

気液熱交換器の技術課題と研究動向

鹿園 直毅 (東京大学)

Naoki Shikazono, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

1. 緒言

空調機は1990年代からの継続的な省エネ化の努力により、現在では極めて高いエネルギー効率を達成している。熱交換器はその重要な構成要素の一つであるが、近年では最適化が進み、技術の進展が飽和してきた感がある。しかしながら、エネルギー資源価格の高騰や地球温暖化防止の観点から、空調機をはじめとするエネルギー変換機器は今後も高効率化が強く求められ、熱交換器も更なる着実な進化が必要である。本稿では、気液熱交換技術を俯瞰し、その課題や今後必要とされる研究の展望について私見を述べたい。

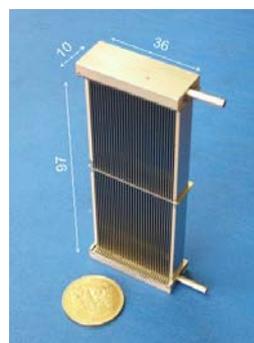


図2 扁平管フィンレス熱交換器

2. 気液熱交換器の技術トレンド

図1は、空調用および車両用の熱交換器について、内外伝熱面積比を管径に対してプロットしたものである。熱交換技術開発のキーワードは細径化、多管化、伝熱促進であり、このトレンドは今後も継続するものと考えられる。以下、それぞれの技術課題や動向について解説する。

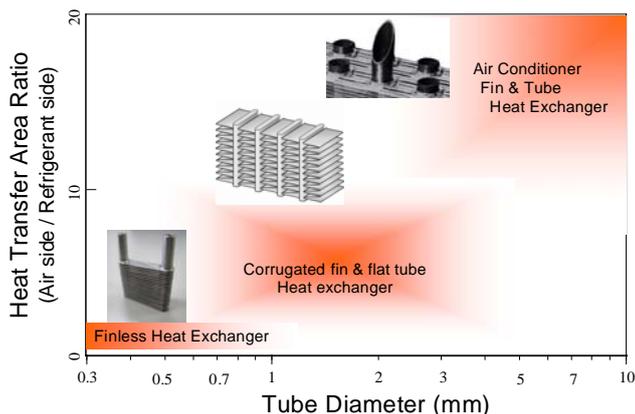


図1 気液分離器の分類

2.1 細径化

空調用に広く用いられるフィンチューブ熱交換器は、管径が5~10mmほどで、管内の冷媒側と管外空気側の内外伝熱面積比は15~20程度である。よりコンパクト性が要求される自動車用熱交換器は、内径1~2mm程度の扁平管とコルゲートフィンで構成されており、内外伝熱面積比は2~7程度である。このように、細径化とともに拡大伝熱面(フィン)への依存が弱まる。このコンセプトを追求すると、十分に細い管を用いれば、管表面だけで空気側伝熱面積を賄えるようになり、フィンは不要となることが推察される。その究極的な形態の一例としてフィンレス細径管群熱交換器が提案されている⁽¹⁾。最適化の結果、空調や電子機器冷却等の用途では、管を気相流れ方向に近接して並べるのが通風抵抗と熱交換性能のバランスが良いことが示されている。一方で、低コスト製法や管配列のばらつき等の改善にブレークスルーが求められており、扁平管の検討が行われている⁽²⁾。図2に厚みが0.5mmの扁平管を用いたフィンレス熱交換器を示す。

2.2 多管化

細径化を進めると必然的に管の本数が増えるため、均一な冷媒分配が困難となってくる。特に管内が二相流となる冷凍サイクル等では、分配において流量と乾き度の2つの独立なパラメータを同時に制御する必要があり、細径化の普及を阻む最大の障壁となっている。

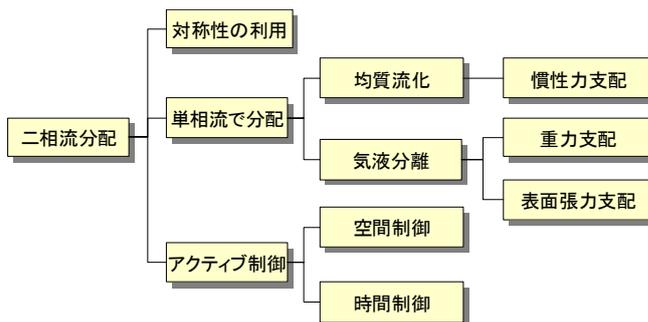


図3 分配技術のコンセプト

図3に冷媒分配を行う際のコンセプトを示す。これまで二相流分配には、二股パイプ等の対称性の利用、オリフィスによる均質流化、重力タンクによる気液分離といった手法が用いられてきた。しかしながら、流量や乾き度のバラつきへの感度や、容積・コストの観点から満足のいく分配方式が実現できているとは言い難い。一方、表面張力は代表寸法が小さいほど支配的となるため、表面張力を用いた気液分離/分配方式では大幅な小型化を達成できる可能性がある。以下、当研究室および共同研究先の日冷工業株式会社とで開発中の表面張力型気液分離器について解説する⁽³⁾。

図4に表面張力を用いた気液分離の原理を示す。祝流部に導入された気液二相流は、その下流の拡大部において気液界面の表面積が最小化されるため、最終的に下流の溝内には液相のみが保持され、気相は溝外を流れる流動様式となり、気液分離を実現できる。水-空気の系の実験において、様々な溝形状と気液の流量範囲での実験を行った結果、気液分離が実現される条件は2つの無次元数、即ち、気相ウェーバー数 We_g と修正液膜レイノルズ数 Re_p^* で整理できることを明らかにした。図5に実験で得られた気液分離限界線を示す。図中の実線で囲まれた白抜き記号の範囲が完全

気液分離が実現可能な流量範囲である⁽⁴⁾.

$$We_G = \frac{\rho_G j_{G,c}^2 b}{\sigma} \quad (1)$$

$$Re_f^* = \frac{Re_f}{130.0 \ln(Bo) + 56.3} \quad (2)$$

$$Re_f^* = \min [1, 29.3 We_G^{-1.486}] \quad (3)$$

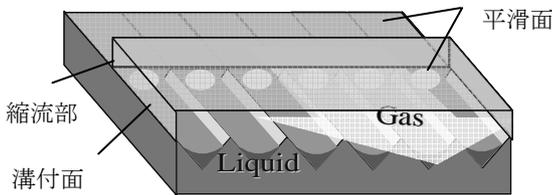


図4 表面張力を用いた気液分離の原理

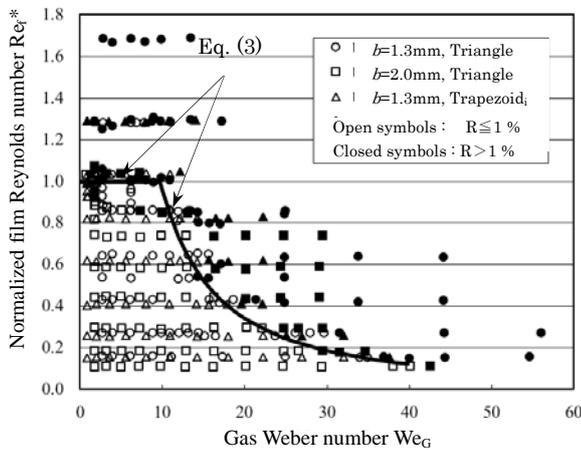


図5 円筒型気液分離器の無次元分離限界

2.3 单相流伝熱促進

実際の熱機器では、伝熱面の汚れや腐食等の課題から細径化が困難な場合も多い。そのような条件では、主たる熱抵抗である気相側の伝熱促進が今後とも重要な課題である。図6に单相流伝熱促進技術を示す。従来の伝熱促進技術の主なものとして、低レイノルズ数域での前縁効果を利用した空調用フィンの伝熱促進や、ガスタービン翼冷却に代表される高レイノルズ数域での乱流伝熱促進技術などが挙げられる。しかしながら、近年開発が進んでいるCO₂給湯器や、エンジン排熱回収用の熱交換器は、従来とは異なるレイノルズ数範囲での伝熱促進が要求されるものが多い。このような中間レイノルズ数範囲における伝熱促進に関する研究例は少なく、今後の研究の進展が望まれている。層流から低レイノルズ数乱流の同一水力直径の管内流れでは、平行平板の熱伝達が最も高く、しかも圧力損失とのバランスが良いことが知られている。従って、平行平板もしくはアスペクト比の大きな長方形断面形状流路を用いることが熱交換器設計の基本であり、その上で有効な伝熱促進手段を講じることが求められる。このような背景から、当研究室では図7に示すような斜交波状面の研究を行っている⁽⁵⁾。凹凸の振幅、波長、折り返し長さ等のパラメータサーベイを行った結果、図8のように平行平板に対して、熱伝達率

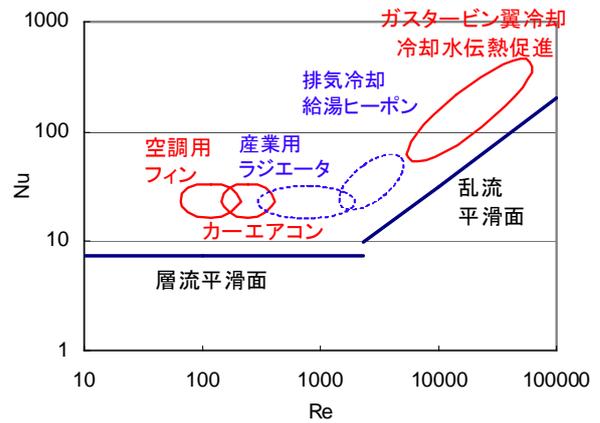


図6 单相流伝熱促進技術



図7 斜交波状面⁽⁵⁾

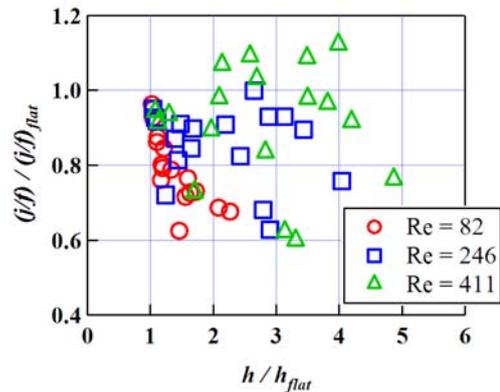


図8 斜交波状面による伝熱促進

と圧損の比 j/f を維持したまま、熱伝達率を3倍以上に増大させることが可能であるとの数値計算結果を得ている。

3. 結言

エネルギー効率を向上させる上で、熱交換器の高性能化は一見地味だが非常に重要な課題であり、今後その重要性は益々強まってくると予想される。細径化、多管化、伝熱促進のトレンドは今後も進展する余地があり、そのための技術開発を継続させることが重要である。

参考文献

- (1) 鹿園ら, 機論 B, 72-717, pp. 1295-1302 (2006).
- (2) Shikazono, N., et al., Proc. 6th Int. Conf. on Compact Heat Exchangers: Sci., Eng. & Tech., 2007, CHE2007-0017.
- (3) 岩田, 小森, 度会, 鹿園, 第40回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, pp. 53-56 (2006).
- (4) 東, 鹿園, 岩田, 機論 B, 74-742, pp. 1340-1346 (2008).
- (5) 福田, 鹿園, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, pp. 293-296 (2007).