

# 省エネ対応チタン二重管曲げ工法の開発

## Development of an Energy-conserving Bending Method for Double Titanium Pipes

田代 庸司 Yoji Tashiro 中島 智之 Tomoyuki Nakajima

● MC 事業本部 生産技術開発室 / MC 事業本部 エンジン SyS 統括部

### 技術論文

Besides its functions in engine performance, noise reduction and heat insulation, a motorcycle muffler also plays a role in the motorcycle's styling, and thus there is a demand for a high-quality exterior appearance. In efforts to reduce component weight and improve corrosion/rust resistance, there has been a shift for some models from steel exhaust pipes and mufflers to stainless steel or titanium piping, including some double piping.

At Yamaha Motor, we have over twenty years of experience using the freeze-bend method for steel and stainless steel double pipes. However, with this conventional method there have always been problems of bend-induced blemishes or scars and discrepancies in bending angle. Also, due to difficulties in achieving consistent pipe quality with double pipes that include glass wool as an insulation material, it has been considered difficult to achieve viable mass production using the conventional bending methods.

Taking the occasion of the scheduled start of production of titanium double pipes, we at Yamaha Motor reviewed the conventional bending method. The result was the development of a practical new method that uses a liquid frozen bending process rather than the conventional gas frozen bending method to achieve high-quality bending of glass wool insulated double titanium pipes. This method also results in energy conservation in the manufacturing process.

## 1 はじめに

モーターサイクルのマフラー（図1）はエンジン性能、消音性、断熱性という機能だけではなく、スタイリングの一部としての外観品質も要求される。現在では部品の軽量化、耐食性向上のため、鋼管に代わりステンレス管やチタン管も採用され、一部に二重管が採用される場合もある（図2）。

この二重管の曲げ工法として、ヤマハ発動機（以下、当社という）は、冷凍曲げを採用し、鉄、ステンレス管では20数年の経験を有する。しかし従来方法では、曲げキズ、曲げ角度不良等が問題となっていた。また断熱材としてグラスウールを入れた二重管は品質不安定要素が多く、曲げ加工による量産は困難であると考えられていた。

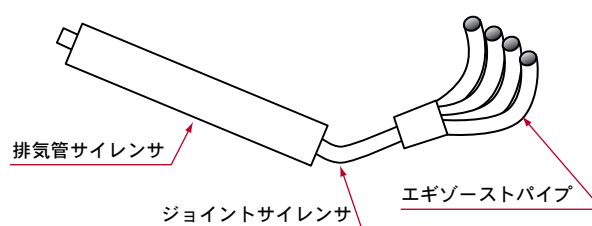


図1 マフラー外観

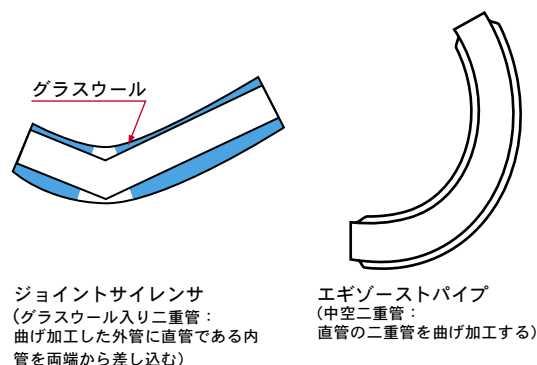


図2 二重管

今回、チタン二重管を生産するにあたり、従来工法を見直して、気体冷凍から液体冷凍に変更し、グラスウール入り二重管を高品質に加工する工法を開発、実用化した。省エネにも貢献することが出来た。

## 2 現状の曲げ技術

### 2.1 二重管製作工程

前成形により内管、外管を組合せ直管の二重管を製作する。このパイプに栓を取り付け、注水して冷凍庫で製氷後、回転引き曲げベンダーで加工する。その後、解凍、検査 - 曲げ角度修正、後成形、傷修正、バフ加工を経て完成する (図3、4)。

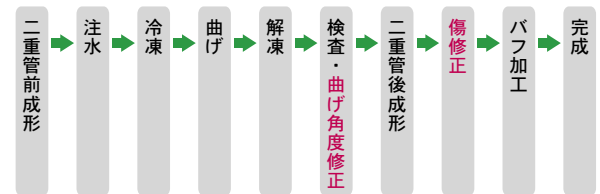


図3 従来の二重管加工プロセス

### 2.2 現状の問題点

空冷冷凍を用いているため冷凍時間は4時間程必要である。パイプ全体を冷凍庫に入れるため、パイプの両端から凍結することにより、体積膨張の逃げ場所が無くなりパイプ太りが発生する事がある。このパイプは金型と形状が合わないため、曲げキズが発生する。また、氷の温度のバラツキにより曲げ角度不良となる可能性が高い。このため修正工程が必要である (図5、6)。

最近是小ロット生産となり冷凍庫内に多機種のパイプが混在し、長い冷凍時間の機種に合わせるため、生産効率が悪くなってきた (図7)。

また、冷凍室以外に6台の室外機や配管等で大きなスペースと大電力を要している。

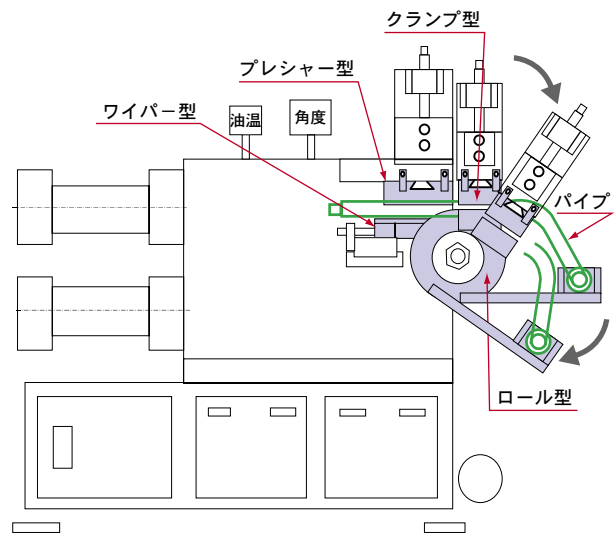


図4 ベンダーによる二重管曲げ工程



図5 曲げ傷修正工程

図6 曲げ角度修正工程

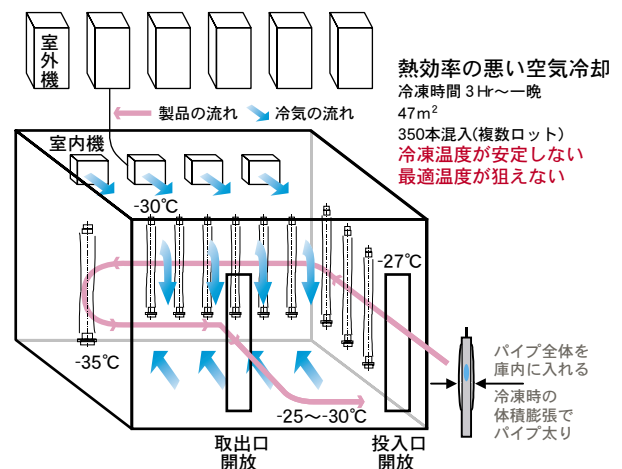


図7 従来の空冷冷凍設備

## 2.3 二重管曲げ工法

一般的な二重管曲げでは氷等で内部を固化してパイプ内面から変位を拘束して曲げる方法が実施されている。特殊な工法として、密着した内管及び外管を曲げてから両管の間に液圧をかけて外管を膨らませる製造法（バルジ加工）もある（表1）。

表1 二重管曲げ工法

工 法	主な問題点
氷	エネルギー上問題
砂	環境上（粉塵、振動）問題
低融点合金	環境上（鉛）問題
熔融塩	環境上（腐食性）問題
バルジ加工	設備費用問題

当社の場合、騒音、断熱対策としてグラスウール挿入管の曲げ仕様を考慮すると、バルジ加工は使用できない。また固化した物質を完全に除去する必要があるため、砂、低融点合金等は使用できない。氷曲げでは気体冷凍法以外に液体冷凍法がある。気体冷凍法として液体窒素の蒸気を利用する方法があるが、氷の温度の安定性から不適と判断した。液体冷凍法では冷凍時間を短縮でき、パイプ全体を浸漬しなくても良いのでパイプ太りが発生しないと考えられる。冷凍槽内の温度を均一にできるので、氷の温度の安定化も容易である。但し、使用する冷媒の種類やその安全性など不明な点が多い。

## 3 新工法の開発

### 3.1 狙い

高価なチタン管の曲げでは良品率を一段と高め、またグラスウールを挿入しても安定して生産できる工法が必要である。調査した各種工法の中で液体冷凍曲げが最も実現の可能性が高く、次の3つを狙いとした。

- (1) 冷凍時のパイプ太りをなくす。
- (2) 氷温度の安定をはかる。
- (3) 小ロット生産可能にする。

### 3.2 液体冷凍法

#### 3.2.1 冷媒液の選定

冷媒液の特性として安全性、熱伝導性の他に、ワーク付着液の分離性、長期の使用に耐える溶液の安定性が要求される。

一般的な不凍性熱媒体として、塩化カルシウム系は腐食性、グリコール系は低温での粘性、アルコール系は引火性が問題となる。

特殊な工法として液体窒素への浸漬、もしくはパイプへの直接散布があるが、パイプ太りが発生しやすく当社には不向きである。

冷凍テストを実施し、PRTR（Pollutant Release and Transfer Register）法に該当せず、不燃性で比較的安全な冷媒液を選定した。

### 3.2.2 冷凍温度

冷凍状態のパイプは内部の水の温度が上昇しない内に曲げ加工する必要がある。従来の空冷冷凍は  $-35^{\circ}\text{C}$  である。夏期には断面偏平率 (= 最小外径 / 公称外径) が悪くなり、冬期には管表面の氷跡が問題となることがあった。対象のワークで氷温度が及ぼす影響をテストした。  $-20^{\circ}\text{C}$  では断面偏平率が悪く、  $-35^{\circ}\text{C}$  では良好であった。品質安定化として曲げ加工迄の室温放置時間に多少の余裕を持たせるため、冷凍温度を  $-50^{\circ}\text{C}$  に設定したい (図8)。

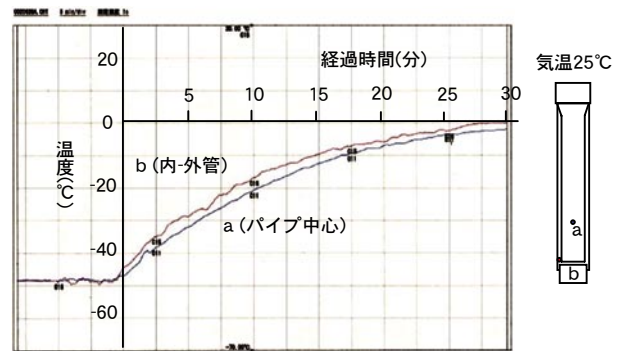


図8 パイプ内(氷)の温度上昇

空冷では装置内の霜取り作業がより大変になり、熱効率も悪くなるが液冷では効率良く温度を下げる事ができる。しかし、  $-50^{\circ}\text{C}$  では、曲げ部外観に氷跡ができ、曲げ条件範囲はやはり狭かった。

### 3.2.3 氷曲げのメカニズム

回転引曲げではパイプはパイプ軸方向に伸び、パイプ内体積が増加しようとする。体積の増加分は水と水の隙間となるはずである。内部の水の挙動について考察した。曲げ内側の氷は圧縮力を受け、管壁はロール金型で拘束されているため、曲げ外側に流動変形する。外側の氷は曲げの引張力で亀裂が入り、外管壁の移動と圧縮側からの氷の流入による圧縮力を受け砕ける。この時、圧縮強度の高すぎる氷は外管壁の移動を抑止でき断面偏平率は良いが、比較的大きな氷となり表面に氷跡ができる。低強度の氷は管壁を支えきれず小さく砕け、外表面は滑らかになるが偏平と考えられる (図9)。

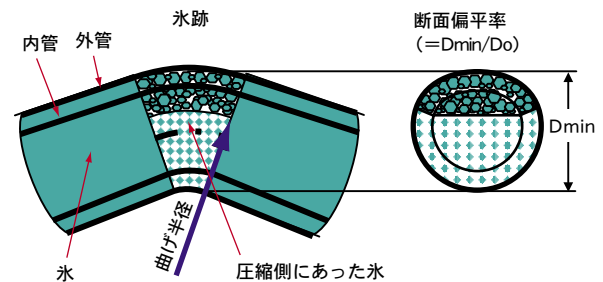


図9 氷曲げのイメージ

また、最適な氷強度は管強度 (肉厚、材質等)、曲げ形状等によって異なる事が推測される。

氷の強度特性は結晶粒度や結晶軸に対する力の方向、氷の温度で異なる。圧縮荷重は低温になるほど高くなる (図10)。

氷跡に対しては軸方向荷重、偏平に対しては軸直角方向荷重が影響していると思われる。もし、方向性が無く、図10の点線に示す特性の氷ができれば、氷の必要強度に対する温度範囲は広がると考えられる。水道水の氷は柱状晶であり方向性がある。粒状結晶にすれば方向性が少ない。

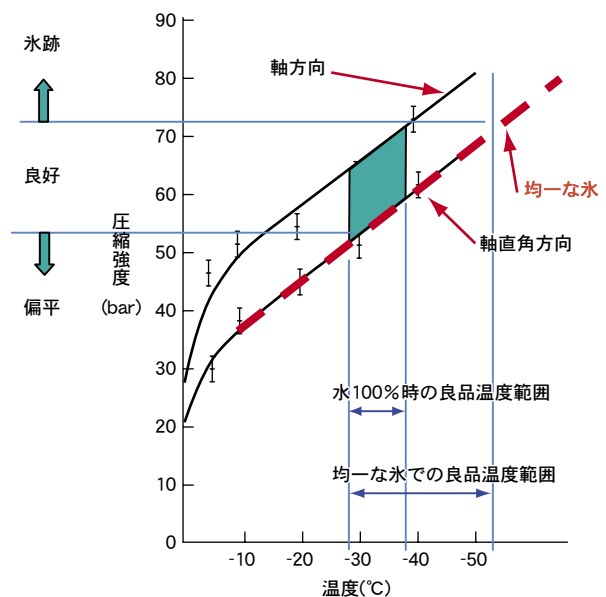


図10 氷の圧縮強度

### 3.2.4 注水液と濃度

氷の特性を調整するため、PRTR法、消防法に非該当の溶液を選定し、添加液濃度と圧縮荷重の関係を調査した。-35℃の氷強度に等しい濃度は2.5%溶液であった(図11)。

今回の対象のチタンパイプにおいてもこの添加液2.5%の時、条件範囲が広い事を確認した(表2)。

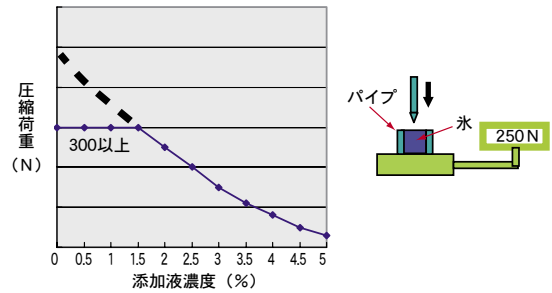


図11 添加液濃度と氷の圧縮荷重

表2 注水液濃度と冷凍温度による曲げ結果

パイプ内液体	冷凍温度			考察
	(-50℃)	(-35℃)	(-20℃)	
水	偏平 NG	良好	氷痕	水だけでは、良品範囲が狭い
2.5%溶液	偏平 NG	良好	良好	良品温度範囲が広い
5%溶液	偏平 NG	偏平 NG	偏平△	添加量がまだ多く、偏平率が悪い

### 3.2.5 冷凍時間

液体冷凍の場合はパイプ全体を浸漬しない。この状態であればパイプ太りが無い事を確認した。また冷凍時間は冷凍温度を-50℃に下げても30分と短い(図12)。

### 3.3 試行結果

チタン外管(外径60.2mm、板厚1.2mm)、チタン内管(外径50.8mm、板厚1mm、パンチング有り)、グラスウール入りを-50℃で30分冷却後曲げ加工した(曲げ半径:150mm、曲げ角度30度)。

その結果次の2つの問題が発生した。

- (1) 外管に大きな凹みが出る。
- (2) 内管のパンチングメタルに亀裂が入る。

グラスウールが一様にほぐれずに一箇所で切れると大きな凹みが出る。そこであらかじめグラスウールに切込みを入れておき複数箇所で切れるようにし、問題のないレベルの凹みに分散させた。また曲げ部にはパンチング部を設けない仕様に変更した。

以上の対策の結果、断面偏平率も97%と従来(93%)以上を確保し、曲げキズ等の外観品質も大幅に向上した(表3、図13)。

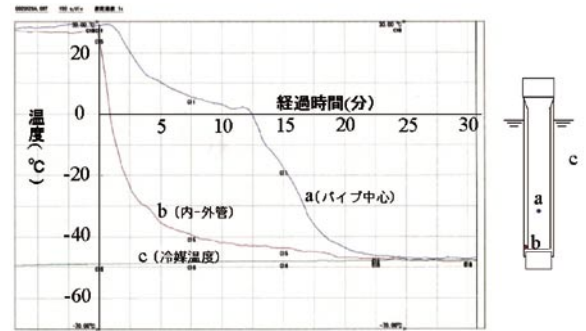


図12 冷凍時間と温度

表3 曲げ結果と判定

	項目	規格	測定値	判定
外観	膨らみ	0.1mm以下	(-0.02mm)	◎
	キズ	バフ後無き事	バフ後無	○
	偏平率	93%以上	97%	◎
	皺	無き事	無	◎
	氷割れ痕	無き事	無	◎
	グラスウール痕	バフ後無き事	バフ後無	○
精度	芯出し	無き事	無	◎

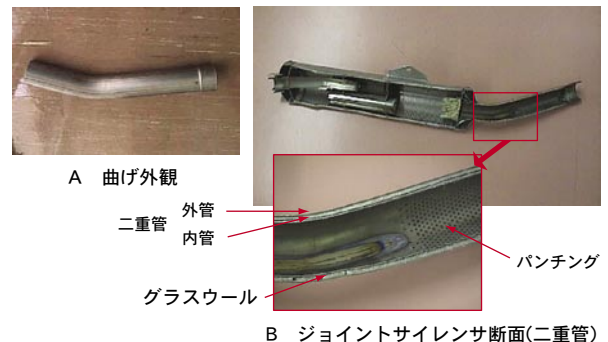


図13 ジョイントサイレンサ曲げ外観、断面

## 4 量産設備への展開

### 4.1 安全対策

主な課題としては液体冷媒の安全対策である。選定した冷媒は自主基準で有機溶剤並みに扱う物質である。冷凍設備には各種安全対策を実施し、有機溶剤マスク無しで生産出来る必要がある。

### 4.2 設備概要

冷媒の蒸気が周囲に漏れないように全体にカバー及び排気ダクトを設けた。作業者が液槽に直接触れないようにワーク自動搬送とした。またワークに冷媒が付着していると臭気を感じるので、冷媒槽からの引き上げ時にエア吹き乾燥とした。これらの対策で作業者が冷媒臭気を感じる事は無くなった。また搬送自動化により未冷凍のパイプを加工するミスを防止した(図14)。

堰板の高さで冷媒液面高さを制御し、冷媒液に浮いた氷は堰板をオーバーフローさせ金網で除去する(図15)。

従来の解凍槽は幅3mと大きく作業者の歩行距離が長い、またワーク滞留本数は24本と大きい。そこで解凍機を開発し設備の幅を1/3、滞留本数を1/4にした(図16)。

解凍した溶液は注水機のタンクに戻し再利用できるようにし、環境面に配慮した(図17)。

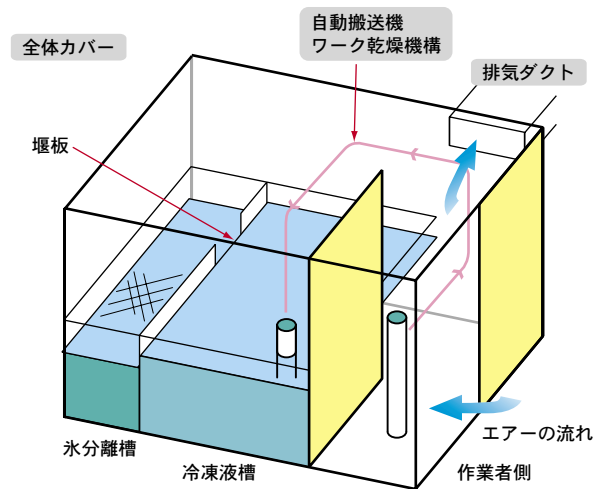


図14 液体冷凍槽概要

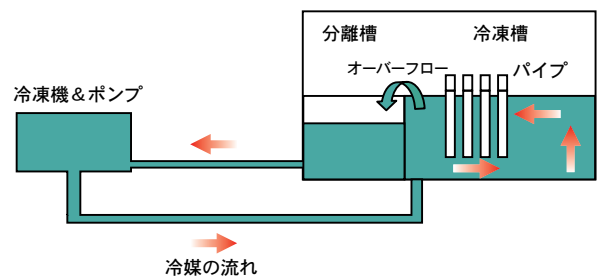
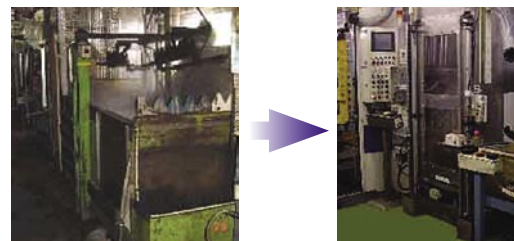


図15 冷凍機と冷凍槽



従来解凍槽 (設備幅3m、ワーク24本滞留) 新解凍機 (設備幅1m、ワーク6本滞留)

図16 新旧解凍槽

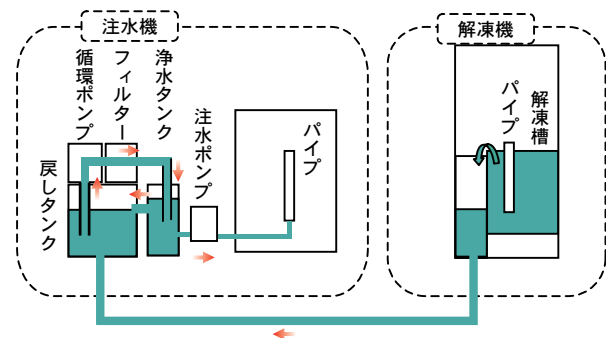


図17 注入水のリサイクル

グラスウール入りでは解凍後もパイプ内に水が残るので遠心式のタイプの脱水機を製作した。

その他、密栓注水機、開栓機は既存の水圧曲げ設備（水圧をかけた状態で曲げる）を改造した。また、氷曲げ、水圧曲げの切替えはセレクトスイッチの切替えで済むように段取り時間短縮も考慮した。

全体のレイアウトを図 18 に示す。冷凍槽、冷凍機をベンダーと併設すること等により省スペースなラインとなった。

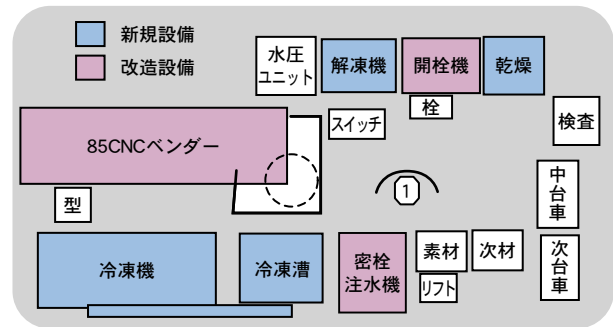


図 18 新ラインレイアウト

### 4.3 効果

本工法により以下の効果を得た。

- (1) グラスウール入りチタン二重管の量産曲げ加工が可能となった。
- (2) 冷凍時のパイプ太り不良が無くなり、曲げ角度修正工程と曲げキズ修正工程を削減できた。パイプ 1 個あたりの製作工数を 40%削減した。
- (3) 冷凍設備は、省エネ 70%、省スペース 70%を達成した。設備の移設が容易となりレイアウト変更が可能になった。
- (4) パイプ冷凍時間を約 15%に短縮でき、小ロット生産を可能とした。
- (5) 氷曲げと非氷曲げ（水圧をかけた状態で曲げる）ができる混流生産を実現した。非氷曲げ生産は従来と同じサイクルタイムである。段取り性も良いので毎日、二重管とチタン単管（水圧曲げ）の曲げ加工を実施し、ベンダーの稼働率を2倍にした。

## 5 おわりに

チタン二重管を高効率、高精度に曲げ加工する工法開発および実用化を達成した。本ラインは 2002 年より稼働している。今後、ステンレスの二重管についても、本工法で生産する計画である。

## ■参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：「チューブフォーミング」, コロナ社, 1992
- 2) 中村ほか：「パイプ加工法」, 日刊工業新聞社, 1998
- 3) 日本塑性加工学会編：「最新塑性加工便覧 第2版」, コロナ社, 平成12年
- 4) 前野紀一他：基礎雪氷講座：「雪氷の構造と物性」, 古今書院
- 5) ホシザキ電機(株) 資料
- 6) スズキ(株) 公開特許公報 特開平 8-121157
- 7) 川崎重工業(株) 特許公報 第 2902388
- 8) 神戸製鋼(株) 公開特許公報 特開平 5-200437
- 9) ヤマハ発動機(株) 公開特許公報 特開 2002-254112

## ■筆者



田代 庸司



中島 智之