3	300	39.2	Fig. 8
		3	600	19.6	Fig. 9
(high speed)×(low torque)		5	300	78.4	Fig. 10
		5	1200	19.6	Fig. 11
Dry and wet		5	600	29.4	Fig. 12

出力LSI 8255からステッピングモーター駆動回路へ出力される。Fig. 5に示すように、マイクロコンピュータからの温度測定指示信号はシリアル・パラレル変換用LSI 8251Aを経由して放射温度計へ送られる。また、測定された歯面温度データはシリアルデータであるので、8251Aでパラレルデータに変換されてマイクロコンピュータへ渡される。

Fig. 2から分かるように、放射温度計の光軸は歯面法線方向とはずれている。これは、歯元付近を計測する際に隣の歯が放射温度計の視界を遮るのを防ぐためである。このように傾斜測定を行ってもほとんど測定値への影響はなかった。また、プラスチック材 (MC-901) の放射率は1.0とみなして測定を行った。

温度測定点 (Fig. 3に一例が示されている) 以外の点の温度は、歯面あるいは歯の端面における温度測定点間を0.1mm刻みのメッシュに分割し、分割点における温度を測定点における温度データをもとにスプライン補間によって推定した。

3. 実験

3.1 実験内容と実験条件

鋼歯車 (駆動) およびプラスチック歯車 (被動) の諸元をTable 1に、実験条件をTable 2に示す。実験は①負荷条件を一定としたときのモジュールの影響、②低速・高トルクと高速・低トルクの比較、③潤滑と無潤滑の比較の3通りについて行った。③の潤滑運転で

は、運転前にギヤオイル (出光スーパーマルチオイル 32) を歯面に刷毛塗りし、以後、温度計測終了 (馴らし運転2時間、温度計測3時間、合計5時間後) まで全く潤滑は行っていない。

3.2 実験結果

3.2.1 モジュールの影響

Fig. 6はモジュール3、回転数600rpm、負荷トルク19.6Nm、総回転数90万回転の場合の歯の表面温度分布である。モジュール5についての同一条件下での結果がFig. 7である。Fig. 6から、モジュール3での作用歯面の最高温度は39°Cで、裏歯面の対応する位置での温度は約36°Cであり、表と裏の温度差が約3°Cと少ないことが分かる。一方、Fig. 7から、モジュール5での最高温度は44°Cで、モジュール3の場合より約5°C高い。また、この点と対応する裏歯面上の点での温度は約33°Cで、表と裏の温度差が約10°Cある。これらのことから、小モジュールの方が全体として歯面温度が低く、作用歯面と裏歯面の温度差が少ないことが分かる。この理由としては、小モジュールになるほど歯面での滑り速度が小さくなり、歯面での摩擦熱が減少すること、また、歯数が多くなり、一枚の歯が荷重を受ける時間長さが短くなるので、歯面接触部における局部変形量が減少しヒステリシスロスによる発熱量が減少す

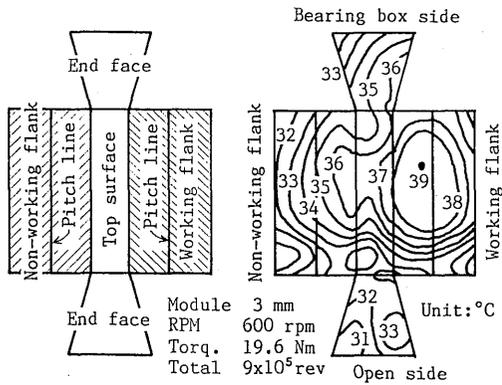


Fig. 6 Distribution of tooth surface temperatures (The influence of modules, No. 1)

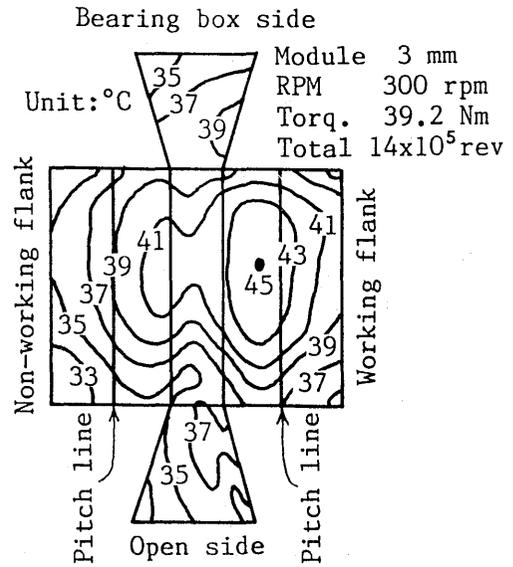


Fig. 8 Distribution of tooth surface temperatures (Transmitted power is constant, No. 1)

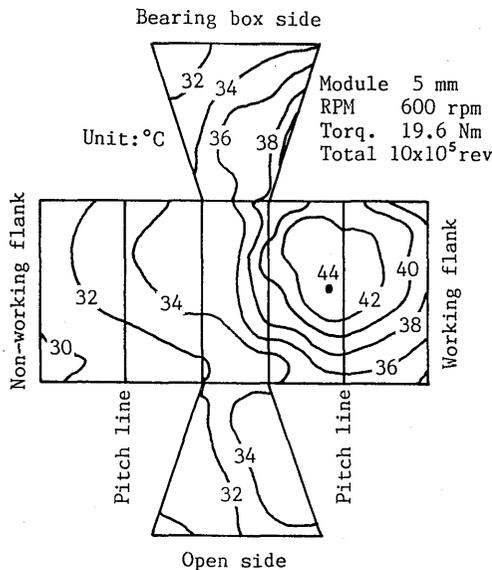


Fig. 7 Distribution of tooth surface temperatures (The influence of modules, No. 2)

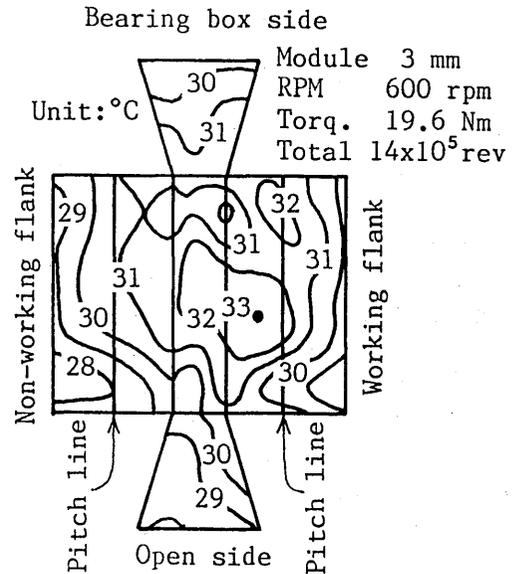


Fig. 9 Distribution of tooth surface temperatures (Transmitted power is constant, No. 2)

ること、歯厚が薄いので裏歯面からも放熱しやすいことなどが考えられる。

3. 2. 2 低速・高トルクと高速・低トルクの比較

同一モジュール間で、伝達動力を一定として比較した。Fig. 8とFig. 9はモジュール3 (300rpm×39.2Nmと600rpm×19.6Nm) の場合、Fig. 10とFig. 11はモジュール5 (300rpm×78.4Nmと1200rpm×19.6Nm) の場合である。モジュール3についてのFig. 8とFig. 9の比較から、低速・高トルクの場合の方が高速・低トルクの場合より最高温度が12°C位高いことが分かる。

モジュール5についてのFig. 10、Fig. 11からも、同様のことが分かる。この場合は、伝達動力がモジュール3の場合の2倍になっていることもあって、低速・高トルクと高速・低トルクの最高温度の差は53°Cに達している。以上から、伝達動力が一定の場合は、高速回転の方が歯面温度は低いことが分かる。

さらに、Fig. 8とFig. 11を比較する。伝達動力はFig. 11の場合はFig. 8の場合の2倍であるにもかかわらず歯面最高温度はFig. 11の場合の方が低い。すなわち、高速回転の場合は伝達動力が大きいても歯面温度はそれほど上昇しないことを示している。これらの結果から、プラスチック歯車の温度には歯車の回転数が大き

く影響していることが分かる。低速・高トルクの方が高温となるのは、低速になるほど一枚の歯が荷重を受ける時間長さが長くなり、歯面接触部におけるヒステリシスロスが増大することと、合わせて、低速になったことにより相手鋼歯車表面からの放熱量が減り、結果的に鋼歯車がプラスチック歯車を冷却する能力が減少するためと考えられる。高速回転になれば放熱は良くなると共に、歯面におけるヒステリシスロスも減少する。一方、高速回転になり、伝達動力の増加を伴う場合には歯面における摩擦熱は当然増加する。従って、発熱量が放熱量を上回れば歯車温度は上昇すると考えることができる。

3. 2. 3 潤滑と無潤滑の比較

Fig. 12は油潤滑（刷毛塗り）の場合と、無潤滑の場合の作用歯面の温度分布の比較を示している。油潤滑では、運転開始前に歯面に油を刷毛塗りしておき、潤滑、無潤滑とも2時間の馴らし運転の後、歯面温度測定を行った。無潤滑では最高温度が65°Cまで上昇しているのに対して油潤滑では52°Cと13°C低下していることが分かる。この結果は、総回転数50万回転という運転初期のものである。運転初期は歯元部の摩耗が大きく進行する時期であり、歯面温度の最高点は歯元付近に存在する。この場合の冷却効果はほとんど無く、もっぱら摩擦係数を引き下げる効果のみを持つと考えることができる。摩擦係数を下げた結果、歯面温度が大きく低下していることから、ヒステリシスロスによる発熱と共に摩擦熱による発熱がかなりの割合を占めていることが分かる。

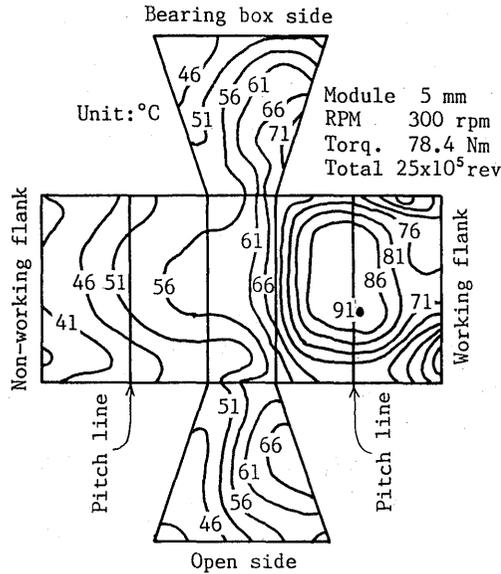


Fig. 10 Distribution of tooth surface temperatures (Transmitted power is constant, No. 3)

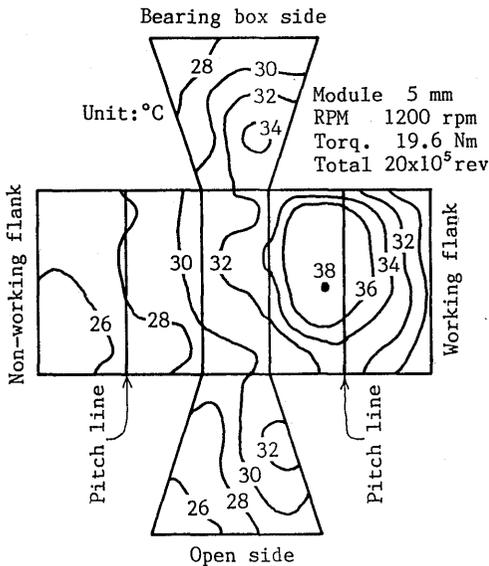


Fig. 11 Distribution of tooth surface temperatures (Transmitted power is constant, No. 4)

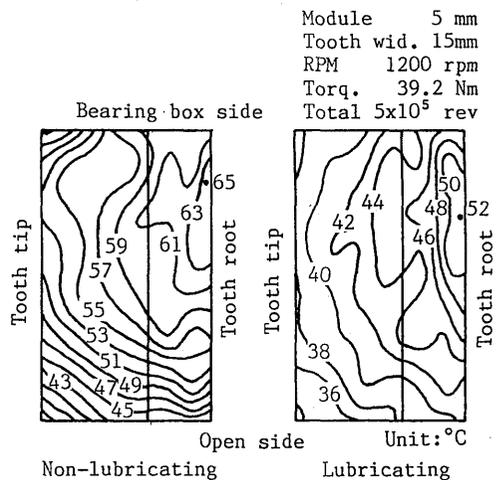


Fig. 12 Distribution of tooth surface temperatures (With and without lubrications)

以上のように、歯面における摩擦係数の把握は歯面における温度上昇原因の解明に欠かすことのできない事項であるばかりでなく、摩擦力によって歯面に生じるせん断力の推定にも不可欠であり、今後その把握が急がれる。

4. 計測の高速化について

温度計測を高速化するには歯車の回転を止めずに測定ができるようにする必要がある。今回使用した放射温度計(IR-0506C)では、焦電素子の前にチョッパを設け、光束を断続し、交流化することによってS/N比を高めている⁴⁾。このチョッパ周波数(IR-0506Cでは20Hz)を歯車の回転周波数と完全に同期させることができれば原理的には歯車の回転を止めずに測定が行えることになる。ただし、チョッパ周波数を変えると感度も変化するので、その補正回路が必要となる。現時点では、放射温度計で回転同期型のもは市販されていないようである。

5. 結 言

動力伝達時のプラスチック歯車(被動)の歯面温度分布を放射温度計で計測した。放射温度計の応答速度が約1秒と遅いため測定ごとに歯車の回転を止めたことや、測定径が $\phi 2\text{mm}$ と大きかったため測定点を多く取れなかったなど不十分な点はあったが、歯の表面温度分布を全体的にかなり正確に把握できた。

測定結果から、温度の面からは小モジュールが有利であること、伝達動力を一定とした場合には高速・低

トルクが有利であることなどが分かった。また、発熱の原因としては、モジュールが大きい場合は歯面での相対滑り速度が大きく、従って、歯面間での摩擦熱が相対的に大きいと考えられる。代わって、モジュールが小さい場合は、歯面での相対滑りは減少し、歯面の局部変形に伴うヒステリシス損失による発熱が相対的に増大すると考えることができる。

摩擦による発熱とヒステリシスロスによる発熱の割合を明らかにするには、歯車運転時の噛み合い歯面における摩擦係数の把握が必要であるが、現時点では高負荷の条件下での摩擦係数の値は明らかではない。今後、温度及び負荷と摩擦係数の関係の解明が重要となる。

最後に、プラスチック材を提供いただいた日本ポリペンコ(株)へ心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本ポリペンコ(株), 技術資料(昭60), 9.
- 2) 寺島・塚本・西田・石, 機論, 51-469, C(昭60), 2309.
- 3) 村田, 日本機械学会シンポジウム歯車および伝動機構講演論文集(平成元年11月), 9-12.
- 4) 寺島・塚本・西田, 機論, 51-465, C(昭60), 1113.
- 5) MINOLTA TECHNO REPORT No.3(1986), 9.