

# 繊維強化氷(FRI)を喪失中子（ロストコア）として用いた 枝管成形プロセスの研究

国士舘大学 理工学部 機械工学系

教授 大橋 隆弘

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015044)

キーワード：チューブフォーミング，バルジ加工，ロストコア

## 1. 研究の目的と背景

部品の軽量化ニーズから、低コスト高効率な中空部品の成形法が必要とされている。液圧成形が主要な加工方法として知られているが、それに対し、申請者らは管に溶融除去可能な低融点物質を充填し、側方へ押し出し加工する方法(ロストコア側方押し出し)を検討してきた<sup>1-3)</sup>(図1)。

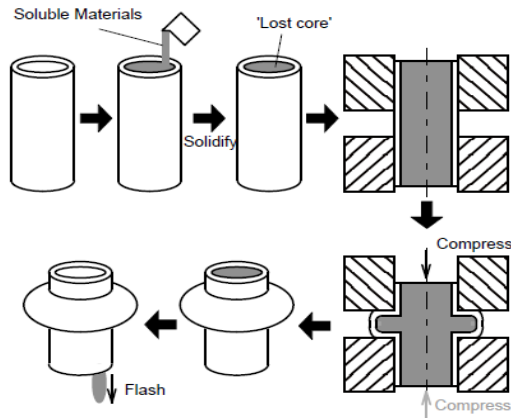


図1 ロスト（喪失）コアを用いた管の側方押し出し<sup>1)</sup>

本法は、

- (1) 簡単なプレス機で実施可能で、液圧成形に比べ、ワンショットのスループットが格段に速い。
- (2) 低い成形荷重で加工できるため、肉厚中空部品に適用可能となる。
- (3) 液圧成形においては、プレスなどの板成形と同様に基本的に引張場下の成形となるのに対し、本プロセスは鍛造などと同様な（枝管などの成形では新生面の創成を含む）圧縮加工となるため、シャープなエッジの成形が可能であり、このような形状的特徴を有することが多い小さなバルク部品の中空構造部品への工法転換に向いている。という特徴を有する。

一方で、ロストコアとして、主に鉛や、低融点合金(Sn-Inなど)が用いられており、環境問題やコストの面で用いられにくいプロセスとなってきた。筆者らはこれらの充填物の代替物質として氷を検討してきた<sup>4)</sup>。管の塑性加工用充填材として氷を用いる利点として以下が挙げられる。

- (1)加熱することなく室温にて放置するだけで、充填材を融解できる。
- (2)除去に酸洗の必要がない。
- (3)100℃以上に加熱すれば、水分を完全に除去できる。
- (4)環境にやさしい。
- (5)安価である。

しかしながら、鉛や低融点合金による充填材の引張強さは 20~30MPa 程度であるのに対し、氷の圧縮強さは 3~4MPa 程度であるため、上記充填剤の代用として氷を用いることができるプロセスは限られたものであった。

そこで、本件開発では、高強度短繊維により、氷を強化した複合材（繊維強化氷；Fiber Reinforced Ice(FRI)）を製作し、鉛や、低融点合金に匹敵する圧縮強さを得て、従来の管の塑性加工用充填材の代替品として用いることを試みる。

これまで先行研究として、科学技術振興事業団（JST）平成27年研究成果最適展開支援プログラム（A-STEP）フェージビリティスタディステージ 探索タイプ「パイクリートを用いた革新的中空部品成形プロセスの研究」（研究期間：平成27年1月~12月）で受託研究を受け、氷—紙パルプ繊維複合材について圧縮試験を行い、A6063合金管のフリーバルジプロセスで有効性を検証した。それに対し、本件開発ではよりロストコアに対する圧縮性の強い条件となる枝管の成形を検証する。そのため、従来の先行研究で検討してきた紙パルプ繊維に加え、表1に示すように、より高強度なガラス繊維による強化について検討した。

表1 ガラス繊維と紙パルプ繊維の機械的性質

	Tensile strength	Young's modulus
Glass fibers	3200 to 4100 MPa	60 to 130 GPa
Paper-pulp fibers	12 to 50 MPa	2.5 to 5GPa

## 2. 研究方法

### 2.1 ガラス繊維強化氷の圧縮試験と紙パルプ繊維強化氷との比較

5種の配合比のガラス繊維強化氷について圧縮試験を行った。本件開発と並行して行われた科学技術振興事業団

(JST) 研究成果展開事業マッチングプランナープログラム「繊維強化氷 (FRI) 型を用いた対向液圧成形」(研究期間平成28年6月1日～29年3月31日)において、紙パルプ繊維強化氷に関し、変形に強い速度依存性が観察されたため、当初予定になかったが、本件開発でも圧縮速度を変えて実験を行った。実験はφ50高さ50の円筒試験片を用い、金型および試験片を温調器により制御された冷凍庫中で、所定の温度になるまで保持した後に、①圧縮強さ試験においては室温雰囲気暴露された島津製作所製30t 万能試験機 UMH-30、②応力-ひずみ線図の測定においては島津製作所製オートグラフ AG-250kNI およびガス噴射恒温槽 TCL-N を用いて、圧縮試験を行った。潤滑剤の代用として、0.05mm 厚の PTFE シート (Niftron#900UL) を用いた。

### 2・2 枝管の成形の実証実験

2・1 節の実験結果に基づき、充填材を選定し、枝管の成形実験を行った。供試金型を図2に示す。型締め装置に十分な出力がないため、型割面は枝管部に沿って割るように設計した。また、成形機としてアマダ製サーボプレス SDE1522 を用い、成形速度を変化させて実験を行った。図3に示すように、2本の対向パンチを同時かつ対称に駆動するため、90度カムを用いた対向圧縮治具を製作して用いた。試験片はφ16mm、厚さt=1mmのA6063TDパイプとした。枝部管径は10mmとした。潤滑剤として二硫化モリブデン (SUMIKO ローコルペースト) を用いた。

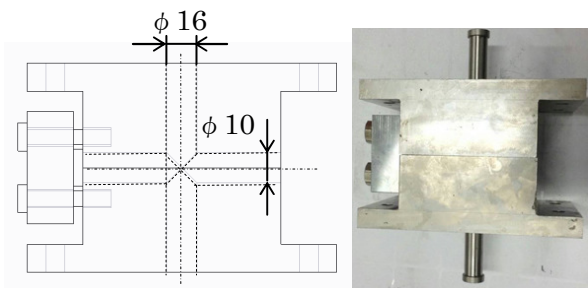


図2 供試金型

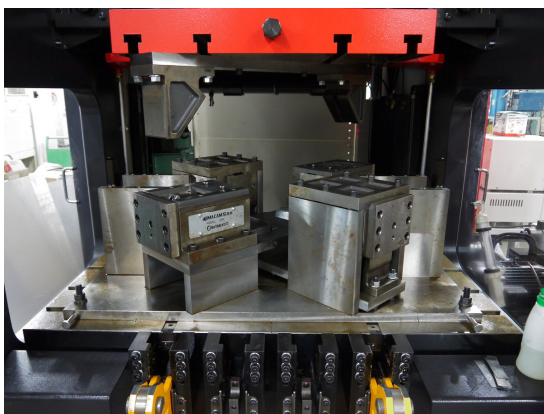


図3 対向圧縮治具

## 3. 実験結果

### 3・1 ガラス繊維強化氷の圧縮試験と紙パルプ繊維強化氷との比較

図4に実験により得られた、繊維濃度と圧縮強さの関係を示す。参考のため、紙パルプ繊維の結果も併記した。

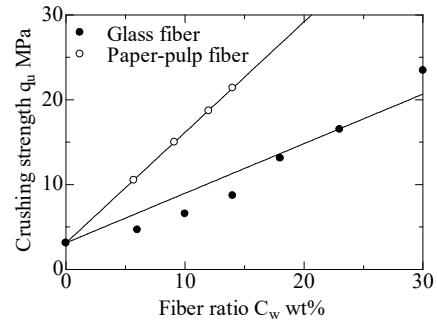


図4 繊維濃度と圧縮強さの関係 (クロスヘッド速度 70mm/min)

また、ガラス繊維強化氷の圧縮速度別の応力ひずみ線図を図5に、参考のため、紙パルプ繊維強化氷の応力ひずみ線図、および低融点合金・鉛の(引張試験による)応力ひずみ線図を図6、図7に示す。

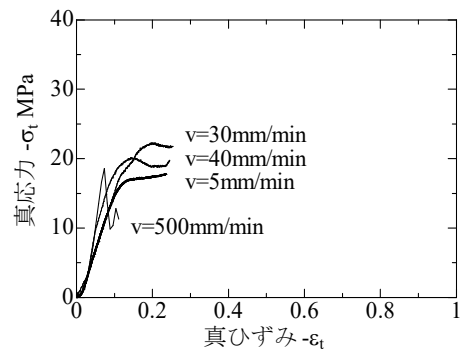


図5 ガラス繊維強化氷の圧縮速度別の応力ひずみ線図 (繊維濃度  $C_w = 30$  wt.%, 恒温槽温度-30°C)

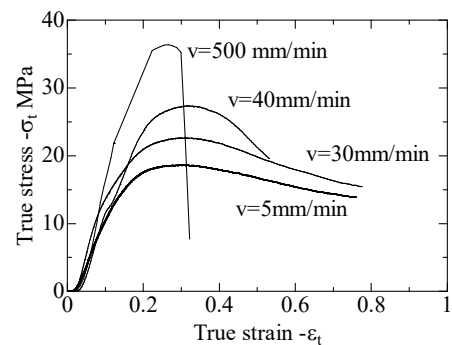


図6 紙パルプ繊維強化氷の圧縮速度別の応力ひずみ線図 (繊維濃度  $C_w = 30$  wt.%, 恒温槽温度-30°C)

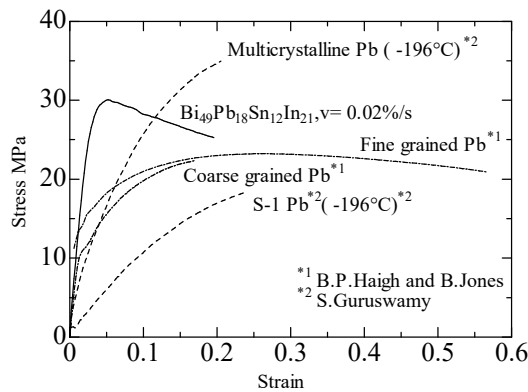


図7 低融点合金および鉛の応力ひずみ線図(低融点合金の応力ひずみ線図は筆者らの実験による. 鉛の応力ひずみ線図は文献<sup>5)</sup>より引用.)

事前の予想に反し, ガラス繊維によって強化された繊維強化氷の強度は紙パルプ繊維による強化に劣ることが分かる. また変形能に関してガラス繊維強化氷は劣ることがわかった. 図8, 図9は圧縮試験によるガラス繊維強化氷, 紙パルプ繊維の破壊の様態の比較であるが, ガラス繊維強化氷は主応力面方向に亀裂が入り, 脆性的な破壊を呈しているのに対し, 十分な繊維濃度のパルプ繊維強化氷はある温度条件以下では, 主せん断応力面方向に亀裂が入り, 延性を呈する.



図8 圧縮試験によるガラス繊維強化氷の破壊の様子 ( $C_w = 30 \text{ wt.}\%$ )

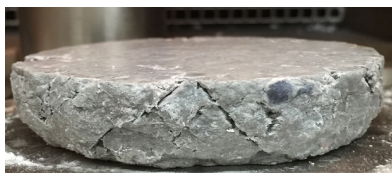


図9 圧縮試験によるガラス繊維強化氷の破壊の様子 ( $C_w = 30 \text{ wt.}\%$ )

以上から次の通り考察した.

- (1) 繊維強化氷の強化メカニズムは一般的な短繊維強化と同様に, 繊維によるアンカー効果によりマイクロクラックの開口・進展を防ぐことによる.
- (2) クラック開口拡大時の繊維の抜けは, 繊維が氷と

ともに弾性変形し界面でせん断が生じる debonding ステージと繊維が滑る sliding ステージを経て行われると考えられるが, 破断伸びが大きな繊維あるいは sliding ステージの抵抗が大きな繊維の選定により, 複合材が延性的な挙動を行うことができるようになることが推察される.

- (3) ヤング率が氷に比べ非常に高い繊維の利用は, debonding ステージの界面付近において氷マトリックス側の塑性変形を促す可能性があり, 氷が脆性材であることから, このことが強度を下げる可能性がある.
- (4) 界面で水素結合の効果がある繊維は, 単純に繊維引き抜き強度において有利だけでなく, 上記延性挙動についても有利である可能性がある.

### 3・2 枝管の成形の実証実験

管成形用の充填材(ロストコア)としての利用を想定すると, 管の成形に追隨して, 管材を内側から支持あるいは成形圧力を伝達することが必要になるため, 延性の発現が望ましく, 管成形の実証実験には紙パルプ繊維強化氷を用いた. 図10~図13に成形例を示す. 今回製作した型締め装置の剛性に問題があり, 締付力・バランスが不足し, 成形時に型が開いて動いてしまい, 中央のバリと形状の若干の非対称性が生じてしまった. そのため, 十分な製品が得られていないが, 図10のような速い成形速度, 高い繊維濃度, 低い成形温度においては, 繊維強化氷の十分な変形抵抗が得られて, 低融点合金を用いた場合と同様に成形できることが示唆されている. 一方で, 成形速度が遅く, あるいは低い繊維濃度, 高い成形温度(図11~13)では, 枝管部に座屈しわが生じ形状も型に沿わなくなる.



図10 枝管成形例(紙パルプ繊維  $C_w = 30 \text{ wt.}\%$ , 金型及び試験片の予冷温度 $-30^\circ\text{C}$ , スライド速度  $60\text{m}^{-1}$ (クランクモーション, ストローク長さ  $225\text{mm}$ )



図11 枝管成形例(紙パルプ繊維  $C_w = 8 \text{ wt.}\%$ , 金型及び試験片の予冷温度 $-30^\circ\text{C}$ , スライド速度  $60\text{m}^{-1}$ (クランクモーション, ストローク長さ  $225\text{mm}$ )



図1 2 枝管成形例（紙パルプ繊維  $C_w = 30 \text{ wt.}\%$ ，金型及び試験片の予冷温度 $-5^\circ\text{C}$ ，スライド速度  $60\text{m}^{-1}$ (クランクモーション，ストローク長さ  $225\text{mm}$ )

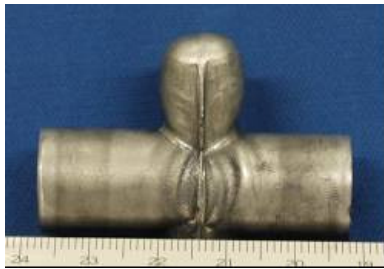


図1 3 枝管成形例（紙パルプ繊維  $C_w = 30\text{wt.}\%$ ，金型及び試験片の予冷温度 $-30^\circ\text{C}$ ，スライド速度  $6\text{m}^{-1}$ (クランクモーション，ストローク長さ  $225\text{mm}$ )

#### 4. 結び

管の塑性加工用充填物として従来用いられてきた鉛・低融点合金の代替品として，繊維強化氷(FRI)の利用を提案した。氷は，氷河の移動のような極端に遅いひずみ速度の場合を除き，通常，脆性的挙動を示すことが知られているが，繊維の選択により氷—繊維複合材について延性的挙動を発現させることができる。一方で高強度な繊維を選定することにより氷—繊維複合材の強度が単純に向上するも

のではないことが明らかになった。本研究ではそのメカニズムについて考察したが，実証的に明らかにするためには，今後，氷マトリックスからの単繊維の引き抜き実験を行い，温度依存性，速度依存性，ヤング率の影響について明らかにしていく必要がある。氷のヤング率自体が  $0\sim 100^\circ\text{C}$ の間で1ケタ以上変化することが知られており，厳密な温度管理に基づく実験が必要となる。枝管の成形については，適した成形条件を選べば鉛や低融点合金充填材の代用として機能する見通しを得た。

#### 謝 辞

本研究の実施にあたり天田財団平成 27 年度一般研究開発助成 AF-2015044 の助成を賜りましたことに改めまして厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) T. Ohashi et. al: J. Mater. Proc. Technol., 138(2003), 560-563.
- 2) 薄肉材のバルジ加工装置，バルジ加工法及び薄肉材バルジ加工用充填材，日本国特許第 4280393 号，出願日 2001/12/4.
- 3) ロストコア式側方押出成形法，日本国特許第 3837562 号，出願日 2005/6/2.
- 4) T. Ohashi et. al: Proc. Int. Conf. Mater. Proc. Technol., (2001), 187-190.
- 5) ASM International: Atlas of Strain Stress Curves 2nd Ed.,” ASM International, (2002), 799-800.
- 6) Takahiro OHASHI, Ryu Hayashi1 and Hidetoshi NANBA: Compression Test of Glass Fiber-Reinforced Ice, Key Engineering materials(採択済).