

特別講演

□第179回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演

鉄鋼材料の圧延と組織制御

Rolling and Microstructure Control of Steels

柳本 潤 東京大学
工学系研究科
教授
Jun Yanagimoto



*脚注に略歴

1 はじめに

私は学部、大学院学生時代を機械工学科、産業機械工学専攻(当時は専門課程と称した)で過ごした。戦後に出来た新制大学院(当初は数物系研究科、後に工学系研究科)は、本郷にある工学部と西千葉にあった第二工学部を源とする生産技術研究所が原資を持ち寄って設立している。在籍した変形加工工学研究室は、昭和17年に第二工学部に創設され、私が学生を過ごした頃は生産技術研究所の機械系(第2部)に属しており、鈴木弘教授を継いだ木内學教授が主宰していた。木内學教授からは、塑性加工理論を大事にすべきこと、有限要素法を研究の対象とすること、研究成果を実業に反映させるようにすること、の3点を命じられ、できるだけ研究成果をもって実業に貢献できるように努めてきたつもりではあるが、以上の様な経歴の私が、その後一般社団法人日本鉄鋼協会より学術功績賞を頂くなど、若いころには全く思い至らぬことであった。今でも大それたことと感じつつ、深く感謝している次第である。

2 圧延の有限要素解析

修士課程では有限要素法を利用した鍛造の解析をテーマとして与えられた。1986年に鍛造時の塑性変形の二次元変形・応力解析で修士論文を書き、何の疑問も持たず深く考えもせず博士課程に進学した。当時はバブルの時代である。この時代、生産技術研究所は六本木にあったが、私の生活は六本木の町の(後で知った)夜の喧騒とは無縁であって、今思えばもったいないことをしたものである。またこの時期はまだ

商用コードが塑性加工には十分に使われておらず、汎用ソフトの作成が研究開発課題であるといった、時代であった。

修士課程でのシームレス管端の増肉加工(アプセット加工)の剛塑性有限要素法での解析が、私にとっての初めての鉄鋼会社との共同研究であった。二次元変形解析は修士課程で随分な数を行ったし、次元が一つ増えるだけで問題の本質が変わるわけではないので、博士課程では三次元解析に注力し、UO鋼管のエキスパンダの解析や、鍛造の溝部への材料流入の解析を、有限要素法を主に一部上界法を組み合わせで行っていった。これらの解析のためのすべてのFEM解析ソフトを自作し、そのために自宅にもPCを買い揃え、大学(研究所)と自宅で理論の勉強とプログラミングに没頭していた。有限要素法のプログラムのみならず、等高線図を作成するためのプログラムまで自作しているような時代であった。さて、UO鋼管のエキスパンダの解析や、鍛造の空隙への材料流入の解析と同時に、博士課程1年生の頃から進めていたのが、孔型圧延の解析である。孔型圧延の孔型設計のためには、当時は油粘土(プラスチック)を使ったモデル実験、物理シミュレーションが使われていた。この実験を有限要素法で置き換え、孔型図面を作図するためのDrafting toolとしてのCADと連結することで、孔型をDesignのための本来のCADが実現できるとの着想が、当時の民間企業には既に存在していた。一方、当時の計算機は今とは比べ物にならないほど貧弱なものであったから、完全な三次元塑性変形の解析には時間がかかりすぎるので、圧延方向垂直断面の二次元塑性変形を、圧延方向の力の釣り合いを考慮しつつ解くことにした。そこで、初等圧延理論と二次元有限要素法を複合化した解析法を提案した^{1,2)}。この計算法による解析例を図1に示す。こ

* 1984年3月に東京大学工学部機械工学科卒業、1989年3月に博士課程を修了し工学博士の学位を得た。同年4月東京大学講師、1991年4月助教授、2003年4月教授(生産技術研究所)、2018年4月に東京大学機械工学専攻教授となり、現在に至る。

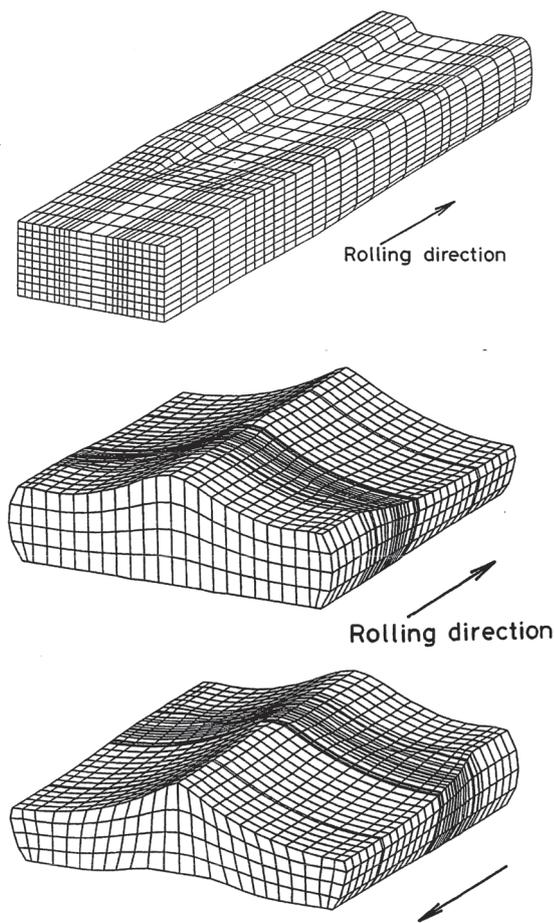


図1 孔型圧延の複合数値解析

の手法は過渡的な存在に過ぎなかったが、後の完全三次元解析のソフトウェアの母体にもなったし、初等圧延理論の勉強ができたことも良い経験となった。この近似三次元解析手法では、圧延方向の歪増分は圧延方向横断面内で一定であることを仮定している。孔型圧延の解析が可能となった後で他の民間企業様との薄板圧延の共同研究にこの手法を利用したが、「圧延方向の歪増分は圧延方向横断面内で一定である」との仮定は薄板圧延には無効であることが後で判り、辛い思いをした。しかしこれは、博士課程時代の得難い貴重な経験となり、その後の研究に繋がることとなる。当時は六本木の生産技術研究所には共用のFAXやテレックスが設置されていた時代で、このFAX室が夜には閉まるから、などとの無理な言い訳をして納期への度重なる要求を何とかしのいだこともある。

さて何とか学位論文を書き上げた後に大学にそのまま就職することとなったので、まずは、学生時代のリベンジとばかりに、熱間薄板圧延の本格的な三次元解析に、気持ちを新たに切り掛かった。今は当たり前前の三次元解析も1990年代初頭ではまだ珍しく、さらにロールの弾性変形を連成した解

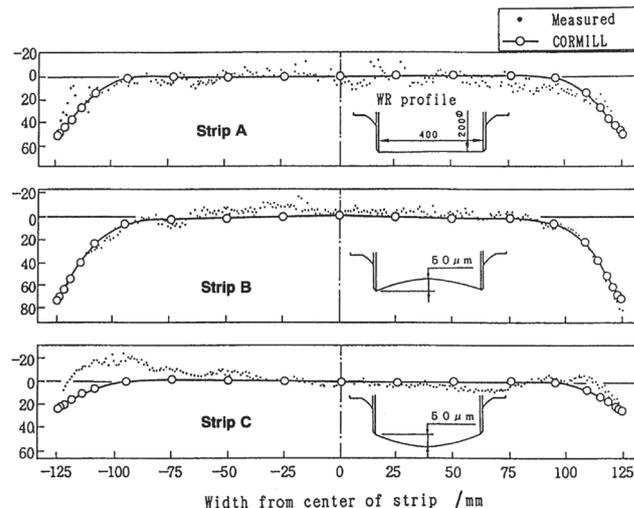


図2 熱間圧延後板プロファイルの(圧延前板厚3.0mm、圧下率30%、SPCC、圧延温度900℃、圧延速度55m/min、美坂の式で摩擦係数0.25とした結果)

析は当時では非常に難易度が高い課題であった。計算精度へ要求も、例えば板厚3mmについて10~30μmつまり1/100の精度が要求される厳しいものであった。この時期は指導すべき学生もおらず、時間だけはたっぷりあったので、プログラムを作成して結果を出し、何とかいくつかの論文として成果を発表するところまで漕ぎつけた。幸いなことに1990年代には薄板熱間圧延の幅制御、エッジドロップ制御といった課題があり、また、鉄鋼各社様の研究者とは今よりさらに自由に議論する雰囲気があった。また様々な圧延解析のベンチマークをする機会にも恵まれた。例えば、圧延理論部会理論解析技術検討会(1992年7月~1998年4月)では、板材、棒・線材、型材および管材圧延の有限要素解析について、合理的な解を得るための計算条件設定(たとえば、要素分割数)の指針などが議論されたが、この委員会に参加する機会に恵まれたことは大変幸運なことであった。

また、当時の鉄鋼会社様との共同研究では、わざわざ試験圧延を行い、結果を比較していただき、結果の公表許可を頂くこともできた。図2は圧延後板プロファイルの試験結果と計算結果との比較である³⁾。ワークロールクラウン量の圧延後板クラウンへの影響を、板幅方向板厚分布として実測した図2の結果は大変貴重なもので、日本語の論文にしかならないのであるが、海外でもこの実験結果はよく知られていると聞いている。このような労多い実験結果と計算結果とを比較して評価する機会を得たことは何物も代えがたいことで、当時の共同研究先に感謝するしかない。

薄板圧延の解析はロール変形と連成させる点で難易度が高いが、塑性変形を解析する部分は他の圧延プロセスにも転用することができる。薄板圧延で利用した解析プログラムに

GUIシステムを装備した「棒鋼・線材圧延FEM解析システム」⁴⁾は、圧延理論部会の後押しで鉄鋼協会に設置された研究会で開発がすすめられ、今でも棒線材圧延メーカーで、変形・負荷の3次元解析用のツールとして利用されている。また、図1の計算をする動機ともなった「孔型圧延CADシステム」もこの三次元塑性変形解析プログラムをもとに開発されており、図3に示すシステムとして実用化されている⁵⁾。このシステムは、四半世紀を経た今でも、現役で稼働している。

3 内部組織の制御と流動応力

圧延加工は造形を役割とするが、熱間圧延加工は材料の特性制御の課題にも深く関わっている。当時は機械科の3年生向けに、金属学科の堂山昌男先生と藤田利夫先生時代による金属材料学が開講されており、また機械系学科では機械材料学講座の田中正人先生と堀幸夫先生により転位論が講じられていた。圧延の3次元変形解析を進めてみると、特性予測やそのための内部組織予測の重要性を耳にする機会が数多くあったが、大学で関連する講義を、若干ではあったが受けていたためスルーすることなく関心を持つことができたのは幸運なことであったと思う。

これもまた幸いなことに、文部省の在外研究員の順番が比

較的早く回ってきたので、大学卒業後10年であった1994年(平成6年)の3月にアーヘン工科大学のKopp先生の下に弟子入りし、機能の創成に関わり、かつ、筆者でも手に負える現象論的理論で説明できそうな、熱間加工材料組織変化の数理モデルの研究を行うことにした。ここで転位密度を媒介とした増分内部組織解析手法を提案することができたが^{6,8)}。この研究を進めるにあたり、鉄鋼メーカー各社で行われていた数多くの基礎研究を大いに参考にさせていただいた。貴重な研究成果を鉄と鋼やISIJ International, Trans. ISIJに多数刊行していただいた、鉄鋼各社様ならびに研究者の皆様には感謝するしかない。また、ネットワーク環境が整っていない当時は、一見不便であるが在外で研究を行うにはパラダイスである。大学からの連絡はFAXと週1回の郵便のやり取りのみで、本当に在外研究をする以外にやる事が無い。たった10か月の期間ではあったが、大変貴重な時間を過ごすことができた。

さて、転位密度を媒介とした増分内部組織解析手法は有限要素法との連成、多段圧延の荷重と組織予測などに展開している。さらに、圧延機の制御モデルと融合し、熱間薄板圧延による特性予測システムの一部として実用化されている⁹⁾。図4は棒線材圧延において塑性変形時の再結晶(動的再結晶)による微細化の程度が、ロール配置によって影響を受けるこ

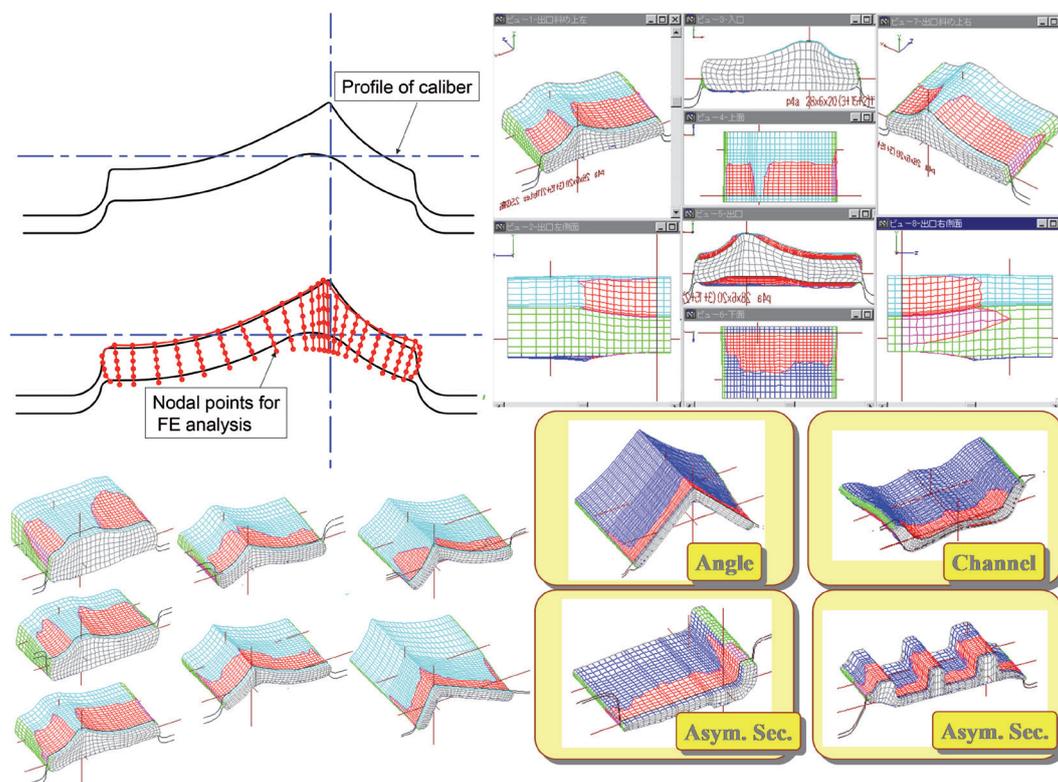


図3 孔型圧延のCAEシステム

とを示した結果である¹⁰⁾。塑性変形による組織微細化の程度は、プロセスの条件、ここではロール配置に影響されることが示されている。

さて、材料の内部組織変化は流動応力の値や線図の形に影響するから、正確に流動応力を測定することで、材料組織変化の程度を推定、測定することができる。熱間加工は圧縮応力場での塑性変形による造形だから、流動応力は圧縮試験で求めなければならない。一方で、これは塑性加工に携わる者にとっては常識なのであるが、圧縮試験により一軸流動応力を測ることはできない。これは金型と被加工材の界面での摩擦に由来する不均一変形故である。熱間であればさらに温度の分布が加わり、圧縮試験による軸方向応力と流動応力との乖離はますます大きくなる。さりとて、流動応力を測るには圧縮試験を行わねばならないので、いろいろ考えた末、サーメックマスターによる圧縮試験による荷重～ストロークデー

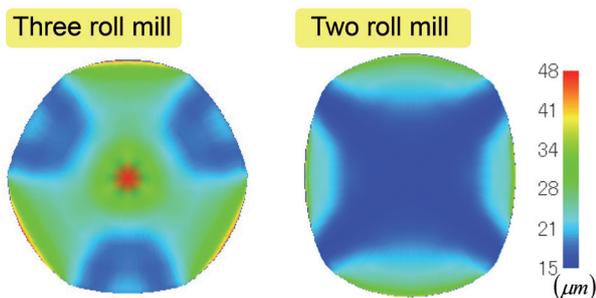


図4 棒鋼圧延の動的再結晶による微細化 (4パス圧延、初期粒径80mm、減面率52%)

タを利用した逆解析を行うことで、動的再結晶型の流動応力を同定する方法を考案した^{11,12)}。図5は流動応力逆解析の模式図である。この手法は、様々な合金の動的・静的組織変化の速度など (材料ゲノム) の解明に利用され、さらに、SIPプロジェクト・大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセスの開発と材料・プロセスデータベースの構築、でも利用されている。

4 まとめ

鉄鋼の圧延と組織制御にかかわる自身の研究を振り返り、自由な感想を記させていただいた。

31年前、平成元年に教員として東京大学生産技術研究所に職を得た時に、圧延を研究課題として選んだ理由は、本文に記した通り大学院時代の研究成果に満足できなかった、という情緒的なものである。このことがきっかけとなり、鉄鋼協会には研究活動を行う場として、長い間にわたりお世話になることになった。圧延や塑性加工、塑性理論の研究で新しさを出すことは、30年前と変わらず容易ではない。しかし、やることはまだ沢山ある。例えば、塑性異方性を対象とした非関連流れ則や構成式といった課題 (図6) は、関連流れ則を金科玉条とし、降伏関数に偏って進められてきた塑性論の研究に新たな流れを生むものと思う¹³⁾。汎用コードが利用できるようになり却って、基礎理論の研究が重要度を増している様に私には見える。さらに、圧延には、まだ数々の未解明の問題があり、メカニズムの究明には新たな圧延理論が待たれて

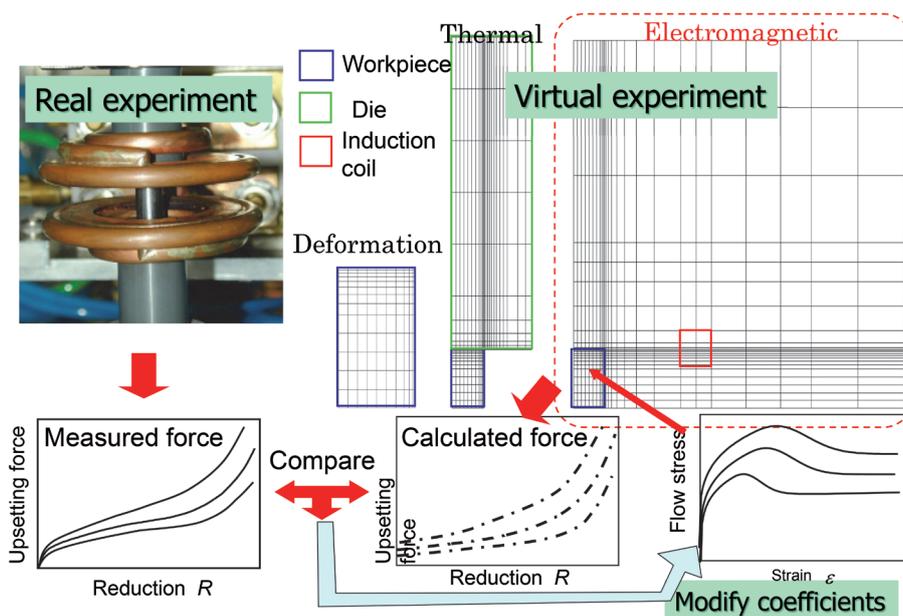


図5 荷重～ストローク線図の逆解析による流動応力の同定

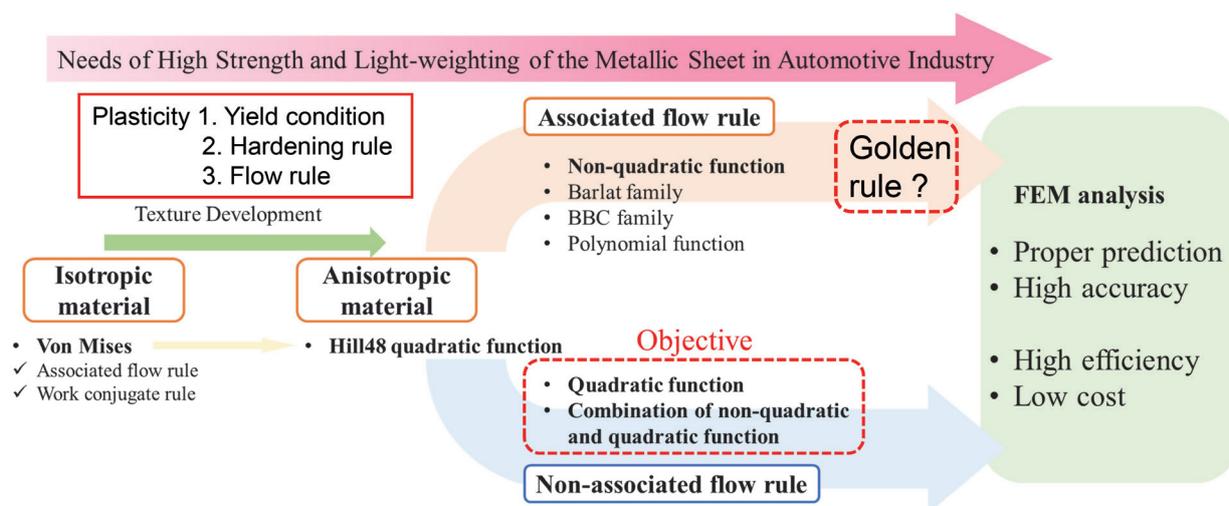


図6 異方性弾塑性構成式の研究

いる。

研究以外の活動により最初に鉄鋼協会に出入りするきっかけとなったのは、Steel Rolling '98の組織委員会の幹事を命じられた時であった。以後、様々な委員会の活動に参加し、沢山の技術者の方、研究者の方、先生方の知遇を得ることができ、事務局に大変お世話になった。これからも鉄鋼協会が、技術と学問を一体のものとして扱う学術団体としてますます発展することをお祈りいたします。

参考文献

- 1) M. Kiuchi and J. Yanagimoto : Trans. MRI/SME, 16 (1988), 34.
- 2) 柳本潤, 木内学 : 塑性と加工, 30 (1989) 336, 19.
- 3) 柳本潤, 佐々木保, 木内学, 河野輝雄 : 塑性と加工, 33 (1992) 383, 1406.
- 4) 柳本潤, 木内学, 宮沢英之, 浅川基男 : 鉄と鋼, 86 (2000) 7, 452.
- 5) J. Yanagimoto, Y. Kadomura, T. Muto and K. Inoue :

Steel Research, 73 (2002) 12, 526.

- 6) J. Yanagimoto, K. Karhausen, A.J. Brand and R. Kopp : Trans. ASME, J. Manufact. Sci. Eng., 120 (1998) 2, 316
- 7) J. Yanagimoto and J.S. Liu : ISIJ Int., 39 (1999) 2, 171.
- 8) J.S. Liu and J. Yanagimoto : ISIJ Int., 41 (2001) 12, 1510.
- 9) K. Ohara, M. Tsugeno, H. Imanari, Y. Sakiyama, K. Kitagoh and J. Yanagimoto : Annals of the CIRP, 63 (2014), 257.
- 10) J. Yanagimoto, T. Ito and J.S. Liu : ISIJ Int., 40 (2000) 1, 65.
- 11) A. Yanagida and J. Yanagimoto : Mater. Trans., 44 (2003) 11, 2303.
- 12) A. Yanagida and J. Yanagimoto : Mater. Sci. Eng. A, 487 (2008) 1, 510.
- 13) B. Wu, H. Wang, T. Taylor and J. Yanagimoto : Int. J. Mech. Sci., 169 (2020), 105320. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105320>

(2020年4月24日受付)