強制潤滑ハイドロフォーミングの実用化に向けた研究

東海大学　工学部　機械工学科
准教授　窪田　紘明
（2022 年度　重点研究開発助成　課題研究　AF-2022003-A3）

キーワード：チューブハイドロフォーミング，強制潤滑，肉厚制御

１．緒言

チューブハイドロフォーミングは，中空部材を一体成形できること，形状凍結性に優れること，加工硬化により高強度化が期待できることから，自動車骨格部材などの軽量化技術として有効である．一方で，管材と金型の間に生じる摩擦は材料流動を妨げ，局部的な減肉や割れを引き起こす．特に軸押し効果が届きにくい部位では，材料が十分に流入せず，成形限界が摩擦によって支配されることが多い．

この課題に対して著者らは，金型と管材が接触する位置に高圧の潤滑剤を能動的に供給し，接触界面を流体潤滑状態に近づける「強制潤滑ハイドロフォーミング」を提案してきた（図 1，図 2）．2020 年度～2021 年度の天田財団助成（AF-2019040-C2）による先行研究では，金型平面部中央から高圧潤滑剤を供給することで，肉厚分布の均一化と割れ抑制が可能であることが示された [1,2]．ただし，この段階では，強制潤滑は「成形を安定化するための摩擦低減技術」としての位置づけが中心であり，実用部材の設計自由度や衝突性能制御にまで展開するには，さらに技術を発展させる必要があった．

本研究では，2023 年度～2025 年度の天田財団重点研究開発助成を受け，強制潤滑ハイドロフォーミングを実用化に近づけるために，①潤滑圧力を時間的に制御する技術，②潤滑領域を空間的に制御・拡大する技術，③強制潤滑を再現可能な FEM 解析モデル，④肉厚分布と部材強度の関係，⑤多方向強制潤滑による衝突性能向上を検討した．本研究の技術思想は，単に摩擦を下げることではなく，潤滑条件を加工パラメータとして扱い，肉厚分布および部材性能を成形により制御する点にある．

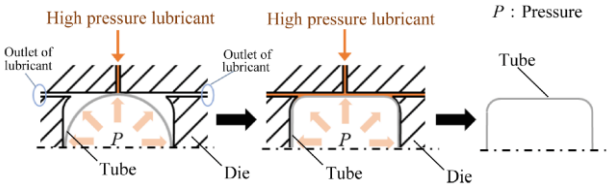


図 1　強制潤滑ハイドロフォーミングの模式図 [1]

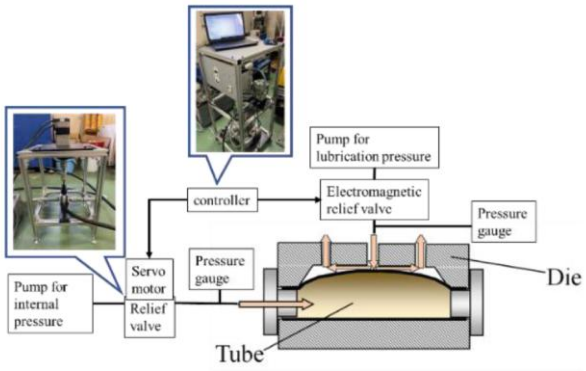


図 2　強制潤滑ハイドロフォーミングの実験装置 [1]

２．時間・領域依存型強制潤滑による肉厚制御

従来の強制潤滑では，成形中に高圧潤滑剤を継続的に供給することで，管材と金型の摩擦を低減し，局部的な減肉を抑制していた [1,2]．しかし，潤滑圧力を内圧とは独立に制御できるという特徴を活用すれば，潤滑を「オン・オフ」するだけでなく，成形途中で変化させることができる．そこで本研究では，成形中の特定の内圧に達した時点で潤滑圧力を低下させる時間依存型強制潤滑を検討した [3]．

実験では，内部圧力を約 20 s で 70 MPa まで上昇させ，潤滑圧力を低下させる内圧 P_{ir} を 0，25，30，40，50，70 MPa に変化させた（図 3）．P_{ir} = 0 MPa は強制潤滑を行わない従来法，P_{ir} = 70 MPa は成形終了まで強制潤滑を継続

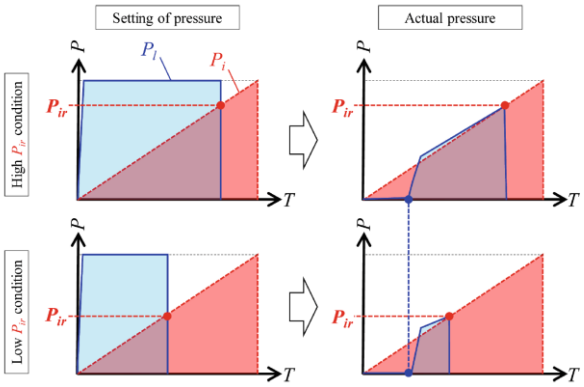


図 3　内圧 P_{ir} と潤滑剤圧力 P_l の制御パターン [3]

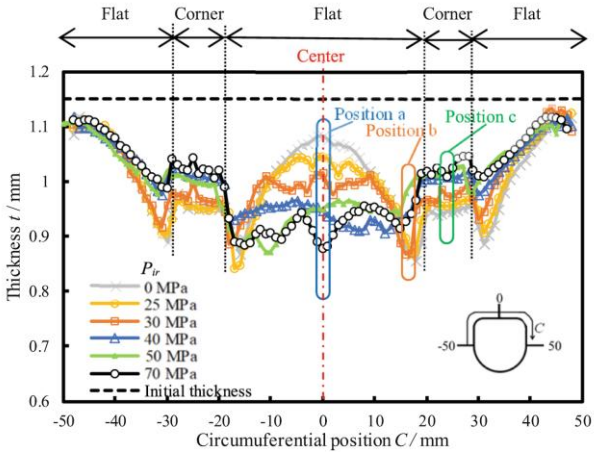


図 4　潤滑停止内圧 P_{ir} と肉厚分布の関係 [3]

する条件に相当する．その結果，潤滑圧力を低下させるタイミングによって，平面部中央，平面部端部，コーナー部の肉厚が大きく変化することが確認された．特に，P_{ir} を大きくすると，潤滑剤供給口近傍である平面部中央の肉厚は減少し，コーナー部の肉厚は増加する傾向を示した．これは，平面部中央とコーナー部の肉厚がトレードオフの関係にあることを意味している（図 4）．

この結果は，強制潤滑が単なる割れ防止技術ではなく，肉厚分布を制御する技術になり得ることを示している．自動車骨格部材では，衝突時に荷重を受け持つ部位と変形を許容する部位を適切に設計することが重要である．時間依存型強制潤滑を用いれば，金型製作後であっても潤滑圧力の制御パターンを変更することで，部材の肉厚分布を調整できる可能性がある．これは，試作後の設計変更や衝突性能の再調整に対して，金型修正ではなく加工条件の変更で対応できることを意味し，開発リードタイム短縮にも寄与する．

さらに，潤滑状態を部位ごとに変える領域依存型強制潤滑についても検討した[3]．金型表面に 0.1～0.2 mm の段差を設け，潤滑剤供給口から 5～15 mm 離れた位置で潤滑剤の流動を制限したところ，潤滑を効かせたい領域と効かせたくない領域で肉厚分布に差を与えることができた（図 5）．この結果は，潤滑剤の流れを金型形状によって制御し，部位ごとに異なる肉厚設計を行う可能性を示している．

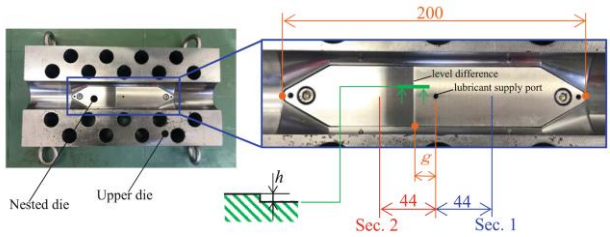


図 5　内面微小段差つき金型による潤滑領域の設定[3]

3．潤滑領域の拡大と FEM 解析モデルの構築

強制潤滑を実用部材へ適用するうえで大きな課題となるのは，潤滑効果が供給口近傍に限定されやすい点である．先行研究では，潤滑効果は供給口から約 65 mm 離れた位置にも及ぶことが確認されていたが[1]，長尺の自動車骨格部材へ適用するには十分とはいえなかった．そこで本研究では，金型表面に長手方向の溝を設け，潤滑剤を遠方へ誘導する溝付き金型を検討した[4]．

実験では，通常の入れ子金型と，幅 3 mm，深さ 1.5 mm，長さ 340 mm の円弧状溝を有する入れ子金型を比較した（図 6）．当初，溝付き金型で従来と同様に潤滑圧力を 70 MPa まで高めたところ，潤滑効果が過大となり，強制潤滑面の平坦部で割れが生じた．圧力履歴を詳細に調べた結果，割れは潤滑圧力が約 65 MPa に達した時点で発生していた．そこで潤滑圧力を 64 MPa に抑えた条件に変更したところ，割れを回避しながら成形することが可能となった．この結果は，潤滑効果を高めると，摩擦低減が強くなりすぎる場合があり，潤滑圧力の最適化が不可欠であることを示している．

肉厚分布を比較すると，溝なし金型では潤滑効果が長手方向 80 mm より遠方には十分に届かなかったのに対し，溝付き金型では供給口から 160 mm 離れた位置まで潤滑効果が確認された（図 7）[4]．すなわち，金型表面の溝を用いることで，強制潤滑の適用範囲を長尺部材へ拡張できることが示された．これは，実用部材への展開に向けた重要な成果である．

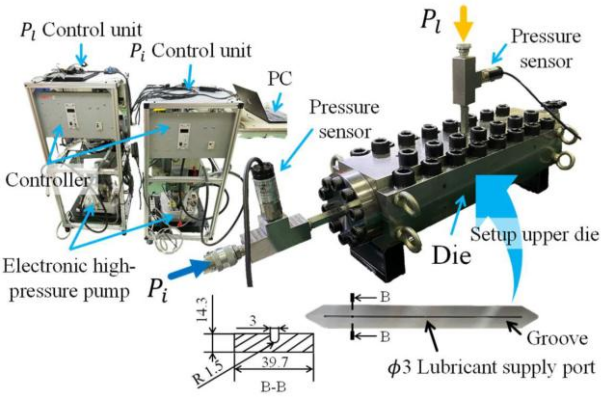


図 6　潤滑領域の拡大のための溝つき金型[4]

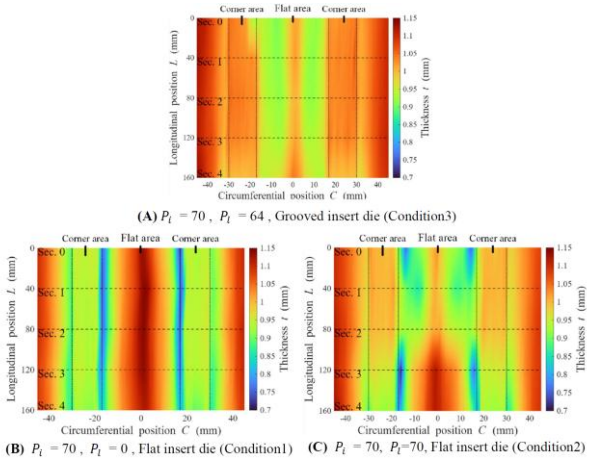


図 7　強制潤滑の有無，溝の有無が肉厚分布におよぼす影響[4]

一方で，強制潤滑の金型設計には FEM 解析が不可欠である．しかし，強制潤滑を単純に「摩擦係数を低くする」モデルで表すと，実験で観察されないくびれが解析上で発生し，肉厚分布を正しく再現できなかった[5]．そこで本研究では，成形後の管表面に光明丹を塗布し，定盤との接触状態を観察することで，潤滑面の実際の接触状態を推定した（図 8）．その結果，潤滑剤供給口と溝の周囲に閉じた接触線が形成され，その内側では管材が金型から浮き上がった流体潤滑状態になっていることが確認された[5]．

この観察結果をもとに，潤滑界面に潤滑圧力を外力境界条件として与える FEM 解析モデルを構築した．このモデル

では，潤滑圧力が作用する節点を成形の進行に応じて変化させ，接触線より内側を流体潤滑領域として扱った．その結果，実験で得られた肉厚分布を高精度に再現できた．さらにFEM解析により，強制潤滑時には平面部の大部分で摩擦抵抗が消失し，平面端部のみに摩擦抵抗が生じるため，平面部全体にほぼ一様な周方向引張応力が発生することが明らかになった（図10）[6]．この均一な応力状態が，肉厚分布の均一化と割れ抑制の本質的なメカニズムである．

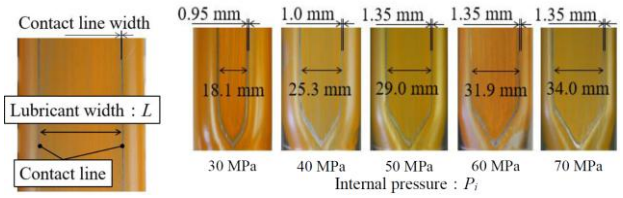


図8　光明丹を用いた金型との接触状態の推定[5]

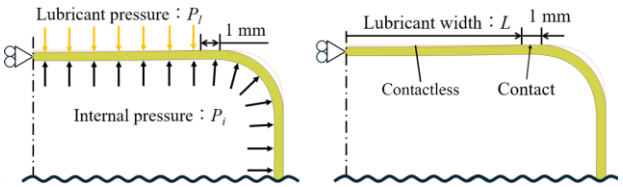


図9　潤滑剤圧力を管に直接加える解析モデル[5]

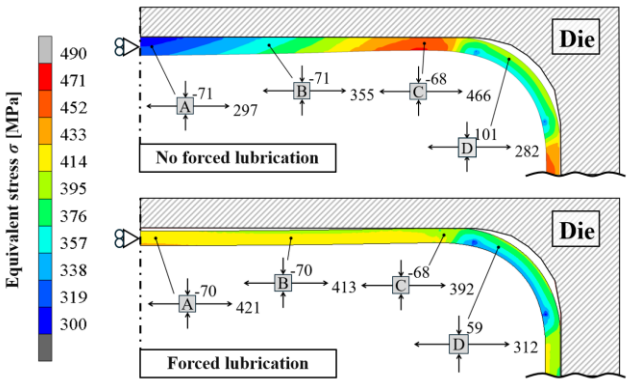


図10　強制潤滑の有無による成形中の応力状態の比較[6]

4．部材性能への展開と多方向強制潤滑

実用化に向けては，成形後の肉厚分布が部材性能にどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある．そこで，強制潤滑により成形した角形管を対象に，衝突を模擬した圧縮曲げ試験およびFEM解析を行い，肉厚分布と最大荷重の関係を調べた[7]．

引張強さ290 MPaのSTKM11A鋼管を用いた実験では，強制潤滑を行った鋼管の最大荷重は6.2 kN，強制潤滑を行わない鋼管は6.5 kNであり，低強度材では強制潤滑により部材強度は上昇しなかった[7]．これは，低強度材では平面部の肉厚が強度に対して支配的であり，強制潤滑により平面部中央の肉厚が薄くなることが不利に働いたためと考えられる．

しかし，FEM解析により材料強度を270 MPaから1500 MPaまで変化させると，材料強度が高くなるほど強制潤滑による強度向上効果が大きくなることが明らかになった（図11，図12）[7]．低強度材では平面部から稜線部までの広い範囲で荷重を受け持つのに対し，高強度・薄肉材では平面部中央が座屈しやすく，稜線部近傍が荷重を支配的に受け持つ（図11）．そのため，強制潤滑により稜線部近傍の肉厚を増加させることは，高強度・薄肉材において有効である．この結果は，強制潤滑が「成形限界を上げる技術」から，「部材の崩壊モードに合わせて肉厚を配置する技術」へ発展し得ることを示している．

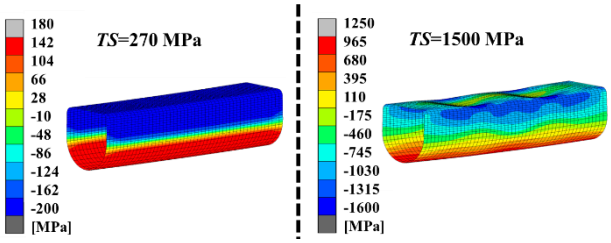


図11　低強度材および高強度材の最大荷重時の軸方向応力分布[7]

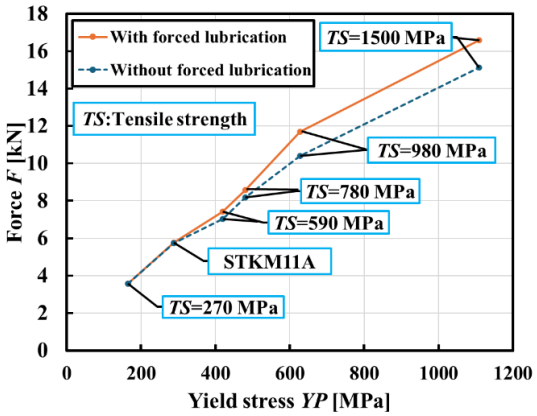


図12　管材の降伏応力と圧縮曲げ強度（最大荷重）の関係[7]

さらに，矩形断面部材の複数面に潤滑を適用する多方向強制潤滑について検討した[8,9]．1方向から4方向まで潤滑方向を変化させて成形解析を行い，得られた肉厚分布を用いて圧縮曲げ解析を実施した．その結果，いずれの強制潤滑条件でも，潤滑なしに比べてエネルギー吸収量または最大荷重の少なくとも一方が改善した．特に3方向強制潤滑では，潤滑なしに比べて最大荷重が5.7%，エネルギー吸収量が8.6%向上し，最も優れた衝突性能を示した（図13）[8,9]．この性能向上は，圧縮側の板厚が増加し，座屈時に荷重を分担する有効幅が拡大したためと考えられる．

この解析結果を実験的に検証するため，4方向から潤滑圧力を負荷できる新たな金型も設計した[8,9]．金型側面に3つの圧力負荷経路を追加し，さらに金型分割面を部分的にずらすことで，縦壁部での潤滑剤のシールと強制潤滑用中子の配置を両立させた（図14）．これにより，多方向強制潤滑を実機で検証するための基盤が整った．

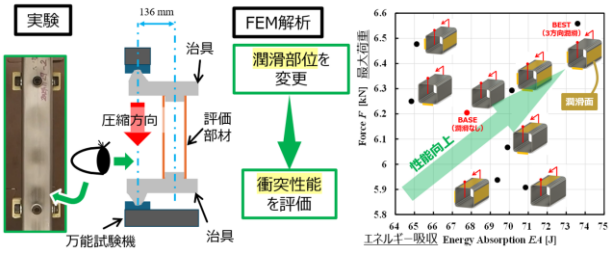


図 13　成形時の強制潤滑面と衝突性能の関係 [8)]

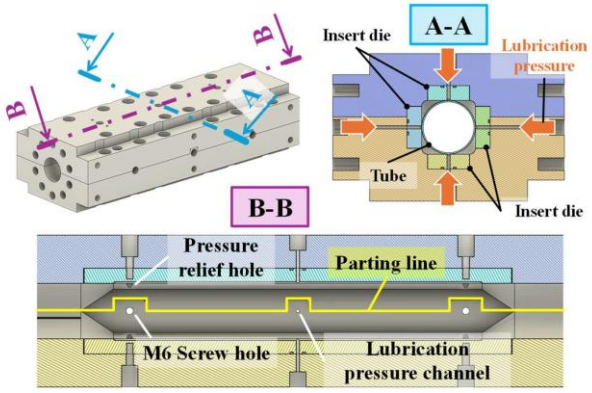


図 14　多方向強制潤滑金型 [9)]

5．結言

本研究では，強制潤滑ハイドロフォーミングの実用化に向けて，潤滑条件を時間・空間・方向の各観点から制御する技術を検討した．得られた主な成果は以下の通りである．

1) 潤滑圧力を成形途中で低下させる時間依存型強制潤滑により，平面部中央とコーナー部の肉厚配分を制御できることを示した．
2) 金型表面の段差や溝を用いることで，潤滑領域を空間的に制御・拡大できることを明らかにした．特に溝付き金型では，潤滑効果を供給口から 160 mm 離れた位置まで拡大でき，長尺部材への適用可能性を示した．
3) 潤滑界面に圧力境界条件を与える新たな FEM 解析モデルを構築し，実験で得られた肉厚分布を高精度に再現した．この解析により，強制潤滑による肉厚均一化は，平面部の大部分が流体潤滑状態となり，周方向引張応力が均一化することによって生じることを明らかにした．
4) 強制潤滑による肉厚分布の変化は，低強度材と高強度材で部材強度に与える影響が異なり，高強度・薄肉材では稜線部近傍の肉厚増加が有効であることを示した．
5) 多方向強制潤滑により，最大荷重およびエネルギー吸収量を向上できる可能性を示し，実験検証用の金型設計まで到達した．

以上より，強制潤滑ハイドロフォーミングは，摩擦低減による成形安定化技術にとどまらず，肉厚分布を加工中に変化させ，衝突性能を制御するための新しい性能設計技術であると位置づけられる．今後は，多方向強制潤滑金型を用いた実験検証を進めるとともに，FEM 解析と圧力制御を連携させることで，部材性能から逆算した潤滑条件設計へ展開することが期待される．

参考文献

1) 窪田紘明，三上拓徒，吉田一也：ハイドロフォーミングにおける強制潤滑技術の開発，令和 3 年度塑性加工秋季講演会講演論文集，2021，pp. 281-282.
2) 天野由紀子，三上拓徒，吉田一也，窪田紘明：強制潤滑を用いたハイドロフォーミングにおける成形特性の検討，日本鉄鋼協会第 183 回春季講演大会，2022，PS-26.
3) H. Kubota, T. Mikami, Y. Amano, S. Ishii, T. Miyazawa and K. Yoshida: Development of Time and Area Dependent Forced Lubrication Technology in Hydroforming, Proceedings of ICTP 2023, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 318–325.
4) 堤大樹，佐々木求貴，窪田紘明：強制潤滑ハイドロフォーミングにおける溝付き金型による潤滑領域の拡大，2025 年度塑性加工春季講演会講演論文集，姫路，2025，pp. 139-140.
5) 佐々木求貴，堤大樹，窪田紘明：強制潤滑ハイドロフォーミングの FEM 解析モデルの開発，2025 年度塑性加工春季講演会講演論文集，姫路，2025，pp. 135-136.
6) M. Sasaki, H. Tsutsumi and H. Kubota: Development of New FEM Model for Forced Lubrication in Tube Hydroforming and Its Application to Clarify Deformation Mechanisms, Proceedings of TUBEHYDRO 2026, 2026, pp. 185-191.
7) 板倉熙，長谷川昂太，窪田紘明：強制潤滑ハイドロフォーミング技術が部材強度におよぼす影響の検討，2025 年度塑性加工春季講演会講演論文集，姫路，2025，pp. 137-138.
8) 堤大樹，佐々木求貴，清水弥明，窪田紘明：4 方向強制潤滑ハイドロフォーミング技術の開発，第 76 回塑性加工連合講演会講演論文集，水戸，2025，pp. 151- 152.
9) H. Tsutsumi, M. Sasaki, H. Shimizu and H. Kubota: Development of Multi-Directional Forced Lubrication Technology in Tube Hydroforming, Proceedings of TUBEHYDRO 2026, 2026, pp. 137-146.