

自動車分野のソリューション開発 (2) — 3次元熱間曲げ焼き入れ(3DQ)の設備開発 —

Automotive Solution: Equipments Development of 3-Dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ)

浜 崎 豊* 湯 本 淳 史
Yutaka HAMASAKI Atsushi YUMOTO

抄 録

自動車業界では、衝突安全性の向上と軽量化のために、車体に適用される鋼材の高強度化が拡大している。このニーズに対応するために、3次元熱間曲げ焼き入れ(3DQ)を開発した。3DQは、閉断面構造部材を焼き入れによる高強度化と同時に、任意の曲げ形状の加工を連続的に行う技術である。機械要素技術の観点から、3DQ設備の概要と設備開発について報告した。

Abstract

In the automotive industry, high strength steels has been applied to car body structure in order to improve the crash safety and light weight body. 3-Dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ) has been developed for this requirement. 3DQ is the process techniques for hollow steel, which is quenching and bending at the same time with optional three-dimensional shape. From the view point of mechanical element techniques, this report introduces 3DQ technology and equipment developments.

1. 緒 言

近年、衝突安全性の向上と燃費の改善を両立させるため、自動車車体に使用される鋼材には、高強度化のニーズがある。これに対応するために、従来から、ハイテンと呼ばれる高張力鋼板をプレス成形し、閉断面の成形品にフランジ部を設け、スポット溶接で接合した閉断面構造にすることで、強度と剛性を高めてきた(図1参照)。

3DQは、任意の曲げ形状(3次元形状)と焼き入れによる強度向上(>1470MPa)を、同時に実現する加工技術である。本技術の適用から、自動車の“衝突安全性の向上”と“軽量化”の両立が期待できる。

この3DQは、閉断面構造の材料を用いて、熱間曲げ加



図1 断面構造による軽量化の模式図

Schematic diagram of lightweight by various cross section of hollow structure

工と高周波焼き入れ加工を、一つの工程で行う。これは、従来のプレス成形ではできなかった、閉断面構造材を曲げ加工ができるので、フランジ部を削減できる。更に、製品加工を、一工程に簡素化できる。

一方、従来から、高周波加熱による加工法として、直管の焼き入れ加工や、熱間曲げ加工がある。それらと比べると、3DQはロボットを使うことで、鋼管を任意の曲げ形状に加工する点が特徴である。製品の形状が変わっても、ロボットの軌道を変更すればよく、従来技術のような特定長さのアーム治具や、プレスのような金型の変更を必要としない。

このように、従来のプレス成型と比べると、3DQは、フランジ部の削減から製品軽量化のメリットがある。また、従来の高周波加熱と比べると、3DQは製品形状に対する柔軟性に優位であるので、自動車部品への適用範囲の広さに期待ができる技術である。そこで、本稿では、従来技術との比較を基に、機械要素の観点から、3DQ設備を概説する。そして、3DQには特有の技術課題があり、それらを解決してきた設備開発について報告する。

2. 3DQ技術の概要^{1,2)}

2.1 3DQの加工の原理

3DQの原理に関わる主な機器構成を図2に示す。高周波加熱によって、 A_{C3} 変態点以上の高温まで鋼管を加熱後に、高温部の軟化した領域を曲げ、その直後に冷却する。ここで、高温部の曲げに必要な加工力は、ロボット（以降、曲げロボットと呼ぶ）が鋼管の先端を把持し、支持ガイドが鋼管からの反力を受けることで、連続的に行う。この結果、マルテンサイト変態による高強度化した、所望形状の製品を得る。

2.2 従来の高周波加熱技術の概要

比較のために、従来からある高周波技術を示す。一つは、直管向けの回転式焼き入れ技術である。鋼管を回転させるので、加熱と冷却の周方向の均一性に優れている（図3³⁾参照）。もう一つの従来技術は、高周波で加熱し、鋼管の先端をアームで把持し、旋回させることで、一定の曲率の曲げ加工（平面内2次元的）を行う方法である（図4⁴⁾）。

2.3 3DQ装置の課題

従来技術の中で、製品の鋼管サイズが近いと考えている回転式焼き入れと3DQの特徴を比較した。その概要を表

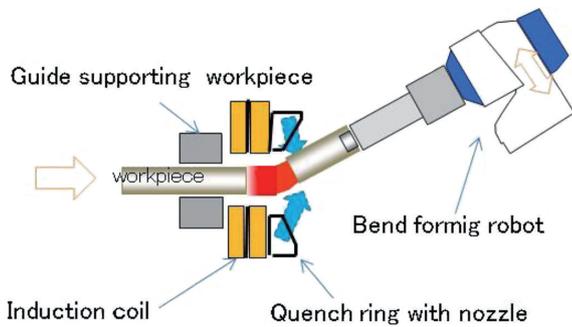


図2 3DQの加工原理
3DQ process principle

1に示す。

従来の回転式と3DQに共通しているのは、鋼管と加熱コイルとのクリアランスの大きさの差異が、誘導加熱の効率を変化させ、鋼管への加熱量に影響を与える点である。また、加熱コイルの下流（鋼管が送られる方向）側に冷却ノズルがあるが、その冷却効果にも、クリアランスの差異が影響する点で共通している。

両方式の違いは、回転式において、鋼管と加熱コイルとの両者の中心の芯ずれが生じると、クリアランスは一定で

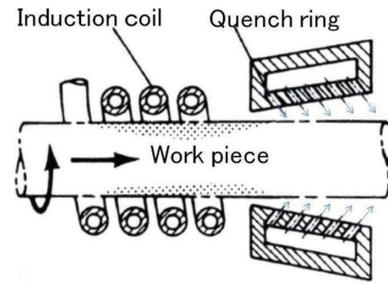


図3 回転式焼き入れ装置の一例³⁾

Example of conventional induction heat system with rotating work piece

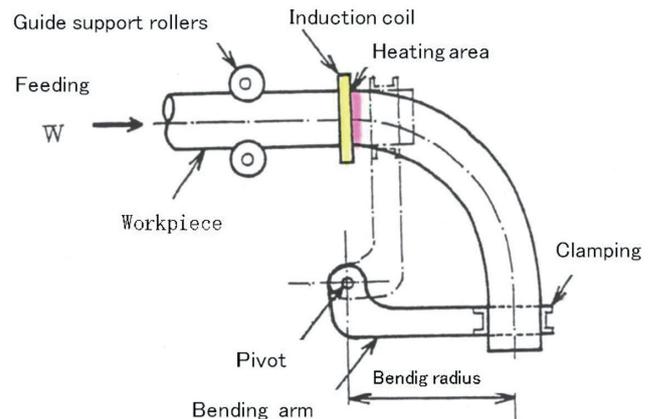


図4 高周波熱間加工曲げ装置の一例⁴⁾

Example of conventional induction heat system with bending work piece

表1 従来の回転式と3DQの特徴比較
Characteristic of conventional type and 3DQ

Type	Heating and quenchig schematic	Temperature deference in circumferential direction
Rotary (conventional)		<p>Good (It might be low due to rotation, even if clearance is not constant)</p>
3DQ		<p>Poor (It might be high due to high frequency heating focusing, if clearance is not constant)</p>

はなくなるが、鋼管を回転させているので、受ける熱量と冷却効果の周方向の不均一性が緩和する点である。その結果、周方向の温度が均一化し、加工が安定化する。但し、加工できる形状は、直管のみである。

一方、3DQは曲げ加工を行うので、基本的に、鋼管を回転させない。このことから、鋼管と加熱コイルとのクリアランスが一定でなければ、鋼管への加熱量と冷却効果において、周方向で不均一を生じる性質がある。また、加熱された高温域（高温で軟化した領域）の長さが、回転式と比べ、3DQは短い。理由は、曲げの加工形状を安定化させるために、高温に軟化した領域を短くしている。

このように従来の回転式と比べると、鋼管を回転させない点と曲げ加工する点から、3DQ装置の特有の課題がある。

2.4 3DQの装置要件

従来の高周波技術との比較の観点から、3DQの装置としての特徴的な要件を以下に示す。

2.4.1 鋼管の拘束位置の高精度化

均一な加熱冷却を得るために、加熱コイル及び冷却ノズルと鋼管の間のクリアランスが、一定かつその位置が安定していることが必要となる。そのため、鋼管の把持及び支持装置には、高精度が要求される。

2.4.2 高温域の短縮化

加工安定化のために、鋼管の加熱部の高温域（高温で軟化した領域）は短い、その実現には、加熱コイルと冷却ノズルの隣接した配置と、鋼管の急速な冷却が必要となる。

2.4.3 装置要件の多様性

自動車部品の形状は多種なので、製品の曲率半径や直線長さ等の形状の条件も多種である。条件が変わっても、装置要件を満たすことが求められる。装置開発は、これらの要件を満足すべく進めてきた。

2.5 3DQの装置構成と加工の流れ

システム全体の装置構成を表2と図5に示す。一例として、加工の流れを紹介することで、装置の構成を説明する。予め、鋼管の先端部分を曲げロボットが把持する。また、コイル近傍の鋼管を支持ガイドが挟み、拘束する。送り装置は、鋼管の後端部を把持しながら鋼管を送り、曲げロボットは、所望の製品形状になるように軌道を制御しながら移動する。この送り装置と曲げロボットは同調して移動する。これと同時に加熱コイルは、鋼管の誘導加熱を行う。鋼管は高温になり、その直後に、冷却ノズルから焼入れ水が散水される。

水槽に保有された焼入れ水は、ポンプによって、冷却ノズルに供給される。鋼管に散水した焼入れ水は、水受けパ

ンに集水され、消泡装置を経由して、水槽に戻る。

写真1は、加工開始前の、冷却ノズルからの焼入れ水の散水状況を示す。散水を装置の側面から見た外観である。鋼管の急速冷却を実現するために、相当な水量であることが解る。写真2は、加工中の曲げロボットのマンピュレー

表2 3DQ 設備の構成
Component of 3DQ system

Classification of apparatus	Main item of apparatus
Holding	Feeding, guide supporting and chucking for work piece
Heating	Induction coil
Cooling	Storage tank, pump, quenching ring
Bending	Bend forming robot

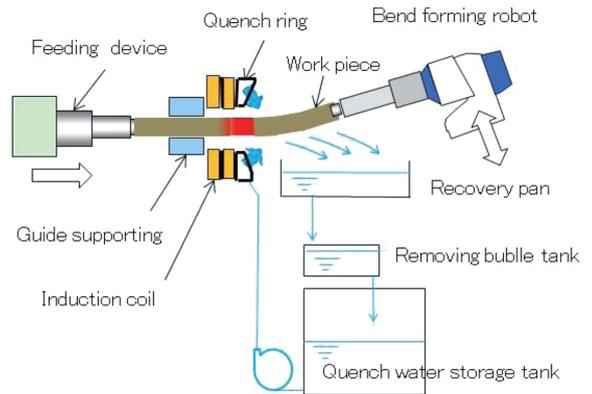


図5 3DQ システムの装置構成 (単腕タイプ)
3DQ system schematic



写真1 冷却ノズルからの焼入れ水の散水
Water spray from quenching ring



写真2 加工中の曲げロボット外観
Bend forming robot during process

ターの先端部が鋼管を把持している外観である。鋼管が赤熱し、下流側へ焼入れ水が散水していることが解る。散水後の焼入れ水は、水受けパンで回収される。

2.6 設備のタイプ

3DQ 設備は、加工する製品対象の形状やサイズに合わせ、曲げ加工する手段に3種のタイプがある。個々の特徴を以下に概説する (表3参照)。3種のタイプに共通しているのは、マニピュレーターに汎用ロボットを適用している点である。通常、加工設備は、製品形状に応じた機械構造を、個々に設計、製作することが一般である。3DQでは、製品要件が多種であることを想定し、それに敏速に対応できるように、個々の装置の汎用性を高め、設計、製作、維持管理の省力化を図っている。

2.6.1 単腕タイプ

1台のマニピュレーターが、加工力を与える設備の構成を単腕タイプと呼ぶ (図6参照)。小～中径サイズの鋼管による、簡単な製品形状を対象としている。曲げロボットの軌道の自由度から、加工製品の曲率半径が変化する形状の加工が可能である。

2.6.2 双腕タイプ

双腕タイプは、3台のマニピュレーターで構成され、協調制御する。単腕タイプの支持ガイドの代わりに鋼管の端部を把持するマニピュレーター1台、加熱コイルと冷却ノズルを保持するマニピュレーター1台、単腕タイプの曲げロボットに相当するマニピュレーター1台の構成である。主に、U字形の製品形状を対象とし、次の特徴がある (図7参照)。

表3 ロボット構成のタイプ
Type of bend forming robot with 3DQ system

Robot type	Cross section of work piece	Shape of product	Bending force
Single arm	Small and medium	Simple	Middle
Double arm	Small	U-shaped bend	Low
Parallel link	Large	Complex	High

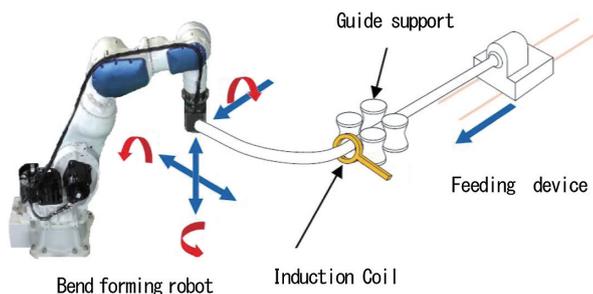


図6 単腕タイプ概略図
Single-arm robot type system schematic

第一に、単腕タイプが1台のロボットで曲げるために、可動範囲に制約があり、加工する寸法形状にも限界がある。一方、双腕タイプは、複数のロボットを使うので、それらを合算したロボットの可動範囲が増す。そのために、特殊な形の加工に対応することができる。

第二に、単腕タイプならば、鋼管の先端であるロボットが把持する部位と鋼管が加熱される部位の距離が大きくなると、必然的に、マニピュレーター先端の移動量や加速度が大きくなり、ロボットの振動や遅れ時間を生じ易くなる。一方、双腕タイプは、複数のロボットが、加工に必要な駆動を分担するので、個々のロボットの移動量や加速度を低減できる。このため、ロボット動作による加工精度の悪化を低下できる。

2.6.3 パラレルリンクタイプ

大径の鋼管の加工には、ロボットの大きな駆動力と高剛性のマニピュレーターが必要になる。このような加工製品に対応するのが、パラレルリンクロボットである。3台のマニピュレーターで構成され、その先端部が一体になって協調制御する。この先端部に、鋼管を拘束するローラを設置し、曲げ加工力を与える仕組みである。一例であるが、更に、鋼管の先端部を把持するロボットを配置し、曲げに必要な駆動力と鋼管端部を把持するロボットが協調動作することで、大径の鋼管形状でも、加工可能とした (図8参照)。

2.7 製品の適用例

3DQ 製品として、期待できる適用例を図9に示す。バンパー、Aピラー、ドア補強材 (ドアビーム)、シート補強材 (シートクロスメンバー) 等の多様な用途がある。現在、製品として量産化の実績があるのは、ドアビームとシートク

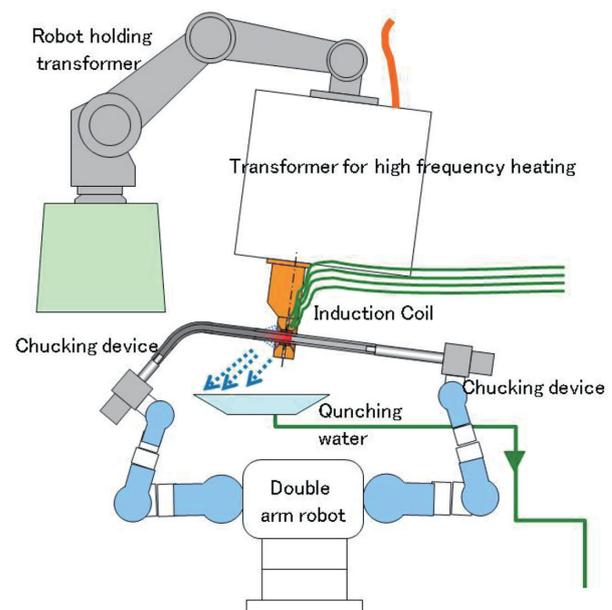


図7 双腕タイプ概略図
Double arm robot system schematic

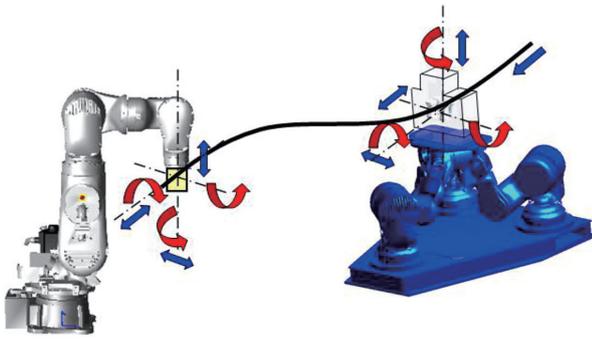


図8 パラレルリンクタイプ概略図
Parallel link robot system schematic

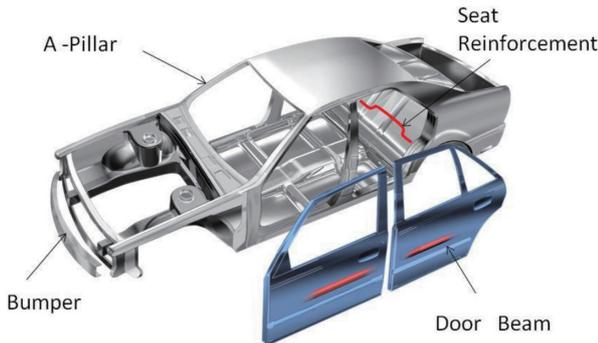


図9 自動車部品適用の例
Various examples of 3DQ product application to automobile parts

ロスメンバーである。ドアビームはドアに内装される補強材であり、シートクロスメンバーは、後部座席の下部に設置している部品である。

3. 機械要素の開発

3DQの装置性能は、加熱冷却、鋼管の拘束、曲げロボットの軌道特性等に依存するが、ここでは、システム全体の中で、機械要素開発の取り組みを報告する。

3.1 把持装置 (チャック)

曲げロボットの先端には、鋼管の端部を把持することで、加工力を与える把持装置 (以降、把持装置をチャックと呼ぶ) がある。機械要素開発の一例として、チャック開発について紹介する (図10参照)。

3.1.1 チャック把持長さの特性

加工形状において良好な精度を得るには、鋼管とチャックとの間で滑りが少ない安定的な把持が求められる。把持力は、チャック駆動部 (以降、チャック爪と呼ぶ) と鋼管内側の間の接触面圧が高いと、把持性能は良くなる。しかし、これが過ぎると、鋼管が断面変形する。図11は、荷重が高すぎたため、鋼管の断面変形量が大きくなった一例である。

一般に、鋼管の断面変形量が大きいと、製品として好ましくない。そこで、この断面変形を防ぐために、チャック

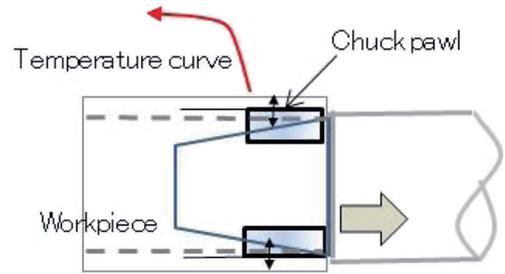


図10 チャックの側面から見た模式図
Side view of chocking work piece

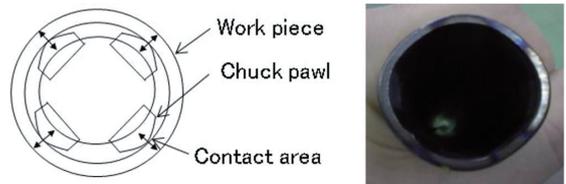


図11 チャックの断面模式図と断面変形の例
Cross sectional view of chocking work piece

表4 把持長さの特徴
Characteristic of chocking length

Contact area of chocking work piece	Long	Short
Work piece yield rate	Poor	Good
Holding performance	Good	Poor

爪を長くして、接触面圧を軽減することが考えられる。しかし、それによって、チャック爪が把持している領域は、誘導加熱による爪の損傷を避けるため、通常、非加熱とし、焼き入れ硬度が得られない。その結果、鋼管全長に対し、製品にできない範囲が増えるので、歩留りが悪くなる。このような背景から、チャックの把持には、“歩留のために把持部を短く”と“断面変形が少なく、把持力の安定化のために把持部を長く”という相反することが求められる (表4参照)。

3.1.2 チャック開発の取り組み

新日鐵住金(株)では、チャック爪の形状や長さの最適点を見出し、構造を開発してきた。この開発の難しさは、上述の把持長さの特性がある上に、鋼管径や肉厚が変わると、チャック爪と管内面の接触状態が変わるため、把持力や断面変形量が影響を受ける点である。更に、鋼管の形が、丸管と四角管のように異なると、チャック爪と管内面の接触位置が、把持力や断面変形の影響因子に加わる。このように影響因子が多い条件下、最適な把持性能を見極めることが課題であった。

これに対し、把持状態の基礎実験とCAEを用いた、すべりの現象解明を行うことで開発を進めている。図12は、管断面の特定形状における、チャックが受ける曲げ荷重とすべりの接触状態を予測するモデルである。チャックと鋼管の接触面が、接触始めから安定状態に移行する現象をシ

ミュレーションできる手法を開発した。これによって、鋼管の肉厚、曲げ荷重等の因子が変わっても、鋼管の断面変形量と把持性能を予測ができるようになり、チャックの構造設計の省力化に寄与している。

3.2 支持装置

曲げロボットが鋼管に加工力を与え、支持装置が鋼管からの加工反力を受けることで、鋼管が所望の形に加工される。機械要素開発の一例として支持装置の開発について報告する。

3.2.1 支持装置の課題

支持装置には、回転式と摺動式があり、各々の特徴を概説する(表5参照)。回転式は、ロールの外輪が加熱コイルに接触することを避けるため、ロールが鋼管を支持する部位と加熱コイルとの距離が、摺動式と比べ、大きくなる。そのため、鋼管全長に対し、支持できる範囲が短くなるので、鋼管の端部を製品にできず、歩留りが悪化する。

一方、摺動式は、シューと鋼管の接触部が摩耗するので、鋼管とシュー間のクリアランスの管理が必要になる。なぜなら、クリアランスが加工寸法の精度に影響するためである。図13に示すように、クリアランスが拡大すれば、鋼管の支持状態が変化し、所望の加工力が加わらないため、結果として、目標寸法との差異を生じる。このような背景

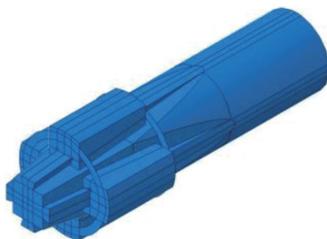


図12 チャックの解析モデル
Analysis model for chucking work piece

から、摺動式には、“クリアランス拡大による寸法精度悪化”の課題があった。これまでに採用実績の多い、摺動式における問題として、鋼管とシューとのクリアランス拡大の影響に関する課題解決に取り組んだ。

3.2.2 支持装置開発の取り組み

これまでは、鋼管とシューとのクリアランスが寸法精度に与える影響を試験的に評価し、クリアランスを調整する必要があった。よって、適切なクリアランスの管理値を、事前に定めることができれば、生産性の観点から、有用であると考えた。そこで、基礎実験とCAEを用いた現象解明により、クリアランスが荷重に与える影響を分析可能な解析モデルを開発した。クリアランスの拡大による、鋼管とシューの接触状態の変化と、加工反力の低下を予測することが可能になった(図14)。

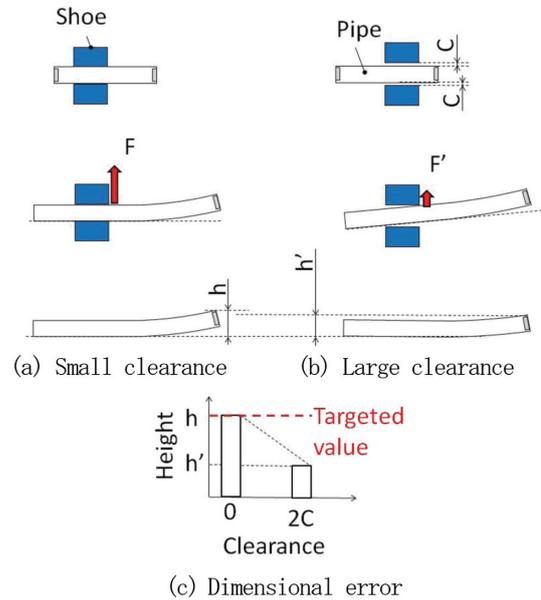


図13 クリアランス拡大による寸法形状への影響
Influence on dimensional accuracy due to clearance expansion

表5 支持ガイドの種類と特徴
Characteristics of guide support devices

Support type	Roller	Sliding
System components		
Strong point	High wear resistant	High yield rate due to supporting the end <u>edge</u> of workpiece by the shoes
Weak point	Non-high yield rate due to supporting the end <u>part</u> of workpiece by rollers	Deterioration in machining accuracy due to clearance expansion of frictional wear

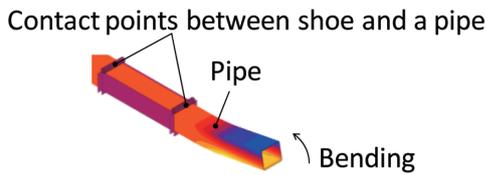


図 14 クリアランス影響解析モデル
Analysis model for shoe clearance

3.3 焼入れ水の消泡装置

焼入れ水は、3DQ 性能の冷却に影響を与える因子であり、この焼入れ水に含まれる気泡を低減する、消泡装置を開発した。

3.3.1 焼入れ水の課題 (気泡)

3DQ は、従来の高周波加熱と比べ、鋼管を急速冷却するために、多量の焼入れ水を、多孔の冷却ノズルから鋼管へ散水する。焼入れ水は、高い流速で鋼管と衝突し、熱交換した後は、周辺に飛散する。そして、外気と接触するため、気泡を含み、白濁になる場合がある。特に、自動車部品工場の生産ラインでは、連続操業を行うので、気泡が消滅する十分な時間がなく、気泡の発生が連鎖的になりやすい。一般に、気泡の消滅には、水槽の容積を大きくして、長時間の貯留による自然浮上に頼ることが多い。しかし、通常、3DQ 設備が導入される自動車部品工場の生産現場では、スペースの制約から、水槽容積を大きくすることが難しい。そのため、焼入れ水に気泡を含んだままに冷却を繰り返すことが、熱伝達効率の低下から急速冷却に悪影響を与える課題があった。

3.3.2 消泡装置の開発 (図 15 参照)

気泡を含んだ焼入れ水に対し、自然浮上の原理を利用した消泡装置を開発した。浅瀬に一時的に焼入れ水を滞留させると、その間に気泡が浮上する。浅瀬の底部にある気泡の少ない水のみを貯留槽へ戻すことで、気泡を除去する装置である。自動車部品の加工は、所定の時間に相当数の生産量が求められるので、焼入れ水の循環が連続的になる。そのような場合でも、この消泡装置によって気泡が低減し、安定的な加工性能を発揮できるようになった。

3.4 今後の装置開発の課題

自動車への 3DQ 製品の普及を考えると、今後の装置開発の課題は、解析モデルの活用範囲を広げることである。

3.4.1 今後の開発ニーズ

3DQ 製品が普及するためには、形状が多種になっても、それに柔軟に応じることができる装置が求められる。製品形状に合わせ装置要件が多種であると、それに応じた開発が求められるが、これに対し、個別の開発や設計では、多くの労力と時間を費やすことになる。このような状況にお

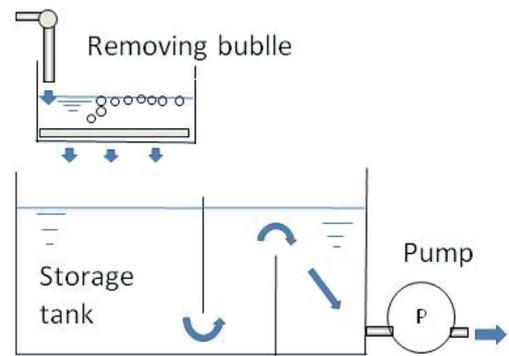


図 15 消泡装置の模式図
Apparatus of removing bubble in quenching water

いて、装置の設計方法を標準化することが有効と考える。

3.4.2 解析モデルの活用範囲の拡大

今まで、解析モデルを用いて、現象解明によって装置開発の効率を高めてきた。本稿で紹介した解析モデルは、鋼管の代表的な断面形状を前提にした、把持装置及び支持装置を対象としてきた。今後の設計方法の標準化を実現するには、解析モデルの活用範囲を広げることが課題になる。

第一に、鋼管の断面条件に関し、形、サイズ、肉厚等の因子があるが、これらの条件を変更した場合における、解析モデルの信頼性が重要となる。つまり、解析モデルに関する、諸条件の網羅化が課題となる。

第二に、現象解明の対象を、把持装置と支持装置の他にも展開すべきである。例えば、加工力が加わった鋼管の力学状態や、焼入れ水の流れ状態等を対象としたモデルの確立である。これは、解析モデルの対象分野を広くする課題である。

これらを実現でき、解析モデルの活用範囲が拡大できれば、多様な製品への条件変更に対し、装置の設計方法の標準化が可能となり、開発のスピードアップと設備の高い信頼度が得られると考える。

4. 結 言

3DQ に関し、機械要素の観点から、設備の概説と装置開発の取り組み内容を報告した。3DQ には、プレス工法と比べると、フランジ部分を削減できるので、加工製品の軽量化のメリットがあるが、従来の高周波加熱と比べると、独自の装置課題がある。それを解決するために、鋼管の把持及び支持装置の重要性や、急速冷却に必要な対策の一例として消泡装置を紹介した。今後も、本稿で紹介した技術を更に発展させ、3DQ の開発要求に役立てていきたい。

謝 辞

3DQ のロボット開発は、(株)安川電機との共同開発であることを記すと共に、厚く御礼申し上げます。また、装置設計・製作にご協力を頂いた日鉄住金テックスエンジニアリング(株)、

試験実施にご尽力頂いた日鉄住金鋼管(株)、モデル解析にご協力頂いた産機エンジニアリング(株)に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 富澤 ほか：3次元熱間曲げ焼入れ (3DQ) 技術の開発. 新

日鉄住金技報. (397), 83 (2013)

- 2) 森, 富澤 ほか:3次元熱間曲げ焼き入れ (3DQ) 設備の開発.
日本ロボット学会第30回記念学術講演会集, 2012
- 3) Richard E, haimbaugh: Induction Heat Treating. p.134
- 4) 浅尾宏 ほか:曲げ加工の基本特性の解明. 第33回塑性加工
連合講演会. 1982



浜崎 豊 Yutaka HAMASAKI
設備・保全技術センター 機械技術部
機械技術開発室 主幹
兵庫県尼崎市東向島西之町1番地 〒660-0856



湯本淳史 Atsushi YUMOTO
設備・保全技術センター 機械技術部
研究員 博士(工学)