「移動速度論 (Transport Phenomena)」概要

工学系の技術者・研究者にとって重要な基礎学問（工学基礎）とは

力学(dynamics)：運動方程式を適用して解を得る力，保存力などの概念の修得

材料力学(Materials Mechanics)：構造材料に働く外力と応力分布，変位との関係の理解

電磁気学(Electromagnetism)：アンペールの法則，ファラデーの法則，フレミングの法則，電磁波などの理解

熱力学(Thermodynamics)：物質の状態変化とエネルギー，エントロピー，それを利用する熱機関の基本理解

１年後期では自由エネルギーの導入とエネルギーミニマムによって状態変化が記述されること，
それは状態変化の最終状態すなわち平衡状態を記述するものであった。　→　平衡論

移動速度論：実際の工学分野では最終状態（平衡状態）への遷移過程（遷移状態）も重要である。

・かつて家庭に必ずあった石油ストーブはファンヒーターに駆逐された。なぜだろう？　熱ふく射によって暖めるより，空気の流れで暖める方が効率が良い。これはこの講義の目標でもある「熱移動に及ぼす流動の影響」によって理解される。コーヒーに砂糖を入れると条件反射的にかき混ぜる。なぜだろう？
移動速度論の内容が凝縮されている。

・日本刀は炭の中で高温に熱せられ，表面から炭素を拡散させ，水中で急冷する（これを焼入れという）。その時に内部の温度は平衡論，すなわち，水の温度にその瞬間になっているのだろうか？　厚い部材であれば内部まで同じように冷却されないことは容易に想像できる。その場合，焼き入れはどの範囲まで有効だったのか。答えは速度論によって得られるのである。時間に伴う変化を経時変化といい，速度論では重要な概念となる。

・パチンコ玉は炉の中で表面に炭素を拡散させた後，水の中に投じて表面だけを焼き入れする。その結果，柔らかい内部を堅い表面が覆う構造でボールのように弾む。平衡論では炉の中の炭素の拡散で，炭素は均一になってしまう。速度論により，表面から1mmの範囲に炭素を拡散する時間が決められる。

・卒業研究等で炉を使用したり，設計したりする場合，発熱体の位置と投入エネルギー，炉内の構造等で運転時の温度分布＊が計算できる。これは移動速度論での基礎式を解くことによって得られるのである。

・スペースシャトルの大気圏突入では表面温度は非常に高温で，何重もの壁の温度は段階的に分布し，室内は常温に保たれている＊

＊では，温度分布の時間経過に伴う変化（経時変化）はないが，これは平衡状態ではなく，定常状態(Steady State)といい，やはり平衡論では記述できない。

・・・などと　日常生活でも実験研究の場でも様々な局面で移動速度論は有用　→　速度論

平衡論　と　速度論　は基礎中の基礎　工学基礎の両輪をなす！！

移動速度論　何が移動して　その速度とは何か　どのように移動するのか　その結果　何がどうなるのか

移動するもの　○運動量(Momentum)(kg･m/s)，○熱(Heat) (J)，○物質(Mass) (mol)

速度とは　rate　(物理量) ／時間 (1/s)　ということで velocity (m/s) ではない。

移動の形態　１．移動速度式　基本的な概念は熱力学の第２法則（均一になる）　界面等は特別
２．媒質（媒体）(Medium)の移動による：流動の影響(Effect of Convection)
３．その他

移動の結果　○運動量移動(Momentum Transfer)
→ 速度分布(Velocity Distribution)の経時変化(Transitional Change)
○熱移動(Heat Transfer)
→ 温度分布(Temperature Distribution)の経時変化
○物質移動(Mass Transfer)
→ 濃度分布(Concentration Distribution)の経時変化

運動量，熱，物質の移動速度式　＋　流動による移動　→　速度，温度，濃度に対する基礎方程式
移動しやすさを示す物性値の理解　　３つの座標系の理解

基礎方程式
非線形，非定常の偏微分方程式 $\xrightarrow{\text{そのままでは解けないので簡単化}}$
定常線形化　→　線形（1階or2階）常微分方程式　→　定常解 Steady State Solution
非定常線形化 Linearization　→　線形偏微分方程式　→　非定常解 Non-Steady State Solution

流動による移動を考慮するには速度に関する方程式との連立になる → 境界層理論 Boundary Layer Theory(BLT) → Boundary Film 境膜の導入
個々の領域における移動速度を比較する。極端に差がある場合を考える。 → 律速段階の理解 Rate Control Step
→ 擬定常問題, Quasi-Steady State　　不均一反応 Heterogeneous Reaction
熱と物質の移動に及ぼす流動の影響

講義の内容と流れ

モチベーションの高まり：『様々な状況で』，速度分布，温度分布，濃度分布　の　経時変化　が知りたい！！　1-1

大雑把に　1-2

３つの物理量の移動の形態は？

対流によって運ばれる
移動速度式　1-3　2-1　相似性　2-2
それ以外の形態　特異性

→移動係数とは（物性値）　2-3　3-1,2,3

３つの物理量が移動するとどうなるのか？
微小要素における収支は？　4-1,3

空間分布を知るためには微小要素で考える必要がある

微小要素の設定と３つの座標系　4-1

質量だったらどうか？→連続の式　4-2

基礎方程式の構成は？
どのような構成なのか？　7-1

３つの座標系における微小要素　に対する

運動量の出入り（作用する力）→　運動の式　5-1
熱の出入り　→　熱移動の式（エネルギー方程式）　5-2
物質の出入り　→　物質移動の式（フィックの第二法則）

5-1,2
基礎方程式，例えば直角座標の熱移動の式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x\frac{\partial T}{\partial x} + v_y\frac{\partial T}{\partial y} + v_z\frac{\partial T}{\partial z} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{Q}{\rho C_P}$$

t：時間（s）　x，y，z，r：座標位置(距離（m）　ρ：密度（kg/m^3）　T：温度（K）

$\alpha\left(=\frac{\lambda}{C_P\rho}\right)$：熱拡散係数（m^2/s）　λ：熱伝導度（J/K m s）　C_P：比熱（J/K kg）　Q：発熱速度（J/s m^3）

解を得るために
初期条件，境界条件の設定　5-3

例えば無限平板の両サイド
I.C.　$T = T_L \quad at \quad t = 0$　　B.C.　$T = T_H \quad at \quad x = 0$，$T = T_L \quad at \quad x = L$

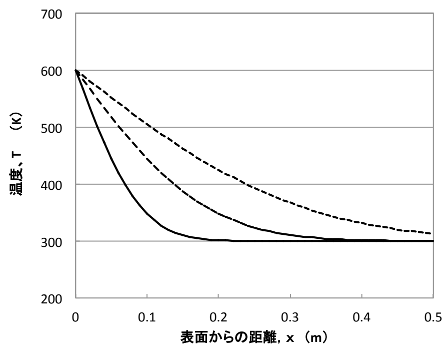
基礎式（基礎方程式）の簡単化　6-1
特に　定常　か　非定常　か　を最初に考える　　定常，無限平板，発熱なし　$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$

定常問題について例題で演習　　Qouette流れ　6-2　　Hagen-Poiseuille流れ　6-3

基礎方程式の各項の意味のおさらい　7-1　　２層板内熱伝導と律速過程　7-2　　回転容器内流れ　7-3

非定常問題　　偏微分方程式　8-1　$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$

いかに解くか　ラプラス変換法　8-2
変数分離法　9-1
変数合成法　8-3



温度分布の経時変化

すべての領域を解く必要があるか？
表面や界面の近傍だけでいいのでは？

境界層とバルクに分ける　　変数合成法の応用　9-2

境界層理論の展開　　積分プロフィル法　10-1　　しかしこれは相当に面倒で結構考えることもある

境膜の導入　10-2　　境膜導入の条件を設定することで近傍だけ考えてよい正当性を保証する　10-3　11-2

境膜内の熱移動と物質移動，速度式　　相似性もある　11-1

擬定常問題　11-3

総括モデル　　律速過程の考え方　12-1　　不均一反応　12-2

移動速度論で修得した知識がどのように役立つのか？

将来，移動速度論が役に立つ現場であなたたちが働いていることは間違いないと思いますが，現状でそれが想像し難いというのであれば，直近でこれを使う現場を予告します。

マテリアル工学実験（応用編）の実験項目7の「低温モデル実験による一方向凝固の観察」では，凝固現象の直接観察をします。そこには，後期の「融体および接合加工学」で学習する凝固現象を実際に観察して講義の理解を深めるという大枠の目標がありますが，実験実習の目的はそれだけでなく，実験結果の考察に講義で修得した知識を活用するという一面もあります。

マテリアル工学実験（基礎編）（応用編）の目標

学習・教育到達目標

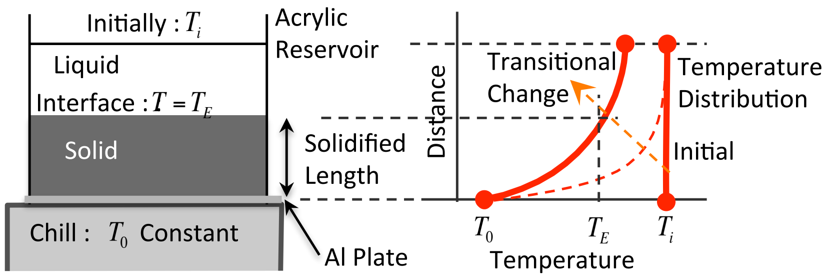
(E) 基礎実験技術（毎回の項目で何を身につけたのか意識する）
(F) コミュニケーション能力（技術者としてのレポート作成）
(G) チームワーク能力（真の意味でのチームワークを意識する）

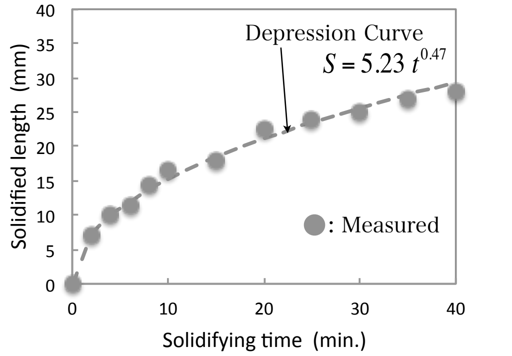
の他に

講義科目との連携

講義の学習内容の理解を深める
実験結果の考察に講義内容を利用する

では，凝固の観察ではどうなのか？　このモデルでは，液体を容器に入れ，下方のチルに接触させ下方から一方向に凝固させます。凝固した部分は白色で液体は透明なので，どこまで凝固したかを目視で測定できます。





Time dependency of solidified length

右上図のように測定され，凝固距離の時間依存性がまあまあわかってよかったね・・・などというような感想で終わりということにはならない!　ことを理解して下さい。

研究者，技術者の態度とは？　理論的考察（結果の検証）

結果をまとめるだけではなく，なぜそうなるのか．その原因は何なのか・・・などということを現在判明している知見の範囲（これは本人の努力でどこまで広がっているか個人差がでる）で説明する（これも本人の努力で個人差がでる）

そんなことを言われてもさっぱりわからないという人のために　例えば・・・　右上の結果から回帰分析してみると $S = 5.23\ t^{0.47}$ となり，このような時間依存性で凝固が進んでゆくことがわかります。しかし，さらに皆さんにはどうしてそうなるのか，理論的に説明する　ということが求められます。回帰分析以上はむりという人のために，この凝固距離を計算して求めようということが結構意味があることに気がつきましょう。数値的に計算するということには２つの意義があります。

1．人間の手で計算するには複雑かつ膨大すぎて，プログラムにやらせればいろいろなことがわかる。事実の発見
2．現状で解明されている知見を駆使した計算結果と実験結果を比較することで現象を支配する新しい因子を発見する。原理の発見

「移動速度論」は役に立つのか？

凝固距離は固体と液体の境界（固液界面）の位置であり，温度分布で考えれば，チルに接触している最下部は温度が T_0 で上の図に示すように上部にゆくに従い，温度が上昇します。図に示す温度　T_E よりも低温の領域が固体，高温の領域が液体ということになります。すなわち，凝固距離は温度分布を求めれば計算できることがわかります。ではこの温度分布はそもそも，どうだったかを考えると．図のinitial に示すように均一で　と T_i うところから，下部がより冷却され，破線のようになり，だんだん全体的に温度低下するということが理解できます。ではこの温度分布の時間変化を知ることができるのでしょうか?
それを見いだすのが「移動速度論」なのです!　実際にこの講義で勉強したことを利用して，実験７では計算してもらいます。どうでしょうか？　少しは具体的にイメージできたでしょうか。

温度分布を求めるための偏微分方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

微分方程式を解くことばかりやってきたがそもそも実際の問題では作ることから始める　Ⓐ

$$T = T_i \quad at \quad t = 0$$

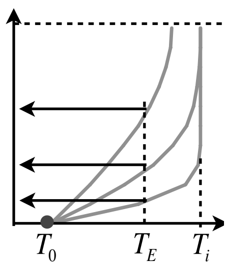
このような条件をどう考えるかも重要で，自ら考えなければならない　Ⓑ

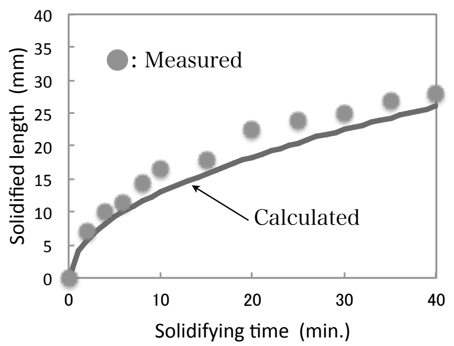
$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad at \quad x = L \qquad T = T_0 \quad at \quad x = 0$$

解 $$T = (T_i - T_0)\sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{(1/2+n)\pi} \sin\left\{\left(\frac{1}{2}+1\right)\frac{\pi x}{L}\right\} \exp\left\{-\left(\frac{1}{2}+1\right)^2 \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2}\right\} + T_0$$

数学を駆使してこのように解くことができる。　Ⓒ

ⒶⒷⒸは今はわからなくてもこの講義で勉強します。それは有意義と思いませんか？





Time dependency of solidified length

計算結果は測定値と一致しません。
だからいいんです！！

理由を納得しましょう