

# 液圧成形によるシームレス加速空洞の製造

高エネルギー加速器研究機構 機械工学センター

教授 山中 将

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021005-B2)

キーワード：液圧成形，加速空洞，銅パイプ

## 1. 研究の目的と背景

管状素材を用いた液圧成形は、古くから知られる塑性加工の一つである。金型内に置いた管材に高内圧を加え、管の両端を軸方向に押し込んで、金型に沿った形状に成形する<sup>1)</sup>。配管継手、ベローズなどの生産に広く用いられている。中空軽量部品を一体成形することができ、コストダウンも図れることから、近年特に自動車部品への適用が急速に拡大している<sup>2)</sup>。

粒子加速器は、電磁波などを使って電子や陽電子などの粒子にエネルギーを加え、粒子を加速する装置である。加速した粒子を衝突させて噴出する様々な粒子を観測したり、がん治療のための医療機器に用いられ、様々な学術および産業用途がある。加速器には種々の方式があるが、超伝導加速空洞は、空洞セル内に大電力の高周波を導き、空洞内にできる電場を利用して粒子を加速する。空洞の材料には純ニオブが用いられ、液体ヘリウムを用いて 4 K まで冷却し、超伝導状態にして運転する。電気抵抗がほぼゼロのため、電力損失や発熱が抑制され、小さな電力、短い距離で大きなエネルギーを粒子に与えることができる。従来の加速器に比べて省エネというメリットがあるが、材料にレアメタルであるニオブを使うため初期コストは高くなる<sup>3)</sup>。

だ円のセル形状を有する超伝導加速空洞の製造方法は、圧延したニオブの板材をおわん状にプレス加工し、それらを電子ビーム溶接 (EBW) で結合する方法が一般的である。空洞は内面が滑らかなことが要求されるが、EBW の電子銃は大型のため、空洞の外側から貫通溶接を行い、隆起の少ない滑らかな溶接裏ビードを形成する必要がある。これは熟練を要する非常に難しい溶接作業である。EBW 機の導入コストも高く、EBW が空洞製造コスト上昇の主要因である。EBW を用いずに液圧成形を用いて空洞を低コストで製造する研究が行われている。特にドイツ電子シンクロトロン研究所 (DESY) において Singer らによって精力的に行われた。内径 150 mm、肉厚 2.7 mm のニオブシームレスパイプを用いて空洞を製造した。最大加速勾配は 30~35 MV/m に達した<sup>4)</sup>。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) は 1994 年より液圧成形の研究に着手し、図 1 に示すニオブ製の 1 セルと 3 セル空洞の製造に成功し、電界性能試験の結果、最大加速勾配は 40 MV/m に達し、加速空洞として使用できることを確認した<sup>5)</sup>。



(a) 1 セル空洞



(b) 3 セル空洞

図 1 ニオブ製シームレス空洞 (ニオブパイプはアルバック製)

超伝導空洞のコストを低減するために、銅で空洞本体を製作し、内部をニオブでコーティングして超伝導を発現させ、廉価な空洞を実現する研究が近年、盛んに行われている。加速空洞の内面は滑らかさが求められ、コーティングの下地は継ぎ目の無い空洞が理想的である。欧州原子核研究機構 (CERN) は 1989 年までに銅パイプを用いて液圧成形による空洞製造に成功している<sup>6)</sup>。本研究の目的は、1 本の銅パイプから、継ぎ目のないシームレス空洞を製造することである。2023 年に日本ニューロン (株) との共同研究により、1.3 GHz 1 セル銅空洞の試作に成功した<sup>7)</sup>。本報告では、製造工程と成形例について詳細に述べる。

## 2. 実験方法

### 2・1 フルシームレス空洞

1 セル空洞の構成部品を図 2 に示す。(a)は従来のプレス・溶接工法により 4 個、(b)はセル部分を液圧成形で製作し、左右のビームパイプを溶接することにより 3 個、(c)

は、さらに左右のビームパイプとセルの間の溶接継ぎ目も無くして1個である。液圧成形を容易にするために、セルの小径部(アイリスと呼ぶ)より径の大きなパイプを用い、予成形としてアイリス部のくびれを作ってからセル形状に膨らめる工法が取られていた。そのため、成形後にアイリス部で切断して、ビームパイプを溶接する必要があった。今回、溶接を廃し、工程を簡素化できる(c)を実現した。これをフルシームレス空洞と呼ぶ。

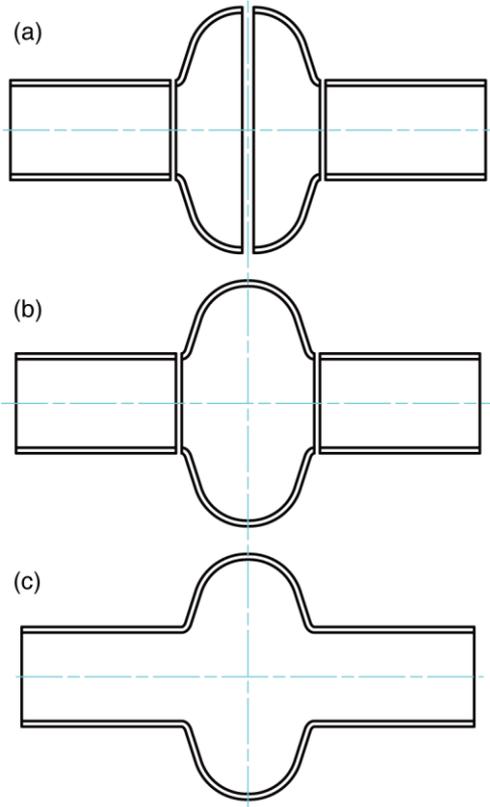


図2 1セル空洞の構成部品

### 2・2 銅パイプ

試作した1.3 GHz 1セル空洞の素管であるシームレスパイプは、外径88 mm、肉厚5 mmである。材質は無酸素銅(JIS C1020)である。純度は99.98%、引張強度219 MPa、伸び67%、硬さ34 HVである。電子管用無酸素銅C1011という高純度の材料もあるが、ここでは通常は無酸素銅を用いた。JIS H3300にシームレス銅パイプが規定されており、4 m程度のパイプを国内で複数社から調達可能である。使用したパイプは引き抜きにより製造された。銅パイプは工業的に流通しているので、ニオブパイプと比べるとコストは1/65以下である。

後述するシミュレーションでは、材料パラメータを与える必要がある。パイプを展開して引張試験片を切り出し、500°C×2時間の真空焼鈍を行った後に引張試験を行った。図3に示す真応力-真ひずみ線図を求め、硬化指数 $n$ を算出した。

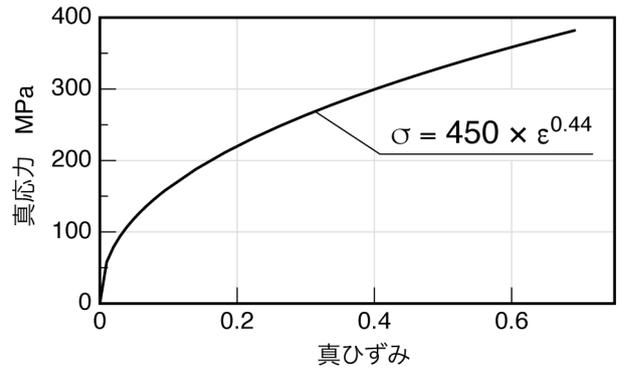


図3 銅の真応力-真ひずみ線図

### 2・3 液圧成形の工程

1本のパイプを一気に空洞形状に成形する方法を試したが難しいことがわかり、図4に示す2工程による成形を提案した。2種類の金型を用意し、液圧成形のみで仕上げる。使用した液圧成形機は立型のため、パイプと金型は縦方向の配置となる。一方の金型の底部を固定し、他方の金型を押し込む。従来は、アイリス部のくびれ加工が必要であるが、これを廃して工程を簡素化した。くびれ加工はアイリス一か所ずつ加工するので時間がかかる。くびれ加工が無いと生産性の大幅な向上が期待できる。まず外径88 mmの銅パイプの中央を130 mm程度に膨らませ、次に金型を交換して、最終形状の210 mm程度まで膨らませる。1工程と2工程の間には、伸び性を回復するために500°C×2時間の真空焼鈍を行う。

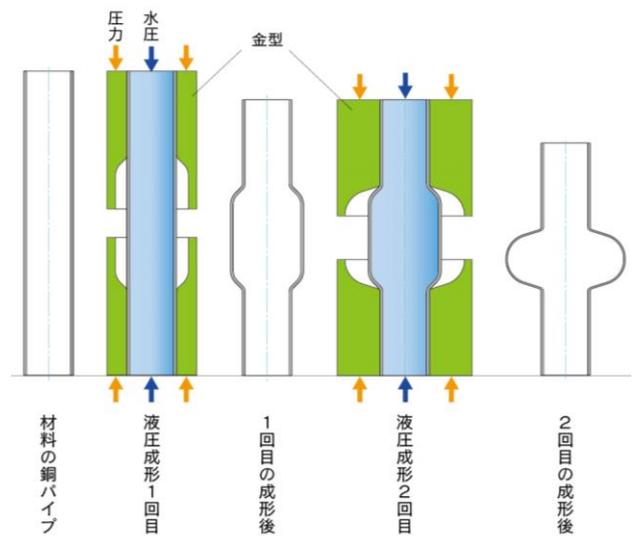


図4 フルシームレス空洞の製造工程

銅はニオブより成形性が良いが、液圧成形でこれほど大きく膨らませる工業的な例は見当たらない。ここでは、周長で2.4倍伸ばす必要がある。近年、液圧成形の過程をコンピュータで精度よくシミュレーションできるので、どのような条件で成形すればうまく膨らむか、実際の成形に先立

ちシミュレーションにより検討した。図5にシミュレーション結果を示す。シミュレーションには図3に示した材料パラメータを使用した。押し込み速度は1 mm/sである。

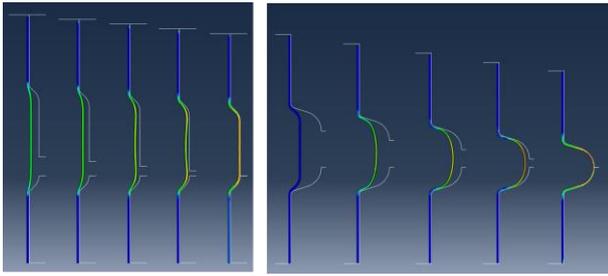


図5 シミュレーションの結果：各工程での最大トレスカ応力は、それぞれ382, 424 MPaとなった。シミュレーションは日本ニューロンが行った。

### 3. 結果と考察

実際に使用した液圧成形機を図6に、成形した銅パイプを図7に示す。液圧成形機は縦方向に圧縮する。流体は水である。シミュレーションを基に決定した、ストロークと水圧の関係（負荷経路）を数値データとして、液圧成形機に入力することで、自動的に成形できる。成形時間は各工程2分程度である。工程で変化した特性値を表1に示す。成形により肉厚は減少し、中央部は1工程後に3.9 mm, 2工程後に2.6 mmとなった。実験において破裂したパイプは、肉厚のばらつきが大きいものが見られた。今回は肉厚のばらつき（最大値-最小値）が0.1 mm以下になるように特別に製造したパイプを使用した。本成形では非常に大きく膨らませるので、材料の伸びも大切であるが、それ以上に肉厚のばらつきを小さくすることが重要である。



図6 液圧成形機（日本ニューロンの厚意による）



図7 成形した銅パイプ：上段・素管，中段・1工程後のパイプ，下段・2工程後のパイプ，成形によりパイプの全長が短くなっていく様子がわかる。

表1 各工程における特性値

工程	全長 [mm]	外径(中央) [mm]	肉厚 [mm]	硬さ [HV]
初期状態	499.6	88	5.02~5.07	34
1工程後	450.1	129.7	3.85~3.92	60
焼鈍後	—	—	—	26
2工程後	371	216.9	2.6~2.71	84

成形による加工硬化により硬さが高くなる。1工程後の焼鈍により初期状態以下に硬さが戻っている。2工程は大きく膨らませるために加工硬化が大きく、1工程後よりさらに硬さが高くなる。

切断した空洞内面を図8に示す。成形前のパイプ内面の長手方向の表面粗さは1.0  $\mu\text{mRa}$ である。成形後のセルの大径部（赤道と呼ぶ）は2.9  $\mu\text{mRa}$ である。肌荒れの少ない良好な仕上がりとなった。また肉厚分布が発生し、赤道部が最も薄くなった。キャリパで測定した肉厚の測定結果を図9に示す。長手方向55 mmあたりがアイリス部である。加速空洞は内面形状が重要であり、肉厚分布をあらかじめ予想して金型形状の設計を行う必要がある。シミュレーションにより求めた肉厚を合わせて示す。成形の最終段階では、パイプと金型が接触した状態で形状が変化する。そのため、シミュレーションと実際の形状を合わせるためには、適切な摩擦係数を与える必要がある。摩擦係数 $\mu=0$ と0.2の場合の結果を示す。 $\mu=0.2$ の場合の方が、実測値に近い結果を得られた。 $\mu$ をさらに大きくしても、赤道部

での実測値には近づかなかった。本シミュレーションでは、軸対象モデル（2次元モデル）を用いているため、パイプの周方向の摩擦力を考慮できない。また成形が進むと摩擦係数が変わる可能性もある。これらが誤差の要因と考えている。

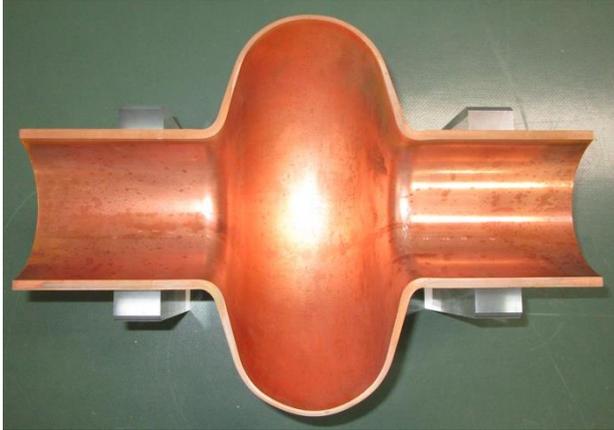


図8 切断した空洞内部：パイプ部の肉厚は5 mm，赤道部の厚さは2.6 mm。肉厚分布があることがわかる。

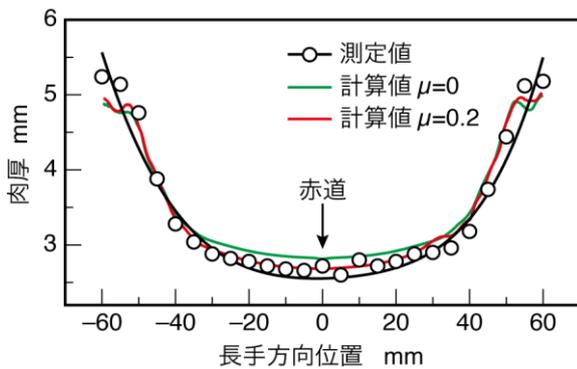


図9 肉厚分布の測定結果とシミュレーションとの比較

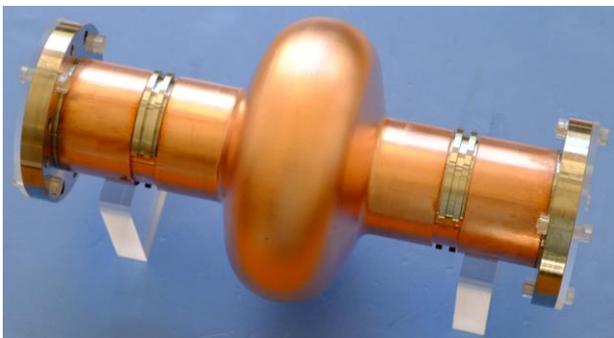


図10 完成したフルシームレス空洞（全長 396 mm）

これまでに十数本の成形に成功し、高い再現性を確認した。図10に示すように空洞の両側にフランジを取付けて完成となる。フランジはステンレス製で銅パイプとは電子ビーム溶接で接合した。

#### 4. まとめ

銅1セルフルシームレス空洞を開発し、廉価なニオブコーティング空洞の開発に貢献した。この銅空洞は CERN に提供され、マグネトロンスパッタリングによるニオブコーティングが行われた。現在、KEK で空洞の性能評価を行っている。従来の継ぎ目のある空洞に比べて良質なニオブコーティング空洞が出来ることを見込んでいる。これによりニオブコーティング研究の進展を期待している。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の2021年度一般研究開発助成（AF-2021005-B2）により行われた。銅空洞の液圧成形は日本ニューロン（株）で行われ、同社の西勇也氏、西森一喜氏との共同作業の結果である。また KEK の山本明名誉教授の橋渡しにより、CERN から銅空洞に関する多くの助言を得た。これらを記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本塑性加工学会：チューブハイドロフォーミング，（2015），森北出版。
- 2) Tolazzi, M.: Int J Mater Form (2010) Vol. 3 Suppl 1:307 – 310.
- 3) Padamsee, H., Knobloch, J. & Hays, T.: RF Superconductivity for Accelerators, (1998), 37-56, John Wiley & Sons.
- 4) Singer, W. & Singer, X.: Phys. Rev. ST Accel. Beams, 18-022001 (2015), 1-22.
- 5) 山中将・井上均・他：第12回日本加速器学会年会プロシーディングス，（2015），1105-1107.
- 6) Hailer, C.: Proc. 1989 IEEE Particle Accelerator Conf., (1989), 485-487.
- 7) KEK プレス発表，世界初の継ぎ目なし加速器心臓部の製造に成功，2023/11/2, <https://www.kek.jp/ja/press/hf202311021400/>