

# アルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の製造方法 の開発と実用化

福増 秀彰<sup>1\*</sup>・中浦 祐典<sup>2</sup>・波照間 勇樹<sup>1</sup>・中本 将之<sup>1</sup>

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 74, No. 4 (2024), 202-206  
© 2024 The Japan Institute of Light Metals

## Development and practical application of a method for manufacturing aluminum helical inner-grooved heat transfer tubes

Hideaki FUKUMASU<sup>1\*</sup>, Yusuke NAKAURA<sup>2</sup>, Yuki HATERUMA<sup>1</sup> and Masayuki NAKAMOTO<sup>1</sup>

**Keywords:** aluminum heat transfer tube; inner groove; helical groove; tube drawing; twisting

### 1. 緒言

地球温暖化、都市人口の増加、中間所得層の増加などを背景に、世界的にヒートポンプ型空調機の需要の増大が予想<sup>1)</sup>されており(図1)、空調機台数の増加に伴う世界的な電力需要の増大が予想される。一方、高効率空調機の導入による将来の電力需要の削減の可能性も予測<sup>1)</sup>されており(図2)、空調機の効率化は喫緊の課題といえる。これらの空調機用の熱交換器にはフィン&チューブタイプが広く用いられており、その多くは平板状のアルミニウム製フィンと、丸管型の銅製内面螺旋溝付伝熱管で構成されている。このような丸管型の銅製伝熱管の内面には熱交換性能を高めることを目的として螺旋溝が形成されており、さらに熱交換性能向上のための内面溝形状の改良や管の細径化等の開発が進められてきた<sup>2)-4)</sup>。

近年では、銅地金の価格高騰および資源枯渇リスクへの対応として、銅と比べて安価で価格変動が小さく、かつ資源枯渇リスクの低いアルミニウムへの材料置換(図3)が期待されている。しかしアルミニウムの熱伝導率は銅よりも劣るため、空調機の高効率化においてアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の伝熱性能向上は重要な課題である。

そこでMAアルミニウムでは、押し出し加工によって複雑かつ微細な断面形状を得ることができるアルミニウムの特徴を活かし、押し出し加工によって作製したアルミニウム製内面直線溝付管を素管に用い、引抜きと同時にねじりを付与することによって内面螺旋溝付伝熱管を得る新たな加工法として、「TT法<sup>®</sup>」を開発した。本記事ではTT法の開発内容を中心に解説する。

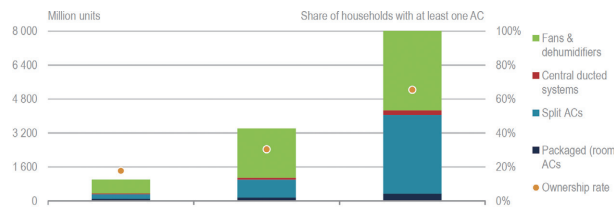


図1 家庭における冷房機器所有率(タイプ別)<sup>1)</sup>

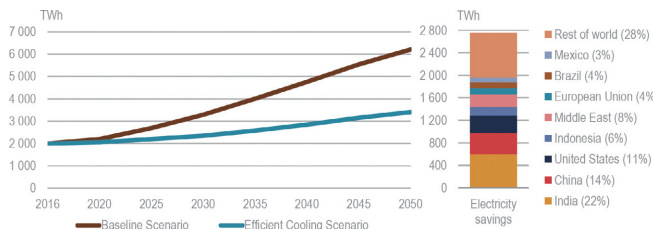
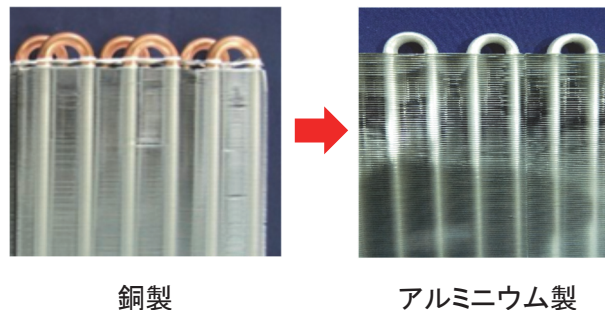


図2 ベースラインおよび高効率冷房シナリオにおける空間冷房のための世界の電力消費量と2050年における国・地域別の省エネルギー量<sup>1)</sup>



銅製 アルミニウム製

図3 内面螺旋溝付伝熱管の材料置換

<sup>1)</sup> MA アルミニウム株式会社 研究開発部 (〒410-1127 静岡県裾野市平松 85) Products Research and Development Department, MA Aluminum Corporation (85, Hiramatsu, Susono-shi, Shizuoka 410-1127)

<sup>2)</sup> MA EXTRUSION INDIA PVT. LTD. (Ahmedabad, India)

\* 責任著者 E-mail: fukumasu@malco.co.jp

受付日: 2024年1月15日 受理日: 2024年2月19日

## 2. 開発課題

アルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の製造方法として、従来の銅製伝熱管の製法である溝転造法<sup>2)</sup>を適用することがまず考えられる。しかし、溝転造法をアルミニウム製伝熱管の製造に適用した場合、管内面形状の自由度が低い、フィン先端欠損が生じやすい、管内にアルミ滓が生じやすい等の課題がある。内面螺旋溝形状の工夫によりアルミニウム製伝熱管の伝熱性能向上を図るためには、これらの課題を解決できる新たな製造方法の開発が必要であった。

ところで、アルミニウムは、本来高い成形性を有し、押出し加工によって複雑かつ微細な断面形状が得られることが特徴である。この特徴を活かせば、フィン先端欠損や内面アルミ滓のない、より最適な内面溝形状を得ることができる。しかしながら、押出し加工によって得られる内面溝付管では、内面溝は押出し方向に平行な直線状となる。内面溝を螺旋状とすることは伝熱管の伝熱性能向上に有効であるが、中空管に対して単純にねじり変位を付与すると容易にねじり座屈が生じ、所望のねじり変形を付与することはできない。そこで、ねじり座屈を抑制しつつ中空管に大きなねじり変形を与える方法について検討し、引抜きと同時にねじりを付与する新たな加工法である「TT法<sup>®</sup>」を開発した。

## 3. 開発内容

### 3.1 TT法の概要

図4の模式図を用いて、開発したTT法について説明する。図では素管は左側（上流側）から供給され、右側（下流側）

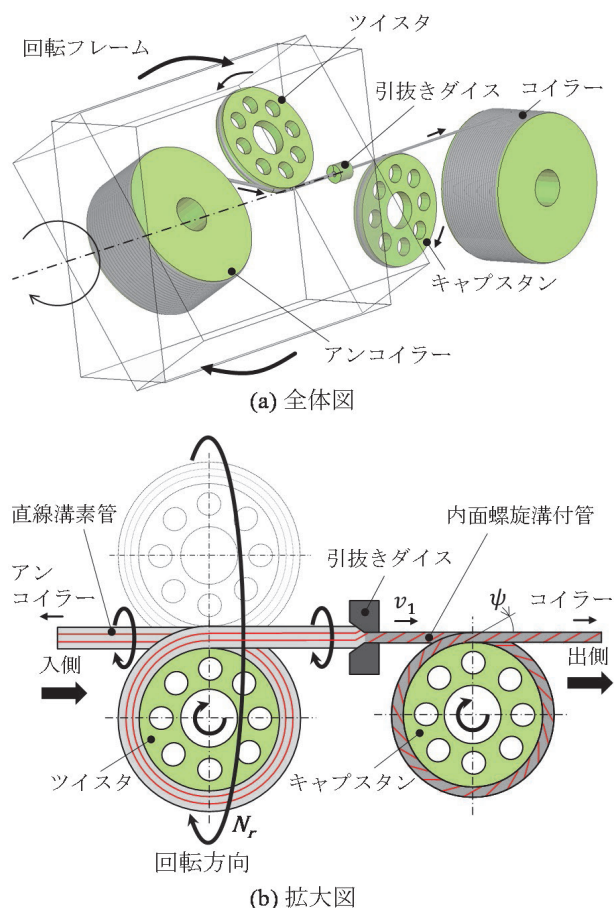


図4 TT法の模式図<sup>5)</sup>

へ向かって加工が進行する。図4(a)の全体図に示すように、装置は、引抜きダイスの上流側と、ダイスを含む下流側に大別される。枠線で囲まれた上流側の設備（素管供給のフィーダーまで）は、引抜きダイスの軸を中心軸としてフレームごとと公転する。以下、公転する上流側フレームから順に管の移動に沿って装置の詳細を説明する。

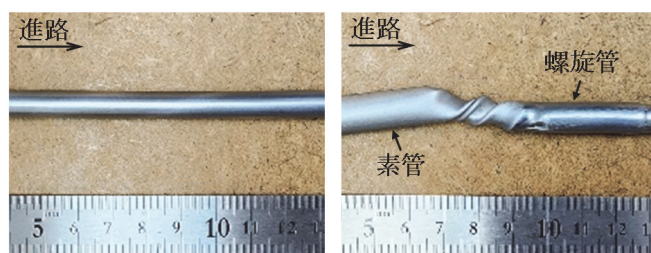
まず、直線溝素管は、上流側フレーム内のアンコイラーから巻き出され、直管となる。この素管はツイスタと呼ばれる孔形溝ロールの外周に一旦巻き付けられる。次いでツイスタから巻き出された素管は、引抜きダイスの軸（パスライン）に沿った直管となり、引抜きダイスに挿通される。アンコイラーとツイスタは同一のフレームに取り付けられており、両者はこのフレームとともにパスライン回りに公転する。これにより、ダイスとツイスタの間で直管にねじりトルクを加える。また、アンコイラーの巻出しトルクを調整することで、引抜きダイスの上流から後方張力を付与する。

引抜きダイス内に進入した素管には、ダイスによる縮径変形と後方トルクによるねじり変形が同時に与えられる。引抜きダイスを通過した管は、外周の接線がパスラインと一致するように配置されたキャプスタンに巻き付けられる。なお、引抜き力はこのキャプスタンロールによって付与されている。最終的に加工された管は、キャプスタンの下流のコイラーで巻き取られる。

以上のように、本加工法では、通常長尺管材の空引きプロセスの上流側設備をフレームごと管軸回りに回転させることでダイス進入前の素管にねじりトルクを付与する。このような構成によって、引抜きダイス内部において縮径変形とねじり変形を同時に付与し、長尺の内面螺旋溝付管を連続的に製造することができる。

本加工法では、下流側キャプスタンの回転による管の出側引抜き速度と上流側ツイスタの公転回転数の関係进行调整することで、成形される内面螺旋溝のねじり角 $\psi$ を所望の値に設定することができる。ただし、管の出側引抜き速度に対してツイスタの公転回転数を過度に高めた場合、管にねじり座屈（図5）が生じる。図6に、管のねじり座屈に及ぼす引抜きリダクション $R$ の影響を実験的に調査した一例を示す。引抜きリダクション $R$ の増加に伴い、管のねじり座屈に対する限界ねじり角 $\psi_L$ は増加し、より大きなリダクション $R$ を与えたほうが管のねじり座屈を抑制できる結果となっている。このことから、引抜きとの複合がねじり座屈抑制効果をもたらしていると考えられる。

なお、本加工法の名称である「TT法」は、「Tornado Twisting<sup>®</sup>」



(a) 良品 ( $\psi = 26^\circ$ )

(b) ねじり座屈品 ( $\psi = 27^\circ$ )

図5 TT法で作製した内面螺旋溝付管の一例（引抜きリダクション $R = 20\%$ <sup>5)</sup>）

法」の略であり、効率の良い螺旋溝の形成と、伝熱管内部を流れる冷媒の旋回による伝熱性能向上をイメージしたものである。

### 3.2 TT法のねじり座屈抑制メカニズム

引抜きリダクション $R$ の増加に伴い限界ねじり角 $\psi_L$ が増加する原因について、有限要素解析を用いて検討する。図7に、検討に用いた解析モデルを示す。解析にはLS-DYNAを用いた。素管は外径 $\phi 10$  mm、肉厚0.5 mmとし、内面溝を省略してシェル要素によりモデル化した。素管の塑性特性は、Misesの降伏条件(等方硬化)を仮定してA3003-H112相当の変形抵抗を与えた。成形条件は、引抜き速度とツイスタ公転回転数から決まるねじり角を $20^\circ$ で一定として、引抜きリダクションを10%、20%および30%の3条件で設定した。なお、ダイスと管の摩擦係数は $\mu = 0.08$ とした。

図8に管の断面に生じる長手方向軸力 $F_z$ とねじりトルク $T$ の軸方向の推移を示す。図の横軸の $z = 0$  mmがダイス出口(テーパ面とベアリングの境界)を示す。ダイス出側の軸力(引抜き力) $F_z$ は、リダクション $R$ の増加とともに増加する。一方、ねじりトルク $T$ は、リダクション $R$ の増加とともに減少する。リダクションの増加によりねじりトルクが減少する傾向は、前述の実験結果においてリダクションの増加によりねじり座屈が抑制される傾向と対応している。

図9に、管の軸方向各位置におけるMisesの相当応力 $\bar{\sigma}$ と同位置における流動応力 $\sigma_Y(\bar{\epsilon}^p)$ を示す。実線は材料に生じている応力成分から計算されるMisesの相当応力 $\bar{\sigma}$ を示し、破線は塑性変形によって加工硬化した状態の流動応力 $\sigma_Y(\bar{\epsilon}^p)$ を示す。つまり、実線と破線が一致している状態は、降伏条件を満たしていることを示し、塑性変形が進展している。

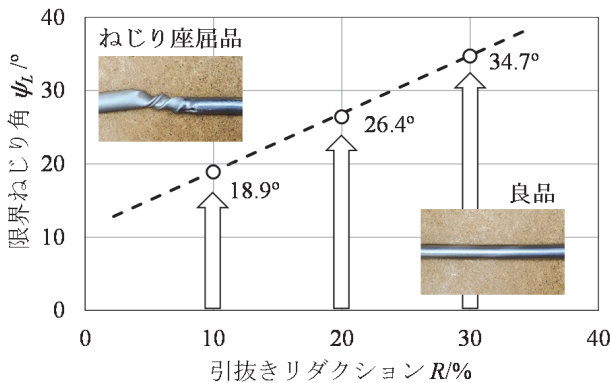


図6 TT法における管のねじり座屈に対する限界ねじり角に及ぼす引抜きリダクションの影響<sup>5)</sup>

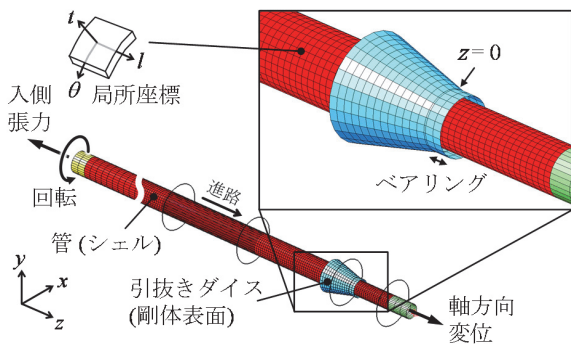


図7 TT法のFEMモデル<sup>5)</sup>

ダイス入側では、20%および30%リダクションで、破線より実線が低く、未降伏状態で引抜きダイスに進入している。しかし、10%リダクションでは、ダイス進入前にすでに降伏条件 $\bar{\sigma} = \sigma_Y$ をほぼ満たしている。ここで図6の実験結果におけるねじり角 $\psi = 20^\circ$ の条件に着目すると、20%および30%リダクションは成形可能領域であるが、10%リダクションはねじり座屈が生じる条件となっている。実験において低リダクションでねじり座屈が生じやすくなる傾向と、解析において低リダクション条件の上流側で管材の応力状態が降伏条件に近づく傾向が対応している。引抜きリダクションが低い場合にダイス入側の素管の応力状態が降伏条件に近づくことで、変形が不安定になり、実験結果で示されたねじり座屈が引き起こされるものと推測する。

引抜きリダクション増加に伴うねじりトルクの減少のメカニズムをさらに詳細に検討するために、各応力成分の推移を図10に示す。本解析ではシェル要素を用いているため、考察対象となる応力成分は、長手方向垂直応力 $\sigma_r$ 、管の円周方向垂直応力 $\sigma_\theta$ および管壁面内せん断応力 $\tau_{\theta l}$ の3成分である。応力成分は肉厚中央面の値で評価する。図では、ダイス内の各位置において、降伏条件 $\bar{\sigma} = \sigma_Y$ を満足するための各応力成分

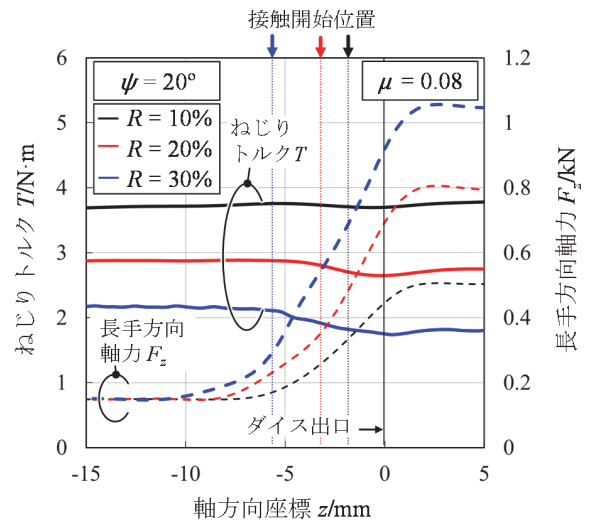


図8 管の断面に生じる長手方向軸力とねじりトルクの軸方向推移(ねじり角 $\psi = 20^\circ$ )<sup>5)</sup>

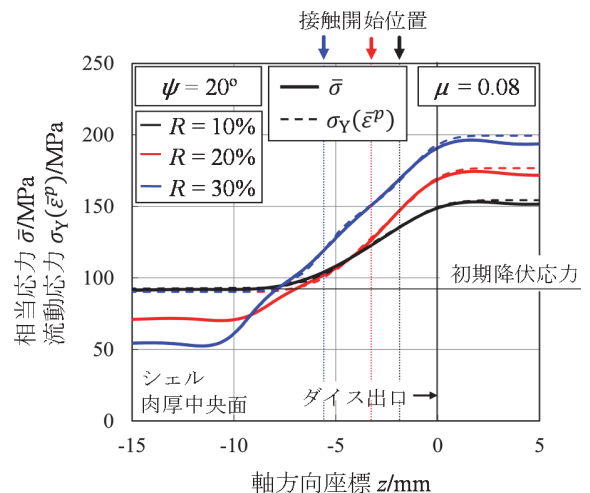


図9 管の軸方向各位置におけるMisesの相当応力と同位置における流動応力(ねじり角 $\psi = 20^\circ$ )<sup>5)</sup>

の寄与を考察しやすいように、応力成分を、その時点での流動応力  $\sigma_Y(\bar{\epsilon}^p)$  で除して正規化（無次元化）して示す。

本解析ではMisesの降伏条件を仮定しているため、塑性変形中の材料は以下の降伏条件を満たす必要がある。

$$\bar{\sigma} - \sigma_Y(\bar{\epsilon}^p) = \sqrt{\sigma_l^2 - \sigma_l\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{\theta l}^2} - \sigma_Y(\bar{\epsilon}^p) = 0 \quad (1)$$

ここで式 (2) は、管壁の曲げおよび厚さ方向の応力を無視し、平面応力状態を仮定したMisesの降伏条件式である。式 (1) を流動応力  $\sigma_Y(\bar{\epsilon}^p)$  で正規化した降伏条件式を以下に示す。

$$\sqrt{(\sigma_l\sigma_Y^{-1})^2 - \sigma_l\sigma_\theta\sigma_Y^{-2} + (\sigma_\theta\sigma_Y^{-1})^2 + 3(\tau_{\theta l}\sigma_Y^{-1})^2} = 1 \quad (2)$$

塑性変形中の管壁の応力状態は、常にこの式を満たす。

管材は出側の引抜き力により縮径・延伸されるため、ダイス内では、引張りの  $\sigma_l$  および圧縮の  $\sigma_\theta$  が生じる。これらは引抜きリダクションの増加にしたがって増加する。本加工法では管材をねじるためのせん断応力  $\tau_{\theta l}$  がこれらに重畳する。

引抜きリダクションを大きくすることで、軸方向応力成分  $\sigma_l\sigma_Y^{-1}$  および円周方向応力成分  $\sigma_\theta\sigma_Y^{-1}$  は、それぞれ正と負の方向に絶対値が大きくなる。これにより降伏条件式では平方根のなかの第1から第3項がすべて増加する。塑性変形中は式 (2) を満たすため、残る第4項の  $3(\tau_{\theta l}\sigma_Y^{-1})^2$  の値は、小さくならざるを得ない。よって、せん断応力  $\tau_{\theta l}$  の値は、同じねじり角を与えた加工条件であっても引抜きリダクションの増加にともない低下することになる。つまり、図8で示した引抜き

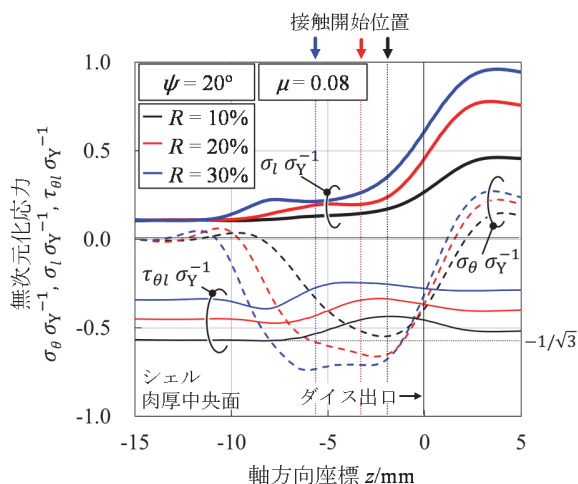


図10 管の軸方向各位置における各応力成分（ねじり角  $\psi = 20^\circ$ ）<sup>5)</sup>

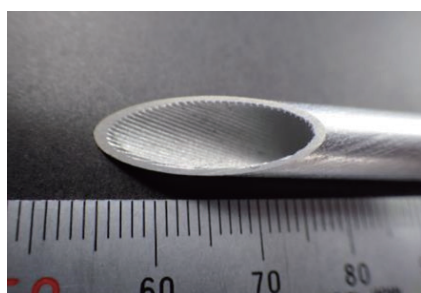


図11 TT法により作製したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の例

リダクションの増加によって生じるねじりトルク  $T$  の大きな減少は、単に加工中の管の平均直径が減少することのみに起因するのではなく、ダイス内の縮径・延伸にねじり変形が重畳することも影響している。以上の複合的な要因によって生じるねじりトルク  $T$  の減少の結果、高リダクション側でダイス入側のねじり座屈が抑制される。

#### 4. 開発の効果と発展性

TT法により作製したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の一例を図11に示す。TT法によって管のねじり座屈を抑制することで、管内面溝を螺旋化できている。本事例のねじり角はおよそ  $20^\circ$  であるが、TT法では最大  $40^\circ$  程度のねじり角を付与できる。

TT法と溝転造法でそれぞれ作製したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管を比較観察した事例を図12に示す。溝転造法で見られるフィン先端の欠損および管内面アルミ滓は、TT法の観察例では認められない。また、押出加工では、溝転造法では必須となるフィンの抜き角が不要のため、図12に例示するような高く細い長方形フィンの加工も可能である。

TT法で製造した、高く細い長方形フィンを有する伝熱管の伝熱性能を、従来形状と比較した例を図13に示す。本事例では、高く細い長方形フィンを有する伝熱管の伝熱性能は、従来形状よりも優れている。

本技術の開発によって、高性能なアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管の製造が可能となり、アルミニウム製伝熱管を使用したヒートポンプ型空調機の性能向上および消費電力低減

	従来法(溝転造)	TT法 <sup>®</sup>
溝形状自由度	 先端欠けあり	 自由度高
管内面清浄度	 アルミカスあり	 アルミカスなし

図12 TT法と溝転造法で作製したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管を比較した例

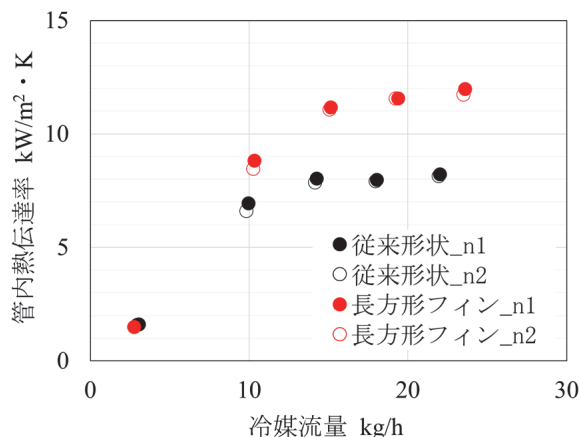


図13 TT法で製造した長方形フィンを有する伝熱管と従来形状伝熱管の伝熱性能を比較した例

に貢献できる。また、ヒートポンプ型空調機の需要の大幅な増加に対して、より安価かつ安定的に伝熱管を提供することが可能となり、ヒートポンプ型空調機のさらなる普及に貢献できる。

さらに、伝熱管の素材を銅からアルミニウムに置き換えることによって、アルミニウム製フィンとアルミニウム製伝熱管からなるモノマテリアル熱交換器を実現できる。モノマテリアル化によって使用済み熱交換器のリサイクルが従来よりも容易となり、熱交換器の製造におけるGHG排出の低減や資源利用におけるサステナビリティの向上が可能となる。

TT法により製造したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管は、国内の複数の空調機メーカーに採用され、量産中である。

## 5. ま と め

TT法で製造したアルミニウム製内面螺旋溝付伝熱管は、

Tornado Twistingというユニークな愛称と相まって、市場より高い注目・評価を得ている。今後は、用途展開の拡大を図るとともに、さらなる性能・品質および生産性の向上に取り組む、高性能・高効率な伝熱管の提供を通じて持続可能な社会の発展に貢献する。

## 参 考 文 献

- 1) International Energy Agency: The Future of cooling, (2018).
- 2) A. Isozaki, M. Ishikawa, and C. Saeki: Kobe Steel Eng. Rep., **50-3** (2000), 66-69.
- 3) Furukawa Electric: Furukawa Electric Review, **120** (2007), 93-94.
- 4) T. Haba, T. Tateyama, H. Iwamoto and N. Hinago: Kobe Steel Eng. Rep., **58-3** (2008), 70-73.
- 5) H. Fukumasu, M. Nakamoto, T. Suzuki, S. Nakanishi and H. Takizawa: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **64** (2023), 211-217.