

シェービング歯面傷ゼロへの取り組み

A PM Analysis of Scars in Gear Shaving

森 一明 Kazuaki Mori

●MC事業部 浜北工場

要旨

モーターサイクルは、小型で燃料消費も少なく、環境にやさしい商品である。一方で、エンジンは自動車のように車体におおわれることがないため、駆動系から発生する音質は重要な品質となる。良好な音質を保つため、当社では、エンジンの高速回転ギヤの大半をシェービング加工して精度を確保している。しかし、シェービング工程では「歯面傷」が発生する場合があります。20年来の課題であった。

この「歯面傷」の発生原因の分析のためPM分析を用い、この現象が、(1)加工点に侵入する異物と、(2)噛合い圧力角との相互作用によることを明らかにした。現在、バリ取り装置の改良、加工油の浄化、洗浄機の改造、カッタ諸元の改良などにより、「歯面傷」不良発生ゼロを継続中である。さらに1再研当たりの刃具寿命が約10倍にアップした。また加工油と洗浄液の寿命がアップしたことにより、年間ドラム缶310本分の産業廃棄物を削減できた。

1 はじめに

モーターサイクルは、小型で燃料消費も少なく、環境にやさしい商品である。一方で、エンジンは自動車のように車体におおわれることがないため、駆動系から発生する音質は重要な品質となる。

良好な音質を保つため、ヤマハ発動機（以下、当社という）では、エンジン内の1次減速、バランスギヤなどの高速回転ギヤの大半をシェービング加工して精度を確保している。しかし、シェービング工程では「歯面傷」が発生する場合があります。これを無くすることが20年来の課題であった。

今回、PM分析によってこの課題を解決したので報告する

2 シェービング加工の概要と「歯面傷」

シェービング加工は、ホブ盤やギヤシェーパーで歯切りを行った後の仕上げ工程として使われる。1926年にアメリカのナショナルブローチ社で開発され、丸形のシェービングカッタとワークである

歯車を噛合わせて回転させることにより歯面を仕上げる加工法である。このとき、カッタ軸とワーク軸を交差させ、両者の軸を互いに自由に回転させることが特徴である（図1）。

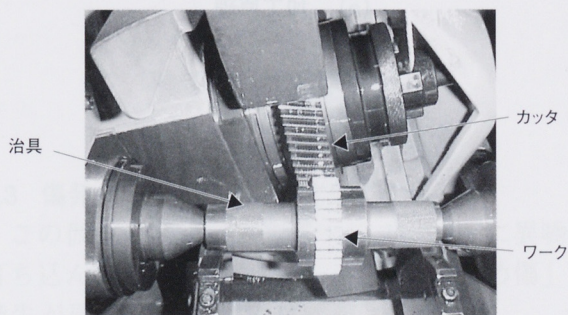


図1 シェービング加工の特徴

シェービング加工に使用されるカッタの歯面には、歯形方向に多数の溝（セレーション）が設けられている。そして、カッタとワークに交差角を与えて噛合わせ、歯面に圧力を加えながら回転させる。すると、歯形方向と歯筋方向に相対滑りが発生し、セレーションのエッジが切れ刃となってワークの歯面が剃るように削り取られる（図2）^{(1),(2)}。

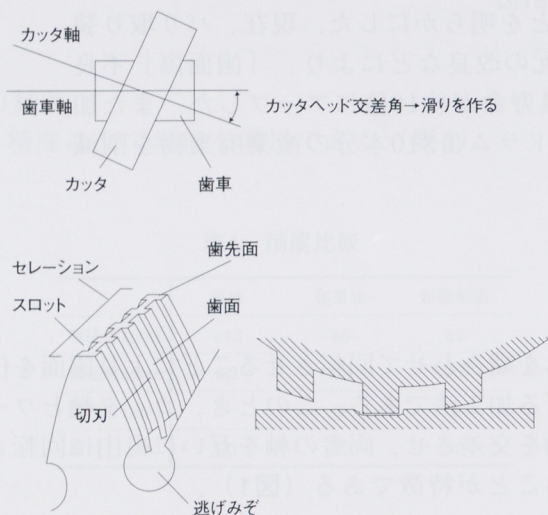
シェービング加工には、カッタとワークの相対的な送り方向によっていくつかの方法がある。当社では、その内コンベンショナルとプランジカットを採用している（図3）。

コンベンショナルはワークを軸方向に動かしながらカッタを半径方向に切り込むため加工圧力が少ないので、幅の広い歯車やたわみやすい軸物歯車に適する。欠点は加工時間が長いことである。

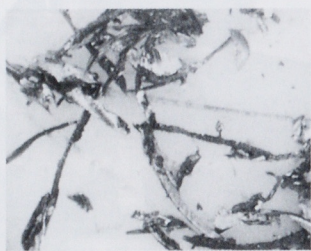
プランジカットはワークを軸方向送りせず、カッタを半径方向のみに切り込む方法で、ドイツの

カールフルト社によって開発された。加工時間が短いと量産に広く使われている。プランジカットでは、加工圧力が高いため剛性の低いワークでは歯形精度が出にくい欠点がある^{(1),(2),(3)}。

「歯面傷」とは、目視で判別できる傷が付く現象で、当社のプランジカットによる不良の70%を占めていた。一方コンベンショナルでは、この不良が無く、プランジカット特有の現象と言える（図4、図5、図6）。



(a) 加工原理



(b) 切屑

図2 シェービング加工の原理^{(1),(2)}

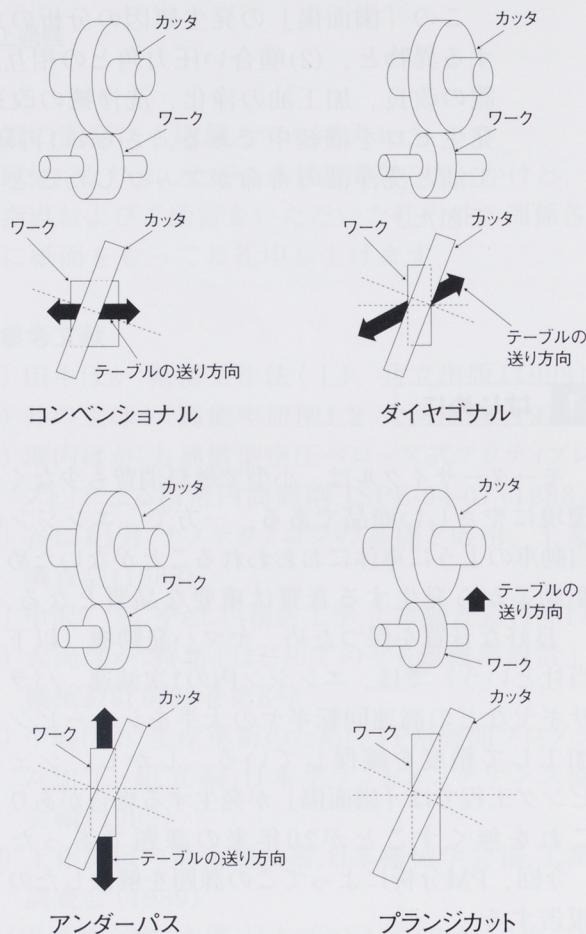


図3 シェービング加工の方法⁽¹⁾

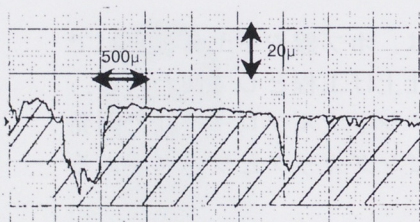
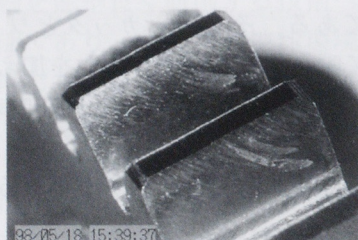


図4 歯面傷不良

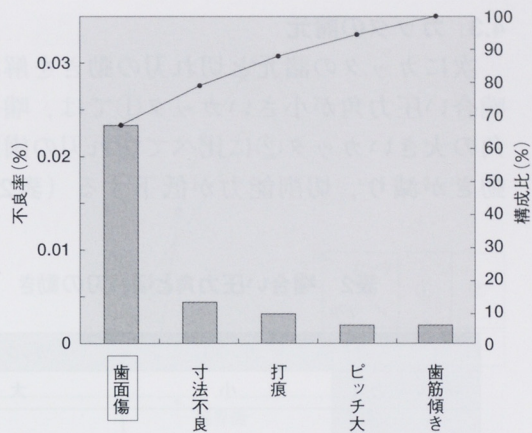


図5 プランジカット加工の不良

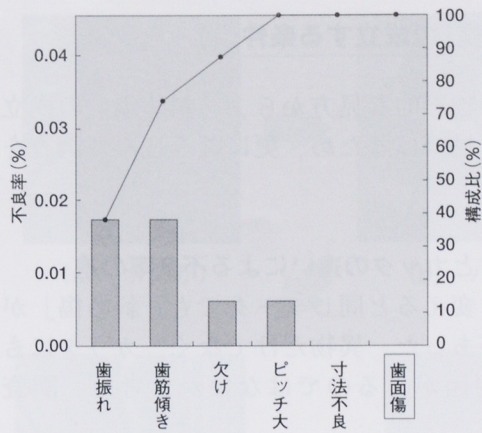


図6 コンベンショナル加工の不良

3 「歯面傷」の物理的解析

「歯面傷」を対象として加工点に着目し、現象を物理的に解析することにした。

3.1 傷の特徴の観察

「歯面傷」を観察し、形状を5つのタイプに分類した（図7）。

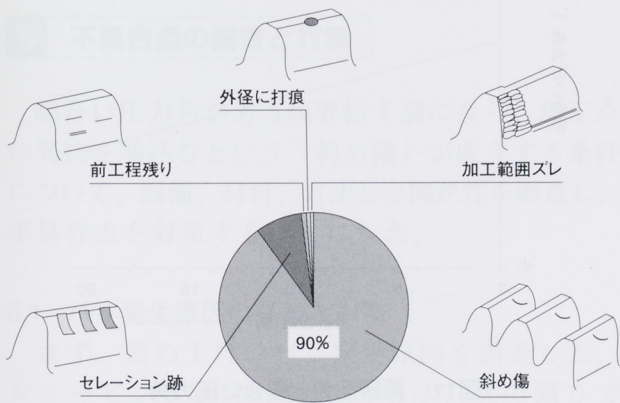


図7 歯面傷不良の分類

ここで9割を占める「斜め傷」とは、三日月状の傷がシェーピングの加工目に沿って、ほぼ全歯面の同じ位置につく不良のことであり、PM分析の対象をこれに絞った。

3.2 傷発生の物理的な見方

「斜め傷」発生の原因は、加工点である切れ刃先端に付着した異物がカッタと一緒にワーク歯面上を移動し、傷を付けることではないかと予想した（図8）。

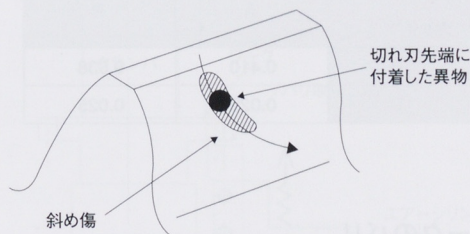


図8 傷発生の物理的な見方

3.3 傷発生の再現テスト

この仮定に基づき、カッタのスロットに異物を打ち込んで加工したところ、類似の「斜め傷」の発生が確認できた（図9）。

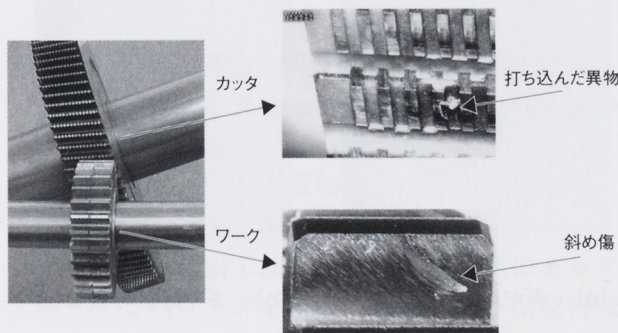


図9 「斜め傷」発生再現テスト

4 「歯面傷」の成立する条件

傷発生の物理的な見方から、「斜め傷」の成立する条件を見つけるため、更に踏み込んだ調査を行った。

4.1 ワークとカッタの違いによる不良率の差

カッタを変えると同じワークでも「斜め傷」が減る場合があった。異物だけでなく、カッタにも何らかの要因があるのではないかと考え、調査した。

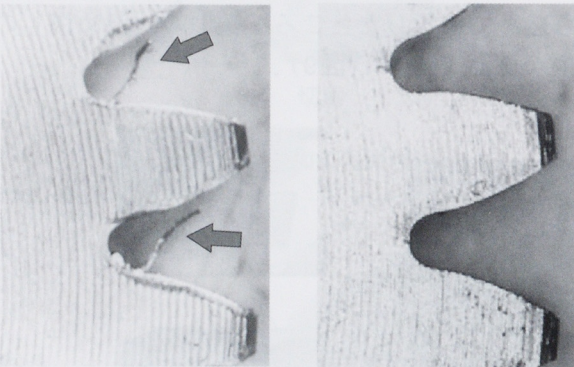
調査は同一歯形諸元で歯幅が異なるギヤAとギヤB、噛合い圧力角の異なるカッタ①とカッタ②の組み合わせで行い、その結果、組み合わせにより不良率が極端に変わることが判った（表1）。

表1 ギヤとカッタの組み合わせによる不良率

単位(%)		
ギヤ カッタ	A	B
①	0.410	0.038
②	0.029	0.025

4.2 ワークのバリ

そこでワークを拡大し観察したところ、ギヤAには2次バリが見られるが、ギヤBにはバリ残りが確認された（図10）。



(a) ギヤA(2次バリあり) (b) ギヤB(バリ残なし)

図10 ワークのバリ

4.3 カッタの諸元

次にカッタの諸元と切れ刃の動きを解析した。噛合い圧力角が小さいカッタ①では、噛合い圧力角の大きいカッタ②に比べて切れ刃の歯筋方向の動きが減り、切削能力が低下する（表2）。

表2 噛合い圧力角と切れ刃の動き

	カッタ①	カッタ②
噛合い圧力角	小	大
ワーク歯面上の 切れ刃の動き		

この噛合い圧力角は、再研が進むに連れて小さくなる（図11）。

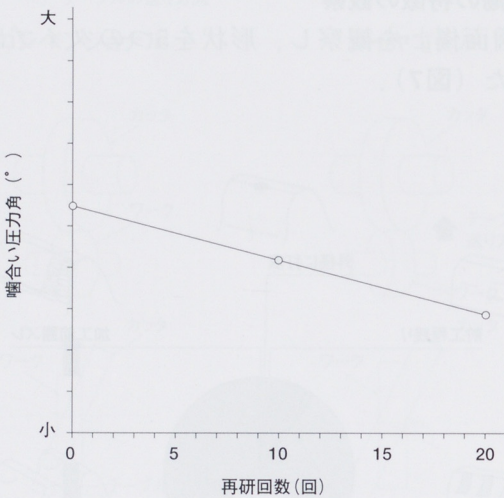


図11 再研回数と噛合い圧力角

そこで再研回数ごとに、噛合い圧力角と「斜め傷」の関係を見た。これから噛合い圧力角がある値を割ると急激に「斜め傷」が発生しやすくなることが判った。以後この値を境界値と呼ぶ（図12）。

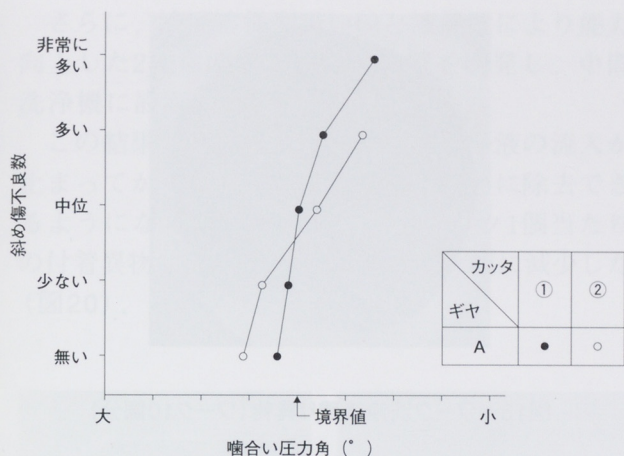


図12 再研にともなう噛合い圧力角と、斜め傷不良の変化

4.4 発生原因とメカニズムのまとめ

以上の調査から、カッタとワークの噛合い圧力角が小さくなると、切削能力が低下してくる。さらにある境界値未満になると、異物が切れ刃に圧着または溶着されやすくなり、「斜め傷」が発生することが判った。

5 不具合点の調査と対策

噛合い圧力角がある境界値未満になり、加工点に異物を噛込むという「斜め傷」が成立する条件について、設備、材料、方法との関連性を調査し、不具合点を対策することにした。

5.1 バリ発生原因の調査と対策

まず、前の工程のバリ発生原因を調査した。シェーピング前の工程の概略は、次の通りである (図13)。

ホブ切り工程で、ギヤAを加工するホブ盤には、バリ取り用固定チップが付き、ホブ切りによる1次バリをなぎ倒すように取る。しかしバリは完全には取れず、根本が0.2mm程残る。

次のバリ取り工程で、この残った根本をバイトで取ると歯面にヒゲ状の2次バリが残る (図10)。今回この2次バリを完全に除去するために、エアークッション式バリ取り装置をホブ盤に取り付け、バリ残り0.02mm以下とした (図14)。

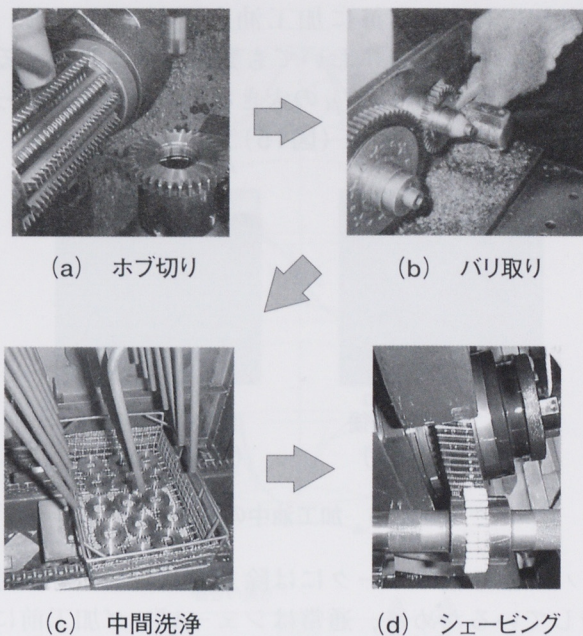


図13 シェーピングに至る工程

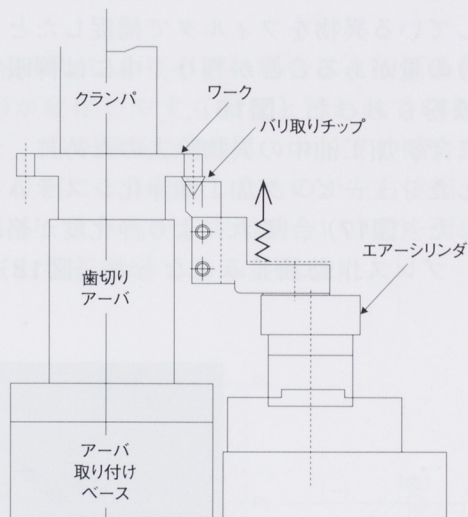


図14 エアークッション式バリ取り装置

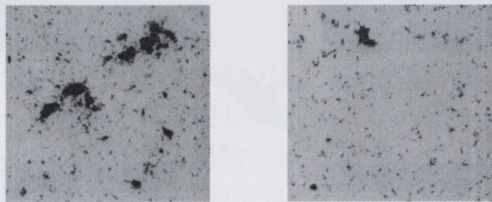
5.2 バリ以外の異物の調査と対策

加工点に噛込む異物としては、バリ以外に次の2つが考えられた。

- (1) 加工油中に混入した異物
- (2) ワークに付着した異物の残り

異物を含んだ加工油は、加工油タンクにあるマグネットセパレータを通ってろ過され、循環再使用されるが、約1/3の異物は加工油の中に残ってしまう。

当社では3ヶ月毎に加工油を更新していた。しかし、更新直後においても異物の数は半減するものの、まだ50~100 μ の大きなものが相当数残っていることが判った（図15）。



(a) 更新3ヶ月後 (100 μ 以上あり) (b) 更新直後 (50~100 μ あり)

図15 加工油中の異物

バリ取り後のワークには除去されたバリ等が付着しているために、通常はシェーピング加工前に中間洗浄を1回行う。ある時「斜め傷」が連続して発生したので2回洗浄をしたところ、発生が止まることがあった。このため、洗浄後のワークに付着している異物をフィルタで捕捉したところ、かなりの量があることが判り、中には裸眼でも見える鉄粉もあった（図16）。

そこで、加工油中の異物除去のために、当社で開発したシェーピング加工油浄化システムを追加設置した（図17）。これにより浄化度が格段に向上し、プレス作動油並みとなった（図18）。

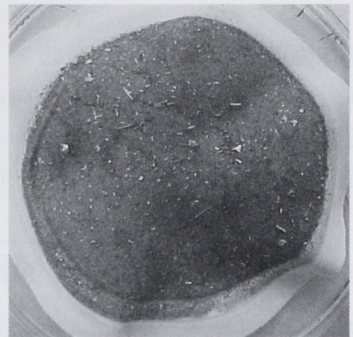


図16 ワーク洗浄後残り異物（ワーク10個分）

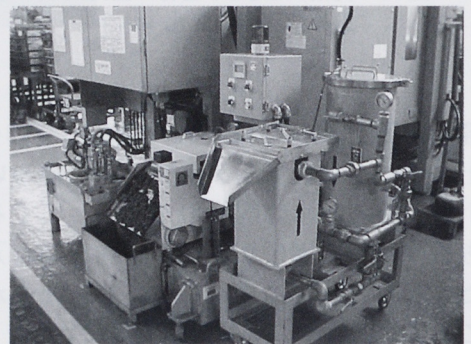
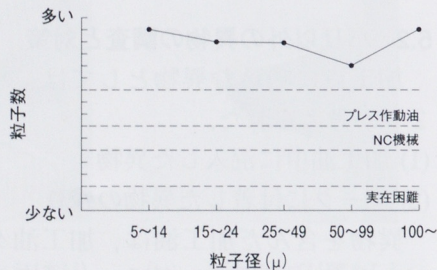
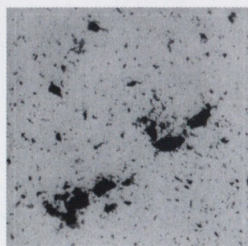
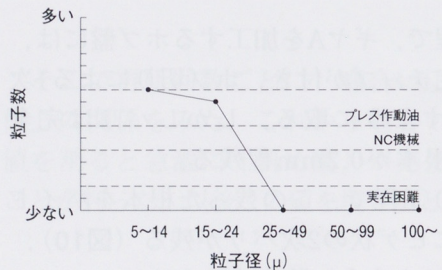
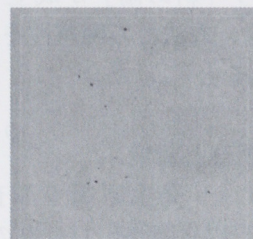


図17 シェーピング加工油浄化システム



(a) 改善前

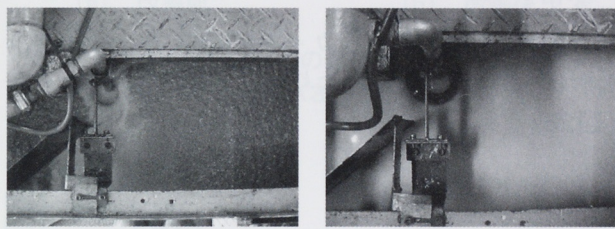


(b) 改善後

図18 浄化度の改善

さらに、液面追従型吸い口と液静置により能力向上した2種類の浮上油除去装置を開発し、中間洗浄機に設置した。

この結果、ワーク洗浄が終わり洗浄液の流入が止まってから10分で、浮上油がきれいに除去できるようになった（図19）。またワーク1個当たりの付着異物は、設置前の約1/25と大幅に減少した（図20）。



(a) ワーク洗浄終了 (b) 10分後

図19 浮上油除去の様子(中間洗浄機)

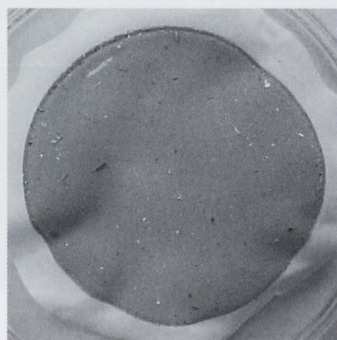


図20 改善後のワーク洗浄後残り異物
(ワーク10個分)

5.3 各社のカッタ設計法調査

次に、なぜ噛合い圧力角が、カッタの再研により早期に境界値未満になってしまうのか、各社のカッタ設計法について調査をした。

各社はカッタ設計に際して歯形精度の確保を主眼としており、このためにカッタとワークの噛合いにポイントを置いている。

噛合い率とは、カッタとワークが同時に噛合う噛合い点の時間的平均値を言う。噛合い率が1より大きく2より小さい場合、回転するに従い、噛合い点は2点から1点また2点と変化する（図21）。

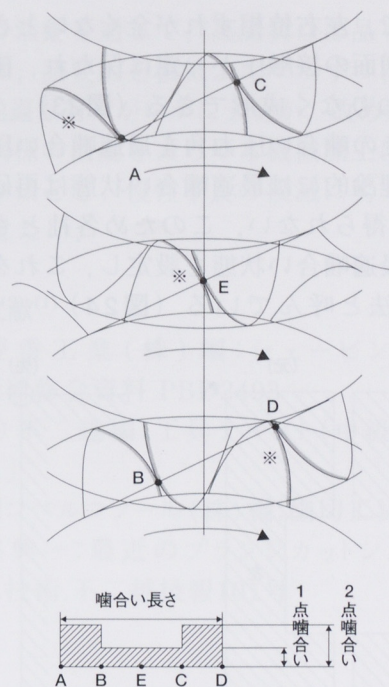
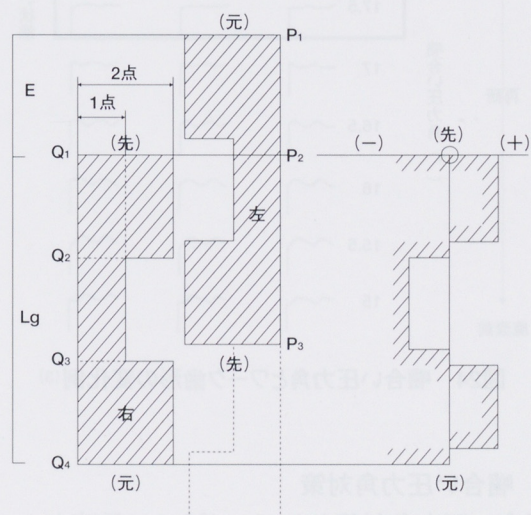


図21 噛合い点数の変化⁽⁴⁾

噛合い率が2より小さい場合は、加工条件により歯形が変化しやすくなると言われている。

また、歯の両面に着目し、カッタの噛合い点の変化を位相により表わしたものが左右位相ずれ線図である。また右から左の噛合い点数を引いたものが左右相殺線図である（図22）。



(a) 左右位相ずれ線図 (b) 左右相殺線図

図22 一般的な噛合い状態⁽⁴⁾

この中で、左右位相ずれが全くないとき、回転中の左右歯面の接触圧が一定に保たれ、歯形は理論上、うねりなく成形できる（図23）。

このときの噛合い圧力角を最適噛合い圧力角と言うが、理論的には最適噛合い状態は再研のある1点でしか得られない。このため各社とも新品に近い点に最適噛合い状態を設定し、これを最適噛合い設計法と呼んでいる（図24）^{(1),(2),(3),(4)}。

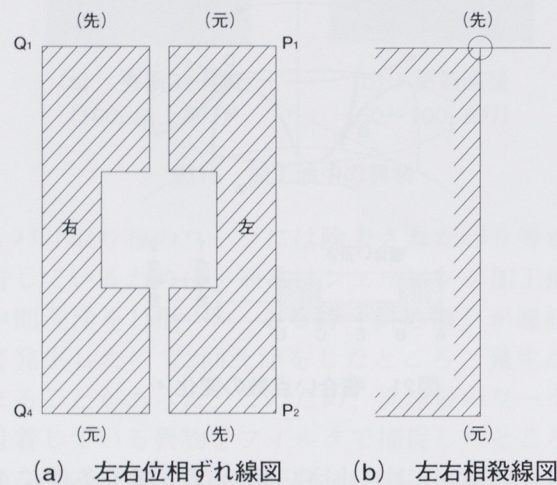


図23 最適噛合い状態⁽⁴⁾

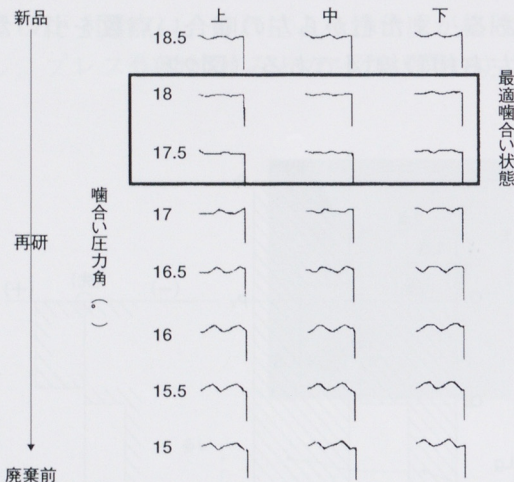


図24 噛合い圧力角とワーク歯形の変化例⁽³⁾

5.4 噛合い圧力角対策

噛合い圧力角対策として、ギヤAに最適なカッタを新規に設計製作することにした。

噛合い率は歯形の変化の少ない2以上とした。また、噛合い圧力角が変化する度合いが大きいと、

歯形に悪影響を及ぼす。この度合いが0.3未満であれば悪影響が少ないことが経験的に知られているので、0.3未満とした。

このギヤAの最適噛合い圧力角は境界値 -0.1° のため、廃棄前を境界値 -0.4° に設定し、新品の状態の噛合い圧力角は、寿命を考慮して境界値 $+1.5^{\circ}$ に設定した。

次にカッタの切れ刃エッジの摩耗防止とスロットの面粗度アップのため、カッタ材質を特殊材質に変更した。

その結果、新品からカッタ寿命まで、ギヤAの歯形は、ほぼ理想形となり全く問題がなくなった（図25）。

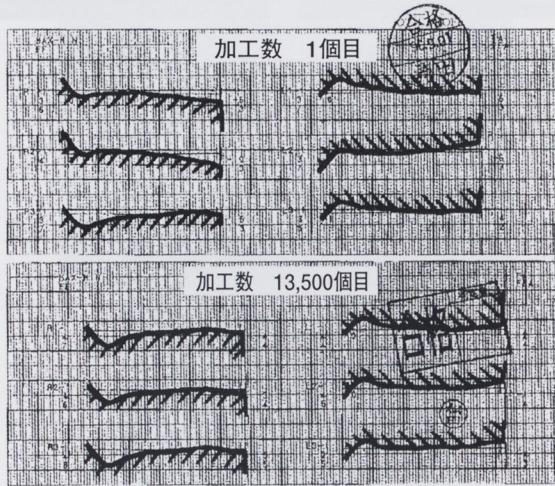


図25 対策カッタでの歯形

6 対策による効果

以上、述べたように、

- (1) バリ取り装置の改良によるバリの完全除去
 - (2) 加工油の浄化による異物除去
 - (3) 洗浄機の改造による異物除去
 - (4) カッタ諸元の改良による切削性能の向上
- の4項目を実施した結果、大きな傷の発生が顕著に減少した（図26）。

また、「斜め傷」不良は15ヶ月経った現在もゼロを継続中である。さらに、カッタ切れ刃エッジの摩耗が減少したことにより、1再研当たりの刃具寿命はこれまでの1,400個から1,3500個へと約10倍にアップした。

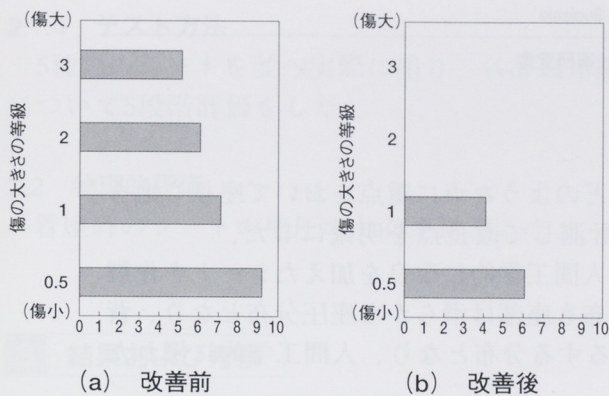


図26 良品ワークの傷のレベルの改善
(良品ワーク各20個×左右歯面中の傷の数)

7 おわりに

PM分析の手法で、プランジカットシェーピング加工の「斜め傷」の原因が、加工点に侵入する異物と噛合い圧力角との相互作用によることが明らかにできた。また、傷の原因となる異物にはバリ、クーラントの汚れ、ワークに付着した異物の3つがあり、主に設備の改良保全によって排除した。また、噛合い圧力角が過小となって「斜め傷」が発生しやすい領域を明らかにし、それを防ぐカッタの再設計を行った。以上の活動により不良を継続的にゼロに抑えることが出来た。

さらに、思いがけず次のことが効果として出てきた。

- (1) 廃液を年間ドラム缶310本分減らすことで、廃棄物対策の一助となった。
- (2) 刃具の寿命が約10倍に伸び、コスト低減に貢献できた。
- (3) 従来、生産現場では不良が発生すると送りを下げて対応しており、このための生産能力の低下があったが、これも解消した。

今回の活動を通して、高品質な部品を製造するためには、諸要因を根気よく一つずつ、徹底的につぶす地道な対策がいかに大切か、改めて感じた。現在、同様の活動をあらゆる機械加工に拡大中であり、今後とも、慢性不良の撲滅に努力を積み重ねていきたい。

参考文献

- (1) 三菱重工業(株)編:シェーピングカッタ, 技術研修会資料 PBD2493
- (2) (株)不二越編:工具テキスト(中級)「歯切り加工」
- (3) 神鋼コベルコツール(株)編:歯切工具
- (4) 筭谷興一:最近のプランジカットシェーピング加工技術,不二越技報101号

著者



森 一明