

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「複雑形状・高精度化塑性加工を可能とする、複合化・塑性加工プロセス技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティールオー株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要	..... 1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	..... 1
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者名、協力者)	..... 2
1-3 成果概要	..... 3
1-4 当該研究開発の連絡窓口	..... 3
第2章 本論	..... 4
2-1 複合化成形におけるプレス成形とハイドロフォーミング 技術の開発	..... 5
2-2 摩擦力低減化表面処理技術の開発	..... 10
第3章 全体総括	..... 13
3-1 研究開発成果	..... 13
3-2 研究開発後の課題・事業展開	..... 14

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 背景

2007年末にEUが決定した2012年度燃費規制目標（120g/km）に向けて、自動車業界は軽量化に伴うコスト上昇を最小限に抑える製造技術、環境負荷問題から製造工程におけるCO₂削減技術が求められている。また、自動車部品メーカー、特に中小末端の製造メーカーにおいては自動車メーカーの海外展開や部品調達の現地化等によりコスト的に厳しい状況下にある。これらの状況を打破するために、海外で普及していない技術（ハイドロフォーミング成形技術）を積極的に取り込み、さらに従来のプレス成形技術との複合化を図ることで、複雑な部品等を安価に製造できる高度な塑性加工技術開発が求められている。

1-1-2 研究目的

従来の精密鋳造/機械加工、分割プレス成形/溶接等により製造されていた自動車部品等をハイドロフォーミング成形とプレス成形の複合化を図ることにより、軽量/低コスト化を可能とする一体塑性加工技術の開発を目的とする。

1-1-3 研究目標

1) 開発目標対象品として、

ディーゼル車の排ガス規制強化に伴い措置は必須となっているEGRクーラーの部品中で、複雑形状で、安定した品質（寸法精度、耐圧性、耐振動性、耐熱性等）、低コスト化及び軽量化が求められている①シェル部品、②ヘッド部品、及び建築用配管接続の大幅な省力化製品として考案された③フランジレスエルボ、以上3点の部品を、一体で成形する塑性加工技術開発及び製品化を目標とする。

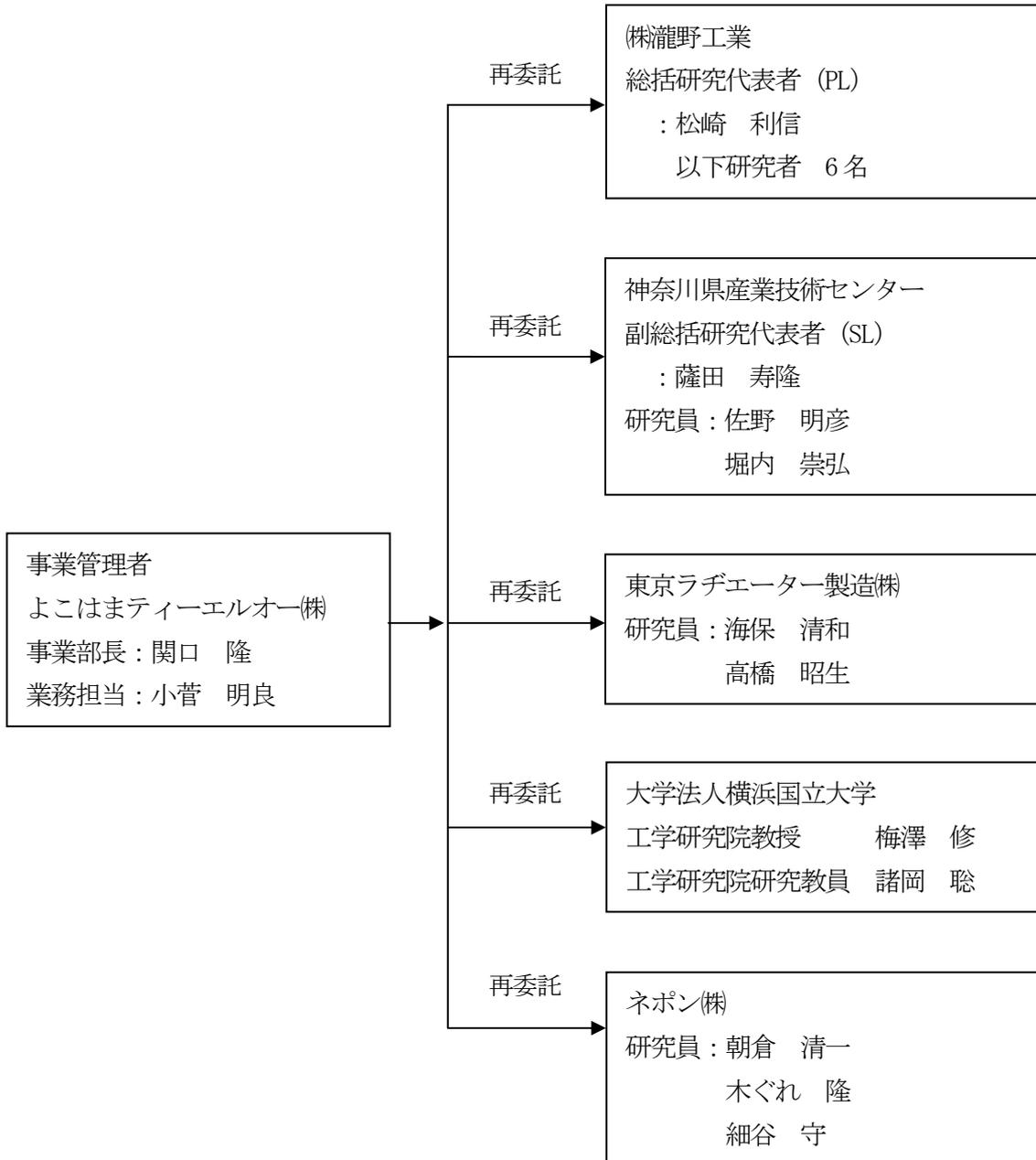
2) 技術開発目標値として、

特にEGRクーラーは500°C以上の排気ガスが通るため、耐熱性フェライト系ステンレス鋼SUS430材を使用するため、加工性の一つである延性は、SUS304の50%に対して30%と材料特性として、成形性が困難な材料であるが、製品化に必要な、肉厚減少率：15%以内、接続部寸法公差：±0.15、拡管率：120~160%を目標とした。

3) 製品化目標値として、

一体成形化により、従来の精密鋳造/機械加工、分割プレス成形/溶接等による製造法と比較して、金型費、溶接費、部品点数・材料削減等により、30%以上の低コスト化、軽量化を目標値とした。またフランジレスエルボについては、従来のネジ及びフランジ付き継手に対して、10%以上の低コスト化を目標とした。

1-2 研究体制



1-3 成果概要

本技術開発においては、ステンレス鋼を素材として、プレス加工とハイドロフォーミング加工を組み合わせることにより比較的複雑な形状に対する成形加工技術の開発を行った。ハイドロフォーミング加工機の仕様検討に始まり、素材となるパイプの作製およびその溶接特性の評価、成形プロセスの考案、成形条件の確立、成形品の評価を実施した。また金型への適用を目的とし、高潤滑性固体膜の摩擦摩耗特性評価を行った。

成形形状は具体的に製品化要望のある、ディーゼルエンジンの排ガス冷却装置 EGR クーラーの筐体のうち、メインボディーであるシェル部品およびエンジンに接続される排気ガス配管とシェルを接続するヘッダ部品を参画メンバーにより選定した。材質は熱膨張係数が低く、熱疲労に優れ安価なフェライト系ステンレス鋼 SUS430 である。また O リングによるワンタッチ式フランジレスエルボ継手の成形加工を実施した。材質はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。

シェルにおいては一部の部位の肉厚を除き、ほぼ目標とする形状の加工技術を確立した。その結果、従来工法と比較して構成部品点数が 2 点から 1 点になり、溶接が不要になった。

一方ヘッダにおいては、ハイドロフォーミングの予備成形工程として、曲げ加工と溶接を組み合わせた工程の達成及びハイドロフォーミング工程において 3 工程中 2 工程を達成した。

しかし、材料伸びが小さい難加工材のこともあり、プレス成形で想定した異径深絞りから従来プレス機ではできないことが判明した。そのため、プレス成形部を 2 分割成形/溶接で製作後、ハイドロフォーム成形で試作製品化を図り、複合化・一体成形技術を構築した。その結果、従来の精密鑄造/機械加工工法での製品化に対して、肉厚 1/2 t で製品化が図れた。

フランジレスエルボの工程においては、張り出し部の一部において、肉厚減少率が 15% 以上の減肉及びマイクロクラックがあるものの、目標とする寸法をほぼ満足した。また現行の溶接によるエルボと同等な継手性能を有している。構成部品点数が 3 点から 1 点なり、さらに溶接が不要になり、その結果、コストを試算したところ現行品に対しておよそ 60% で製造できることが分った。さらに金型表面の表面処理技術においては、素材上に VC (炭化バナジウム) 層を形成しその上に DLC 皮膜をコーティングすることで、VC 層単体よりもステンレス鋼に対する摩擦係数を大きく低減できた。

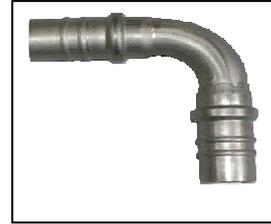
従来のプレス成形/溶接、精密鑄造/機械加工工法での製品化に対して、プレス成形とハイドロフォーミングを複合化して、複雑形状部品等の一体化塑性化を図ることにより、ほぼ 30% 以上の低コスト化、軽量化が図れることがわかった。



(a) EGR クーラー用シェル



(b) EGR クーラー用ヘッダー



(c) フランジレスエルボ

図1 試作成形品

1-4 当該研究の連絡窓口

株式会社瀧野工業

◎担当者：代表取締役社長 瀧野明

◎TEL:0463-54-1750

◎FAX:0463-55-1189

◎E-mail:info@takino-industry.co.jp

神奈川県産業技術センター

◎担当者：機械材料部 主任研究員 薩田 寿隆

◎TEL:046-236-1500

◎FAX:046-236-1525

◎E-mail:satsuta@kanagawa-iri.go.jp

第2章 本論

本技術開発においては、ステンレス鋼を素材として、プレス加工とハイドロフォーミング加工を組み合わせることにより比較的複雑な形状に対する成形加工技術の開発を行った。ハイドロフォーミング加工機の仕様検討に始まり、素材となるパイプの作製およびその溶接特性の評価、成形プロセスの考案、成形条件の確立、成形品の評価を実施した。また金型への適用を目的とし、高潤滑性固体膜の摩擦摩耗特性を評価した。

成形形状はディーゼルエンジンの排ガス冷却装置 EGR クーラーの筐体のうち、メインボディであるシェル部および配管接続部であるヘッダ部を参画メンバーにより選定した。材質はフェライト系ステンレス鋼 SUS430 である。また 0 リングによるワンタッチ式フランジレスエルボ継手の成形加工を実施した。材質はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 である。図 1 は開発対象の目標形状を示す。また表 1 は各形状に対する成形工程を示す。

ステンレス鋼はいずれも表面の酸化膜が薄く、塑性加工時に金型の表面と焼き付きを生じ、製品にキズが付くとともに成形性が大きく低下する。逆に素材と金型との潤滑を良好にすれば、より複雑な形状に対する加工が可能になる。そこで固体膜の中では摩擦係数が低い DLC を素材である冷間金型鋼 SKD11 に対してコーティングし、摩擦摩耗特性を調べた。また比較のため従来耐久性を向上させるために行っている TD 処理 (VC 層を形成) した上にコーティングをそれぞれ行い、摩擦摩耗特性を調べた。

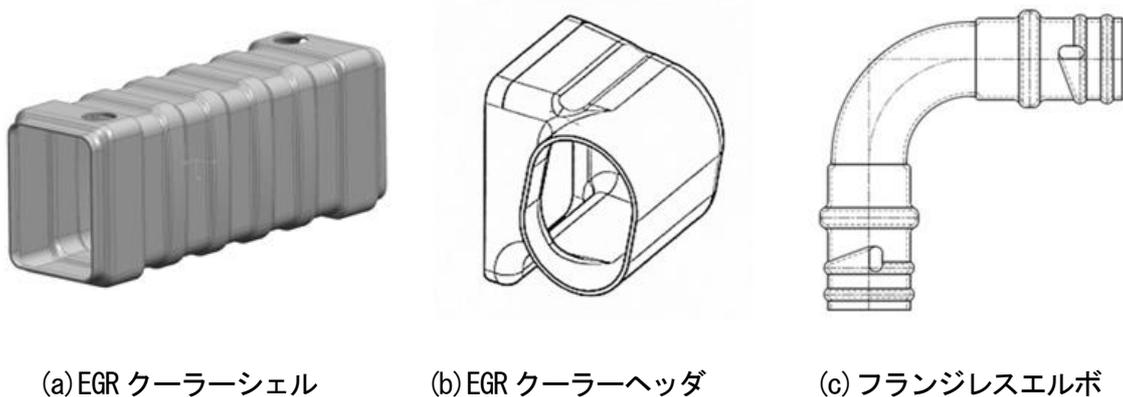


図2 開発対象の目標形状

表1 成形工程

	材料準備	塑性加工		
		予備成形		ハルジ加工
シェル SUS430J1L	素管製作 (板ロール曲げ・溶接)	角パイプ作製 (プレス成形)		ハイドロフォーミング加工
ヘッダ SUS430J1L	板形状加工 (レザトリミング)	曲げ加工 +溶接		ハイドロフォーミング加工
エルボ SUS304	パイプ (20Su) 購入	エルボ作製 (曲げ加工)	両端拡管 (パンチによる段付き加工)	ハイドロフォーミング加工

2-1 複合化成形におけるプレス成形とハイドロフォーミング 技術の開発

2-1-1 EGR クーラーシェル

図2に成形工程の概要を示す。板材を曲げ加工しTIG溶接で素管を作製する。次にプレスにて角パイプとする。これを素材としてハイドロフォーミング成形条件の確立を行った。

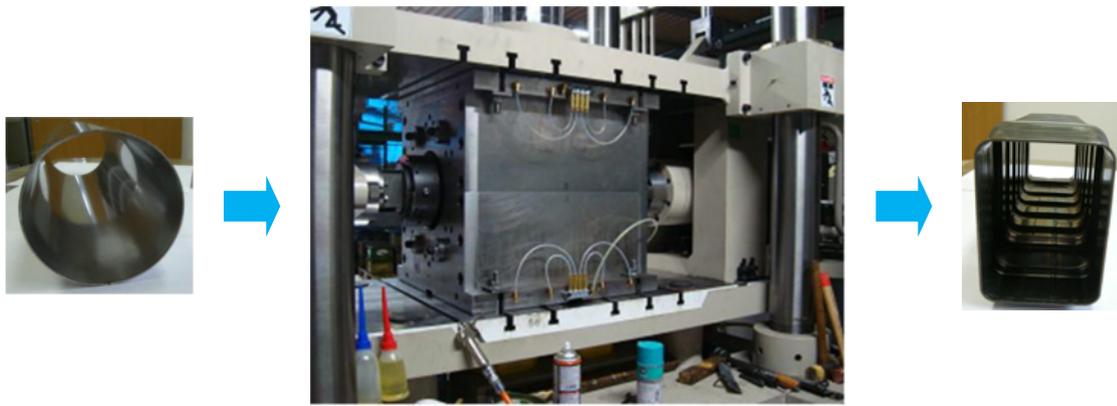
成形時発生する不具合としては、溶接部の伸び不足による割れ及び張り出しが大きいR部のバーストである。これらの不具合を抑制するために、素管の周長ならびに成形条件（成形圧及び左右の軸押しストローク）を変更した成形実験のトライ&エラーにより成形条件を確立した。

図3に張り出しが大きく加工硬化度が高い曲げ加工部（R部）の硬さ分布を、角パイプ及びシェル（成形品）について測定した結果を各々示す。角パイプに比べ、ハイドロフォーミングにより曲げ加工部では50HV程度上昇している。

図4に形状測定位置を示す。シェルを長手方向で二分割して、各位置での外形寸法、肉厚及び曲率半径を詳細に測定した。

表2に目標値から外れた寸法検討箇所を示す。外形寸法で特に厳しい精度が要求されているのは両端の開口部である。ここは熱交換機能をもつ部品と溶接される部分で、溶接欠陥防止のため±0.15mmの公差に収めることが求められている。⑭において-3.8mmと公差から大きく外れている。ハイドロ加工後プレスによる管端成形が必要である。

減肉率は素材の15%以内に収めることが目標である。最も減肉している場所は②のコーナー部で肉厚は0.99mmである。減肉率が34%である。この場所は張り出し量も大きく本開発当初にバーストが頻繁に生じた場所である。同様に張り出し量が大きい⑫においても、肉厚が1.01mmと減肉率が30%を超えている。その他の場所ではいずれも減肉率が15%以内に収まっている。成形条件の一層の最適化及び金型の調整を図ることにより減肉を抑えることが必要と思われる。



素管

hidroforming加工

成形品

図3 成形工程

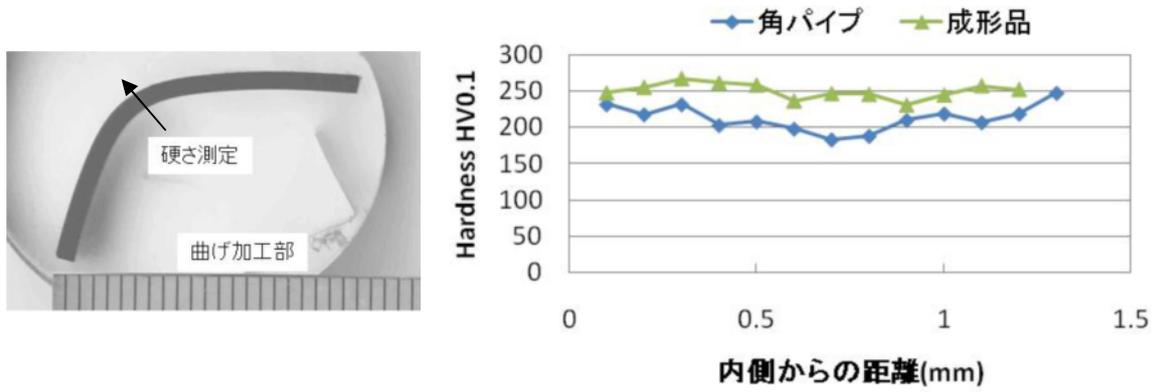


図4 成形品の硬さ測定

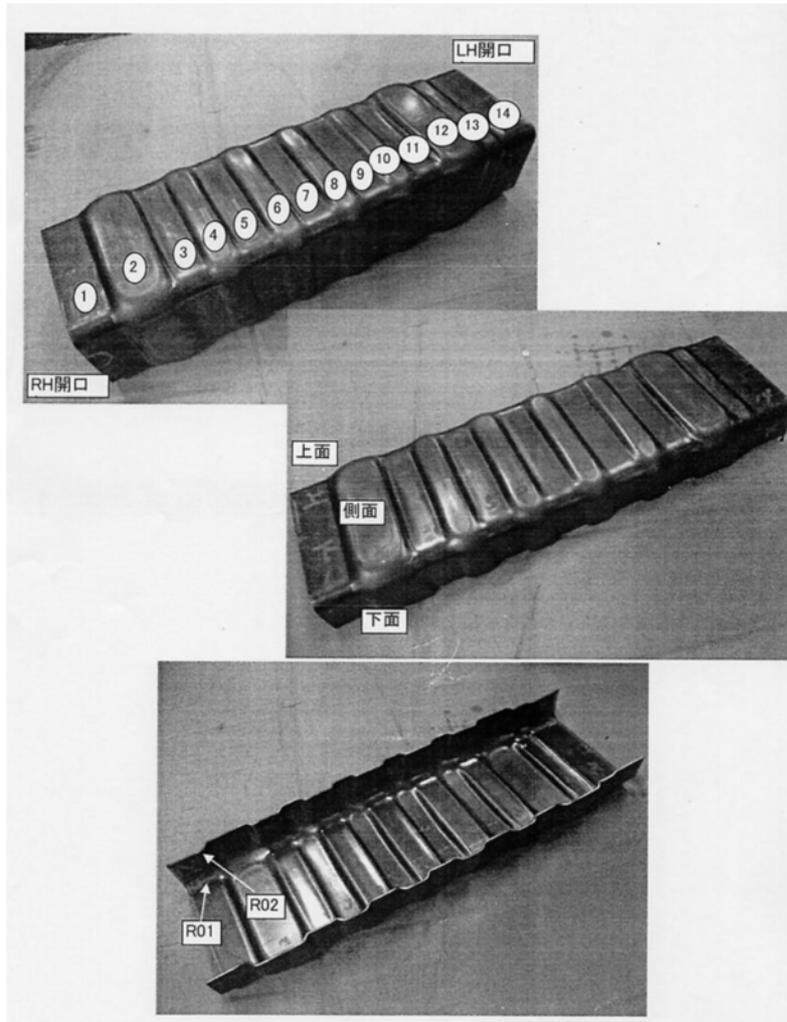


図5 形状測定位置

表2 寸法検討箇所

	検討箇所	対策
寸法	⑭において目標値の-3.8mm	後加工追加により公差内に収める
肉厚	②⑫のR部において減肉率15%超	実機試験を行い耐久性確認する。問題がある場合には、成形条件の見直しもしくは金型の修正を行う。

硬さはいずれも 400HV 前後と素管 (200~250HV) より上昇しており、組織観察結果と対応している。

図7に成形品の断面金属組織と硬さ分布をそれぞれ示す。観察部位はOリングが入る張り出し部で加工硬化度が高いところである。最終的な成形条件が確立していないため、左右の対称性が取れておらず、また張り出し部の一部の角が直角に近い形状である。金型の微修正および成形条件の修正が必要である。

図に示す組織写真は、成形後固溶化処理を行ったものである。成形後に見られたフローラインが消失し、再結晶組織を呈している。成形後の硬度は400HVまで加工硬化しているが、熱処理により180HV前後と通常のSUS304の硬さに回復している。

表3に各種試験の結果をまとめたものを示す。4項目いずれにおいても基準を満たしている。

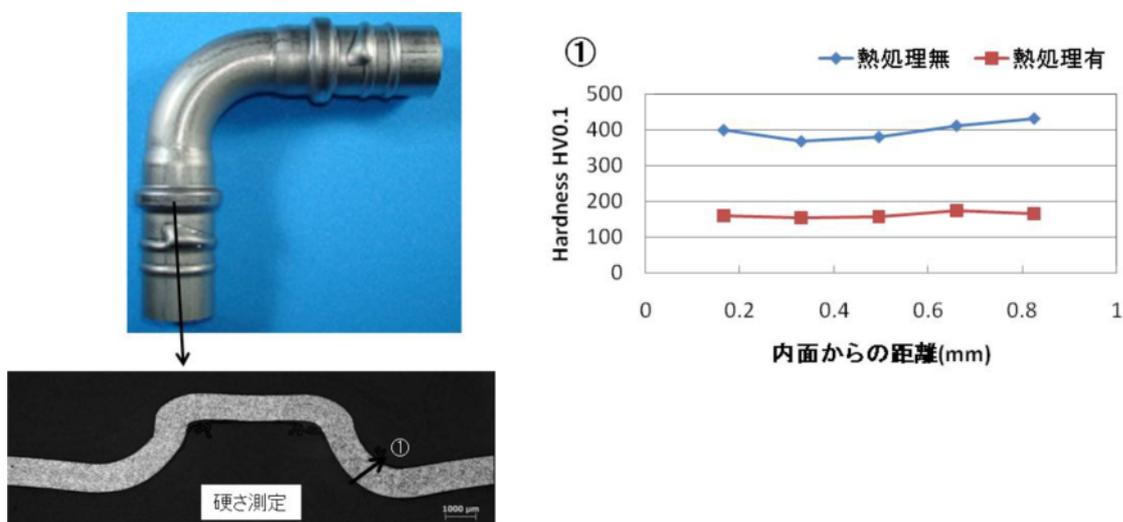


図8 成形品の断面組織と硬さ分布

表3 評価試験のまとめ

試験項目	試験結果	合否
負圧試験 (-96MPa で2分間保持において、吸い込み無いこと)	吸い込み無し	合格
水圧試験 (3.5MPa で2分間保持において、漏れ、破壊、抜けが無いこと)	漏れ、破壊、抜け無し	合格
水圧破壊試験 (11.8MPa まで、漏れ、破壊、抜けが無いこと)	16.1MPa で抜け始める	合格
減肉率 (15%以内)	素管肉厚 1mm に対して 0.85mm (減肉率 : 15%)	合格

2-2 摩擦力低減化表面処理技術の開発

プレスやハイドロフォーミング用金型材料とし冷間工具鋼SKD11が用いられているがトライが終わり量産に移行する前に、耐久性向上のために表面処理を施されることが多い。SKD11の表面処理としては、熱拡散によりVC（炭化バナジウム）を厚さ10 μ m程度形成するいわゆるTD処理が主流である。

塑性加工においては、加工時に素材と金型の間の潤滑油が加工圧力により排出される。通常、鋼においては素材表面の酸化膜が徐々に剥離しながら潤滑に寄与し、成形が継続する。しかしステンレス鋼は、表面の酸化膜が薄いため加工初期に酸化膜が破れ素材の新生面が現出し、金型と焼き付きを生じ、成形性に劣るといった問題がある。

DLCコーティング膜は潤滑性に優れ摺動面の摩擦係数が低いことが知られている。これを金型にコーティングすれば、ステンレス鋼の成形性が向上することが期待できる。

そこで本開発では、DLC膜に対するステンレス鋼の摩擦摩耗特性を調べた。DLC膜は一般に密着性に問題があると言われているので、鋼材の上に直接コーティングしたものとTD処理したうえでコーティングした試験片を作製した。表4に処理条件を示す。試験方法は回転するディスクにボールを押しつけるいわゆるボールオンディスク試験である。表5に摩擦試験条件を示す。ボールはフェライト系及びオーステナイト系ステンレスの成形を想定し、SUS430及びSUS304を用いた。また成形時の油切れを想定してドライとした。

図8はSUS430ボールに対するTD処理膜の試験結果である。図9は同ボールに対するTD処理後DLCコーティング膜を形成した試験片の結果である。両図とも摩擦係数は細かく振幅している。この細かな振幅は、試験片作製時の研削による条痕をボールが直角に摺動する際に生じるもので、本試験条件の50回の回転に対応して100回の振幅が認められる。

図8のTD処理した試験片の摩擦係数の増加速度は大きく、8分過ぎでは1を超え、試験機の保護装置が働き見かけ上摩擦係数が低下している。

図9はTD後DLCコーティングした結果である。TD後の研磨による凹凸の低減及びDLCによる潤滑性向上の相乗効果で摩擦係数は最も低くかつ振幅も小さい。また試験片上には明確な摩耗痕は認められず、ボールの摩耗痕の大きさも最も小さい。摩擦係数はほぼ一定で0.2以下である。

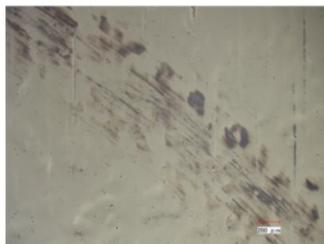
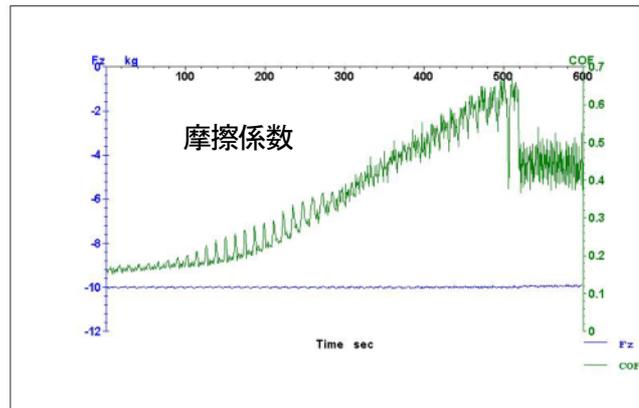
図には示していないが、SUS304ボールでの試験における摩擦係数はいずれの表面処理においても、430ボールより摩擦係数は小さくなっていた。一般にSUS430は304より、加工硬化しなため、成形性が悪いとの説明がされている。今回の摩擦試験結果に見られたような潤滑性に劣ることも成形性が悪い理由の一つと考えられる。鋼種による成分の違いが表面酸化膜の相違につながっているためと想定される。

表 4 基材ならびに表面処理条件

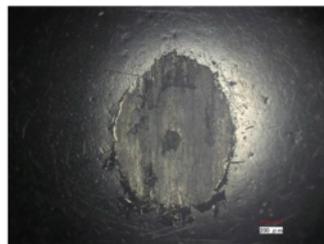
基材	日立金属 SLD-Magic $\Phi 60 \times 10$ t 研削仕上げ
処理条件	①焼入 (1030°C→窒素ガス冷却)・焼戻(520°C×2回) ②焼入・焼戻+TD処理 (1050°C×8h) ③焼入・焼戻+DLC (スパッタ法 処理温度: 約 200°C) ④焼入・焼戻+TD+DLC

表 5 摩擦試験条件

負荷荷重	10kgf
試験時間	600s (50回転)
摺動半径	15mm
摺動回転数	5rpm (7.85mm/s)
球	SUS304 $\Phi 10$ mm SUS430 $\Phi 10$ mm
潤滑方法	ドライ

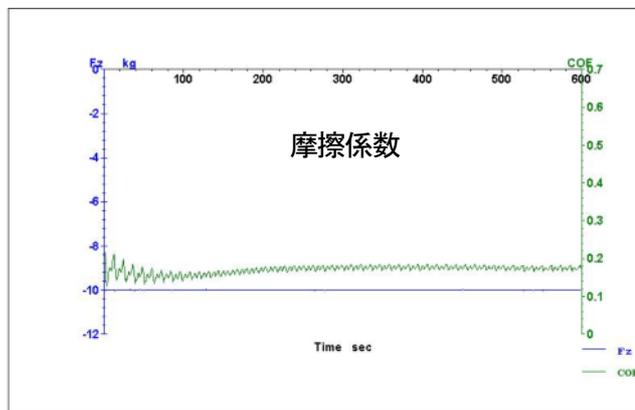


試験片摩耗痕



ボール摩耗痕

図9 SUS430 ボールに対する TD 処理膜の摩擦摩耗特性



試験片摩耗痕



ボール摩耗痕

図10 SUS430 ボールに対する TD 処理後 DLC コーティング膜の摩擦摩耗特性

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

本研究開発で得られた成果を表6にまとめて示す。シェルにおいては、溶接方法も含めて角パイプ作製技術を確立し、その角パイプを素材として hidroforming を行いほぼ目標とする形状を作製する技術を確立できた。ヘッダにおいては、プレスと溶接により作製した試験体を素材に hidroforming を行い、3工程中2工程まで到達した。フランジレスエルボでは、素管の曲げ及び拡管加工技術を確立し、それを素材として hidroforming により同時に2個作製できる技術を確立した。ほぼ目標どおりの形状が得られ、現行の溶接で組みつけるエルボと同程度の継手性能を有していることを確認できた。製造コストを試算すると溶接エルボの60%程度で作製できる見込みである。

摩擦力低減化表面処理技術においては、現在ステンレス鋼の塑性加工時に処理される VC 層の上にさらに摩擦係数が低い DLC をコーティングすることで、摩耗が少なく潤滑性を向上させることが確認できた。

表6 研究成果

	塑性加工		
	プレス加工	hidroforming	
シェル SUS430J1L	角パイプ作製技術（含溶接）の確立	ほぼ目標形状達成（肉厚減少率15%以内、±0.15寸法精度）	
ヘッダ SUS430J1L	曲げ加工及び溶接による成形方法の確立	二分割プレス成形/溶接品+hidroformingでの一体成形化達成	
エルボ SUS304	曲げ加工技術の確立	両端拡管加工技術の確立	ほぼ目標形状達成 現行品と同程度の継手性能 40%の製造コスト削減
表面処理	VC層の上にDLCコーティング（摩擦係数：0.2以下）		

3-2 研究開発後の課題・事業展開

研究開発後の課題

シェル及びヘッダにおいては参画メンバーの東京ラヂエーター製造を中心に実製品への実機テストを実施する。その際に減肉率が30%を超えたシェル張り出し部の耐久性を詳細に試験・調査する。また本開発で確立したハイドロフォーミング技術を展開できる形状を調査する。

エルボにおいては耐久性評価が未実施であるためこれを早急に行う。今回作製した管径20SUであるが、より管径が大きいパイプのニーズは高い。50SUのエルボ作製への技術課題を検討する。

摩擦力低減化表面処理技術においては一般にDLC膜は耐剥離性に問題があると言われている。早急に密着性を評価する。実際のハイドロフォーミング金型へ適用し、実機での成形性向上の有無や耐久性について調査を行う。

事業化展開

本開発の成果として、EGRクーラー用シェル、ヘッダ部品、ステンレス配管用フランジレスエルボの試作開発の結果、90%以上の製品化に目処を付けた。部分的な形状、寸法精度の修正、しわ座屈等製品化開発と客先における性能/耐久試験、エンドユーザーの承認等解決すべ課題があるが、共同体構成の川下製造者と共同で製品化開発を進め、2年以内の事業化をはかる。また、EGRクーラー用部品以外の分野においても、積極的に複合化・一体塑性加工による営業展開を図り、本開発成果の早期事業化を目指す。