

動力伝達用プラスチック歯車に関する研究 (歯面温度に関する考察)

小林 洋一* ・ 西田 知照*
扇谷 保彦* ・ 塚本 尚久**

Study on plastic gears for power transmission (Examination related to tooth flank temperature)

by

Youichi KOBAYASHI*, Noriteru NISHIDA*, Yasuhiko OUGIYA*
and Naohisa TSUKAMOTO**

Until now, the decrease of mechanical strength owing to temperature rising is attached great importance as the most important factor to decide the life cycle (wear, breakage) of plastic gears for power transmission. But, there is few example that tooth flank temperature is actually measured. Also, the relation between tooth flank temperature and tooth damage is not examined enough. In this report, tooth flank temperature of plastic gears is measured in detail by using a radiation pyrometer and the results are obtained as follows:

1. When module is large, average temperature of working flank is high and that the difference of maximum and minimum temperature is large.
2. Pitch point does not always take maximum temperature, there are some cases in which tooth flank temperature is influenced by the interference by teeth of steel gears.
3. Cooling effect of teeth by rotation is affected by gear operating position (driver or follower) and combination of gear materials.
4. It is very effective for preventing temperature rising to cool forcibly the tooth of plastic gears. So, if forced cooling is applied, extension of life cycle can be expected.
5. Breakage point of plastic gear teeth does not always coincide with maximum temperature point.

1. 緒 言

プラスチック歯車の持つ大きな特徴として、無潤滑運転が可能であることはよく知られている。このことは非常に大きな利点である反面、冷却効果無くすことにより歯面の温度上昇を引き起こすことになっていることもまた事実である。プラスチックの強度はその温度に大きく依存しており、一つのかみあい歯面の中

であっても各ポイントの温度上昇幅に応じて強度もかなり違ってくる。このことが鋼歯車の場合と違い、プラスチック歯車の損傷機構を解明する上で歯面の温度上昇あるいは温度分布を把握することが欠かせない理由である。実際に、熱電対・サーモペイントなどによって歯の内部、あるいは端面部の温度を計測した例もいくつか報告されている。しかしながら、亀裂の発生が

平成3年4月30日受理

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

**千葉工大 (Chiba Institute of Technology)

歯のかみあい歯面上ごく表面（もしくは表面）から起こることを考えると、やはり、このかみあい歯面上での温度上昇幅、温度分布の傾向を正確につかむことがまず第一に必要となり、このかみあい歯面温度の様子が得られて初めてプラスチック歯車の寿命に及ぼす歯面温度の影響が議論できることになる。

今回、赤外線放射温度計を利用した歯面温度計測装置を考案し、いくつかの運転条件のもとにプラスチック歯車の歯面温度実測を行ったので、これを基にプラスチック歯車での亀裂発生・折損機構に及ぼす歯面温度の影響、さらには歯面温度上昇、歯面温度分布自体についていくつかの検討を加えるものである。

2. 実験装置及び方法

2.1 歯車試験機及び温度計測装置

歯車試験機は動力循環式とし、試験歯車にはピッチ円上、歯幅歯厚中央付近に熱電対（銅-コンスタンタン）を埋め込み、内部温度をスリップリングを介して1分おきに計測した。また、この内部温度計測と同時に室内温度の計測も行っており、これらのデータはすべてパソコンに取り込み温度データの時間的変化をディスプレイ上に表示するようにしてプラスチック、鋼歯車の内部温度変化また、定常温になるまでの時間などの確認に利用している。なお、室内温度は歯面温度に大きく影響するので常に $24 \pm 1^\circ\text{C}$ に保って実験を行っている。

2.2 実験条件

Table 1に本研究で用いたプラスチック歯車および鋼歯車の仕様を、Table 2には実験条件を示す。本報ではすべてトルク39.2 Nm、回転数1200rpm、歯数比1:1の組み合わせとし、主に

- a) モジュールの違い ($m = 5$ と 3)
- b) プラスチック歯車運転位置の違い (駆動と従動)
- c) 組み合わせの違い (鋼とプラスチック、プラス

Table 1 Specification of plastic and steel gears

	plastic		steel	
module	5	3	5	3
number of teeth	27	45	27	45
face width	15		17	
standard pressure angle	20°			
material	MC901		S45C	
teeth finishing	hobbing			
accuracy	JIS6		JIS4	

チックとプラスチック)

に主眼を置きながら、 5×10^5 rev/運転毎に歯面温度および歯形の計測を行った。

2.3 歯面温度計測

2.2で述べたように、各実験条件とも 5×10^5 rev毎に歯面温度の計測を行ったわけであるが、ここで言う 5×10^5 rev毎とは、歯面温度計測終了時点で 5×10^5 revの運転を達成し、その都度試験機から歯車を取り外し歯形測定を行ない、再び 5×10^5 rev運転するといったことの繰り返して、いわゆる間欠運転にて積算回転数を増やしていつている。また、今回用いたプラスチック歯車はモジュール $m = 5$ と 3 の2種類であるが、それぞれについて、歯すじ方向には共に8点、歯形方向には $m = 5$ が7点、 $m = 3$ が5点、従ってかみあい歯面上において $m = 5$ で56点 (8×7)、 $m = 3$ で40点 (8×5) の計測を行った。Fig.1にそれぞれのモ

Table 2 Experiment condition

	module	driver side	follower side	torque	number of rotations
1	5	S	P	39.2Nm	1200rpm
2	5	P	S		
3	3	S	P		
4	3	P	S		
5	5	P	P		
6	3	P	P		
* 7	5	P	P		
* 8	3	P	P		

(* shows enforced cooling experiment, S: steel P: plastic)

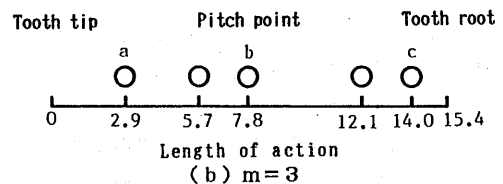
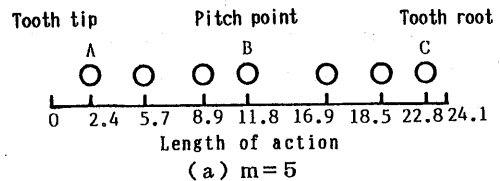


Fig.1 Measuring points of tooth flank temperature

ジュールにおける歯形方向測定点を示す。なお、歯面温度を計測する段階においては歯面温度が定常温になっておく必要があるが、その判断は内部温度の定常状態を見て行っており、おおむね、2～3時間の運転で十分定常状態に達するのが確認できた。

3. 実験結果と考察

3. 1 歯面温度分布の傾向

かみあい歯面上における発生熱としては

- a) 歯面のすべりによる摩擦熱
- b) プラスチックが粘弾性材料であるためのヒステリシス損失に基づく発熱

の2つがあり、歯面温度上昇はこの両者の発熱量の和で与えられる。ピッチ点近傍はすべりが小さく(ピッチ点で0)摩擦による発熱は少ないが、全荷重を1枚の歯で受け持つことによってヒステリシスによる発熱が非常に大となり、結局このピッチ点近傍が最高温度になるといわれている。そこで、Table 2の実験条件で

得られた歯面温度分布より、このような考え方の確認も含めプラスチック歯車の歯面温度の様子について検討を行う。Fig. 2に鋼とプラスチックの組み合わせ、Fig. 3にプラスチックどうしの組み合わせでの歯面温度分布を示す。但し、歯面温度が常にこのような温度を取り続けるかというとはそうではなく、特に鋼とプラスチックの組み合わせの場合、積算運転回転数が進むに連れて歯面温度も変化していく傾向がみられた。あわせてFig. 4に代表点として歯幅中央における歯先、ピッチ点、歯元 (Fig. 1においてm=5ではA, B, C, m=3ではa, b, c,)の3点での温度変化の様子を示す。

3. 1. 1 モジュールの違いによる歯面温度

Fig. 2, Fig. 3において、鋼とプラスチックまたプラスチックどうし、いずれの場合においてもモジュールm=3の方が低い温度となっている。また、かみあい歯面全体での温度幅もm=3の方が小さい。これはもちろん、m=3の方がすべり速度が小さいこと、かみあ

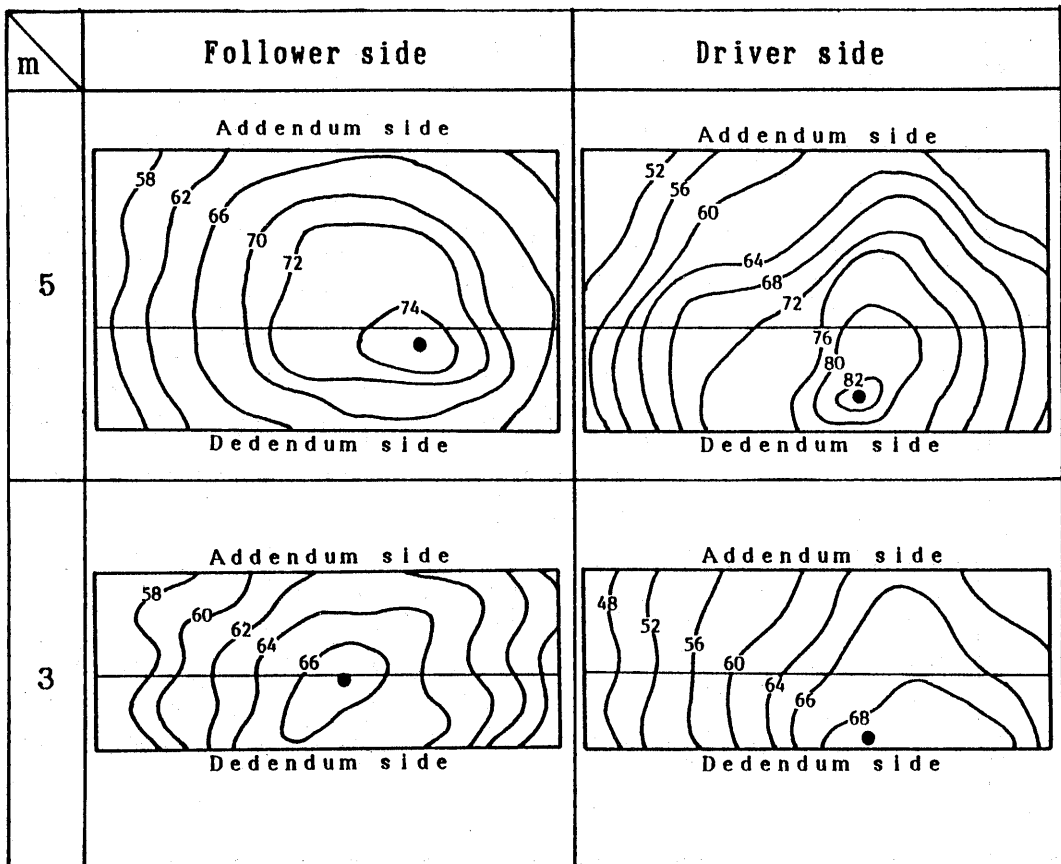


Fig. 2 Tooth flank temperature distribution of plastic gears (Contact of plastic gear and steel gear)

い歯面が狭いため全体がある温度に均され易いためであると考え。但し、最高温度の位置、温度分布そのものの傾向としては従動、駆動それぞれにおいてモジュールが変わっても同様で、 $m=3$ のピッチ線を $m=5$ のそれに合わせるようにしてみると温度分布が似通っているのが分かる。

3. 1. 2 駆動・従動の違いによる歯面温度

Fig. 2, Fig. 3においてピッチ点近傍の温度が非常に高温になることが確認できる。しかし、必ずしもこのピッチ点近傍がかみあい歯面上最高温度になるとは限らず、プラスチックと鋼の組み合わせにおいて $m=5$, $m=3$ とも駆動側では明らかにピッチ点よりも歯元側の温度の方が高くなっている。さらに、Fig. 4をみると、積算回転数の増加につれて最高温度の位置も変わってくるのがわかる。 $m=5$ ・従動側の場合、運転初期は歯元側、以降ピッチ点近傍が最高温となり、駆動側における $m=5$, $m=3$, 両モジュールでは運転がかなり進んだ時期で歯元側からピッチ点近傍へと最高

温度の位置が移動する。これは、プラスチック歯の大きなたわみによって両歯車の相対的な回転角に遅れが生じ、鋼歯車歯先がプラスチック歯車の歯元に喰い込むようにかみあうこと、およびそれに伴うプラスチック歯車歯元側の摩耗によるものと考えられる。つまり、このような現象は正規の(理論的な)かみあい以外にプラスチック歯車の歯元で生じる余分なかみあい(干渉)であるから当然この余分なかみあいの分だけ発熱量が歯元側にプラスされ歯面温度が上昇するものと考えられる。しかし干渉による発熱がいつまでも大きいかというとはそうではなく、鋼歯車歯先が干渉しようとする現象は常にあるものの、それまでの干渉によって生じた著しい摩耗のため接触が緩和され発熱量そのものも減少する。Fig. 5に、プラスチックと鋼の組み合わせの運転において、ある程度定常状態に落ち着いたときの歯形曲線を示す。これからわかるように、プラスチック歯車を駆動側に用いた方が歯元側の摩耗が大きい。ここで、一個の歯車においては、すべての歯がほ

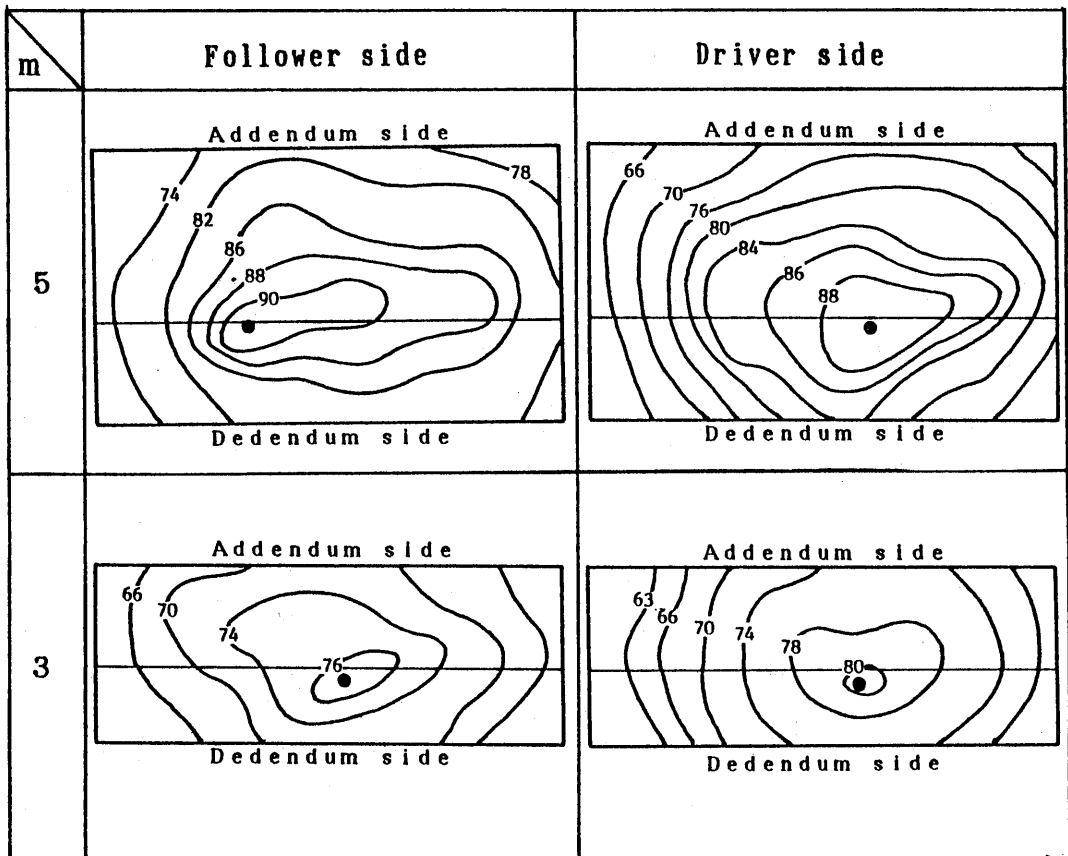


Fig. 3 Tooth flank temperature distribution of plastic gears (Contact of plastic gear and plastic gear)

は同様な摩耗形態を取ると考えられる。従って、Fig. 5の駆動側のように歯元部とそこから1法線ピッチ離れた点との摩擦量の差 ϵ が大きいと正規のかみあい時における歯元部の荷重分担率そのものも減少し、このことでも歯元側の発熱量は減少する。以上述べたような事から、Fig. 4において駆動側では当初歯元側が最高温となり、この歯元の摩擦がある程度進行してきた時ピッチ点近傍が最高温になってくること、従動側では駆動側ほど干渉が大きくないため運転当初は歯元側が

最高温になることはあってもおおむねはピッチ点近傍が最高温になるものと考えられる。

3. 1. 3 プラスチックどうし組み合わせた時の歯面温度

従来よりプラスチックどうしの場合は鋼との組み合わせの時より歯面温度が上がると言われている。確かにFig. 3から、プラスチックと鋼の組み合わせのときよりも10~15°C程度高い歯面温度となっているのが確認できる。また、かみあい歯面上での発生熱は両歯車

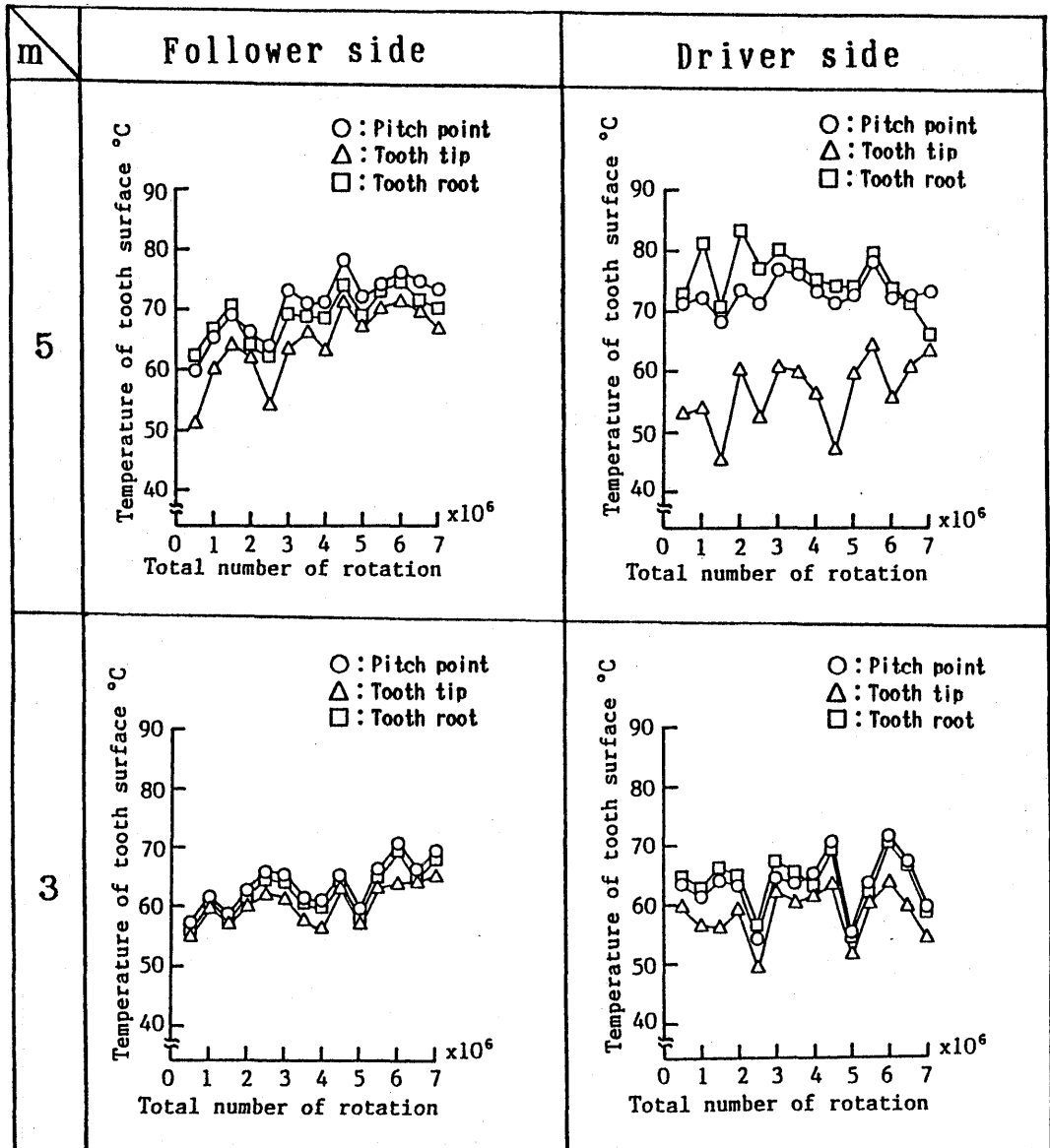


Fig. 4 Change of tooth flank temperature following operation (Contact of plastic gear and steel gear)

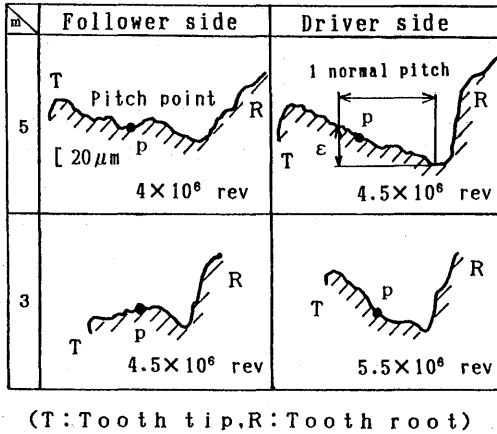


Fig. 5 Wear form of plastic gears

がまったく同じ材質の物であるから、駆動、従動両者にはほぼ等しく配分されるはずである。従って、前述した干渉による発熱が大きい駆動側の方が高温になり、特に $m=5$ の時それが顕著に現れることが予想される。ところがFig. 3をみると $m=3$ の場合はそうであるが、 $m=5$ の場合逆に駆動側の方が低い温度となっている。このことから、駆動側ではかみあい歯面がいわゆる風を切る面となり熱伝達率が従動側かみあい歯面のそれよりも高く、モジュールの大きい方がその冷却効果も大きかったものと思われる。この点で鋼とプラスチックの組み合わせをみている。この場合はプラスチックどうしの組み合わせの時とは逆に、熱伝導性の良い鋼歯車のかみあい歯面を冷却させた方が相手プラスチック歯車への熱の流入を抑える意味で有効であることが確認できる。

3. 2 プラスチック歯車の損傷時期と歯面温度

Fig. 2から、鋼とプラスチックの組み合わせの場合プラスチックを駆動側に用いた方が歯面温度が高いことが分かったが、亀裂の発生時期が早かったのは逆に温度の低い従動側であった。同様に、プラスチックどうしの組み合わせの場合も、駆動、従動で若干の温度差があるがほぼ似たような温度、温度分布にもかかわらず、先に亀裂が発生したのは駆動側で従動側とは明らかな差があった。(従動側は、相手駆動側が折損した後も新しい歯車と組み合わせて運転を続け、その差が確認できた。)このように、歯面温度の高低のみでプラスチック歯車の損傷時期を比較予想することはできないことが分かる。但し、このことは、歯面温度自体がプラスチック歯車の耐久性を決める第1のパラメータ

とはなり得ないというだけのことで、歯車温度が高くなればそれだけ機械的強度が低下するのは事実であり、実際にプラスチックどうしの組合せにおいて先に亀裂の入った駆動側の歯面を強制的に冷却(冷却しない時に比べて30~40°C程度歯面温度を低下させた)しながら実験を行ったら非常に耐久性を増すことができ、この場合、鋼とプラスチックの組み合わせの場合の亀裂発生時期を過ぎてもお損傷無しで運転できた。

3. 3 プラスチック歯車の損傷位置と歯面温度

本研究で行った実験および別のいくつかの実験においても若干の位置の違いはあるものの、その損傷位置としてはFig. 6に示すように駆動側の場合ピッチ点近傍、従動側の場合かみあい終わり近傍という歴然とした差がみられた。これを先の温度分布と共に考えると、必ずしも歯面温度の一番高い位置で亀裂が発生して折損に至るといえることは言えないことが分かる。従来より、プラスチック歯車の耐久性あるいは、折損位置を決めるのは歯の温度であると定性的な理由付けがなされてきたが、その考えは当てはまらないことが本報の実験で明らかになった。

4. プラスチック歯車の損傷機構の考え方

鋼歯車の折損理由には、歯元隅内部における応力集中、あるいは、歯面でのピッチングが進展してピッチ点近傍で折損することなどが上げられる。これに対してプラスチック歯車では、3. 3節でも述べたように、駆動側に使用するかあるいは従動側に使用するかで折損位置が異なり、ピッチ点近傍で折損することもプラスチック歯車ではピッチングという現象が現れないことから鋼歯車での折損理由をそのままプラスチック歯車に適用することは出来ない。プラスチック歯車の場

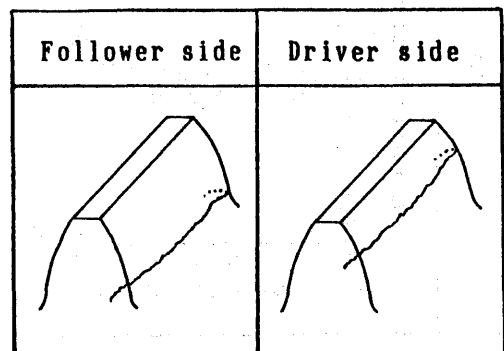


Fig. 6 Breakage point of plastic gears

合、かみあい歯面の範囲の中でかならず亀裂が発生しており、このことはかみあい点に発生する接触応力の取り扱いを十分に吟味する必要性を意味している。

ここで、亀裂の発生から折損に至る段階は次の3段階に分類して考えることができる。

- 1) かみあい歯面上に欠陥部を発生させる。
- 2) かみあい表面から歯の内部のごく表面近傍の範囲で欠陥部を広げる。
- 3) 折損まで進展させる。

亀裂の発生から折損までの間隔が長い場合 ($m=5$ に多く見られる) と短い場合 ($m=3$ に多く見られる) とがあることは3)の段階で曲げ応力の大きさによって比較的容易に説明できる。しかし、プラスチック歯車の寿命を左右しているのは1)の段階に集約され、亀裂の発生位置は第一義的には、1)の段階における接触応力と材料の強度で決まる。つまり、かみあい点における接触応力とそこでの歯面温度に対応する材料の強さの比で定まると考えられる。

いままで簡単のために接触応力という表現を使ってきたが、これは勿論ヘルツの接触理論によって求まる応力 (この値もプラスチックと鋼の組み合わせの時は直接使えるものではない) に加え、歯車の歯面は必ずすべり状態であることから、このすべりに伴う歯表面のせん断力まで合わせた状態での最大応力の事を表している。鋼歯車運転の場合は油潤滑が必須であるから比較的このせん断力は無視できるかも知れないが、プラスチック歯車の運転では無潤滑運転ということからかみあい点での摩擦係数は大きなものとなり、この時のせん断力は無視できる大きさのものではない。さらに、これら応力発生の源である歯面動荷重がどの様に作用しているかは非常に重要である。プラスチック歯のかみあい歯面とは反対の面に歪ゲージを貼って実測した歯元歪の変化を見ると、歯面動荷重として理論的 (静的) 荷重を用いるのは無理で、モジュール・回転数・プラスチック歯車の使用位置 (駆動、従動)・運転に伴う歯形の変化等により動荷重の大きさ、あるいは動荷重の変化が著しく違うことが分かった。本報では詳しく述べなかったが、実際の動荷重を基に、せん断力を考慮しながら最大応力発生点を求めていくと、せん断力の大きさ、言い替えると摩擦係数の与え方によっては、ピッチ点近傍よりむしろ歯元側での応力が大きくなることもあり、実験で得られた亀裂発生の位置を説明出来る可能性が得られた。

以上述べたように、亀裂の発生位置、耐久性に関しては、動荷重の大きさ、摩擦係数の大きさ、それと歯面温度に対応する材料の強さが重要で、特に摩擦係数

の大きさは、最大応力値、最大応力発生点に非常に大きく影響するため是非明確にしたい項目である。現在二円筒試験機を用いて、ころがりすべり時におけるプラスチックの動的挙動の実験を行っており、この実験より摩擦係数を含めた新しい知見が得られるものと考えている。

5. 結 言

- 1) モジュールの大きい方が歯面温度が高くなり、かみあい歯面全体での温度分布の幅も大きくなる。
- 2) 歯面上で最高温度となる位置はかならずしもピッチ点とは限らず、鋼歯車歯先稜での干渉による発熱また摩擦が非常に大きく影響し、歯元が高くなる場合、さらには歯元からピッチ点へ最高温度の位置が移行する場合がある。
- 3) 鋼とプラスチックの組み合わせではプラスチックを駆動側に用いた方が、また、プラスチックとしては従動側の方が歯面温度が高くなり、モジュールが大きいほどその傾向が強くなる。
- 4) プラスチック歯車を冷却させながら運転することは非常に有効で、通常は折損の時期が早いプラスチックどうしの組み合わせであっても歯面温度を低下させることによって鋼とプラスチックの組み合わせの時以上に耐久性を増すことができる。
- 5) 亀裂発生の時期、亀裂発生の位置を歯面温度の高低のみから予測することはできず、実際の動荷重下での接触応力およびせん断力を考える必要があり、特に、摩擦係数を含めたプラスチックのころがりすべり特性を明確にすることが早急である。