

RA272エキゾーストパイプに織り込まれたホンダミュージックをつくり出した WAZA(技)

Waza (Skilled Craftsmanship) that Produced “Honda Music”: Creation of RA272 Exhaust Pipe

上 田 孝 治*
Koji UEDA

高 橋 龍 一*
Ryuichi TAKAHASHI

今 野 修*
Osamu KONNO

要 旨

1960年代、Honda が Formula 1 で初優勝し、日本の自動車産業界に新しい歴史が刻まれた。その RA272 エンジン排気系エキゾーストパイプ(以後、エキパイと呼ぶ)を現代に継承された“つくり”の WAZA(技)により、忠実に再現させ分析を試みた。その結果、当時の機械曲げ工法に比べ、パイプに砂を入れ炙り曲げる工法(以後、手曲げと呼ぶ)は、図面や型を使わず曲げ限界が大きい連続した曲げが可能であるため、レイアウトの自由度、製作スピードの点で優れていたことがわかった。職人が曲げる瞬間の勘所からは、WAZA の解明に重要な曲げ温度と起点が明らかにされた。曲げ加工による残留応力が少なく、材料のマイクロ組織が700℃から900℃の排気熱でも安定していることから、形状安定性と機械的強度においても有用な知見が得られた。

ABSTRACT

In the 1960s, when Honda won its first Formula 1 race, the Japanese automotive industry entered a new era. This study attempted to accurately reproduce and analyze the process of formation of the exhaust pipe of the winning RA272 engine, using the waza (skills) employed in its fashioning, which have been handed down by its makers. This analysis showed that the manual bending method, used to create the RA272 exhaust pipe, which was filled with sand and bent while being flame-heated, enabled the achievement of a continuous curve with a high bending limit, without the use of figures or molds, and was superior to the mechanical bending method of that time, from the standpoint of the degree of freedom of the layout, as well as that of speed of production. Study of the skills employed by sheet metal specialists at the moment of pipe bending has provided information on the bending temperature and point at which bending is initiated, which is important in elucidating the pipe production technique. The fact that the pipe displays lower residual stress from bending and that the microstructure of the material remains stable, even at exhaust temperatures of 700 °C to 900 °C, has also provided useful information on the pipe's shape stability and mechanical strength.

1. まえがき

Formula 1 などへのレース参戦は、Honda 特有の文化である。技術者はレースの極限で WAZA を鍛え磨き上げてきた。1965年、第1期レース活動において1.5L V12 RA272を擁し Fig. 1⁽¹⁾、メキシコ GP で優勝を果たした。レース参戦当初から、試作技術者は、レース車の設計やドライバの要望に応え、エンジン、車体部品の製作と供給に努めてきた。また、RA272を動態保存するため、当時と同様の手法で忠実に再現している。RA272 のエキパイは、所定のスペースに

おさめるレイアウトから“配管の芸術”との異名⁽²⁾が与えられ、その独特な乾いた高周波の排気音から“ホンダミュージック”という新しい用語を生んだ⁽³⁾、レースエンジンの出力特性を司る機能部品でもある。

昨今、CAD、CAM、CAEを利用したモノづくりの高度化が求められる中で、WAZA やその価値をどう伝え継承するかは容易なことではない。そのエキパイの“つくり”の WAZA を後世に伝える方法を模索する過程で、芸術や音楽の称号を与えられたエキパイを、現代において可能な計測技術で価値分析してみたいという興味に駆られた。エキパ

*四輪開発センター

イに織り込まれた“ホンダミュージック”をつくり出した WAZA を現代で紹介することが、伝え方の一つでもあり、本稿を通じて多くの読者に紹介することで後世へと繋げられると考える。

本稿では、日本ならではの卓越した“つくり”の技を WAZA と表現している。例えば、日本刀にみる高い鍛錬技術や硬くても折れない複合構造は、世界に例を見ない独自の刀づくりへの伝統的な精神と WAZA によって生み出され、その美しさは芸術品としても価値の高いものである。WAZA は、日本人の先祖から頂いた手先の器用さとモノづくりの伝統的な精神から継承され、資源の少ない国にあって独自の発展を続け、自動車産業の基盤を築いた財産である。

Fig. 2 に示すエキパイを復元した職人 WAZA の勘所を検証した上で、当時対抗する機械曲げ工法と具体的な評価手法で比較し、価値分析を試みた。レース活動第1期のエキパイと“つくり”の WAZA やそれを通じて得られた知見を中心に紹介したい。

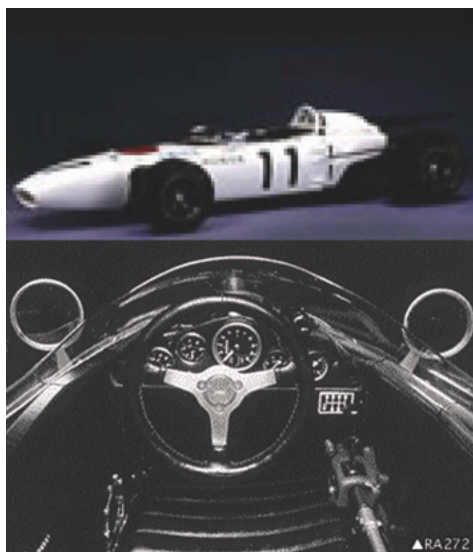


Fig. 1 RA272



Exhaust pipe

Fig. 2 RA272 engine and exhaust pipe

2. エキパイの紹介

2.1. レース活動におけるエキパイ製作法の変化

レース活動第1期から3期までのエキパイ材料と製作方法、エンジンのタイプをTable 1⁽⁴⁾に示す。第1期から2期では曲げ加工していたものが、第3期ではプレス成形へと変化している。その理由は、よりコンパクト化を追求していくと、パイプ曲げの限界を超えるレイアウトが要求され、曲げ加工では対応が困難になるからである。また、材質が鉄から、高強度で耐熱性に優れたステンレスやインコネル材を使用したこともその理由である。現在も、耐熱性と軽量化を両立したコンパクトな構造を目指し、日々改良が進んでいる。

2.2. エキパイの構成

1965 年型の RA272 は、12000rpm, 230ps の高回転・高出力エンジンで比較的高次の排気脈動⁽²⁾を利用するため、排気系は3本の排気管から1本に結合する(以後、3-1結合と呼ぶ)テールパイプを4本もった構成にしている(Fig. 3)。Table 2 に当時のレース参戦チームとエンジンタイプを示す。

エキパイは、エンジン排気ヘッド部に接続するフランジから始まりプライマリ、コレクタ、テールの部品から構成され(Fig. 4)、他のチームに比べ最多の本数でコンパクトなレイアウトとなっている。できるだけ排気干渉を少なくするために12本のパイプを同じ長さで揃え、配置しやすいよう3-1結合にしている。エンジンの回りにコンパクトにまとめられ、1本ずつ異なる形状でありながら同じ長さのプライマリが12本巻きつくようにレイアウトされた姿が“配管の芸術”といわれたゆえんである。

2.3. エキパイの復元

エキパイ復元の主なポイントを紹介する。Fig. 5 に示すように、フランジ部と締結されたパイプは口元を広げ(以後、拡管と呼ぶ)プライマリパイプと接合される。段差を生じさせないように外径 32mm から 35mm への均一な拡管がポイントになる。

1曲げから4曲げまで継ぎ目が無い連続曲げのプライマリパイプを Fig. 6 に示す。図面や型を使わず、砂を詰めガスバーナで炙りながら手の感触を頼りに曲げている。本エキパイ製作には、熟練した WAZA が求められる手曲げ工法を採用している。

プライマリパイプを3-1結合させるため Fig. 7(a) に示す形状にパイプをカットする。それを治具に固定、酸化しないようにシールドガスを流し、合わせた箇所を溶接している[Fig. 7(b)]。溶接背面に鱗状ビードが現れると最適な溶接と判断できる。タングステンイナートガス溶接における、極薄板溶接の熟練された WAZA が要求される。この3-1結合

Table 1 Manufacturing methods for Formula 1 vehicle exhaust pipes

	First term 1963-1968	Second term 1984-1992	Third term 1999-
Material	Steel pipe (STKM)	Stainless steel, inconel	Stainless steel, inconel
Manufacturing method	Manual bending	Mechanical bending, welding	Mechanical bending, welding, press forming
Engine type	V8, V12	V6, V10, V12	V10, V8
Photograph			

Table 2 Team and engine type

Team	Ferrari	BRM	Honda
Engine type	Dino 158 V8 1489 cc 210 ps 11000 rpm	B.R.M. 56 V8 1498 cc 220 ps 11500 rpm	RA 272 V12 1500 cc 230 ps 12000 rpm

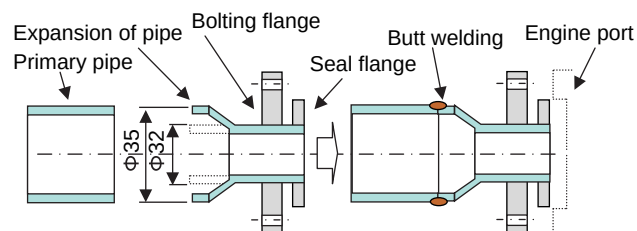


Fig. 5 Method of manufacture of flange

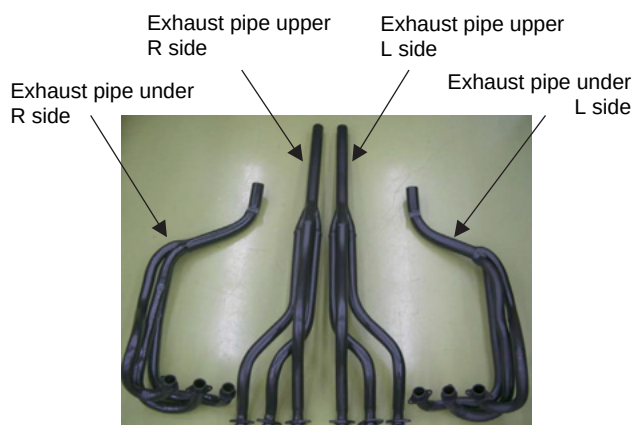


Fig. 3 RA272 exhaust pipe

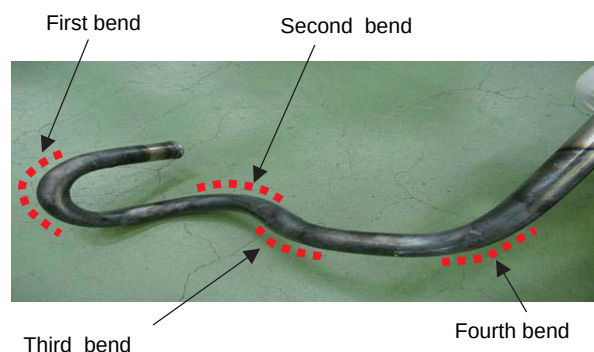


Fig. 6 Technique of bending primary pipe



Fig. 4 Configuration of exhaust pipe

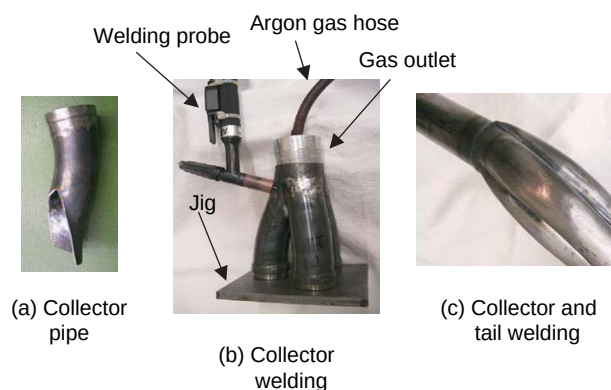


Fig. 7 Method of manufacture of collector

部の合わせ溶接箇所が、排気抵抗を極力抑え、高音で清らかな“ホンダミュージック”の隠れたチューニング部分となっている。Fig. 7(c) に示すように 3-1 結合されたコレクタをテールパイプと結合して完成される。

2.2 節で紹介した“配管の芸術”RA272 のエキパイは、復元のポイントをおさえ、現在のレース部門で板金のモノづくりをしている職人の WAZA により復元されている。

3. 職人の WAZA

パイプを通常に曲げると Fig. 8 に示すようにシワが入る。2.3 節のプライマリパイプ連続曲げの WAZA を調べるため、当時の“つくり”を継承している職人(Fig. 9)の勘所について検証した。

3.1. 曲げの瞬間

職人は、パイプ表面の焼け色を見ながら、Fig. 10 に示すパイプを曲げる瞬間を、パイプを持つ手に伝わる剛性感が失われる瞬間であると述べている。職人が見ている焼け色と、曲げる瞬間について調べた。



Fig. 8 Conventional bending



Fig. 9 Sheet metal specialist



Fig. 10 Manual bending by specialist

パイプを炙る工程から曲げの瞬間、曲げた直後、自然冷却後の順に温度計測結果を Fig. 11(a)-(d) に示す。職人が見ている焼け色とは、820°C 近辺であることがわかった。曲げ起点で 820°C の温度エリアが拡大し、パイプ表面の 1/3 程度に達したときに、曲げ作業に入っている。その時点が、剛性感が失われ、曲げる瞬間と判断できる。これまでは、職人が曲げ角の大きさの調整を、最も材料が伸ばされる曲げ先端部の外側を中心におこなっていたと考えられていた。しかし、Fig. 11(c) の矢印で示すように、最も高い表面温度を示す部位が曲げ起点となり、曲げ R が形成されており、曲げ角の大きさの調整は、曲げ起点を中心に曲げ温度エリアの拡大と縮小の加減によっておこなわれている。

3.2. 曲げの修正

職人はパイプを曲げた直後、局部が扁平になるので曲げ反対方向に少し戻し、真円に近づけ、曲げの内側にシワが残った場合、炙りを止め直後に鉄ハンマで叩きシワを伸ばしている(Fig. 12)。

職人がハンマ作業を入れなかった場合と入れた場合の外観と断面の比較を Fig. 13 に示す。ハンマ作業を入れた場合、シワは消え扁平が解消している。これから、プライマリパイプの連続曲げは、曲げ限界にある R 部にシワが生じた場合でも、ハンマで叩きパイプ径を均一に維持しながら、次の曲げへと繋ぎ完成されたことがわかる。この WAZA は、

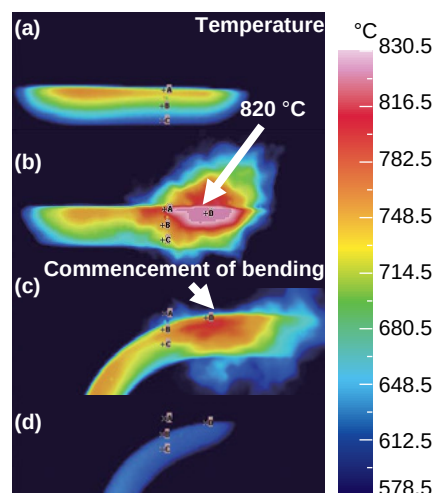


Fig. 11 Results of temperature measurement



Fig. 12 Correction with hammer

レイアウトが厳しい曲げ構成において、パイプを継ぐことなく曲げが可能のため、曲げ自由度が高い工法といえる。“ホンダミュージック”を奏でるプライマリパイプの源は、職人が鉄ハンマで叩き、シワを伸ばす熟練の WAZA から生み出されていた。

3.3. 製作スピード

機械曲げは第2期レース活動にて採用され、耐熱性の高

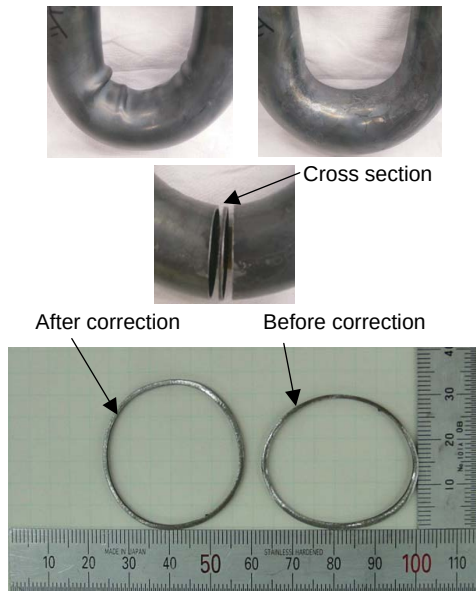


Fig. 13 Comparison of correction with hammer

いステンレスやインコネルの材料を使い、2チーム供給やレース数の増大に対応した手法でもある。しかし、曲げ機械の制約と曲げ限界から連続曲げはできないため、曲げRの異なるパイプ同士を接合しなければならず、ベンダや曲げ型の費用と製作日程も必要になる。

第1期レース活動において、手曲げを採用した最大の理由は、図面や曲げ型を使わず、難度の高い連続曲げエキパイを、1日以内の短期間に製作した点であると考えられる。

レースは予選から決勝まで2日から3日間でおこなわれる。仮にレース場でエキパイ製作ができると仮定した場合、手曲げは熱源が用意できれば2本程度なら再製作しテスト走行には間に合わせることができる。当時のレースチームは WAZA の早さを活用し、レース決勝寸前まで対応できる“つくり”を選定していた。

4. 価値ある特性“手曲げエキパイ”

3.3節で手曲げエキパイが機械曲げと比べ、特に製作工期面において優れていることがわかった。ここでは、品質の比較とエキパイとしての機能性について調査した結果を述べる。

4.1. 外径と板厚の変化

外径 34mm、板厚 2.3mm の STKM 材を曲げ半径 60mm、180 度の U 字曲げ品を製作し比較した [Fig. 14(a), (b)]. そ

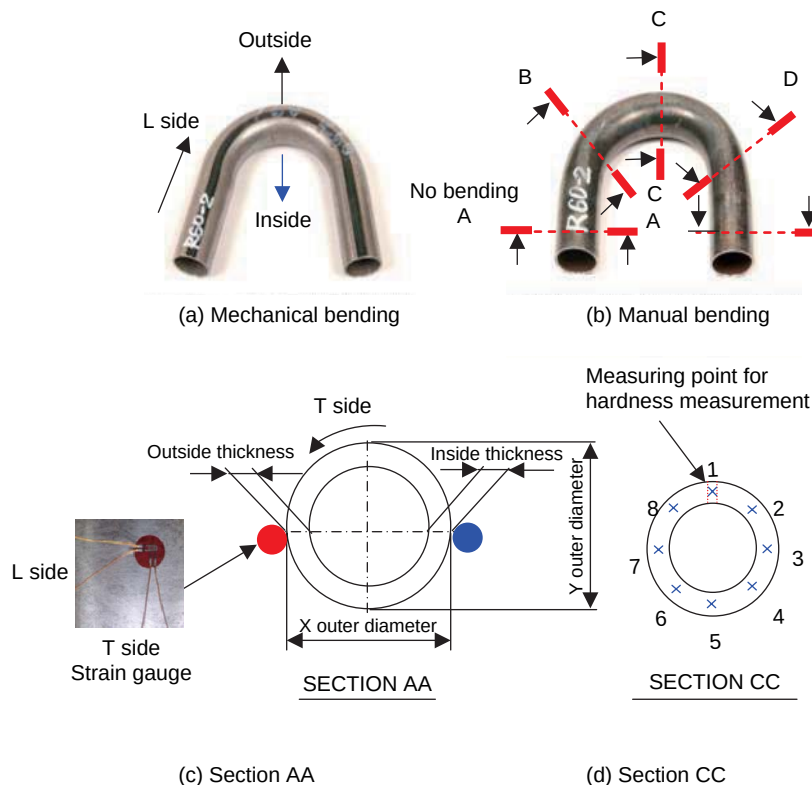
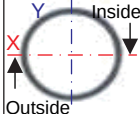
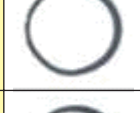
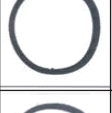


Fig. 14 Comparison of mechanical and manual bending

Table 3 Rate of change table of outer diameter and thickness

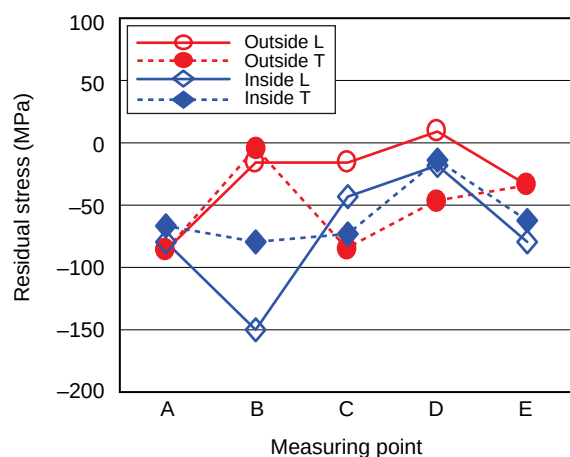
	Form	Mechanical bending				Form	Manual bending			
		X outer diameter	Y outer diameter	Outside thickness	Inside thickness		X outer diameter	Y outer diameter	Outside thickness	Inside thickness
Section A		34.14 mm	34.14 mm	2.21 mm	2.13 mm		33.49 mm	34.16 mm	2.10 mm	2.19 mm
B		-4.3 %	0 %	-23.5 %	23.0 %		-3.3 %	-1.0 %	-16.2 %	13.2 %
C		-6.2 %	-0.2 %	-18.6 %	22.1 %		-9.0 %	-1.2 %	-17.1 %	14.2 %
D		-5.0 %	-0.7 %	-22.6 %	23.5 %		-5.5 %	-0.1 %	-15.2 %	13.2 %

の結果、機械曲げは機械構造と曲げ駒の位置関係により、少し開いた形状になるのに対し、手曲げは完全な 180 度曲げが可能であった。

外径 XY の 2 方向と曲げ内側と外側(以後、内外と呼ぶ)の板厚測定をおこなった[Fig. 14(c)]。曲げ加工の無い A 断面に対し、B、C、D 断面それぞれの板厚増減率を Table 3 に示す。外径変化については機械曲げ、手曲げともに数%程度小径になる傾向にあり、それほど大差が見られない。しかし、機械曲げは内外の板厚差が最大 46.6% あるのに対し、手曲げは 31.3% と少ない。したがって、曲げ限界性能において手曲げの優位が明らかである。また、機械曲げは曲げ起点と終点の B、D 断面外側の板厚減少が大きく最も板が伸びている。

4.2. 曲げ加工残留応力

Fig. 14(c) 断面図に示すように、パイプの内側と外側にひ



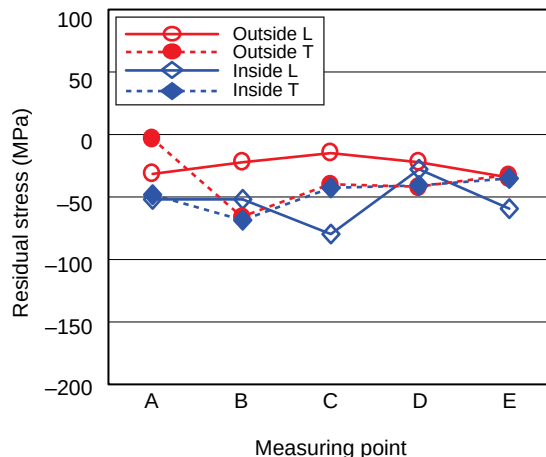
(a) Mechanical bending

ずみゲージを貼り、残留応力の調査をおこなった。その結果を Fig. 15 に示す。機械曲げは、Fig. 15(a) に示すように、曲げ起点に近い B ポイント部の内側付近に、残留応力による大きなひずみがある他、手曲げに比べ全箇所で大い傾向にある。したがって、実走時の排気熱による残留応力の開放を起因とした、形状変形が予想される。一方、Fig. 15(b) に示す手曲げは、残留応力ひずみのばらつきが少なく、形状安定性において有利である。

4.3. 組織と硬度

曲げ部のマイクロ組織と硬度を調べるため、曲げ先端部断面の測定をおこなった[Fig. 14(d)]。機械曲げと手曲げの硬度計測の結果を Fig. 16 に示す。手曲げは入熱の影響から硬度低下はあるものの均一であるため、円環状における変形因子が少ない。

機械曲げは曲げ直後、加工硬化によってマイクロ組織が微



(b) Manual bending

Fig. 15 Results of residual stress measurements

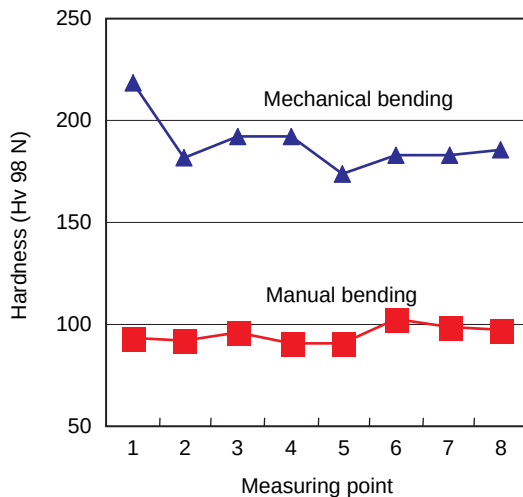


Fig. 16 Results of hardness measurements

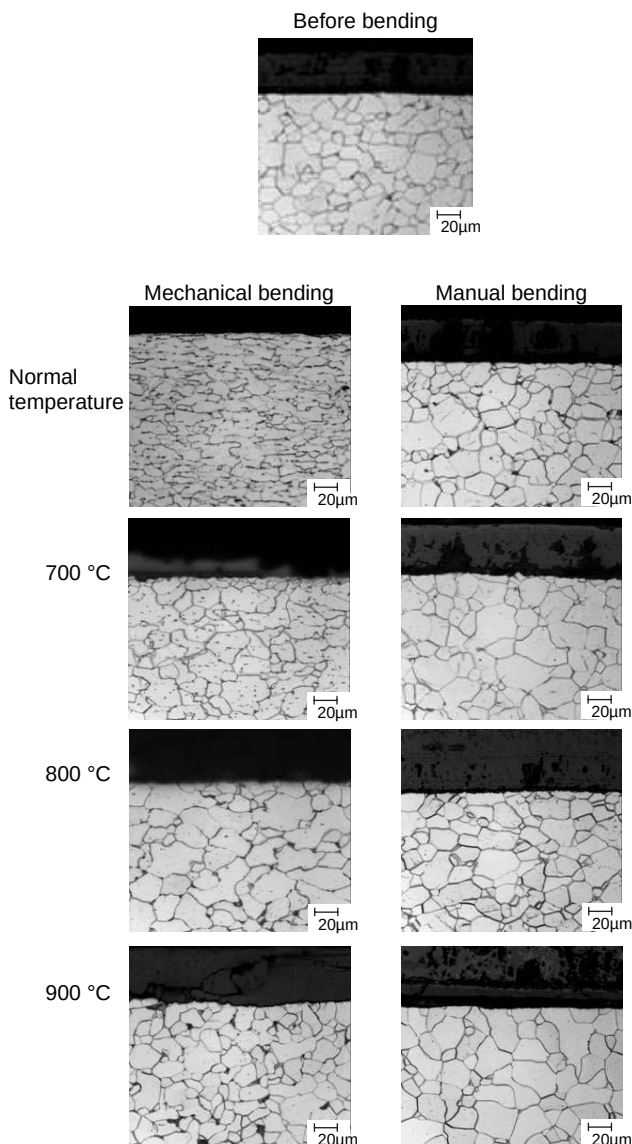


Fig. 17 Microstructure from normal temperature to 900 °C

細化しているため、常温から700℃前後まで静強度特性では優れるものの、熱による粒成長、クリープでの変形が懸念される。手曲げは炙り曲げ時の入熱により粒成長・組織粗大化が見られる (Fig. 17)。しかし、排気温度の上昇を想定した700℃から900℃のテストにおいて、機械曲げに見られるような大きな変化が生じていないため、実走時における機械的強度も安定した状態を保つと考えられる。

5. まとめ

RA272 のエキパイを忠実に再現させ、当時の機械曲げ工法と比べ分析した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 手曲げパイプ表面の曲げ瞬間温度は、820℃近辺にあり、曲げ角の大きさの調整は、曲げ起点を中心とした曲げ温度エリアの拡大と縮小の加減によって、おこなわれている。
- (2) 機械曲げは、連続曲げができないほか、ベンダや曲げ型が必要になるのに対し、手曲げは図面や型無しで製作が可能のため、1日と短期間で製作できる。
- (3) 機械曲げは内外の板厚差が最大 46.6%あるのに対し、手曲げは 31.3%と少ない結果から、曲げ限界性能において手曲げの優位が明らかにされた。
- (4) 手曲げのパイプは加工残留応力が少なく、硬度低下はあるものの均一であるため、円環状における変形因子が少ない。また、排気温度の上昇を想定したテストにおいて、ミクロ組織に機械曲げに見られるような大きな変化が生じていないため、実走時における機械的強度も安定した状態を保つと考えられる。

RA272 エキパイをつくり出した WAZA は、レイアウトの自由度を広げ、レースへの投入に即座に応えるスピードを持っていた。そのエキパイは、加工残留応力が少なく、排気熱による高温化においても形状安定性と機械的強度に優れていた。

6. あとがき

職人の WAZA を後世へ伝える方法を模索する過程で、“配管の芸術” “ホンダミュージック” を探る興味に駆られ調査した結果、得られた答えは、予想していたものより、はるかに優れているエキパイ性能であった。当時と同様に RA272 のエキパイを復元した WAZA は、レース参戦により継承され、本稿で述べた価値の高さが現在でも試作技術の一部に活かされている。また本稿を通じておこなった科学的な計測や分析は、WAZA の価値を明らかにする手段となった。改めて、メキシコ GP で初優勝すべき要素が、部品の“つくり”に多分に含まれていたと確信させてくれた。ここから、継承するためのヒントを得たような気がする。

当時のレースチームは、モノつくりの WAZA で世界最高

水準の部品を製作し、戦いに挑み、勝ったことで後世へ夢を繋いでくれた。そして、その歴史的な WAZA の一端を紹介できたことに、技術者としての喜びを感じる。

参考文献

- (1) http://www.honda.co.jp/collection-hall/episodes_old/motor/ra272/,2007/3/2
- (2) 中村良夫, 神田重巳, CAR GRAPHIC:HONDA F1 1964-1968, 二玄社, p.260(1984)
- (3) 中村良夫:レーシングエンジンの過去・現在・未来, グランプリ出版, p.231(1981)
- (4) 安藤和夫, 上田孝治, 高橋龍一, 中島嘉寿夫, 山上武, 福島保秀:F-1エンジン用排気系の開発, HONDA R&D Technical Review, F-1 Special, p.143-146

■著 者■



上田 孝治



高橋 龍一



今野 修