

チタンとステンレスの異材接合工法研究と生産への導入

Research for a dissimilar-material fastening method for joining titanium and stainless steel and its deployment in manufacturing

中島 智之 新聞 敬也 塩野 由紀



図1 弊社オートバイ、チタンマフラ

要旨

近年、自動車業界では、メカニカルクリンチ工法が研究活用されている。今回、弊社ではオートバイマフラの軽量化とコストダウンの両立を狙い、チタンとステンレスの異材接合に取り組んだ。

本開発では、実験、解析を通して、加工の基本的性質を把握し、バラツキ影響を吸収する工程能力の高い工程設計を導入した。また、評価方法は、独自の開発により信頼性を高めている。

その結果、現在1万台以上を生産し、加工不良0を継続している。また、コストは、マフラパーテーション部品の37%を低減している。

Abstract

In the automotive industry in recent years, considerable research has been done on the mechanical fastening method known as clinching and its application in the manufacturing process. Here, we report on a dissimilar-material clinching method for joining titanium and stainless steel developed and implemented by Yamaha Motor to reduce both the weight and cost of motorcycle mufflers.

In this development project, testing and analysis led to a solid understanding of the basic properties of the clinching process and we implemented a process design with a high capacity to absorb the effects of material deviations. We also developed an exclusive method for evaluating the quality of the mechanical clinch that has increased reliability.

As a result, this process has been used to manufacture more than 10,000 units to date with a process defect rate of zero. Furthermore, this method has reduced the cost of muffler partition parts by 37%.

1 はじめに

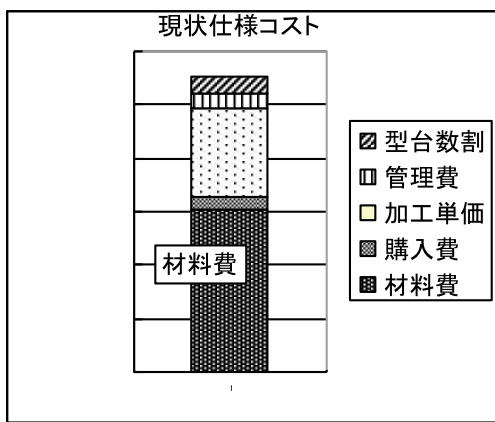
近年、自動車業界では、軽量化と剛性を両立させるために、アルミと鉄の異材接合が求められ、メカニカルクリンチ工法が研究活用されている。一方で、弊社ではオートバイマフラの軽量化とコストダウンの両立に取り組んでいる。オートバイマフラには、消音、排ガス浄化、エンジン性能はもとより軽量化やデザイン性が求められている。特にスーパースポーツモデル

の場合、軽量化のためマフラの構成部品にチタン材(密度が鉄の2/3)が多く使用されている(図1)。しかしチタン材は高価で、SUS304に比べ7倍にも相当する。軽量化とコストの両立の観点から、チタン材を適所に使用するのが理想であるが、異種金属の組合せでは溶接できないため、それに代わる接合工法が求められる。そこで、本開発ではメカニカルクリンチ工法について研究し、知見の少ないチタンとステンレスの異材接合条件を作りこんだ。また、工程能力の高い生産工程の設

定と、信頼性を高めた独自の評価方法開発で生産導入し、マフラパーテーション部品の37%のコストダウンを達成したので報告する。

2 従来の問題点

弊社のハイグレードモデルでは、チタンが多用され、マフラ原価の50%以上を材料費が占めている(図2)。モデルチェンジに当たり、軽量化とコストのバランスを見直し、部分的にステンレスに材料置換する検討を実施した。



材料費50%以上
図2 マフラコスト

従来のチタンマフラは、プレス成形した部品をTIG溶接、スポット溶接、リベット等で接合している。チタンとステンレスの異材接合の場合、TIG溶接やスポット溶接では、接合部に脆い金属間化合物ができるため接合されず、リベットでは貫通穴が開くために気密性が問題になる。そのため新たな接合工法の開発が必要になった。

3 異材接合工法の検討

3-1. 新しい工法の開発(メカニカルクリンチの検討)

メカニカルクリンチ工法とは、まず2枚の板を重ね合わせて型の上に置き、それをポンチで板鍛造のように押潰してカシメ接合する工法である(図3-1、図3-2)。これは一般的にALや鉄のような軟らかく、延性のある材料に用いられる工法で、4輪のALボンネット、ALパネル、家電のパネル等に用いられる工法である。今回のチタンでの適用例は、ツールメーカーでも殆ど知見が乏しく、また、マフラのように高熱が直接かかる部品への適用も知見が無いため、基礎条件の調査から進めた。

3-2. 対象部品の選定

対象部品の選定に当たっては、マイナーチェンジに織込ん

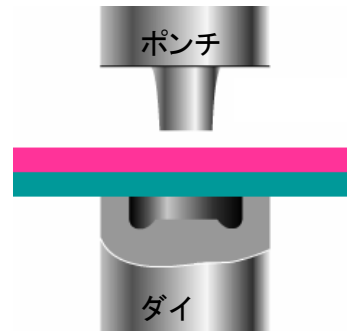


図3-1 メカニカルクリンチ



図3-2 メカニカルクリンチ断面

で、短期間に少ない型投資で、大きなコストダウン効果が得られる部品を狙った。

マフラ内部には消音、断熱のためにグラスウールを巻いたパンチング板の内筒がある。これをマフラ本体に固定するプレート部品は、要求強度が低く短期間の開発に適している(図4)。また、このプレート部品は、2本出しマフラの前後端に2枚使うため、

1部品の型投資で、4箇所の材料置換(チタンからステンレス)が可能となり、大きなコストダウン効果が得られる。これらの理由から、このプレートを材料置換の対象部品とした。



図4 プレートアセンブリ

4 製品成立性の確認

4-1. 製品としての成立性

異材を接合する本工法がマフラとして成立するためには、熱膨張による影響と電食の懸念について把握し、適切な対応が必要となる。そこで、それぞれの課題について調査を行った。

4-1-1. 熱膨張に対して

500℃にもなるマフラ内部では熱膨張の差が問題になる。そこで、熱膨張差を抑制するためには、置換する材質は、熱膨張係数がチタンに近い材料を選定するのが望ましい。塑性加工上では、加工性が良いのはオーステナイト系ステンレスのSUS304だが、熱膨張差を考慮し、フェライト系ステンレスのSUS436Lを選定した(図5)。

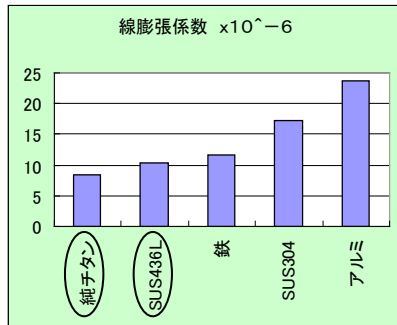


図5 熱膨張係数

さらに、熱膨張のわずかに大きいSUS436Lを内側にして、加熱されるとカシメが締まる方向に設定した。この状態で実際にヒートサイクル試験(500℃に急加熱、常温まで急冷却を200サイクル繰返し負荷の後、引張試験)を行い、加熱後に接合強度の低下が無いことおよび接合の必要強度を満たしていることが確認できた(図6)。

4-1-2. 凝縮水による電食に対して

マフラ内では排気ガスが冷却されて凝縮水が発生する。これが内部に滞留し、異材接合部分が浸かると、電食発生の懸念があり、確認が必要である。ステンレス、チタンはともに不働態膜があるため電食されないはずであるが、実際にテストを行い調査した。500℃で10時間加熱後に、72時間の塩水噴霧試験を行い、接合面を観察し、電食が無いことが確認できた(図7)。さらに引張試験を行い、強度変化を調査し、必要強度を満たしていることを確認した(図8)。熱膨張影響と電食のテ

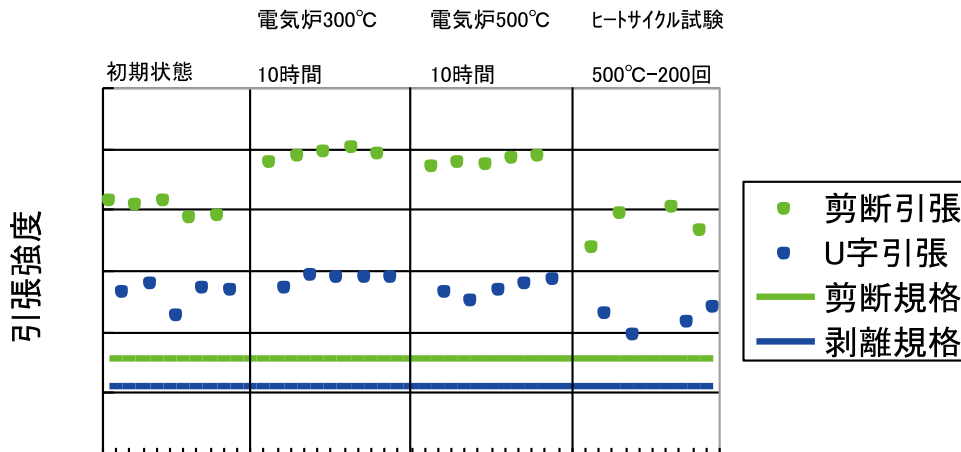


図6 ヒートサイクル試験後の引張強度測定

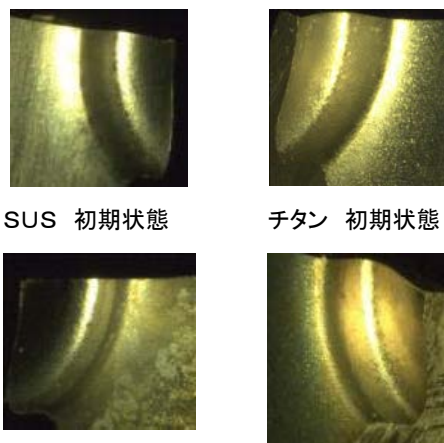


図7 加熱、塩水噴霧試験結果

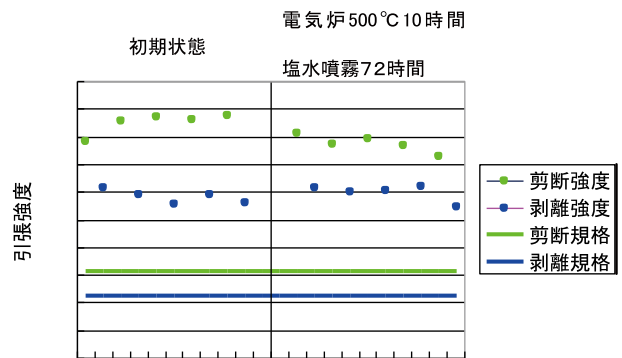


図8 加熱、塩水噴霧後、引張試験結果

ストの結果、マフラとして使用できることが分かった。

5 工法の研究

5-1. 基本的なメカニズムの調査

メカニカルクリンチの良品条件を設定するためにまず基本的なメカニズムを調査した。重なった板は型の中に絞られて、やがて底突きして斜め下の溝に外板の肉が流れて行く。中央の板厚が圧縮されると、横に広がり張出を形成する(図9)。

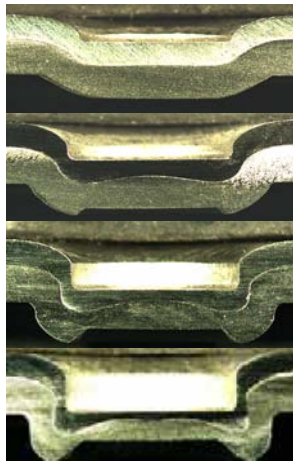


図9 加工の過程

張出が形成される部分をシミュレーション解析すると、ポンチ型に押し潰された肉が斜め下の溝に向かって流れていることが分かる(図10)。

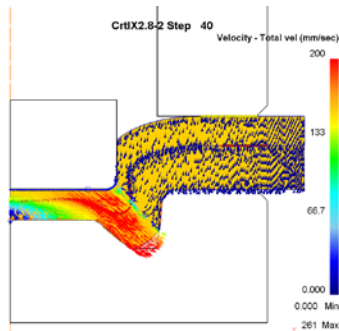


図10 材料流れの解析

5-1-1. 強度の規格設定

従来のスポット溶接強度を基準に、製品の接合部でそれ以上の強度を保証する必要がある。また接合強度は、板を垂直方向に剥がす力①「剥離強度」と板を水平方向に剪断する力②「剪断強度」の2方向の強度で判定する(図11)。材料のオーバーハング量が③「張出」で剥離の荷重を受ける。縦壁の厚さが④「ネック厚さ」で剪断の荷重を受ける。押し潰された中央の板厚を⑤「コントロールX」と呼ぶ。

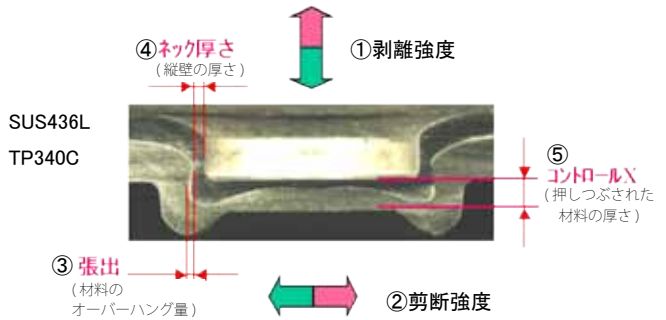


図11 剥離強度、剪断強度

5-1-2. 剥離強度

メカニカルクリンチの①～⑤の関係を数値で確認した。中央の板厚を押し潰していくと、ある所から張出が形成され始め、リニアに成長する。この時、剥離強度は張出にほぼ比例して上昇し、やがて頭打ちする(図12)。

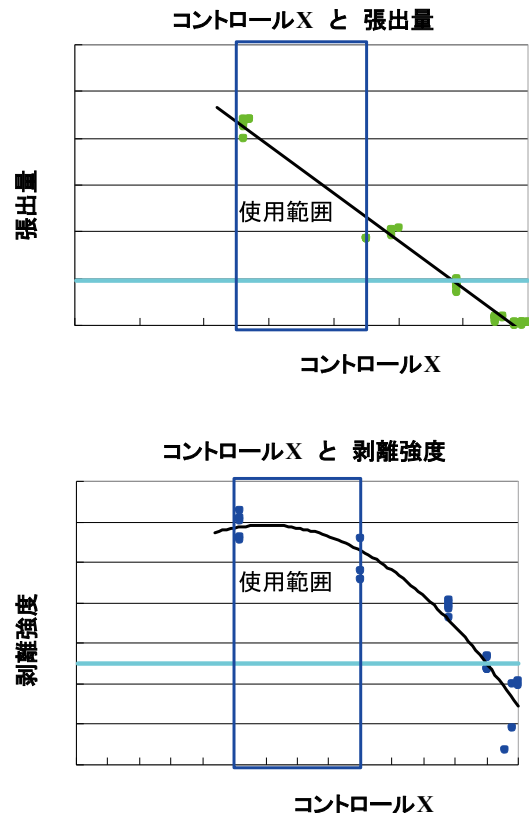


図12 コントロールXと張出、及び剥離強度の相関

5-1-3. 剪断強度

中央の板厚の押し潰しに関係無く、ネック厚さはほぼ一定になり、剪断強度はネック厚さに関係し、同様にその間一定になる。このような基礎データが取れた(図13)。

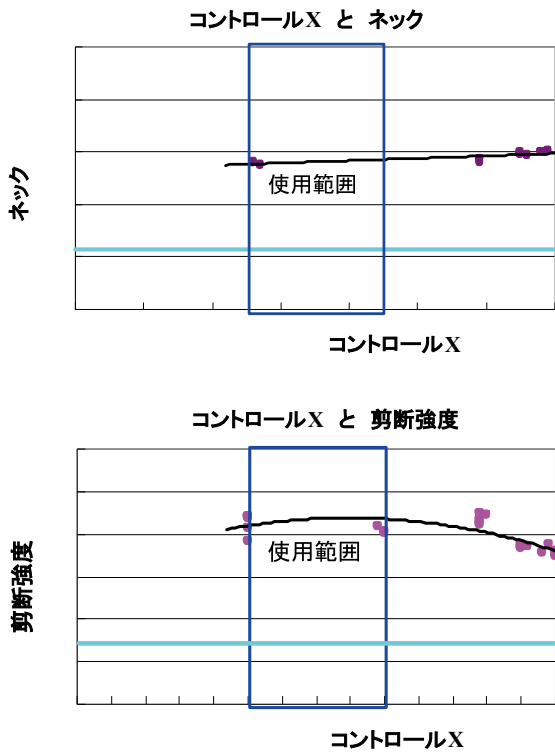


図13 コントロールXとネック厚さ、剪断強度

5-2. 生産工程の設定

実際の生産では、材料、設備、金型、人など各項目でバラツキがあるが、その中で強度に影響する3点と、工程能力に影響する1点について調査した。

5-2-1. ①素材板厚バラツキの影響

素材の板厚は±5%の公差でメーカーから納入される。板厚を潰して接合する工法のため、板厚のバラツキは、接合強度に大きく影響すると推察できるが、メーカーにチタンのデータが無く、公差内でバラついた状態を自ら解析した。その結果、張出に影響が出る事が確認できた(図14)。

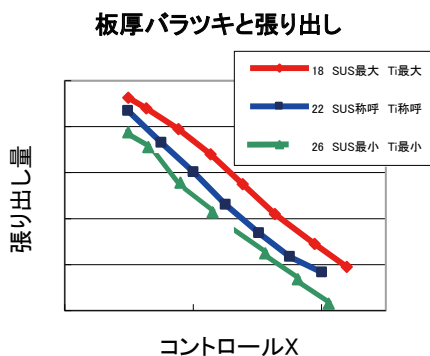


図14 板厚バラツキと張出の相関解析

5-2-2. ②合わせ面内の油の影響

素材と金型の間には、油が必要な工法であることは知られているが、素材間にその油が入った場合の影響は不明であった。作業手順や作業環境から、素材間に油が入る事は充分考えられる。解析の結果、その影響は想定していた以上に、張出に大きく影響する事が分かった(図15)。

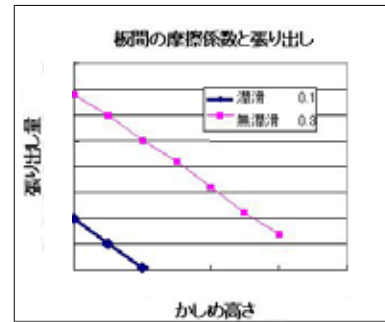


図15 コントロールXとネック厚さ、剪断強度

5-2-3. ③ポンチ、ダイ磨耗の影響

また数多く生産する中では、ポンチ、ダイの磨耗で先端形状が変わり、張出が変化することも考えられる。チタンとステンレスの接合では知見が無いため、その耐久性が不明であり、型償却費の観点からも調査が必要である。

5-2-4. ④測定バラツキの影響

メカニカルクリンチの剥離強度の根拠となる断面形状の測定方法を検討した。従来は、加工部分を切断し、電子カメラ画面上で境界部を目視でクリックし、寸法を拾っていたため、測定誤差が0.05mm程度あった(図16-1)。またメカニカルクリ



図16-1 目視でクリックする測定

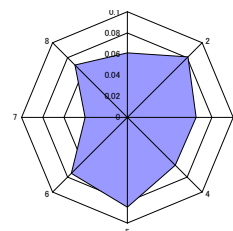


図16-2 位相で異なる張出

ンチの張出量は360°の全周で均一では無く、切断面毎にバラツキを持っている(図16-2)。

ALや鉄のように軟らかく押し潰し量を多く取れる素材では、張出量が充分大きく測定誤差の影響は小さい。チタンとステンレスでは押し潰し量が少なく張出量が小さいため、測定誤差の影響が無視できず、対策する必要がある。

5-2-5. 一般的な生産工程

調査したバラツキの影響を考慮すると、以下の生産工程となる(図17)。

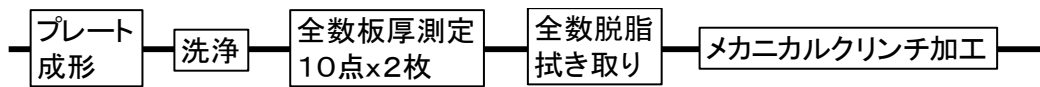


図17 一般的な生産工程

全数板厚測定と全数脱脂拭き取り工程は、①板厚バラツキと②油付着影響を対策するために存在する。しかしこの2工程によりコストダウン効果が大幅に打ち消される。また、③ポンチ、ダイ磨耗の影響があると、予備のポンチ、ダイを持たねばならず、予備型費が発生する。これらのコスト要因を削減するために、工程能力を向上させる施策を検討した。

6 生産への導入

6-1. 工程削減: 工程能力向上への取り組み

メカニカルクリンチは基礎条件テストの通り、押せば押すほど剥離強度が高くなり、やがて頭打ちして安定する。しかし、ポンチにかかる加圧力が大きくなり破損する危険がある。ポンチの応力解析を行うと、先端内部とスミRに応力が集中していることが分かる(図18)。

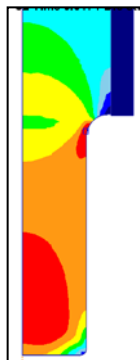


図18 ポンチ先端の応力解析

そこでポンチが破損しない範囲で高荷重の領域を狙い、剥離強度の工程能力を高めるようにする。充分な張出を出させて強度の余裕を上げ、上記のバラツキを吸収するために、ポンチストロークと、ポンチ荷重の相関を解析した(図19)。

中央の板厚を押し潰すとポンチ荷重が上昇していく。溝に充満すると急に荷重が上昇して金型破損危険領域になるので、この前までが使用可能領域である。

メーカーの一般的なポンチ荷重の推奨値は70KNであるが、金型破損危険領域までには余裕があることが分かったため、そのまま鶴呑みにせず、点線枠の強度が高く安定する領域を使う事が可能であると考え、高負荷領域でのツール耐久性を実際にテストした。85KNの荷重で製品償却台数分の繰返し負荷試験を行い、ツールに破損、磨耗が無いことを確認できた(図20)。

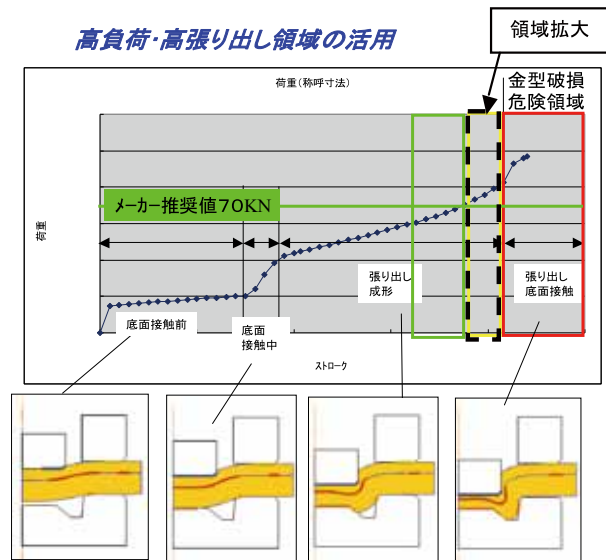


図19 ストロークとポンチ荷重の関係解析



サーボパルサー85KN×償却台数分

破損、磨耗無し

図20 負荷試験と結果

以上より高加重領域を使用することで工程能力が向上し、①板厚バラツキと②合わせ面油付着の影響による張出減少が吸収でき、全数板厚測定と全数拭き取り脱脂工程が不要になり、③破損磨耗の問題が無いことから予備型費も不要なこ

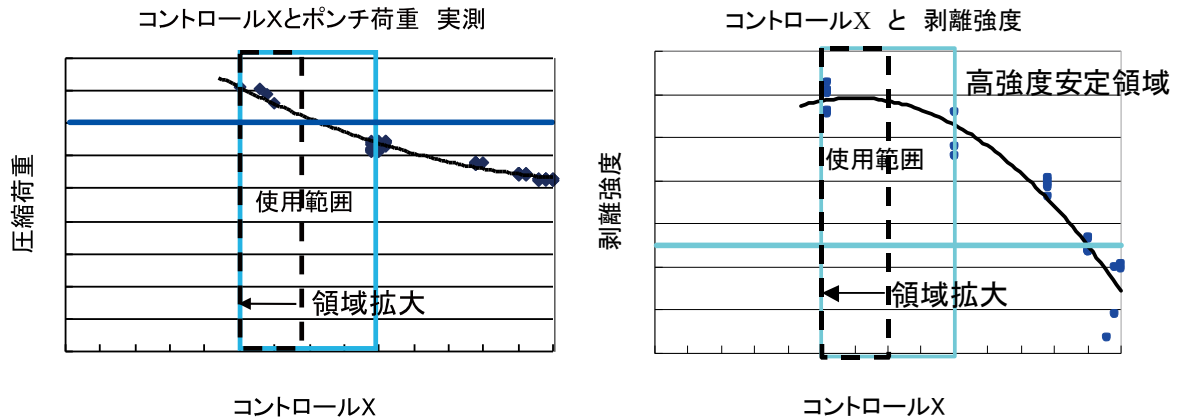


図 21 領域拡大

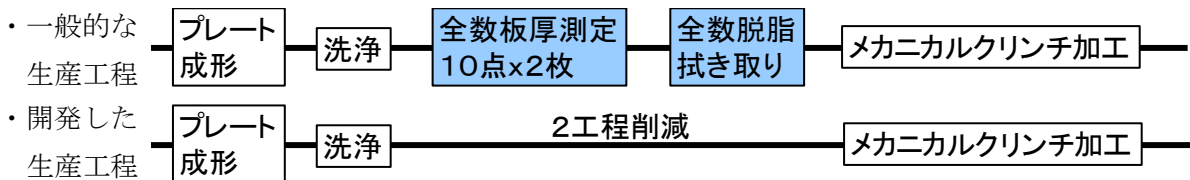


図 22 工程削減効果

とが分かった(図21)(図22)。

この自社開発した高精度な高速測定方式により、規格0.02mm以上に対して約0.07mmの張出を正確に判定できるようになった(図23-2)。

6-2-1. 接合品質評価方法、断面形状測定

④測定バラツキの影響を対策するため、高精度な測定方法としてCTでの断面測定を開発した。メカニカルクリンチ接合部の周囲をレーザーでくり抜き、専用治具に固定しCT撮影を行った後、境界部を自動測定する手順で行う。まず、CT測定で得られた3次元の内部形状データから、45°ずつの8断面を非切断で作成できるため、従来の2分割切断に比べ切断誤差が無く、データ量も4倍になる。また、開発した画像処理プログラムは目視ではなく、自動で境界線をピックおよび計測するため、測定誤差が少なく測定時間も短い(所要時間1/7)(図23-1)。

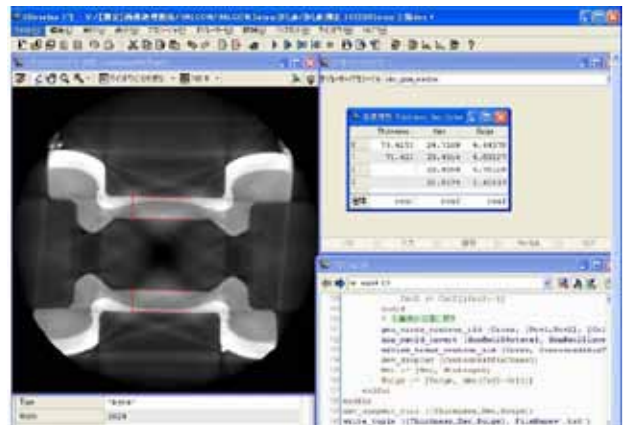


図 23-2 CT 画像処理、自動判定画面

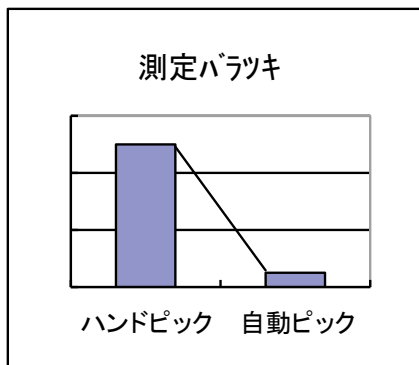


図 23-1 測定バラツキ

開発時はCT断面測定で良品条件を設定し、工程能力を評価した。高い工程能力から生産はコントロールX管理で対応可能となった。しかしながら確認の意味を込めて試験片での破壊試験は併用している。破壊試験データは、今後の他部品展開に役立てたい。

6-2-2. 引張試験(接合部の剥離試験)

U字引張試験での測定バラツキを少なくするためには、試

験片は専用治具、プレスを用いて正確に折曲げる必要がある。また、試験片が弾性変形領域Aで剥離する接合条件は強度バラツキが多く、塑性変形領域BになるまでコントロールXを追込み、接合強度を上げると接合強度が安定することも判明した(図24)。

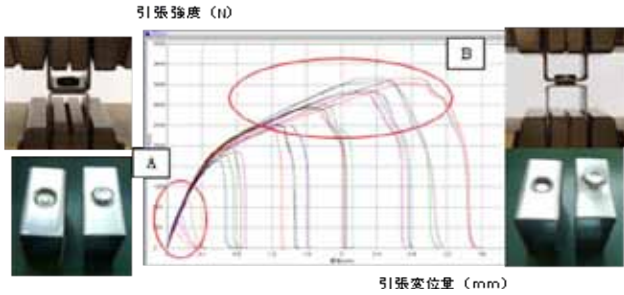


図 24 接合部の引張強度が安定する領域
1条件当たり n=4



図 25 10点同時打ち金型

6-3. 生産する設備及び型の仕様

設備投資抑制と生産性を考慮して、新たな専用装置の導入は行わず、既存のサーボプレスを使用し、従来のスポット溶接のように1点ずつではなく、ポンチを加工箇所分10点装着した金型を製作し、一度で加工できるようにした(図25)。

7 効果

以上を総合して生産移行確認のためN300打点の測定を行い、工程能力を最終確認した。コントロールX、張出は共に十分に高い工程能力をクリアした(図26)。

また、0次試作移行からの取り組みにもかかわらず、短期間に開発、生産移行でき、現在工程不良『0』で生産継続中である。コストダウン効果は、材料費の差額から型治具費用等を差し引いたものになり、予備ポンチ削減、10点同時加工の効果を含めて下記の結果となった(図27)。

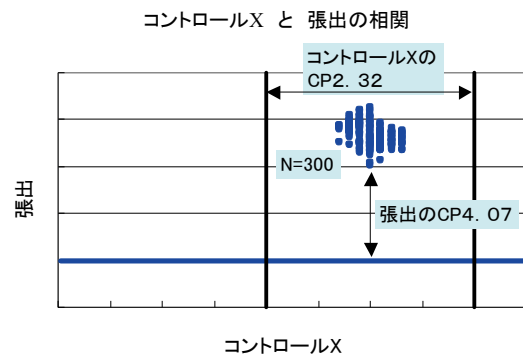


図 26 コントロール X と張出の N300 分布

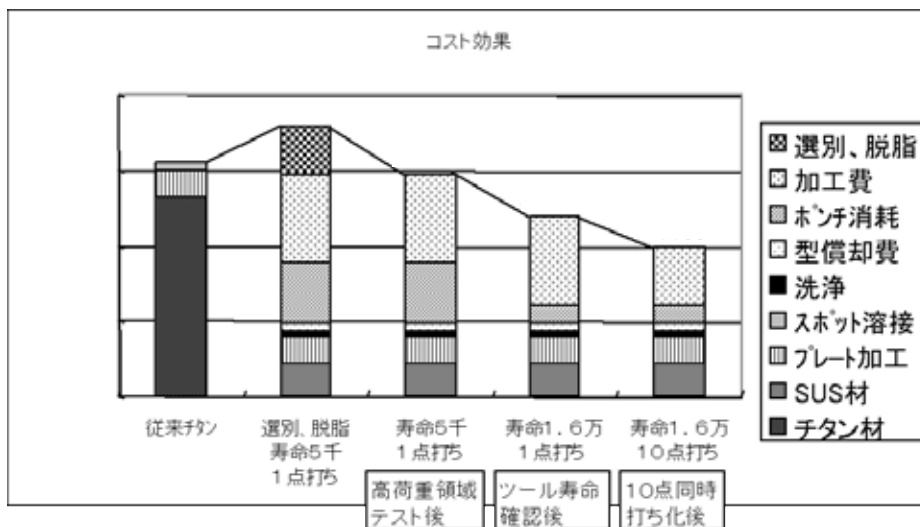
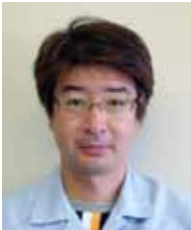


図 27 コスト効果

8 おわりに

メカニカルクリンチの基本的性質を把握し、生産課題をクリア、最適な評価方法を確立し、実際に生産へ導入できた。今後は素材置換えだけでなく、溶接困難なメッキ鋼板やアルミの接合改善、リベット接合箇所の軽量化とコストダウンを計画している。さらに、燃費要求からの軽量化のため、鉄とアルミの接合にも適用していきたい。

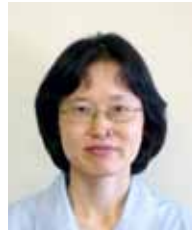
■著者



中島 智之
Tomoyuki Nakajima
技術本部
生産技術統括部
生産技術部



新間 敬也
Yukiya Shinma
技術本部
生産技術統括部
生産技術部



塩野 由紀
Yuki Shiono
技術本部
生産技術統括部
生産技術部