

はじめに

『熱の移動』は目には見えない。これが機械系の学生を悩ませる。学生にとっては材料の変形、ロボットの動き、流体の流れなどのように現象が目で直接見えるほうが理解しやすい。反対に、目には見えない『熱の移動』を学ぶ際には自分の頭の中で「熱が移動していく様子」をイメージしなければならず、この点が難しく感じる。このため、『熱の移動』を体系的に取り扱った「伝熱工学」は初めて学ぶ学生にとっては取っつきにくい科目となる。そこで、「熱の移動をイメージしやすく」「起きている現象をイメージしやすく」という点を本書の主題に置いた。

社会人になってから「伝熱工学を学ばねば」と迫られる場合がある。汎用パソコンでも簡単な伝熱計算ができるようになり、解析ソフトが容易に手に入るようになった。このため、解析ソフトを正しく利用するために解析手法を理解したり、パラメータを正しく設定したりする必要性が高まっている。さらに、それら解析ソフトの支援を受けて、電気・電子機器をコンパクトに設計するために効果的に発熱体を冷却する構造や機構を考える必要性が増している。この必要性から伝熱工学を独学される方が増えてきた。しかし、初学者にとって「伝熱工学は見えないから理解しにくい」と感じ、苦勞される方が多い。

これに対し、伝熱工学を一通り修めると『熱の移動』が見えるようになる。物を見ながら「熱はここを流れてあちらに流れていく」「ここが熱くなりそうだ」「断熱にはこの方法が有効そうだ」と頭の中で熱の通り道や物体の温度分布が推測できるようになってくる。すると、熱設計が頭の中で直感的に行えるようになる。読者自身が頭の中で「熱が移動していく様子」をイメージできるようになることが本書のゴールであり、これを目指した。

初学者が『熱の移動』をイメージできるようになるためには、以下の「三つのポイント」を身につけることが肝要である。

- ・現象の単純化：現象の支配要因を残して単純化する。
- ・数式の理解：数式の意味を理解し，数式を使いこなせるようにする。
- ・無次元数と式の選択：多くの無次元数と数式の中から，現象に適合した使える数式を選択する。

本書では，初学者が読み進めていくうちに上記の「三つのポイント」を身につけられるように工夫を凝らした。具体的には

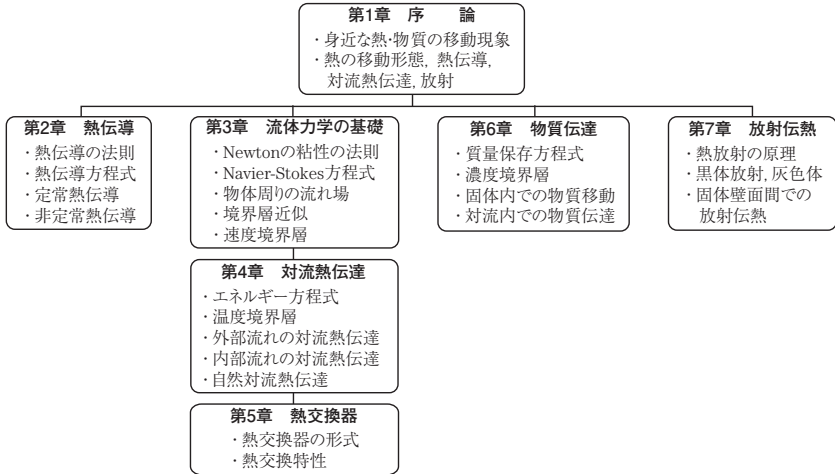
- ・図を多用し，熱が移動する様子を描いて目で見えるようにした。
- ・数式の各項の意味を示し，数式の物理的な意味を平易に解説した。
- ・身近な伝熱現象を例題として数多く載せた。

初学者はできるだけ多くの事例を見て，いろいろなパターンでの熱の移動のイメージを持つことが重要である。そして，具体的な事例を実際に計算して経験する必要がある。これによって必要な基礎知識が身につき，基礎を展開できる経験を積み，自分が直面する伝熱問題にも応用が効く。

伝熱工学という分野では著名な先生方が名著を数多く出版している。それらの教科書は格式高く厳密性が重んじられ，産業応用にまで広く展開されている。それらの名著は多くの研究者や技術者の方々に今なお読み継がれ，学術と技術の進展に大きく寄与している。それらの名著に対し，本書は「初学者が伝熱工学の基礎を学ぶ」ところに重点を置いた。機械工学系の大学3年生を対象者とし，初めて熱の移動，運動量の移動，物質の移動，熱交換器，放射伝熱を学ぶ場面を想定して書いた。それらの構成は図に示すように，熱伝導から始まり，流体力学の基礎，対流熱伝達，物質伝達へと展開する。この内容は半年間（15回分）の講義に相当し，最小限必要な事項にとどめた。本書を理解するうえで，流体力学の基礎知識が必要となるが，それは3章にまとめて記した。

一方，本書では伝熱促進，沸騰・凝縮などの相変化を伴う伝熱や，ガスの熱放射などは割愛した。それらはページの都合上，他書に譲ることとした。

本書では見やすさにも意識した。文章を読むというより，絵・図を見る，マンガ絵を見る，という感覚で本書の体裁を整えた。絵や図によって現象をイメージとしてつかみ，「熱の移動が見えるようにする」というのが本書のねら



いである。本書が「伝熱工学への苦手意識」を少しでも払拭^{しよく}し、日常の熱移動現象が「ああ、こんなふうに熱が移動しているのだな」と見えるようになれば、筆者として至高の喜びである。

数式にはSI単位系での単位を記した。本来、どのような単位系であろうとも成立する数式には単位を明記しないのが慣習である。一方で、数式に単位を書いたほうが初学者には理解しやすく、計算する際の混乱が少なくなる。本書では初学者の理解を優先し、数式に単位を明記した。

物性値表は本書で使用する最小限の数値のみにとどめた。必要なときにインターネットで検索するほうが便利であろう。ただし、信頼できる数値が必要な場合は、日本熱物性学会 (<http://www.netsubussej.jp/>) のデータベースや日本機械学会が編纂^{きん}した熱物性値集を利用されることを推奨する。

本書を出版するにあたりコロナ社の方々には本書の企画段階からご尽力いただき、「見える伝熱工学」を形にいただいた。御礼申し上げます。

最後に、著者を絶えず励まし続け、支えてくれた妻聖子に深く感謝する。この著書を長男清太郎、長女葵子に捧げる。

2011年8月

小川 邦康

目 次

1. 序 論

1.1 熱の移動現象：熱移動の形態	1
1.2 身近な伝熱現象	2
1.3 産業で利用されている伝熱工学	4
1.4 伝熱工学で学ぶこと	5
1.5 現象を伝熱工学の視点から見る	6
1.6 熱力学と伝熱工学の相違	8
1.7 伝熱過程の微視的説明	9
1.8 伝熱過程での速度方程式	11
1.8.1 熱伝導による熱移動 (Fourier の法則)	
1.8.2 対流熱伝達による熱移動 (Newton の冷却の法則)	
1.8.3 粘性による運動量移動 (Newton の粘性の法則)	
1.8.4 物質拡散による物質移動 (Fick の拡散法則)	
1.8.5 熱放射による熱移動	

2. 熱伝導 —— 非流れ系での熱移動 ——

2.1 熱伝導の法則 (Fourier の法則)	18
2.2 身近な物質の熱伝導率	20
2.3 熱伝導方程式 (エネルギー方程式)	22
2.4 初期条件と境界条件	28
2.5 無次元化された熱伝導方程式と無次元数	31
2.6 熱伝導の定常問題と非定常問題	33
2.7 熱伝導問題を解くにあたって	34
2.7.1 熱伝導問題へのアプローチ法	
2.7.2 熱伝導方程式を解くための方法論	
2.8 定常一次元熱伝導	36
2.8.1 単層平板内の一次元熱伝導	
2.8.2 多層平板内の一次元熱伝導	
2.8.3 単層円管内の半径方向熱伝導	
2.8.4 多層円管内の半径方向熱伝導	
2.8.5 平板表面での境界条件が対流熱伝達と与えられる場合の一次元熱伝導	
2.8.6 円管外側面での境界条件が対流熱伝達と与えられる場合の一次元熱伝導	
2.9 拡大伝熱面 (フィン)	52
2.10 単層矩形柱内の定常二次元熱伝導	56
2.11 非定常熱伝導	59
2.11.1 単層平板内の非定常一次元熱伝導	
2.11.2 さまざまな非定常熱伝導	
2.11.3 Biot 数	
2.11.4 集中熱容量法	
参 考 文 献	68

3. 流れ場中での運動量移動と流速分布

3.1 伝熱工学での流体力学の位置づけ	69
3.2 運動量移動の微視的概念	71

3.3	流れ場の方程式：Navier-Stokes 方程式	75
3.4	完全に発達した層流の速度分布	77
3.4.1	平板間を流れる定常でかつ完全に発達した層流の速度分布	
3.4.2	円管内を流れる定常でかつ完全に発達した層流の速度分布	
3.5	物体まわりの流れ場	81
3.6	動き始めた平板上の流れ場 (Rayleigh の問題)	83
3.6.1	Rayleigh の問題での方程式	
3.6.2	Rayleigh の問題の解法	
3.7	境界層近似と速度分布	88
3.7.1	平板上の流れ：薄い境界層	
3.7.2	速度境界層方程式を導くための考え方	
3.7.3	速度境界層方程式の導出 (Prandtl の速度境界層方程式)	
3.7.4	速度境界層方程式を解く (Blasius の解)	
3.8	乱流の場合の速度境界層内速度分布と摩擦係数	100
	参 考 文 献	100

4. 対流熱伝達 —— 流れ系での熱移動 ——

4.1	対流熱伝達の基本事項	101
4.1.1	対流熱伝達の表し方	
4.1.2	高温の平板上を流れる流体中に形成される温度境界層	
4.1.3	対流熱伝達率の定義式	
4.1.4	対流熱伝達率の値	
4.2	エネルギー方程式 (流れ系)	108
4.3	平板に沿う流れ場の境界層近似と対流熱伝達率	114
4.3.1	エネルギー方程式の境界層近似	
4.3.2	平板上で発達する温度分布の近似解	
4.3.3	平板の層流局所対流熱伝達率 (Pohlhausen の式)	
4.3.4	平板の層流平均対流熱伝達率	
4.3.5	熱流束が一定の場合の平板の層流平均対流熱伝達率	
4.3.6	物性値を決める膜温度	
4.4	無次元数 Pr , Nu , Pe , St の物理的意味	125
4.4.1	無次元数 Pr の物理的意味	
4.4.2	局所 Nusselt 数 Nu_x の物理的意味	
4.4.3	無次元数 Pe の物理的意味	
4.4.4	流れと熱移動の相似性	
4.5	平板に沿う流れでの乱流対流熱伝達	131
4.5.1	等温平板に沿う流れでの乱流対流熱伝達率	
4.5.2	等熱流束平板に沿う流れでの乱流対流熱伝達	
4.6	流れの中に置かれた物体の対流熱伝達	134
4.6.1	円柱に直交する流れの円柱まわりの対流熱伝達	
4.6.2	球まわりの対流熱伝達	
4.7	円管内流れの対流熱伝達 (内部流)	140
4.7.1	流体温度についての基礎的な考察 (混合平均温度)	
4.7.2	無次元温度 θ の関数形	
4.7.3	エネルギー方程式と温度分布の解	
4.7.4	エネルギー収支で熱移動を考えた際の混合平均温度	
4.7.5	発達した乱流での対流熱伝達率	
4.8	自然対流熱伝達	156
4.8.1	自然対流での境界層方程式と Grashof 数	
4.8.2	自然対流熱伝達	
	参 考 文 献	160

5. 熱 交 換 器

5.1	熱交換器の概要	161
-----	---------	-----

5.2	熱交換器の形式	163
5.3	隔板式熱交換器内での熱交換特性	164
5.3.1	流体の温度分布と対数平均温度差	5.3.2 熱通過有効度 ϵ , 熱通過数 Ntu
	参 考 文 献	174
6. 物 質 伝 達		
6.1	身近な物質移動現象	175
6.1.1	身近な物質移動現象	6.1.2 固体中または流れ場中での物質移動
6.1.3	本章で取り扱う物質移動現象	固体中と気体中の物質移動現象
6.2	濃度, 速度, 質量流束の定義式	180
6.2.1	濃度の定義式	6.2.2 速度の定義式
6.2.3	質量流束の定義式	
6.3	質量保存方程式	184
6.3.1	質量保存方程式の導出	6.3.2 無次元化された質量保存方程式
6.4	固体内での物質移動	188
6.4.1	固体内での質量保存方程式	6.4.2 固体内での非定常次元拡散
6.5	流れ場中で生ずる物質伝達と濃度境界層	191
6.5.1	物質伝達率の定義式	
6.5.2	一様流中に置かれた平板上での濃度境界層の進展と物質伝達率	
6.5.3	一様流中に置かれた平板上での濃度境界層の厚さ	
6.5.4	物質伝達と対流熱伝達の相似性	6.5.5 乱流時の平板上の物質伝達率
6.6	界面での質量密度	198
6.6.1	境界での質量密度が既知である場合	
6.6.2	境界で成分 A が蒸発している場合	飽和密度の適用
6.6.3	境界で成分 A が溶解する場合	
	参 考 文 献	204
7. 放 射 伝 熱		
7.1	身近な熱放射	205
7.2	熱放射の原理と電磁波	206
7.2.1	熱放射の原理	7.2.2 電磁波の種類
7.2.3	放射強度, 全射出能, 単色射出能	
7.3	黒体放射	211
7.3.1	黒体の性質	7.3.2 Planck の式: 黒体から射出される単色射出能
7.3.3	Stefan-Boltzmann の式: 黒体の全射出能	
7.4	射出率, 単色射出率	214
7.5	吸収, 反射, 透過	215
7.6	Kirchhoff の法則	216
7.7	灰色体	217
7.8	太陽放射	219
7.9	固体壁面間での放射伝熱	222
7.9.1	二つの黒体表面間での放射伝熱	7.9.2 灰色体表面間での放射伝熱
7.10	形態係数	226
	参 考 文 献	229
索 引		230

1 序 論

身近な熱移動現象を例に挙げて、三つの熱移動の形態を紹介する。そして、伝熱工学の基礎となる熱移動、運動量移動、物質移動の速度方程式を駆動力によって表記する。また、伝熱工学で学ぶこと、ミクロな視点での移動現象について述べる。

1.1 熱の移動現象：熱移動の形態

暑い夏にうちわで扇ぐと涼しくなる。太陽の日差しを浴びれば暑い。熱い鉄板の上に肉を置けば焼けていく。**図 1.1** に示したような熱の移動現象は日常経験するところである。これらはみな、高温の物体から低温の物体へと熱エネルギーが移動していく現象である。この熱の移動現象には三つの形態がある。

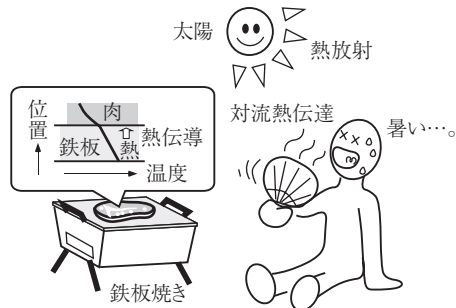


図 1.1 熱移動の形態（熱伝導，対流熱伝達，熱放射）

① 熱伝導による熱移動：熱い鉄板の上で肉を焼く。鉄板は熱く燃える炭で熱せられ、鉄板の裏側は高温となる。一方、肉を置いた表側は少し低温となる。鉄板の裏側は燃える炭でつねに加熱されているので、鉄板内部を通して裏側から表側へと熱が伝わり、肉が焼ける。熱は鉄板の裏側と表側との温度差によって鉄板内を移動していく。これを **熱伝導による熱移動** (conductive heat transfer) と呼ぶ。

② 対流熱伝達による熱移動：体をうちわで扇ぐと涼しくなる。うちわで体

のまわりに風を起こせば、体のまわりにまとわりついた熱い空気が吹き飛ばされて冷えた空気と入れ替わり、体表面から空気へと移動する熱が増加する。この際、体と周囲空気との温度差が広がるほど、さらには風が強いほど熱移動が増えて涼しくなる。これを **対流熱伝達による熱移動** (convective heat transfer) と呼ぶ。

③ 熱放射による熱移動：太陽の強い日差しを浴びれば暑い。太陽の光は真空の宇宙空間を通過して地表面に降り注いでいる。光は電磁波であり、真空中でも伝わる。物体はその温度に応じた熱放射 (thermal radiation) を放出している。太陽の温度は約 $5\,500^{\circ}\text{C}$ であり、一方、体温は 36°C であるため、両者の温度差により太陽からの熱エネルギーが人体へと移動する。この熱放射による熱の移動を **放射伝熱** (radiation heat transfer) と呼ぶ。

温度差に基づく熱の移動現象を **伝熱** (heat transfer) と呼ぶ。伝熱工学は①～③の三つの熱移動形態をもとにして移動する熱量を定量的に扱う学問である。

1.2 身近な伝熱現象

身近な熱移動現象をもう少し眺めてみよう。さまざまな事例を **図 1.2** に挙げてみた。ここでは物質の移動現象にまで事例の範囲を広げて示した。

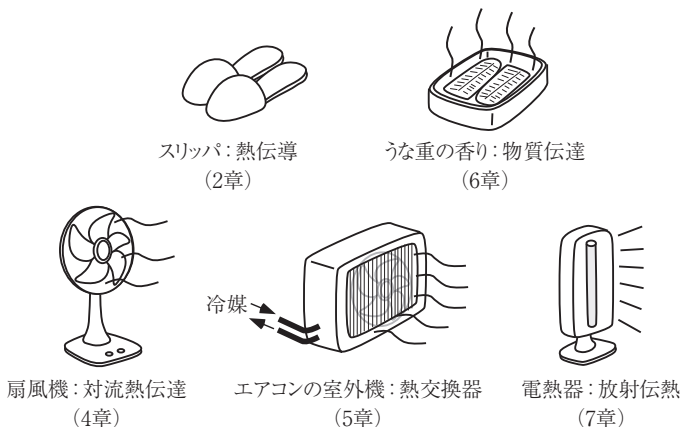


図 1.2 身近な熱・物質移動現象の例

寒い朝にはスリッパを履く。そうすれば冷たい板の上を歩いても足先は冷た
くない。スリッパは冷たい板に足が直接触れないようにする。スリッパは熱伝
導率の低い布やゴムできているため、スリッパが断熱材の役目をして足から
板への熱移動量を小さく抑える。この固体材料中の熱伝導による熱移動現象に
ついては **2章** で学ぶ。

うな重のふたを開ければ、香ばしい匂い^{にお}が漂う。うな重のタレから発せられ
る匂いの成分が顔の前に立ちのぼり、鼻孔を通して嗅細胞^{きゆう}で感受される。匂い
成分の分子が空気の流れに乗ってうな重から鼻の中へと移動し、われわれは匂
いとして感じる。分子（物質）そのものが移動していくことから、これを
物質移動（mass transfer）と呼ぶ。この物質移動現象については **6章** で学ぶ。

扇風機はうちわと同様に風を起こす。周囲空気の温度と体温との温度差自体
は変わらないが、風が起きると体の周りの温められた空気を吹き飛ばし、空気
が入れ替わって熱移動が増加する。これにより体を風にさらせば、涼しく感じ
る。流体の流れ（移流）による熱移動現象については **4章** で学ぶ。

エアコンには室内機と室外機がある。室外機の中をのぞいてみると、厚さ
0.2 mm ほどのたくさんのアルミニウム板が 1 mm 間隔でびっしりと並んでい
るのが見えよう。エアコンの室外機では、圧縮機によって熱くなった冷媒を空
気で冷やして、冷媒と空気との間で熱交換させている。室外機の中のアルミ板
には銅パイプが貫いており、銅パイプの中には熱い冷媒が流れている。冷媒の
熱をアルミ板に分散させ、ファンを回して空気をアルミ板の隙間^{すきま}に通すことで
空気へと放熱している。熱交換器（heat exchanger）については **5章** で扱う。

電熱器の赤い光は体を温めてくれる。高温の電熱器からは目には見えない赤
外線が多量に出ており、その電磁波を受けて体が温められる。熱放射による熱
移動現象は **放射伝熱** と呼ばれる。放射伝熱については **7章** で学ぶ。

図中には描いていないが、われわれ人間は安静時に約 100 W の熱を発生し
ており、周囲空気に放熱している。テレビもパソコンも同様に発熱し、放熱し
ている。洗濯物が乾くのは繊維の水分が水蒸気となって空気中に移動していく
からである。このように身の回りには熱や物質が移動する現象は非常に多い。

1.3 産業で利用されている伝熱工学

熱や物質の移動現象は、製鉄所をはじめとする化学プラント、発電所、機械加工やプラスチック成型などさまざまな産業で見られる。その中でも熱の移動が機器の安定動作にとって非常に重要となる事例（ほんの一例）を **図 1.3** に示す。

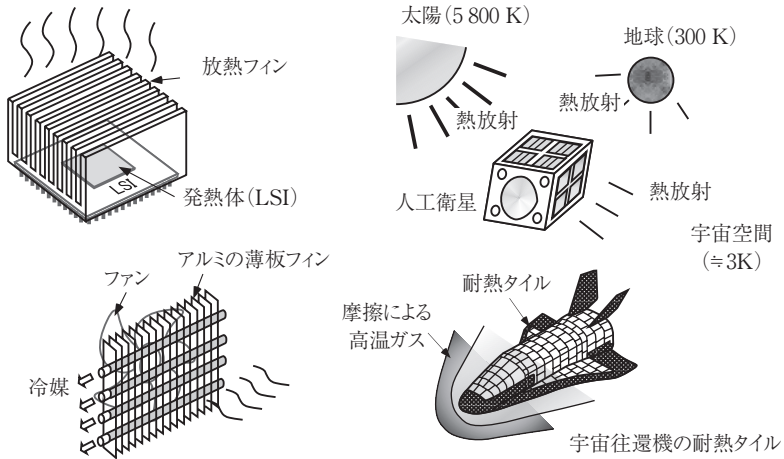


図 1.3 産業で利用されている熱・物質の移動現象

パソコンの CPU は発熱量が数十 W にもなる。安定に動作させるためには常時放熱する必要がある、そのためにアルミニウムの放熱フィンが用いられる。放熱フィンは拡大伝熱面とも呼ばれ、櫛のように薄板を一定間隔で並べた形状をしている。多数の薄板は空気との接触面積を増大させ、放熱フィンの放熱量を増加させている（**2章** で扱う）。放熱量が不足している場合にはさらにファンを取り付け、放熱フィンの隙間に空気を強制的に流して、対流熱伝達を増大させる。これを **強制対流熱伝達** (forced convection) と呼ぶ（**4章** で扱う）。

人工衛星は太陽からの強い熱放射を受ける一方で、影となる部分では宇宙空間に向けて放熱している。日なたと日陰での温度差が激しく、厳しい動作環境にある。電子機器の安定動作や熱ひずみを最小限に抑えるために、人工衛星の温度差を小さくする必要がある。このため、人工衛星では太陽からの熱放射を

効果的に反射する機構や、衛星内部で熱を移動させて温度を均一化するような工夫がなされている。

宇宙往還機が大気圏に再突入する際、空気との摩擦により機体は高温のプラズマガスに覆われる。高温ガスから機体への熱移動を少なくするために、機体表面には熱伝導率が非常に小さいセラミック製耐熱タイルが貼られている。耐熱タイルは断熱性の高さだけでなく、軽さや強度も求められる。往還機にとって、耐熱タイルは機体を保護するシールドとして重要な役割を果たしている。

このように、機器の動作要求に合わせた熱移動や温度制御を行わせることを熱設計と呼ぶ。具体的には、温度を制御したい機器を何℃に保つことができるか、その機器からどれだけの熱量が放熱（または給熱）できるか、機器内部または周囲の温度はどのような温度分布となるかを推測し、設計に反映させることである。熱設計は電子機器の小型化、極限環境での機器使用において重要な役割を担っている。

CPUには情報処理という機能が、人工衛星には通信や気象観測などの機能が要求される。熱設計はそれらの機能を向上させる技術ではなく、機器の性能が十分に発揮されるように支援する技術である。熱・物質移動や伝熱工学は産業において表に出て注目され、騒がれるような学問や技術ではないが、それらを考えずして適切に機器を設計できるとはいいいにくい。「縁の下の力持ち」としての基礎知識・工学として知っておくべき重要な学問・技術の一つである。

1.4 伝熱工学で学ぶこと

身近で生じている熱・物質移動現象を [図 1.1](#)、[図 1.2](#) で示したが、実際の現象はそれほど単純ではない。熱伝導、対流熱伝達、熱放射が同時に起き、簡単には区分けできない。さらに、物質移動や相変化が加わる場合もある。例えば、[図 1.1](#) の人体からの放熱を見てみよう。うちわで扇いだときには、対流熱伝達で体から熱を放熱するだけでなく、暑くなれば皮膚から汗がにじみ出て、汗が空気中に蒸発し、蒸発熱を奪って皮膚を冷却する。太陽からの熱放射を受けもする。対流熱伝達、物質移動、相変化伝熱、熱放射などの多くの現象

が同時に起きている。

伝熱工学は、機器がある状況に置かれ、機器と周囲の間で熱や物質の移動現象が生じているときに、注目している機器のある部品からどれだけの熱量を放熱（または給熱）することができるか、または、その機器部品や周囲の温度はどのような空間分布になるのかを推定することができる。さらに、熱移動量を増減させるためには、どうすればよいかを示すことができる。しかし、現象が複雑であると熱移動量や温度分布の推定は容易ではなくなる。

本書では、複雑な現象を伝熱工学の視点から整理して単純化し、計算できるレベルにまで持ち込む方法を学ぶ。具体的には以下の事項である。

- ① 起きている現象をよく観察し、熱伝導や熱放射などが生じている移動現象を整理する。この作業にはマンガ絵を描く作業が早道である。
- ② 現象を支配する要因を抽出し、それを残して移動現象を単純化する。
- ③ 温度分布や濃度分布などの必要な量や値が引き出せる数式を用いて計算する。

これらの過程では「本来の移動現象から大きく外れることなしに、いかに単純化し、計算可能な数式へと持ち込めるか」が重要な点となる。複雑すぎる現象を詳細にかつ忠実に追いついても解は求められない。反対に、現象を単純化しすぎると現象から遠く離れてしまい、求めた解は現象とは大きく違った値や分布となってしまう。ほどよい単純化（モデル化）が肝要である。

移動現象の整理と単純化には多くの事例を見るのがよい。整理・単純化の方法と、それにより求められた解の特徴を学ぶことである。複雑な現象を支配要因のみ残して単純化し、その単純化された場合での推定値を知り、さらに、物体の形状や物性値が推定値にどのような影響を与えるかを知ることが伝熱工学を学ぶ意味であろう。本書はこの考え方に立って進める。

1.5 現象を伝熱工学の視点から見る

複雑な現象を眺め、現象を整理する過程を一つの事例で見てみよう。

図 1.4 に示した「鍋^{なべ}で湯を沸かす」場合を考えてみる。

索 引

	<p>局所物質伝達率 192</p> <p style="text-align: center;">【く・け・こ】</p> <p>駆動力 8</p> <p>形態係数 224</p> <p>黒 体 211</p> <p>混合平均温度 142</p> <p style="text-align: center;">【し】</p> <p>シェルアンドチューブ形 熱交換器 163</p> <p>自然対流 7, 156</p> <p>質量分率 180</p> <p>質量平均速度 181</p> <p>質量保存方程式 184, 186</p> <p>質量密度 180</p> <p>質量流束 16, 178, 182</p> <p>時定数 66</p> <p>射出率 214</p> <p>射 度 225</p> <p>自由対流 156</p> <p>集中熱容量法 64</p> <p>主流温度 13</p> <p style="text-align: center;">【す】</p> <p>推進力 8</p> <p style="text-align: center;">【せ】</p> <p>全 圧 180</p> <p>せん断応力 14</p> <p>全放射能 210</p> <p style="text-align: center;">【そ】</p> <p>相似性 186, 196</p> <p>層流境界層 71</p> <p>速度境界層 89</p> <p>——の厚さ 98</p>	<p>——の速度分布 97</p> <p>速度境界層方程式 94</p> <p>速度方程式 11</p> <p style="text-align: center;">【た】</p> <p>第 1 種の境界条件 29</p> <p>第 2 種の境界条件 29</p> <p>第 3 種の境界条件 30</p> <p>対向流形熱交換器 165, 168</p> <p>対数平均温度差 167</p> <p>体積膨張係数 158</p> <p>代表寸法 64</p> <p>太陽放射スペクトル 220</p> <p>対流熱伝達 70, 101</p> <p>対流熱伝達率 13</p> <p>対流熱伝達による熱移動 2</p> <p>単色射出能 210</p> <p>単色射出率 214</p> <p>断熱条件 30</p> <p style="text-align: center;">【ち・て・と】</p> <p>直交流形熱交換器 165</p> <p>伝 熱 2</p> <p>伝熱工学 8</p> <p>透過率 216</p> <p style="text-align: center;">【な・に】</p> <p>内部流 82</p> <p>流れと熱の相似性 130</p> <p>二次元 Poiseuille 流れ 78</p> <p>二重管形熱交換器 163</p> <p style="text-align: center;">【ね・の】</p> <p>熱（エネルギー）の移動 7</p> <p>熱・物質移動論 8</p> <p>熱拡散方程式 28</p> <p>熱交換器 163</p>
<p style="text-align: center;">【い】</p> <p>移動現象 8</p> <p>移動速度 8</p> <p>移動速度論 8</p> <p style="text-align: center;">【う】</p> <p>運動量移動 7</p> <p>運動量流束 15</p> <p style="text-align: center;">【え】</p> <p>エネルギー方程式 28, 113</p> <p>エネルギー保存方程式 28</p> <p style="text-align: center;">【お】</p> <p>温度境界層 103</p> <p>温度効率 171</p> <p>温度助走区間 142</p> <p>温度伝導率 27</p> <p>温度分布の相似性 116</p> <p style="text-align: center;">【か】</p> <p>灰色体 217</p> <p>外部流 82</p> <p>拡散移動現象 177</p> <p>拡散係数 183</p> <p>拡大伝熱面 53</p> <p>隔板式熱交換器 163</p> <p>管の摩擦係数 81</p> <p style="text-align: center;">【き】</p> <p>吸収率 216</p> <p>境界層方程式 116</p> <p>強制対流熱伝達 4</p> <p>局所 Nusselt 数 120</p> <p>局所 Sherwood 数 194</p> <p>局所対流熱伝達率 105, 119</p>		

熱通過数	172
熱通過有効度	170
熱通過率	38
熱抵抗	38
熱的に発達した領域	142
熱伝導	18
熱伝導方程式	28
熱伝導による熱移動	1
熱伝導率	19
熱放射	207
熱容量	18
熱容量流量	162
熱容量流量比	172
熱流束	12, 19
熱流束ベクトル	20
熱流量	18
濃度境界層	178
【は・ひ】	
反射率	216
微小体積要素	22

【ふ】	
フィン	53
フィンアンドチューブ形	
熱交換器	163
フィン効率	54
物質移動	3, 7
物質移動現象	176
物質伝達	179
——での Stanton 数	196
——の J_{mass} 因子	197
物質伝達率	192
プレート形熱交換器	164
分 圧	180
【へ】	
平均自由行程	72
平均対流熱伝達率	121
平均物質伝達率	194
並行流形熱交換器	165

【ほ】	
放射エネルギー流束	210
放射強度	208
放射伝熱	2, 3, 17, 205
【ま・も】	
膜温度	124
摩擦係数	79
モル濃度	180
モル分率	180
【ゆ・よ】	
輸送現象	8
溶解度	203
【ら・り】	
乱流境界層	71, 100
立体角	209
流速分布の相似性	95
臨界 Reynolds 数	132

【B・C】	
Biot 数	62
Blasius の解	95
Boltzmann 変換	87
Bussinesqu 近似	158
Chilton-Colburn の相似則	131
Colburn の J 因子	131
【F】	
Fanning の摩擦係数	81
Fick の拡散法則	16
Fourier 数	32
Fourier の熱伝導法則	12, 19

【G・H】	
Grashof 数	159
Hagen-Poiseuille 流れ	80
Henry 定数	200
Henry の法則	200
【K・L】	
Kirchhoff の法則	216
Lewis 数	197
【N】	
Navier-Stokes 方程式	75
Newton の粘性法則	14
Newton の冷却の法則	13, 102

【P】	
Peclet 数	128
Planck の式	212
Pohlhausen の式	119
Prandtl 数	125
Prandtl の	
速度境界層方程式	90
【R・S】	
Rayleigh の問題	84
Reynolds 数	76
Reynolds の相似則	130
Schmidt 数	187
Stanton 数	129
Stefan-Boltzmann の式	213

— 著者略歴 —

1968年 岐阜県揖斐郡池田町に生まれる
1990年 福井大学工学部産業機械工学科卒業
1992年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了（機械物理工学専攻）
1995年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学
（機械物理工学専攻）
1995年 東京工業大学助手
1996年 博士（工学）（東京工業大学）
2000年 慶應義塾大学専任講師
2006年 慶應義塾大学助教授
2007年 慶應義塾大学准教授
現在に至る

見える伝熱工学

Instruction of Heat and Mass Transfer with Illustrations

© Kuniyasu Ogawa 2011

2011年10月17日 初版第1刷発行



検印省略

著者 小川 邦康
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04618-2 (安達) (製本：複製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします