

脈動流れとその応用

近江宗一

種々の工業的設備プラント、あるいは流体機械を含む管路系などにおいて、流体や熱の流れが時間の経過と共に変わっていく現象（これを非定常現象という）が随所に現われるが、このようになると、色々な量を正確に測ったり、またその情報を利用して、運転状態を調節したりすることがたいへんむつかしくなる。特に最近では装置を大形化して生産量を効率よく増大させることが実施されているが、このような場合、装置全体を安定した好都合な運転状態に維持するとなると、問題は一層むつかしくなり、これを技術的に解決することが重要な課題となってきた。

たとえば一つの例をわが国の鉄鋼業にとって考えてみても、これは過去10年間にわたって飛躍的な発展をとげ、現在粗鋼生産量は1億2000万トンを超える状態で、米ソと並んで世界の三大製鉄国となった。このような急成長の背景には、高炉、転炉を主体とする新鋭大形製鉄所の建設と、鉄鋼製錬プラントの操業技術の進歩が大きく貢献していることは勿論であるが、ここにも大容量化した高炉を中心とする膨大な製鉄プラントをうまく運転するために、更に取組まなければならない技術的な問題が多数挙げられる。すなわち、高炉内における送風が脈動することによって生ずる鉄鉱石の還元反応への影響、転炉における超音速ノズルからの流れと溶鋼の揺動の関連性、各種炉内における燃焼ガスの変動を抑止することなど、すべて非定常流動現象の性質を明らかにして、どのような状態のときどのような流れの変動が起るか、その速度とか圧力はどのように変動し、これをどのように計測し整理すれば正確な情報となるか、あるいはさらにこれらの情報を基にして変動を制御するには、どのような手段を講ずればよいか

などの問題を解決していかななくてはならない。

さらに製鋼業について話しを続けることにするが、一方で生産規模の拡大は、公害問題および資源エネルギー問題などいくつかの歪をひき起こし、大規模な高炉、転炉一貫方式にも再検討が唱えられ始めた。特に強粘結炭、低硫黄重油の不足、原子力関係技術の開発に伴うエネルギー革命の情勢などを背景として、高炉を使用しない直接製鉄法、あるいは原子力製鉄法に関する研究も開始されつつあり、今後次第に大きな課題となっていくことであろう。

本研究室は、昭和42年7月に開設され、爾来主として冶金関係諸設備を設計、管理するにあたって必要とする基礎的資料を集め、具体的な提案を行うことを使命として研究を行っている。冒頭に掲げた理由によって、特にその中でも脈動流れに関してその力学的特性を明らかにすることは、一つの大きな目的としているが、それによって得られた成果を応用して、脈動流れの積極的な利用という観点に立ち、酸化鉄ペレットの新しい還元反応装置を開発するという目標をおいた基礎的研究も進めている。

まず管内流体の脈動流れの性質を調べるために、管路に蝶形弁あるいはピストンを設置して、それぞれ空気あるいは水の脈動流れを発生させ、管内の圧力、速度を測定し、管軸方向の圧力、速度および管横断面上の速度の挙動などを記録している。流れについては、層流の場合と乱流の場合とがあるが、すべての場合についてもれなく測定を行っている。

またこれに対する理論的分野も開拓しつつある。層流の場合には、粘性圧縮性脈動流れの圧力、速度についての厳密解と、圧縮性をわずかに考慮した近似解とを示し、実用の面から種々の検討を加えている。乱流の場合について

は、工業上極めて頻繁に現われる関係上重要であるにもかかわらず、理論的解析は相当繁瑣である。乱流となるために特に現われる応力（これをレイノルズ応力と呼んでいる）を、その分布状態に関して実験結果を参照しつついくつかのモデルを設定して基礎方程式を解き、色々の検討を加えた後、管横断面上の速度分布、波動の伝わり方を規定する定数（これを波動伝播定数という）、あるいは圧力、管中心速度などの管軸方向の分布について、レイノルズ数、脈動周波数などの影響を層流の場合と比較しながら調べ、力学的な挙動を解明している。

周波数とレイノルズ数の影響については、一般に同一周波数に対してレイノルズ数を高くした場合、それが脈動流れに与える影響は、同一レイノルズ数において周波数を低くした場合の効果と類似していることがわかった。なお層流の場合には、流れの変動は周波数（無次元化した量であることを特にことわっておく）のみに依存するが、乱流の場合には、同じ量とレイノルズ数の両方に依存することが確かめられ、注目すべき内容であると思われる。その他、実験の結果とも比較して明らかになった事項を列記してみると次のようになる。

(1) 脈動速度の管横断面上分布は、非常に周波数の低い場合には、各瞬間に定常速度分布と同じ形状をとるが、周波数が高くなると、その管中央部の変動を示す曲線の形が平たんになると共に、管壁側にピークおよび位相の進みがみられる。また脈動速度の時間平均値の管横断面上分布は、脈動流れの周波数、レイノルズ数、振幅に関係なく、定常流れの速度分布に一致してくる。

(2) 変動速度（脈動速度から、その時間平均値を差引いた残りの成分をいう）の管横断面上分布は、かなり広い周波数・レイノルズ数の範囲で理論的な解と分布形状が比較的よく一致する。

(3) 管内の変動圧力、管中心変動速度の管軸方向分布も、理論的な解と定量的によく一致してくる。

したがって横断面が一様な円形直管路において、二つの横断面上の脈動圧力が精度よく測定

でき、さらにそれらの時間平均値から時間平均速度を推定できれば、管内のあらゆる場所における各瞬間の圧力と速度を知ることができる見通しが立っている。

以上紹介してきた脈動流れは、これを鉄鉱石の還元プロセスに利用して、その能率を向上させようと試みを種々実行することによって、益々重要性を増してくる。酸化鉄ペレット（鉄鉱石を粉碎して粉状にした後、適当の大きさに造粒して焼成したもので直径10~12mm程度のものが多い）は、高炉の原材料としても逐次利用される傾向にあるが、本研究室では、高炉内の反応を促進させることを目的とするほか、将来高炉にとってかわるべき新しい製錬プロセスとして、ロータリーキルン法などの所謂直接製鉄法の開発を目標として、このペレットの水素ガスによる還元プロセスの研究に意欲を燃やしている。

高炉は現在なお、その内容積が4000m³~5000m³と大容量化して建設されつつあるが、いずれに近い将来において、最初にも述べたとおり縮小または廃止されたりして、直接製鉄法へと切換えられていく運命をたどる可能性が大きいであろう。この意味でも、酸化鉄ペレットのガス還元は極めて有意義な課題であり、各所で研究が進められているが、この場合に流すガスに脈動流を使おうとする試みは新しい内容を持っている。これに関する研究は、二、三見あたるが、系統的な反応機構の検討や、速度論的な解析は行われていない。

本研究室では、酸化鉄ペレットの単一球に対し、水素ガスを使ってピストンによる脈動流れをあて、600~1000°Cの温度で還元反応を行わせる実験を繰り返す、その効果と、効果の現われる諸条件とを具体的に確かめつつある。脈動流れの効果は、主としてペレット表面の境界層（ガス境膜とも呼ばれている）内の拡散抵抗の減少によるものであることは勿論である。脈動流れは、ペレット粒内の拡散抵抗も減少させるのではないかと疑いから、その可能性を探ってみたところ、これもある程度確かめられてきた。

ガス境膜内の拡散、粒内の拡散および化学反

応の各過程を考慮して基礎的な一界面未反応核モデルを想定し、それから得られる総括反応速度式と、脈動流れにおけるガス境膜内の物質移動係数とを用いて種々の計算を行ってみると、脈動還元法の速度論的な特徴、期待できる効果、その効果の操作条件による変化や最適操作条件などが一応予測でき、実験の結果と一致す

る点もみられる。しかし、粒内の拡散過程については、まだ不明確な点が多々あるので、反応モデルの精密化を図って理論的に追求すると共に、ガス境膜内の物質移動と、粒内の物質移動とに対する脈動流れの効果を分離して検討できるような実験装置を考案して、この問題の本質的解明を行ないつつある。