

TED Plaza

冷媒伝熱データベースの構築



宮良 明男

佐賀大学 教授
 理工学部 機械工学部門
 miyara@me.saga-u.ac.jp

1. はじめに

気液相変化を伴う伝熱に関する科学的研究は、沸騰は1756年のLeidenfrostの論文(西川, 藤田, 1974), 凝縮は1861年のJouleの研究(藤井, 上原, 1973)に始まり, これまでに数多くの研究者によってさまざまな視点から, 実験的研究や理論的研究が行われてきた. そして近年の論文や国内外の学会での発表を見ると, 数値計算, 分子動力学, 計測法などの発達, また各研究者の独創的で洗練された研究により, マクロおよびミクロな視点の両面で, その現象が高いレベルまで解明されてきたように思う.

しかしそのような現象解明の進展の一方, 熱交換器の設計やシステムのシミュレーションなどに必要な熱伝達率や圧力損失の予測は未だ十分ではなく, 比較的簡単な伝熱面形状であっても, 提案された相関式が期待される予測精度内で実験値と一致しないことも多い. これは, 気液相変化現象の複雑さと, 冷媒の熱物性値などの熱伝達を支配する因子の多さに起因すると考えられる. また, 伝熱面形状や熱交換器の形態は様々であり, 全ての伝熱面, 熱交換器に対して予測精度の高い相関式を作成することは困難である.

冷凍機や空調機, ヒートポンプでは, 様々な熱交換器が使用されていることに加え, そこで使われている冷媒は図1に示すように, 機械式冷凍機が開発された当初の可燃性や毒性は有するがとりあえず使用可能な第1世代冷媒, 安全性を確立した第2世代, オゾン層破壊問題に適合した第3世代と変遷してきた. そして, パリ協定やモンテリオール議定書キガリ改正といった国際条約, 菅首相の2050年カーボンニュートラル宣言などを背景にオゾン層破壊問題と地球温暖化防止の両方に適合する第4世代冷媒の開発が緊急の課題となっている.

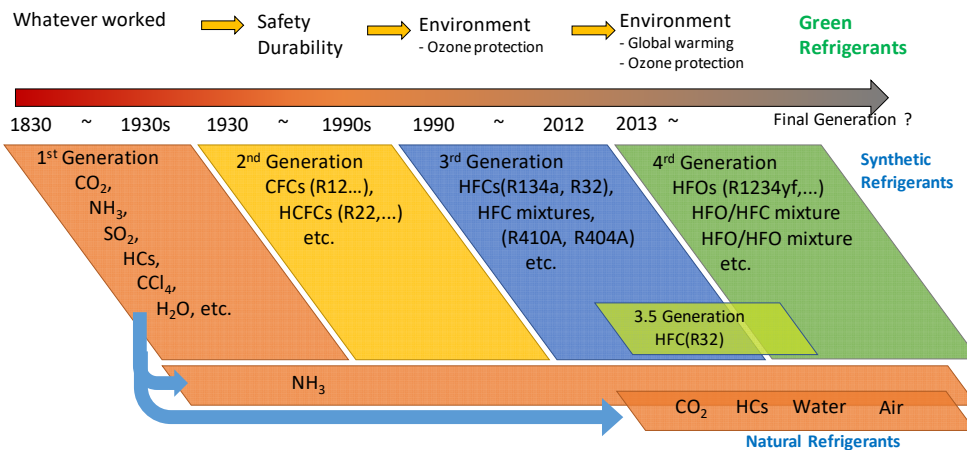


Fig. 1 A brief history of refrigerant from 1st generation to 4th generation

第4世代冷媒はグリーン冷媒とも呼ばれ、地球温暖化係数（GWP）の小さいフルオロカーボンの Hydrofluoroolefin (HFO) 系冷媒と自然冷媒と呼ばれるアンモニアや二酸化炭素、炭化水素、水、空気に大別される。なお、HFO 系冷媒の中の純媒体で使用できるものは5種類程度であり、その5つだけでは様々な用途で使用される冷凍空調機に対応できないため、Hydrofluorocarbon (HFC) 系冷媒や自然冷媒を混合して GWP 値や燃焼性、蒸気圧などの熱物性値を調整した混合冷媒が多く提案されている。表1に代表的な冷媒について熱伝達に影響する熱物性値を示す。上段は自然冷媒、中段は HFC 系冷媒、下段は HFO 系冷媒と HFO 系冷媒を含む混合冷媒である。冷媒ごとに熱物性値が異なるのは当然であるが、熱伝達に影響するそれぞれの物性値の違いが必ずしも相似的でないことや混合冷媒の相変化の際の温度変化（表中の Temp. glide）が、全ての冷媒に対して適用可能な熱伝達率の一般相関式の作成や相関式による高精度な予測を妨げている。

Table 1 Thermophysical properties of natural refrigerants, HFCs, and HFO/HFO blends calculated with REFPROP (Lemmon et al., 2018)

Refrigerant	Temp. °C	Pressure MPa	Latent heat kJ kg ⁻¹	Density		Temp. glide K	Viscosity		Thermal conductivity		Surface tension mN m ⁻¹
				Liquid kg m ⁻³	Vapor		Liquid μPa s	Vapor	Liquid mW m ⁻¹ K ⁻¹	Vapor	
R600a	10	0.221	344.6	568.9	5.87	0	177.5	7.1	94.8	15.3	11.7
R290	10	0.637	360.3	514.7	13.78	0	113.5	7.7	100.9	16.9	8.9
R744	10	4.502	197.2	861.1	135.16	0	83.5	15.8	97.2	25.2	2.7
R717	10	0.615	1225.2	624.8	4.87	0	148.0	9.4	502.3	25.1	24.0
R134a	10	0.415	190.7	1261.0	20.23	0	234.9	11.1	87.6	12.4	10.0
R22	10	0.681	196.7	1246.7	28.82	0	193.7	11.8	90.2	10.1	10.3
R32	10	1.107	298.9	1019.7	30.23	0	134.6	12.0	137.4	12.8	9.3
R410A	10	1.088	209.0	1128.4	41.18	0.11	142.8	12.7	97.5	13.4	7.4
R1234yf	10	0.438	156.6	1144.0	24.27	0	182.4	10.7	68.2	12.5	8.1
R1234ze(E)	10	0.308	177.6	1210.4	16.45	0	230.6	11.3	79.4	12.4	11.0
R452B	10	1.042	243.3	1054.9	33.13	1.15	136.9	12.1	113.0	13.0	8.3
R454B	10	1.032	247.6	1045.0	32.02	1.32	136.5	12.0	115.0	12.9	8.5
R454C	10	0.789	178.8	1100.7	31.20	7.57	155.0	11.7	81.8	12.9	7.8
R466A	10	1.161	184.1	1368.0	49.02	0.08	166.8	14.2	114.8	12.4	10.3
R447A	10	0.997	253.4	1079.4	29.87	4.19	146.5	12.1	120.4	12.8	9.6

冷凍機や空調機で使用される代表的な熱交換器は、フィンアンドチューブ熱交換器、シェルアンドチューブ熱交換器、マイクロチャンネル熱交換器、プレート式熱交換器などであり、冷媒は様々な形態の流路で沸騰または凝縮しながら熱交換を行う。また、それぞれの熱交換器において、伝熱促進のための表面加工などが施される。管内の伝熱促進で代表的なものは、内面に 0.1~0.2 mm の溝（マイクロフィン）が加工されたらせん溝付管である。管外面伝熱促進には2次元フィンや複雑な3次元形状を有する加工が施される。冷媒の沸騰や凝縮の伝熱促進に関する研究は過去から多くなされており、論文中には貴重なデータが示されているが、それを二次的に利用するためには図や表、文章中から数値を抽出する必要があり、多大な手間がかかる。

前述した地球温暖化影響の小さい新規冷媒の熱伝達については、種々の熱交換器、伝熱促進管、伝熱促進面を用いた実験が近年盛んに行われるようになり、時々刻々新たな実験結果が報告されている。これらの研究成果により、低 GWP 冷媒を使った冷凍空調機の開発が進むものと期待されるが、開発を推進するためには実験データを簡便かつ速やかに評価できるシステムが望まれる。ここでは、現在構築中の冷媒伝熱データベースの概要を説明するとともに、将来的な発展について説明する。

2. 冷凍空調機に用いられる熱交換器の冷媒伝熱促進

冷媒伝熱データベースに収集される伝熱データの一例として、管内沸騰および凝縮の伝熱促進に多く使用される溝付管（マイクロフィン管とも呼ばれる）について紹介する。これまでに開発された溝付管の主なものは図2に示す (a) らせん溝付管, (b) クロス溝付管, (c) ヘリンボーン溝付管であり、溝の深さや形状、数、リード角などの溝形状の影響、冷媒の質量速度や乾き度などの

冷媒側条件の影響が実験的に調べられている。冷媒伝熱データベースにはこれらのパラメータを全て含め、それぞれの評価ができる機能を持たせるように設計している。

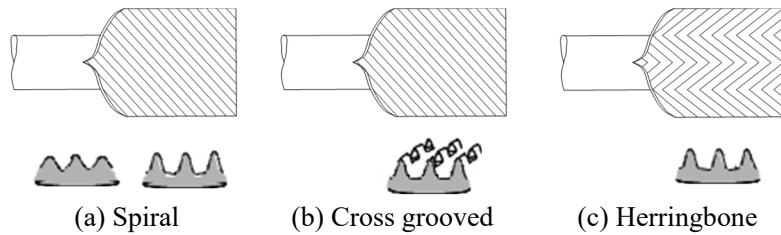
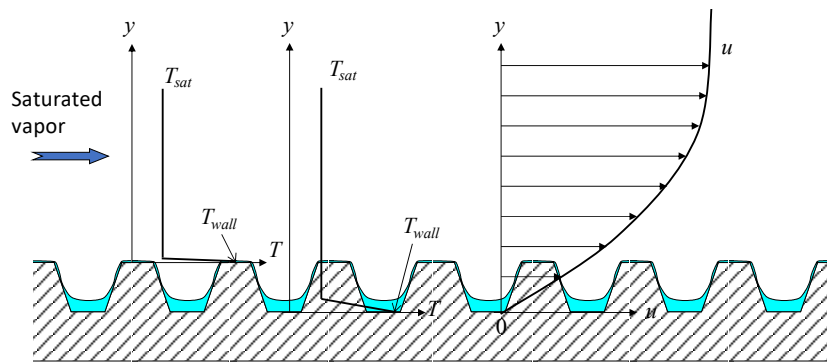
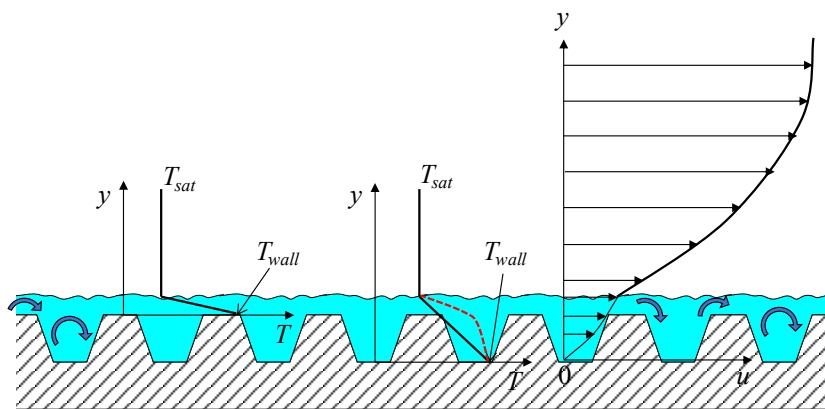


Fig. 2 Microfin tubes

溝付管の伝熱促進は、溝周りに形成される薄い液膜、伝熱面積の拡大、溝による流れのかく乱効果の3つが考えられる。図3(a)に示すように、乾き度が高く液膜が薄い流れの場合、溝の周りに極めて薄い液膜が形成される。気液界面温度は飽和温度と一致するので、温度境界層は液膜厚さと一致し、高い熱伝達が達成される。野津と本田(1998)や本田他(2000)は、凝縮液膜厚さと熱伝達に関する理論解析を行っている。蒸発液膜では、溝側部に形成されるメニスカス液膜の寄与が大きいと考えられている。一方、溝による摩擦圧力損失の増加率は、多くの場合に熱伝達の促進率より小さくなるが、これは速度境界層の厚さが溝深さより大きく、溝は粘性底層の中にあることが原因であると考えられる。図3(b)に示すような溝が液膜で覆われる条件では、薄液膜の効果は無くなり、面積拡大効果と攪拌効果により伝熱が促進される。溝部の液流れが停滞するような条件では液温度が壁面温度に近くなり、面積拡大効果が小さくなる。これらの効果は溝形状や管径、冷媒物性などに依存する。なお、壁面で核沸騰が発生する場合は別の伝熱機構を考える必要があるが、ここでは説明を省略する。



(a) Thin film region



(b) Thick film region

Fig. 3 Liquid film on a microfin tube and temperature and velocity distributions

3. 伝熱データの収集と基礎データの構造

伝熱データを収集する方法と収集した基礎データの構造を図 4 に示す。収集した伝熱データは書式を定められた Excel シートに収められる。シートの左側から、(1) 伝熱形態や伝熱管、冷媒名称と混合組成比などの情報、(2) 熱伝達率や温度、圧力、質量速度、乾き度、圧力損失勾配などの実験データ、(3) 実験条件から計算された熱物性値、(4) 実験データが公開された論文の文献情報や提供者の情報、の順に構成されている。伝熱データベース構築プロジェクトに関わるメンバーおよび協力者から提供された数値データは、この書式に整理される。

文献情報からのデータ収集は、(1) は論文中の文章や図表から読み取る。(2) の実験データはグラフにプロットされたデータの数値を読み取り、座標軸に使われている変数以外のデータは実験条件の説明文などから見つけて入力し、実験データ部分を完成させる。(3) は温度、圧力、冷媒組成などの条件から REFPROP を使って計算する。(4) には論文の DOI 情報などを入力し伝熱データと紐づけができるようにする。最新の実験データおよび過去の実験データについて、このような書式で整理した基礎データを作成して蓄積する。

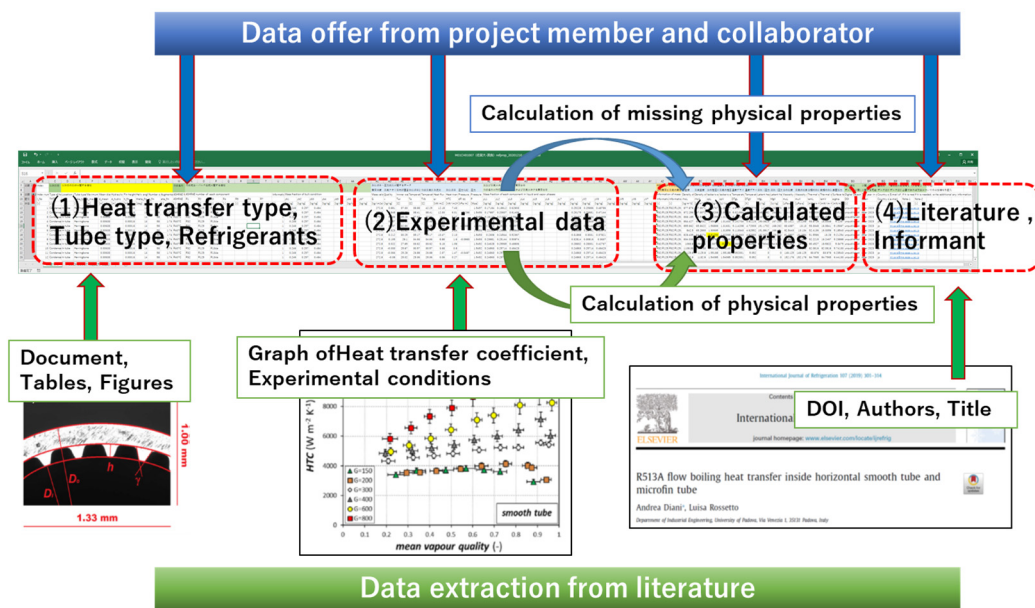


Fig. 4 Data collection scheme and basic data format

4. 伝熱データベースのネットワーク構成

伝熱データベースのネットワーク構成を図 5 に示す。蓄積した基礎データは、クラウド上のデータベース管理システムにアップロードし、データの使用や取得が簡単に行えるように構造化する。ユーザーは Website に作成した伝熱データベースシステムからアクセスして伝熱データを使用し、表示条件の設定や閲覧ができる。

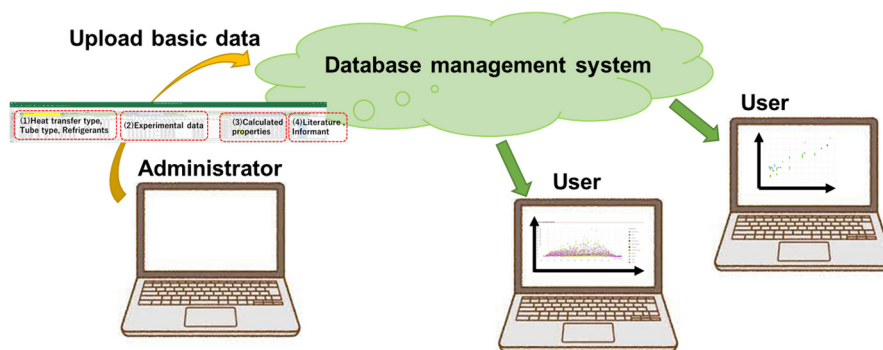


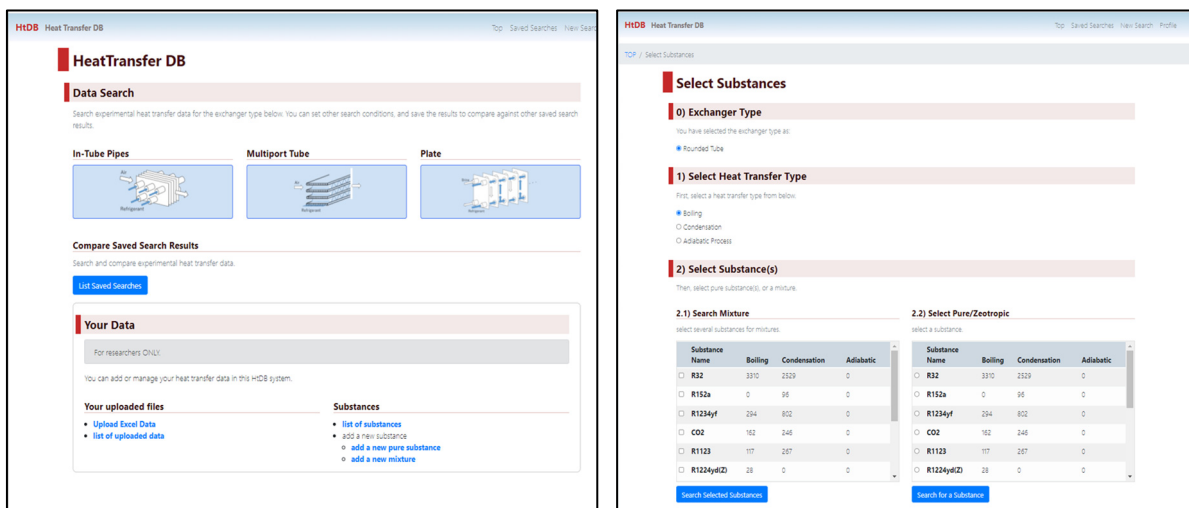
Fig. 5 Network configuration of heat transfer database

5. 伝熱データベースの機能

クラウドに構造化されて保存された伝熱データは、インターネット上に置かれたプログラムをブラウザで起動して利用する。図 6(a) はログイン後のトップ画面である。現在は、円管、扁平多孔管およびプレート式熱交換器内の沸騰および凝縮の伝熱データの収集を進めている。画面上の熱交換器の図をクリックすると、図 6(b) の画面が表示され、沸騰・凝縮・断熱などの伝熱形態や冷媒の種類を選択する画面が表示される。伝熱データベースには、現在使用されている冷媒に加え、新たに報告される新規冷媒のデータを順次追加していくとともに、オゾン層破壊や地球温暖化の問題で使用できなくなった過去の冷媒のデータも収集する。なお、冷媒には種々の純冷媒や混合冷媒が存在し、混合冷媒には組成比の異なる 2 成分もしくはそれ以上の冷媒を混合したものが数多くあり、研究者が任意に混合して実験を行ったものや ASHRAE の認証を受けた番号が付けられた特定の混合比の冷媒も存在する。伝熱データベースではこれらに対応した冷媒選択が可能である。

図 7(a)~(d) は伝熱データの表示例である。ここでは、複数の冷媒の沸騰伝熱データを例として示す。図 7(a) は伝熱データの質量速度と圧力条件の分布であり、このようなグラフを調査すれば、どのような条件の実験データが保存されているかが分かる。なお、右側のカラムには冷媒ごとのシンボルの凡例が示されており、シンボルにポインターを合わせるとそのシンボルがハイライトされ、冷媒ごとに実験条件の分布状況が把握できる。図 7(b) は熱伝達率の乾き度に対する分布を示したものである。このグラフには様々な冷媒の平滑管や溝付管内の沸騰伝熱のデータが一緒にプロットされているためそれぞれの分布特性の判別が困難であるが、冷媒や伝熱管種類、質量速度などの条件を絞ることにより、目的の条件だけの伝熱データを表示させることができる。また、選択した表示条件を保存しておくことができ、保存した複数の表示条件のデータを同時にグラフにプロットして比較することができる。図 7(c) は、らせん溝付管について、乾き度が 0.4~0.5 の範囲の熱伝達率を熱流束に対してプロットしたものである。複数の冷媒を同時に示しているが、良く知られた特性と一致し、全体として熱流束が大きくなると熱伝達率が高くなる傾向がある。一方、同じデータを用いて質量速度に対する熱伝達率の変化を調べると、図 7(d) に示すように、質量速度の影響が小さい冷媒と、質量速度が大きくなると熱伝達率が高くなる傾向を示す冷媒が存在することが分かる。

現在は、このシステムの改良を図りながら伝熱データを蓄積している段階であるが、データを増やすことでより詳細な評価ができるようになる。また、ある特定の冷媒に関する熱伝達の調査や新規冷媒と既存冷媒の熱伝達率の比較、熱伝達率に影響する様々な支配因子の影響調査、伝熱促進管の比較調査が瞬時に行えるようになる。



(a) Top page

(b) Selection of heat transfer type and refrigerants

Fig. 6 Website of the heat transfer database

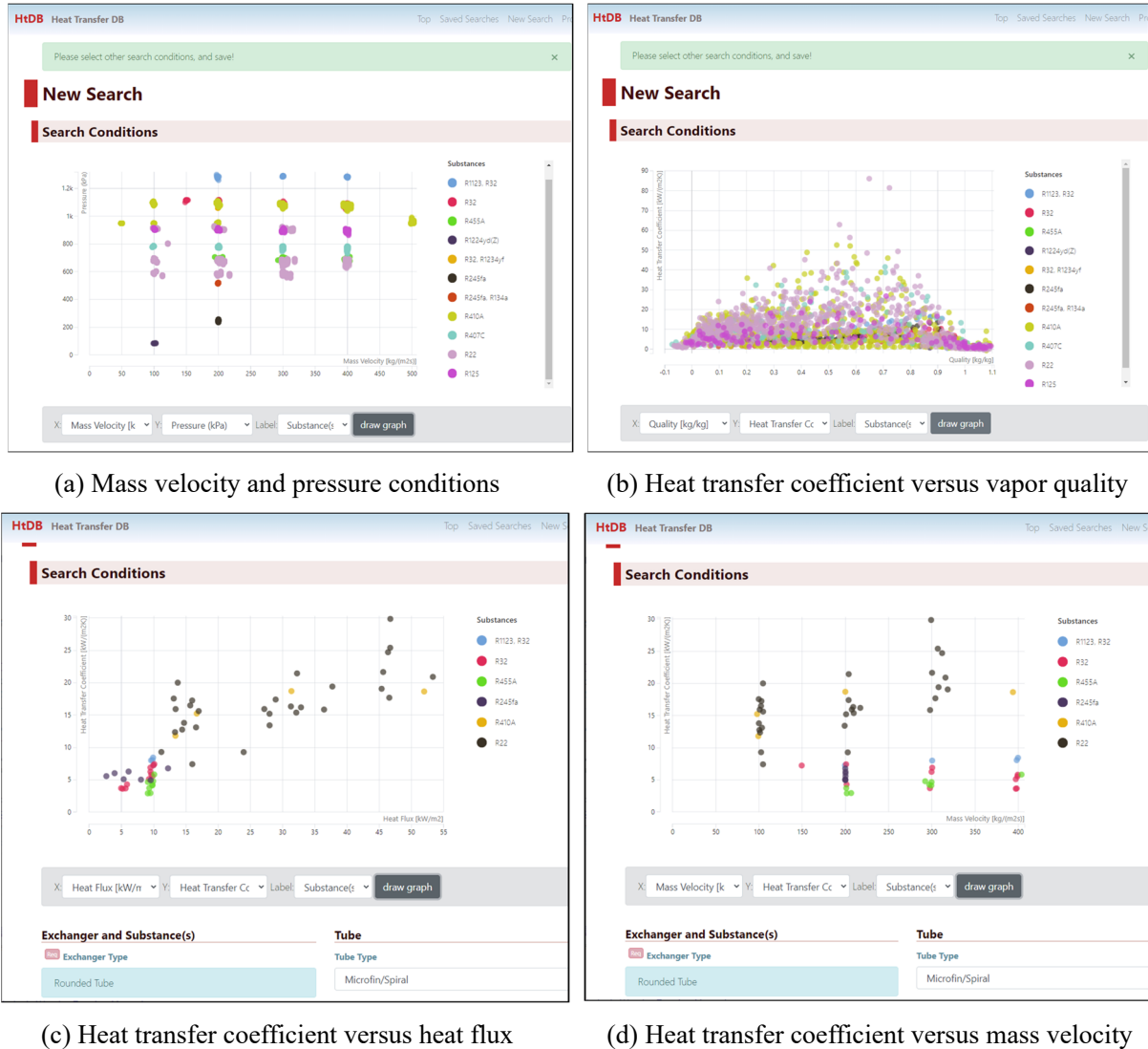


Fig. 7 Examples of data display form

6. 今後の展開

クラウド上に蓄えられた伝熱データを閲覧できるだけではその価値を十分に活かしていない。ユーザーが自身の実験データとの比較を行ったり、独自の解析や相関式の作成を行ったりできるように、必要なデータをダウンロードできる機能を追加する予定である。近年の研究により気液相変化を伴う伝熱現象の理解が進んでいる中で、この伝熱データベースが理論を検証するためのデータとして使用されることも期待している。

また、大規模データは深層学習の教師データになり得るので、榎木ら（2017）が進めているような人工知能を利用した熱伝達予測などでの使用も検討している。将来的には、クラウドに人工知能を構築するようなことも考えたい。

気液二相流の流動様相や沸騰現象などの写真や動画は気液相変化伝熱を理解するための重要な情報であり、これらのデータベース化についても計画を進めたい。図 8 に伝熱データベースの将来のネットワーク構成を示す。

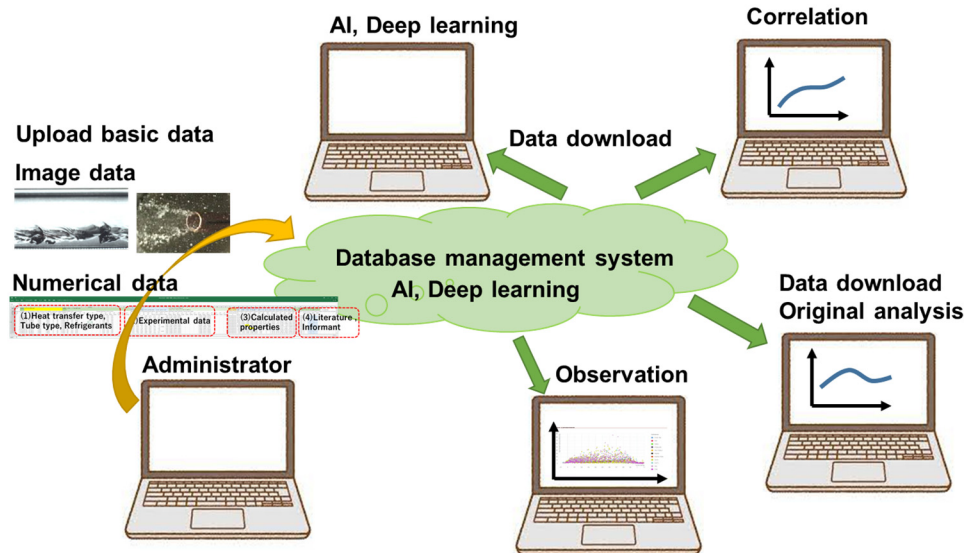


Fig. 8 Future development of heat transfer database and application network

7. おわりに

冷凍空調分野で開発を進めている伝熱データベースの概要を説明した。近い将来、一般に公開できる段階にまでシステムの開発が進んでおり、多くの方に利用していただける環境を整備する予定である。新しい伝熱データの収集やシステムの改良は継続的に進めており、伝熱研究に関わる研究者や技術者から伝熱データベースを充実させるための実験データの提供や改良についてのご意見、ご協力をいただき、さらに発展させていきたい。

謝 辞

本研究の実施にあたり、NEDO プロジェクト「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発 (P18005)」の支援を受けた。また、システムの開発にあたり、亀井亜佐夫氏 (ワークスポット・ジェーピー) にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

文献

- 榎木光治, 清雄一, 大川富雄, 齋藤潔, 人工知能の深層学習による円形微細流路内水平流の沸騰熱伝達の予測, 混相流, Vol.31, No.4, (2017), pp.412-421.
- 藤井哲, 上原春男, 伝熱工学の進展 Vol.1, 「膜状凝縮熱伝達」, 養賢堂, (1973), p.5, (Joule, J.P., On the Surface-Condensation of Steam, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol.151, (1861), pp.133-160.).
- 本田博司, 王華生, 野津滋, マイクロフィン付き水平管内凝縮の理論解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.66, No.650, (2000), pp.2697-2703.
- Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, (2018).
- 西川兼康, 藤田泰伸, 伝熱工学の進展 Vol.2, 「核沸騰」, 養賢堂, (1974), p.3, (Leidenfrost, J.G., De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus, Ovenius, Duisburg am Rhein (in Latin), (1756).).
- 野津滋, 本田博司, 冷媒のマイクロフィン付き水平管内凝縮 (環状流領域における熱伝達の数値解析), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.64, No.623, (1998), pp.2258-2265.