



鉄の歴史

戦後復興・発展期における我が国鉄鋼製造技術史—技術編 日本の鉄鋼生産における計測・制御の進展

野坂康雄

元計測部会長

Yasuo Nozaka

Development of Measuring and Control in Japanese Iron and Steel Industry

1 まえがき

日本の鉄鋼生産の堅実な発展は、需要家の要求に対するきめ細かな配慮と、計画通りの生産を可能にする体制によって実現された。この生産体制においては、各種の新鋭設備、新技術、効率的な生産管理方式とともに、計測・制御が重要な役割を果たした。高水準の計測・制御なくしては日本の鉄鋼生産の現在に見るような発展はなかったであろう。

計測・制御を鉄鋼生産の現場に導入して効果を挙げることは、それほど容易ではなく、初期から幾多の試行錯誤と研究開発の苦心がその背後にあったのである。実際には各社の積極的な人材確保と、多額の投資とにより、鉄鋼業における計測・制御の導入とその効果は、他産業には見られない広範囲、かつ高度なものに発展し得たのである。

筆者は戦後50年代から約30年、鉄鋼生産の現場で計測・制御の開発と推進の実務に携わった。また、昭和46～51年、日本鉄鋼協会共同研究会計測部会の部会長をつとめた。本稿ではこれらの経験と知見をもとに、鉄鋼生産における計測・制御の発展の概要を回顧を交えて紹介する。なお、記述は初期のことを主体としているものの、中には現在と二重映しになっている箇所もあることをあらかじめご了承ください。

2 鉄鋼生産と計測・制御システム、制御とはどのようなことか

制御とは対象の状態を所定の目標通りにすることである。実際には、この操作は自動的に行われることが多い。計測は制御を実行する場合に欠かせない機能で、これは対象の物理的状態量を、定められた単位量と比較して数値化

することである。この操作は連続的かつ自動的に行われる。システムとは互いに機能の異なる要素が結合され、全体としてひとつの目的機能を達成する構成で、制御も計測もその実態はシステムである。制御を実現するためには、種々の前提条件の整備、技術的および経済的可能性、複数の目標間の相反関係など現場的に解決すべき問題が多い。これを鋼片加熱炉の制御を例にして説明する。

鋼片加熱炉では抽出時の鋼片温度が制御目標であり、実際の抽出温度が目標値になるように入熱量増減の操作を行う。これは単純と思われるが、実際には種々の問題がある。まず在炉中の鋼片温度の実測ができない。そのために間接制御目標として炉内ガス温度を鋼片温度の代用にしなければならない。このように計測のニーズを直接満足するシーズ技術がないことがしばしば起こるのである。しかし、理論やシーズ技術がなくても制御と計測はニーズがあれば実現しなければならないところに現場技術者の苦労がある。

目標が複数になると制御は複雑になる。最適在炉時間、省エネルギー、厚さの異なる鋼片の最適加熱などのニーズは互いに相反することが多く、同時に満足できない。基本的には制御目標間の順位づけなどの調整が必要である。

上述の加熱炉温度制御に適用する技術は、フィードバック制御として一般化しているが、実際には既成技術をそのまま使えない対象が多い。目標温度が直接計測できない場合の対策、最適測温箇所の選定など理論にはないことが少なくない。

鋼片加熱炉では大体において連続性と定常性が保たれ、フィードバック制御が適用できる。しかし、転炉のようなバッチプロセスには適用できない。現在のところバッチプロセスの制御に対する理論はなく、それぞれ個別に考える必要がある。

バッチプロセスには適用できる制御理論はないが、転炉

てシステムエンジニア (SE) グループが自社内に確立されたのである。鉄鋼生産の計測・制御が産業界で群を抜いていることは、このようなSEグループによるところが大きい。

4 初期の計測・制御の特記事項¹⁾

戦後の日本政府の産業復興政策としてエネルギー (石炭)、電力、鉄鋼などの増産対策である傾斜生産方針が打ち出された。エネルギー政策では石炭の増産と同時にエネルギーの有効利用が中心となった。鉄鋼業界ではこれを熱経済技術の推進という体制で受けとめた。これは平炉、加熱炉などで無駄な燃料消費を防ぐことになるが、その実行のために流量計、圧力計、温度計などの「熱計器」の導入と使用法の確立が急務として進められた。具体的には日本鉄鋼協会、日本鉄鋼連盟、通商産業省通商鉄鋼局合同の鉄鋼技術委員会の傘下に熱経済技術部会が設置され、さらに計測部門の審議体制として熱計器専門委員会が発足した。この委員会は鉄鋼各社の関係者と東京大学などからの学識経験者で構成され、昭和24年から同27年まで活動した。この委員会は後年の計測部会の前身と考えられる。

4.1 当時の「熱計器」の概要

熱計器の中で最も重要なのは燃料、蒸汽、空気の使用量を計測する流量計であった。これについて炉内圧力を正微圧に保つための圧力計、平炉天井煉瓦などの過熱防止用の定置型温度計が導入された。光高温計は従来通り溶鋼や加熱中の鋼片温度の測定用に使われていた。排ガス分析は手動式が主流であったが、自動分析計が一部で使われるようになった。また、石炭量の連続計測用には全機械式のコンベアスケールが一部で使われ始めた。

熱計器専門委員会の活動の主眼は熱計器の普及とその活用、定着 (計器の管理、保全を含む) であった。従って制御については将来の必要性を認めつつも、推進の主目標とはされていなかった。しかし、この頃から加熱炉を中心に自動燃焼制御が始められていた。

「熱計器」の普及によって製鉄所内には「計器掛 (係)」のような職制が誕生した。この職制の活動はやがて鉄鋼における計測・制御の専門技術者の養成の始まりとなった。

4.2 計測機器の新旧の比較^{1),2)}

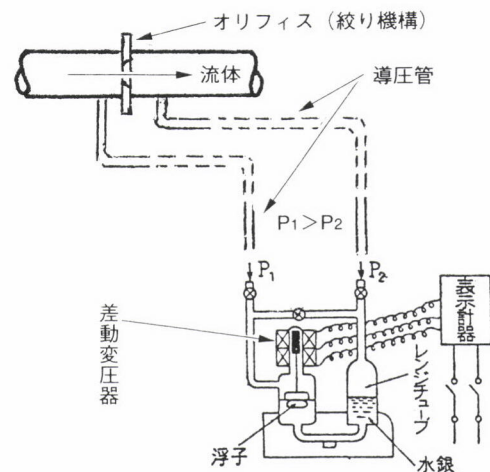
計測技術にはコンピューターや情報処理技術に見られるような長足の進歩はない。これは物理現象を計測する難しさを物語っている。現在の機器は信号の処理と伝送における性能と信頼性は大幅に改善されたが、信号検出の基本では依然として変りがない。次に代表的な計測機器について

新旧の比較をしてみる。

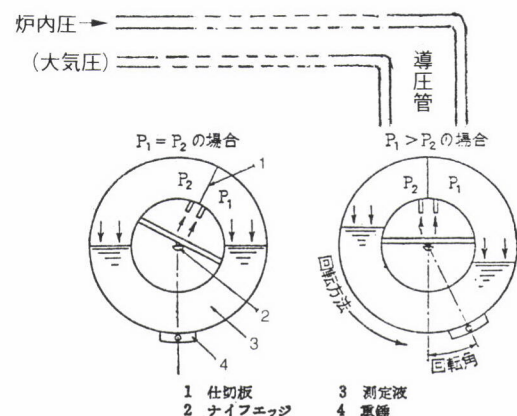
4.2.1 流量計の新旧について

現在の流量計には当時から使われている差圧式と容積式のほかに、電磁流量計、超音波流量計などが加わっているが、このうちオリフィスを用いる差圧式は依然として用途が広い。そのセンサ部である圧力検出機構は、圧力差を機械的変位に変換する原理において新旧同じである。異なるのはセンサ部の小型化と、ディジタル伝送によって現場設置が容易になったことである。

図2は初期の例で、(a)はU字管式差圧検出器、(b)はリングバランス式微圧計である。前者ではU字管の両脚にそれぞれ高圧と低圧を加え、水銀面の高低差を検出する。大型で多量の水銀を必要とした。夜間に水銀を盗まれ、指示がなくなることが時々起こった。後者は計器室に取付けられ、炉内の微圧は現場から太い (径25~50mm) 導圧管を布設して計器に導かれた。

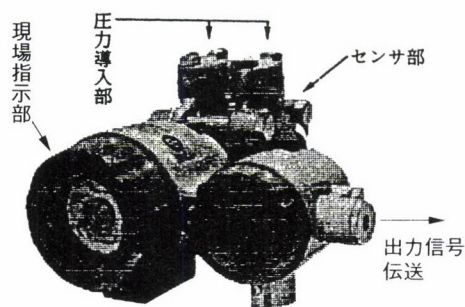


(a) U字管式差圧検出器 (総高約1m)

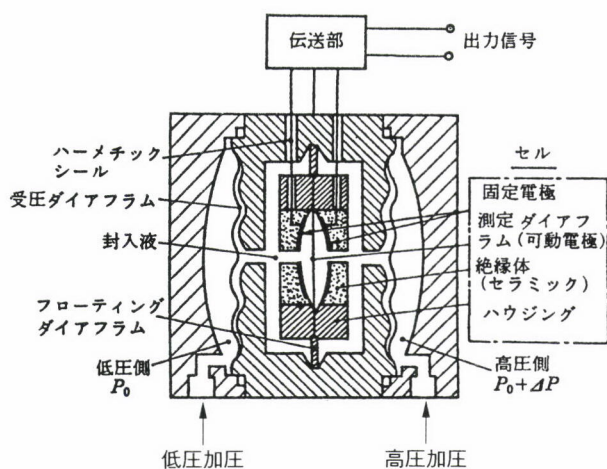


(b) リングバランス式微圧計 (径300~500mm)

図2 初期の圧力検出部の例



(a) 外観



(b) センサ部構造

図3 ダイアフラム式差圧センサ部の例

これに対して現在の差圧検出センサは図3のようなダイアフラム式で、加圧部を変えて高圧から低圧まで同じ方式で検出できる。小型で現場設置が容易で、導圧管は短くてよい。

4.2.2 温度計の新旧比較

初期の温度計は熱電温度計が主流であった。これは現在でも全く変わっていない。使用熱電対が白金・白金ロジウムとクロメル・アルメルであったことも同じである。異なるのは信号変換の進歩によって、伝送距離の制限がなくなったことである。表示計器類についても各種があり、使用上の自由度が格段に広がったことはいうまでもない。白金熱電対の素線は消耗品であるのに、当時の社内では貴重品扱いで、盗難防止など余計な管理を強いられたことが思い出される。また、ある製鉄所では白金素線を腹に巻いた泥棒が、逃走中に海に落ちて溺死したことがあったと聞いている。

放射高温計については初期には光高温計がほとんど唯一のもので、感度が高く自動計測ができるものは、一部で使われた光電管高温計だけであった。それが現在では光高温計が現場から姿を消し（ただし光高温計の標準電球は検定用として重要）、新しいセンサ（太陽電池、半導体センサなど）による高感度の放射高温計が多用されるようになってきている。また、全放射式も性能が改善され、低温用として用途が拡大されている。

4.2.3 分析計の新旧比較

分析計の進歩は特に遅れている。初期から現在までにガス成分と溶液成分について一応の機種がそろったというべきであろうか。これらの分析計の大部分は試料のサンプリング装置を必要とし、それが計測出力の遅れの原因となり、制御においても大きな問題であることには新旧変わりがない。分析性能は抜群なガスクロマトグラフがオンラインに使えないことは、分析計の根本問題を代表しているといえよう。しかし、最近になってジルコニア酸素計とイオン電極のように、サンプル不要の分析センサが実用になったことはまことに意義が深い。将来はこの種の分析センサが増加することが切望される。

固体の分析になるとますます問題は難しくなる。鉄鋼生産にとって、材料の性状を即時的に知ることは以前から変わらぬ願望である。それにもかかわらず、この分野の進展は皆無といっても過言ではない。現在実用になっているものには発光分光分析（カントバック）と焼結用中性子水分計、それに転炉サブランスに装着された凝固温度による炭素量計測が挙げられるに過ぎない。固体や溶体の成分と物性をその状態のままで非破壊的に知る方法はないものだろうか。

4.3 初期の制御と制御用機器について

前述のように鉄鋼生産における初期の制御は、高い潜在的ニーズの中に少しずつではあるが、その地歩を固めていた。ここでは熱計器の延長上にある自動燃焼制御と薄板連続圧延機の主電動機制御について当時の状況を簡単に述べることにする。

4.3.1 連続加熱炉と平炉の自動制御

連続加熱炉の自動燃焼制御（ACC）の構成の基本は現在も変わらない。ただし当時の石炭焚の炉では入熱量の制御はできず、炉内圧力制御だけであった。当時の加熱炉燃焼制御の効果は、その時点で稼働期間が短かったために定量的報告は多くない。炉内温度の変動が $\pm 10^{\circ}\text{C}$ になったこと、炉内圧制御で侵入空気が減少したことがそのおもな効果で

あった。

平炉の自動制御は実施例が少ないが、70トン、固定式塩基性平炉についての効果が報告されている。それによると純製鋼時間が手動時に比べて7°46'から7°01'に、1時間当り出鋼トン数は8,507トンから8,848トンに、重油原単位は150ℓから128ℓに改善された。また、大天井煉瓦の寿命は約40%延長されたと報告されている¹⁾。

4.3.2 薄板連続圧延機の主電動機制御²⁾

薄板圧延における制御では電動機の運転が中心であり、他の分野に比べて計測・制御に対する関心が高かったと思われる。そして電動機の制御など電気設備の制御は、制御対象の特性の違いから、現場では熱設備の計測・制御とは別個に進められていた。

当時の電動機の適用区分は、定速、非可逆圧延機には誘導電動機または同期電動機、可逆圧延機用はイルグナー方式であった。その後薄板連続圧延機の導入で、可変速度の直流電動機が初めて用いられた。しかし、初期の速度制御方式は電動発電機を電源とする電機子電圧制御方式であったために応答性が低く、材料の噛み込み時のインパクトドロップの補償が困難であった。この問題はその後水銀整流器の導入で一応の解決がなされた。しかし、水銀整流器は保守が面倒であり、この問題の解決はさらにその後のサイリスタによる直流電源にまたなければならなかった。

初期の速度制御は方式から見ると開ループ制御であった。しかし、間もなく圧延製品の品質の面から速度制御の制御精度向上のニーズが高まり、圧延ロール回転速度をフィードバックする閉ループ制御が定着した。これにAGC（自動厚さ制御）、インパクトドロップ補償など種々の制御が加えられ、薄板連続圧延機の主電動機の高速、高精度、高応答制御が確立され、当時の増産と高品質の諸要求には十分応えられるものとなったのである。

このような主電動機制御方式による効果は高く、その技術は他の圧延機主機の制御にも応用された。直流電動機による高精度、高応答の制御は、以後当分の間、圧延機制御の主流であった。しかし、さらに最近では後述のような画期的進歩の時代を迎えるのである。

5 開発期における計測・制御の進展

この時期の特色は、日本の鉄鋼業におけるこれまでにない大きな変革と発展が行われたことである。高炉、ホットストリップミルの大型化および転炉という全く新しい製鋼法の導入による生産性の急上昇がその原動力であった。これに続いてこれらの新技術をもとにした新立地計画も着々

と進んだ。当然のことながら、このような新時代の生産を安定かつ効率的に実行するための基本として計測・制御に対する期待度はますます高まっていた。ただし高い期待といっても、その中には希望的要素もかなり含まれ、実際問題として解決すべき多くの問題があった。しかし一方では、計測・制御技術の本質的なことと、その最適な適用法についてはかなりの理解と解明が進んでいた。これとともに専門技術者たちも、計測器の保全業務のみならず、制御システムの計画、設計、活用についても責任を負うべきことを自他ともに認識し、認識されるようになっていた。これに加えて適用技術、機器にも各種の進歩があったが、特にコンピューターが現場の制御に使えるようになったことは、これまでに見ない画期的なことであった。

このような背景のもとに、この時期の進展中顕著な新技術を、転炉およびホットストリップミルを代表例としてその実状を述べる。なお、高炉についても付言する。

5.1 転炉の制御システム^{3),7)}

1957年(昭和32年)、日本最初の転炉が導入された直後から、生産関係者は大きな困難に直面していた。製鋼時間が短かく、生産性が従来の平炉の数倍とされる転炉製鋼の成分、温度の的中率が低く、生産性が目標に達しないという問題がそれであった。

そのために関係者間では検討が始められたが、典型的なバッチプロセスである転炉に適用できる既成制御理論はない。そこで正攻法としての物理モデルによる制御システムの開発をする方針が決定された。これは転炉プロセスの物質収支と熱収支をもとにして数式モデルを作成することに帰するが、変数、パラメータともに数が多く、かつその中には同定が困難なものも少なくないために、モデルは非常に複雑になる。しかしいずれにしても、数式モデルと実操業との整合度を確認しなければならない。そのために八幡製鐵所で実行されたことを述べると、製鋼、制御、計測の各専門技術者から成るグループを発足させ、操業データと制御モデルとの対照作業を行った。これには当時としては最新のコンピューターを専用し、現場との電話連絡でデータの収集と解析が実行された。

その結果、非常に有望な見通しが得られ、それはやがて経営層の検討と決断によって実行予算がつけられ、ここに初めてコンピューターによって生産を実行する制御システムの誕生となったのである。ちなみにその時導入した制御用コンピューターは、何と機械語の24ビット機で、加算時間0.3秒、主メモリ0.6kW、外部メモリ28kW(ドラム)というものであった。しかし、これで当初の目標は十分に達成した。

この制御システムの基本は、制御モデルによって製造鋼

種ごとに予測計算を行い、装入原料と通酸量、ランス高さなどを決定するものであった。しかし、これだけでは高い中率は得られず、そのために終点における実データを統計的に処理し、その結果を使って次回チャージのパラメータの修正をする方式を取った。これをスタティック制御と称した。

スタティック制御によって炭素濃度、温度の同時的中率は手動による場合に比べて大幅に上昇したが、予測制御の精度の悪さという根本問題は解決されず、的中率は最高で60%程度にとどまった。その後種々の検討の結果、スタティック制御の弱点は、吹煉中の鋼浴情報がなく、終点予測軌道修正ができないことにありと認識された。その結果、溶鋼中の残存炭素濃度の実測が検討の対象となった。考えられた方法には排ガス中のCO₂、CO濃度の分析値と、脱炭速度の推移特性とから計算する方法、および鋼浴炭素濃度を直接計測する方法があった。前者では分析計の遅れが大きく、すぐには実用へのめどが立たなかった。

一方、鋼浴からの分析試料の採取は、プローブの投入、引き上げが思うにまかせず、その方法は断念された。その後は長期間の試行錯誤が繰り返されたが、その結果鋼浴中の挿入と引き上げが確実なサブランス方式が最適であると判断された。これは先端のプローブに温度計測用の消耗型熱電対とサンプル採取とその凝固温度計測のための小室を装着したもので、本体ごとサーボ機構により鋼浴中の定位置に挿入される。

サブランス計測は終点の2～3分前に行われ、そのデータはコンピューターを通じて以後の脱炭軌道の修正がなされる。これを現場ではダイナミック制御と称した。この方法はスタティック制御の精度を上げ、終点同時的中率はほぼ100%に達した。この効果が確認されて間もなく、すべての転炉にこの制御システムが導入されて現在に至っている。

5.2 ホットストリップミルの制御システム^{3),7)}

ホットストリップミルはもともと生産性の高い設備であるが、この当時から増産と品質に対する要求がさらに高まり、対策として設備更新、新設、スタンド増設が相いついた。品質面からの要求に対しては主電動機の容量増加と高応答化(回転部の低慣性構造)と、AGCの新設、増強が行われた。また、AGCの応答性上昇のために油圧圧下方式が登場した。

AGCの効果はあるひとつのコイル内の板厚を一定に制御できるが、ロット変更(鋼種、サイズの変更)時のセット替え(最適ロール速度、ロール開度決定)には効果はない。そのためにAGCの有無には関係なく、ロット変更時に

は従来通りの経験と試行錯誤によるセット替えが必要であり、ホットストリップミルの生産性阻害の大きな原因となっていた。

この問題を解決するために、圧延中の材料の塑性変形に関する圧延理論式から圧延制御モデルを作り、このモデルを使ってロット変更時に必要な最適セット替え指示値を計算し、即時的なロット変更を可能にするシステムが開発された。これによりホットストリップミルの本来の高生産性は、文字通りに発揮されることになった。

このシステムを実現するためには当然コンピューターが必要であるが、数式モデルとコンピューターがあるだけではどうにもならない。実時間の制御では限られたサンプリング時間内に信号入力、演算、制御信号出力が可能でなければならない。ところがこのシステムで基本とした圧延理論式は指数関数などを含む非線形部分が多く、そのままを制御モデルにすることはできず、式の本質を失わずに線形化するなどして演算時間の短縮をはかる必要がある。しかし、これには理論も汎用的手段もなく、使用者において独自に開発しなければならなかった。この経験は以後の制御システムの開発にとって貴重な技術ノウハウとして残された。

ここで用いられた制御モデル中には、重要なパラメータとして圧延材料の変形抵抗、弾性係数などの物性値を含むが、これらはいずれも実測できず、推定値を使わざるを得ない。また、このモデル式では材料中の張力変動による干渉を無視している。しかし、後述のように製品に対する要求がさらに高度化すると、物性値の推定精度や干渉要因についても考慮しなければならず、新たな制御モデルが必要となるのである。

5.3 高炉の計測・制御について

高炉は製鉄のシンボルとされているが、そのプロセスが複雑なために、転炉やホットストリップミルにあるような計測・制御上の進展は見られない。高炉の使命は無事故で予定の出鉄を続行することである。しかしかなり最近になっても出鉄量低下をもたらす事故は絶えず、また、巻替えのために製鉄所では片肺操業は不可とされ、複数の高炉の可動が当然と考えられて来た。ところが現在の中規模の製鉄所では他の製鉄所からの融通を得て、高炉は1本で十分とされるようになって来た。これはどういうことであろうか。それを一口に言えば、高炉各部の状況、特に内部状態の情報が得られるようになったことであると考えられる。従来から炉壁温度などおもに外周部の情報は、「花魁の簪」と呼ぶ人があるほどに多数の計測器によって検出されていたが、炉内状態についてはほとんど手がかりが得られないままであった。

高炉の内部情報の検出の初めは、60年代後半に設置された炉頂部工業テレビによるものであろう。これによって発見された装入原料の表面温度の異常部の発生は、炉内反応の不均一を推定する有力な情報として認められた。これがきっかけとなり、装入後の原料の反応状況把握に対する関心が高まり、新たに炉腹ゾンデを設置するなどの試験が進み、従来は推定の域を出なかった内部状態が少しずつ明らかになって来た。さらに70年代になって行われた休止高炉の解体調査により、炉内反応の状態をかなりはつきり知ることができた。

このような調査、研究の結果、高炉の解析的制御は非常に困難なものの、実操業においては安定な炉内反応を維持するための各種の対策が実行された。原料装入の均一化、装入時の原料表面のプロファイルの制御、炉熱、特に炉底部の炉熱レベルの安定化などがそれである。しかし、高炉全体を制御できる一元的制御モデルはまだ得られていない。

5.4 コンピューターの導入について

鉄鋼におけるコンピューターの導入は50年代中ごろに始められたが、当時はまだ活用の段階には至らなかった。その後大手企業では大型事務用の機種が導入され、一部の事務の機械化が行われ、それが契期となってコンピューターへの関心と期待が生まれたのである。

このような時期にコンピューターの効果をはつきり認識させたのが、転炉とホットストリップミルの制御システムであった。これらのシステムの導入費用は、当時は相対的に高額であったが、その効果の高さは経済的にも十分納得し得るものであった。これが大きな刺激となり、コンピューター利用に対する要望が急速に高まった。転炉、ホットストリップミルに続いて他のプロセスも導入の対象になった。しかしこれとは別に、生産工程の実務をコンピューターシステムに置き換えようとする意図は、さらに大きな効果を生む重要な発想であった。

受注生産が宿命である鉄鋼生産における従来の工程管理は非常に複雑なものであった。多数の工程要員が必要な上に、不測の事態発生に対しては対策に時日がかかるという問題を内蔵していたのである。この問題の解決にコンピューターを利用したいという要望が出たのはむしろ当然のことであった。しかし、この要望が具体化されるまでには問題が山積していた。その初めに実際の生産工程をモデルにした予備調査が行われたが、その結果は前記の要望と期待を大幅に後退させるものであった。その原因は長期間人間の経験と慣れに支えられて来た工程実務は余りにも複雑で、簡単にコンピューターに置き換えられるものではないことが発見されたことにある。人間のもつ広汎な自由度

のもとに行われて来た実務は、自由度が低く、硬直性の高いコンピューターにはできないことを見せつけられたようなものであった。コンピューター化には例外処理を最小限にするなどの必要な事前準備が不可欠であることを学んだわけである。

このような事情から在来の生産工程に対するコンピューターの導入は、その時点では断念せざるを得なかったが、これとは別に新立地計画という大きな道が開かれていた。新立地計画で最大の問題は多数の工程要員であった。この問題に直面した担当者間では、ただちにコンピューター化の可能性が浮上した。人間の手が入り込んだ既存工程では不可能であっても、新立地での業務の単純化とロジック化が可能になればコンピューター化の可能性は高く、工程要員の削減という大きな効果が得られる、という確信が生まれたのである。

ところがその実現に当ってはコンピューター故障時の生産停止という大きな問題があることがわかった。これは経営上当然の要求ではあるが、コンピューター故障時にも生産を続行するならば、人的、物的バックアップが必要となり、かえってコンピューターシステムの効果を減殺することになる。この矛盾はコンピューターの故障時には生産は停止する、ただし最短時間で復旧すべし、というトップの決断によって解決した。

これらの経緯を経て、最初の大規模コンピューターシステムによる生産工程管理は1968年、新設の一貫工場の操業開始とともに実現したのである。このシステムにより生産は計画通りに実行され、万一工程内に不測の事故が起こっても、非常に短時間で復旧できるという大きな効果が確認された。また、これによってユーザーサービスにも貢献することになる。このシステムは生産ラインに定着し、その後のオンライン工程管理方式の始まりとなった³⁾。

6 より高いニーズに対応する計測・制御

初期から開発期を通じて進展した鉄鋼生産の計測・制御は、その効果によって生産ラインの中に定着した。計測・制御システムは生産設備そのものとして位置づけられ、生産と設備のすべてにわたって計測・制御を前提とするようになった。同時に計測、制御、システムの専門技術者たちは、強い責任感のもとに新たなニーズに対応して行ったのである。

新たなニーズとしてはより高度な品質要求、工程の連続化、省力化、徹底した省エネルギー、より高度な環境保護が挙げられる。ここではそれらの中からいくつかの事例を紹介し、あわせて関連する事項について述べる。

6.1 ホットストリップミルにおける新しい品質制御⁷⁾

ホットストリップミルではAGCと仕上げ圧延機自動設定、および幅方向厚さ制御により板厚精度、形状ともに満足すべきレベルに達した。しかし、その後板厚精度をさらに上げる新たな要求が起こったために、従来の変数であった圧下量だけでなく、スタンド間張力の影響を考慮しなければならなくなった。実際には一変数のフィードバック制御ではなく、二変数の非干渉の制御としなければならない。さらに使用する材料の弾性係数、変形抵抗などの物性値の同定精度をより高くする必要がある。しかし、これには限度がある。理想的には物性値を計測できればよいが、現在のところその可能性は薄い。実際には種々の対策により、ほぼ目的を達成しているが、もし物性値の高精度計測ができれば、複雑な制御方式ではなく、古典制御のフィードバックで十分ではないかと考えられる。

6.2 連続鋳造のモールドレベル制御⁷⁾

連続鋳造は転炉と一体となって鋼材生産工程の始まりとして重要な工程である。おもな制御はモールド内の溶鋼レベルの制御と、鋳片の温度制御である。前者では溶鋼レベルを検出し、その信号でタンディシュのスライディングノズルの開度をPIDフィードバック制御するが、実際には注入管の劣化による剝離物のモールド内落下などによる予期しない外乱があり、このままでは鎮静凝固に支障が起こる。これを防ぐために各種の現代制御理論や新手法をPID制御に重ね、ロバスト（頑健）制御を目指している。ただし各社、各所で採用している新理論、手法は一樣ではなく、効果も大同小異で決定版はないようである。

一方、鋳片の温度計測は冷却注水にさえぎられてほとんど不可能に近い。また、冷却における抜熱の過程を数式モデルで表すことも容易でなく、鋳片全長にわたる温度制御は非常に難しい。現在ではリアルタイムのシミュレーションによって伝熱、凝固などの現象を予測しながら注水量制御を行っている。このモデルは鋳片内の液相、固相の厚さ、温度分布に応じて断面内の設定点数ごとに計算をして作られる。計算点数を増加すれば精度は上がるが、演算時間が長く応答性が悪くなる。ここにも制御精度と応答性の相反関係を見る。

6.3 制御理論について⁵⁾

汎用の制御理論として最も多く適用されているのは古典制御理論である。これは一変数系に限られるが、わかりやすく、適用しやすいという長所をもつ。しかし、多変数系や干渉系には原則的に適用できない。これに対して現代制御理論にはそのような制約はない。ただしそれは理論上の

ことで、実用上は理論が難解であり、適用法も簡単でないために、導入例が少なく効果も十分には確認されていない。鉄鋼界では現代制御理論の有効活用に向けて技術者たちは努力を続け、他産業と比較して適用例は少なくないが、まだ定着したとはいえない。このような理論と実際とのギャップには解消のめどは立っていない。

6.4 荷役、ハンドリング、検査、分析の自動化について

鉄鋼生産の主工程では大部分が繰り返しプロセスであるから、汎用制御理論が適用できない対象を含めてシステム制御は可能である。しかし、荷役、ハンドリングは鉄鋼生産ではきわめて重要でありながら、不特定かつ一回限りの作業であることから、その自動化は現在でも実現していない。クレーン荷役のように、すべての操作を人間が行う作業を、そのまま自動化することはほとんど不可能なのである。逆にいえばこの種の作業でも、あらかじめ作業の定形化ができる場合は自動化は可能である。コイルヤード、厚板精整工程などに適用例がある。荷役やハンドリング作業においては、人間がする通りを自動化することは至難であり、自動化するならばあらかじめその作業を機械装置に置き換えるなど、自動化に適した準備が必要なのである。

品質検査の内容は多岐にわたるが、そのうち省力化、労働環境改善のニーズが強いのは表面欠陥や形状の目視検査の自動化である。これは人間の視覚に代わるセンサの問題に帰する。かなり以前から薄板、メッキ鋼板の表面検査用の光学的手段の開発が進み、最近ではレーザー技術を使って実用上ほとんど問題のないレベルに達した。表面欠陥のほか内部欠陥の検査で最も進んでいるのはUSTによる方法である。特に需要家の要請の高い厚板とシームレス鋼管などでは、オンライン連続式の自動検査が定着している。

従来から行われている各種の材料検査、特に機械試験については、試験機そのものの自動操作はできても、試験片製作を含めると自動化は完全とはいえない。理想的に言えば試験片なしに、かつ非破壊的に引張り強さ、剪断強さなどがわかることである。さらには硬さ、じん性、脆性、磁性などの検出センサが開発されることが将来の目標であろう。

オンライン分析については4.2.3で述べたように、古くて新しい問題が多く、技術的進展は依然として遅い。溶鋼表面からの放射スペクトルを利用した成分分析のような直接計測は長年来の要望であるが、これについては嘗て通商産業省の大プロジェクトの研究テーマに挙げられたが、その成果については不明である。

6.5 高度にシステム化された生産と人間との関係について

さきに図1で見たように、初期の生産では人間が製造工

程と設備に密着し、生産の進み具合を肌で感じつつ操業、運転をしていた。それが現在では人間は制御室内にとどまり、CRTの画面を見て制御操作をするようになった。つまり生産の現場を見ない、見なくてもよい形になっているのである。制御操作者はCRTというマンマシンインターフェースを通じてのみ生産現場と接するのである。驚くべき変化であるが、これが本当に進歩なのであろうか。確かにこのようなシステムは生産にも人間にも多大な便益をもたらした。システムの故障時の処置法もすべてが用意されているから心配はないであろう。

しかし漠然とではあるが一抹の不安は残る。複雑な自動化システムのオペレーターが最少人数に絞られていることが、異常時の問題にならないであろうか。異常時には生産の一時停止、事故原因の探索と確認、対策と処置など緊急措置が必要である。この時オペレータにかかる精神的、肉体的負荷はきわめて大きいはずである。責任感から来るストレスの集中は決して低いものではない。幸いにして鉄鋼生産ではこのような原因で大事故に至ったことはないが、複雑なシステム中で働く人間の問題には何らかの対策が必要である。

鉄鋼の計測・制御で思い出すこと

世界最高のレベルに到達した日本の鉄鋼業を支える基盤のひとつである計測・制御は、それ自体もまた斯界の最高技術水準にある。これはその発展の実務に携わってきた技術者たちにとって大きな誇りである。しかし一方においては、日本の鉄鋼生産はますます厳しい環境下にあり、技術者の肩にかかる責任も一層重くなっている。これを乗り切るためには、これまでの蓄積技術を活用しつつ、さらなる開発への努力が必要である。

ここではこのような思いをこめて将来の発展を望みつつ、今までの歩みを回顧して思い出すことのいくつかを記すことにする。

7.1 鉄鋼の計測・制御はどのようにして成功したか

日本の鉄鋼生産における計測・制御を高いレベルに到達させた背後には、メーカー、学界など多数の支援があったことはいうまでもない。しかしここでは外部からの支援と並んで、鉄鋼企業としての独自の開発努力が重要な要因であったことを強調したい。

鉄鋼生産では生産プロセスの特性、機器設置環境などの理由から、単に既成の技術、機器を導入するだけではニーズは完全に満たされない。これが鉄鋼各社における独自の開発努力を促したのである。それを実行するためには優秀

な人材の確保が必要であるが、これについては各社ともにトップの判断に従って早くから計画し、実行した。

次に技術者の充足の経過を簡単に述べる。まず前述の熱計器の使用開始の時期には、自家修理のために若干の要員が配置された。その後しばらくすると一部の大学では計測専門学科からの卒業生が産業界に採用されるようになり、鉄鋼でも少数ではあるがこれらの技術者を迎えることとなる。ただしこの採用は、化学、石油などに比べるとまだ本格的ではなかった。本格化し、毎年の採用計画に組み入れられたのは50年代以降のことであった。さらに50年代半ば頃からの高度成長に合わせた新設備、新立地計画の推進で技術者の採用にも拍車がかかり、計測・制御の専門技術者の配置は累積的に増加した。この時期には採用数において石油、化学などの他産業をしのぐに至った。この間には新計画遂行のための組織が職制化され、その中に計測・制御に関する専門技術者のチームが設定された。

この体制はその後も拡張がつづき、必要要員数が不足することがしばしばであり、採用担当者は常に忙しい思いをしたものである。要員の充足は新規採用のみならず、社内他部門、例えば電気関係の部課からの転属も少なくなかった。コンピューターの導入増加とともに、ソフトウェアの専門技術者もかなりの数になった。ソフト要員には事務部門での経験者も考えられたが、生産現場や設備に関する基礎知識の点から転属は多くなかった。

一方、新規プロジェクトだけでなく、既設の計測・制御設備の保守、技術開発、研究調査の業務も次第に増加し、内容も複雑となった。これらに対しても技術者の充足が行われ、その場合は新人の配置後教育訓練が終わると、経験者をプロジェクトチーム要員として送り出すというしきたりがしばらくの間続いた。転炉、ホットストリップミルなどの自動化システム開発のためのチームが、職制化されて成功したことは前述の通りである。

このような体制のもとに行われた計測・制御システムの計画、実行は生産工場、生産技術を始め人事、労働、経理など関係部門との緊密な協力のもとに進められた。実行予算については、他の設備投資同様の厳密な評価によって査定を受けた。しかし、その中には新技術開発を目的としたものも少なくなく、これは計測・制御に対する大きな期待と、未知技術に対する企業のチャレンジ精神の現われであったと考えられる。

また、新設生産工場の計画では、新規採用の生産要員数と計測・制御による省力化との関係が第一に審議されたことも、計測・制御が生産の中に定着していたことを表わしている。これとともに計測・制御の内容はより高度、広範囲となり、設備予算中に占める比率も初期に比べて大幅に

増加して現在に至っている。

7.2 生産現場での計測・制御の受け入れについて

生産現場では計測・制御のうち、計測の必要性はかなり以前から認識されていた。人間の「勘」だけでは適正な作業ができないことがわかっていた。しかし制御に対してはそうではなかった。計測器によって生産プロセスの実態がわかれば、制御操作は自分でできるという現場の自信が強かった。そのため制御システムは不要か、あるいはアクセサリと見られていた。このように初期には現場からははっきりした拒否はないものの、積極的に導入をはかる気配はなかった。

しかし制御システムの進歩と生産作業への導入の検討が進むにつれて、現場の考え方には少しずつ変化が現われ、制御システムに対する関心が次第に高まり、実際に効果が認められ始めると、それまでの関心は実際に導入したいという希望に変わって行ったのである。

これについて思い出されるのは、その段階でも生産現場ごとに受け入れの姿勢が違っていたことである。率直に言わせてもらおうと、圧延、特に薄板圧延では導入要求が一番高く、転炉では半々という感じであった。しかし、高炉部門でははっきりした要求はなかった。

薄板圧延では早くから大型圧延機の高速運転という難しい問題を経験していたことと、設備上システム化の条件が他に比べて整っていたのがその理由と考えられる。転炉では平炉での経験からオペレーターは自信をもっていた一方では、未経験の新プロセスによる製鋼の難しさに対する不安感があったのではないと思われる。

これらとは違い、高炉ではもともと炉況の把握が難しく、操作の判断に勘と経験に基づく苦労を重ねてきた。そのため人間にとっても難しいことはコンピューターには到底できない、と考えられたのではなかろうか。ここには長く人間によって操作されてきた生産様式をシステム化する難しさの実感がある。この実感は常に考慮されなければならない。

さらに同じ転炉でも当初は三交代の組ごとに対応の違いがあったようである。それはコンピューター制御システムを自分たちのものとして活用する組と、参考程度とする組とでは、的中成績に差があったということである。この違いはほどなく消えたことはいまでもない。このように現場の操業者が、生産の責任を達成するために、制御システムを全面的に活用した姿勢が日本の鉄鋼生産における自動化の普及を促進したと考えられる。

外国ではこの事情がかなり違っていたようである。社内で実績を挙げた制御システム技術を海外の製鉄企業に提供した時、先方では制御システムをオペレータの誤操作の防

止用と考えていたのである。生産管理者とオペレーターとが一致協力して操業する伝統をもとにして構築したシステムでは、そのようなことは第一目標ではなかったのである。

7.3 計測・制御用機器の進歩とメーカーの協力について

日本の工業用計測器の歴史は古く、すでに1920年代には製鉄用の光高温計が国産されていた。また、戦前からドイツやアメリカの技術を導入して流量計、圧力計、油圧式制御装置などの国産が行われていた。しかし、その生産が盛んになったのは戦後である。

当時信頼性が高かったのは従来から外国技術で生産していたメーカーの製品であった。戦後はそれら以外に新規参入のメーカーも多かったが、製品は正直にいうと試作的なもので、現場使用には耐えなかった。新規参入メーカーには総合電機メーカー、精密測定器メーカー、電気計器メーカーなどがあり、それぞれ技術の伝統が違っていたが、いずれも工業計測器、つまり現場で長時間高精度で使用できる性能についての経験不足が信頼性不足の原因と思われる。しかし、その後は各社とも信頼できる優秀な製品を製造するようになり、在来メーカーをしのぐ企業に成長した所もある。計測器使用で現場としての最大の関心はメーカーの保守支援体制であった。特に中央から離れた地にある製鉄所では問題であった。しかし、間もなく系列修理会社の設立などによって解決された。また、使用者側の計測器の精度維持、トレーサビリティの確保に対する活動も盛んになり効果を上げた。

初期の計測器は4.2で述べたように、大半が機械機構で構成されていた。指示、記録など現在から見ても実に巧妙なものが多かったが、修理には特殊技能が必要であった。それがやがて電子管式、電子式となり、さらにIC回路やデータ伝送法の進歩によって現在の姿となり、性能、取り扱い法ともに便利になった。ただし現在の製品は信頼性は高いから一応安心できるが、もし修理を必要とする時にはほとんどお手上げである。これは国内では問題ないにしても、海外に輸出したものについてはどう考えたらよいのだろうか。

制御用コンピューターの製造は大手の総合電機メーカーおよび一部の計測機器専門メーカーによって始められた。開発期になると機種が多くなり、選択に迷うこともあった。その中で最も問題となったのは、コンピューターのオンライン・リアルタイム性能の違いである。これは事務用など多量の情報をまとめて処理する機種と、対象プロセスに忠実に従って処理することを必要とする機種との機能の違いに起因する。制御用では実行プログラムは短くても、処理には高い応答速度が必要である。当時のコンピューターは

現在に比べて処理速度が低く、記憶容量が少なかったことも原因のひとつであるが、致命的な原因はOS（当時はモニターなどと呼んでいた）の内容の差異にあったのである。

OSの機能はメーカー側の限られた技術者の設計思想、企業としての販売計画に左右され、かつ多額の投資を必要とするから、使用者側の要請があっても、メモリーの増設程度にとどまり、機能の変更はほとんど不可能であった。この事実は当初は導入時にはわからず、問題発生後に判明することが多く、担当者は非常に困った。メーカーからの種々の協力を得て不満足ながらシステムの実用にこぎつけたこともあった。この経験から、より高い応答速度を必要とする圧延制御用と、応答性がやや低くても差し支えない対象向けの機種を区別して選ぶという知恵が得られた。この考え方は現在でも同じと考えられる。

コンピュータのソフトウェアの対価については、初めのうちは付属物で無償という通念で取引された。しかし、ソフト費の比率が高くなると大きな問題となり、使用者側でも次第に考え方を考えるようになった。根本的にはソフト費を人件費コストと見るか、完成品の対価と見るかは、現在でも見解の分かれるところであろう。

メーカーからの協力については多岐にわたり、ここで詳しく説明できないが、初めに述べたように鉄鋼の計測・制御の発展に寄与したことは絶大で感謝に耐えない。その中には制御システムの海外輸出における協力も含まれる。

また、必要によっては新技術開発のために共同研究をお願いすることがあったが、利害関係を超えて長期間協力していただいた。新しいセンサの開発などでは、鉄鋼側としても多大な成果となったことについて深く感謝するところである。

7.4 計測部会について⁴⁾

計測部会の前身は鉄鋼協会熱経済技術部会熱計器専門委員会であるが、当委員会はその後昭和30年に計測分科会として再編成された。しかしこの分野の進展にともない、コンピュータ制御システムなどが加わり、かつ対象範囲も熱設備に限定されなくなった。このような事情から、昭和35年に熱経済技術部会から分離独立して新たに計測部会となったのである。その活動を見ると、昭和36年2月に第一回の部会が開催されて以来、昭和51年2月で第62回を迎えた。その時点でのメンバーは鉄鋼会社16社、計測・制御機器メーカー15社および若干名の学識経験者から構成された。当時の部会は年に三回開かれ、毎回100名を越す出席者があった。2日間の日程であったが提出資料が多く、時間切れになることが多かった。会場はメンバーの鉄鋼会社の製鉄所とメーカー各社が交代で提供し、部会終了後は現場

の新技術あるいはメーカーの新製品についての見学と紹介が行われた。

計測部会の構成メンバーは他の諸部会と異なり、鉄鋼以外に学識経験者とメーカーを加えている。これは発足以来のことで、当時は専門の技術者は皆年令的に若く、部会長には幹事会社の役員または本社の部長クラスが選ばれていたが、専門技術についての指導と方向づけのために学識経験者の代表として東京大学計数工学科の教授に副部会長をお願いしていたのである。また、メーカーの参加の目的は、使用者側は機器の進歩と技術の情報の入手を効率化するため、またメーカー側は使用者のニーズの動向と新技術をより正確に知り、協力して鉄鋼生産における計測・制御の高度化するニーズに応えるためであった。

計測部会には計測・制御以外にはかり(秤)についての専門グループとして秤量分科会が設置されていた。製鉄業は運搬業の異名をもつほどはかりは重要である。はかることは重量計測であり、計測の一環であるが、古く江戸時代からの中央または地方政府の管理下に置かれていた伝統と因習があり、そのために秤量器は一般の計測機器とは業界を含めて別個に扱われていた。計測部会に秤量分科会が設けられたのもこの経緯による。しかし、昭和26年に旧度量衡法が廃止されて新たに計量法が施行された以後は、はかりの管理は取引用を除き、使用者の自主管理となった。これと前後してはかり自体にも全機械式からロードセルによる電子式などの進歩があり、はかりは生産用の重要な計測器として計画され、管理されるようになったのである。

計測部会は当初から計測のみならず、「制御」や「システム」の問題を対象にして来た。しかし、部会名称は依然として計測に限られる印象を与えるものであった。これはその後になって計測・制御部会、さらに制御技術部会と改められ、名実ともに備わって現在に至っている。

8 むすびーもの作りは時代遅れかー

鉄鋼における計測・制御の発展の過程についていくつかのことを思い出すままに述べた。ひと口にいつて現在の状況は、初期のレベルからは考えられないような発展ぶりである。初めは無用かせいぜいアクセサリとしか考えられなかった制御システムは、今や生産に不可欠となり、生産と密着した。こうなったのは単に進歩した技術や設備、機器を導入した結果ではない。あくまでニーズに対してひたすら努力を続けてきた成果である。

かくして生産と計測・制御とは、それによって得られた効果のみならず、互いに影響し合って新しい生産様式や設備を実現させた。これは最近の注目すべき進歩である。制

御をより容易にするためのプロセスの変更、メンテナンス・フリー・システム、より高い応答速度を追求した結果としての圧延主電動機の交流化（ベクトル制御）などの設備改善にその実例を見る⁶⁾。計測・制御と生産とは、今後も緊密な関係のもとに進歩するであろうし、この進歩に大いに期待したい。

その一方ではもの作りは時代遅れだという世の風潮がある。情報関係の華々しい進出に刺激された軽薄な考えである。なるほど情報技術は画期的な便益をもたらした。しかし、それは生産をより活性化するために多大の効果はあるが、生産に取って代ることはできない。生産は人間の生活にとってあくまで必要であり、まだまだ解決、改善すべき問題が山積している。計測・制御、それに情報を含めて生産と一体となり、今後とも健全に進展すべきものであることを忘れてはならない。

最後になるが本稿執筆には、当時の計測部会幹事であっ

た藤井國一氏（現(株)ニレコ）から有益な助言を戴いた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 熱経済技術要覧 計測編, 日本鉄鋼協会編, 丸善(株), (1953)
- 2) 自動制御便覧, 自動制御研究会, (株)コロナ社, (1957)
- 3) 鉄鋼業のコンピュータ・コントロール, 野坂康雄編著 産業図書, (1970)
- 4) 野坂康雄, 中沢尚次, 藤井國一: 鉄と鋼, 62(1976), 1278
- 5) 北森俊行: 材料とプロセス, 6 (1993), 1200
- 6) 歳弘卓也: 鉄と鋼, 79 (1993), 272
- 7) 野坂康雄: 産業システム制御, (社)計測自動制御学会, (株)コロナ社, (1994)

(1997年7月1日受付)