

高速回転歯車の潤滑に関する考察（第1報）

—歯面における潤滑油の挙動と気流の関係—

Consideration on Lubrication of High-Speed Rotating Gear (First Report)

- Relationship between the behavior of lubricating oil and air flow on the tooth surface -

(株) ユニバンス (非) *鈴木 健祐 (株) ユニバンス (非) 堀 和樹

(株) ユニバンス (非) 酒井 香織 (株) ユニバンス (非) 原 智之

Kensuke Suzuki*, Kazuki Sakai*, Kaori Sakai*, Tomoyuki Hara*

*UNIVANCE CORPORATION

1. はじめに

欧州連合から、2035年エンジン搭載（以下 ICE）車の販売を事実上禁止する規制が発表されたのを皮切りに、各国から電動化の普及を推進する政策などが発表されている。それを受けるように、自動車メーカー各社は、電気自動車（以下 BEV）を主軸とした電動化の方針を前面に打ち出している。

当社は、1937年工作機械部品のメーカーとして創業し、1950年にはパワートレイン部品の生産を開始した。その後マニュアルトランスマッシャン、4WD用トランスファーケースなど部品からユニットへと製品群を拡大し、2005年からはハイブリッド（以下 HEV）用ギヤボックスの量産も開始した。

今後はパワートレイン部品および駆動ユニットを量産してきた経験を生かし、軽量・コンパクト・高効率なギヤボックスを低コストで実現することでパワートレインの電動化普及に貢献していく。本稿においては、パワートレインの電動化により必要性が高まっている、高速回転歯車の潤滑に関する考察について、その一端を紹介する。

2. ギヤボックス要求性能と要素技術課題

当社の考える e-Axle（モーター・インバーター・減速機を一体化した BEV 車用ギヤボックス）の要求性能について、ICE 車用ギヤボックスの要求性能をベースに、今後の性能向上、入力要求を反映し明確にした。さらに、

そこから今後の e-Axle 開発に求められる要素技術課題 (Fig.1) を設定した。

本稿では e-Axle 重要課題の一つとなる高速回転歯車の歯面における潤滑油の挙動に関する基礎研究状況について報告する。

3. 高速回転ギヤ潤滑状況可視化

油の噴射からギヤ歯面へ到達するまでの流れと歯面付着後の油の挙動については過去多くの文献で報告されている。しかしながら、過去の研究においては当時の可視化技術、解析技術の限界から e-Axle で要求される回転速度、環境とは異なる条件下での実験であった。そこで本研究では、可能な限り e-Axle で要求される環境に近い、高速回転する歯車周辺の空気の流れと、油の流れについて可視化を試みた。そこで観測された実測結果と、同一条件で数値解析した結果とのコリレーションを取ることで、新たな気づきを見つけ出し、今後の潤滑最適化へつなげることを目的としている。

潤滑状況の可視化および解析の第一段階として、

- ① ギヤ直上への噴射時の歯面潤滑状況確認
- ② ギヤかみ合い始めへの噴射時の潤滑状況確認

の 2 テーマに取り組んだ。可視化方法として油の挙動は、高速度カメラによる動画解析、ギヤ周辺に発生する気流速度は、粒子画像速度測定法 (PIV) にて確認している。数値解析については、熱流体解析の粒子法 (MPS) と有限体積法 (FVM) の連成解析（以下 MPS-FVM）により確認している。

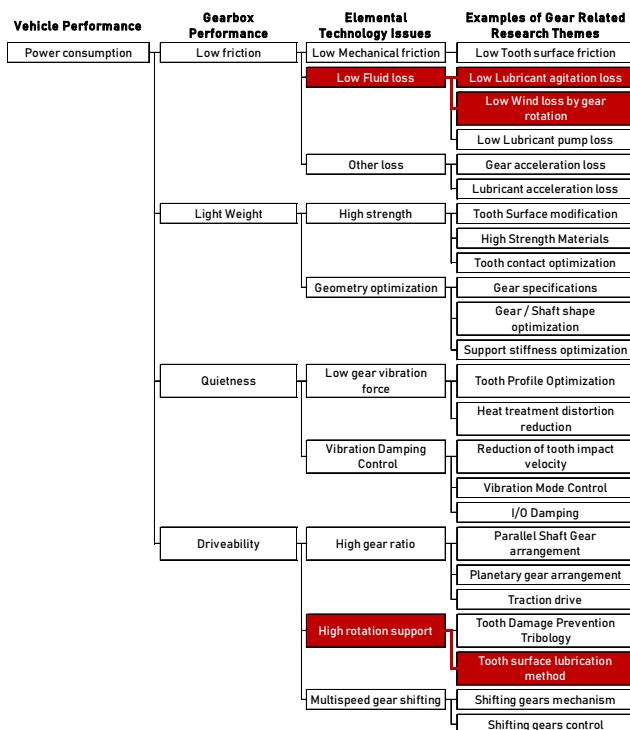


Fig.1 Gearbox Performance Requirements and Elemental Technology Issues

4. 試験方法

4.1 スタンバイ (高速度カメラ)

試験には3軸構造のギヤボックス (Fig.2) を使用し、2軸ギヤの上方 (a部), 1軸ギヤと2軸ギヤのかみ合い位置上部 (b部) にパイプを取り付け、潤滑油を噴射し、その動きを高速度カメラ (Fig.3) で撮影した。

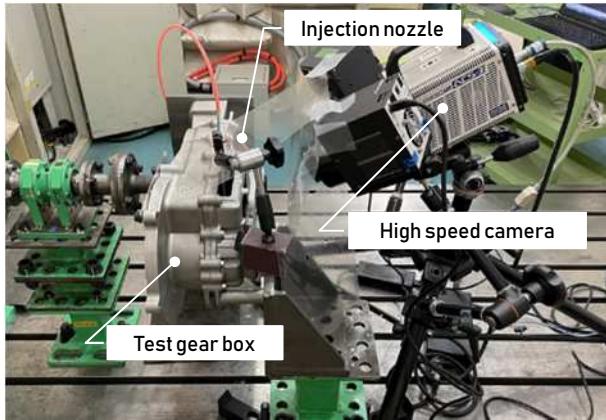


Fig.3 Test Stand-by (High speed camera)

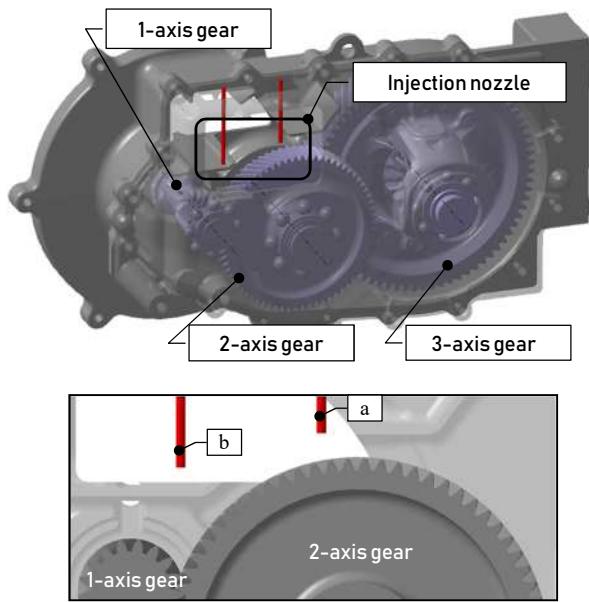


Fig.2 Test Gear Box

4.2 スタンバイ (PIV)

次にPIVについて説明する。PIVでは、ギヤボックス内に微粒子を注入しその微粒子にレーザーを照射し発光させその動きを高速度カメラで撮影することで、気流の速度を測定した。

5. ギヤ直上への噴射時の歯面潤滑状況確認

5.1 標準形式ギヤ歯面への潤滑に関する計算

ギヤ歯面への潤滑状況を確認する上で潤滑油噴射流速とギヤ周速について検討した。かみ合いピッチ円半径までへの潤滑油到達を仮目標とすると、ギヤ周速（ピッチ円上）と潤滑油噴射流速の関係は以下の式で表される。

※この計算にギヤから発生する気流は含まない。

※計算式に関する記号を次のように定める。

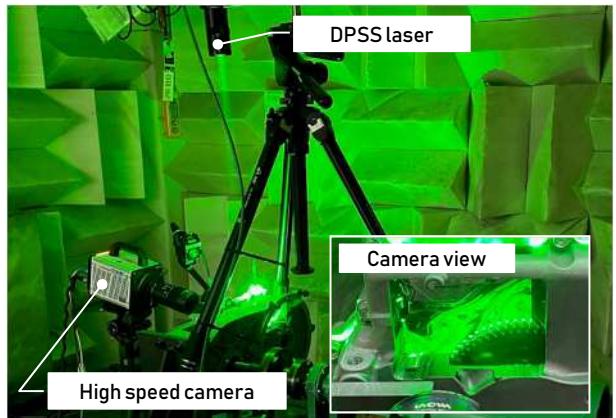
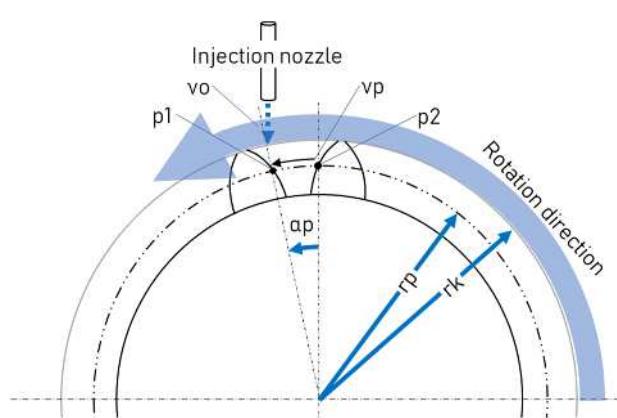


Fig.4 Test Stand-by (PIV)



[Calculation Formula]

$$f(x) = \pi \cdot rp \cdot \frac{ap}{180} = \Delta rp \quad \frac{\Delta rp}{vp} = pt$$

$$rk - rp = ra \quad vo \cdot pt > ra$$

[Symbol]

rk : Radius of tooth tip circle [mm]

z : Number of teeth

rp : Engagement pitch circle radius [mm]

vo : Injection speed [m/s]

vp : Engagement pitch circumferential speed [m/s]

p1 : Injection timing

p2 : Aiming point of injection (Reaches tooth surface)

Fig.5 Calculations for injection lubrication toward the intermeshing pitch circle radius

5.2 実測結果（動画解析）

動画解析（高速度カメラ）を使用しギヤ歯面に噴射した油の挙動について観察した。その結果油の挙動は、大きく3つの状態にあることが観測された。1つ目は、周速が低い条件で発生しており、歯面に沿って油が付着しそのまま歯面上にとどまっている状態。2つ目は、周速が増すと発生し、ギヤ歯先に弾かれた一部の油が歯先上を回転方向側へ滑るように飛散し、一部の油は歯面上にとどまり回転している状態。3つ目はさらに周速が増すと発生し、ほとんどの油が歯先で弾かれ上方へ飛散しながら回転方向へ滑るように飛散し歯面に到達しにくい状態。このことから、周速が速くなると噴射した油の歯面への付着量は減少し十分な潤滑ができない状態にあると考えられる。回転方向側へ飛散する要因としては、歯先に弾かれるることはもちろんのこと、ギヤ歯先外周上に発生する気流も影響していると考える。

5.3 理論式との比較結果

5.1項にて計算される歯面到達限界速度に対し潤滑油噴射流速を変化させた場合のギヤ歯面ピッチ半径到達状況を5.2項の動画解析にて判定した結果をFig.7に示す。

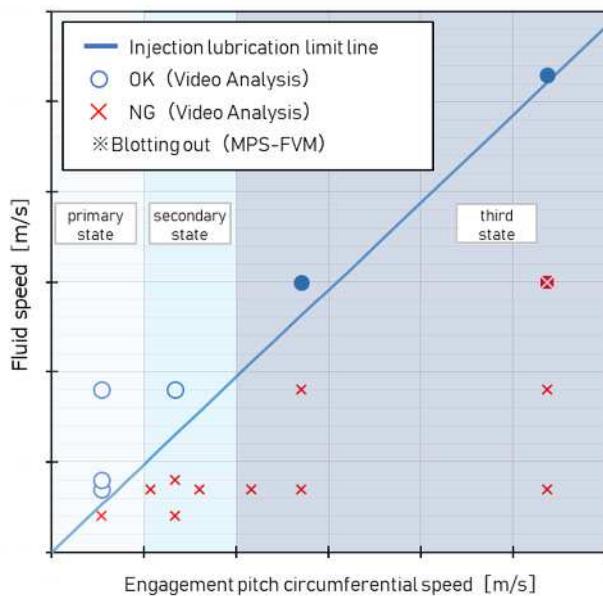


Fig.7 Relation between peripheral velocity and flow velocity for oil adhesion to tooth surface

5.4 ギヤ歯先外周上の気流確認（PIV）

次に、ギヤ歯先外周上に発生する気流についてPIVによる可視化を行った。高速回転中のギヤ歯形により励起された気流はギヤ回転方向に沿ってギヤ歯先外周上に巻き付くように発生し、ギヤ歯先外周近傍で最も速く、ギヤ歯先から離れるに従い遅くなることが確認できた。この結果、歯車周速が速い場合、歯先に衝突し微細化した潤滑油が歯先近傍を流れる気流に巻き上げられたと仮定すると、動画解析で観測されたギヤ回転方向に滑るように飛散する現象の裏付けが得られたと考える。

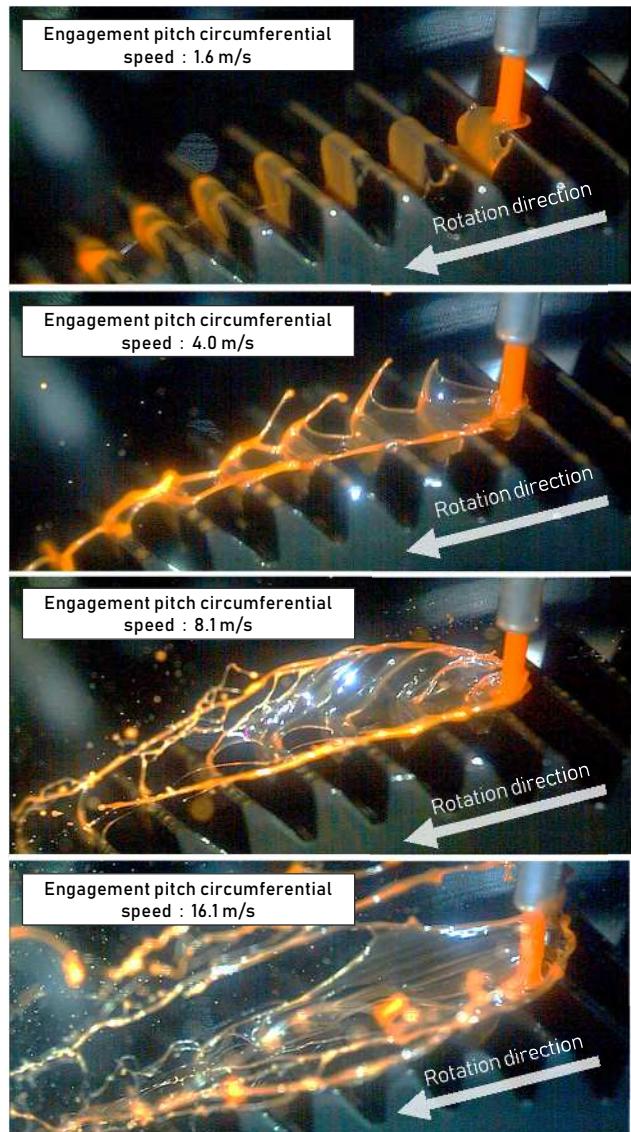


Fig.6 Lubrication status near the outer circumference of gear tooth tips (on 2-axis gear)

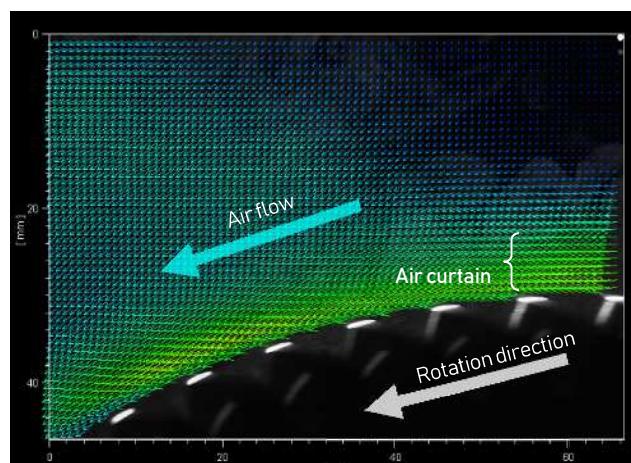


Fig.8 Airflow conditions on outer circumference of gear tooth tips (on 2-axis gear)

5.5 ギヤ歯先外周上のエアカーテンと周速の関係

続いて高速回転中のギヤ歯形により励起された気流の MPS-FVM 解析結果と PIV 解析により実測した気流との整合について考察を実施する。本稿では定量的な比較を行うためギヤ歯形およびギヤ歯先外周近傍を Fig. 9 に示す P1 から P4 の 4 つのゾーンを定義し、それぞれのゾーンにおける MPS-FVM 解析値、PIV 実測値の平均値を Fig. 9 のグラフ上にプロットした。この結果、ギヤ歯先近傍外周部にはギヤ周速と同等の風速の気流が存在し、周速が高いほど高速気流の厚みが増大すること、また MPS-FVM 解析値と PIV 実測値は近似しており傾向にも矛盾がないことから MPS-FVM 解析で気流の予測が可能であると言える。従って、ギヤ周速が速い場合は、厚みのある高速の気流（エアカーテン）が潤滑油の挙動に与える影響は無視できないものと考える。

6. ギヤかみ合い始めへの噴射時の潤滑状況確認

6.1 実測結果（動画解析）

次に、噴射位置をギヤかみ合い始め直上とし、潤滑油を噴射した際の油の流れと気流の影響を観察した。かみ合い始め側は、厚みのある高速気流がぶつかり合う位置となり複雑な気流の発生が予想された。この結果、噴射した油は途中でその方向を湾曲させピッチ円半径まで到達できないことが観測できた。その結果を Fig. 10 に示す。そこで、ギヤ回転方向を逆回転させ、かみ合い終り側をつくりだし観測を行った。その結果、かみ合い始め側の挙動とは異なり直線的に歯面へ向かって噴射できるが、ギヤは遠のき側への回転となるため、ギヤの周速が高い場合には最終的に噴射した油は、ギヤ直上への噴射で観測された第三状態同様にギヤ歯先に弾かれ歯面へ到達することができないことが観測された。

6.2. ギヤ歯面上気流確認（PIV）

次にギヤかみ合い始め側に発生している気流について PIV による測定を行った。その結果ギヤかみ合い始め部では Fig.11 に示すように、1 軸ギヤ上と 2 軸ギヤ上で発生したエアカーテンが合流するポイントから上昇気流が発生する様子が観測された。一方、ギヤかみ合い終り部では Fig.12 に示すようにエアカーテン起点部に向かう吸い込む方向への気流が発生する様子が確認できた。また、これら気流の流れはギヤ周速に連動し周速が増すほど、これら気流の風速も増加することが確認できた。

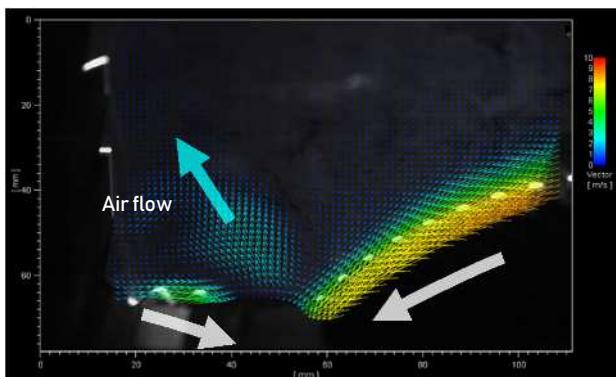
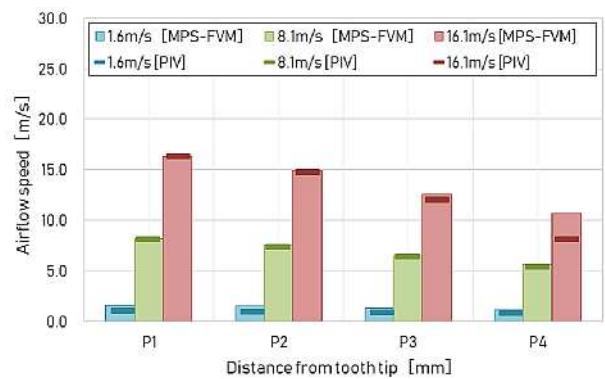
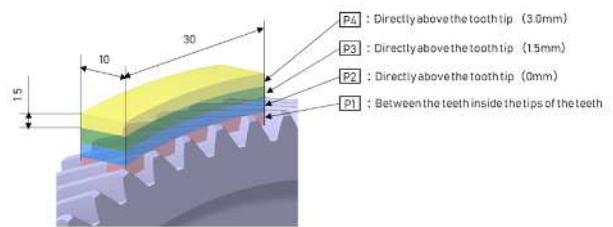


Fig.11 Airflow conditions at the beginning of the meshing side



※Values are the result of reading the average of each point (P1-P4)

Fig.9 Gear tooth surface air flow check results (on 2-axis gear)

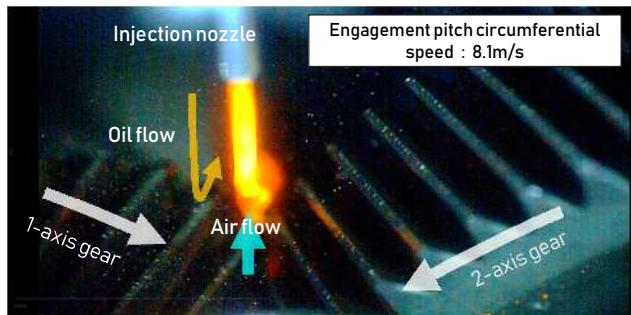


Fig.10 Lubrication situation when injecting to the beginning of engagement side

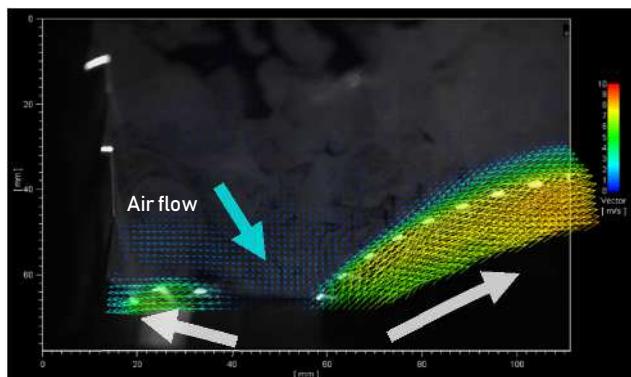


Fig.12 Airflow conditions at the end of the engagement

6.3.ギヤかみ合い部の気流解析結果 MPS-FVM 連成解析

次にギヤかみ合い始め側に発生している気流について PIV から得られた結果を基に MPS-FVM の連成解析より気流と油の流れについて確認した。その結果を Fig.13 に示す。かみ合い始め部から発生する気流は、かみ合い部から上昇方向に上がっているように見える。しかし、よく確認するとかみ合い部直上方向ではなく、エアカーテン半径の小さな 1 軸ギヤ側に傾いた方向に噴き出している。次に気流の吹き出し方について確認した結果を Fig.14 に示す。かみ合い部より発生する気流は、かみ合い部全体（歯幅）から均一に噴き出すのではなく、歯幅方向の中央部からかみ合い終り付近にかけて噴き出す気流の流速が高いことが確認できる。以上より動画解析で噴射した油が湾曲した原因は、歯幅中央部をねらって噴射した油が歯幅中央部からの上昇気流と衝突したことが影響していると考える。

7. 考察

本研究により、以下の項目について確認ができた。

回転するギヤ歯面上に噴射した油の挙動

歯面に付着した油は大きく 3 つの状態に区分される。歯面に付着するもの、歯先に弾かれ円周方向に飛散するもの、ギヤ上方に飛散するものであり、周速により飛散の仕方は異なる。

ギヤ歯先外周上に発生する気流の実測と解析のコリレーション

ギヤ歯先近傍外周部には、高速回転中のギヤ歯形により励起された気流がギヤ回転方向に沿って巻き付くように発生している。その気流は、ギヤ周速と同等の風速で存在し、周速が高いほど高速気流の厚みが増大する。また MPS-FVM 解析値と PIV 実測値は近似しており傾向にも矛盾がないことから MPS-FVM 解析で気流の予測が可能であると言える。

ギヤかみ合い部に発生する気流の挙動

ギヤかみ合い部に発生する気流は、かみ合い始めとかみ合い終りで異なり、かみ合い始め部では吹き出し方向、かみ合い終り部では吸い込み方向に気流が流れている。また、これら気流はギヤ周速と連動し周速が速いほどその風速は増す。噴き出し方にも特徴があり、歯幅方向の中央部からかみ合い終り付近にかけて噴き出す気流の風速が高い。

以上の結果から、潤滑油の噴射方向、位置、噴射速度を工夫することで、ギヤ歯面の潤滑・冷却性能要求を満足しつつ低損失な潤滑方式につながる知見が得られたと考える。また、効率的な開発手法を確立していく上で、実測結果 (PIV) と数値解析結果 (MPS-FVM) とのコリレーションを取り、考察することが重要であると確認できた。

8. まとめ

今回、実環境に近い条件で、油の噴射からギヤ歯面へ到達するまでの流れと歯面付着後の挙動および気流の関係について動画解析、PIV、MPS-FVM の連成解析を用い可視化しその挙動について確認することができた。今回確認できた結果を基に、今後ニーズが高まると予想される超高速回転ギヤボックスを想定し、より最適な潤滑方法を開発するため、以下の課題について引き続き取り組んでいく。

- ・歯溝内歯面上に発生する気流の流れ（ねじれ角の影響等）
- ・噴射以外の潤滑方法の可能性検討
- ・積極的に気流を利用した新たな潤滑方法の開拓

上記、課題を解決することで最適潤滑方法への足掛かりとし電動車両の普及に貢献していきたい。

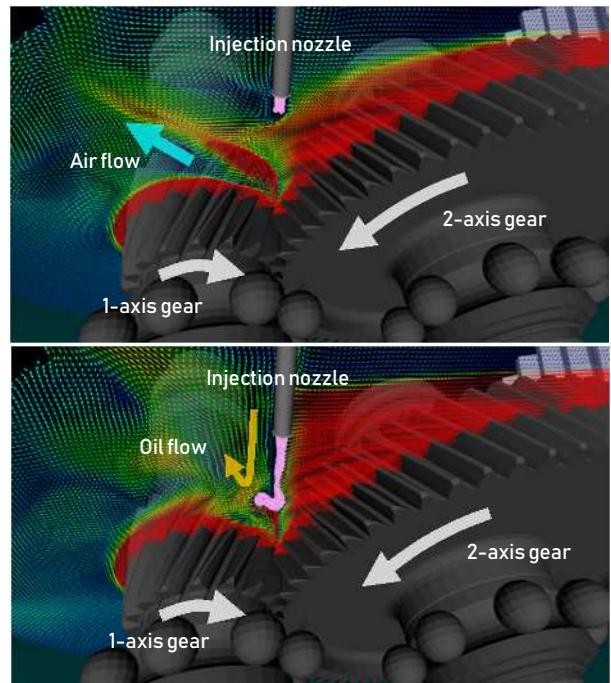


Fig.13 Airflow and oil conditions at the beginning of the engagement side

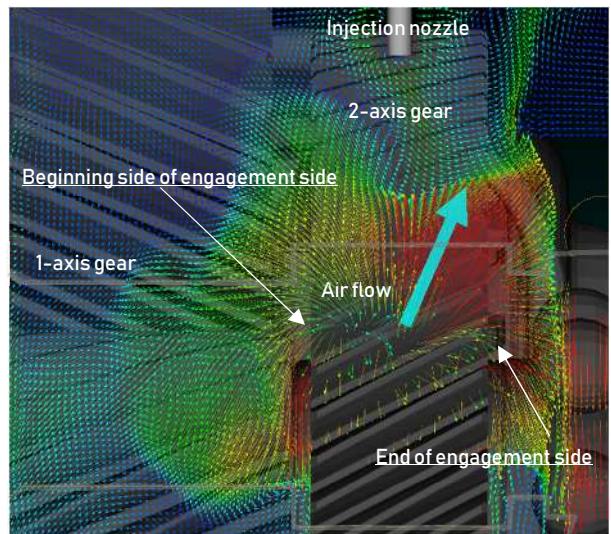


Fig.14 Air flow conditions at the engagement area

文献

- 1) 藤田公明ほか：平歯車のかみあいにおける潤滑油の挙動，“潤滑” 第19巻 第6号（1974）437～447
- 2) 北條春夫ほか：高速はすば歯車のかみあいはずれにおける空気の振舞いについて，機構論[No.04-17] (MPT2004 シンポジウム) pp.315-318[2004.11]
- 3) 北條春夫ほか：アクリルはすば歯車を用いたかみあい部の 媒質流れの可視化，機構論[No.06-6] (第6回機素潤滑設計部門講演会) pp.69-70[2006.5]
- 4) 北條春夫ほか：はすば歯車のかみあい部における媒質流体 の運動挙動の実験的把握，機構論[No.07-15] (MPT2007 シンポジウム) pp.94-97[2007.11]
- 5) 大嶋俊一ほか：水中相似実験に基づいたはすば歯車の歯溝内における潤滑油輸送に影響する流れの実験的考察，機構論[No.11-1] (日本機械学会 2011年度年次大会) [20011.09]
- 6) 北條春夫ほか：流れの可視化に基づくはすば歯車のかみあい外れにおける潤滑油供給の一考察，機構論[No.13-17] (MPT2013 シンポジウム) pp.96-100[2013.11]