吸収冷凍機蒸発器用伝熱管 (エバーフィン[®] CCS40L)の開発

Development of Heat Transfer Tube (EVER-FIN CCS40L) for Evaporator of Absorption Chiller

> **亀岡秀光^{*} 釣弘太郎^{*} 西澤武史^{*2}** Hideaki Kameoka Koutaro Tsuri Takeshi Nishizawa

概 要 吸収冷凍機の蒸発器用伝熱管には従来ローフィン管が多く使用されていたが, 伝熱面積の 増加率に対して伝熱性能向上率が低く, より高性能な伝熱管のニーズが高まっている。その背景のも とローフィン管のフィン高さを低くしかつ切欠きを入れた形状に改良することで, 蒸発器で特に重要 となる冷媒の伝熱面に対する濡れ性を向上させ, 同時に素管肉厚を薄くしコストダウンを図った伝熱 管(エバーフィン CCS40L)の開発を行った。

当社伝熱管評価装置で測定した結果,管外熱伝達率でローフィン管比1.5倍に性能が向上した。また CCS40L用に新規開発した管内リブを組み合わせたCCS40L-R24では熱通過率でローフィン管比 1.7倍に性能が向上した。

1. はじめに

アメニティの追求により空調機器の普及がめざましいが,一 方地球環境の保護から省エネルギー,フロン削減が叫ばれてい る。また夏期電力事情の逼迫を背景にコージェネレーションシ ステムの普及も伴って中型及び大型空調機器のほとんどがフロ ンを使わない吸収冷凍機で占められてきている。吸収冷凍機は 冷媒として水を,吸収剤として臭化リチウム水溶液を使い,熱 をエネルギー源としている事を特徴としており,夏期の空調用 エネルギーとしての電力消費を抑える一端を担っている。

吸収冷凍機には蒸発器,吸収器,再生器,凝縮器の4つの熱 交換器があり,そのほとんどが伝熱管を熱交換器に水平に装着 するシェル&チューブ型となっている。当社ではそれらの熱交 換器に使用される銅管の製造を行っており,平滑管やローフィ ン管等を吸収冷凍機メーカーで御使用いただいている。今回特 に注目した蒸発器には流下液膜式が採用されており,従来はほ とんどにローフィン管が使用されていた¹)。これは平滑管より も伝熱面積が増大することで伝熱性能向上を実現しているもの であるが,更なる高性能化とコストダウンの要求がユーザーで ある吸収冷凍機メーカーより出ており,より高性能で薄肉の伝 熱管が必要とされていた。当社では以前よりフロン用高性能伝 熱管の開発²⁾⁻³を行ってきたが,吸収冷凍機用伝熱管について は従来のローフィン管で対応を行ってきた。

このような背景のもと吸収冷凍機蒸発器に最適な伝熱管(エ バーフィン CCS40L:以降 CCS40L と記す)の開発を行った ので以下に報告する。写真1に外観を示す。

*2 金属事業本部大阪事業所生産技術部生産技術課



写真1 CCS40L 外観 Appearance of CCS40L

2. 管形状

ほとんどの吸収冷凍機蒸発器ではシェルに伝熱管を水平に装着し,流下液膜式であるので上方より冷媒である水を伝熱管に 散布して,伝熱管上に冷媒の液膜を形成させて蒸発させている。 水はフロンに比べて粘性も表面張力も高いので平滑管では伝熱 管外表面全体が濡れにくく,伝熱面積として有効に使われない 部分が生じる。ローフィン管では表面積は拡大されるが,それ 以上に濡れ拡がりがフィンによって阻害され,伝熱面積として 有効に使われない部分が平滑管よりも生じ易い。これが伝熱面 積増加率に対して伝熱性能向上率が低い理由であると考えられ ている。

そこで従来のローフィン管よりもフィン高さを低くし,フィン枚数を増やし,かつフィンに切欠きを入れ管軸方向へ冷媒が移動し易い形状を考案した。具体的に図1に示す。これにより冷媒が伝熱管に液膜を形成する面積が増大し伝熱性能も向上した。また同時に素管肉厚を従来ローフィン管よりも薄くすることでコストダウンにも繋がった。また管外側だけでなく管内側にリブを形成することで管内熱伝達率の向上を図った CCS40L-R10,CCS40L-R24の開発も行った。供試管の主要諸元を表1に示す。

^{*} メタル総合研究所大阪研究室

| 表 1 | 供試管形状 Dimention of test tubes | |
|-----|----------------------------------|--|
| | | |

| 供試管名 | 公称外径 | 素管肉厚 | フィン高さ | フィン枚数 | 内面リブ数 |
|------------|---------|--------|--------|--------------|-------|
| CCS40L | 15.88mm | 0.75mm | 0.35mm | 40枚 / 25.4mm | - |
| CCS40L-R10 | 15.88mm | 0.75mm | 0.35mm | 40枚 / 25.4mm | 10条 |
| CCS40L-R24 | 15.88mm | 0.75mm | 0.35mm | 40枚 / 25.4mm | 24条 |
| ローフィン管 | 15.88mm | 1.24mm | 1.42mm | 19枚 / 25.4mm | - |
| 平滑管 | 15.88mm | 0.75mm | - | - | - |



図 1 CCS40L外面形状模式図 Enlarged image of CCS40L

3. 実験方法

3.1 評価装置

図2に評価装置の概要を示す。蒸発器には1列5段35mmピッ チで有効長500mm,管端部 15.88mmの伝熱管を装着してお り、O-リングでシールを行っている。蒸発器下部には冷媒タン クとポンプがあり, 伝熱管上方のトレーに冷媒を供給する。蒸 発器と対向する位置に吸収器があり,蒸発器と同様に水平に装 着された伝熱管に滴下された臭化リチウム水溶液に蒸発器で蒸 発した水蒸気を吸収させる。吸収器下部には濃溶液タンクとポ ンプがあり,吸収器に臭化リチウム水溶液を供給する。吸収器 出口には希溶液タンクが接続されている。蒸発器吸収器の側面 には 200のガラス窓が取り付けてあり、伝熱管上の液の動き や濡れ性を観察できるようになっている。

3.2 実験方法

器内を真空に引いて非凝縮性ガスの排出を行ってから実験を 開始する。実験条件を表2に示す。伝熱管内には入口温度28 の被冷却水を流速2m/sで最下段から5パスとなるように流し ている。冷媒を蒸発器に供給しトレー側面に開いた穴より冷媒 である水を一定ピッチで伝熱管に滴下させ,蒸発しきれなかっ た冷媒は冷媒タンクに戻る。器内圧力は吸収器での臭化水溶液 の流量,管内冷却水の流量を変化させて設定値に安定させる。 臭化リチウム水溶液は予め所定の濃度に設定して濃溶液タンク から吸収器にポンプで供給され, 伝熱管上方に設置されたト レーより滴下される。伝熱管内には入口温度28 の冷却水を流 している。

伝熱管上で水蒸気を吸収して濃度が薄くなった臭化リチウム 水溶液は吸収器下部より排出され希溶液タンクに流れ込む。実 験後は希溶液タンクより濃溶液タンクへ臭化リチウム水溶液を 移動させ、ボイラーからの蒸気を濃溶液タンク中に通して濃度 調整を行う。

実験中は各部の温度が安定した後に、被冷却水入口出口、器 内の温度,器内圧力,冷媒流量,被冷却水流量を測定する。な お流量計は電磁流量計を用いている。



評価装置概要 図 2

Schematic view of experimental apparatus

| 表 2 | 実験条件 |
|-----|-------------------------|
| | Experimental conditions |

| 冷媒 | 入口温度 | 17±2 | |
|------|------|----------------------|--|
| | 流量 | 0.6 ~ 2.5L / min • m | |
| 被冷却水 | 入口温度 | 28 ± 0.3 | |
| | 管内流速 | 2.0m/s | |
| | 器内圧力 | 1.60±0.03kPa | |

4. 伝熱性能測定

前記評価装置にて表1に示す各種供試管の測定を行った。以 下にそれに付いて記述する。

4.1 交換熱量

図3に横軸に冷媒流量,縦軸に交換熱量をプロットしたグラ フを示す。図中の印は平滑管,印はローフィン管,印は CCS40L, 印はCCS40L-R10, 印はCCS40L-R24のデー タを表す。横軸の冷媒流量は実流量である。交換熱量は以下の 計算式より算出した。

 $Q = Cp \cdot Gw (Ti - To)$

Q: 交換熱量 (kW)

Cp: 被冷却水比熱 (kJ/kg・K)

Gw: 被冷却水質量流量 (kg/s)

- Ti: 被冷却水入口温度()
- To: 被冷却水出口温度()

平滑管, ローフィン管, CCS40L, CCS40L-R10, CCS40L-R24の順で交換熱量が大きくなっている。また管内平滑,10条, 24条と管内リッジの条数が増えることで,管内の乱流効果が大 きくなり,管内熱伝達率は向上し,交換熱量がさらに大きく なっている。



4.2 熱通過率

図4に横軸に冷媒流量,縦軸に熱通過率をプロットしたグラ フを示す。熱通過率は以下の計算式により算出される。

 $K = Q/(A \cdot T)$

K: 熱通過率 (kW/m²・K)

A: 伝熱面積 (m²) = do L

do: 伝熱管外径 (m) = 0.01905m (計算に使用する外径は 公称外径相当の平滑管外径を基準とする)

L: 伝熱管有効長 (m) = 0.50m

T: 対数平均温度差 = (Ti-To) /ln ((Ti-Ts) / (To-Ts))

Ts:器内飽和温度()

熱通過率は交換熱量とほぼ同じ傾向を示している。CCS40L-R24では熱通過率ローフィン管比1.7倍に性能向上している。

4.3 管外熱伝達率

図5に横軸に冷媒流量,縦軸に管外熱伝達率をプロットした グラフを示す。管外熱伝達率は以下の計算式により算出される。

 $_{o} = 1/(1/K-do/di/_{i})$

。: 管外熱伝達率 (kW/m²・K)

```
_{i} = 0.023 /di · Re<sup>0.8</sup>Pr<sup>0.4</sup>
```

(Dittus-Boelter 管内強制対流乱流整理式)

```
i: 管内熱伝達率 (kW/m<sup>2</sup>・K)
```

: 被冷却水熱伝導率 (kW/m・K)

- di: 伝熱管内径 (m)
- Re:レイノルズ数 (-) = di・v/
- v:被冷却水伝熱管内流速(m/s)
- : 被冷却水動粘性係数 (m²/s)
- Pr : プラントル数 (-)

平滑管は冷媒流量が少ないほど伝熱性能が向上する。これは 液膜厚さが減少することで,熱抵抗が減少し性能が向上すると いう膜状凝縮理論で説明できる。本実験の冷媒流量域を膜 Re 数(=4 / μ = 2Gw/ μ , μ : 粘性係数)にすれば 20 ~ 70 と



図4 供試管の熱通過率 Overall heat transfer coefficient of the tubes

層流域となり, 平滑管の管外熱伝達の傾向は藤田ら⁴⁾の報告と 一致する。

ローフィン管は冷媒流量が多くなるほど伝熱性能は向上する。 これは外面フィン部の一定領域が冷媒で濡れていないことが目 視で観察されており,流量が多くなるにつれて濡れ面積が多く なるので性能が上昇していると考えられる。これが外表面積増 加率に対して伝熱性能向上率が低い原因だと考えられる。

CCS40Lは平滑管に対して約2.2倍, ローフィン管に対して 約1.5倍に管外性能が向上した。また冷媒流量1.5L/min・mで 最高性能が得られているが,その値を境に少流量域では冷媒で 濡れていない部分が発生しており,そのために伝熱性能が減少 していると考えられる。高流量域では平滑管と同じ様な考え方 で説明できる。

図6にフィンによる拡大表面積を考慮した実表面積基準で計 算した管外熱伝達率をプロットしたグラフを示す。CCS40Lは 平滑管に比べ同等もしくはそれ以上の値を示している。それに 対して,ローフィン管の値は低く,特に少流領域でその差が大 きくなっている。これは上記に記したように外面フィン部の一 定領域が冷媒で濡れておらず,流量が多くなるにつれて濡れ面 積が多くなる為であることが原因と考えられる。

5. 圧力損失

図7にCCS40L-R10, CCS40L-R24の管内摩擦係数を示す。 縦軸に管摩擦係数,横軸にレイノルズ数をプロットしている。 管摩擦係数は以下の計算式により算出される。

f=2 P・di・g/(L・・v²) f:管内摩擦係数(-) P:圧力損失(kPa) g:重力加速度(m/s²) L:管長さ(m) :比重(kg/m³)



図7 供試管の管内摩擦係数 Inner friction coefficient of the tubes

レイノルズ数(Re)

管内平滑の場合はブラジウスの式に表される線上に乗るが, 管内平滑でない場合はこの線より上になる。CCS40L-R10より も CCS40L-R24 の方が管摩擦係数は高くなっている。当社の 過去のリブ形状と管内伝熱性能と圧力損失の関係について条数 やリブの高さ等のパラメーターを入れて重回帰分析を行い,数 式化を行った。これにより新たな伝熱管開発において設計段階 での管内伝熱性能と圧力損失の推定ができるようになっている。



図6 供試管の実表面積基準管外熱伝達率 Outer heat transfer coefficient of the tubes calculated using enlarged surface area

6.おわりに

吸収冷凍機蒸発器用伝熱管エバーフィン CCS40Lの開発を 行い,以下の結論を得た。

- (1) 外面フィンに切欠きを入れた形状のCCS40Lは管外熱伝 達率でローフィン管比 1.5 倍の性能に向上した。
- (2) CCS40L用に新規開発した10条,24条のリブを管内に 形成することで管内熱伝達率の向上を図り,熱通過率も向 上した。CCS40L-R24では熱通過率ローフィン管比1.7倍 に性能向上した。

参考文献

- 1) 高田秋一:吸収冷凍機とヒートポンプ,(社)日本冷凍協会, (1989),47
- 2) 吉末, 杉林, 吉川: 古河電工時報第65号 (1979), 37
- 3) 杉林:古河電工時報第73号(1981),199
- 4) 藤田,筒井:日本機械学会論文集,60-578,B(1994),346