

衛星用薄肉導波管の小曲率半径化を目指した曲げ加工技術の開発

埼玉大学 教育学部 生活創造講座

准教授 内海 能亜

(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016026)

キーワード：回転引曲げ加工，薄肉方形管，変形特性，加工限度

1. 研究の目的と背景

通信機器部品の導波管は、船舶や航空宇宙産業にとって欠かせないものである。近年の開発で共通に叫ばれることは、小型・軽量化である。材料置換や最適形状がそれらを解決する重要なキーワードである。

導波管は人工衛星に適用され、アメリカ連邦航空局 FAA の報告によれば¹⁾、2018 年から急激な増加を示唆し、2019 年には 420 機の商業用の人工衛星が打ち上げられると予測している。導波管はアンテナから集約した電磁波をその管内に流すもので、衛星機体中に張り巡らされているため、直管だけでなく曲線、すなわち、曲げ部も必要となってくる。一般的に、フランジ部を溶接やロウ付けなどで設けた導波管の端部を、ボルト等でつなぎ合せて衛星に取り付けている。とはいえ、任意の形状に 3 次元的に曲げ加工された一体型の導波管の適用が望ましいことは明らかである。したがって、これらを小型・軽量化することにより、衛星の本体そのものを軽量化できるので、導波管の薄肉・省スペース化が必須であると推測できる。この他、電磁波を効率的に伝播させるためには、導波管の断面形状の精度も重要なファクターとなってくる。このように、導波管の曲げ加工技術の開発は、十分に需要があるものと予測できる。

薄肉管の小さな半径の曲げ加工では、座屈現象である屈曲やしわが発生しやすい。また、曲げ加工と同時に発生する断面変形としての偏肉やへん平化などは、断面の形状精度を著しく低下させる。さらに、小さな曲げ半径の加工では、その材料の持つ変形能を超えた場合に発生するくびれや割れなどの成形不良が問題となってくる。導波管は構造部材ではないものの、宇宙空間で地球の周りを高速で移動するため、ある程度は強度、耐食・耐久性が必要となってくる。

これまで、筆者らの研究では断面変形の抑制には心材を適用し、座屈変形には軸引張力の負荷した曲げ加工が効果的であることを明らかにしてきた²⁾。また、肉厚変化やへん平化を伴った断面変形の抑制に関する研究も行ってきた³⁾。そこで、本報では肉厚 0.5mm のアルミニウム合金薄肉方形管を適用し、回転引曲げ加工実験を行った。また、曲げシミュレーションを適用して断面の変形解析も行った。これらにより、曲げによる薄肉方形管特有の変形特性および加工特性を調査し、さらに、曲げによって発生する各種不良現象の抑制方法を考察し、その加工限度を明らかにしたので、ここに報告する^{4),5)}。

2. 実験方法

2.1 供試材

導波管は規格化されており、材質は銅合金やアルミニウム合金などがある。断面形状は方形管と円管等が主であるがへん平管もある。方形管では小さなもので、断面の外形が 1mm 以下で、大きなもので 500mm 以上のものがある。アルミニウム合金製の方形管は一般的に押し出し加工されるが、外形が 20mm のものは、肉厚が 1.2mm で、それ以下の外形、例えば 10mm のものであってもその肉厚は 1.0mm の規格で、一般的な肉厚の規格値は 1.0~2.0mm ほどとなっている。

本研究で適用した方形管は 20×10×t0.5mm の薄肉管である。方形管の形状寸法を図 1 に示す。押し出し材としては規格にないので、また、押し出し加工では薄肉化に限界があるので、市販の円管の押し出し材から引抜き加工し、方形断面形状を得たものである。導波管はコーナ R の寸法も規格化されているので、それを参考にした寸法とした。

方形管の機械的性質を表 1 に示す。材質は A6063 材の焼なまし材を適用した。導波管は電磁波を流すのが目的であり、構造部材ではないので焼なまし材とした。方形管断

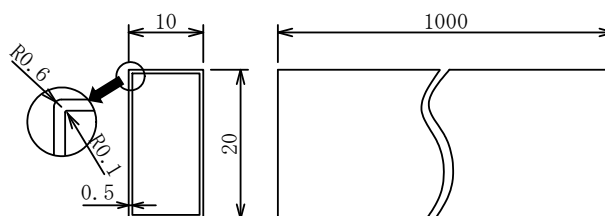


図 1 供試材の形状寸法

表 1 機械的性質

材質	A6063-O
引張強さ σ_B /MPa	91
耐力 $\sigma_{0.2}$ /MPa	39
伸び ϵ /%	24
n 値	0.27*
塑性係数 C /MPa	160*

* $\sigma = C\epsilon^n$ JIS Z2201

面の各辺 20 と 10mm からワイヤカットで試験片 14B 号を切り出し作製した。各辺の肉厚差は 10 数 μm オーダーであり、また、各数値に差がほとんどなかったため、各辺の試験片 3 本、計 $N=6$ を平均して表 1 の値を求めた。

2・2 曲げ半径

図 2 に示すように、曲げ半径 R は曲げドラム半径、すなわち、方形管内側を曲げ半径とした。方形管高さ $H_0=20, 10\text{mm}$ の 2 種類とした。

2・3 実験装置

予備実験として、薄肉管の変形特性を簡易に観察する目的でプレス曲げを用いた。パンチ半径 R は 75 と 50mm、ダイ半径は 30mm、ダイ間隔は 200mm とした。

本実験では回転引曲げを採用し、その装置の概略を図 3 に示す。この装置の構造は材料を固定するチャック、曲げ半径を決定する曲げドラム、曲げモーメントを発生させる曲げ負荷棒が基本工具となる。曲げドラムは半径 20, 22.5, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200mm の 9 種類から選択できる。オプションとして軸引張力負荷装置が装備され、また、管内に挿入する心材の着脱も可能である。それぞれロードセルによって荷重の検出ができる。この負荷装置は図 4 に示すように、モータとスクリュージャッキにより、てこの原理で負荷力を発生させる。そして、その負荷力に

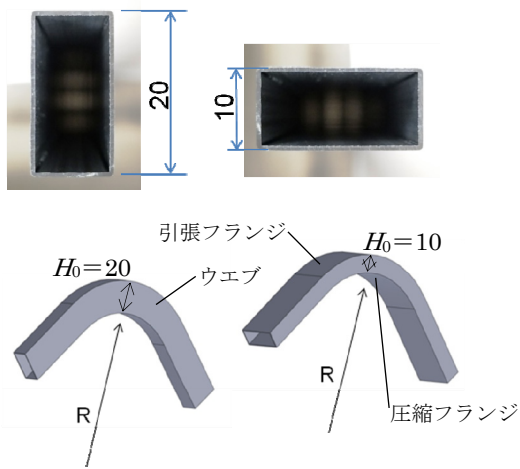


図 2 曲げ半径と高さ

より方形管をブレーキパットで挟込むことで、軸引張力を負荷する構造としている。

図 5 に示す積層心材は厚さ 0.01~2.0mm の PVC と SUS 薄板を専用の治具で束ねた構造で、任意の高さの寸法に調整ができる。また、最小で 0.01mm の調整が可能である。積層心材の曲げ剛性 ($E \cdot I$) は方形管の数千分の 1 に調整し、方形管に悪影響を及ぼさない曲げ剛性値をとした。クリアランス C_L は高さ・幅方向とも 1.0mm とした。

2・4 シミュレーション

回転引曲げのシミュレーションには、市販の有限要素汎用コード LS-DYNA3D を適用した。解析モデルを図 6 に示す。図は 1/2 モデルで示しているが実際の計算ではフルモデルで解析した。積層心材はソリッド要素で、それ以外はシェル要素とした。また、方形管はべき乗硬化則の等方弾塑性体、心材は弾性体、その他のモデルは剛体とした。方形管と工具・心材間の摩擦係数は、転がり接触や油を塗布しているため、摩擦はほとんどないものと判断し 0.01 とした。

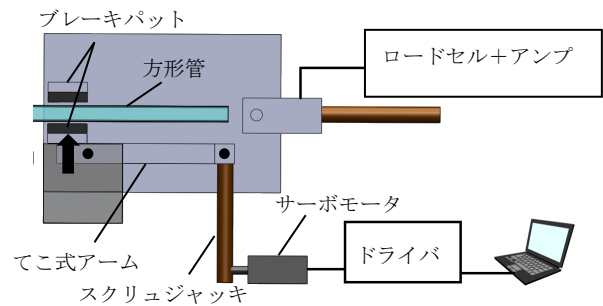


図 4 軸力負荷装置の概略

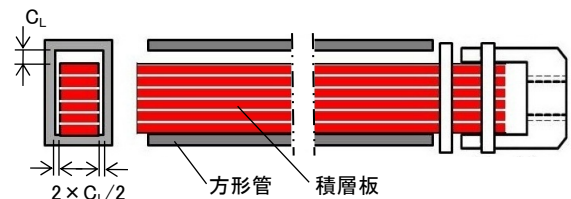


図 5 積層心材の概略

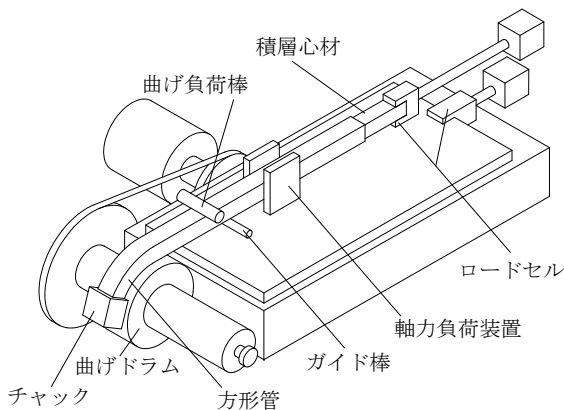


図 3 回転引曲げ加工装置の概略

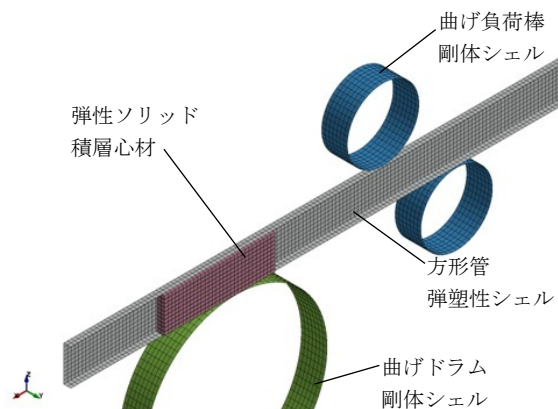


図 6 解析モデル (1/2 モデル)

3. 結果および考察

3-1 プレス曲げ加工

薄肉方形管の変形挙動を調査するために予備実験としてプレス曲げを行った。図7に曲げ加工後の断面形状を示す。パンチストローク δ はパンチが方形管に接触してからの距離である。曲げ開始直後から断面が変形し、肉厚が薄いため、管の圧縮側コーナ部（赤丸部）の剛性が低く、大きく変形していることがわかる。また、 δ が大きくなると元のコーナ部が無くなり、ウェブの一部が折れ込み、それが圧縮フランジとなり、断面全体に屈服が発生する。

次に、積層心材を適用した条件の方角管外観を図8に示す。パンチは $\delta=50\text{mm}$ まで下降させた。図7で示した大きな断面変形は減少したものの、しわが多数発生していることがわかる。さらに、ウェブ（管の両側面）を拘束する治具を設けてプレス曲げを行ったが、しわの高さが若干抑えられるものの、しわ自体の抑制はできなかった。

3-2 回転引曲げ加工

心材と拘束治具なし、軸引張力の負荷をかけない条件で回転引曲げ加工をすると、図9のようになる。 $H_0=20$ では屈服、 $H_0=10$ ではしわが発生していることがわかる。次に、軸力引張力を負荷するとしわは抑制できるが、図10のように、フランジの落込みが大きく発生する。しわの抑制は軸引張力により方形管の圧縮領域が減少し、座屈変形が抑制されたことによる。しかしながら、引張力を増大させればさせるほど、へん平分力³⁾も大きくなり、引張

δ (mm)	5	10	30	50
$H_0=10$ R50				
$H_0=20$ R75				

図7 プレス曲げによる断面変形（心材なし）

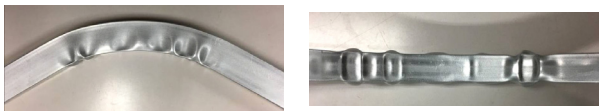


図8 心材を適用したプレス曲げ ($H_0=20$, R75)



(a) 屈服 ($H_0=20$, R50) (b) しわ ($H_0=10$, R50)

図9 心材および軸力なしの曲げ加工

フランジを大きく落込ませ、結果としてウェブも大きく膨らむ。ここで断面変形に影響するファクターを以下に整理する。[1]軸引張力、[2]1/R、[3]断面外形、[4]肉厚、[5] n 値、[6]塑性係数などが大きくなると、へん平分力が大きくなり、曲げによる断面変形が進行するものと考え⁴⁾。

軸力引張力を負荷し、積層心材を適用した曲げの結果を図11に示す。 $H_0=10$, R20 では、しわや割れのない曲げ加工が可能であったが、 $H_0=20$, R20 では割れが発生した。R50 ではしわや割れのない曲げ加工が可能であった。しかしながら、 $H_0=10$, 20 とともに断面の変形は大きく、 $H_0=20$ では、洋ナシ形の薄肉管特有の変形が発生した。これはウェブが薄肉のため、また、コーナ部の剛性が低いためにウェブが外側へたわんだものと考え。言いかえる

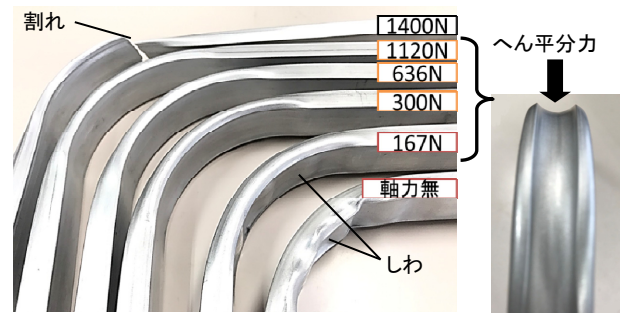
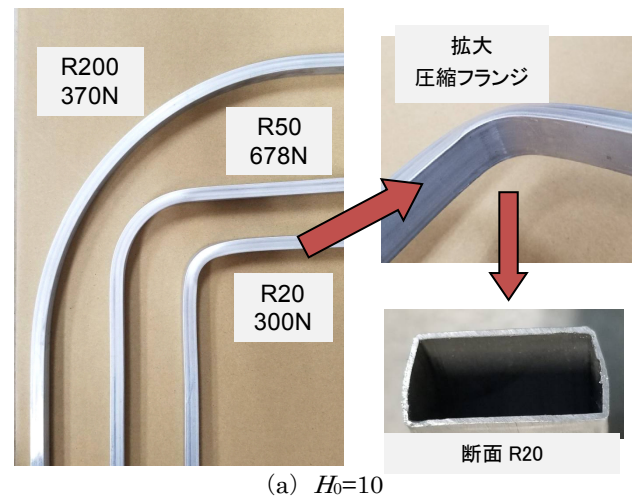
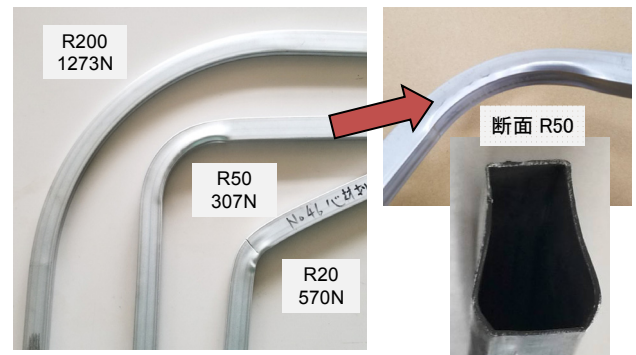


図10 軸力負荷の効果とデメリット ($H_0=10$, R50)



(a) $H_0=10$



(b) $H_0=20$

図11 積層心材および軸力負荷を適用した曲げ加工

と、これはウェブの座屈変形である。ウェブの一边を長柱の座屈と考えると、引張り側の端部は拘束され、圧縮側の端部は回転拘束された梁のたわみと同様の変形様式となっていることに気づく。この他、積層心材の効果について言及すれば、ウェブが内側でなく外側へたわむこと、また、引張および圧縮フランジは管内へ落込んだり外側へ膨らんだりすることなく、水平になっていることが図から観察できる。

他に、 $H_0=10$ の曲げと比べると $H_0=20$ のウェブ膨らみは大きい。幅方向に膨れるということは、心材が高さ方向（管高さ H_0 方向）につぶされて、ウェブにたわみが発生することになる。 $H_0=20$ の曲げで用いる積層板の枚数は $H_0=10$ に比べて非常に多い。なぜなら、心材の曲げ剛性を低くしなければ、方形管の引張フランジに割れや膨らみなど悪影響を与えるからである。したがって、枚数が多くなると板と板の間に空間が多くなり、心材と方形管との間のクリアランスは実質的に大きくなってしまう。そして、曲げによるへん平分力で方形管が高さ方向に圧縮され、 $H_0=10$ の曲げよりも大きな膨らみが発生することになる。

図12に示すように曲げシミュレーションにおいても、洋ナシ形の変形が確認できた。解析条件は $H_0=20$ 、R50の曲げで、積層心材の適用および軸力負荷した。シミュレーションの積層心材は、モデル作成・解析時間短縮化のため、実際の積層板よりも枚数を少なくし一枚当たりの厚みを厚く設定した。また、モデルの積層板は弾性体で、断面二次モーメントを実験用の積層心材に合わせるために、ヤ

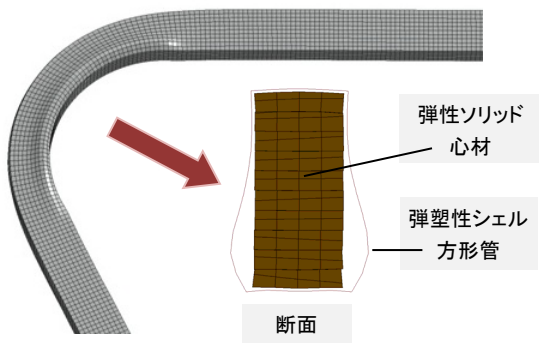


図12 解析結果 ($H_0=20$, R50, 心材・軸力有)

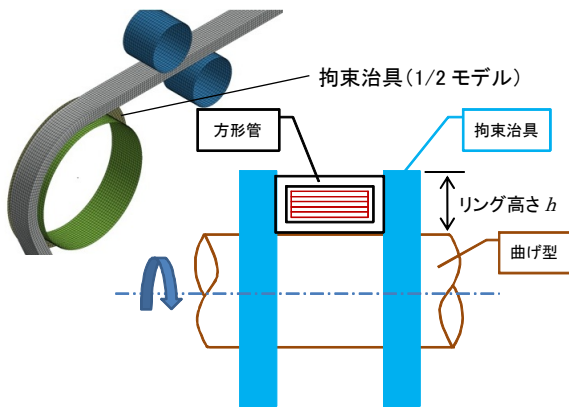


図13 拘束治具の概略と解析モデル

ング率を小さく設定した。このため、ソリッドモデル（積層心材）の板厚方向の変形が実験よりも大きくなりやすく、引張および圧縮フランジに落込みや膨らみがわずかながら発生する結果となった。

3.3 ウェブ拘束治具

ウェブの外側への膨らみを抑制するために、ウェブ面を拘束する治具を製作した。その概略と解析モデルを図13に示す。 $H_0=10$ の曲げでは、拘束するリング高さは $h=10\text{mm}$ のみとした。 $H_0=20$ では、特に圧縮側の変形が大きいので、ウェブの圧縮部のみを拘束する条件とウェブ全域にわたって拘束する条件を調査した。リング高さ $h=10$ 、 20mm の2種類とした。

はじめに、 $H_0=10$ 、R20の曲げ条件の実験結果を図14に示す。縦軸は、元の幅 $W_0=20\text{mm}$ を基準とし、曲げ後の最小・最大部の幅 W に関する比（ $=W/W_0$ ）を表す。拘束治具を適用した条件では、著しく改善されていることが方形管断面の写真からわかる。また、数値的には、大きくても5%未満に変形が抑制されていることがグラフよりわかる。この他、最小部は引張フランジを表しているが、本曲げ加工はしわの発生を抑制しているの、軸引張力を負荷している分だけ、引張フランジ部の幅 W が減少する。したがって、最大部（圧縮側）に比べ、引張フランジの幅の精度が若干悪い傾向となる。

次に、 $H_0=20$ 、R50の曲げ条件で、拘束治具のリング高さ $h=10$ の場合、実験と解析結果を合わせて図15に示す。

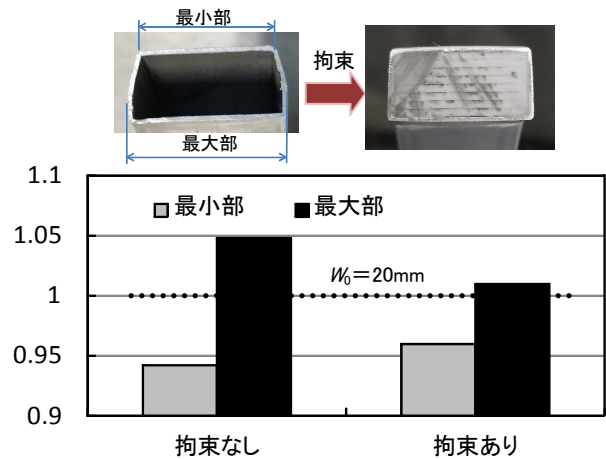


図14 拘束治具の効果 (実験結果: $H_0=10$, R20)

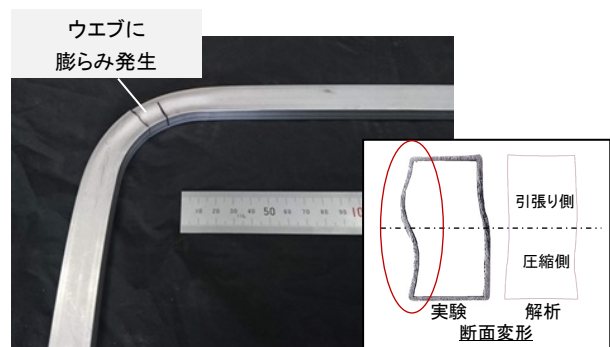


図15 拘束治具 $h=10$, $H_0=20$, R50の曲げ加工

図中の断面変形について考察する（赤丸部）．まず、曲げ加工と同時に圧縮側に膨らみが発生するが、ウェブの中心から圧縮側は拘束治具で拘束されているため、ウェブは管内に向かってたわみ始める．心材と方形管と幅方向にクリアランス（片側 $0.50\text{mm}\times 2$ ）があるため、その分だけウェブは内側へ倒れ、心材に接触してその変形が収まる．引張り側は拘束されていないので、図の中心線上部では、前述の圧縮側のたわみを受けて、ウェブが外側に倒れ、引張り側に膨らみが生じたものと考えられる．

さらに、拘束治具のリング高さ $h=20$ による曲げの結果を図 16 に示す．実験および解析結果ともに $h=10$ に比べ、ウェブの外側への膨らみの変形が抑制されていることがわかる．しかしながら、ウェブがまだ波形となっている．これは、心材と方形管との間のクリアランス（高さおよび幅方向ともに）を 1.0mm としているため、曲げのへん平分力によって高さ方向に心材が押しつぶされる．そして、その分ウェブも圧縮されて座屈し、波形のたわみが発生するものと考えられる．

拘束なし（図 11 (b)）と拘束治具あり（ $h=20$ ）の曲げ実験で得られた断面形状 H 、 W_{\max} 、 W_{\min} を比較すると図 17 のようになる．縦軸は元の長さ H_0 と W_0 との比である．拘束治具を適用すると、最大幅 W_{\max} が著しく改善（14% 向上）されていることがわかる．また、高さ H と最小幅 W_{\min} は、ほとんど変わらないが、ここでは、最小幅が引張フランジに相当し、元の幅から 9.8% 減少（ $10\Rightarrow 9.02\text{mm}$ ）する結果となった．高さは 4.4% 減少した．

ところで、方形管の肉厚を厚くした曲げ解析では、このような内側に倒れる、あるいは、波形の変形は確認されなかった．主として台形形状の断面変形となる．洋ナシ形や波形のウェブの変形は、薄肉方形管特有の断面変形と考えられる．このウェブの波形の変形を抑制するためには、方形管と心材のクリアランスを最小限にする心材の開発が必要である．

4. 結論

薄肉方形管 A6063-O、 $20\times 10\times t0.5$ 材における回転引曲げ加工実験および曲げシミュレーションを行った．

薄肉管の曲げではしわが発生しやすいが、軸引張力を負荷することによって、しわを抑制することができた．また、薄肉方形管特有のウェブの座屈による断面変形が発生することがわかった．この変形は心材との関連が深く、方形管と心材のクリアランスを調整することで改善できるものと考えられる．本曲げ実験では、 $H_0=10$ 、 $R20$ の条件で、断面変形を 5.0% 未満に抑えることができた． $H_0=20$ 、 $R50$ では、引張フランジの幅が 9.8% 減少する結果となった．

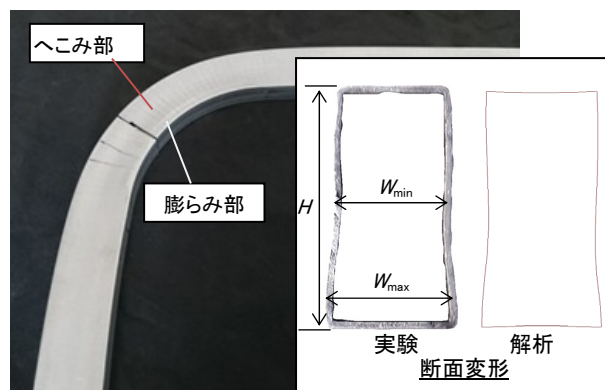


図 16 拘束治具 $h=20$ 、 $H_0=20$ 、 $R50$ の曲げ加工

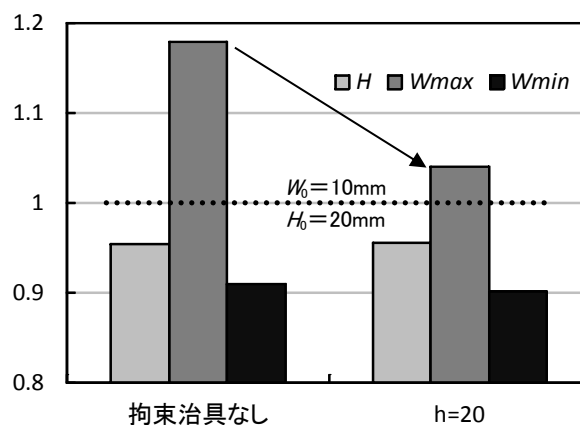


図 17 拘束治具 $h=20$ の効果（実験結果： $H_0=20$ 、 $R50$ ）

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成（AF-2016026）によって実施した．ここに深く感謝の意を表します．

参考文献

- 1) Federal Aviation Administration : Annual Compendium of Commercial Space Transportation, (2018).
- 2) 坂本修次・内海能重 : 塑性と加工, 日本塑性加工学会, 52-604,(2011),572-576.
- 3) K.NAKAJIMA・N.UTSUMI・M.YOSHIDA : International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 14-6, (2013), 965-970.
- 4) 内海能重・齋藤佳久・吉田昌史 : 第 69 回塑性加工連合講演会講演論文集,(2018)127-128.
- 5) Y.SAITO・Y.KONO・T.KAMIMURA・N.UTSUMI・M.YOSHIDA : The 5th Asian Symposium on Materials and Processing Proceedings, (2018), 68-69.