

溶接管理技術者の体験紹介

レーザブレイズ接合 (Laser Beam Brazing) の 高速化へ向けてのアプローチ

ホンダエンジニアリング株式会社
堀向 俊之

1. ニーズと背景

近年、軽自動車のツートンカラーのデザイン性やルーフの見栄えを向上させて魅力をより高めることが求められている。そのため弊社では、一般的な乗用車に用いられているルーフと左右のサイドパネルの接合部を覆うための黒い樹脂モール (図 1 参照) を不要にし、コスト削減や軽量化にもつながる新技術を開発した。具体的には、図 2 に示すような耐疲労強度性の高い凹のメニスカス形状ビードが形成されるフレア継手を用い、ろう付けの一種であるレーザブレイズ接合 (Laser Beam Brazing) を適応した。更に、一般的なレーザブレイズ接合の速度 (~4.5m/min) では、弊社生産加工タクトを満足することができないことから、生産性を維持させるためにその接合速度の高速化 (6m/min 以上) にも取り組むこととした。



図 1 樹脂モールのルーフ外観

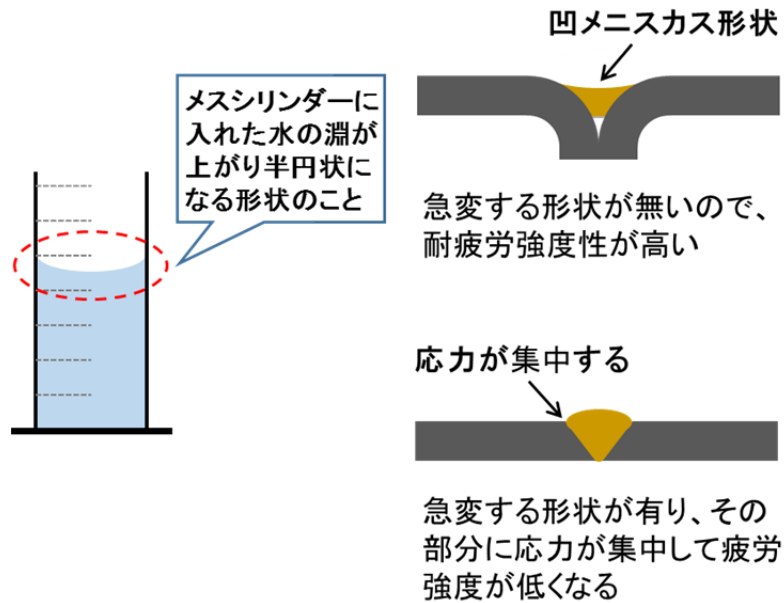


図 2 凹のメニスカス形状と疲労強度

2. 現状把握

レーザーブレイズ接合は、母材よりも融点の低い銅合金ワイヤを連続的に供給しながらその上方の方向より、レーザー発振器からレーザーヘッドを経て集光されたレーザービームを熱源に利用してそのワイヤを熔融させ、母材表面に連続的に流し込んで母材自体を熔融させずにろう付けする接合法である（図 3 参照）。

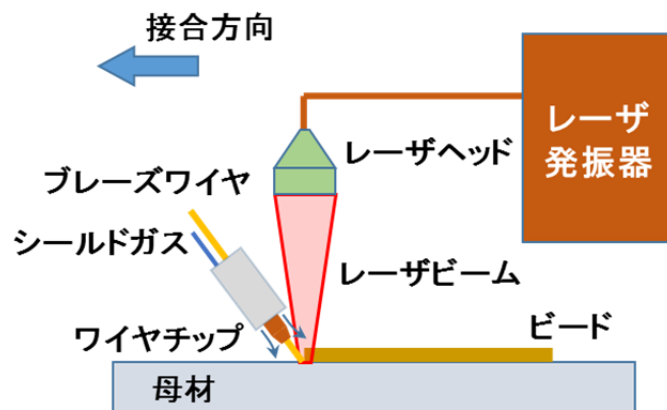
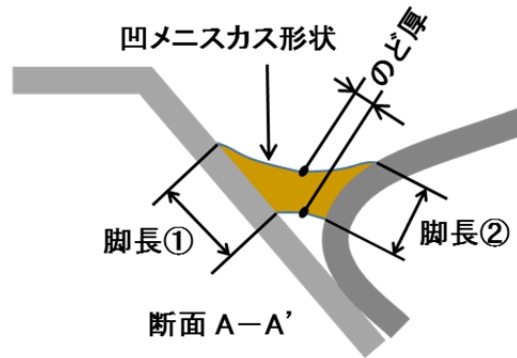


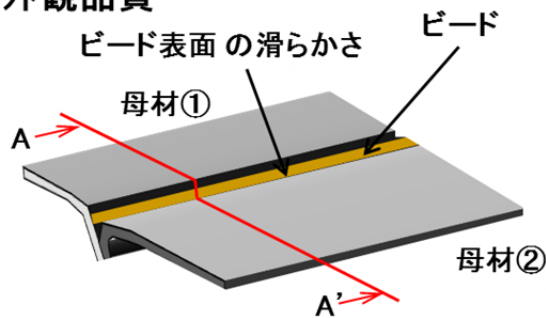
図 3 一般的な Laser Beam Brazing 装置イメージ

目標の加工速度で、製品に要求される代表的な接合品質「内部品質（左右の脚長とのど厚）、外観品質（ビード表面滑らかさ）、引張強度」（図 4 参照）を満足させるには、レーザービームの高出力化やワイヤ送給量を増やすことが必要と考えられ、その確認テストを実施した。供試材は、母材①、②は共に裸軟鋼板で、板厚は 0.6mm、継手は段差を有するフレア継手とし、ルート GAP は 0mm と 0.5mm の 2 水準とした。溶加材（ろう材）は、成分調整を加えた独自の $\phi 1.6$ 銅合金ワイヤ（以下ワイヤと称す）を用い、シールドガスは不活性ガスのアルゴンガスとした。レーザー機器は、半導体レーザーを使用し、駆動は多関節 6 軸ロボット（ファイバー伝送）とした（図 5 参照）。

● 内部品質



● 外観品質



● 引張強さ

図4 ろう付に要求される代表的な接合品質

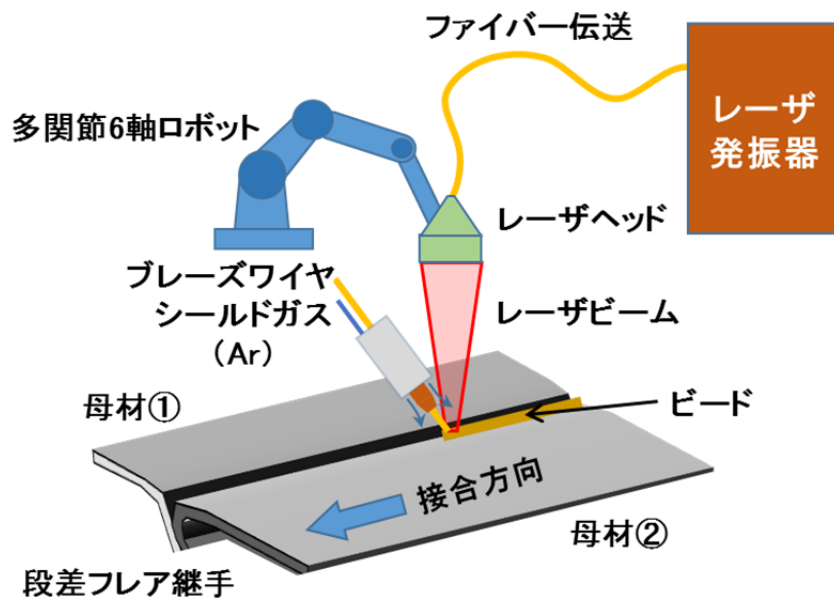


図5 確認テスト装置イメージ

次に、確認テストの結果を一般的な接合速度で加工された接合品質と比較して示す。

内部品質においては、フレア継手の断面マクロ観察から、脚長①、脚長②共に基準値をほぼ満足する。しかし、ビードの盛り量は増すものの、のど厚が不安定であり、バラツキを考慮すると基準値未達と判断した（図6参照）。尚、ボイド等の欠陥は見られなかった。

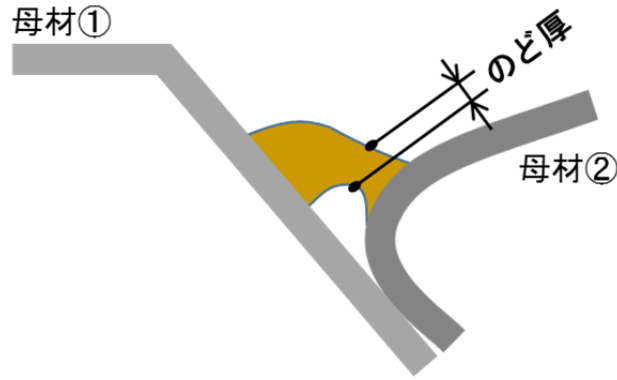


図6 のど厚不足時の断面イメージ

外観品質は、目視観察からビード表面の滑らかさが低下し、コントレーサー（輪郭形状測定機）による表面測定でも滑らかさの基準値を満足していなかった。

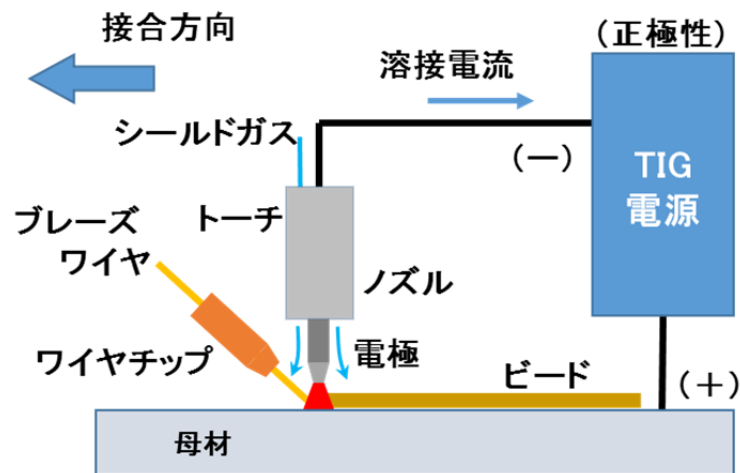
引張強度は、基準値を満足して破断箇所は母材部であった。

以上の事から、内部品質の「のど厚」と外観品質の「ビード表面滑らかさ」が基準値を満足できていないことが分かった。

3. 不具合原因とその課題

ろう付けに不可欠な主要因を考えると、「ワイヤの溶融」と「母材のぬれ性」があげられる。前述の確認テスト時にワイヤの溶融状態を高速カメラで観察していたが、十分に溶融されているのが見てとれていたことから、のど厚の基準値を満足できていないのは母材のぬれ性が不足しているものと予想した。

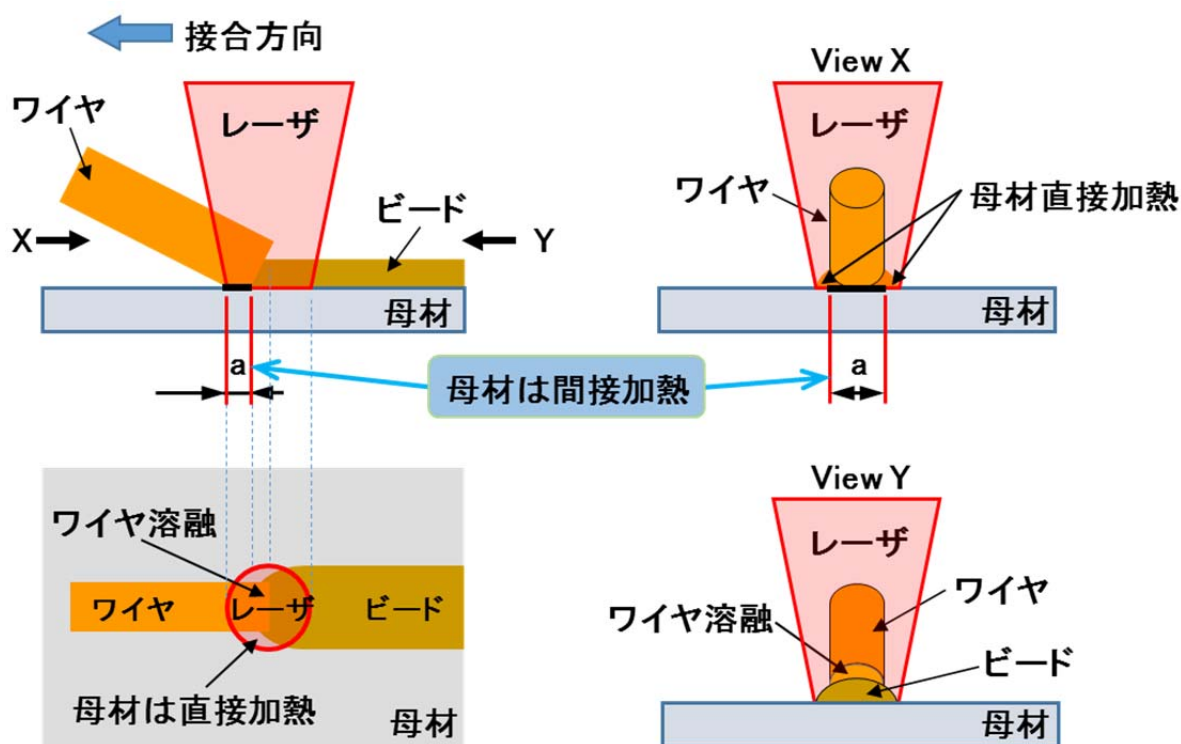
母材にアークが移行して直接的に加熱されるアークブレイズ接合（Arc Brazing：図7参照）では、母材①と②の温度が上昇するまでの時間が十分得られていた。



母材と電極間に発生したアーク熱により、ワイヤ及び母材が直接的に加熱される

図7 Arc Brazing 装置イメージ

一方、レーザーブレイズ接合では、熱源であるレーザービームがワイヤを溶融させる際に間接的に母材①と②が加熱される。すなわち、レーザービームがワイヤの影になり、ビームが直接的にワイヤ直下の母材を加熱できないことから、レーザーの高出力化でワイヤ自体を溶融することはできても、母材への加熱が不十分だったと考えられる。このため、母材温度が十分に上昇せず、母材のぬれ性が悪くなって、溶融ワイヤ量は増えてもフレア継手の奥にまで溶融ワイヤが流れていけなかったことで、のど厚の基準値を満足しなかったと考えた（図8参照）。逆に、母材のぬれ性が上がれば、奥まで溶融金属が侵入出来るようになって、ビード表面が凹になり、フレア継手の奥はロート状に必要な溶金断面積が小さくなるので、のど厚が増えると考えた。



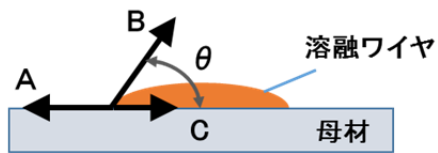
ワイヤの影になっている母材(a部)はレーザービームで直接的に加熱されない

図8 一般的な Laser Beam Brazing の加熱イメージ

また、外観品質の低下もこの母材への加熱が不十分なことに起因し、接合速度が速いことで溶融ワイヤの冷却時間が速くなり、その液面が安定しない状態で凝固し始めたからと考えた。

一般的にぬれ性（ぬれの程度の評価）は、溶けたろう材と母材の接触角度（以下 θ と称す）が小さいほど良いとされ、その θ は母材の表面エネルギーと溶けたろう材の表面エネルギーと母材と溶けたろう材間の界面エネルギーの釣り合いで決まり、次式のヤングの関係として知られている（図9参照）。

$$\cos\theta = (A-C)/B$$



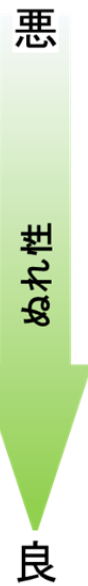
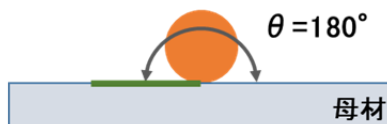
※溶融ワイヤが滴下後にヤングの関係で釣り合った状態のぬれ性比較(イメージ)

ぬれ性の状態は、溶融ワイヤが母材に接触した後に、次の3つのエネルギーの釣り合い(ヤングの関係)から決まる。

$$\cos \theta = (A - C) / B$$

- A: 母材の表面エネルギー
- B: 溶融ワイヤの表面エネルギー
- C: 母材と溶融ワイヤ間の界面エネルギー

※溶融ワイヤが母材に滴下した直後の状態



θ が小さい ($\cos \theta$ は大きい) 程、ぬれ性は良くなる

図9 溶融ワイヤと母材とのぬれ性

今回の現状把握時に溶融ワイヤがフレア継手の奥へ流れて行かなかったことはこの θ が十分に小さくなっていなかったと考えられる。式からぬれ性を良くするために θ を小さくする ($\cos \theta$ は大きくなる) には、A を大きくして、B と C を小さくすれば良いことがわかる。

但し、今回使用されるワイヤは、他の機能要件から指定された成分とその重量比率で調整がされているため、前述の3エネルギーの中からろう材が関係しない母材の表面エネルギーを大きくして、ぬれ性を上げることが接合速度の高速化への課題と考えた。

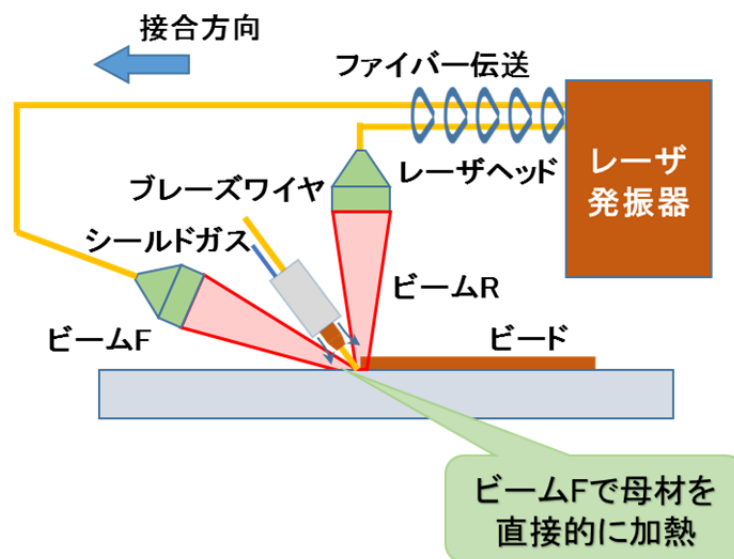
4. 課題解決の着想と具現化

母材の表面エネルギーを大きくするという事は、母材表面をより活性化させるということになる。通常のろう付けには、フラックスや予熱等を用いる場合が多いが、本件では量産工程上の都合でフラックスを使用する際に発生する残渣処理ができなかった。従って、母材表面を活性化させるには溶融ワイヤが流れてくる前にワイヤの影になっている母材①、②の表面を直接的に加熱してその温度を十分に上昇させることを着想とした。また、このことは母材表面の活性化を促すと共に、その表面のほこり、水分及びプレス油分等の除去も期待できることから、更に母材の表面エネルギーを大きくすることができることも考えた。

思い返すと幼少期に工作のはんだ付けで、鋺で溶けたはんだが板上で玉状になり転げ落ちたときに板を鋺で温めて行うことを習ったが、これはぬれ性を良くするために板の表面エネルギーを大きくすることを既に経験していたことになる。

具体的な方法として、一般的なレーザーブレイズ接合のヘッドレイアウトは、ワイヤが接合方向に対して後退角で挿入されるが、更にその前方斜め上方からワイヤと母材間を狙ったレーザービームを追加で配置することとした。

今まで上方の一方向からワイヤを溶融していたレーザービームをワイヤを溶かすレーザービーム（以下ビーム R と称す）と着想とした母材を直接的に加熱と母材表面のクリーニングとを目的としたレーザービーム（以下ビーム F と称す）の 2 分割（1 ビームから 2 ビーム化）にすることで対応した。尚、2 ビームの合計出力値は 1 ビーム時の出力とほぼ同等とし、その比率はワイヤが溶けるに十分な出力をビーム R に配分し、残りの出力をビーム F に配分することとした（図 10 参照）。



後退角で挿入されているワイヤの前方斜め上方から母材加熱を行うビームFを追加して、ワイヤ溶融を行うビームRとの2ビーム化とした。

図 10 2 ビーム化 Laser Beam Brazing 装置イメージ

5. 検証結果

2 ビーム化ヘッドによる加工テストの接合条件概要及び接合品質結果を以下に示す。

① 接合条件概要

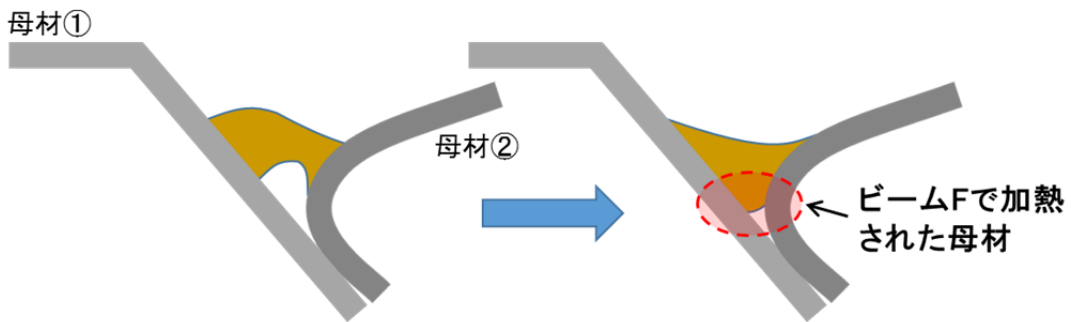
- 接合速度は目標の 6.0m/min 以上を達成し、一般的な接合速度に対して約 1.4 倍を超えて向上することができた。
- 1 ビームの出力に対し、2 ビームの合計出力はビーム F 出力の微増により約 10%高くなった。

② 接合品質結果

- 内部品質（左右の脚長とのど厚）は、断面マクロ観察から左右の脚長は 1 ビーム時と差異無く基準値を満足し、未達だったのど厚は約 30%向上し、1.0mm を安定的に超えて基準値を満足した。
- 外観品質（ビード表面滑らかさ）は、目視検査を満足しコントレーサーによる測定でもその滑らかさの基準値を満足した。
- 引張強度は、1 ビーム時と差異無く母材部から破断して基準値を満足した。

6. 接合品質結果の考察

のど厚が向上したのは、2分割された一方のビームFが母材（フレア継手のルート部）を直接的に加熱したことで、ビームRで溶かされたワイヤが流れてくる前に母材温度が十分に上昇することで、母材表面が活性化されると共にその表面のクリーニングも行われ、ぬれ性が向上し、熔融ワイヤがフレア継手の奥まで流れ込めたことでビード表面が凹形状になり、のど厚が増えたことから考える（図11参照）。

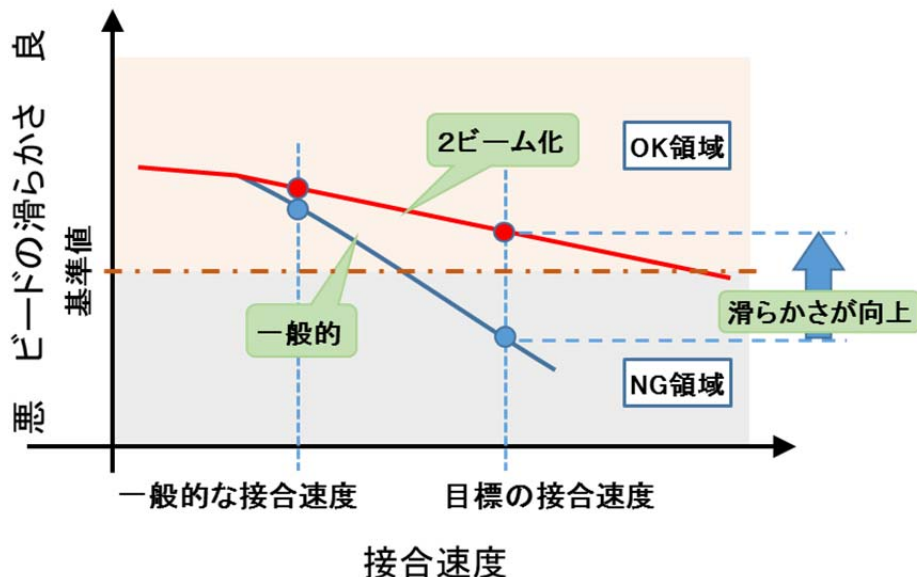


母材（フレア継手のルート部）のぬれ性が向上して
熔融ワイヤが奥まで侵入できた

図11 ぬれ性向上によるビード形状

外観品質（ビード表面滑らかさ）が平滑なのは、母材が十分に加熱されたことで熔融ワイヤの冷却時間が遅くなり、その液面が安定した状態で凝固できたからと考える（図12参照）。

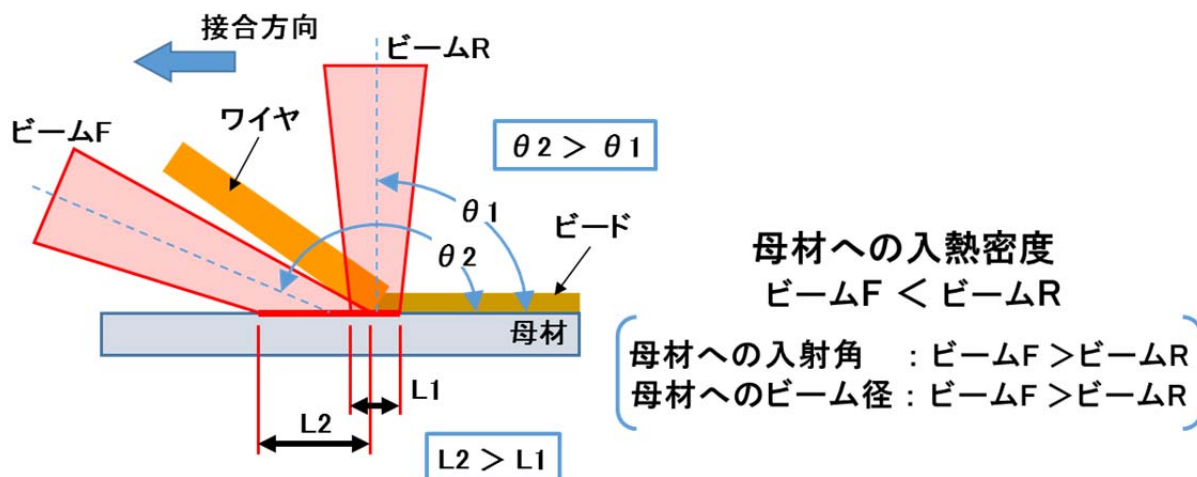
（高速度カメラ観察で、熔融池が若干後方へ伸びていたのが見てとれた）



ビームFの母材加熱効果で熔融地の冷却時間が遅く
（温度低下勾配が緩く）なり、ビード表面が滑らかになる

図12 ビード表面の滑らかさと接合速度（凝固時間）のイメージ

また、直接的に母材を加熱するビーム F の出力の微増加は、ビーム F が前方斜め上方からワイヤと母材間に照射されているため、入射角度が大きいことから、母材に対しレーザービームの反射やそのビーム径が楕円に広がることで、入熱密度が落ちた分を補うために必要になったと考える（図 13 参照）。

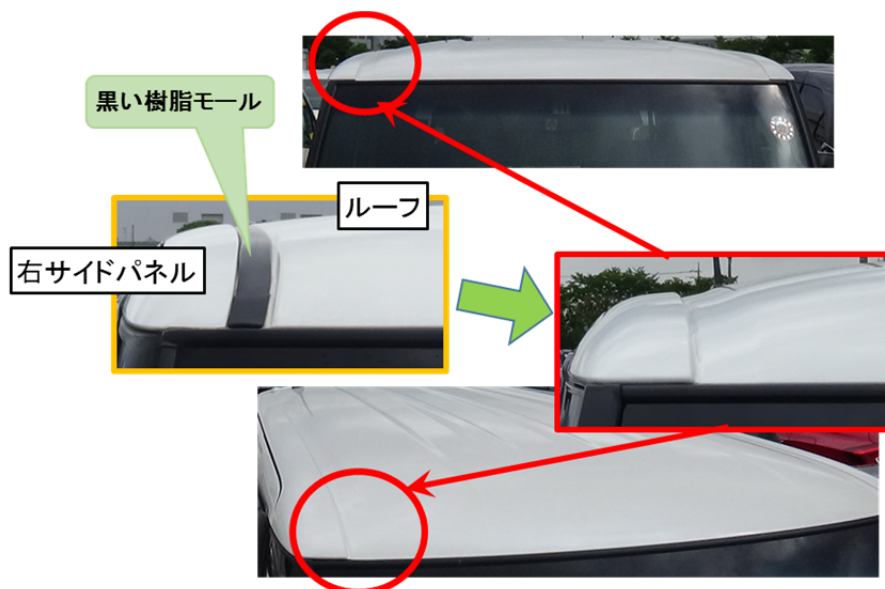


ビームFは母材に対して、反射及びビーム径が広がり
入熱密度が低くなっている

図 13 2 ビーム化した Laser Beam Brazing の加熱イメージ

7. まとめ

- ① 高速化の課題となっていた母材のぬれ性の向上を 2 ビーム化する事で解決し、接合品質（内部、外観、強度）を満足することができた。
- ② 合計出力は 1 ビームに比べ約 10%高くなったが、一般的な接合速度の約 1.4 倍以上（4.5m/min → 6.0m/min 以上）の高速化が達成でき、量産ラインでの生産性維持や軽量化、コスト削減に貢献できた（図 14 参照）。



樹脂モールが無くなり、デザイン性や見栄えが向上

図 14 Laser Beam Brazing のルーフ外観

今後は、量産の更なる安定化へ向けて、ワイヤチップの高寿命化等を図ると共に、より高速化へ向けた取り組みとして、レーザ波長（青色レーザ等）やビーム形状（扁平）及びワイヤ自体へのレーザ吸収率向上（表面改質）等の検討と共に、設備のイニシャルコスト削減へ向けた開発も進めて行きたい。

8. 最後に

本技術を可能にできたのは、設計、製造、生産技術、製作所の各領域の総合力で達成できたことはいふまでもありませんが、現場の地味に見えても大切な段取り作業やご協力を頂いた関係各社様の努力のうえにあることを、感謝の気持ちと共に忘れてはいけないと思います。

また、課題の解決に向かう姿勢では、日々の自己研鑽に努めると共に経験から得られる事を基にした想像の広がりを持つことが大切だと考えます。

本取り組みが今後の技術開発をする上での一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) 接合・溶接技術 Q&A1000 第8章ろう接・圧接・接着 第1節ろう接 Q08-01-01～Q08-01-11
(雀部, 恩澤他著) 1999年 産業技術サービスセンター
- 2) 溶接用語事典 (第2版) 2015年 (一社)日本溶接協会

堀向 俊之 (ほりむかい としゆき) 溶接管理技術者特別級

<略歴>

1988年 ホンダエンジニアリング株式会社 入社 第三技術ブロック 配属

2018年 同社 車体生産技術部 車体設備技術ブロック 技術主任

現在に至る