

ハイポイドギヤ歯面のうねり性状評価手法の開発

Development of Evaluation Method for Waviness Property on Hypoid Gear Tooth Surface

堀 剛*
Takeshi HORI

宿島 直人*
Naoto SHUKUSHIMA

要 旨

ハイポイドギヤから発せられる高次数ギヤ放射音の原因となる歯面うねりを定量評価する測定、解析手法を開発した。歯面うねりは、光学式非接触3次元測定機を用いて測定した。この結果に2次元フーリエ変換と逆フーリエ変換による画像フィルタリングを適用し、ギヤ音の周波数に影響する周期性のあるうねり成分を抽出した。本手法を用いて実機ユニットで歯面うねり評価をおこなった結果、うねりの周期性のピーク次数とギヤ放射音の周波数のピーク次数が一致した。また複数の供試体ギヤの評価の結果より、ピーク次数のうねり振幅値とギヤ放射音の音圧レベルの定量的な相関関係を見出した。これより従来には無いハイポイドギヤ単品での定量評価が可能となった。

ABSTRACT

Measuring and analysis methods have been discovered for quantitative evaluation of tooth surface waviness, which cause high-order sound radiation from hypoid gears. Tooth surface waviness was measured by an optical, non-contact 3D measuring device. Taking this measurement result, images were filtered by applying a 2D Fourier Transform and inverse Fourier Transform to extract the cyclical waviness components impacting gear noise frequencies. The method was used to evaluate tooth waviness of hypoid gear in an actual gearbox unit. The cyclical peak order of the waviness matched the peak order of frequencies of sound radiation from gears. In addition, upon evaluating multiple specimen gears, a quantitative correlation was found between the amplitude of peak order waviness and the pressure level of sound radiation from gears. This has newly made quantitative evaluation of hypoid gears in isolation possible.

1. まえがき

SUVに代表される全輪駆動(AWD)多目的乗用車の普及と拡大に伴いHondaは多くの駆動系用ハイポイドギヤを開発し商品化してきた。ハイポイドギヤは原動機の回転動力を駆動輪に伝達する経路において回転軸を直角に変換する傘歯車的一种である。Fig. 1に示すHondaのAWD車両のドライブトレインのようにプロペラシャフトの前後端に各1組のギヤセットを配置する構造が一般的である。前端側はトランスミッションに付随するパワートランスファユニットに、後端側は後輪軸上に配置するリヤドライブユニットに内蔵されそれぞれが駆動トルクを伝達する。

近年の乗用車の車室内静粛性能の向上に伴い、駆動系装

置から発生する振動騒音に対してより厳しい高品質な性能が要求されるようになった。特にハイポイドギヤのかみあいから発せられる高周波の振動騒音は実機の常用運転域で

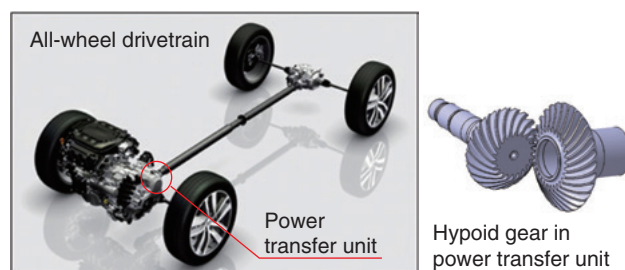


Fig. 1 Drivetrain and hypoid gear of Honda AWD vehicle

*四輪 R&D センター

耳障りな高周波音となり、開発段階の車室内騒音において課題となってきた。歯車の動力伝達において発生する振動騒音は1対のギヤのかみあい歯面、すなわち駆動側歯面と従動側歯面のかみあい周期に同期した周波数を持った特性を有する。高次数ギヤ音の周波数はかみあいの周期に対して一定倍の次数成分を有することより歯面のうねり性状、および歯面製造過程の精度管理に影響を受けていることが知られている⁽¹⁾。しかし従来は高次数ギヤ音の原因となる歯面のうねり性状を定量評価できる手法や指標が無かった。このためギヤ単品での評価は容易ではなく、量産の製造工程では完成品ギヤセットのかみあい試験結果による品質合否判断とその後の流動管理をおこなってきた。これより管理工数が増加し生産効率の低下を招いていた。またギヤ音やうねりの発生防止策をギヤ単品の製造管理条件にフィードバックするために、製造条件違いによるギヤかみあい試験、および実機騒音試験のパラメータスタディに多くの時間と労力を費やしていた。

2. 高次数ギヤ音の発生メカニズム

2.1. ハイポイドギヤの歯面うねりと高次数ギヤ音の関係

開発車両の室内騒音において、3000 Hz から 4000 Hz 付近に高周波音が顕著に発生している車両と発生が無い車両の比較をおこなった。高周波音の発生している車両のパワートランスファユニットに内蔵されるハイポイドギヤセット単体を、実機の組込み状態と同様になるかみあい試験機に配置し実機と同等の負荷を掛けて試験をおこなった結果、車両で発生している高周波音の周波数に相当するかみあい次数に伝達誤差のピークが確認された。Fig. 2 に高周波音の発生する車両の室内音のデータを示す。横軸は周波数のハイポイドギヤのかみあい1サイクルに対する次数成分を、縦軸は車両の走行速度を、そしてカラー図の色調は音圧の強さをそれぞれあらわす。本稿においては、ハイポイドギヤの瞬間的にかみあう歯面同士が隣接する次の歯面に移行し同じ動作を繰り返すまでの周期をかみあい1サイクルと定義する。その周期は駆動歯車、従動歯車ともに一致し各歯車が1回転するのに所要する

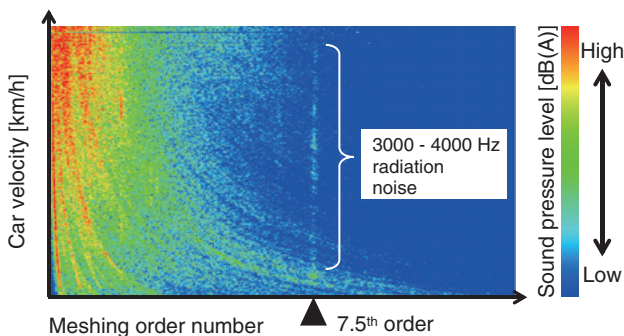


Fig. 2 Sound radiation level inside actual vehicle

時間を歯数で除した値に等しい。室内騒音計測の間、車両は所定のモード条件に従い一定の加速度を保ち試験走行をする。そして計測された走行速度ごとの全ての周波数範囲の音圧データより、ハイポイドギヤのかみあい1サイクルに対する次数成分に分析した音圧レベルを横軸方向に配列し表示した。さらに車両の走行速度に従い、グラフ縦軸方向に移動しながら連続的にデータの記録をおこなった。このグラフより計測中のほぼ全域の速度においてハイポイドギヤのかみあい1サイクルに対して7.5次成分の周波数をもった高周波音が絶えず発生していることが確認できた。Fig. 3 にギヤ単体のかみあい伝達誤差データを示す。測定にはグリーソン社製かみあい試験機 600HTT を使用した。一定時間の回転の間に収集した伝達誤差量のデータから、高速フーリエ変換にて周波数分析をおこないハイポイドギヤのかみあい1サイクルに対する次数成分をグラフの横軸に、伝達誤差の振幅値を縦軸にあらわす。このグラフ上に室内騒音データに確認された高周波音と同じ7.5次周期の伝達誤差ピークを確認できた。

かみあい伝達誤差は二つの歯車の回転運動においてかみあい1サイクル間の回転変動量をあらわす値であり、単位はrad または mm で評価される。伝達誤差は両歯面の幾何形状(歯形)から決まる法線方向の相対位置に等しく、その値に応じた角加速度が従動歯車に周期的に発生し、振動騒音の起振力として直接影響することが知られている⁽²⁾、⁽³⁾。これらの結果より試作車両で課題となった高周波音はハイポイドギヤの歯面より発せられた7.5次のギヤ放射音であることがわかった。またハイポイドギヤのかみあい歯面を観察すると、ギヤ放射音の発生するギヤの歯面には同じ方向に規則正しい間隔で複数並ぶ筋目模様が確認された。Fig. 4 に駆動側小歯車(ピニオン)の歯面の画像を示す。次に動力伝達の作用点となる歯面上のかみあい点の略図をFig. 5 に示す。歯面にはかみあい開始点 A1 から終了点 A2 の間の接触点を結ぶかみあい軌跡線 (Fig. 5 図中の Path of contact) が存在し、動力伝達は接触点がかみあい軌跡線上を等速運動することによりおこなわれる。さらにその線上には一つ前のかみあいから切替わる瞬間点 B1、および次のかみあいに切替わる瞬間点 B2 が存在する。歯車が 2π / 歯数の角度回転をする間にかみあい点は B1-B2 間を移動し、この動作を1単位とした繰り返し運動をおこないなが

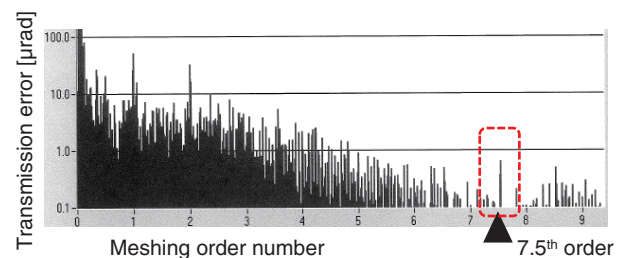


Fig. 3 Transmission error spectrum of hypoid gear

ら動力伝達をする。これらより Fig. 4 にて確認された歯面の筋目模様は規則正しい間隔でかみあい軌跡線上を横切っていることが推測される。さらにかみあい1サイクルの中における伝達誤差特性の様子を Fig. 6 のモーショングラフに示す。横軸は駆動側歯車の回転角度をあらわし、一方縦軸は従動歯車の回転変動の大きさとして遅れ量(伝達誤差)をあらわす。伝達誤差が0となる横軸線上においては、駆動側歯車と被駆動側歯車の歯面の接点は等速運動となり被駆動側歯車の回転に遅れが発生しない状態をあらわす。伝達誤差曲線の交点はかみあいの切替わる瞬間点 B1 と点 B2 に相当しその間隔はかみあい1サイクルの回転角度に等しい。点 B1, B2 では歯形の持つクラウニング量に応じた1次周期の回転遅れが発生しこれらは歯面の法線方向の相対位置に等しい。これより仮に点 B1-B2 間のかみあい軌跡線上に一定の周期性を持つうねり性状が存在すると、回

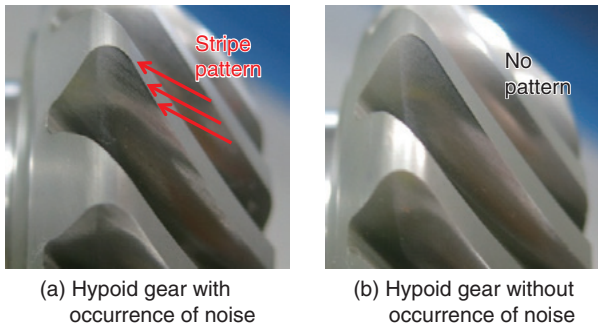


Fig. 4 Stripe pattern on tooth surface of hypoid gear

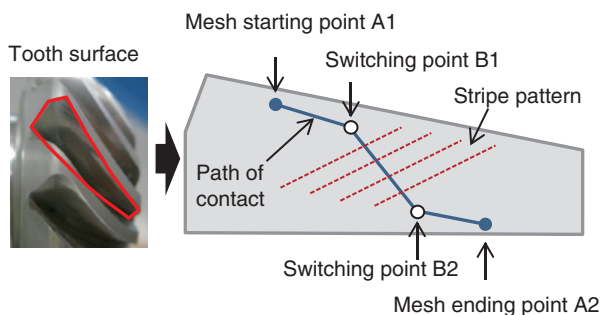


Fig. 5 Sketch of tooth surface and path of contact

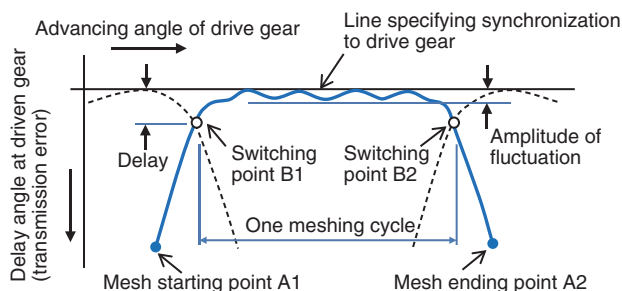


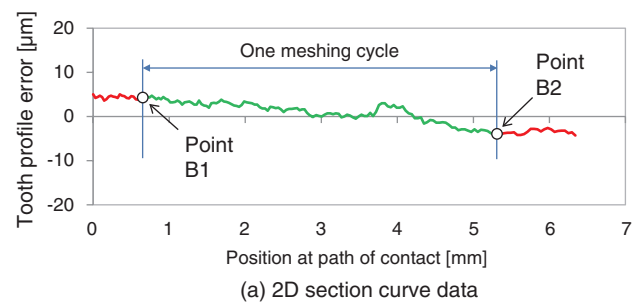
Fig. 6 Motion graph during one meshing cycle

転時にはかみあい1サイクルの間に、B1-B2 移動距離をうねり性状の間隔ピッチ長さで除した値で倍する周期次数をもった伝達誤差と回転変動が発生する。これら歯面のうねり性状が特定次数の伝達誤差に影響することは従来の研究より明らかにされている^{(1), (4)}。

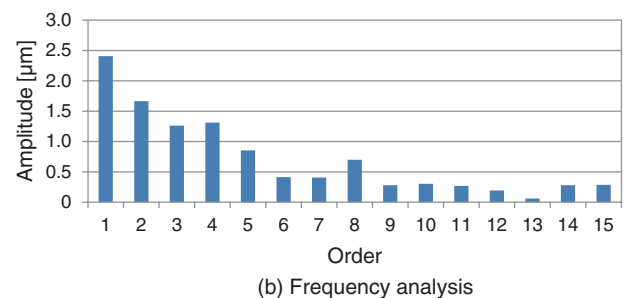
2.2. 歯面うねりの定量評価方法の目的

従来の研究においては歯面のうねり性状の測定、評価法として歯車試験機等の歯形測定機を用いて歯形形状、歯筋形状測定線上を2次元的に測定する手法が知られている⁽¹⁾。従来手法を応用しクリンゲルンベルグ社製の歯形試験機と専用ソフトウェアを用いて Fig. 5 に示すかみあい軌跡線上で歯形計測し、そこから得られた法線方向の断面曲線を抽出した。また曲線内に存在するうねりの周期性を解析するために高速フーリエ変換処理をおこなった。測定に用いた試験歯車は、歯切り加工時にカッタのアライメントを調整し意図的に歯面うねりを発生させたものである。測定結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) は歯面上のかみあい軌跡線上の断面曲線データである。横軸はかみあい軌跡線の長さ方向の位置を、縦軸は歯面法線方向の形状を示す。一方(b) は(a) データを周波数解析した結果であり、横軸はかみあい1サイクルに対する周期次数成分を、縦軸は歯面法線方向の振幅値をあらわす。このグラフには車両で発生している高周波音に相当する7.5次付近の成分以外にも多くの次数成分の周期が現れている。これより測定結果から得られたピークとなる周期次数値と振幅値をうねりの特性値として定量評価することは容易ではない。

歯切り加工や熱処理等の製造工程を経て、ハイポイドギヤの歯面上には波長の異なる凹凸性状がさまざまな方向



(a) 2D section curve data



(b) Frequency analysis

Fig. 7 Measurement results

に存在している。主な性状としては Fig. 8 の歯面の略図に示す (1) 歯形形状, クラウニング, (2) うねり性状, (3) 加工筋目がある。加工筋目とは切削点に生じる挽き目やカットブレードの表面性状の転写等による筋目の総称とする。上記手法では測定段階でかみあい軌跡線上のすべての性状情報を捕捉するため、他の粗さレベルと対比して小さいうねりはそれらに埋没してしまい顕在化ができない。このため従来手法では歯面単独での評価は容易ではなく、完成品ギヤセットのかみあい試験による伝達誤差量で評価をおこなっていた⁽¹⁾。本研究では方向と周期の異なるさまざまな性状が存在する歯面形状データの中から、ギヤ放射音の原因となる微小な特定のうねり成分のみを抽出し定量評価することを目的とした新手法を構築した。そのために、歯面測定は従来のかみあい軌跡線上の2次元測定から歯面広範囲の3次元測定に変更し、得られた歯面3次元データから画像フィルタリング手法を用いてうねり性状の方向分析と抽出をおこなった。

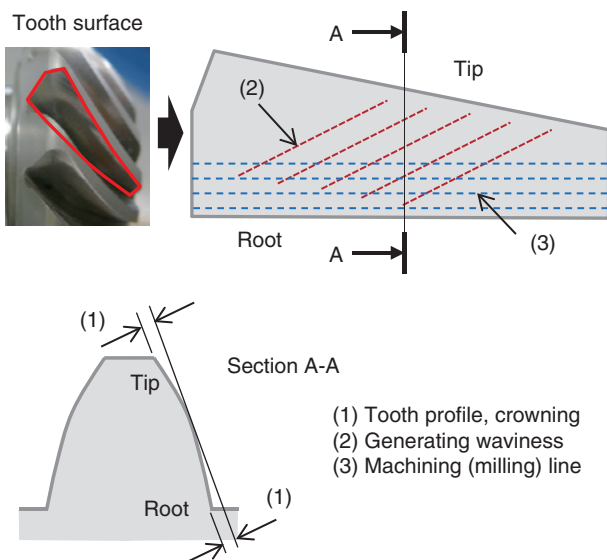


Fig. 8 Sketch of tooth surface and property

3. 歯面うねり性状の測定と評価手法の構築

3.1. 歯面形状の3次元測定

歯面形状を高精度に3次元測定することができるアリコナ社製の光学式非接触3次元測定機を用いて計測をおこなった。本測定機では焦点移動式測定を採用しており、測定の様子と機器の基本仕様を Fig. 9 に示す。測定機Z軸上を移動する対物レンズを介して撮像センサに歯面の画像を取り込む。移動中の対物レンズの高さ位置ごとに連続して撮像された複数の各画像データにおいて、焦点の合った部位の画素（ピクセル）と高さ情報を合成して一つ

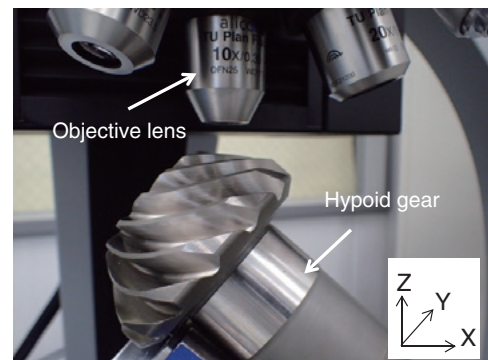
の3次元形状データを生成する。これにより測定部位を傷つけずに高低差の大きい箇所を短時間で測定することが可能である。また、測定テーブルをXY方向に移動して3次元データを複数回連結することにより広範囲な歯面データを合成する。

3.2. 多項式近似を用いた歯形形状除去

取得した画像データは、クラウニングやバイアス等の歯形形状による波長の長い成分が含まれている。これら形状成分の影響が大きい場合、うねり成分を顕在化することが容易ではない。この形状偏差を取り除くために、最小自乗法による多項式近似を適用した。表面座標を $Z = f(x, y)$ とした場合、 n 乗の多項式は式 (1) であらわされる。多項式の添数 i, j は最小自乗法により算出される。

$$Z_n(x, y) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

本測定では $n = 3$ 次の多項式を用いて計算をおこなった。形状成分を除去した結果クラウニングによる影響のない平坦な歯面データを得た (Fig. 10)。



Horizontal resolution	1.76 μm
Vertical resolution	0.1 μm
Viewing range (X)	10 mm
Viewing range (Y)	5 mm

Fig. 9 Measuring equipment and basic specification

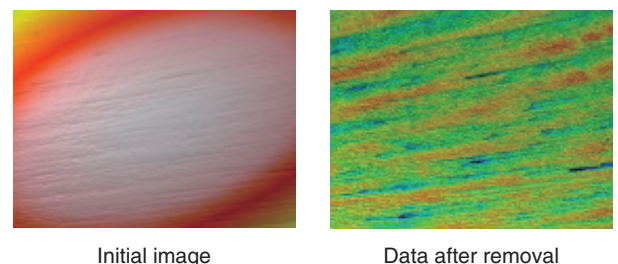


Fig. 10 Removal with polynomial approximation

3.3. 2次元高速フーリエ変換によるうねり成分の検出

形状偏差を取り除いた3次元画像データには、歯切り加工時の切り刃の偏芯運動によって発生したうねりと思われる筋目が見受けられる。一方それとは方向の異なる波長の短い筋目が発生しうねりの筋目を覆っている。この二つの筋目の周波数成分を検出するために2次元高速フーリエ変換(2次元FFT)を用いた。Fig. 11に2次元FFTの概要を示す。2次元である画像は水平方向と垂直方向の二つの周波数成分を持っているため、水平方向と垂直方向に対してそれぞれ1次元の周波数解析をおこなっている。

2次元FFT解析結果グラフの見方をFig. 12の解説図を見ながら説明する。グラフの縦横方向はそれぞれ画像データの垂直方向、水平方向をあらわす。なお画像データの上辺は歯先線と一致させて計測をしている。中心点からの距離はうねりの周波数をあらわしており中心から離れるにしたがい高周波成分となる。今、画像データ上に一定の方向に周期性を持つうねりのピークを結ぶ等高線が存在すると右図のグラフのようにその波長に相当する中心からの位置に高輝度部としてあらわれ、輝度は振幅の大きさを示す。中心点と高輝度点を結ぶ直線のベクトルはうねりのピーク等高線に垂直な方向をあらわす。本データにおいてうねりは歯先線に対し19.8度の方向に傾斜していることを示している。

3.4. 逆高速フーリエ変換による3次元データの抽出

解析ソフトウェア上にて分析された2次元FFTデータの中から、高輝度部のうねり成分のみを分離抽出した後に同ソフトウェアの逆高速フーリエ変換をおこない3次元データを生成する。これらのフィルタリング処理を経て方

向と周期の異なるさまざまな性状が存在する歯面3次元データの中から、うねり成分のみを抽出し得られた3次元データをFig. 13に示す。データはかみあい1サイクルに相当するかみあい軌跡線(Fig. 13図中のPath of contact)を含む周辺広範囲の歯面うねりを捉えたものであり、その上辺は歯先線(Fig. 13図中のTip)と一致し、左右辺は歯先線に垂直方向な測定範囲を示す。またコンター図の色調は歯面法線方向のうねり高さを示す。この3次元データは、同じ角度に傾斜したうねり性状がかみあい軌跡線上を横切るように規則正しく並んでいる様子を明確にとらえており、かみあい1サイクルの間に約7山のうねりが存在している。本手法によりギヤ放射音の原因となる特定のうねり成分のみを抽出することが可能となり、うねりの定量評価手法の目的を達成した。

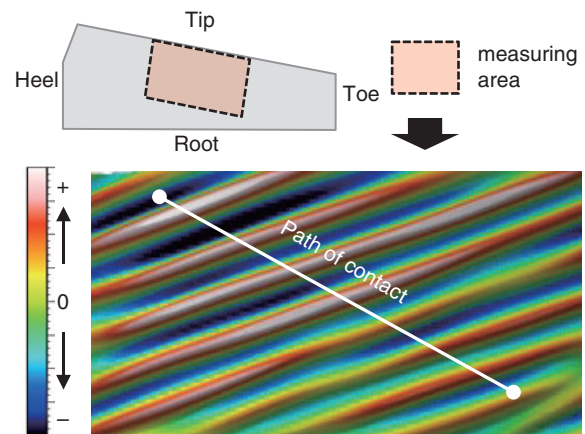


Fig. 13 3D data of tooth surface waviness

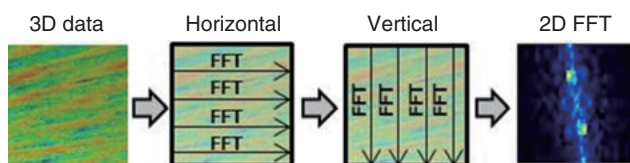


Fig. 11 Calculation procedure of 2D FFT

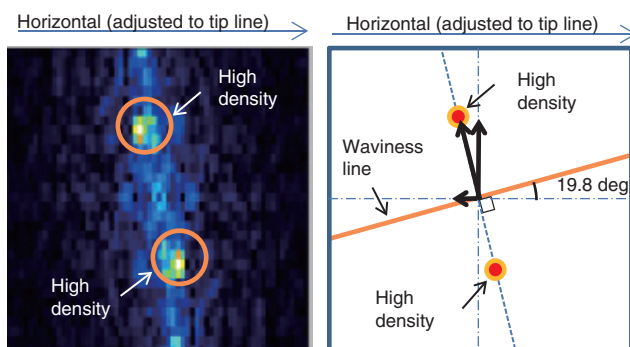


Fig. 12 Calculation result of 2D FFT

4. うねりの定量評価結果と実機検証

本手法を用いて実際のハイポイドギヤの歯面うねりを測定評価し、手法の確からしさとギヤ音発生メカニズムの検証をおこなった。抽出された歯面うねり3次元データ上のかみあい軌跡線上のうねり形状から周波数解析をおこない、かみあい1サイクルに対するうねりの周期次数成分と振幅値を算出評価した。かみあい軌跡線についてはクリンゲルンベルグ社製ソフトウェアから得られるPath of contactの座標情報を元に3次元データ上のかみあい1サイクルに相当する区間を特定し断面曲線を切り出した。

検証に用いた試験歯車ハイポイドギヤセットの詳細条件をTable 1に示す。カッターヘッド切り刃の取付け偏芯精度は通常の量産工程では数ミクロンに管理をしているが、試験歯車では歯面うねりが顕著に発生するように意図的に大きく再現して歯切り加工をおこなっている。この試験歯車は2.2.節に示される、従来の測定手法では定量評価ができなかったものと同一の仕様である。

Table 1 Detailed conditions of hypoid gear for inspection

	Pinion	Gear
Number of teeth	21	29
Module		3.724
Pinion offset		
Mean spiral angle	36.1 deg	30.8 deg
Sum of pressure angle	40 deg	40 deg
Cutter head type	Stick blade	Stick blade
Cutter head radius	2.25 inch	2.25 inch
Number of cutter blade pairs	11 pairs	11 pairs
Cutter rotation speed	211 rpm	239 rpm
Generating feed speed	4.54 deg/sec	5.71 deg/sec
Cutter runout on machine	0.03 mm	0.03 mm

4.1. 実機ギヤ放射音と歯面うねりの周期性比較

本手法により抽出した歯面うねりのかみあい軌跡線上の形状データと周波数分析結果を以下に示す。Fig. 14 はうねり性状のみを抽出した歯面 3D データのかみあい軌跡線の長さ方向を横軸に、歯面法線方向の形状を縦軸に示した断面曲線図である。Fig. 15 は Fig. 14 データを周波数解析した結果であり横軸にかみあい 1 サイクルに対する周期次数成分を、縦軸に歯面法線方向の振幅値を示す。本手法により試験歯車に発生した歯面うねりは平均ピッチ 0.65 mm であり、かみあい 1 サイクルに対して 8 次付近に周期ピークを持ち最大振幅 0.55 μm の特性と評価できる。次に Fig. 16 に同一のハイポイドギヤを組み込んだ実装試験結果を示す。これはトランスミッションおよびパワートランスファ

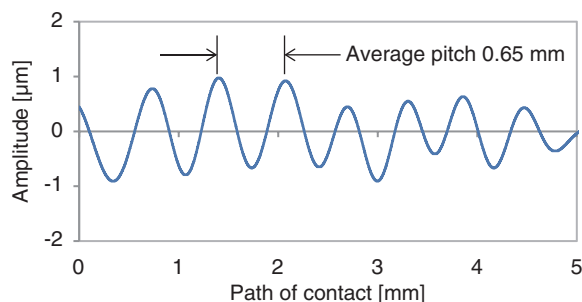


Fig. 14 Section curve data of waviness extracted



Fig. 15 Frequency analysis result of waviness extracted

ユニットを台上ベンチに設置し、所定の位置にてマイクロフォンで測定した放射音データであり縦軸は平均音圧、横軸は周波数のハイポイドギヤのかみあい 1 サイクルに対する次数値を示す。本データの矢印で示す部位には 7.6 次付近の周波数にピークを持つ顕著なギヤ放射音の発生が確認でき、これは歯面うねりの測定、評価結果より得られた特性値と一致する。以上の検証結果より歯面うねりにより高次数ギヤ放射音が発生するメカニズムが明らかとなったと同時に本評価手法の検出精度の確からしさが証明できた。

4.2. 実機ギヤ放射音と歯面うねりの振幅値の関係

4.1. 節の試験歯車と同一諸元仕様のハイポイドギヤ複数について同様の歯面うねりの測定評価と実装試験をおこなった。これらのギヤは量産管理条件の中から無作為に選出したものである。結果より歯面うねりと高次数ギヤ音の関係を Fig. 17 にまとめた。グラフ横軸に歯面うねりの振幅値を、縦軸に実機ユニットでのギヤ放射音ピークの音圧値を示す。ギヤ放射音の音圧値はうねりのピーク周期次数と同じ 7.6 次の値をプロットする。このグラフより放射音とうねりの振幅値の間には正の相関があり、うねりの振幅値の増加にともないギヤ放射音ピーク値が増加する傾向を定量的に捉えた。

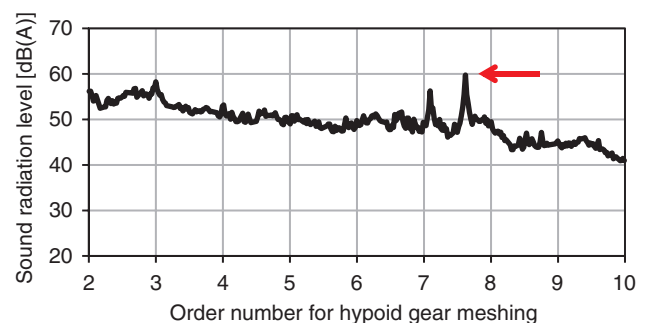


Fig. 16 Result of power transfer unit test

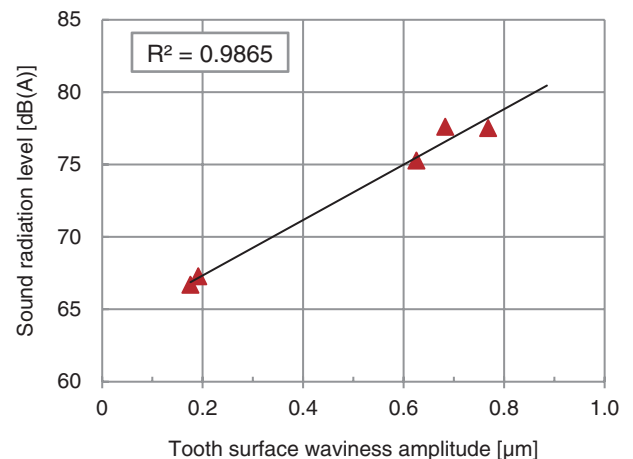


Fig. 17 Relationship between waviness amplitude and sound radiation level

5. まとめ

従来から経験的に知られてきた、ハイポイドギヤ歯面に発生した周期性のあるうねり性状と高次数ギヤ音の関係について、本研究ではうねりの評価手法の検討を通じて以下のことを達成することができた。

- (1) 歯面の3次元測定データから2次元高速フーリエ変換と逆高速フーリエ変換を用いた画像フィルタリング手法よりうねり成分のみを抽出し、従来には無い歯面うねりの定量評価手法を新たに構築した。本手法による測定結果から歯面うねりが高次数ギヤ音の発生要因であることを明らかにした。
- (2) 本手法により評価されたピーク次数のうねり振幅値と実機ギヤ放射音の音圧値の相関関係を定量的に捉え、同時にうねり振幅値の指標基準を得た。これよりギヤ単品の定量評価が可能となった。

参考文献

- (1) 加藤昭悟:ハイポイドギヤ精度測定技術に関する研究, 京都大学学位論文(博士) 205p., (1996)
- (2) 柴田好克, 牧泰希, 森勝浩:歯車のかみあいにおける歯面修整及びピッチ誤差のかみあい伝達誤差に及ぼす影響, TOYOTA Technical Review, Vol.52, No.2, p.40-47, (2002)
- (3) 渡辺健, 白木啓一郎:直交歯車箱によるハイポイドギヤ振動と放射音の基礎試験, スバル技報, 第41号, p.138-144, (2014)
- (4) 江上領, 近藤忠身, 伊熊元紀:ねじ型工具歯車加工に起因するゴースト音発生メカニズム, Honda R&D Technical Review, Vol.20, No.2, p.99-105

■著 者■



堀 剛



宿島直人