

トランスミッション歯車シェービング加工 工程の振動解析を用いた歯車精度対策

Methods to improve gear accuracy utilizing experimental modal analysis in the transmission gear shaving processing phase

牧瀬 芳輝

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2015年度TPM優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

要旨

モーターサイクルのトランスミッション歯車は強度向上、騒音低減を目的に歯面仕上げ工法にシェービング加工を採用している。シェービング加工における歯形精度が周期的に変化する現象について、振動モード解析を用いて共振のメカニズムを解明し、精度改善する手法を開発したので紹介する。

Abstract

Shaving processing is employed in gear surface finishing methods aimed at increasing strength and reducing noise in motorcycle transmission gears. With regard to the phenomenon of cyclic changes in gear profile accuracy in shaving processing, this report will introduce the development of methods to clarify resonance mechanisms utilizing experimental modal analysis and improve accuracy.

1 はじめに

モーターサイクルのトランスミッション歯車(図1)の歯面仕上げにはシェービング加工が広く用いられている。シェービング加工はホブ加工と比較して歯面が平滑なため低騒音化、ピッチング損傷防止の効果がある。また、加工時間が他の歯面仕上げ加工に比較して短いことが利点である。トランスミッション歯車の高精度化による効果は、低騒音による品質感向上、エンジン全体の軽量化による燃費向上、歯車の表面処理廃止によるコストダウンであり、お客様の感動を創造する加工技術としてますます重要度を増している。

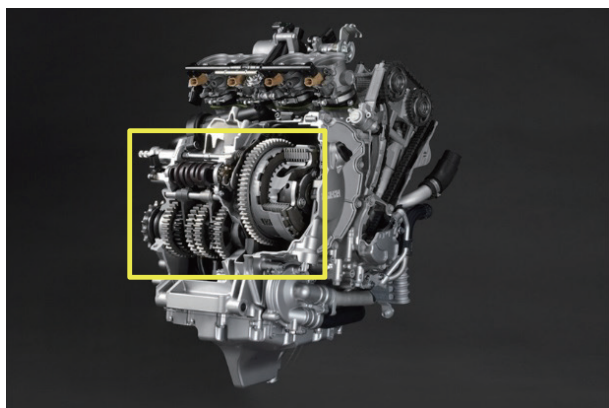


図1 モーターサイクルのトランスミッション

しかしながら、特定の歯車部品のシェービング加工において、狙った歯車精度が得られなくなる現象が発生する場合があります。異常品の検出のために全数検査を実施することでロスが発生していた。本稿では振動解析を用いて原因となる共振のメカニズムを解明し、その結果に基づき対策を実施するこ

とで全数検査を廃止できたので報告する。一般的にシェービング加工では振動が歯車精度に悪影響を与えるとされているが、本稿では振動に関する新たな取り組みを説明する。

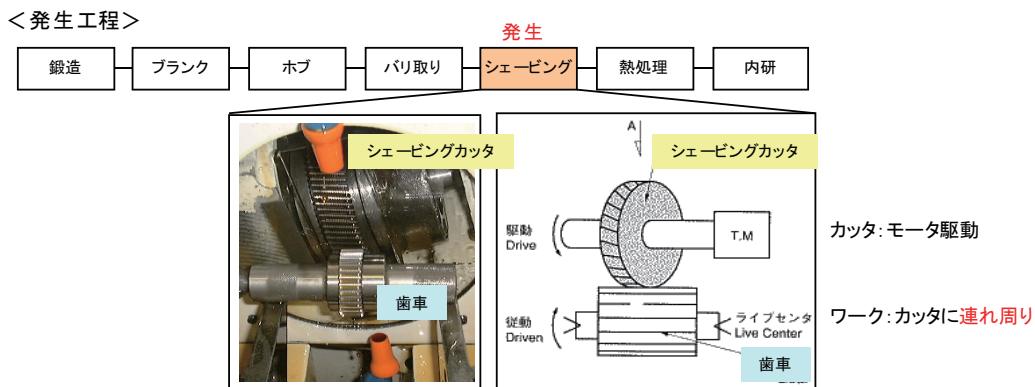
2 シェービング歯車の精度問題

2-1. シェービング加工の原理

トランスミッション歯車の製造工程は鍛造後にブランク加工、ホブ加工を行うが、部品の要求精度によりホブ加工の後にシェービング加工を行う(図2)。シェービングカッタがサーボモータによって駆動され、ワークはカッタとの噛合いにより従動する。カッタは歯車形状で、溝(セレーション)が多数並んでいる(図3)。ワークとカッタは15°前後の交差角を持って斜めに噛合わせ、カッタを回転させながら押し付ける(プランジ加工)。セレーションのエッジの切れ刃がワーク歯面を横滑りして切削を行う。なお、プランジ加工においては歯面を均一に切削するため、1歯ごとにシェービングカッタのセレーションが少しずつ位置を移動するように設計されている。この移動量をディファレンシャル量と呼び、通常は一定である(図4)。

2-2. シェービング加工の精度問題点

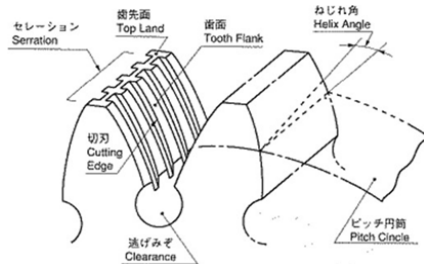
歯車に要求される精度の1つに歯溝の振れがあり、内径に対する歯面の偏芯および歯ごとのピッチ誤差を総合した製品機能上重要な規格として表わされる(図5)。歯車のインボリュート曲線を歯形と呼び、通常は真のインボリュート曲線を基準としてずれ量の比較測定を行うが、特に角度のずれ量は歯形圧力角誤差と呼ぶ(図6)。



シェービングカッタ全景



カッタの歯先の様子



カッタの切れ刃の軌跡
⇒横滑りしながら切削

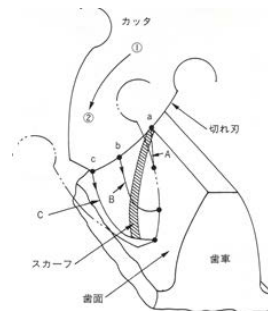


図3 シェービングカッタのセレーションと加工原理

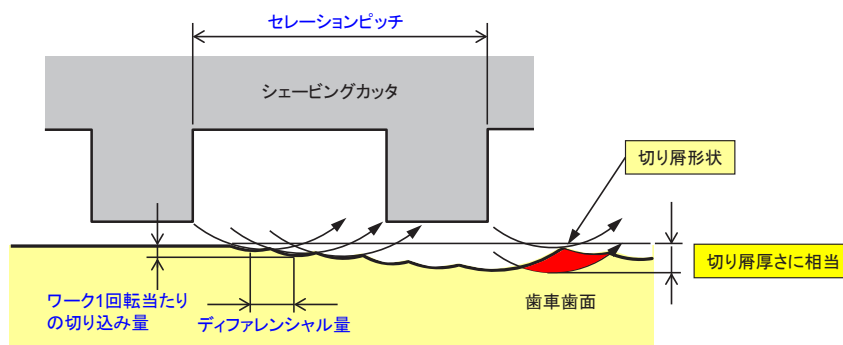


図4 シェービングの加工点の様子

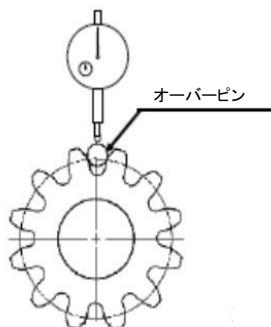


図5 歯溝の振れ

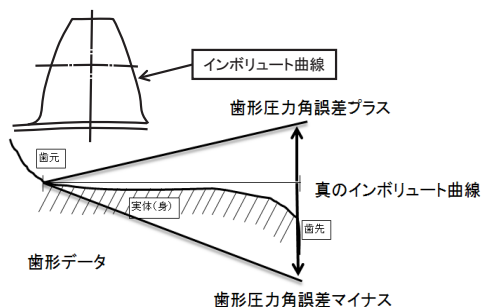


図6 歯形と歯形圧力角誤差

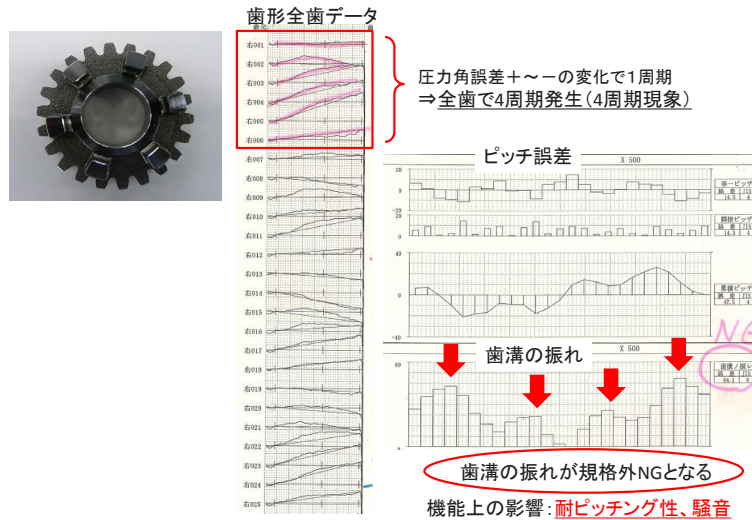


図7 歯車部品Aの歯溝の振れ4周期変化問題

異常が発生した歯車部品Aでは、歯形を全歯測定すると歯形圧力角誤差においてプラス、マイナスの周期的な変化が全周で4回現れる。この歯形圧力角誤差の周期的な変化の影響で歯溝の振れにも4周期の変化が発生し、規格 $43\mu\text{m}$ を超える製品が発生していた(図7)。

流出防止として同様の精度問題を持つ全17部品の歯溝の振れを全数選別しており、大きなロスが発生していた。ロスコスト撲滅のために真のメカニズムの解明、発生防止策の良品条件への織り込みが求められた。

3 振動解析を用いたシェービング歯車精度問題対策

3-1. シェービング加工と振動との関連性 ～噛合いメカニズム～

ここではシェービング加工と振動との関連性について噛合いメカニズムの視点から説明する。カッタとワークの噛合いの状態は歯面の左接点、右接点が2点ずつで均等な状態から開始して、回転すると右接点が3点となり左接点の2点に対して不均等となる。その結果、右から左へワークを回転させるモーメントが増加する(図8)。さらに回転するとモーメントは左右均等となり、次に左から右へワークを押す方向に増加する。ワークとシェービングカッタの噛合いによって連続的に左右にモーメントが変動することを噛合い変動と呼ぶ。押し付けられた状態で噛合い変動が生じるとシェービングカッタのセレーションによる切削量が変動し、ワークの歯形に影響する。この周期的な噛合い変動が一定以上に大きくなると振動につながり、歯車精度に悪影響が発生すると一般的にいわれている。

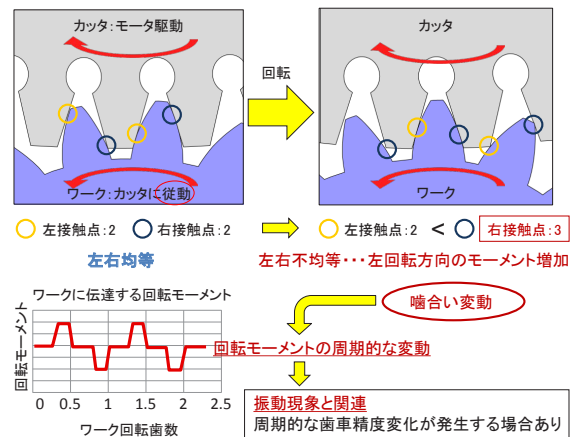


図8 シェービングカッタとワークの噛合い変動

3-2. シェービング加工と振動との関連性 ～歯車諸元～

次に振動との関連性について歯車諸元の視点から説明する。モジュールとは歯の大きさを示し、大きい方が切削負荷が高く振動に影響する。一方、同一のカッタにてモジュールが一定の歯車を加工する場合に、歯数が少ない方がワークとカッタの噛合い長さが小さく、噛合い変動が大きくなるため振動に影響すると考えられる(図9)。

ここでモジュールを横軸、歯数を縦軸とした歯車諸元マップに精度不良となった対象17部品を×点、他の問題のないシェービング部品を○点として共にプロットした(図10)。対象17部品はモジュールが全体の中で大きい側、歯数が少ない側に偏って存在している。メカニズム上、この2つの諸元による要因から振動が発生し易くなることと一致している。

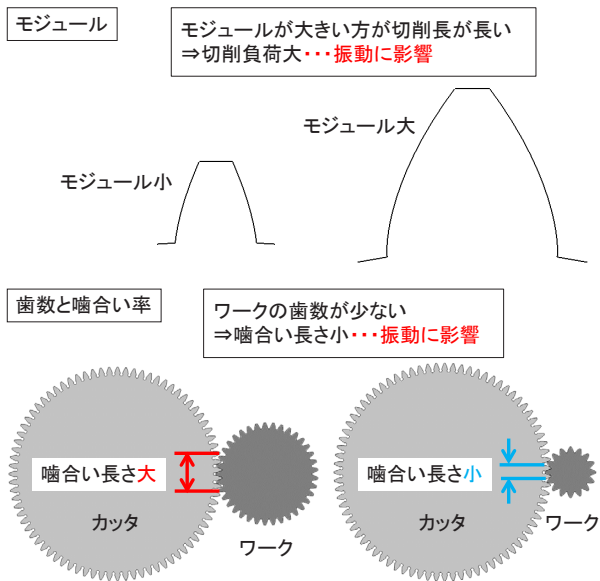


図9 歯車諸元の振動影響

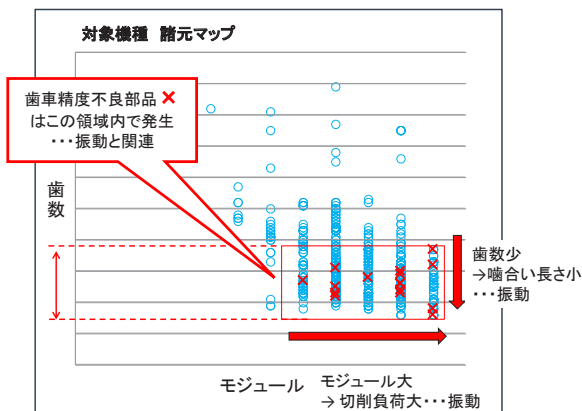


図10 歯車諸元マップ

3-3. 歯車精度問題発生状況の調査

歯車部品A(表1)の原因調査の過程において2枚のシェービングカッタ①、②で歯車精度不良の発生に差があることが分かった(表2)。噛み合い周波数266Hz(カッタ回転数165rpm)の場合に歯溝の振れの4周期変化がカッタ①、②の両方で発生する。カッタ②は300Hz以外の噛み合い周波数でも歯溝の振れの4周期変化が発生する。特に、噛み合い周波数266Hzでは歯溝の振れが規格外となる。

カッタ①、②は同じ仕様だが、カッタ②のセレーションにワークの歯幅以上の欠損がある(図11)。以上の状況で歯溝の振れが周期的な変化を示したことから発生メカニズムに振動が深く関わっていると考え、ハンマリングを用いた振動解析を中心に調査を進めることとした。

表1 歯車部品Aの諸元、カッタ諸元、加工条件、設備仕様

歯車部品A 諸元		加工条件	
モジュール	2	回転数 (rpm)	150~225
圧力角 (°)	20	送り量 (mm/min)	0.30~1.00
歯数	25	加工設備仕様	
転位量	0.5474	メーカー	HURTH
基準ピッチ円直径(mm)	50	型式	ZST7
カッタ諸元		数値制御	FANUC NC
歯数	97	主軸モータ	5kW
ねじれ角 (°)	15	加工方法	ブランチ

表2 歯溝の振れ4周期変化の発生状況

噛み合い周波数	カッタ回転数	シェービングカッタ	
		①	②
240Hz	148rpm	○	△
266Hz	165rpm	△	×
300Hz	186rpm	○	○
340Hz	210rpm	○	△

○: 4周期変化無し △: 4周期変化有るが規格内 ×: 4周期変化有り規格外

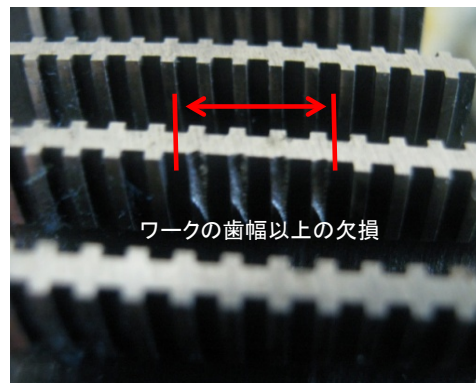


図11 カッタ②の欠損状況

3-4. 実加工振動解析

実加工中の振動解析では図示の位置(図12)のカッタ付近での加速度、ワーク付近での加速度を加工中に測定する。カッタ側を入力、ワーク側を出力として出力÷入力を伝達関数と定義する。伝達関数は振動の伝達レベルを評価する指標で、横軸周波数、縦軸伝達関数としてグラフに示す(図13)。グラフより周波数800Hzで振動レベルが最大となり、またカッタ歯数と回転数から決まる噛み合い周波数266Hzの3次周波数が800Hzで振動最大の周波数と一致し、関連があると考察される。

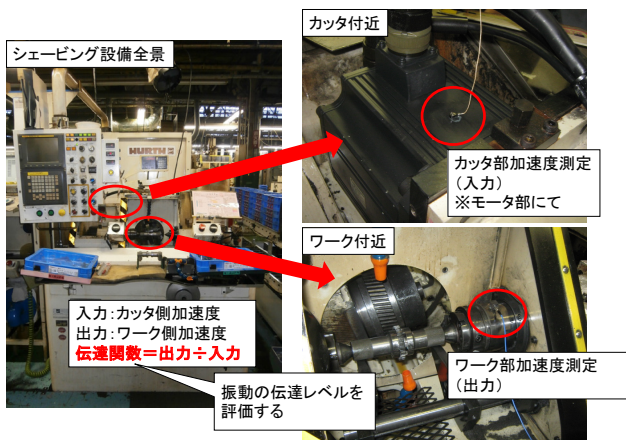


図12 実加工振動解析の様子

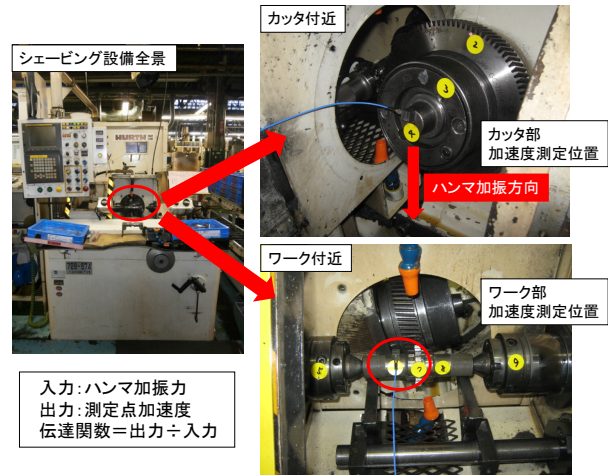


図14 ハンマリングテストの様子

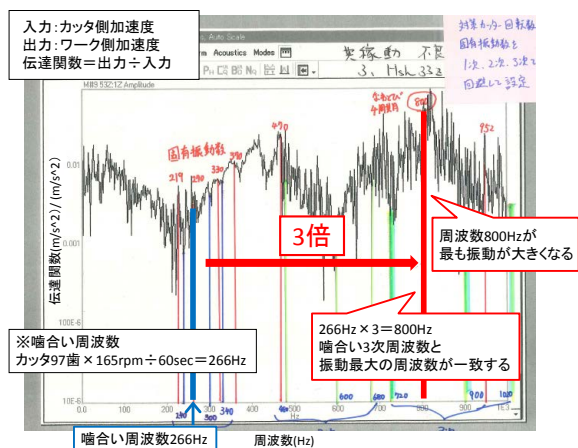


図13 伝達関数グラフ(実加工時)

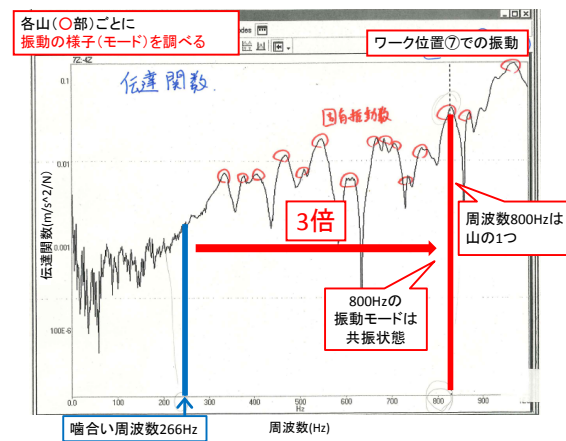


図15 伝達関数グラフ(ワーク位置⑦ハンマリング)

3-5. ハンマリングテストによる振動解析

ハンマリングテストでは3軸加速度センサを対象物の黄色マークの各位置に取り付けて、計測用ハンマでカッタ主軸の先端に加振を行い、加速度の測定を行った(図14)。

加振力データを入力、加速度データを出力として出力÷入力を伝達関数と定義する。横軸周波数、縦軸伝達関数としてここではワーク位置⑦の伝達関数をグラフに示す(図15)。

各測定位置での伝達関数から各周波数での系全体の振動の形、すなわち振動モードを調べることができる^{[1][2][3]}。振動モード解析ソフトウェアを用いて系の各位置の伝達関数をモデル上に関連付け、各周波数での振動モードを動画で描画して振動の様子を観察した(図16)。

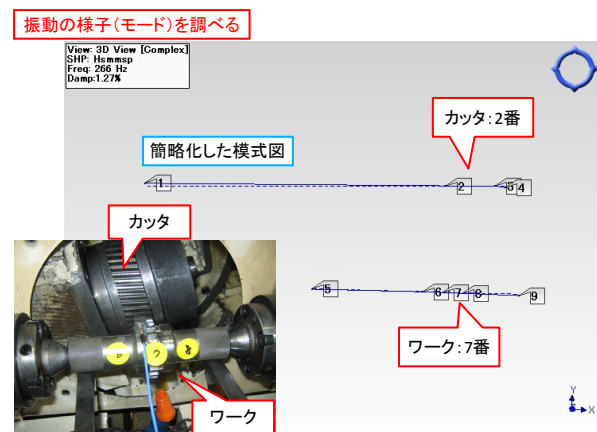


図16 振動モードの様子

3-6. 振動解析結果

実加工振動解析の伝達関数を確認すると周波数800Hzに最大の振動のピークがある。ハンマリングで800Hzでの振動モードを確認すると、カッタを保持するカッタシャフトとワークを支持するワークシャフトの振動は逆位相となっていた(図17)。これは、800Hzが構造上の共振点であり、軸間距離が狭くなったり広がったりを繰り返す動きが周期的に発生していることを意味している(図18)。この動きが歯溝の振れの周期的な変化につながっていると考えられる。

また、266Hzでの振動モードを確認するとワーク側は動いておらず、カッタ側の動きは小さいため歯形精度に影響を与えないことが分かる(図19)。その他の振動のピーク点で振動

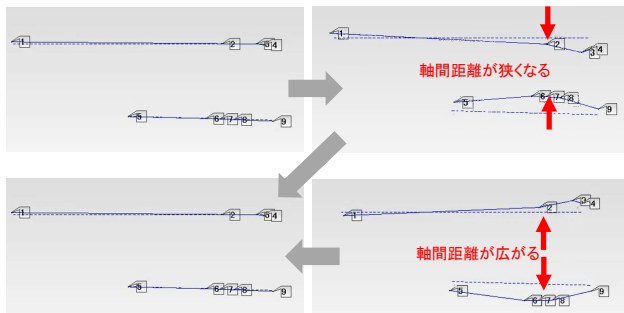


図17 800Hzの振動モードの様子

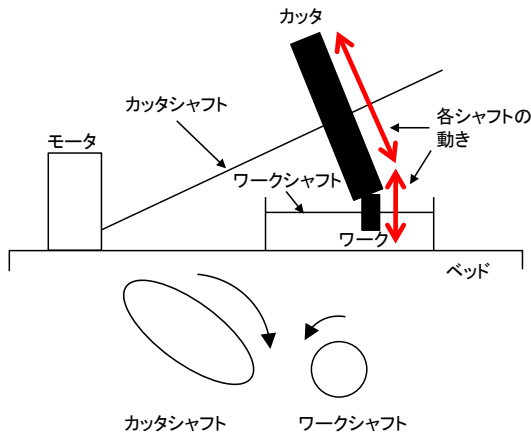


図18 800Hzでのカッタとワークの動き

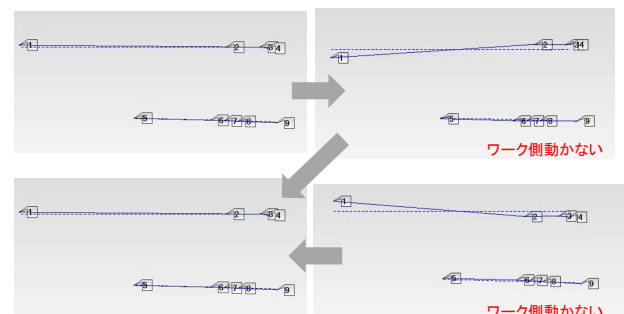


図19 266Hzの振動モードの様子

モードを確認すると同位相となっていた。このことは、800Hz以外では軸間距離の変動の影響が少ないことを意味している。さらに考察すると、シェービングカッタの回転数を165rpmに設定すると噛合い周波数266Hzが発生し、その3次成分の800Hzが前述の構造上の共振周波数800Hzと一致するため、特に歯溝の振れの周期的な変化が発生すると考えられる。

3-7. 歯溝の振れの変化が4周期となるメカニズムの推測

前述のように、シェービングカッタの回転数を165rpmに設定すると噛合い周波数266Hzが発生し、その3次成分の800Hzが前述の構造上の共振周波数800Hzと一致するため共振状態(歯形精度に影響を与える軸間距離が狭くなったり広がったりを繰り返す動き)となっている。さらに、カッタ②の97歯中の1枚のセレーションの欠損はワークの幅以上であるため、回転中に欠損のところでワークとカッタの噛合いのクリアランスが瞬間的に増加する。この時、噛合いの角速度が変化し衝撃的な加振をワーク歯に与える。衝撃的な加振はあらゆる周波数の振動をワークとカッタに与えるため、800Hzでの共振状態をさらに助長させることとなる。

カッタの欠損は1回転に1回の衝撃を与え続けるが、3次成分の800Hzはカッタ1回転に3回の振動を行う。つまりカッタ1回転97歯で800Hzの振動の山は3回発生する(図20)。よって $97 \div 3 = 32$ 歯に1回振動する。800Hzではカッタシャフトとワークシャフトが共振状態で、図17および18に示した軸間距離が狭くなったり広がったりを繰り返す動きで歯形精度に影響を与える。これによりカッタ振動の軸間距離の変動が32歯ごとにワークに転写されることになる。カッタとワークの歯を横に並べた歯車展開図で模式的に説明すると、32歯毎のカッタの振動に対し、ワークは25歯であるため、振動1回毎にワークは1回転+6歯進む。これが繰り返された時、ワークには6歯間隔で振動が転写されるようになる。 $25 \div 6 \approx 4$ のため4周期の山が現れているように見えると考えられる。

4 歯溝の振れの周期的な変化の対策

4-1. 共振回避のための加工条件設定

シェービング工程では刃具の加工数によりセレーションの切れ刃のエッジ性状が変化するため歯形精度が変化する。また、カッタの再研磨に伴うカッタの寸法変化でワークとの噛合いが変化することによっても歯形精度が変化する。歯形精度の調整のため、段取り時に加工条件を作業標準書の加工条件表から作業者が設定している。前章で説明したように、歯車

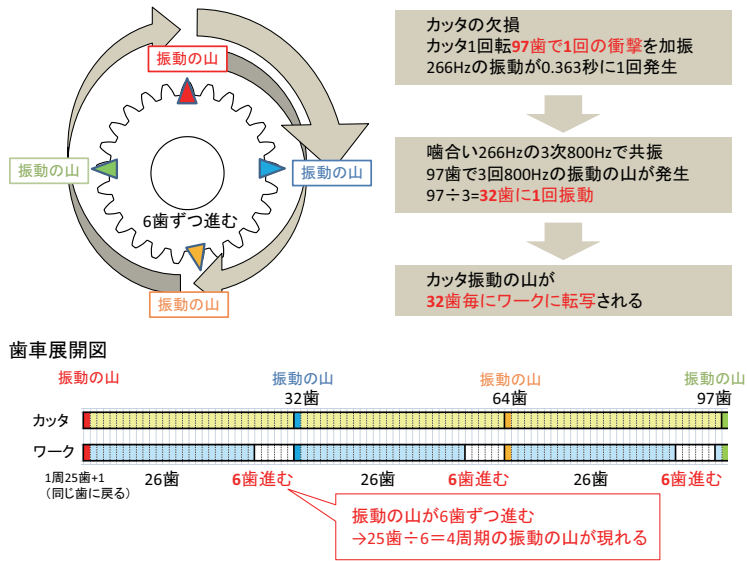


図20 カッタとワークの噛み合わせの動き

部品Aにおいてカッタ回転数165rpmの場合に共振が発生するため、カッタ回転数165rpmの使用を禁止するよう、作業標準書を変更した(表3)。

数検査を廃止した。全数検査廃止により検査人工のロスコストを削減することができた。

表3 作業標準書の加工条件設定

周速	カッタ 回転数	送り速度(R:荒 F:仕上) ワーク1回転当たりの送り量				
		0.0005	0.0008	0.001	0.0013	0.0015
150	225	0.44	0.66	0.88	1.1	1.31
140	210	0.41	0.62	0.82	1.02	1.23
130	195	0.38	0.57	0.76	0.95	1.14
120	180	0.35	0.53	0.7	0.88	1.05
100	150	0.3	0.44	0.59	0.73	0.88

※S165は設定不可(振動発生領域のため)

4-2. シェービングカッタのセレーションの欠損の検査実施

3章で述べたように、カッタのセレーションのワーク歯幅以上の欠損が衝撃的な加振を行い、歯溝の振れの周期的な変化を発生させていたことが分かったため、これに対する対策を実施した。加工職場にカッタ欠損をチェックする検査台、記録帳票を設置すると共に、加工の前と後で確認する仕組みを作った。これにより、ワーク歯幅以上に欠損したカッタは生産で使用されないようにした。以上により、カッタのセレーションの欠損について、振動発生防止を目的として明確な基準を作ることができた。

4-3. 対策の成果

今回の取組みの中で良品条件表を作成した。発生防止、流出防止の良品条件を設定することができて、歯溝の振れの全

5 おわりに

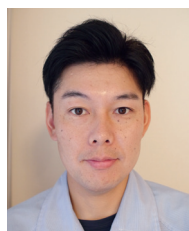
シェービング加工の歯溝の振れの周期的な変化について、ハンマリングを用いた振動解析により原因となる共振のメカニズムを解明した。シェービング工程は従来、段取り時の歯形精度調整などに職人技能的な領域があるが、振動解析を用いた技術的解決手法の開発ができたことが今回の収穫であり、今後も継続していく。

最後に、振動解析に多大なご協力を頂いた(株)柏原応用力学研究所 柏原礼一郎様に深く感謝申し上げます。

■参考文献

- [1] 長松昭男「モード解析入門」コロナ社
- [2] 星鐵太郎「機械加工の振動解析」工業調査会
- [3] 日本機械学会講習会資料「切削加工、びびり振動の基礎知識」日本機械学会

■著者



牧瀬 芳輝
Yoshiteru Makise
エンジンユニット
コンポーネント統括部
ユニット技術部