

3次元熱間曲げ焼入れ (3DQ) 技術の開発

Development of Three-dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ) Technology

富澤 淳*
Atsushi TOMIZAWA

坂本 明洋
Akihiro SAKAMOTO

原 三了
Mitsusato HARA

嶋田 直明
Naoaki SHIMADA

吉田 経尊
Michitaka YOSHIDA

桑山 真二郎
Shinjiro KUWAYAMA

窪田 紘明
Hiroaki KUBOTA

山本 憲司
Kenji YAMAMOTO

岡田 信宏
Nobuhiro OKADA

森 弘志
Hiroshi MORI

抄 録

近年、自動車業界は、地球温暖化防止を目的としたCO₂削減(燃費向上)のための車体軽量化や、安全性向上対策としての衝突安全性の向上に、重点的な取り組みを実施している。これらのニーズに応えるために、1470MPa以上の強度を有する自動車部品を製造出来る3次元熱間曲げ焼入れ(3DQ)技術を開発した。3DQは、閉断面部材の複雑な3次元成形を行うと同時に焼き入れを行う連続成形である。開発した3DQ技術と3DQによって得られる製品特性を報告した。

Abstract

Recently, the automotive industry has been focusing on developing on lighter vehicles to improve fuel economy and crash safety. In order to meet these requirements, Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ) Technology, which enables the formation of automotive parts with a tensile strength of 1470MPa or more, has been developed. This 3DQ is a consecutive forming that allows three dimensional complex hollow bending and Quenching at the same time. In this reports, developed 3DQ technology and characteristics of products by 3DQ are described.

1. 緒 言

自動車には、地球温暖化防止を目的としたCO₂排出量削減(燃費向上)のための車体軽量化と、衝突安全性向上が求められている。これらの2つの相反するニーズに応えるために、新日鐵住金(株)、日鉄住金鋼管(株)、日鉄住金プラント(株)は、3次元熱間曲げ焼入れ(Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench:以下3DQと記す)技術を開発した。3DQは、鋼管やロールフォーム材を素材にして、3次元形状の超高強度な自動車部品を、1工程で製造できる画期的なプロセスであり、他の材料に比較して、高強度の部品が安価に得られる鉄の良さを、究極まで引き出すことが可能となった。本報では、3DQ技術の概要と製品性能について報告する。

2. 開発の背景と目的

近年、地球温暖化への対策として、自動車の更なる燃費

向上に伴う二酸化炭素の排出量の大幅な削減と衝突安全の向上が急務となっており、更なる技術開発が必要となってきた。

自動車の軽量化を達成する手法として、材料の更なる高強度化が重要であるが、プレス加工の開断面の溶接組み立て構造を、鋼管を素材とした一体加工により閉断面構造とすることも有効である(表1)。この観点から、鋼管ハイドロフォーム^{1,2)}は、従来のプレス成形品の溶接組み立て部品と比較して、

- 閉断面の複雑形状部品の一体成形が可能であることから、プレス成形の溶接組み立て時に必要なフランジ部が省略できるとともに、部品点数の省略や付加的な溶接が省略できる
- 加工硬化が得られる
- 形状凍結性が良好である(スプリングバックが小さい)ため、成形精度が良好である

といった長所があり、自動車部品に適用されてきた。現在、

* 鉄鋼研究所 加工技術研究部 上席主幹研究員 博士(工学) 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

表1 自動車の高強度部品の加工法
Forming method for high-tensile automotive parts

	- 980 MPa	1470 MPa -
Open cross section structure	Cold stamping	Hot stamping
Hollow tubular structure	Hydroforming	3DQ

980MPa級の強度を有する鋼管を用いたハイドロフォームによる閉断面の自動車部品が実用化されている。

一方、熱間プレス^{3,4)}は、1470MPa以上の強度を有する閉断面の自動車用高強度部材として、1990年頃から欧州をはじめとして日本国内にも適用拡大している技術である。開発した3DQ技術は、熱間プレスの焼き入れによる強度向上と、ハイドロフォームによる閉断面構造加工の長所を併せ持つ画期的な技術であり、本技術を適用することによって、自動車の軽量化と衝突安全性の向上が期待できる。

3. 3DQ技術の概要^{5,6)}

3DQは、①1470MPa以上の閉断面の3次元部材を製造できる ②熱間加工であるため、従来の冷間成形に比べて、残留応力も小さく形状凍結性にすぐれている ③金型を用いないダイレス成形であり、設備もコンパクトである といった特長を有する世界初の技術である。

3DQの加工機を図1に示す。図1(a)は可動ローラダイス方式、図1(b)、図2がロボット方式であるが、鋼管の先端部を拘束し、3次元の加工に必要なモーメントを付与する。いずれも、サーボモータを用いた制御により、任意の3次元形状加工が可能である。

次に、開発した3DQのロボット方式の加工システム例を図3に示す。与えられた設計図面(CADデータ)から、塑性変形解析をベースにした逆解析プログラムを用いて、オフラインでロボットの軌道データを作成する。これらの軌道データに基づき、ロボットを動作させ、3DQの加工を行う。一般的に、3DQ加工におけるロボットの軌道は、複雑な3次元となる。そこで、軌道重視の新たな制御を導入したロボットを用いることで、加工の信頼性の向上と量産機化を実現した。

なお、汎用ロボットを採用することによって、大幅な設備のコンパクト化がなされている。さらに、装置の標準化の観点からも、ロボット化は有効である。機械式の装置では、製造する部品に合わせた個々の設計になりがちであるが、汎用ロボットを適用することで、標準設計化(短納期化)を実現することができた。更に、金型を用いないダイレス成形であるのに加えて、ロボットの軌道データを入れ替えることが極めて容易であることから、本加工システムは、少量多品種の生産にも適している。

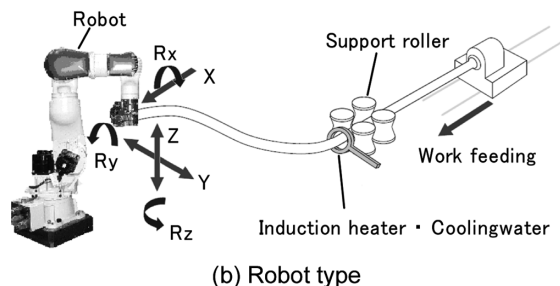
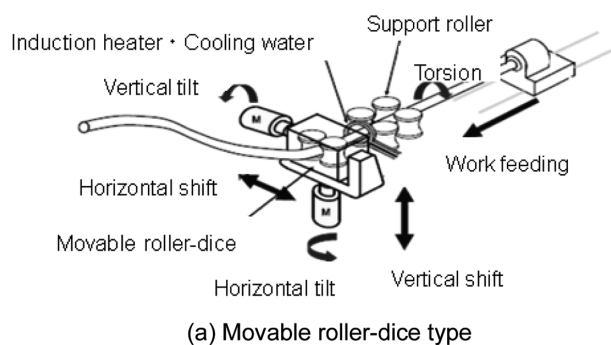


図1 3DQ加工機の概要
Schematic illustration of 3DQ machine

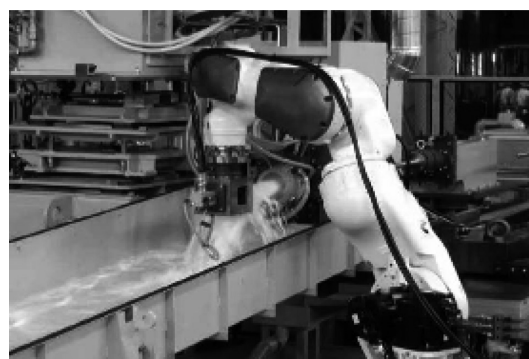


図2 3DQ加工機の外観(ロボット方式)
Photograph of 3DQ machine (robot type)

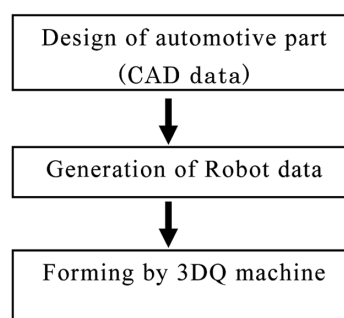


図3 3DQの加工システム(ロボット方式)
3DQ system (robot type)

3DQでは、図4に示す種々の断面形状の鋼管やロールフォーム材を用いることが出来る。図5に、高さ35mm、幅45mm、板厚1.6mmの矩形鋼管を用いて、3DQ加工を実施した場合の温度の測定例を示す。送り速度は80mm/sとし、鋼管内面の熱電対により温度を測定している。高周

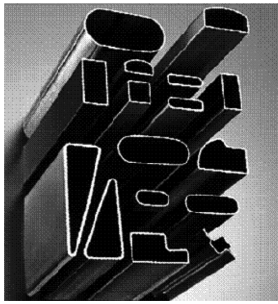


図4 3DQの素材となる鋼管の例
Various shaped tubes using 3DQ process

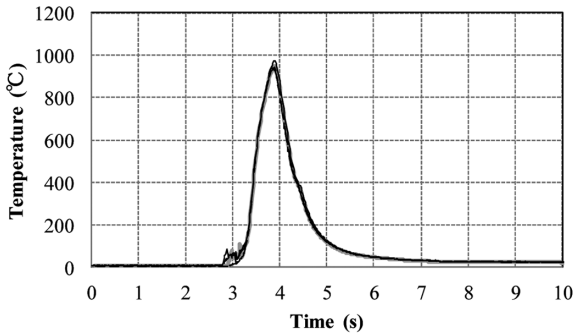


図5 3DQでの鋼管内面の熱履歴の例
Example of measuring temperature in 3DQ process
(feeding speed 80mm/s, 35mm height × 45mm width × 1.6mm thickness)

波加熱コイルにより A_c3 点以上の温度に急速加熱され、冷却水で室温まで急速冷却される。

後述する FEM 解析モデルを用いて 3DQ での変形を解析した結果を図6に示す。曲げ内周側中央部の板厚中心の温度と軸方向の歪速度を示している。曲げ変形は高温領域に集中しており、この解析条件では軸方向約 20mm の極めて狭い領域で曲げ加工が施され、その直後にマルテンサイト変態による強化が行われる。したがって、熱間領域の加工であるため加工による残留応力は極めて小さい。なお、加工領域の変形抵抗は、素材の 1/10 以下、焼入れ後の 1/30 以下であり、変形抵抗の高い冷間領域に拘束されながら曲げ加工が行われるため、断面の変形が抑制される。

4. 3DQで得られる製品の性能例

3DQ で試作した製品の硬度分布の一例を図7に示す。40mm × 40mm の角断面の肉厚 1.8mm の鋼管を 3DQ 後、肉厚中心と表面と内面から 0.2mm 位置の硬度を測定した結果である。均一な硬度分布が得られており、1470MPa 以上の強度が得られている。図8は、同一部材のマイクロ組織を観察した結果である。微細なマルテンサイト組織が得られている。

図9は、高周波加熱コイルの電力をオン・オフ制御することにより、40mm × 40mm 肉厚 1.8mm の製品を部分焼入れした硬度分布を示している。高周波コイルの出力変化

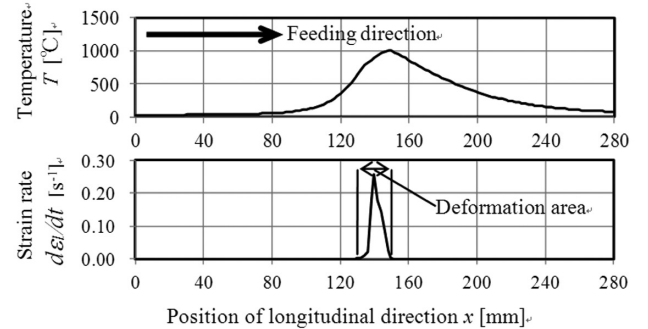
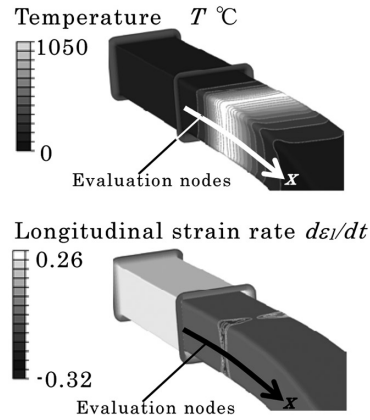


図6 3DQにおける温度分布と変形領域 (FEM)
Distribution of temperature, strain rate in 3DQ (FEM)
(feeding speed 80mm/s, 35mm height × 45mm width × 1.6mm thickness)

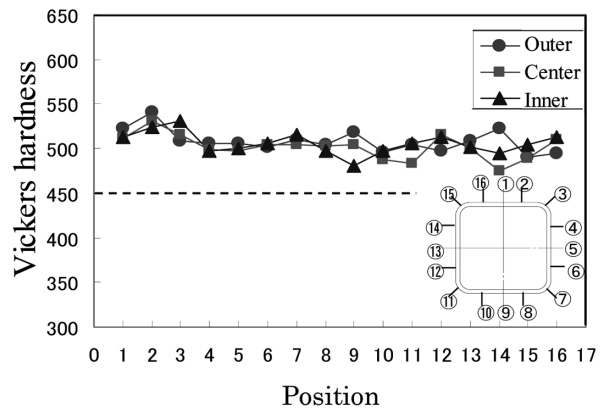


図7 3DQで得られる製品硬度の一例
Example of hardness distribution of product by 3DQ
(40mm × 40mm, thickness: 1.8mm)

に対応した硬度が得られており、自動車部品に必要な部分のみを強化することが可能である。

次に、同一の矩形鋼管を単一曲げし、全体を焼き入れした部材と曲げ部分のみを焼き入れした試験片を用いて、軸圧潰試験 (錘体重量:430kg, 錘体初期高さ:2.4m) を行った。結果を図10, 11に示す。これらの図に示す様に、全長を焼き入れた場合には、曲げ部分が初期の段階で屈曲するため、吸収エネルギーは低い水準となる。一方、曲げ部分のみを焼き入れした試験では、上部の未焼き入れ部分が初期の段階で潰れ、その後下部の曲げ変形が発生している。全長

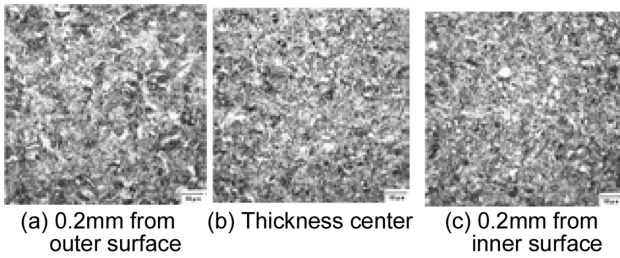


図8 3DQ による製品の肉厚方向のマイクロ組織
Micro structure of product by 3DQ
(40mm × 40mm, thickness: 1.8mm)

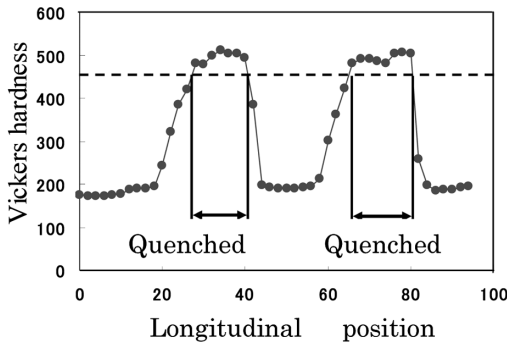


図9 3DQ による部分焼き入れの硬度分布例
Hardness distribution of partial quenched product by 3DQ

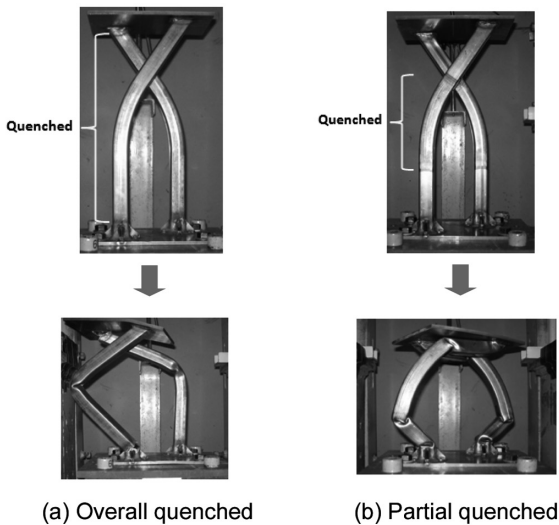


図10 軸圧潰試験での部分焼き入れ材の変形状況
Deformation of the partial quenched specimen by 3DQ in the axial crash test

焼き入れの試験片で最初に折れ変形を起こした曲げ部分は、部分焼き入れ試験片では、最後まで変形せず形状を保持した。一方、部分焼き入れ品の吸収エネルギーは、150mmのストロークで評価すると、全長焼き入れ品より大きくなっている。

以上の結果より、3DQで適切な部分焼き入れを施すことで、自動車部品の潰れモードの制御が出来る可能性がある。図12は、20mm × 60mm肉厚1.6mmの製品をねじり加工した製品の外観を示している。従来の加工法では、得られ

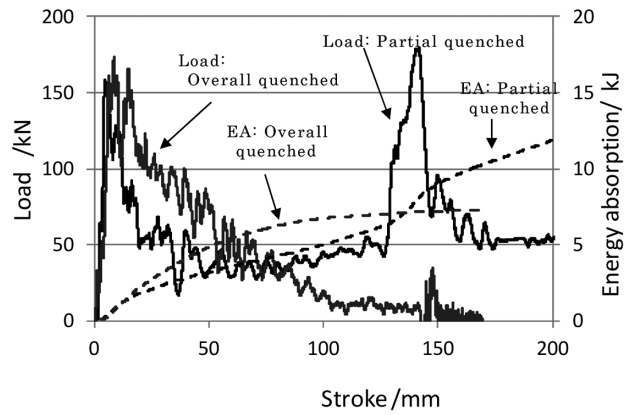


図11 軸圧潰試験での部分焼き入れ材の吸収エネルギー
Energy absorption of the partial quenched specimen by 3DQ in the axial crash test



図12 3DQによるねじれ加工例
Example of twisted products by 3DQ

なかつた複雑な形状の超高強度部品を得ることが可能である。

5. 解析モデルの開発

従来の高周波加熱曲げの解析としては、初等解析をベースとして、比較的単純な丸断面の製品に対して曲げモーメントや肉厚を求める方法^{7,9)}が提案されている。本解析では3DQで用いられる複雑な断面形状に適応可能な解析モデルを開発する必要があった。特に、複雑な異形断面の3DQ加工においては、周方向に均一な加熱を得るための最適加熱コイルの設計、加工力の推定、加工での変形(しわの発生など)を正確に予測できる手法の確立が重要となる。図13に開発したFEM解析モデルの概要を示す。

5.1 電磁場、熱解析¹⁰⁾

高周波加熱の数値解析は、電磁場解析によりジュール熱密度分布を算出し、伝熱解析により温度分布の計算を行う。一般的には、鋼管全体を有限要素モデル化し高周波加熱コイルと鋼管の相対位置を移動させながら解析を行うが、3DQのような長尺材を取り扱う場合には、鋼管と、広範囲の空気層をモデル化する必要があり、某大な解析時間が必要となる。

そこで、本解析では、モデル化範囲を鋼管の近くに限定

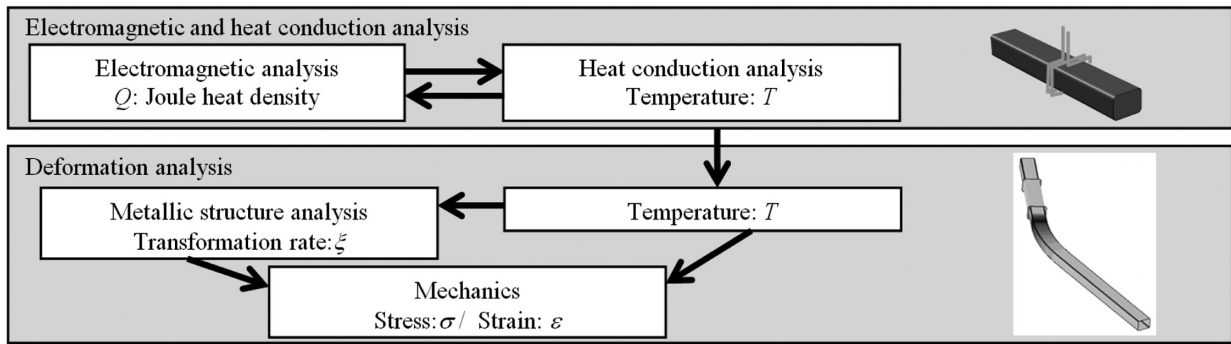


図13 3DQの有限要素法モデルの概要
Outline of 3DQ FE analysis

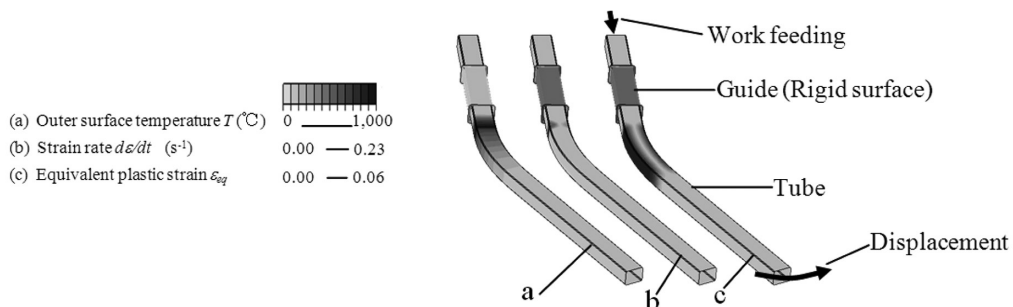


図14 3DQの有限要素モデルと境界条件
FE model of 3DQ and mechanical boundary conditions

し、鋼管を移動させる代わりに、伝熱に関する支配方程式に移流項を考慮することで、定常状態の温度分布を得る。また、解析モデル内にPID (比例・積分・微分) 制御を組み込み、温度制御を行うことで、自動的に最適な加熱電力を算出することが可能である。

更に、3DQの対象とする鋼材の場合には、磁気変態温度を境に強磁性体と非磁性体が混在するため、一定の透磁率を用いた解析では、解析精度は不十分である。そこで、材料の磁気特性の非線形性と磁気変態温度、導電率および熱特性の温度依存性を考慮している。本解析モデルにより、3DQの加熱コイルの最適設計や、加工中の温度分布などが、高精度にかつ高効率に得ることが可能になった。

5.2 変形解析¹¹⁻¹³⁾

前項で説明した電磁場 - 伝熱解析を用いて3次元的な温度分布を得て、変形解析モデルのシェル要素の各積分点位置へマッピングする。冷却は冷却水による対流熱伝達を考慮するため、実験から得られた熱伝達係数を用いた。次に、変形解析を実施する。3DQにおいては、金属組織の変化が生じており、加熱領域においてはフェライト - パーライト組織からオーステナイト組織へ変化し、冷却領域においてはマルテンサイト変態が生じる。したがって、各組織の体積率を算出することで、金属組織を推定している。変態開始温度には邦武¹⁴⁾の式を用い、マルテンサイト体積率の算出には Koistinen-Marburger 則¹⁵⁾を使用した。

式(1)に熱間加工において生じるひずみを示す。 de^e は弾性ひずみ、 de^p は塑性ひずみ、 de^{TH} は熱ひずみ、 de^{TR} は変態ひずみである。

$$de^{total} = de^e + de^p + de^{TH} + de^{TR} \quad (1)$$

弾塑性ひずみを考慮することで、しわや板厚変化等の大変形の解析が可能となった。また、熱、変態ひずみを考慮することで、熱変形や残留応力の解析が可能である。本モデルでは、上述した変態予測モデルを用いて、流動応力の温度および金属組織依存性を考慮した。熱および変態ひずみは、Miettinen¹⁶⁾の密度予測式と各金属組織の体積率を用いて算出した¹⁷⁾。ひずみ速度依存性は Cowper-symonds 則を用いて定義した。

5.3 解析の適用例

図14にモデル形状と境界条件を示す。境界条件としては、パイプ先端に強制変位を与え、ガイドは剛体とした。図15に解析と実験結果の比較を示す。解析は、しわのピッチ、深さについて若干の違いは認められるが、しわ発生状況を良くあらわしている。本解析を用いることによって、自動車部品の設計の形状最適化が可能になり、部品開発の効率化を達成できた。

6. 結 言

1470MPa以上の強度を有する自動車部品を製造可能な3DQ技術を開発した。超高強度の鋼管による自動車部品

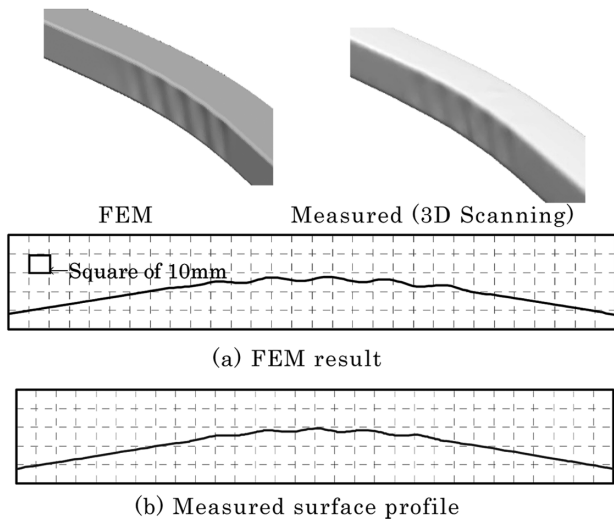


図 15 しわの実験値と計算値の比較

Comparison of measured wrinkle with calculated one by this model in 3DQ process

(図 16) の大幅な軽量化が期待される。現在、複数のラインで自動車部品の量産が、順調に進行中である。今後、更なる技術開発を進め、3DQ の適用拡大を図っていきたい。

謝 辞

3DQ 設備の開発において、ロボット制御の開発は(株)安川電機との共同で実施しました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kojima, M. et al.: Proc. of JSTP 195 Int. Joint. Symp. 2000, p. 244
- 2) Tomizawa, A. et al.: Proc. of Tube Hydro 2009. 2009, p. 1
- 3) 小嶋 ほか：自技会学術講演前刷集. 72-07, 2007, p. 13
- 4) Asai, T. et al.: Proc.IDDRG. 2004, p. 344
- 5) 富澤 ほか：平成 22 年度塑性加工春季講演会講演論文集.

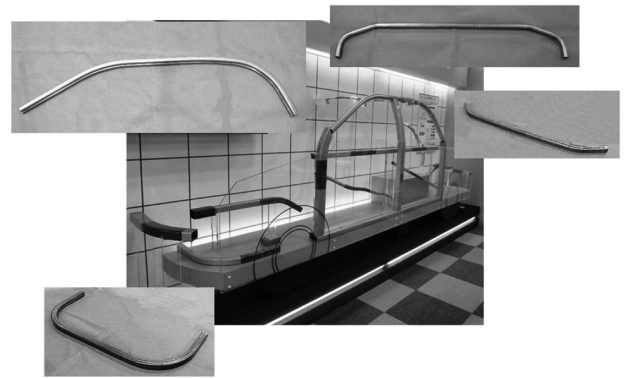
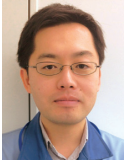


図 16 3DQ による自動車部品イメージ
Example of automotive products by 3DQ

- 2010, p. 207
- 6) 富澤 ほか：第 63 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2012, p. 171
- 7) 小嶋 ほか：塑性と加工. 28 (313), 214 (1987)
- 8) 浅尾 ほか：塑性と加工. 28 (313), 206 (1987)
- 9) 栗山 ほか：塑性と加工. 42 (481), 57 (2001)
- 10) 岡田 ほか：鉄と鋼. 98 (7), 38 (2012)
- 11) 窪田 ほか：平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2011, p. 49
- 12) 窪田 ほか：第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集. 2011, p. 149
- 13) 窪田 ほか：平成 25 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2013, p. 131
- 14) 邦武：熱処理. 41 (3), 164 (2001)
- 15) Koistinen, D.P. et al.: Acta Metallurgica. 7 (1), 59 (1959)
- 16) Miettinen, J.: Metallurgical and Materials Transactions B. 28B, 281 (1997)
- 17) 岡村：材料. 5 (5), 529 (2006)



富澤 淳 Atsushi TOMIZAWA
鉄鋼研究所 加工技術研究部
上席主幹研究員 博士(工学)
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



嶋田直明 Naoaki SHIMADA
鉄鋼研究所 加工技術研究部
主任研究員



窪田紘明 Hiroaki KUBOTA
鉄鋼研究所 加工技術研究部
研究員



岡田信宏 Nobuhiro OKADA
先端技術研究所 数理科学研究部
主幹研究員 博士(工学)



坂本明洋 Akihiro SAKAMOTO
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員 博士(工学)



吉田経尊 Michitaka YOSHIDA
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部
主幹研究員



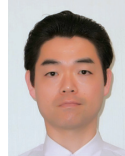
山本憲司 Kenji YAMAMOTO
鉄鋼研究所 材料信頼性研究部



森 弘志 Hiroshi MORI
設備・保全技術センター 機械技術部
機械技術開発室 主幹



原 三了 Mitsusato HARA
日鉄住金鋼管(株)
技術統括部 3DQ技術室長



桑山真二郎 Shinjiro KUWAYAMA
日鉄住金プラント(株)
尼崎技術部 自動車産機グループ
グループ長