

特別講演

□学術功績賞受賞記念

素材製造プロセスの反応工学的研究

Reaction Engineering Based Research on Materials

Production Processes

桑原 守

Mamoru Kuwabara

名古屋大学大学院工学研究科 マテリアル理工学専攻
材料プロセス創成工学講座 教授



*脚注に略歴

1 はじめに

筆者が冶金反応工学の創始者である名古屋大学工学部の故鞭巖教授に師事した当時、我が国の鉄鋼業では、世界最大級の高炉やそれに見合う巨大転炉などを備えた新鋭で大規模な一貫製鉄所の建設、各種圧延設備の強化等の合理化計画が進行中であった。また、産、官、学とも、製鉄の学理構築のための探索的研究で活気に満ちていた。当時の研究室では、森山昭助教授、八木順一郎東北大学名誉教授、森滋勝、浅井滋生、両名古屋大学名誉教授、堀尾正鞠東京農工大学教授、柴田(旧姓樋口)充蔵金沢工業大学教授らや、田村健二博士(前新日本製鐵)をはじめとする多くの先輩諸氏と、同期の伊東修三氏(前神戸製鋼所)、大井淳一氏(前住友金属工業)、河合久孝博士(前三菱重工業)、谷口正彦氏(前新日本製鐵)、渡辺純夫氏(前新日本製鐵)、藤井徹也博士(前JFEスチール)らに囲まれ、多くの刺激を受けて切磋琢磨したものである。本稿では、その雰囲気の中で、また、後の後輩諸氏や各界の研究仲間との協調の中で、ともに歩み、考えてきた反応工学について振り返ってみる。

2 高炉研究

鞭先生と田村、八木両先輩らが完成させた定常、1次元、混合装入のいわゆる「鞭モデル」¹⁻³⁾の後を受け、筆者が最初に取り組んだ研究は、定常状態にある層状装入高炉の反応工学的モデルであった。Fig.1は1975年に公表した同モデル^{4,5)}の模式図を示しており、ことに、隣接する鉱石とコークスを合わせた1ブロックが降下する時間 θ 内の周期的定常の表現、傾斜した層状装入に基づく半径方向へのガス分配の推算

法に工夫を凝らした。同モデルは時間 θ 内のガス温度 T と粒子温度 t についての非定常伝熱、その間での総括の熱および物質収支式、および、ガスの圧力損失式で構成される。Fig.2は計算結果の一例であるが、振動するプロセス変数の分布が当時の電算機でも数秒以内で推算できるようになった。世界最初の実用電算機は1945年に米国で開発された「ENIAC」であるが、名古屋大学に大型計算機センターが設置されたのが1971年であるから、当時はまだ電算機の黎明期にあった。なお、同大の大型計算機ニュース第1号の巻頭言を飾ったのは鞭教授であり、当時の研究室の活性度がうかがい知れよう。

その後も、電算機の進歩に合わせて高炉内流体力学の研究を行い、装入物分布制御の重要性を示した⁶⁾。1975年にオーストラリアのStandish教授が企画したBlast Furnace Aerodynamics Symposiumは、その後の反応工学的高炉研究の原点となったが、筆者にとっては初めて出席した国際会議⁷⁾でもあり、また、ニューヨーク州立大学のSzekely教授、ウラル工科大学のKitaev教授、McGill大学のGuthrie教授らとの人脈形成の機会ともなり、思い出深いものとなった。

鉱石とコークスの層状構造の下では、Fig.3(a)の数値計算結果⁸⁾に示されるように、蛇行した流線と等圧線、2層間流量分配、半径方向での偏流を特徴とした不均一ガス流れが発生する。近松栄二氏(前新日本製鐵)とは、偏微分方程式の数値計算をしなくても流れの特徴を簡便に推算し得る近似解析法を開発した⁸⁾。同モデルの構想と考慮したプロセス変数をFig.3(b)に示す。流線は不浸透壁と考えられるので、任意の2本の流線に囲まれた空間は流管と見なせる。積層した隣接2層を横断する流管内の全圧力損失が最少となる経路を探索した結果、蛇行する流線の原理を含めて流れの特徴が

*昭和42年に名大工学部鉄鋼工学科卒業、同44年に同大学院工学研究科修士課程修了、同年に同大工学部助手就任。平成8年同助教授、10年同大学院助教授、15年同大学院教授、19年中国遼寧科技大学名誉教授、現在に至る。その間、平成4~5年にCalifornia大学Berkeley校客員特別研究員。

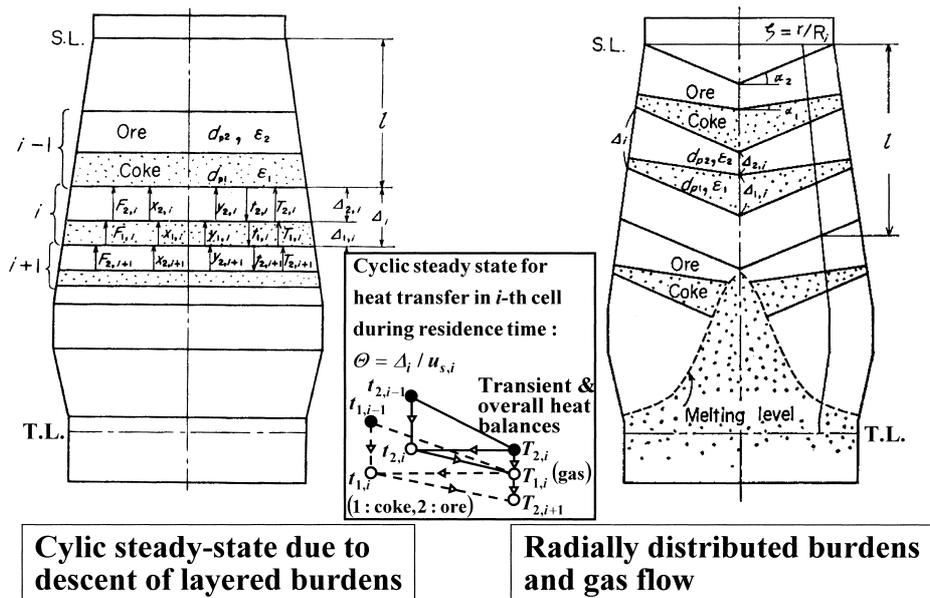
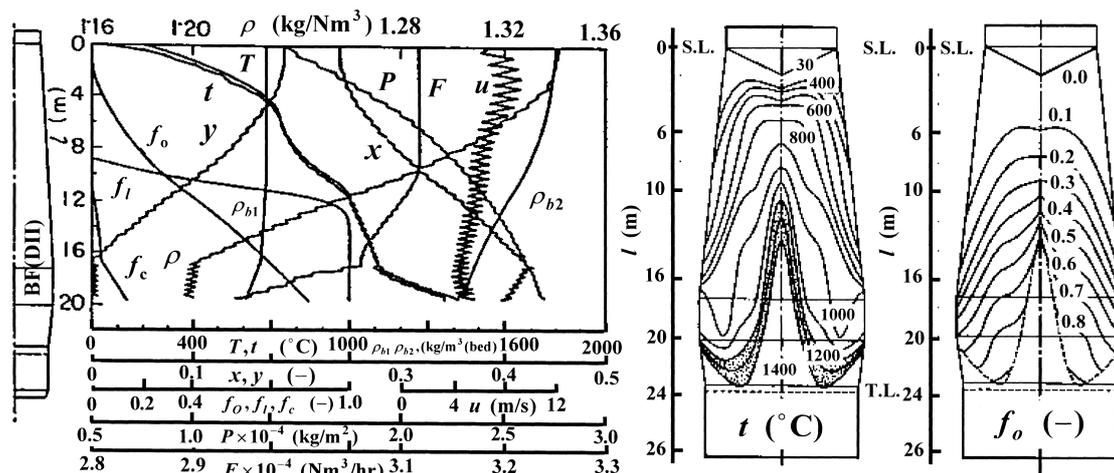


Fig.1 Schematic illustration of the layered structure model of blast furnace



(a) longitudinal distribution of process variables (b) isotherms (c) ore reduction

[F : flow rate of gas, f_o, f_c, f_l : fractional conversion, P : gas pressure, T, t : temperature of gas and burden, u : gas velocity, ρ : gas density, ρ_b : bulk density]

Fig.2 Typical computed results by the layered structure model of blast furnace

明らかとなった。この解析を通じて、一見複雑な現象も本質は単純明快であることに納得した。

続いて、高炉内における装入物の挙動について検討した。羽口先でのコークス燃焼速度論⁹⁾については、戦後の中国からの名古屋大学留学生第1号の謝裕生氏(前北京化工冶金研究所長)と、また、羽口先での微粉炭燃焼モデル¹⁰⁾については、中国からの名古屋大学博士第1号の赫冀成氏(現中国東北大学学長)とで1次元モデルを完成させた。また、磯部浩一博士(現新日本製鐵)らと高炉内装入物の運動¹¹⁾について検討した。Fig.4の実験Iでは、アクリル製半裁高炉モデルの層頂からドライアイス粒子を連続的に装入し、複数の羽口

先から吹き込んだ加熱した窒素ガスで昇華させた。メタノールの凝固点(175.3K)がドライアイスの昇華点(194.6K)より若干低いことを利用して、アルコールと染料で着色したドライアイス粒子を可視化用のタイムラインとして採用し、装入物運動と炉心形状に及ぼす炉体形状の影響を観察した。実験IIでは、ドライアイスとガラス粒子を連続的に上部から層状装入し、予め設定した軟化融着帯周りに吹き込んだ窒素ガスで鉍石層に見立てたドライアイス消失させ、粒子流線の変化を観察した。また、炉心形状や収縮率 S_r を考慮した装入物運動の定式化についても検討した。

最終的には、高炉内での不均一な伝熱、物質移動、ガス流

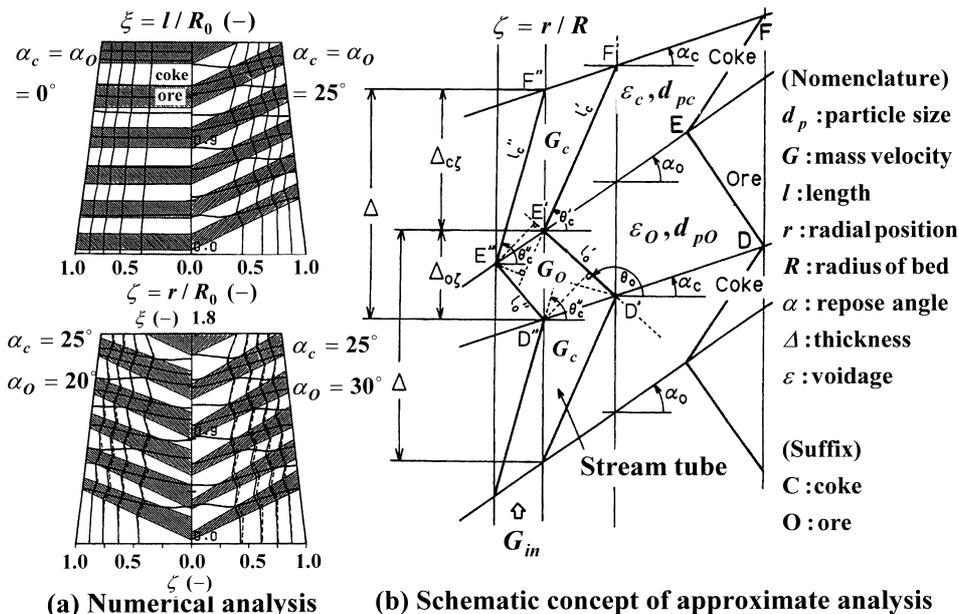


Fig.3 Numerical and analytical analyses of gas flow through layered burdens

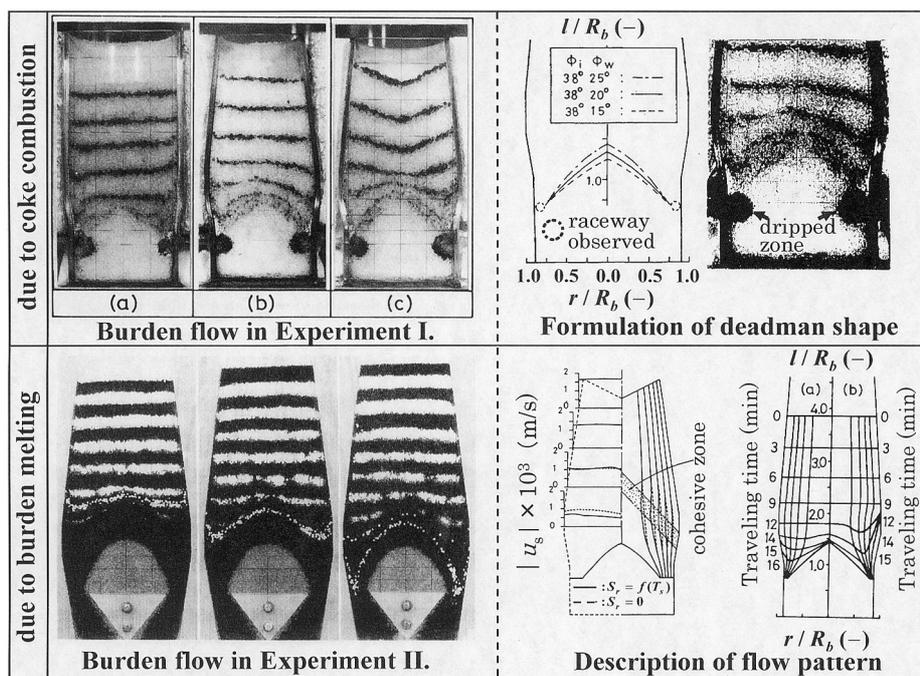


Fig.4 Solid flow patterns and their mathematical description

れ、装入物運動を、すべて偏微分方程式で表した総合2次元モデル^{12,13)}を、高根慎司氏(現日立金属)、関戸邦雄氏(現トヨタ自動車)らの協力の下で完成させた。Fig.5には、ガス流れ(流線、等圧線、質量速度)、温度場(等温線と半径方向分布)、濃度場(鉱石還元率、溶銑中Si濃度)の計算結果例¹³⁾を示す。同モデルでは、拡散、伝導項を含めた数値計算の技術ばかりでなく、浸炭、SiOを介したSi移行の熱力学と速度論についても過去の研究を踏まえて取り込むことに成功した。このことは、論文を公表した当時、Si濃度、溶

銑温度も含めて推算可能な世界初の総合2次元モデルとして羽田野道春博士(前住友金属工業)によって紹介¹⁴⁾されている。

3 プロセスのアナロジー

高炉以外の研究でも、筆者が手がけてきた反応工学的研究の対象分野は広い。燃焼合成^{15,16)}、凝固時の2重拡散問題¹⁷⁾、電磁場の応用技術¹⁸⁻²¹⁾、超音波の応用技術²²⁻³⁰⁾、さらに最

近では、製鋼反応³¹⁻³⁸⁾や組織形成³⁹⁻⁴¹⁾の分野にまで拡大し、製鉄プロセス一貫の総合的プロセスの設計を目指してきた。以後は、個々の研究手法を詳述するより、研究に至る、または、研究を概観するときの反応工学的発想法について、例を挙げて述べてみたい。

3.1 雲と凝固

Fig.6は、筆者が中国へ出張するときに機内から撮った2枚の写真である。下の写真は、名古屋から成田へ移動するときに富士山周辺で撮影した。出発するときは雨で、上空は雲で覆われていたが、かなたの富士山が美しく見える。確かに雲はあるが、上方と下方に積層化している。一方、上の写真は成田から北京への国際線上的写真で、積層化した雲ははるか下方である。この雲の状態は、国内線が6000 m ~ 11000 m 辺りの対流圏を、国際線がその上方の対流圏と成層圏との境界面近傍を飛行しており、対流圏では通常、循環を伴う対流

セルが積層化していることによる。筆者等はこの現象に着目して、奥村圭二博士(現名古屋工業大学)の修士課程の研究として凝固における2重拡散問題について検討した¹⁷⁾。Fig.7は、濃度と温度の安定条件で決まる密度対流を濃度に関連するレイリー数 Ra_c (横軸)と温度に関するレイリー数 Ra_T (縦軸)とに関連させて分類化したグラフである。図中には、状態図が鉄-炭素系と類似した NH_4Cl-H_2O 系での実験で確認した対流場の写真も示した。温度が不安定で濃度が安定に分布するときには、積層する雲のようなDiffusive型対流が発生する。一方、温度が安定で濃度が不安定ときには、入道雲タイプのFinger型対流が発生する。上記の研究では、炭素鋼の一方向凝固における欠陥発生とその対策について検討した。下方から凝固させるとき、凝固界面の液相内に軽い炭素が吐き出され、結果として発生したFinger型上昇流が下方の固液共存層内にまで液体の吸出し効果を及ぼし、筋状のフレックルという欠陥を凝固相内に形成する。こ

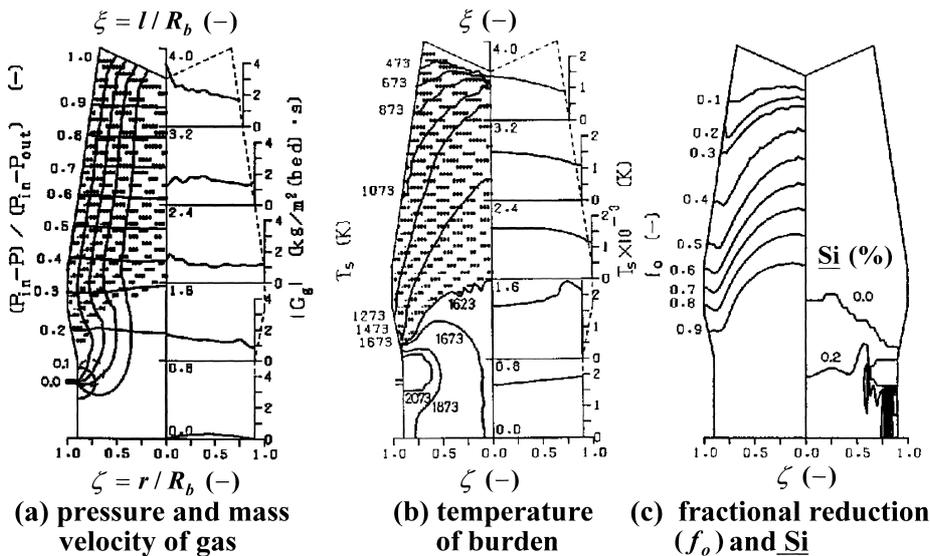


Fig.5 Typical computed results by mathematical two-dimensional model of blast furnace

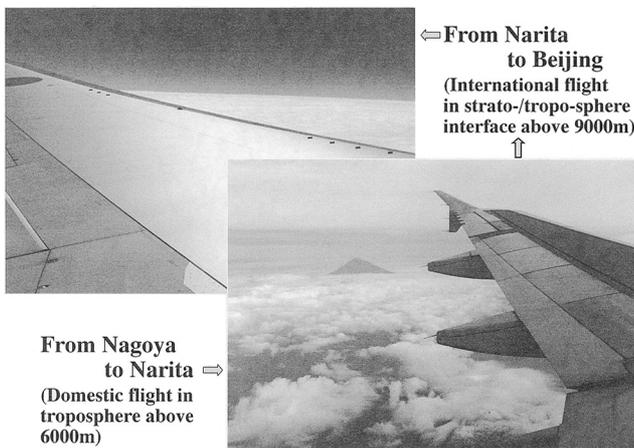


Fig.6 Diffusive type double diffusion formed around Mt.Fuji

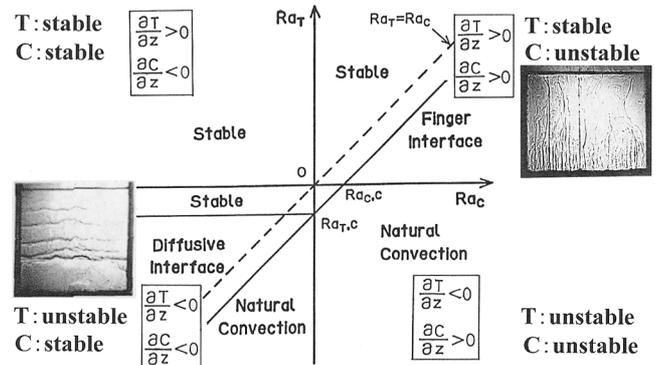


Fig.7 Stability criteria in buoyancy-driven double diffusion and phenomena visualized in aqueous NH_4Cl solution system

のFinger型対流は、熱いコーヒーに冷やしたクリームを入れたとき、一旦下降したクリームが再上昇流するときに経験できよう。

3.2 風呂とRH脱ガス

Fig.8 (a) は、RH真空脱ガス装置の模式図と、容積Vの取鍋内における着目成分濃度Cの物質収支式を示している。また、Fig.8 (b) は、循環加熱型ボイラー付きのお風呂と、その熱収支式を示している。これら2つの場合における液循環の駆動力は、前者では、片方の足に吹き込まれた不活性ガス気泡による両足間の密度差、後者では、ボイラー内加熱による吸い込みおよび吹き出しパイプ内の密度差という差はあるものの基本原理は同じである。また、Fig.9に示すように、両者の本質は、等流量(F)での流入と流出がある場合の、容積Vの連続式完全混合槽(CSTR)とも同じである。同図にはCSTRの定式化とその解の性質も示しているが、無次元濃度の時間θによる変化は、ピストン流れ(PF)における滞留時間θ(=V/F:時定数)を用いてexp(-θ/θ)で規定され、θ=θでの変化度は飽和値の63%である。CSTRは

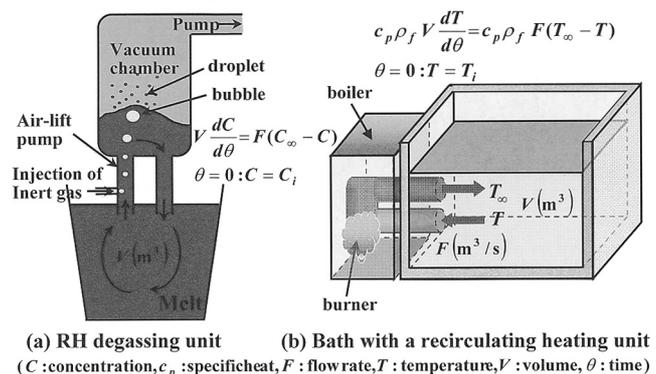


Fig.8 Analogy between degassing in the RH unit and heating of water bath with a recirculating heating unit

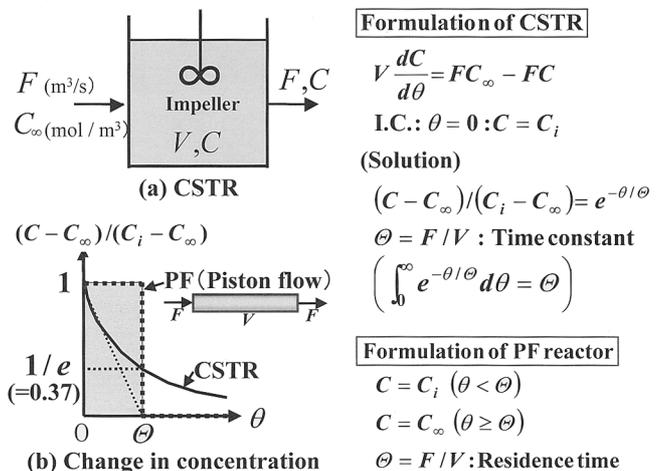


Fig.9 Formulation and characteristics of a continuous stirred tank reactor (CSTR) and a piston flow type reactor (PF)

洗濯のすすぎの問題とも同じであるが、各種の現象を時定数で定量的にイメージすることは大切である。

3.3 多くの現象は完全混合槽的

上記以外でも、CSTRとのアナロジー関係が成り立つ現象やプロセスは多い。それらの例をFig.10に示した。熱電対のステップ応答、介在物や雨滴の加速過程、Janssen式に基づく充填層内の荷重圧分布、材料内での誘導磁場の振幅値減衰等の問題でも、CSTR系に相当した時定数(またはそれに相当する特性値)θや飽和値(C_∞)があり、C_∞に向かってのプロセスの変化過程が同形の式θ(dC/dθ)=C_∞-Cで表される。このことを理解し、特性値の概略値を把握しておく、現象やプロセスが定量的に理解しやすくなる。例えば、塔径Dの容器内の荷重圧は、いくら深くなってもθ≈2D程度の深さでの静水圧の荷重圧で飽和するが、その深さθでの実働圧は飽和値の63%程度である。なお、磁場浸透では、θに相当する深さがスキンドepsになっている。

4 先入観の払拭

物事を数式で考えることは重要であるが、時として先入観にとらわれる嫌いがあり、注意が必要である。逆に言えば、その注意があれば、先入観ではイメージできない、いわゆる、セレンディピティーの発見があるかもしれない。筆者が経験した2、3の例について述べる。

4.1 AI熱還元反応の反応速度

燃焼合成の分野では、大きな発熱を利用して無機化合物を合成しようとするが、いつも反応開始温度が問題となる。固体・固体間反応では接触面積が小さいので、片方の物質の融点まで加熱することで反応が始まると考えることが多い。し

System of interest	Formulation	Process indices	Process variation
Transient purification of melt during RH degassing	$\theta \frac{dC}{d\theta} = C_{\infty} - C$ $\theta = 0: C = C_i$	$\theta = \frac{V}{F}$ $C_{\infty} = C_{equilibrium}$	$(C - C_{\infty}) / (C_i - C_{\infty})$ $\frac{1}{e} = 0.37$ $\frac{1}{e} e^{-\theta/\theta}$
Convective step heating/cooling of a particle in fluid	$\theta \frac{dT}{d\theta} = T_{\infty} - T$ $\theta = 0: T = T_i$	$\theta = \frac{c_p \rho_p V_p}{h_p A_p}$ $T_{\infty} = T_{ambient}$	$(T - T_{\infty}) / (T_i - T_{\infty})$ $\frac{1}{e} e^{-\theta/\theta}$
Gravitational acceleration of a particle to its terminal velocity (Stokes Eq.)	$\theta \frac{dv}{d\theta} = v_{\infty} - v$ $\theta = 0: v = v_i$	$\theta = \frac{d^2 \rho_p}{18 \mu_f}$ $v_{\infty} = \frac{\rho_p d^2 g (\rho_f - \rho_p)}{18 \mu_f}$	$(v - v_{\infty}) / (v_i - v_{\infty})$ $\frac{1}{e} e^{-\theta/\theta}$
Increase in pressure of burden in a cylindrical packed bed (Janssen Eq.)	$\theta \frac{dP}{dz} = P_{\infty} - P$ $z = 0: P = P_i$	$\theta = \frac{D}{4 \mu_b k} \approx 2D$ $P_{\infty} = \rho_b g \theta$	$(P - P_{\infty}) / (P_i - P_{\infty})$ $\frac{1}{e} e^{-z/\theta}$

Fig.10 Analogous processes which behave as a CSTR reactor

しかし、筆者らの実験¹⁶⁾では、 MoSi_2 の合成反応はSiの融点まで加熱することで直ちに開始するが、よく知られたテルミット反応、すなわち、酸化鉄とAlとの反応は、Alの融点を超えて1100℃以上にならないと起こらなかった。最近になり、MgOのAl熱還元反応のメカニズムを調べていて次の事実^{42,43)}が判明した。Fig.11 (a) に示すように、試薬のアルミニウムでさえ、既に常温においてナノオーダーの酸化皮膜が形成されており、その膜は不活性ガス中での加熱でも徐々に厚みを増す。1100℃を超えたあたりで、 β アルミナから α アルミナへの相変態による熱応力で酸化皮膜が破壊され、その後に急激に反応が開始した。すなわち、反応開始を規定していたのは化学的機構ではなく、物理的機構であった。

4.2 Arrheniusの式

一般に化学反応の反応速度はアレニウス式で表されている。しかし、この式の正当性については少なからぬ疑問を感じている。Fig.11 (b) は、無次元式で表したアレニウス式を無次元温度に対してプロットしたものである。周知のように、この図はシグモイド型であり、「反応速度 k は絶対温度 T とともに上昇するが、頻度因子 k_0 を超えることは無い」ことを示している。通常、 $\ln k$ を $1/T$ に対してプロットして活性化エネルギーと頻度因子を決定する。しかし、図中の例からも明らかなように、変極点での接線が横軸と交わる点の無次元温度 T_R でさえ、通常は3000K程度以上であり、そのときの反応速度は頻度因子の2%にも満たない。すなわち、一般に、この図の左端近傍で横軸に接するあたりのデータだけから頻度因子を求めようとする。従って、余程の注意深さを持って

反応速度が決定されていないと安心できない。このような無次元表示のアレニウス式が成書に登場しないことも不思議である。

4.3 MgOのAl熱還元反応

Ellingham線図によれば、図上で下位にある直線が関与する元素で上位の酸化物を還元し得る。温度軸の広い範囲でMgの線はAlの線より下方に位置し、通常はAlによるMgOの還元は困難なはずであるが、高温部分では上下が逆転している。これは、Mgが蒸気化したときにエントロピーが急増するため、Mgの沸点(1090℃)以上ではMgの線の勾配が急激に大きくなるからである。逆転した温度域では、AlによるMgO還元が可能になるとともに、生成するMgは蒸気のはずである。最近、筆者等のグループ³¹⁻³⁸⁾が、溶鉄からの熱でこの反応を起こさせ、生成したMg蒸気を直ちにキャリアガスで溶鉄に吹き込むことによる脱硫または脱酸反応の操作を提案しているのは上記の発想に基づいている。

5 新プロセスの創成

数式からは新しいプロセスを創成できないという意見を時々耳にする。これも一理あると思うが、数式に振り回されること無く、数式を追求していく中で新しい発想が生まれるという思いもある。反応工学もそうであったが、新しいプロセスを開発しようとするときには数式に裏づけされた学理への敢然とした挑戦が必要である。筆者は最近、超音波の動力学的応用にも多大な関心を寄せてきた²²⁻³⁰⁾。理由は、先人の努力の結果、プロセス改善でできることは限界近くまでなされてきたが、次のステップアップのためには、努力で解決できない大きな障壁を感じるからである。たとえば、Fig.10中にも示したStokes式で溶鋼中介在物の浮上速度を計算するとき、1mの浮上に要する時間は、100 μm のものなら4.4minで済むが、10 μm のものなら7.3hrもかかることに気付く。こうなると、超音波による放射圧や電磁力のような外力が必要となる。

放射圧以外の超音波の動力学的作用に、キャビテーションという現象がある。通常は、液体中の圧力は静水圧だけであり、これは深さに比例した正の圧力、すなわち、圧縮圧力である。一方、音圧は正弦波的な圧力であるから圧縮圧と膨張圧とが交互に現れる。これを液体中に照射して共振音場を作れば、静水圧と音圧の総和でも大きな負圧期が発生し、液体の分子結合が切られてキャビテーション気泡が発生する。この微小空間に蒸発等が入った気体は、次の正圧期にも不可逆的に気泡として残存し、断熱圧縮に近い急速な圧縮を受けると高温となって回りからの蒸発を促す。このような挙動を数

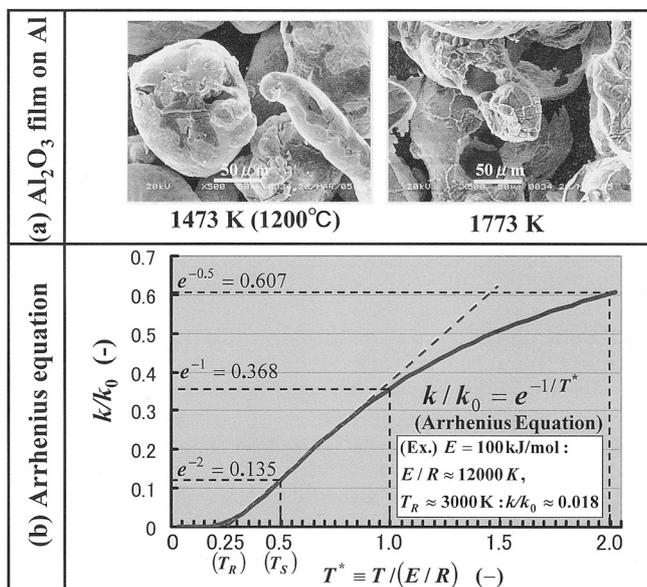


Fig.11 Rate processes being needed further investigation

サイクル繰り返した後は、気泡内のガス量は次第に増すため、瞬間的には5000K、1000atmの高温、高圧場が現れ、遂にはその気泡は崩壊してランダム方向にマイクロジェットを発射する²⁷⁾。Fig.12 (a) は、積層化した水とテトラリンが音響起因のマイクロジェットによってエマルジョン化する過程の高速写真³⁰⁾である。また、Fig.12 (b) は、超音波キャビテーションのナノ気泡が凝固したウッドメタル中に捕捉されて発泡金属化した例²⁹⁾である。これらの研究は、当時学生であった畑中信一博士(現電気通信大学)、久保貴司博士(現古河スカイ)、齊木康生君(現トヨタ車体)らに遂行して頂いたものである。

6 おわりに

本稿では、筆者が長年行ってきた反応工学的研究を振り返り、研究者の思いの一端を紹介させていただいた。本分野をさらに発展させて頂く若手研究者の方々の参考となれば幸いである。

最後に、栄誉ある学術功績賞を受賞できたのは、恩師の故鞭巖教授や坂尾弘名誉教授、佐野正道名誉教授による適切なお指導、長年にわたり学協会を通じてお世話になってきた各位のご教示、さらには、旧教員のKomarov博士(現日本軽金属)と奥村圭二博士、現教員の楊健博士と劉中柱博士、卒業生各位と学生諸君らすべてによる多大なご支援の賜物であり、心から謝意を表します。

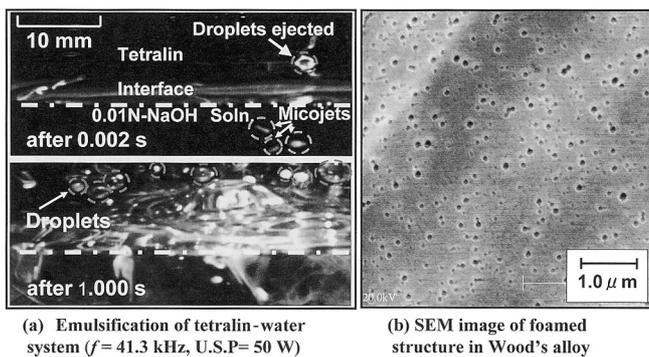


Fig.12 Emulsification of two stratified liquids and production of foamed material by using acoustically induced cavitation

参考文献

- 1) 鞭巖, 田村健二, 八木順一郎, 森山昭: 日本金属学会誌, 30 (1966), 1109.
- 2) 八木順一郎, 佐々木恵一, 鞭巖: 鉄と鋼, 54 (1968), 1019.
- 3) J. Yagi and I. Muchi: Transactions of Iron and Steel Institute of Japan, 10 (1970), 392.
- 4) 桑原守, 鞭巖: 鉄と鋼, 61 (1975), 301.
- 5) 桑原守, 鞭巖: 鉄と鋼, 61 (1975), 787.
- 6) 桑原守, 鞭巖: 鉄と鋼, 62 (1976), 463.
- 7) M. Kuwabara and I. Muchi: Proceedings of International Symposium on Blast Furnace Aerodynamics, Wollongong, Australia, September, AIMM, (1975), 61.
- 8) 桑原守, 近松栄二, 鞭巖: 鉄と鋼, 74 (1988), 246.
- 9) 桑原守, 謝裕生, 鞭巖: 鉄と鋼, 66 (1980), 1918.
- 10) 赫冀成, 桑原守, 鞭巖: 鉄と鋼, 72 (1986), 1847.
- 11) 桑原守, 磯部浩一, 三尾圭右, 鞭巖: 鉄と鋼, 66 (1988), 1734.
- 12) M. Kuwabara, K. Isobe, K. Mio, K. Nakanishi and I. Muchi: Proceedings of 2nd Japan-Australia Joint Symposium, Tokyo, Japan, October, ISIJ, (1983), 193.
- 13) 桑原守, 高根慎司, 関戸邦雄, 鞭巖: 鉄と鋼, 77 (1991), 1593.
- 14) 羽田野道春: 高炉製鉄法, 地人書館, (1999), 49.
- 15) M. Kuwabara, N. Ohtuka and S. Asai: International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 4 (1995) 3, 253.
- 16) M. Kuwabara and M. Sano: Proceedings of 1st Russian-Japanese Workshop on SHS, Karlovy Vary, Czech Republic, October 30-November 3, (1998), 35.
- 17) 奥村圭二, 桑原守, 佐々健介, 鞭巖: 鉄と鋼, 75 (1989), 618.
- 18) 佐々健介, 桑原守, 安田延侯, 浅井滋生: 鉄と鋼, 77 (1991), 1442.
- 19) K. Iwai, M. Kuwabara, K. Sassa and S. Asai: Transactions of Materials Research Society of Japan, 9 (1992), 228.
- 20) 牧野泰育, 桑原守, 浅井滋生: 鉄と鋼, 81 (1995), 523.
- 21) 阿部芳久, 佐々健介, 桑原守, 浅井滋生: 鉄と鋼, 85 (1999), 1.
- 22) S. Hatanaka, M. Kuwabara, T. Taki, M. Sano and S. Asai: Japan. Journal of Applied Physics, 38 (1999) 5B, 3096.
- 23) S.V. Komarov, M. Kuwabara and M. Sano: ISIJ Int., 39 (1999), 1207.
- 24) S.V. Komarov, M. Kuwabara and M. Sano: ISIJ Int., 40 (2000), 431.

- 25) S. Yamahira, S. Hatanaka, M. Kuwabara and S. Asai : Japan. Journal of Applied Physics, 39 (2000) 6A, 3683.
- 26) 畑中信一, 桑原守, 浅井滋生 : 鉄と鋼, 86 (2000), 625.
- 27) T. Kubo, M. Kuwabara and J. Yang : Japan. Journal of Applied Physics, 44 (2005) 6B, 4647.
- 28) S.V. Komarov, M. Kuwabara and O.V. Abramov : ISIJ Int., 45 (2005), 1765.
- 29) Y. Saiki, T. Kubo, M. Kuwabara and J. Yang : Japan. Journal of Applied Physics, 45 (2006) 5B, 4793.
- 30) M. Kuwabara, J. Yang and T. Kubo : Proceedings of Sohn International Symposium, 4 (2006), 423.
- 31) J. Yang, S. Ozaki, R. Kakimoto, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : ISIJ Int., 41 (2001), 945.
- 32) J. Yang, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : ISIJ Int., 41 (2001), 965.
- 33) J. Yang, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : ISIJ Int., 42 (200 2), 595.
- 34) J. Yang, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : ISIJ Int., 42 (200 2), 685.
- 35) J. Yang, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : Metallurgical Transactions B, 34B (2003), 619.
- 36) J. Yang, K. Okumura, M. Kuwabara and M. Sano : ISIJ Int., 45 (2005), 1795.
- 37) J. Yang, M. Kuwabara, T. Sakai, N. Uchida, Z. Liu and M. Sano : ISIJ Int., 47 (2007), 418.
- 38) J. Yang, T. Yamasaki and M. Kuwabara : ISIJ Int., 47 (2007), 699.
- 39) Z. Liu, Y. Kobayashi, J. Yang, K. Nagai and M. Kuwabara : ISIJ Int., 46 (2006), 744.
- 40) Z. Liu, Y. Kobayashi, J. Yang, K. Nagai and M. Kuwabara : ISIJ Int., 46 (2006), 847.
- 41) Z. Liu, Y. Kobayashi, J. Yang, K. Nagai and M. Kuwabara : Materials Transaction, 47 (2006), 2312.
- 42) J. Yang, M. Kuwabara, Z. Liu, T. Asano and M. Sano : ISIJ Int., 46 (2006), 20 2.
- 43) J. Yang, M. Kuwabara, T. Sawada and M. Sano : ISIJ Int., 46 (2006), 1130.

(2007年6月5日受付)