



「鉄と鋼」第100巻記念連動記事  
エポックを作った人物紹介-11

## 美坂佳助博士と圧延機の制御

Dr.Yoshisuke Misaka and His Contribution to Control of Rolling Mills

高橋亮一

Ryoichi Takahashi

大阪大学 大学院工学研究科  
附属フロンティア研究センター  
特任教授

### 1 はじめに

美坂佳助博士は1960年に住友金属工業に入社、中央技術研究所において、熱間平均変形抵抗式の導出、多変数系であるタンデムミルの影響係数解析、そして圧延理論に基づく国産技術によるホットストリップミルの計算機制御の開発に中心的役割を果たし、圧延理論に基づく数学モデルが実機で有効に活用できることを明確にした。引き続きコールドストリップミルや厚板ミルなどへと展開、さらに高炉、転炉、CCなどの鉄鋼製造プロセス全般に関する制御モデルの研究を手掛けて、多くの先駆的業績を上げた。本稿では、塑性加工と自動制御に関する美坂佳助博士の功績について記載する。

### 2 塑性加工・圧延技術の研究者として

1960年代の日本の鉄鋼業は薄板製造体制の確立が推進されていた時期であり、和歌山製鉄所でもホットストリップミルの建設が計画されていた。

美坂佳助氏は、このような時期に東京大学工学部機械工学科を卒業し、住友金属工業中央技術研究所において、塑性加工ならびに圧延機に関する研究に従事した。最初の仕事として岡本豊彦氏の指導のもとで熱間変形抵抗の測定に着手した。1960年10月から1年間は東京大学生産技術研究所鈴木弘教授のもとに研究生として派遣され、塑性加工、塑性力学、圧延技術の研鑽を積んだ。その後、ホットストリップミル仕上圧延機の圧延荷重の計算などの研究に従事、1962年3月のホットストリップミル稼働に立ち会った。1964年からはホットストリップミルの計算機制御システムの開発に従事し、圧延機のセットアップモデル開発の中心的役割を果たした。この時期の美坂氏が塑性加工・圧延技術の研究者として取り組んだ研究課題である熱間変形抵抗、タンデムミルの影響係数、ホットストリップミルの計算機制御について以下に述べる。



写真1 美坂佳助博士

#### 2.1 熱間変形抵抗

材料の変形抵抗は、塑性加工の理論を用いて圧延の実作業における圧延荷重や圧延トルクなどを求めるための必須の物性値であるが、鋼種、加工温度、ひずみ速度、加工度等によって変化する。そのデータベース構築のため日本鉄鋼協会圧延理論分科会の共同研究会が1955年に発足し、同一サンプルを各社で測定して比較するなどの活動がなされた。美坂氏は、高温における鋼の変形抵抗を研究していた池島俊雄氏から継承した落重式衝撃圧縮機を用いて普通炭素鋼の熱間平均変形抵抗を算出する実験式(美坂・吉本の式)

$$k_{fm} = \exp\left(k + \frac{A}{T_k}\right) \cdot \varepsilon^{0.21} \cdot \dot{\varepsilon}^{0.13} \dots\dots\dots (1)$$

$$A = 2851 + 2968 C - 1120 C^2$$

$$k = 0.126 - 1.75 C + 0.594 C^2$$

$k_{fm}$  : 平均変形抵抗 (kg/mm<sup>2</sup>)

C : 炭素量 (%)

$T_k$  : 絶対温度 (K)

$\varepsilon$  : 加工度 (対数ひずみ)

$\dot{\varepsilon}$  : ひずみ速度 (1/sec)

を導出し、炭素量：1.20%以下、対数ひずみ：0.5以下、ひずみ速度：30～200 1/sec、加工温度：750～1200℃の条件のもとで実用上十分な精度を持つことを確認している<sup>1)</sup>。この熱間平均変形抵抗式は、後述のホットストリップミルの計算機制御で圧延荷重計算に適用されたのは無論のこと、現在でも熱間加工機械の設計や熱間加工作業の操業基準の作成、また熱間加工をFEM解析する際には応力-ひずみ曲線に換算して、一般に広く活用されている。

## 2.2 タンデムミルの影響係数

タンデム圧延では、ロール開度やロール回転数を操作変数として、板厚や圧延荷重、圧延トルクなどの制御変数が変化する多変数系となっている。美坂氏は、ホットストリップミル仕上圧延機において、各スタンドのロール開度の微小変化が仕上板厚にどのように影響を与えるかについて、Simsの熱間圧延荷重式を用いて解析を行い、実機試験により圧延理論の検証を行った<sup>2,3)</sup>。因みに、タンデムミルにおける操作変数と制御変数の関係を示す「影響係数」というネーミングは鈴木弘教授によるとのことである。

スタンド間張力の影響が大きいコールドタンデムミルでは、操作変数と制御変数との関係はホットストリップミル仕上圧延機よりさらに複雑である。BlandとFordの圧延理論式を近似したHillの式を用いて影響係数を求め、実機試験にて理論の検証を行っている<sup>4,5)</sup>。影響係数による解析は、冷間圧延における板厚制御の操作変数選択に重要な指針を与えるものとして現在でも広く活用されている。特に、全スタンド油圧圧下を採用した1971年稼働の鹿島製鉄所コールドタンデムミルでは、影響係数による解析をもとに油圧圧下による等価ミル剛性係数の最適化や張力一定制御をベースにした張力・板厚制御系が実機適用されて注目を浴びた<sup>6-10)</sup>。

## 2.3 ホットストリップミルの計算機制御

1960年代は、電子計算機の科学技術計算や情報処理、生産現場への普及が急速に進められていた時期であり、鉄鋼製造プロセスへの計算機制御の導入も欧米で開始された。ホットストリップミルでは、米国 McLouthの Detroit工場 (1962年設置) 等で計算機制御システムの導入がなされていた<sup>11,12)</sup>。

ホットストリップミルの計算機制御の機能の中でも、仕上圧延機のセットアップ制御は、様々な材質・寸法の成品を圧延するために圧延機のロール開度やロール回転数を材料が圧延機に噛み込む前に設定する機能で、良好な成品を安定に生産するための最重要機能である。仕上圧延機のセットアップ制御について、前述の欧米で開発された計算機制御システムでは、ロール開度設定に必要な圧延荷重の推定に際して、標準的な材質・温度条件に対する単位幅あたりの圧延

荷重を予め記憶しておき、実際の圧延では材質による補正係数、温度による補正係数により補正を行い圧延荷重を推定するというものであった。この方法では、予め記憶する圧延荷重データを作るために大量の圧延データの蓄積が必要であり、また圧延条件の変化に対する追従性にも課題があることが懸念された。

このような状況のもと、我が国の独自技術での開発を期して、1964年10月に住友金属工業と日立製作所間でホットストリップミル計算機制御の共同研究協定が結ばれ、圧延理論に基づく数式モデルをベースとした制御とするとの方針のもとに共同研究が進められた。変形抵抗は前述の美坂・吉本の式、圧延荷重・先進率はSimsの圧延理論を用いることとし、リアルタイムの処理を行うため、当時の計算機の処理能力を考慮して圧下力関数や先進率等の理論式を多項式近似するなどの工夫をしている<sup>13)</sup>。

共同研究は、1965年3月に日立製データロガーによるデータ解析及び数式モデルの検証、1966年4月に実験用コンピュータによりオンラインでセットアップ計算を行って運転室に表示する「表示実験」、同年11月に表示された計算値通りに手動でロール開度・ロール回転数を設定して圧延する「表示圧延実験」、1968年3月に制御用コンピュータ HITAC-7250 (コア16KW、磁気ドラム95KW) の搬入、同年7月コンピュータ制御による自動運転開始に至る実用化まで約4年を要するものであった<sup>14)</sup>。

圧延理論に基づいた国産技術によるホットストリップミルの計算機制御の実用化は、日本の鉄鋼業の高品質・高生産性を支えるコンピュータ・コントロールの端緒として意義は大きい。また、過酷な処理を要求されるホットストリップミルにおける制御用計算機のハードウェア・ソフトウェアの開発経験は、その後の制御用計算機システムの多様な産業への展開に寄与した。この開発におけるポイントは、「圧延のメカニズムを記述する数学モデルの確立とリアルタイムの制御を行うソフトウェアの構築」であると美坂氏は述べている<sup>15)</sup>。圧延のメカニズムを記述する数学モデルとして、熱間平均変形抵抗式と圧延理論の研究結果が活かされ、その後の圧延プロセスのモデルベースド制御の発展にも大きな影響を与えた。

## 3 鉄鋼製造プロセスの制御の研究指導者として

ホットストリップミルの計算機制御の実用化が一段落して以降、美坂氏はコークス、焼結、高炉、転炉、連続鋳造、ホットストリップミル、コールドストリップミル、表面処理、厚板ミル、形鋼ミルなど鉄鋼製造プロセス全般の制御・自動化のための研究開発を統括することになった。私事ながら、著

者は1972年に入社し、美坂氏から直接指導を受けてホットストリップミルの制御を担当することになった。

プロセス制御の開発については、

- ・現象のメカニズムを記述する数学モデルの確立
- ・リアルタイムの制御を行うソフトウェアの構築
- ・制御モデルの実機へのインストールと現地調整の三段階の業務がある。これらに対する美坂氏の取り組み方針は、
- ・モデリングについては、可能な限り理論モデルの構築を優先する。
- ・制御則の物理的意味・解釈を考える。
- ・実機で効果が出るまで製造現場に立ち会う。

というものであり、ホットストリップミルの計算機制御での経験が色濃く反映されたものであったと思う。また、プロセスデータの採取や現地調整は製造現場スタッフの納得と協力を得て可能となるものである。この点について、美坂氏は製造現場の上長との接触などを通じて、研究者が動きやすい環境作りを心がけていた。特に、板圧延の研究における美坂氏の実績と信用は、圧延工程の制御を担当する研究者には大いに助けになった。1973年の石油危機を経て、日本の鉄鋼業が生産能力拡大から省エネルギー、品質・歩留向上、多品種小ロット生産へと向かい、制御・システム技術の必要性は益々増大していった。圧延プロセスにおいては、加熱炉制御、冷却制御、板厚制御などについて製造現場から次々に出される要請に、現場の信頼を裏切らぬようにとの美坂氏からのプレッシャを受けて対応に追われていた。また、何事も徹底して理解しようとする美坂氏の姿勢は、オペレーションリサーチの研究グループやマイクロコンピュータ設計標準化グループといった圧延工学からかけ離れた分野の若手研究者との議論においても貫かれていた。

美坂佳助博士の学会での活躍について述べる。塑性加工・圧延技術の研究者として論文を発表して活躍した主要な学協会は塑性加工学会や鉄鋼協会であるが、ここでは制御分野における貢献について述べる。

1977年に計測自動制御学会関西支部長であった岡本豊彦氏が委員長、木村英紀東京大学名誉教授(当時、大阪大学助教授)が幹事となり、制御理論研究と産業界とのギャップを解消し産学共同で制御理論の活用を図ることを目的とした多変数制御調査研究委員会が発足した。当時の制御理論は、多変数動的線形システムの理論は発展していたが、その応用、特に産業応用は殆どなく有用性について懐疑的な意見が少なくなかった。制御理論のこのような状況を打破すべく、大学の制御理論研究者と美坂氏もメンバーとして参加した産業界の技術者によって委員会が構成され、制御理論研究者による理論の解説や海外での実施例の紹介、産業界からの例題提示とそれに対する理論研究者による制御系設計の試みと制御効果のシミュレ-

ション結果報告などが月に一度のペースで行われた。

約2年間活動した委員会は、その後いくつかの研究専門委員会の形態をとりながら継承され、ここでは鉄鋼におけるモデルベースド制御や多変数制御の実施例が数多く紹介された。この活動を受けて、1991年に制御理論応用部会が設置されることとなり、美坂氏が部会の初代主査に就任し当該分野の発展に寄与した。その後、副会長も努め、同学会のフェロー・名誉会員として、制御技術の分野でもその功績は高く評価されている。

## 4 おわりに

美坂佳助博士は、塑性加工・圧延技術の研究者としてスタートし、熱間平均変形抵抗式、タンデムミルの影響係数解析、そして圧延理論に基づく国産技術によるホットストリップミルの計算機制御を始めとした圧延機の自動制御に関する研究開発によって、圧延理論に基づく数学モデルが実機で有効に活用できることを明確に示すという大きな功績を挙げており、圧延分野においてエポックを作った人物に相応しいものと確信している。

最後に、前述の多変数制御調査研究委員会が活動の総括として開催した研究発表会<sup>16)</sup>における岡本豊彦委員長の序文を紹介する。

「昭和20年頃には、圧延理論は役に立たないというのが定説であった。理由の第一は、手計算の労力があまりにも大きい。第二の理由は、理論計算値は実際の値と食い違っている。第二の理由は実は2つあって、その一は、理論は正しくても計算に使用する材料の変形抵抗値のような、数値の正確で適当な値が知られておらず、結局計算結果は当てにならないこと、その二は、実測値といっても、当時の計測技術が不完全、不正確で、実測値自体も往々にして正しくなかった事である。

このような背景の下で、日本鉄鋼協会に圧延理論分科会が創設され、圧延理論の応用のための変形抵抗と計測方法の共同研究が始められ、その後、この第二の理由は解消された。(中略)その後、電子計算機の実用化と普及が進み、技術研究用のオフラインのコンピュータや圧延機の計算機制御用のオンラインのコンピュータが登場してからやっと第一の理由は解消した。役に立たないと言われた圧延理論が、今日は業界では不可欠なものになったのは、実にコンピュータの御陰であると言っても過言ではない。また、言うなれば、圧延機の計算機制御には、圧延理論が完全に定着していると言える。」

これは制御理論研究者に向けてのメッセージの一部であるが、熱間変形抵抗式とホットストリップミルの計算機制御の意義を明確に表していると思う。



写真2 1995年 美坂博士を囲んで

美坂氏は、1989年取締役システムエンジニアリング事業本部長、1992年常務取締役、1994年専務取締役を歴任し、1995年共同酸素(株)社長に就任した。写真2はこの頃に美坂博士を縁の者が囲んで会食した時のものである。

#### 参考文献

- 1) 美坂佳助, 吉本友吉: 塑性と加工, 8 (1967) 79, 414.
- 2) 西村三好, 枝本希彦, 美坂佳助: 塑性と加工, 4 (1963) 27, 231.

- 3) 美坂佳助: 塑性と加工, 10 (1969) 96, 9.
- 4) 美坂佳助: 塑性と加工, 8 (1967) 75, 188.
- 5) Y.Misaka: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 8 (1968) 86.
- 6) 美坂佳助, 河野輝雄, 近藤勝也: 塑性と加工, 12 (1971) 125, 477.
- 7) 竹内久弥, 渡辺和彦, 河野輝雄, 北村洋一: 塑性と加工, 14 (1973) 149, 478.
- 8) 山下了也, 美坂佳助, 川上義弘, 近藤勝也: 塑性と加工, 14 (1973) 155, 976.
- 9) 美坂佳助, 大橋保威, 渡辺和彦, 近藤勝也: 塑性と加工, 15 (1974) 159, 309.
- 10) T.Okamoto, Y.Misaka, T.Kouno, K.Kondo and H.Takeuchi: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 16 (1976) 614.
- 11) 野坂康雄: 鉄鋼業のコンピュータ・コントロール, 産業図書, (1970)
- 12) 岡本豊彦: 鉄と鋼, 57 (1971) 10, 127.
- 13) 大成幹彦, 諸岡泰男, 美坂佳助, 川野晴雄: 電気学会論文誌C, 92 (1972) 2, 38.
- 14) 美坂佳助: 塑性と加工, 32 (1991) 362, 257.
- 15) 美坂佳助: 計測と制御, 21 (1982) 2, 85.
- 16) 計測自動制御学会: 実例にもとづく多変数制御に関する研究発表会, (1978)

(2014年9月3日受付)