

技術論文

ベベルギヤの耐久性向上（歯形計測・歯当たり解析による歯形の最適化）

Development of Optimal Tooth Flank in Spiral Bevel Gear by Contact Analysis and Measurement

長 田 哲¹⁾
Tetsu Nagata
七 野 勇 人¹⁾
Hayato Shichino
田 村 幸 雄¹⁾
Yukio Tamura
川 井 仁²⁾
Hitoshi Kawai
太 田 順 子³⁾
Yoriko Ohta
小 森 雅 晴⁴⁾
Masaharu Komori

ベベルギヤは複雑な歯面形状をしており、さらに直角軸に保持された状態で噛み合うため、非常に複雑な噛み合い状態となっている。また、これまで加工機メーカーから提供される経験的手法に歯形設計や生産のコントロールを独占的に委ねられてきた背景があり、詳細な検討は困難であった。近年、大学や自動車メーカーを中心にベベルギヤの歯形の計測や噛み合い状態を把握するためのシミュレーション技術の開発が進められている。そこで、コマツにおいても大型のベベルギヤの耐久性を向上するために、これまで実施してきた経験的手法から脱却し、大型のベベルギヤにも適用可能な歯形計測から噛み合い状態を計算する歯当たり解析までの評価技術を開発し、大型ダンプトラックの開発に適用した。

Bevel gears have complicated tooth flank form and, as they mesh perpendicularly, the meshing is in a very complicated condition. On the other hand, as tooth flank form design and production control have been exclusively entrusted to the empirical method provided by cutting machine manufactures so far, detailed study was difficult. In recent years, the development of the simulation technology is being made to measure the tooth flank form of bevel gears and to grasp their meshing conditions led by universities and automotive manufacturers. Given this situation, Komatsu has got rid of the empirical method implemented so far, and developed evaluation technologies ranging from tooth flank form measurement applicable to large bevel gears to tooth contact analysis that calculates meshing condition, and applied these technologies to the development of heavy-duty dump trucks.

Key Words: ベベルギヤ, 歯形計測, 歯当たり解析

¹⁾研究本部 材料技術センタ ²⁾開発本部 パワートレイン開発センタ ³⁾開発本部 技術統括部

⁴⁾京都大学大学院 工学研究科

1. はじめに

ベベルギヤは交わる 2 軸間に回転と動力を伝える歯車でダンプトラックなどの建設機械のアクスルなどに使用されており、中でもスパイラルベベルギヤは非常に複雑な歯面形状であることと、直角軸で保持されながら噛み合うために、噛み合い状態を把握するのは非常に困難であった。またベベルギヤの歴史においては、設計から生産のコントロールにおいて、全て加工機メーカー（グリーンソン社とクリンゲンベルク社）から提供される経験的手法に独占的に委ねられてきた背景から、これまでは熟練した技術者・作業者の勘と経験に支えられてきており、コマツもその例外ではない。

このような状況から脱却するために、日本の自動車メーカーは 1975 年頃から歯形の計測技術の開発に着手し、近年になって測定機が市販されるようになった⁽¹⁾。また、複雑なベベルギヤの噛み合い状態を把握するためのシミュレーションの開発⁽²⁾も進み、自動車の開発に適用され始めている⁽³⁾。

コマツにおいても、これまで実施してきた経験的手法から脱却し、高い耐久性と信頼性を確保できるベベルギヤを開発するために、大型のベベルギヤの歯形計測から噛み合い状態を計算する歯当たり解析までの技術を開発し、大型のダンプトラックの開発に適用したので報告する。

2. ベベルギヤの特徴と問題点

本報告で対象とするスパイラルベベルギヤは図 1 の例に示すように、ダンプトラックのアクスルにおいて用いられているギヤで、エンジンから出力された動力を車輪へ伝えるために回転軸が直交している。スパイラルベベルギヤは曲がり歯傘歯車とも呼ばれており、その歯面形状は図 2 に示すように、歯幅方向に曲線でねじれており、両端で歯形方向の長さが異なることが外見的特徴である。また、ベベルギヤの歯面形状およびデファレンシャルの構造的な特徴により、動力を伝達する際にデファレンシャル全体が変形してしまうことから、ベベルギヤとピニオンにはディフレクションと呼ばれる噛み合い位置のずれが発生する。図 3 はデファレンシャルの FEM 解析による負荷時のギヤが変形する様子を示したものである。変形した結果、ディフレクションがどの程度であるかは未知であり、ギヤの諸元（ねじれ角や圧力角など）や支持構造によって変化するため、経験的にギヤおよび構造の設計が行われてきた。

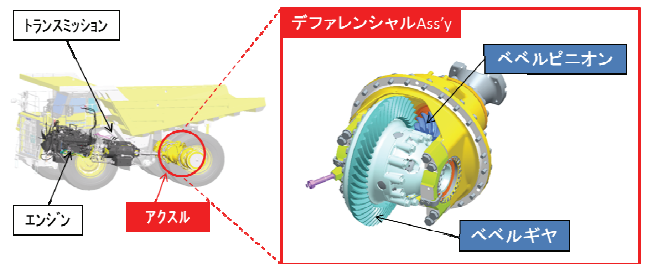


図 1 ベベルギヤが使われている場所

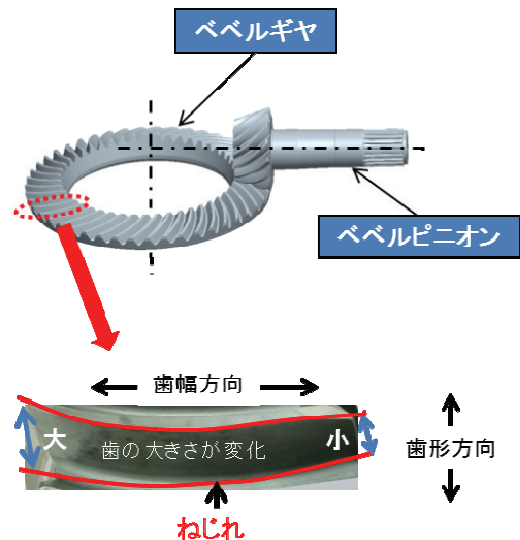


図 2 ベベルギヤの歯面形状

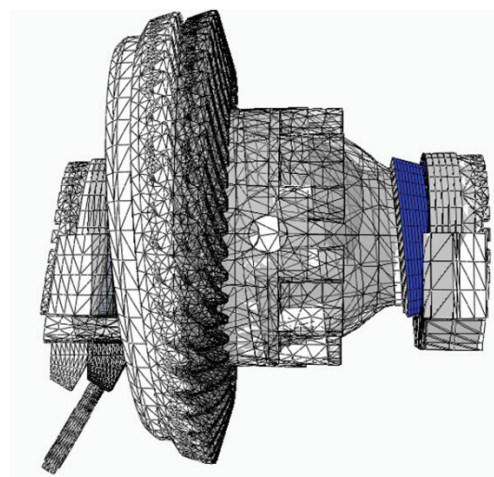


図 3 解析によるデファレンシャルの動力伝達時の変形の様子

ベベルギヤは70年以上前に開発され、自動車ではハイポイドギヤとして世界中で現在も生産されている重要なギヤである。しかし、ギヤの設計および生産のコントロールにおいて、全て加工機メーカーから提供される経験的手法に独占的に委ねられてきたために、ベベルギヤの性能・品質の改善は停滞させられてきた。その一因として、歯面形状を幾何学的に把握できなかったことが挙げられる。一般的な円筒歯車はその多くがインポリュート歯形を基準としており、歯形測定機を用いて直接歯面を計測し、精度管理が行われている。一方、これまでベベルギヤは歯面を計測できなかったため、いわゆる「歯当たり」(ギヤとピニオンが噛み合った際に歯面に塗った塗料が剥がれた領域)によってギヤの歯面形状を判定してきた。図4にベベルギヤの製造工程を示す。歯切り工程、浸炭焼入れ工程を経て、最後にピニオンとギヤを砥粒と一緒に噛み合わせながら歯面を削るラッピングで歯面形状を整える。この組み合わせのピニオンとギヤのセットで最後に歯当たり検査を行い、その組み合わせのままアクスルへ組み込まれる。歯当たり検査では、負荷をかけない状態で単に歯面上の比較的高い範囲が検出されるのみで評価できるのは歯面の一部であり、また詳細な歯形を知ることもできない。実際にベベルギヤが動力を伝達する場合には、ディフレクションが発生した状態で歯面全体を使って噛み合うが、その状態を歯当たり検査から推し測ることはできない。また、歯当たりの判定は人の官能評価によるため、人による差異が大きいのも問題である。このような技術的な課題によって、通常円筒歯車で行われている歯形を基準とした設計・製造をベベルギ

ヤでは行うことができず、品質の向上と信頼性の確保を困難にしてきた。

一方で大型の建設機械に使用されるベベルギヤの耐久性は、その歯面形状に大きく影響されるために、良い噛み合い状態が得られる歯面形状を評価できるようにするために、自動車のハイポイドギヤ用に市販されている歯形測定機を大型のベベルギヤに拡張するとともに、ギヤの噛み合い状態をシミュレーションできる技術を大型のベベルギヤ用に開発した。

3. 歯形に基づく評価技術の開発

3.1 歯形設計手法の提案

従来のベベルギヤの開発手法は、図5(a)に示すようにトライ&エラーで歯形を試作し、無負荷の歯当たり試験により歯形の評価を行ってきた。そのために、詳細に歯形を検討することができず、歯形を決定するまでのやり直しにより非常に時間がかかることが多く、さらにベンチ試験でしか負荷時における歯当たりを評価することができなかった。そこで図5(b)に示すように、事前に推定したディフレクションを基に狙いの歯形を設定し、噛み合い状態をシミュレーションする「歯当たり解析」を行う。これにより十分な机上検討を行なった後にギヤの試作を開始する。試作したギヤは、大型ベベルギヤ専用の歯車精度測定機(大阪精密機械(株)と共同開発)により歯面形状を計測する。次に計測した実際の歯面形状を用いて歯当たり解析を行い、狙いの噛み合い状態であれば再び歯切り条件の検討へ戻ることで、ベンチ試験

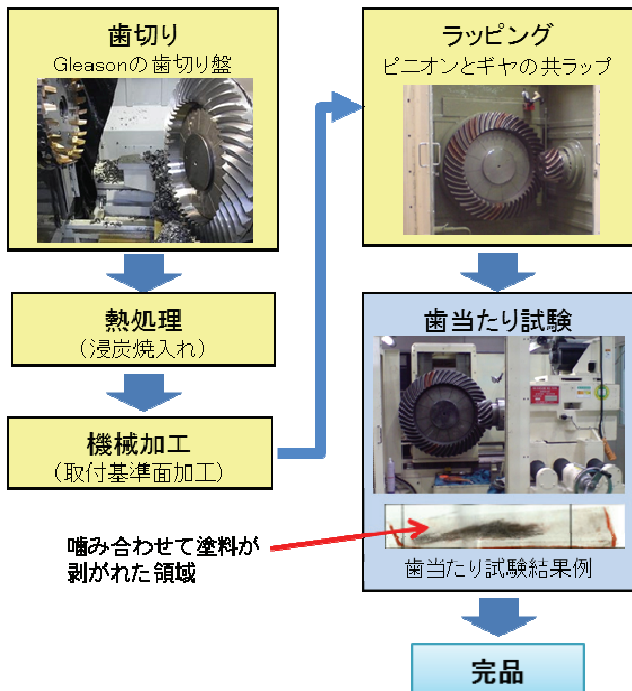


図4 ベベルギヤの製造工程

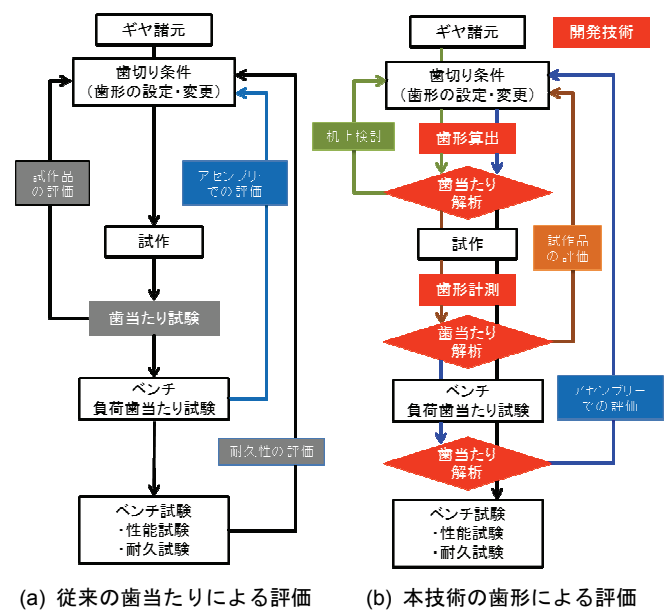


図5 ベベルギヤの開発手法

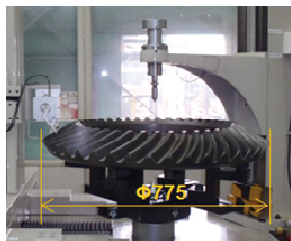
を行う前に十分に検討・確認された歯形を開発することが可能になる。またベンチ試験後にも歯当たり解析を行い、想定したディフレクションの適正さを評価することができ、耐久ベンチ試験を行う前に支持剛性を考慮した歯形を設計することができる。これにより耐久性に優れた歯形を効率的に開発することが可能となった。

3.2 大型ベベルギヤ測定機による歯形計測

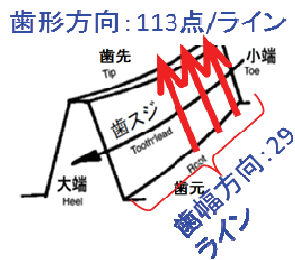
今回の大型ベベルギヤ専用の測定機は、自動車のハイポイドギヤ用に市販されていた歯形測定機を基にして大型のベベルギヤ用に開発されたものである。図6は大型ベベルギヤを計測する様子を示したもので、歯面形状を詳細に計測することができる。計測は歯形方向に29ライン・歯幅方向に9ラインで、1ラインにつき113点の計測を行うことができる。従来の3次元測定機での計測点が1歯面につき45点に対し、本測定機は3,277点と圧倒的に詳細な歯面全体の形状を計測できることが特長である。計測は歯切り時の加工条件から算出した理論加工歯面を基準に、その基準面からの偏差を出力する。図7は計測結果をコンター図形式に表現したもので、ギヤは理論加工歯面基準、ピニオンはギヤの理論加工歯面の共役歯面（理論加工歯面と偏差なく噛み合う面）基準からの偏差を表し、歯面全体で評価可能である。図7に示す計測例からわかる様に、実際には複雑な曲面を呈している歯面も理論加工歯面を基準にすると、ギヤは平坦な形状をしており、ピニオンはクラウニングのついたような形状をしているのが一般的である。

3.3 歯当たり（噛み合い）解析

噛み合い解析は、京都大学がハイポイドギヤ用に開発してきたソフトウェアをベースにコマツの大型ベベルギヤの解析ができる様に共同開発を行なった。図8は実測したピニオンとギヤの歯形が噛み合う様子を模式的に示している。噛み合い解析において用いている手法は、まずギヤの回転角を求め、次に回転角度を順次変えることによってピニオンとギヤが最も近い点の集合を接触線と定義し、各噛み合い位置での荷重分担を接触線上に受けた場合に局部ごとに2次元のヘルツ接触式で接触幅を算出している。これを計測した互いに偏差のある歯形を組み合わせて解析することにより、実際の歯当りに近い結果を再現することができる⁽⁴⁾。また無負荷の噛み合い解析は、ピニオンとギヤの面が一定の距離以内に近づいた領域を無負荷の歯当たりとして結果を算出する。図9は実際の無負荷の歯当たり試験と実歯形の解析結果を比較したもので、よく一致していることがわかる。無負荷の歯当りは実物でも比較的簡単に計測できるので、シミュレーションと実体との相関を評価することが可能である。



(a) 歯形計測時の様子



(b) 歯面の計測点
(大阪精密機械株式会社測定マニュアルより抜粋)

図6 大型ベベルギヤの歯形測定機

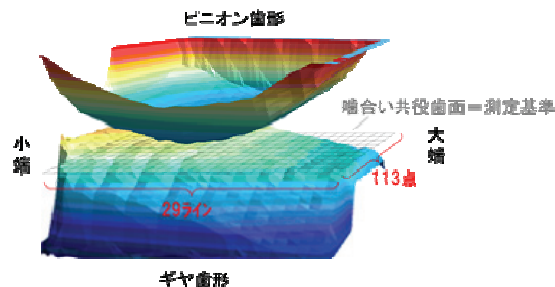


図8 計測した歯形同士での歯当たり解析



(a) 歯当たり試験による結果



(b) 計測した歯形による解析結果（無負荷）

図9 無負荷での歯当たり試験と解析結果の比較

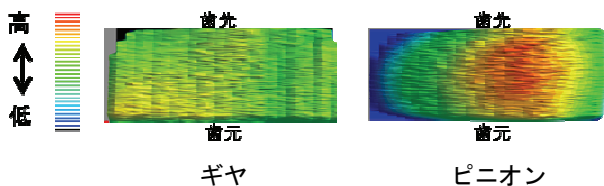


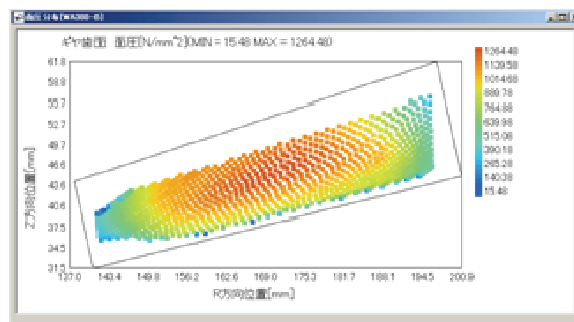
図7 歯面計測結果のコンター図

解析では負荷時の歯当たりだけでなく、噛み合い時の面圧・滑り速度・フラッシュ温度・伝達誤差等も算出できるのが特長で、想定もしくは実測したディフレクションを入力することで、実体に近い負荷時の歯当たりを再現することができる。図 10 は解析の出力例を示したもので、面圧、フラッシュ温度、伝達誤差など強度や騒音の検討に必要な項目を評価することができる。

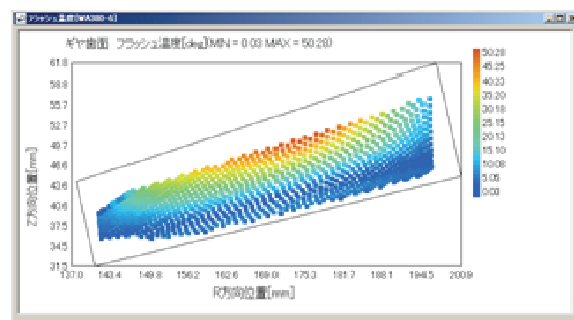
4. 噛み合い状態の評価

ベベルギヤでは組み付け時の調整や歯当たりの移動量について、図 11 のようなピニオン・ギヤの軸方向およびオフセット方向を定義し、各軸の相対的な差で計測・評価を行なっている。

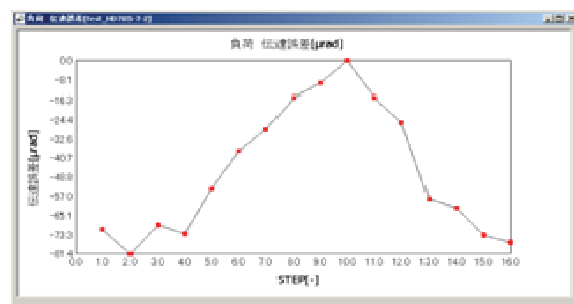
噛み合いに影響するディフレクションはベベルギヤの支持構造により異なるが、その値を求めるための方法として、実際のギヤボックスでの負荷歯当たり試験から推定する方法がある。負荷をかけた場合の実際の変形量は図 3 に示したとおり複雑になっていると考えられるが、ここではあくまでそういった変形によるピニオンとギヤの相対位置のずれを図 11 の VHG 各方向にずれたと定義して考える。負荷歯当たり試験の方法は表 1 に示す様に、まず正規の歯当たりの初期位置において負荷を 2~3 段階に分けて歯当たり試験を実施し、各負荷における実際の歯当たりを記録する。解析も同条件で行い、解析による歯当たりの位置と実体の試験での歯当たりの差がディフレクションに相当すると考え、解析上で実際の歯当たり位置になるように VHG を調整して合わせることで、各負荷におけるディフレクションを VHG の移動量に換算して推定を行う。推定の精度を上げるためには、初期の位置を 2~3 通り H 方向にずらして同様の試験と解析を行うことで、図 12 のようなディフレクションの推定を行うことが可能である。



(a) 面圧



(b) フラッシュ温度



(c) 伝達誤差

図 10 解析による出力例

表 1 負荷歯当たり試験によるディフレクションの推定

負荷トルク		組付け 基準位置	H -0.2	H +0.2	H +0.3
4% (フルトルク比)	試験				
	解析				
25%	試験				
	解析				
50%	試験				
	解析				

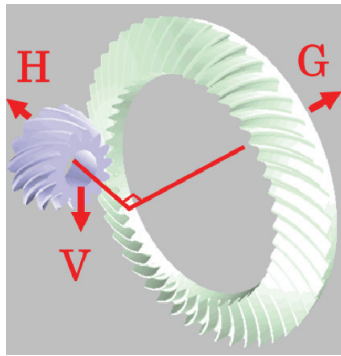


図 11 ベベルギヤ各軸の定義

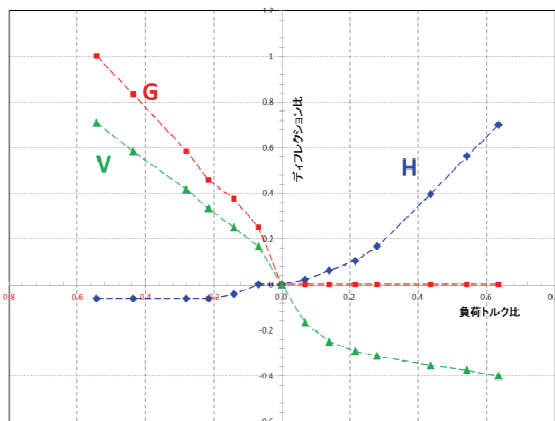


図 12 求められたディフレクション

5. 新型ダンプトラックのベベルギヤ開発

図 5 に示した新しいベベルギヤの設計手法を用いて、大型ダンプトラックの新規開発機種におけるベベルギヤの歯形設計を行なった。新規設計の場合、設計の段階でディフレクションを実測することができないため、支持構造が似ている車格の近い既存のデファレンシャルで実測した結果を参考に開発機種のディフレクションの設定を行ない、目標とする耐久性が得られるように歯形を設定した。

実際の試作においては、歯形計測から求めた熱処理ひずみを考慮して、完品で設定した歯形が得られる様に歯切り条件の変更を行った。次に製作したベベルギヤを用いて負荷歯当たり試験を行なったところ、事前検討では図 13 (a) のような歯当たりになる狙いに対し、図 13 (b) のように想定とは異なる結果になり、この噛み合い状態では目標とする耐久性が得られないと判断された。ここで今回の歯当たり解析と実際の試験での歯当たりの差こそがディフレクションの差と考えられるので、図 13 (c) の歯当たりを再現するディフレクションを推定した結果、想定よりもディフレクションが小さいことがわかった。そのため、確定したディフレクションに適した歯形を再

設計し、再度同様の試験を行なったところ、図 14 のように試験結果と解析結果が一致した。

これら一連の開発において、歯形に基づいたベベルギヤの設計および耐久性の評価を行うことができたが、さらにディフレクションの机上検討の必要性が明らかになったので、現在は FEM によるディフレクションの算出技術の開発を進めている。

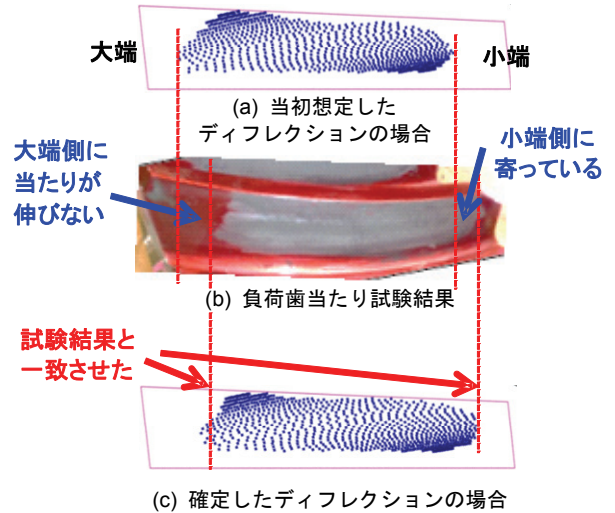


図 13 新規開発したベベルギヤの歯当たり

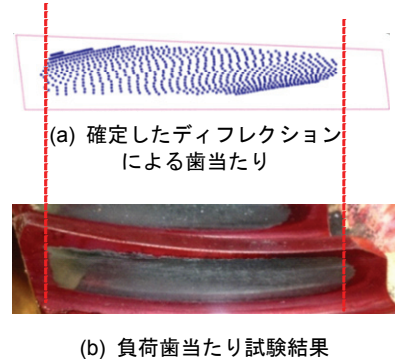


図 14 歯形改善後の歯当たり試験結果

6. まとめ

1. 自動車メーカーを中心に進められているハイポイドギヤの歯形計測および歯当たり解析技術を大型ベベルギヤに適用し、従来の歯当たり基準ではなく歯形基準によるギヤの設計手法を開発した。
2. 開発した手法を用いて、新機種のベベルギヤの設計を行い、適正な歯形を設計・試作することができた。

謝辞

なお、本研究を進めるにあたり、京都大学工学研究科竹田龍平氏に多大なる協力を得た。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) Ryohei Takeda, Zhonghou Wang, Aizoh Kubo, Soichiro Asano, Shogo Kato, "Performance Analysis of hypoid gears by tooth flank from measurement", The JSME International conference on motion and power transmission, The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (2001), pp595-601.
- (2) 小森雅晴, 久保愛三, 西野達也, 竹田龍平, 西野隆之, 奥田健司, 山本真司, "創成歯切り勾配歯ハイポイドギヤの運転性能解析法", 日本機械学会年次大会講演論文集 (2004.4), pp.157-158.
- (3) 飛澤圭一郎, 狩野正樹, 斎木康平, 花川剛, 横山剛士, "基準歯面を用いないハイポイドギヤ実測歯面の歯当り解析法", 自動車技術会論文集, Vol.37, No.1 (2006), pp.119-124.
- (4) 久保愛三, 樽谷一郎, Claude Gosselin, 野中铁也, 青山昇, 汪中厚, "ハイポイドギヤ・ベベルギヤの運転性能解析法 (第2報, 歯面形状定義基準面のとり方がシミュレーション精度に及ぼす影響)", 日本機械学会論文集 (C編), Vol.52, No.599, pp.2842-2850 (1996)

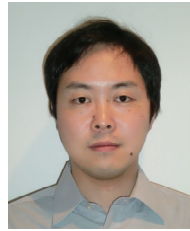
筆者紹介



Tetsu Nagata
なが た 哲 2002年コマツ入社。
現在, 研究本部 材料技術センタ所属。



Hayato Shichino
しち の はや と
七 野 勇 人 1987年コマツ入社。
現在, 研究本部 材料技術センタ所属。



Yukio Tamura
た む ら ゆ き お
田 村 幸 雄 2007年コマツ入社。
現在, 研究本部 材料技術センタ所属。



Hitoshi Kawai
かわ い ひ と し
川 井 仁 2007年コマツ入社。
現在, 開発本部パワートレイン開発センタ
アクスル開発 Gr 所属。



Yoriko Ohta
お お た よ り こ
太 田 順 子 2004年コマツ入社。
現在, 開発本部 技術統括部所属。



Masaharu Komori
こ も り ま さ は る
小 森 雅 晴
現在, 京都大学大学院 工学研究科
機械理工学専攻 准教授。

【筆者からひと言】

本研究は京都大学との産学連携を通じた共同研究として実施した。今回の技術開発と適用により、一般的な円筒歯車と同様の計測・解析がベベルギヤでも可能になり、特に大型ベベルギヤの設計・製造においてこれまで勘と経験に頼っていたことを考えると、大きく「見える化」が進んだのではないかと思う。今後は本開発技術を社内に定着させ、歯形設計だけでなく品質向上や精度の高い強度評価を目的としても活用できるようにしたい。また、本件を遂行するにあたり共同で開発を進めてきた開発本部パワートレイン開発センタ、大阪工場にも深く御礼を申し上げます。