



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

集合組織の一貫予測モデル実現に向けて

Heading Towards Implementation of Through-Process Texture Modeling

田中泰明

Yasuaki Tanaka

新日鐵住金(株) 技術開発本部
先端技術研究所 基盤メタラジー研究部
主幹研究員

1 はじめに

筆者は2002年に旧住友金属工業株式会社の薄板研究開発部に配属を頂き、薄鋼板の研究開発に取り組んできた。最近では基礎研究部門に席を移し、鉄鋼材料が持つ集合組織の予測に関する研究に取り組んでいる。本稿では、特に熱延鋼板の集合組織予測に関して、自身が携わっている研究の紹介とともに、その展望について述べさせて頂く。

2 熱延鋼板の集合組織

熱延鋼板の集合組織は組成や製造条件によって変化することが知られている。たとえば、CやMnのみを主添加元素とした熱延鋼板に見られる集合組織では $\{100\} \langle 011 \rangle$ 方位に高い集積を示す傾向にあるが、一方でNbを含有する熱延鋼板の集合組織は $\{311\} \langle 011 \rangle \sim \{211\} \langle 011 \rangle$ にかけて高い方位密度を示す場合が多い。これらは圧延率や圧延温度等の条件によって変化をし、さらに冷却条件によっても違いを生じ¹⁾、フェライト変態とマルテンサイト変態が生じる場合では異なる集合組織を与えることが判っている。

熱延鋼板は深絞り等の集合組織の制御が重要な用途に用いられることは稀で、その集合組織が着目されることは多くはない。しかし上述のように熱延鋼板の集合組織には組織形成に係わる情報が含まれており、その定量解析と解釈は、圧延や冷却過程での組織制御を考える上で重要である。

一般に、集合組織の形成には加工と再結晶および変態が寄与するが、熱間多段圧延と制御冷却過程から成る熱延鋼板の製造工程ではこれら全ての因子が含まれる。各素過程において、前過程によって生じた集合組織は次過程の集合組織に影響し、これを繰り返すうけて発達する実鋼板の集合組織の形成過程はかなり複雑であろうことが推察される。高温域での圧延、再結晶現象を直接観察することは難しく、また多くの

場合、熱間圧延中の集合組織情報は変態によって見かけ上失われてしまう。つまり、実際の製造プロセス中における集合組織の形成過程を実験で定量的に把握する事は容易ではなく、そこで、計算による定量予測が試みられている。これは各素過程における集合組織の発達を個々にモデル化し、それらを連成計算させる事で一貫的に集合組織の形成予測を行うものである。素過程の計算予測手法にはそれぞれ多くの先行研究やモデルがあるが、次節以降では特に $\gamma - \alpha$ 変態集合組織の予測について述べる。

3 変態集合組織の予測方法

一般に熱間圧延中のオーステナイト (γ) に見られるFCC金属の再結晶集合組織は $\{100\} \langle 001 \rangle$ 方位への配向を示す。変態前後の結晶方位関係をKurdjumov-Sachs (K-S) 関係とすると、この方位から変態によって $\{100\} \langle 011 \rangle$ 方位が生じ、一般的なC-Mn鋼の持つフェライト (α) の集合組織の特徴を概ね再現する。一方、FCC金属は圧延によってCopper方位 ($\{112\} \langle 111 \rangle$) からBrass方位 ($\{110\} \langle 112 \rangle$) にかけて帯状の集積 (β -Fiber) を有する圧延集合組織を形成する。先ほどと同様、K-S関係のもとでは、前者から $\{311\} \langle 011 \rangle$ から $\{211\} \langle 011 \rangle$ にかけて、後者からは $\{100\} \langle 011 \rangle$ あるいは $\{554\} \langle 225 \rangle$ が生じ、これらは加工 γ の回復および再結晶を抑制するNbを含んだ熱延鋼板の集合組織の特徴を概ね捉えている。

このように熱延鋼板に現れる変態集合組織は、変態前の γ の集合組織と変態前後の結晶方位関係を通じて定性的に説明できる。しかし、定量的な予測には、結晶学的に等価な変態前後の方位関係のうち、特定の方位関係 (バリエント) が優先的に選択される機構 (バリエント選択則) を考慮しなくてはならないことが知られている²⁾。例えば、K-S関係ではオーステナイトとフェライトの最密面、最密方向平行を満足する γ と α の方位関係は24通りあるが、この中から特定のバリエントが

選択されるメカニズムを考える必要がある。選択則を考慮せず、各バリエーションが等価に働くと仮定すると、多くの場合、変態集合組織の集積密度は実際よりも大幅に低くなる²⁾。

3.1 バリエーション選択則

バリエーション選択則を変態集合組織の予測計算に取り入れるには球調和関数展開法を用いる手法がある³⁾。変態後の α 相の集合組織は母相 γ 相の集合組織とバリエーション選択則により(1)式のような形の関数で表される。

$${}^{\alpha}C_{\lambda}^{\mu\nu} = F\left({}^{\gamma}C_{\lambda}^{\mu\nu}, \Delta g, \rho_{\lambda}^{\nu}\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで ${}^{\alpha}C_{\lambda}^{\mu\nu}$ と ${}^{\gamma}C_{\lambda}^{\mu\nu}$ はそれぞれ α と γ の方位密度関数(ODF)の展開係数で、 Δg はK-S関係による回転操作を示している。 ρ_{λ}^{ν} はバリエーション選択関数 $\rho(g)$ を、サンプル対称性を考慮した球調和関数の基底関数で展開した係数であって、変態集合組織の予測計算にバリエーション選択則を取り入れるには、個々の選択則に基づいた選択関数 $\rho(g)$ を考えればよい。

3.2 二重K-Sモデル⁴⁾

鋼の γ - α 変態におけるバリエーション選択則に関してはこれまで多くのモデルが提案されているが、その多くはマルテンサイトの変態集合組織の予測に関するもので^{5,8)}、一般的な熱延鋼板においてよく見られる拡散型のフェライト変態におけるバリエーション選択則に関する研究は比較的少ない^{4,9,10)}。近年、富田らによりフェライト変態における変態集合組織の予測に関して、実験結果を定量的に説明しうるバリエーション選択則が提案された⁴⁾。このモデルは、オーステナイト(γ)の粒界にフェライト(α)が核生成する際、隣接する両方の γ と同時にK-S関係を持つようなバリエーションが選択されると考えており、二重K-Sモデル(Double K-S、DKS)と呼ばれている。重要なのは、このとき少なくとも片側の粒との方位関係にはK-S関係から 10° 程度の角度差を許容する点にある。 α が両側の γ と厳密なK-S関係を満足しうような粒界は極めて特殊な粒界に限られるが、上記の仮定によってDKSは一般的な大角粒界へ適用することが出来るようになる。粒界上にある α と隣接する片方の γ 粒の方位を g 、K-S関係による回転操作を Δg 、立方対称性に関する方位回転操作を g_k^c とすると、バリエーション選択関数 ρ は以下の(2)式で表される。

$$\rho(g) = \frac{\omega}{N} \sum_k f\left(\Delta g^{-1} \cdot g_k^c \cdot \Delta g \cdot g\right) + \rho_c(g) \dots\dots\dots (1)$$

N はバリエーションの数、 ω はDKS則の強さを決めるパラメータで、バルク全体においてDKSに沿って変態する体積割合にあたる。言い換えると式の第一項はDKSに沿って変態する割合に相当し、第二項はK-S関係のバリエーションがランダムに選ばれる部分を担っている。 ω を単にフィッティングパラ

メータのように扱う事もできるが、本質的には変態前 γ の性質によって固有の値をとるべきであるものと考えられる。この ω の持つ物理的意味のさらなる理解と決定は今後の研究課題の一つである。

ところで(2)式から判るように、このモデルでは、バリエーション選択の強さそのものが母相 γ の集合組織の強度に比例する。これは従来のモデルにない特徴で、変態前の γ 集合組織の定量性がバリエーション選択則の決定に直接影響し、 α の変態集合組織を大きく左右する。すなわちDKSを用いて一貫予測モデルを考える際には、変態前の加工/再結晶 γ 集合組織の定量予測がより重要であることが示唆される。

4 熱延鋼板による検証例

4.1 実験方法

図1に示すように、0.2wt%C-1.5wt%Si-1.45wt%Mnを含有する鋼に930℃で30%の1パス熱間圧延を施した。再結晶が生じないように、圧延直後に1000℃/secで750℃まで熱延板を水冷し、10秒間の空冷を挟んでフェライトを析出させた後、再び冷却を行い、400℃の炉に10分間保持してから室温まで放冷して残留 γ を含む熱延鋼板を得た。板厚中心部の圧延面を化学研削により面出しし、 α と残留 γ の集合組織をX線により測定しODFを算出した。本報告では残留 γ と圧延での加工 γ の集合組織が等しいと仮定し、計算との比較を行ってモデルの定量性を見積もった。

4.2 予測計算との比較

図2は実験とDKSによる計算で得られた α 集合組織を、 $\phi 2=0, 45$ および 65° 断面における方位密度関数(ODF)の等高線図によって比較した結果である。これらから判るようにバリエーション選択則にDKSを用いると実際に得られる変態集合組織を非常に良く再現することができる。 ω は0.8で最も実験と計算が良い一致を示したが、これは異なる鋼板組成および圧延条件によって先行研究⁴⁾で報告された値と近いことは興味深い。

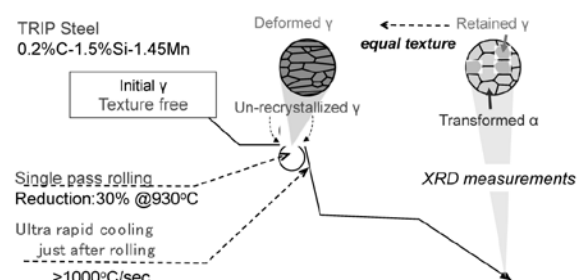


図1 ラボ熱延実験の模式図

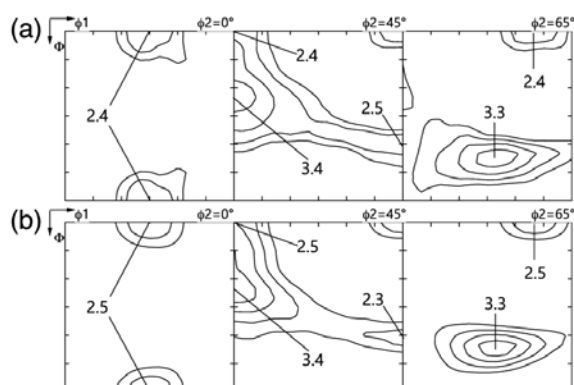


図2 (a) 実験および (b) 計算により得られた変態後 α のODF等高線図

最近ではDKSと加工集合組織予測モデルとの連成により、熱間圧延を含めた変態集合組織の予測についても研究を進めている^{11,12)}。一例として、図3には変形時において隣接粒との相互作用を考慮した結晶塑性モデル (Grain Interaction Model¹³⁾) を用いて加工 γ 集合組織を予測し、これをもとにDKSにより変態後の α 集合組織を予測した場合のODFを示している。計算における加工条件は図1に示す実験と同一とし、 $\omega = 0.8$ を用いた。図2を図3と比較すると、連成計算結果は実験値と良い一致を示している事がわかる。このようにDKSと定量性の高い加工集合組織予測モデルとの連成により、熱間圧延を経た変態集合組織の定量予測が得られるようになってきている。今後さらに熱間圧延中の再結晶についてより一層の理解とモデル化が進めば、熱延鋼板における集合組織の一貫予測の実現に一步近づくものと期待される。

5 おわりに

鉄鋼材料は緻密な組織制御の上に実現されており、実製造に至るにはその製造指針を治金的根拠とともに提示することが求められる。組織形成や特性発現のメカニズムを追求していく中で、特に直接観察が困難な場合においては数値計算による予測の果たす役割は大きい。一方で、計算の妥当性や精度を高めるには実験と観察による検証が不可欠であり、計算と実験は両輪で進めるべきものと考えている。特に、組織観察手法や装置の進歩は著しく、従来は困難であった時間分解能や空間分解能で冶金現象を捉えられるようになってきている。これらを積極的に活用することで、冶金現象の高精度モデル化に必要な情報を得られるかもしれないという期待がある。今後は解析や分析を専門とする研究者の方々とも議論を積極的に行いつつ研究を進めていきたいと考えている。

筆者は数年前にAachen工科大学へ滞在する機会に恵まれた。短い期間ではあったが、集合組織に関する自身の研究指

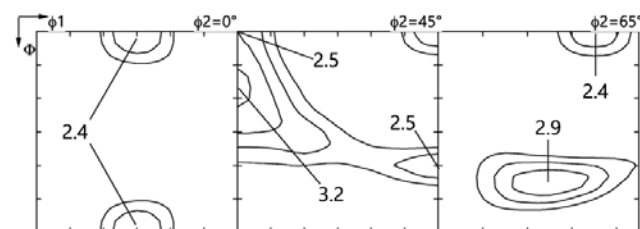


図3 結晶塑性モデルによる計算加工 γ 集合組織をもとに計算した α の予測変態集合組織¹²⁾

針を決定づけるとともに、企業研究者としての自分を外から見つめ直す良い転機となった。先に紹介した研究成果の多くは、その際に頂いた、先生および上司の方々ならびに諸先輩方のご指導と、同僚の協力のもとに得られた成果である。この場をお借りして感謝を申し上げる次第です。今後ともご指導とご鞭撻の程、宜しくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) J.J.Jonas and M.P.Butron-Guillen : CS.Da Costa Viana Proc. 11th ICOTOM, (1996) , 575.
- 2) R.K.Ray, J.J.Jonas, M.P.Butron-Guillen and J.Savoie : ISIJ Int., 34 (1994) , 927.
- 3) HJ.Bunge, M.Humbert and PI.Welch : Text Microstruct, (1984) , 681.
- 4) T.Tomida, M.Wakita, M.Yoshida and N.Imai : Proc.15th ICOTOM, Pottsburg, (2008) , 325.
- 5) K.Haslam, T.Coleman, D.Dulieu and I.L.Dillamore : 3rd. Euro.Colloq.on Text., Pont à Mousson, (1973) , 369.
- 6) M.Sum and J.J.Jonas : Textures and Microstruct., 31 (1999) , 187.
- 7) M.Humbert, F.Wagner, W.P.Liu, C.Esling and H-J. Bunge : Proc.ICOTOM-8, (1987) , 743.
- 8) P.S.Bate and W.B.Hutchinson : Acta Mater., 48 (2000) , 3183.
- 9) N.Stanford and PBate : Advanced Engineering Materials , 53 (2005) , 859.
- 10) I.Lischewski, G.Gottstein : Acta Mater., 59 (2011) , 1530
- 11) Y.Tanaka, T.Tomida and V.Mohles: CAMP-ISIJ, 26(2013) , 1016.
- 12) Y.Tanaka, T.Tomida and V.Mohles : Proc.17th ICOTOM, Dresden, (2014) , (in press)
- 13) M.Crumbach, G.Pomana, P.Wagner and G.Gottstein : 2001 Proc.1st Rex&GG, Berlin, (2001) , 1053.

(2014年10月30日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東京工業大学 精密工学研究所 先端材料部門 教授

細田 秀樹

合 金添加元素や不純物濃度といった元素によらない材料の高機能化・高付加価値化のための組織制御法の中でも、各結晶粒方位を所望の方向に揃え、材料の異方性を積極的に活用する集合組織制御とそのプロセス開発の重要性が増しています。微視組織の方位解析ではEBSD法および計算機の長足の進歩により、実験的な広範囲の解析とシミュレーションができるようになり、集合組織の研究は大変発展しています。鉄鋼材料でも、電磁鋼板で重要となるGoss組織形成など多くの研究がなされています。それに関わらず、鉄鋼・非鉄材料によらず、集合組織形成は未だ半経験的理解で、定量理解はかなり難しいと感じています。冷間加工組織形成はすべり変形を考えれば良いので、特にfcc金属であれば比較的理解しやすいですし、強加工材の再結晶集合組織も、発達した加工集合組織では単結晶に近い状態なので、まだ理解しやすい状況です。しかし、鉄鋼の多段熱延過程においては、本稿にあるように各素過程で集合組織が形成され、それを基に次の過程での集合組織が形成される上に、相変態も加わるため事態は極めて複雑で、経験式以上のものはできないだろうと感じていました。

このような中、新日鐵住金株式会社の田中泰明さんは、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態を伴う熱延鋼板の定量的な集合組織制御、特にその予測法の構築と実際の制御について熱心に取り組まれている新

進気鋭の研究者です。内容は本稿にありますが、実際は書かれているよりもさらに大変複雑な現象かつ研究です。このような研究では、失敗や回り道が多くても気にせず直向きに進むしかなく、大変タフな研究といえますが、田中さんは言葉通り実直に取り組まれています。熱心に、というのは、研究発表を聞かせて頂いた際に、温厚でどちらかと言えば控えめに思える人柄なのですが、堂々と実に気持ちの入った大きな声の発表をされ、また、個人的にお話した際にも、研究に対する情熱、ひたむきさと真摯さを強く感じたためです。研究は、理論・計算と実験のバランス、基礎と応用のバランスが良く、個人的に好ましいスタイルで、当研究室の学生には是非見習って欲しいとも感じました。

田中さんの研究は、バリエーション選択則—二重KSモデルをベースとする定量予測手法の開発で、本稿は良くまとめられており、勉強になりました。および、現状、既にかかなり定量的に実際の集合組織形成をシミュレートできているように見えます。しかし、先はまだ遠い。将来的には、組織計算法として急速に進歩しているPhase Field法なども取り入れられるようになればより現実の組織ができるのでは、と思いますが、まずは本手法の完成を願っております。工業的な意味も含め、鋼の集合組織制御を成し遂げ、日本の鉄鋼業に名を残すような研究者になって頂きたいとエールを送ります。

JFEスチール(株) スチール研究所 薄板研究部長

瀬戸 一洋

世 界中の鉄鋼会社が深絞り用鋼板の開発に鎬を削っていた1970～80年代、薄板分野における集合組織の研究は花形で、非常に活況を呈していました。70年代は冷延鋼板が主流でしたが、80年代に入ると高温 α 域での集合組織など熱延鋼板に関しても多くの研究がなされました。近年、講演大会での発表件数を見ればわかる通り集合組織を対象とする研究は当時に比べればかなり減っているものの、やや閉塞感の漂いはじめた薄鋼板の製品開発で新たな地平を切り開くには集合組織、なかんずく熱延集合組織の理解が不可欠であると筆者は認識しています。

田中さんの素晴らしいところは、若くしてこのような熱延集合組織の重要性を認識するとともに、実験的に解析することが難しいその形成過程について計算で予測しようと長年努力され続けていることです。熱延鋼板で特に重要なフェライト変態に関する集合組織研究では本文中でも言及されていますが、最近の田中さんはこれに加工集合組織（これも熱延では高温のため検証が難しい領域です）の予測モデルを組み合わせて、熱延鋼板におけるフェライト変態集合組織の予測・理解に大きく歩を進めていらっしゃるように見えます。世界にお

ける同分野の研究状況を見渡しても田中さんの研究は間違いなく最先端であり、競合メーカーという枠を超えて日本鉄鋼業の将来を考えたとき、非常に頼もしく感じています。

ところで、推測ではありますが、田中さんの会社での研究人生にとって入社後研究活動をともにされている富田さんの影響は相当に大きなものだったのではないのでしょうか。名伯楽あってはじめて名馬あり、とも言います。昨今広く問題となっている技術伝承という観点で思いを致すと、熱意をもって技術を伝えようとする師と、同じく必死にこれに応えようとする弟子の姿が浮かんできます。異動の多い会社人生の中で長い時間一途に育ててくれる先輩との出会いは貴重なものです。今後はご自身の研究をさらに進めて熱延集合組織の深い理解と工業的利用を推進されるのに加え、社内外で田中さんに続く若手の育成にもぜひ力を注いでいただきたいと思います。

最後になりましたが、当社の若手からも憧憬と尊敬を集める田中さんにはぜひ今後の日本の、さらには世界の鉄鋼業を支える意気で文字通りの飛躍を期待しており、心よりエールを送ります。