

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

東京海洋大学での研究を振り返って

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2011-12-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 藤田, 稔彦 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/397">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/397</a>

[随想]

## 東京海洋大学での研究を振り返って

東京海洋大学 名誉教授 藤田 稔彦

### Looking Back over My Studies in TUMSAT

Toshihiko FUJITA

#### はじめに

2010年3月に東京海洋大学を定年退職し、4月から鳥羽商船高等専門学校に校長として勤務しています。1976年7月に東京商船大学に奉職して以来、機関学の補機関係の授業を担当し、主に冷凍空調分野の研究に従事してきました。拓海 Vol.13 (2010年3月)にも書きましたが、あっという間の34年間でした。この間の研究生生活を振り返れば、反省すべき点は多々ありますが、少しは熱工学や省エネルギー技術などの発展に寄与できたという満足感もあります。取り組んだ研究テーマは、主に空気線図、冷却塔、氷蓄熱、ガス空調に関係するものでした。

#### (1) 空気線図

地球上の大気から水蒸気と局所的な汚染物質を取り除くと、その成分組成は地球上どこでもほぼ一定です。空調では、この一定成分組成の空気を乾き空気、水蒸気を含んだ空気を湿り空気と呼びます。自然界に存在する空気はすべて湿り空気です。湿度すなわち空気中の水蒸気量の増減には、非常に大きな熱エネルギー（水の蒸発・凝縮の潜熱）の移動を伴います。空気線図は、湿り空気線図ともいい、ある圧力（一般には標準大気圧）における湿り空気の種々の熱物性値（温度、湿度、体積、エンタルピーなどの値）を1枚の線図として描いたもので、冷房、暖房などの空調プロセスの解析には必ずといってよいほど使用されるものです。

空気線図の作成には、研究的な要素はあまりありませんが、図中のすべての線に正確な数値が反映されていることはもちろん、使い勝手の良いデザインであることが要求されます。湿り空気の熱物性値の計算方法には、湿り空気を近似的に理想気体として取扱う方法と、実測値を基に実在気体として取扱う方法とがあります。前者は比較的簡単な式により手計算も可能で、一般の空調計算ではこの方法で十分な精度が得られます。一方、後者は広範な圧力・温度範囲でより正確な値が得られますが、計算式がかなり複雑で電子計算機が必要になります。

空気調和・衛生工学会誌に1983年12月号から「湿り空気線図とその応用」という連載講座（全6回）を手塚俊一先生と共同執筆しました。そのこともあって、1984年に日本冷凍協会（現、日本冷凍空調学会）から依頼されて、空気線図を作成しました。当時わが国では、上記の理想気体としての式で計算し、線を一本一本カラスロで製図して作った内田研究室（東大）の空気線図が一般に使われていました。この線図はデザインも良く、標準大気圧の通常温度範囲の線図以外に、低温域と高温域の線図も制作されていました。ただし、これらは数値が重力単位系で、学会ではSI（国際単位系）による空気線図を必要としていました。

新しい空気線図の作成にあたり、先ず上記の2つの方法による計算値の差から修正係数を求め、それを作図プログラムに組み込む方法をとりました。当時はカード読取装置で大型計算機にプログラムを入力し、ボールペン式のロール式XYプロッタで出力するという方法でしたので、数値はより正確になったものの、でき映えは決して満足できるものではありませんでした。

その後、空気調和・衛生工学便覧第11版（1987年12月）のために、SIによる通常温度範囲の空気線図を含め、4種類の線図をA3版の2色刷で作成しました。このときから、作図プログラムには実在気体としての計算式を直接組み込んでパソコンで計算し、セラミックペンの卓上型XYプロッタで制作することにしました。当時はパソコンが普及し始めたばかりで、計算に数分（最近のパソコンならほとんど0秒）、製図には30分以上かかりました。この方法で制作した線図は正確で、仕上がりも非常に綺麗でしたが、3年ほど前にこの種のXYプロッタは市場から消えてしまいました。

この便覧第11版のあと、少しデザインを変え、第12版（1995年3月）、第13版（2001年11月）、第14版（2009年11月）の空気線図も同じ方法で制作しました。日本機械学会の機械工学便覧（2005年11月）や日本冷凍空調学会の冷凍空調便覧第6版（2006年3月）の空気線図も同様で、これらは現在も使われています。

なお、実在気体としての湿り空気の熱物性値の計算プログラムには、当時ASHRAE（米国暖房冷凍空調学会）が採用した

Hyland-Wexler<sup>1),2)</sup>の式を使いました。ただし、この論文に記載された諸式を熱力学的に検証してみると、記載ミスが2箇所あり、それらを修正して使いました。

## (2) 冷却塔

熱機関や冷凍機は、外部からエネルギーを与えるだけでなく、その一部を外部に捨てないと動き続けることはできません(熱力学第2法則)。捨てているのは熱エネルギーで、周囲の空气中に直接捨てるのが空冷式、一たん冷却水に捨てるのが水冷式です。水冷式の場合、熱エネルギーを吸収して温度が上がった冷却水を再利用するためには、何らかの方法でその温度を下げる必要があります。船では熱交換器を通して海水で冷やすことができますが、陸上では一般に冷却塔(クーリングタワー)を使用します。冷却塔は塔内で水と空気を直接接触させ、その水の一部を空气中に蒸発させて潜熱を奪い、水の温度を下げる装置です。1%の水を蒸発させれば、残りの水の温度は約6℃下がります。

1981年11月に日本工業規格 JIS B8609「強制通風式クーリングタワー性能試験方法」が制定(2008年に改正)されましたが、その原案作成委員会に参加しました。当初の案は米国のCTI(冷却塔協会)やASME(米国機械学会)の試験方法を真似たものでした。この方法では大量の空気温度と湿度を制御できる環境試験室が必要になり、中小の冷却塔メーカーにとっては過大な負担でした。審議を重ねる間に、ある委員から「冷却塔の大きさや性能が違っても、カタログに表示されている特性曲線の形は、どのメーカーでもほとんど同じ・・・」という発言があり、その根拠を探るために、向流形・直交流形の強制通風冷却塔の理論に基づいて、広範な数値計算を行ってみました。その結果、周囲の気温と湿度が安定した状態で、冷却塔の入口水温と水量、送風機の風量をほぼ設計条件に保って出口水温を測定すれば、一つの特性曲線を用いて簡単に性能を評価できることが判りました<sup>3)</sup>。この特性曲線を用いる方法は合理的で、大がかりな試験装置も不要であり、このJISにそのまま採用されています。なお、余談ですが、査読者の怠慢でこの論文の掲載が大幅に遅れたのは不運でした。

一般に使用される冷却塔は、上記のように、冷却水として使う水を空気と直接接触させる方式で、開放式冷却塔と呼ばれています。一方、空气中の汚染物質の溶解による冷却水の水質悪化を避けるために、冷却水を空気と接触させない方式もあり、蒸発冷却器または密閉式冷却塔と呼ばれています。これは、塔内に設置した熱交換器の表面に上方から水を散布し、熱交換器の管内を通る冷却水を冷却すると同時に、散布水を空気と接触させて、散布水の蒸発冷却を行うものです。

話は前後しますが、東京商船大学に来てすぐの仕事がこの蒸発冷却器の熱伝達・物質伝達特性に関する研究<sup>4),5)</sup>でした。当時は、都市や工場地帯における空気汚染の問題から、幾つかの大学や企業で蒸発冷却器の研究開発が行われていましたが、その性能特性は未知の部分が多く、理論も確立されていませんでした。そこで先ず理論的に検討し、それぞれ熱交換器の管内流体-散布水間の熱移動と、散布水-空気間の熱・物質同時移動を表す2つの性能値を用いる性能解析方法を提案しました。この方法は方程式の解析解を用いることができますが、先達はそれを見落としていたようです。また、手塚研究室で収集していた多管式蒸発冷却器とプレート式蒸発冷却器の多数の実験データをこの方法で解析し、性能特性や運転特性を明らかにすることができました。この研究で空気調和・衛生工学会論文賞を受賞することができました。

## (3) 氷蓄熱

わが国の電力需要量、最大需要電力(ピーク電力)は、電力各社の発電設備容量の限界近くまで増加しています。ピーク電力の増加は夏季昼間の冷房需要によるところが大きく、その電力負荷平準化対策の一つとして氷蓄熱システムの普及が勧められてきました。これは比較的余裕のある安価な夜間電力を使って製氷し、蓄熱槽に貯えた氷を昼間の冷房に使用するものです。冷房負荷の大きい日は昼間も冷凍機を運転する方式をとれば、冷凍機の設備容量を半減できるというメリットもあります。

氷蓄熱の研究を始めた頃は、それまでの電力会社による強力な支援もあって、大手の建設会社、設備会社は既にそれぞれ独自の氷蓄熱システムを開発し、宣伝を競っている段階でした。その中で最もオーソドックスなシステムは、水槽の中に浸した多数の製氷管の周りに円筒状の氷を作るアイス・オン・コイルシステムでした。このシステムでは、製氷を均一にし、かつ解氷を促進するために、水槽の最下部から気泡を浮上させて水を攪拌しますが、そのために使う空気圧縮機の消費電力と空気が持ち込む熱負荷が無視できないことと、そもそも水槽水と氷の温度差が小さいために解氷速度が遅いことが欠点でした。

既存の氷蓄熱システムの多くは、このように製氷よりも解氷に難点があります。それを解消するために、製氷管を水槽の水面より上に設置し、そのさらに上方から槽内水あるいは還水(冷房に使用して温度の上昇した水)を散布して製氷・解氷を行う流下液膜式氷蓄熱システムを考案し、特許を取りました。このシステムをモデル化し、数値解析により製氷・解氷特性を調べると、アイス・オン・コイルシステムと比べて、解氷特性および空調負荷変動に対する追従性が格段に優れていることが判りました<sup>6)</sup>。なお、この流下液膜式氷蓄熱システムの性能は、後に実験でも検証しましたが、得られる冷水の温度

はほぼ 0℃で、そのまま冷房に使用するには低すぎる温度です。現在このシステムは食品製造や汚水の凍結濃縮などに応用されています。

アイス・オン・コイルのように静止した氷を作る氷蓄熱システムは、スタティック型と呼ばれますが、ほかに流動性のあるシャーベット状の微粒氷や薄板氷片を作るダイナミック型の氷蓄熱システムも実用化され、幾つかの大規模建物で運用されています。水槽内に浮かんだ微粒氷や氷片に上方からスプレーで還水を散布する方式は、解氷特性が良く、2℃程度の冷水が得られます。

以上は比較的大規模な中央方式の空調に用いられるユニット型あるいは現場築造型のものですが、個別分散方式のビルマルチ型、パッケージ型の氷蓄熱システムも製造・販売されています。

ある氷蓄熱個別分散型空調機（ビルマルチ型）について、メーカー公表の技術資料に基づいて、簡単な表計算によるシミュレーションを行い、製氷、ピークシフト冷房、ピークカット冷房、蓄熱無し冷房の各運転モード別にエネルギー消費量を算出してみました。その結果、ピークシフト冷房、ピークカット冷房などの蓄熱利用冷房運転による昼夜の全消費電力量は、蓄熱なし冷房運転の場合よりもはるかに多いこと、したがって地球温暖化の原因になる二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の総排出量も多いことが明確になりました<sup>7)</sup>。このシミュレーションで用いた建物の冷房負荷や外気温度条件は標準的なもので、対象とした空調機は当時最も高性能の機種でした。論文には敢えて記しませんが、補助金を貰ってこの空調機を購入し、専ら蓄熱なし冷房運転をするのが省エネルギーで、環境にも良いという結論でした。この種の空調機はエコ・アイスあるいはエコ・アイス mini と称され、省エネルギー性が高く、CO<sub>2</sub> 排出量削減にも貢献するシステムとして、当時大いに宣伝されており、この結果は学会発表の場でもかなり衝撃的でした。

## (4) ガス空調

ガス空調とは、都市ガスや LP ガス（液化石油ガス）を主エネルギー源として冷暖房を行う方式で、ガス吸収冷温水機（吸収式）とガスヒートポンプエアコン（GHP）という 2つのシステムがあります。いずれも日本独自の技術開発によるものです。また、これらは電力消費量が少ないため、夏季の電力負荷平準化にも貢献できるシステムです。都市ガスの原料は、天然ガスが約 90%で、LP ガスなどが混合されています。天然ガスは、メタンが主成分なので、他の化石燃料と比べて、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出量が少なく、大気汚染や酸性雨の原因となる窒素酸化物（NOx）の発生量も少なく、煤塵や硫黄酸化物（SOx）を発生しないことから、製造工場や火力発電所でも、天然ガスへの燃料転換が進められています。

吸収式は比較的大型で、中央方式の空調に使用されます。基本的には蒸発器、吸収器、再生器、凝縮器という 4種類の熱交換器で構成され、冷媒として水、吸収剤として臭化リチウム水溶液を使用し、燃焼ガス、蒸気、温水などの熱エネルギーで駆動されます。冷媒とは、冷凍機やヒートポンプの中を循環して熱を運ぶ物質で、作動媒体ともいいます。臭化リチウムは、食塩などと比べて非常に吸湿性の強い強電解質の塩です。ガス吸収冷温水機は、2つの再生器による二重効用で、高温の燃焼ガスで高温再生器を加熱し、そこで発生した冷媒蒸気で低温再生器を加熱します。最近、これをさらに高効率化した三重効用のガス吸収冷温水機も製品化されています。

一方、GHP はガスエンジン駆動圧縮式ヒートポンプ（Gas engine driven Heat Pump）の略称で、この方式の個別空調機を一般に GHP、ガスヒートポンプエアコン、ガスヒーポン、JIS B 8627 ではガスヒートポンプ冷暖房機と呼んでいます。GHP は、基本的には電気式のエアコンと同じく蒸発器、圧縮機、凝縮器、膨張弁という 4種類の機器で構成され、冷媒にはフロン（フルオロカーボン）を使用しています。電気式のエアコンはその心臓にあたる圧縮機を電動機で動かしていますが、その電動機を小型ガスエンジンに替え、暖房時にはエンジンの排熱も回収利用できるようにしたのが GHP です。GHP には同様の方式で冷温水をつくる機種（GHP チラー）もあります。

吸収式の研究は、日本冷凍協会創立 60 周年（1985 年）のプロジェクト事業に参加して始めました。分担は、高性能化を目的とした熱交換器内部の流動状態の調査でした。そこで、吸収器、蒸発器などの流下液膜式熱交換器とその流動状態に関連する文献を調査し、水平管ならびに垂直管上の流下液膜の流動特性、伝熱管形状の影響、マランゴニ対流の発生条件とその効果、液膜破断条件などについて、資料の整理と考察を行いました<sup>8)</sup>。この調査研究は、さらにその後の文献資料を追加して、IIR（国際冷凍協会）にレビュー<sup>9)</sup>として発表しました。なお、吸収式の実験研究も試みましたが、実験装置（内部は真空）の気密を保つのが難しく、残念ながら精度の高いデータは得られませんでした。

GHP の研究は、1995 年秋にヒートポンプ技術開発センター（現、ヒートポンプ・蓄熱センター）内にエンジンヒートポンプ研究会を立ち上げて以来、今も続けています。各年度の研究成果は報告書にまとめ、空調・給湯用 GHP チラーの性能特性と各種建物への導入効果（エネルギー消費量、二酸化炭素排出量などの評価）に関するシミュレーション解析の結果を国内外で論文発表<sup>10), 11)</sup>しました。

2000 年 7 月に日本工業規格 JIS B 8627-1「ガスヒートポンプ冷暖房機—第 1 部：一般要求事項」、JIS B 8627-2「同一第 2 部：直吹き形ガスヒートポンプ冷暖房機一定格性能及び運転性能試験」、JIS B 8627-3「同一第 3 部：ダクト接続形ガスヒー

トポンプ冷暖房機一定格性能及び運転性能試験」が制定され、第1部は期間消費エネルギー量算出基準を盛り込むなどして2006年11月に改正されましたが、これらの原案作成委員会の委員長を務めました。このときは電動式のJIS B8616「パッケージエアコンディショナ」や国際標準化機構のISO 5151、ISO 13253とできるだけ整合を取る必要があります、GHP特有の事項、とくに附属書(規定)「NOx濃度試験方法」の作成には苦勞しました。

その他、ガスエンジンとの絡みで、数値シミュレーションによりコージェネレーションシステム(CGS)の排熱利用、熱電変換モジュールのCGSへの適用、ガスエンジン駆動ターボ冷凍機<sup>12)</sup>などの研究も行いました。

## おわりに

以上、これまでに携わった研究を振り返り、その時々背景や感想を記しました。ほとんどは2010年3月5日の最終講義で話した内容です。どんな研究でも創造性が求められ、受託研究などは時間の制約もあって、多少は生みの苦しみを味わいましたが、概して楽しい研究生活でした。

他方、学会図書の編集にもかなりの時間と労力を割きました。本文だけで全3600頁を超える6分冊の空気調和・衛生工学便覧(第13版)<sup>13)</sup>は、委員長という立場もあって、図表のSI表記などにはとくに注意しつつ、2~3回全体に目を通しました。この便覧は、初版(1933年発行)以来、数年ごとに改訂され、空調・衛生技術者必携の書とされてきたものです。また、この第13版は、こういった大部の便覧としては、わが国で始めてCD-ROM化されたものです。英和・和英それぞれ約4500語を収録した冷凍空調・食品用語集<sup>14)</sup>は、ASHRAE HandbookのCD版などを使って、専門用語としての使用頻度や和製英語で無いことなどをチェックしました。また、A4版で約400頁の湿度制御設計ガイド<sup>15)</sup>は、原文と突き合わせて、翻訳の正確さや表現の適否をチェックしました。これらの作業も一部だけならどうということもありますが、全部となると、時にはその分量に圧倒されそうになります。大学の先生は暇だなあと自嘲しつつ、結構こういった仕事(勉強)も楽しみました。このことを付記して筆を置きたいと思います。

## 参考資料

- 1) Hyland, R. W. and A. Wexler: Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173.15 K to 473.15 K, and of saturated moist air from 173.15 K to 372.15 K, at pressures to 5 MPa, ASHRAE Transactions, 89-2A, pp.520-535 (1983).
- 2) Hyland, R. W. and A. Wexler: Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H<sub>2</sub>O from 173.15 K to 473.15 K, ASHRAE Transactions, 89-2A, pp.500-519 (1983).
- 3) 藤田稔彦, 手塚俊一: 強制通風冷却塔の熱的性能とその求め方, 日本機械学会論文集(B編)49巻443号, pp.1521-1529 (1983).
- 4) 藤田稔彦, 手塚俊一: 蒸発冷却器の熱伝達・物質伝達特性に関する研究(第1報, 理論解析と多管式蒸発冷却器の実験データ), 空気調和・衛生工学会論文集No.9, pp.9-18 (1979).
- 5) 藤田稔彦, 手塚俊一: 蒸発冷却器の熱伝達・物質伝達特性に関する研究(第2報, プレート式蒸発冷却器の実験データと運転特性), 空気調和・衛生工学会論文集No.10, pp.31-40 (1979).
- 6) 藤田稔彦, 千葉孝男, 高橋勉: 流下液膜式氷蓄熱システム—モデルと解析, 空気調和・衛生工学会論文集No.53, pp.47-55 (1993).
- 7) 藤田稔彦, 小嶋満夫, 功刀能文: 氷蓄熱個別分散型空調機の省エネルギー性に関する一考察, 日本機械学会第12回環境工学総合シンポジウム2002, pp.449-452 (2002).
- 8) 藤田稔彦: 吸収式冷凍機・ヒートポンプにおける流下液膜, 日本冷凍協会論文集Vol.5, No.1, pp.15-26 (1988).
- 9) Fujita, T.: Falling Liquid Films in Absorption Machines, International Journal of Refrigeration, Vol.16, No.4, pp.282-294 (1994).
- 10) 藤田稔彦, 三田暢博, 森山 忠, 星野典正, 木村能久: 空調・給湯用ガスエンジン駆動ヒートポンプチラー, 第1報: GHPチラーの性能特性の解析, 日本冷凍空調学会論文集Vol.18, No.2, pp.185-192 (2001).
- 11) 藤田稔彦, 三田暢博, 森山 忠, 星野典正, 木村能久: 空調・給湯用ガスエンジン駆動ヒートポンプチラー, 第2報: 空調・給湯用GHPチラー熱源システム評価シミュレーション, 日本冷凍空調学会論文集Vol.18, No.2, pp.193-202 (2001).
- 12) 藤田稔彦, 小嶋満夫, 竹内由実, 市川徹: ガスエンジン駆動ターボ冷凍機と排熱投入型ガス吸収冷温水機のハイブリッド熱源システムの性能, 空気調和・衛生工学会論文集No.143, pp.21-29 (2009).
- 13) 空気調和・衛生工学会編: 空気調和・衛生工学便覧(第13版), 空気調和・衛生工学会 (2001).
- 14) 日本冷凍空調学会編: 冷凍空調・食品用語集, 日本冷凍空調学会 (2003).
- 15) 藤田稔彦監修: 湿度制御設計ガイド, 日本冷凍空調学会 (2006).