



共同研究会熱経済技術部会

© 1987 ISIJ

模型理論とスケールアップ研究小委員会報告

委員長 渡 辺 一 雄*

Report of the Activity of Joint Research Committee on Theory of Models and Scale-up Method

Kazuo WATANABE

1. 背景と活動状況

現在まで、さまざまな鉄鋼製造設備のプロセス解析に模型実験が適用され、数多くの成果を挙げてきた。製鋼設備については、溶鋼の流動や混合を表す水モデルがよく使用されており、特に転炉や連続鋳造設備など新プロセスの導入に際して盛んに活用され、その理論や手法にも一段の発展をみせた。

高炉に関しては、従来、各部の現象ごとに模型実験が開発されてきたが、最近では融着帯が再現できるホットモデルも研究され、シミュレーションモデル作成のための中間実験として大きく寄与している。

さらに、研究開発面にとどまらず、模型実験の技術は、順次生産現場にも浸透し、さまざまなプロセスの模型実験設備が生産現場に設置され、実動設備の作業上の問題点解決に活用されるというような状況に至っている。

熱経済技術部会では、ここに研究小委員会を組織し、各種の鉄鋼製造設備の模型実験の理論と手法に一貫した検討を加え、設備技術の立場から現時点における一つの見解を取りまとめることとなった。

研究小委員会は昭和 59 年 4 月から昭和 60 年 11 月まで約 1 年半にわたって、8 回の研究委員会と 5 回の編集委員会を開催し、報告書を取りまとめ、昭和 60 年 11 月、第 77 回熱経済技術部会にて報告した。

委員は表に示すように、鉄鋼各社の研究所のメンバーと製造現場の技術者で構成されており、基礎的な面と製造現場のニーズを反映した研究活動が行えるように配慮されている。

研究活動は次のような方針に従って進めた。

鉄鋼製造設備の模型実験と一口に言っても、各設備はそれぞれ異なつたメカニズムで支配されており、模型実験の理論や手法も相当異なつたものである。また、模型

実験について研究するにあつても実際のプロセスについての知識は不可欠であり、そのプロセスに関与したものの間でなければ十分な討論ができない。

そこで、今回は、高炉、製鋼、燃焼炉の三つのグループを編成し、それぞれのプロセスについて経験豊富な委員が各グループを分担して討論を進めることとした。

表 1 委 員 構 成

	氏 名	会 社 名	事 業 所 名
委員長	渡 辺 一 雄	大 同	中 研
委 員	林 順 一	新 日 鉄	設 技 部
	沢 田 郁 夫	新 日 鉄	第 一 技 研
	村 中 清 志	新 日 鉄	名 古 屋
	久 保 秀 穂	川 鉄	千 葉
	吉 川 文 明	川 鉄	水 島
	福 田 脩 三(旧)	鋼 管	中 研
	大久保 豊(新)	鋼 管	中 研
	石 井 俊 夫	鋼 管	中 研
	野 口 孝 男	鋼 管	京 浜
	加 藤 有 三	鋼 管	福 山
	鈴 木 豊	住 金	中 研
	栗 山 壽 志	住 金	鹿 島
	綾 田 研 三	神 鋼	材 研
	深 山 浩	神 鋼	神 戸
	橋 本 公 男	神 鋼	加 古 川
	椎 木 正 信	日 新	呉
	松 場 伸 三	日 新	呉
幹 事	陣 内 秀 信	大 同	機 械 事 業
	藤 田 憲 史(旧)	鉄 鋼 協 会	
	竹 内 正 幸(新)	鉄 鋼 協 会	

(昭和 60 年 9 月現在)

昭和 61 年 7 月 1 日受付 (Received July 1, 1986)

* 本会共同研究会熱経済技術部会模型理論とスケールアップ研究小委員会委員長 大同特殊鋼 中央研究所 研究第二部副主席 工博 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

模型実験は、もともと未知の部分の多い現象についてその全貌を知るのに有効な方法であるが、支配的な相似則（無次元数）を介して、模型における実験結果を実機へスケールアップすることができる。ここでもこの点に主眼を置き、プロセスを支配するメカニズムを十分検討し、これを通して相似則を導き出すことに多くの時間をさいた。さらに、相似則に基づいて模型の設計を試みた。

実験の手法は文献に基づいて調査した。特に共同実験は行わなかったが、燃焼炉では、一社から実炉と試験炉のデータの提供があり、このデータに基づいてスケールアップの手法を展開した。

溶鋼の流動については、前述のように水モデルが有効に使用されているが、一方、最近では流動の数値計算法が実用の域に達しており、模型実験と数値計算の結果を照合して判断することが多くなっている。また、両者は思考上でも共通する事項が多い。そこで、今回は特に流動の数値計算を研究対象に加えることとした。

2. 研究の成果

報告書の内容に従って研究の成果を述べる。

報告書は基礎編と応用編に分かれ、基礎編は、相似則について述べた模型実験の基礎の章と流動の数値計算の章によつて構成されている。応用編は高炉、製鋼設備、燃焼炉の模型実験について、各グループにおける研究の成果を取りまとめたものである。最後に模型実験の可視化の章を設けた。

2.1 模型実験の基礎

無次元数の導き方を例を挙げて述べた。i) 流動現象のように支配方程式が明確である場合、支配方程式から無次元数を導く方法、ii) 支配方程式は確立されていないが、支配する物理法則から無次元数を導く方法、iii) 関与する物理量から Buckingham の定理と π 定理に基づいて無次元数を導き出す次元解析の三つの方法について説明した。

i), ii) は物理量間の関係に基づいたものであり、応用編では i), ii) の使用例が多い。iii) における Buckingham の定理や π 定理は無次元数の本質に触れるものであり、いまいつそう活用されるべきものと思われる。

2.2 流動の数値計算

流動の数値計算の方法は相似則について多くの示唆を与えるものである。ここでは、まず、流動の数値計算の立場からみて、相似則の緩和、代表値の選定など相似則について見解を示した。

次に数値計算法の概要を述べている。まず、支配方程式であるナビエ・ストークスの方程式を述べ、差分法や有限要素法の各解析法を説明している。乱流モデルとしては従来の 0, 1, 2 方程式モデルから最近の Large eddy simulation や直接法にも言及している。

鉄鋼各事業所へ流動の数値計算に関するアンケートを行い、結果を一覧表にまとめた。使用プログラムは自社開発のものと市販のものがある。適用対象は広い範囲にわたっており、この分野の現状がよくうかがえる。

2.3 高 炉

現在の高炉の技術的課題は操業管理を目的としたシミュレーションモデルの作成と炉の長寿命化であり、模型実験もこれらを目的として開発される。前者に関する装入および装入物分布、レースウェイ、荷下がり、融着帯について、支配する物理法則を十分検討し、これから相似則を導いた。導出された相似則に基づいて 1/10 スケールの模型を設計し、さらに、文献に基づき実験例を調査した。

全般的に粉粒体の形状特性（内部摩擦係数、空隙率など）が重要なファクターである。今後、さらに、粉粒体の基礎的な性質に基づいた取扱いが必要であろう。

炉の長寿命化に関するものは最近のテーマであるが、これについては、炉底耐火物の熱応力に対するれんが目地のとり方や炉芯コークスを通しての湯流れについて新たに相似則を導出し、実験例について検討を加えた。

高炉全体の機能を表すために数学モデルが研究されており、また、高炉内ガス流れのように模型実験よりむしろ数学モデルによる研究の方が主流の場合もある。このような見地から、この章の最後に、高炉プロセスの数学モデルについて述べ、高炉全体をまとめた。

2.4 製 鋼

溶鋼の流動に関する相似則を統一的に論じた。すなわち、ナビエ・ストークスの方程式に基づいて、溶鋼のみの流動を扱う場合、ガスジェッティングを行う場合、ガスバブリングを行う場合についてそれぞれ相似則を導いた。また、均一混合時間についても混合の方程式に基づいて相似則を導いた。RH 脱ガス装置の上昇管はガスバブリングの典型的な形であるが、上昇管内の溶鋼の流動について改めて運動量方程式と気泡の上昇速度を表す式に基づいて、無次元数や吹込みガス流量と環流溶鋼流量の関係を表す無次元方程式を導いた。

実験例は、転炉の酸素吹精とスロッピング、トーチードカーにおける予備精錬、取鍋精錬、RH 脱ガス装置の各プロセスについてまとめた。

連続 casting では、介在物浮上に関する相似則を検討し、ノズル噴出角度やタンディッシュ内の堰が介在物浮上に及ぼす影響などの実験例を数多く調査した。また、鋳片のバルジングを始め水モデル以外の模型実験例についても調査している。

溶鋼流動に関しては支配方程式も明確であるため、相似則について面密に検討された。重力に関する無次元数であるフルード数についてたびたび討論されたが、取鍋・タンディッシュなどの重力系についてはフルード数の意味を再考する必要があると思う。

2.5 燃焼炉

バーナー噴流の基礎式について検討し、炉内のガス流れや混合を表す流体模型実験の具体的な設計を行つた。

実際の炉を考える上では、流動以外に、むしろ熱的現象を中心にした取扱いが重要である。このような場合、炉の縮尺比以外にバーナーの縮尺比が炉内現象の諸量の相似をつかさどることとなる。これについて精しく検討した。

すなわち、実炉と試験炉の温度を同一に保つことを前提条件として、さらに、バーナーの相似条件として、バーナー圧力損失を一致させるなどいくつかの条件を考え、これら条件に対して入熱量、火炎長、NOX 発生量などの諸量の実炉と試験炉における比を導出した。バーナー圧力損失一致の条件下で導かれたこれらの諸量の比は実炉と試験炉の実測データによる値とよく一致し、相似則の妥当性が確認された。

2.6 模型実験の可視化

可視化の方法は従来さまざまな工夫が凝らされているが、どのように用いるかは実験者各人に委ねられているような状態である。ここでは、まず、現在使用されている種々の可視化の方法やトレーサーの特徴についてまとめ、次に、高炉の荷下がりとレースウェイ、転炉、連铸タンディッシュ内の介在物の挙動、加熱炉バーナー噴流

についてそれぞれ可視化の事例を調査した。

3. 結 言

鉄鋼製造設備の模型実験について現在まで数多くの報告があり、製造現場で模型実験にあたる技術者はこれらの文献を手引きにして実験にあたることが多いが、目的に応じて相似則や模型の構成、あるいは可視化の方法が推挙されておれば便利である。

本小委員会ではこのようなことを念頭に置き取りまとめを行つた。理論面については多くの問題提起があり、大いに討論された。中には明確に結論を言い切れなかつた部分もあるが、これらの事項についても検討経緯は詳細に述べてあるので十分参考になるものと思う。

実験の手法の多くは文献調査によつたが、文献の著者にアンケートを行い、実験の細部を知るよう努力した。いずれにしても、多種多様な実験や可視化の手法について評価することは相当な労力を要し、これについては今後の活動に期待したい。

最後に、小委員会活動に関し種々ご協力下さつた関係各位に厚くお礼を申し上げる。

本報告書は昭和 61 年 3 月、本会から「鉄鋼製造に関する模型理論とスケールアップ」の題名で発刊された。