FEM シミュレーションによる総転造歯車のまくれ込み発生機構解析*

鈴木 秀 人^{*1}, 西 野 創 一 郎^{*1}
丹 羽 健 児^{*2}, 斎 藤 琢 磨^{*3}Analysis for Initiation Mechanism of Lap Defect
on Full Gear Rolling by FEM SimulationHideto SUZUKI, Souichiro NISHINO,
Kenji NIWA and Takuma SAITO

Full gear rolling, that is one of plastic working methods, has a lot of merits of cost. But it has some problems for practical employment. One of the most principle problem is lap defect. It is initiated on follow side addendum after rolling process. Therefore, the aim of this study was simulating full gear rolling process and solving the lap defect problem with use of FEM analysis by MARC. It was high performance analysis because of the simplification of FEM analysis modeling and made the reduction of total calculating time. The main results were as follows. (1) High performance FEM analysis on full gear rolling process could be carried out in order to examine the locus of rolling dies movement. (2) Lap defect was caused by the difference of material flow between follow and driven side on pinion tooth. (3) Initiation and growth of lap defect could be shown on computer simulation and the result of FEM analysis was roughly the same as the results of proof test. (4) It was suggested that control factor of lap defect was work-hardening exponent (n value). Therefore, blank, which has low n value, makes large lap defect.

Key Words: Plastic Working, Finite Element Method, Proof Test, Lap Defect, Full Gear Rolling, High Performance Computing, Work hardening Exponent

1. 結 言

近年, 増肉プレス法⁽¹⁾をはじめとする新しいニアシェイプ塑性加工法が考案され, 輸送機器, 特に自動車の原価低減に大きく寄与している。その中でも歯車総転造は, 最も注目を集めている。従来, 歯車の製造工程は, 切削加工であるホブ切りが一般的に採用されているが, 一方で製品のコストダウンや歩留の向上を狙いとして, 切削加工をいっさい行わずに転造のみで加工する総転造が試みられている。

しかしながら, 実際に歯車を総転造で製造すると歯面にまくれ込みと呼ばれる欠陥が生じ, 実用が困難な状況下にある。まくれ込みの解決手段の一つには転造ダイスの形状改善が挙げられるが, ダイスの改良に試行錯誤を繰り返すことは莫大な経費や時間を消費するため, FEM 等の数値シミュレーション⁽²⁾⁽³⁾が必要であるとされている。

転造に関する研究成果は数多いが, その大半は仕上げ転造に関する報告^{(2)(4)~(6)}であり, 総転造に関する成

果⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾は少ない。また, 加工特性や加工精度に焦点を絞った研究が主流であり, まくれ込みのように実際の製造現場での問題を取扱った例^{(7)~(10)}はごくわずかである。

そこで本研究では, 歯車総転造におけるまくれ込み現象の解決策を検討する第一段階として, その発生および成長挙動を FEM 解析によって再現することを試みた。その際に, 解析モデルの工夫および転造初期段階に焦点を絞ることによって, 計算時間が短く, 簡易かつ正確なシミュレーション, すなわち, ハイパフォーマンス解析⁽¹⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の実施を目標とした。さらに, 実際の工程において保証試験を行い, その結果と解析結果の比較により, 解析の実用性を検証した。

2. 歯車総転造工程とまくれ込み現象

2・1 歯車総転造の概要 歯車総転造における転造ダイスは, 図 1 に示されるように食付き部, 仕上げ部, 逃げ部の三つの部分から構成されている。一般に仕上げ転造と呼ばれる加工法は, 仕上げ部以降で行う歯車転造のことをさす。総転造と仕上げ転造の大きな違いは, ホブ切りによって歯車を創成していた工程を, 食付き部で転造加工することにより, 全工程を塑性加工のみで行う点が挙げられる。なお, 本研究では, 図

* 原稿受付 1997 年 5 月 21 日。

^{*1} 正員, 茨城大学工学部 (☎ 316-0033 日立市中成沢町 4-12-1)。^{*2} 学生員, 茨城大学大学院。^{*3} 日立工機(株) (☎ 312-0025 ひたちなか市武田 1060)。

1に示すように、総転造工程のうち食付き部を9分割し、総転造開始を0/9工程、食付き部の終了時点を9/9工程とした。転造ダイスの歯丈は、工程の進行とともに増大している。各工程における歯丈寸法を図1の表内に示す。

この歯車総転造工程において、素材は、下ダイスの移動方向と同方向に、下ダイスの1/2の速度で移動する。その結果、上下のダイス間で素材表面にピニオン

Fig. 1 Full gear rolling process

Fig. 2 Photograph of pinion

Fig. 3 Locus of rolling dies (3/9 process)

が形成される。なお、下ダイスの転造速度は8 m/minである。

2・2 食付き部におけるまくれ込みの成長 歯車総転造の全工程を終えた完成品であるピニオンの外観を図2に示す。ピニオンのモジュールは0.8、歯数は9である。歯先を詳細に観察した結果、まくれ込みの存在が認められた。まくれ込みの特徴は、ドリブン歯面よりも、むしろ、フォロー歯面で顕著に現れることである。このような材料流れは初期工程からすでに起こるため、これに起因するまくれ込みも総転造の初期段階から現れる。そこで、本研究では総転造初期段階にあたる食付き部の0/9工程から3/9工程までの解析に焦点を合わせることにした。

3章では歯車総転造のFEM解析を行うためのモデルの構築について検討する。

3. FEMモデルの構築と解析方法

歯車総転造工程のFEM解析は、困難を伴う。これは、ダイスと素材の双方が動くため、解析モデルに与える条件が複雑化するためである。そこで本研究では、モデル構築に関して工夫を行った。すなわち、素材が固定されているものと仮定し、その際のダイスの軌跡を調査した。その結果が図3である。図3に示す結果を参考にし、固定した素材にダイスを接触させることによってFEM解析を可能とした。

Fig. 4 Geometry of rolling dies (3/9 process)

Fig. 5 FEM analysis model

図3に用いた仕上げ部の転造ダイスの形状を図4に示す。食付き部の0/9工程から3/9工程までに素材に接触するダイスの歯丈は、0.89 mm から始まり、1.19 mm まで大きくなる。本研究では、0/9工程から3/9工程までを七段階に分割し、歯丈を0.89 mm から1.19 mm まで0.05 mm ずつ増やし、全部で7回の解析を行った。

図5は、この七段階のうちの一段階目、すなわち総転造開始時点の解析モデルである。また、ダイスの挙動が複雑であるため、図3および図5に示すように、一段階当たり1/7～7/7の7種類の角度の異なるダイスを用意し、これを順次接触させることにより回転を模擬し、一段階当たりの転造加工を再現した。具体的には、まず1/7のダイスを図3の素材円上の点(1)を回転中心として時計回り方向に10度回転させ、次に2/7のダイスを点(2)を中心として時計回り方向に10度回転させた。同様に、3/7～7/7のダイスは、素材円上の点(3)～(7)を回転中心として、時計回り方向に10度、順次回転させた。したがって本解析は、1/7～4/7のダイスが左半分の歯面(フォロー)を、5/7～7/7のダイスが右半分の歯面(ドリブン)を転造する挙動を示している。

以上が一段階当たりの解析で、残りの六段階はダイス丈を0.05 mm ずつ高くして、同様に用意した1/7～7/7のダイスを、素材円上の点(1)～(7)を中心として順次回転させて解析した。したがって、本解析におけるダイスの接触回数の総合計は、 $7 \times 7 = 49$ 回となる。

要素分割に際しては、工具と接触する箇所および大きく変形する箇所には、綿密なメッシングを施し、かつ解析モデルを二次元に簡略化し、計算時間とコスト面において大幅な短縮が見込めるハイパフォーマンス解析を行った。境界条件は、要素の最下層の全節点をXY拘束とした。解析には非線形構造解析汎用プログラム MARC(バージョン K 6.2)を用いた。その際に、工具である転造ダイスは剛体とした。変形体である素材はマンガン合金鋼 SMn 435 BL と軟鋼 S 10 C、そしてまくれ込み現象に及ぼす材質の影響を詳細に検討するために、銅とステンレス鋼 SUS 304 について FEM 解析を行った。解析の際には、各材ともに n 乗硬化塑性体として設定した。表1に、これらの4種類の材料の機械的性質を示す。なお、ダイスと素材の摩擦係数は0.3とした。

以上の条件で FEM 解析を行い、まくれ込みの発生および挙動に検討を加えた。

4. 解析結果および考察

4・1 材料流れとまくれ込み発生挙動の関係 図6は、SMn 435 BL の転造工程のシミュレーション結果である。図6より、工程の進行とともに歯丈が生成していく様子がわかる。特に、注目すべき点は、変形の左右非対称である。このことは、まくれ込み発生の重要な因子である。変形過程について詳細に検討するために、材料内部の流れに着目することとした。

図7は、全七段階のうち一段階終了後の解析結果である。図7(a)は SMn 435 BL、(b)は S 10 C の解析

Table 1 Mechanical properties

Material	SMn435BL	S10C	Cu	SUS304
Young's modulus	2.10×10^5 [MPa]	2.10×10^5 [MPa]	1.29×10^5 [MPa]	2.10×10^5 [MPa]
Poisson's ratio	3.00×10^{-1}	3.00×10^{-1}	3.43×10^{-1}	3.00×10^{-1}
Yield stress	2.98×10^2 [MPa]	1.98×10^2 [MPa]	1.61×10^2 [MPa]	2.45×10^2 [MPa]
n value	2.28×10^{-1}	2.53×10^{-1}	3.71×10^{-1}	4.50×10^{-1}

(a) 1/9 process

(b) 2/9 process

(c) 3/9 process

Fig. 6 Tooth profile obtained by FEM analysis

結果を示している。歯形の形状は加工前のものであり、各節点から延びている変位ベクトルが加工後の歯形の形状に相当する。すなわち、転造加工により発生する材料流れを示す。図7より、歯丈が創成されてゆく過程を再現し得た。また、七段階まで解析を行った結果、フォロー歯先部に突起状の欠陥の存在が認められ、まくれ込みの発生が確認された。まくれ込みは、早期の段階から存在しており、三段階終了時点において、発生が確認された。解析の進行とともにまくれ込みは成長を続け、七段階終了時には約0.045 mmの高さに達した。

図7において、材料流れに着目すると、歯元隅肉部に材料が流れ込み、歯車を創成する様相がうかがえる。しかしながら、フォローおよびドリブンの材料流れには相違が認められ、転造後に相互の歯形の不一致を招く。これはダイスの加工方向と素材の回転方向の相対関係がフォローとドリブンで異なることに起因し

ている。ドリブンにおいては、素材がダイスの回転によって逃げるため、フォローと比較すると小規模な材料流れを呈する。一方フォローでは、ダイスと素材は正面からぶつかり合う。このことからダイスと素材のかみあいが大きく、ドリブンと比べて転造量が大きくなるので、非常に大きな流れを生じさせる。残りの工程の解析結果においても同様の傾向が認められた。SMn 435 BL と S 10 C の解析結果を比較したところ、両者は同規模・同傾向の材料流れを示した。

以上の解析結果を総括して、まくれ込みの発生および成長のメカニズムを図8に模式的に示す。まくれ込みの発生・成長挙動は、加工の際に生じる材料流れの蓄積が大きく影響し、総転造初期段階からすでにその兆候をみせることが明らかとなった。したがって、まくれ込みを抑制する方法は、フォローの材料流れを緩和すること、例えばダイスのフォロー歯先の形状を緩やかにすることが考えられる。

(a) Result of SMn435BL

(b) Result of S10C

Fig. 7 Material flow obtained by FEM analysis

Fig. 8 Lap defect formation behavior

(a) 3/9 process

(b) 5/9 process

(c) 7/9 process

(d) 9/9 process

Fig. 9 Morphologies of lap defect on gear rolling process

4・2 節では、まくれ込み深さ比-歯丈比曲線による保証試験結果との比較を行い、この解析結果の妥当性に検討を加える。

4・2 保証試験結果と解析結果の比較検討 図9は、SMn 435 BL を用いた場合の歯車総転造食付き部の保証試験結果である。総転造における転造工程が進むにつれて、図9(a)～(d)のように加工される歯車の歯丈は大きくなるが、これと同時に、まくれ込みの成長も確認される。

図10に解析結果および保証試験結果のまくれ込み深さ比-歯丈比曲線を示す。なお、図中の歯丈比およびまくれ込み深さ比は、解析ならびに保証試験結果における最大値に対する比率を表している。歯丈は、歯先の最頂点から歯元の最下点までの差を、同様にまくれ込み深さは、突起状の欠陥の高さを算出した。図10より、解析ならびに保証試験結果において、まくれ込みは歯丈とともに成長する挙動を示した。また、解析

Fig. 10 Lap defect depth ratio-Tooth depth ratio diagram

Fig. 11 Lap defect depth ratio-Tooth depth ratio diagram obtained by FEM analysis

結果と保証試験結果はよい一致をみせており、このFEM シミュレーションの妥当性が確認された。また、SMn 435 BL, S 10 C のまくれ込み深さは同等であった。双方の材料特性は、降伏応力には相違があるものの、加工硬化指数(n 値)にほとんど差はない。このことからまくれ込みの大きさは、降伏応力よりも n 値すなわち加工硬化の影響を大きく受けることが考えられる。

4・3 まくれ込み現象を支配する材料因子 4・2 節より、解析、保証試験の両者においてまくれ込み量の大小は n 値と相関関係があることが示唆された。そこで、SMn 435 BL, S 10 C とは異なった n 値を持つ2種類の材料(銅, SUS 304)の転造工程をシミュレートし、 n 値の影響について詳細に検討した。その結果を図11に示す。なお、図11も図10と同様に最大値に対する比で表している。図11より、まくれ込み深さは n 値と密接な関係にあることがわかった。すなわち、 n 値が最も大きい SUS 304 のまくれ込み深さは最小となり、 n 値の減少とともにまくれ込み深さは増大することが判明した。図12は、まくれ込み深さに影響を及ぼす材料因子について検討した結果であ

(a) Evaluated by work-hardening exponent

(b) Evaluated by yield stress

Fig. 12 Control factor for lap defect

る。図 12(a)では n 値, (b)では降伏応力を横軸に設定し, まくれ込み量の大小との相関関係を調査した結果, まくれ込み現象を支配する材料因子は, 降伏応力ではなく, 加工硬化指数(n 値)であることがあらためて理解された。

以上の結果より, まくれ込み発生・成長挙動をハイパフォーマンスな FEM 解析によってシミュレートし, その妥当性を保証試験との一致により確認した。また, まくれ込み量に影響を及ぼす材料因子は加工硬化指数(n 値)であることを見い出した。したがって, 最適な総転造加工条件について計算機上で簡易に検討することが可能となった。工具-素材間の摩擦の影響やダイス形状の最適化については, 今後の研究課題としたい。

5. 結 言

本研究では, 歯車総転造工程で問題となっているまくれ込み現象の解明を目標として FEM 解析を行い, さらに保証試験による考察・検討を加えた。得られた結果を要約して以下に示す。

(1) 転造ダイスの軌跡を参考にした FEM モデルを構築し, 従来, 困難であった歯車総転造工程の FEM 解析を可能とした。

(2) まくれ込みの発生・成長挙動は, 加工の際に生じる材料流れの蓄積が大きく影響する。すなわち, ダイスの加工方向と素材の回転方向の相対関係がフォローとドリブンで異なる点が, 両者における材料流れの相異に起因し, まくれ込みを発生させる。

(3) まくれ込みの発生と成長の過程を, 計算機上で再現した。また, まくれ込み深さ比-歯丈比曲線による保証試験を行い, 解析結果と実験結果の良好一致を得た。

(4) まくれ込み深さに影響を及ぼす材料因子は加工硬化指数(n 値)である。すなわち, n 値が大きい材料ではまくれ込み深さは減少する。

本研究の遂行にあたり, 茨城大学 SVBL(サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー)の支援を受けたことに対し, 感謝の意を表します。

文 献

- (1) 鈴木秀人・滝内希良・大屋邦雄・岸正幸, 機論, **63**-605, A (1997), 132-137.
- (2) 竹増光家・尾崎龍夫, 機論, **60**-574, C (1994), 2134-2139.
- (3) Chandra, A., *Trans. ASME*, **111** (1989), 48-55.
- (4) 竹増光家・尾崎龍夫, 第 47 回塑性加工連合講演会, (1996-11), 53-54.
- (5) 久野精市郎, 愛知工業大学研究報告, No. 15 (1980), 77-82.
- (6) 久野精市郎, 愛知工業大学研究報告, No. 20 (1985), 121-125.
- (7) 田中利秋・松井宗久・澤村政敏・団野敦, 塑性と加工, **30**-342 (1989-7), 1038-1043.
- (8) 団野敦・田中利秋・澤村政敏, 昭和 59 年度塑性加工春期講演会, (1984-5), 639-642.
- (9) 槌川武男・渡辺真, 歯車加工ハンドブック, (1971), 49-74, 日刊工業新聞社.
- (10) 日本塑性加工学会編, 回転加工-転造とスピニング-, (1990), 43-70, コロナ社.
- (11) 大坪英臣, 機論, **62**-603, A (1996), 2402-2406.
- (12) 鈴木秀人・岸正幸・中村雅史, 機論, **62**-602, A (1996), 2187-2192.