J. Yanagimoto

鍛造を用いた材料プロセス開発

柳本　潤 *

1．まえがき

塑性加工は，金型や塑性加工機械による形状の創成と，塑性変形を利用した材料特性の創出を行う，加工技術である．航空機の機体およびエンジン回りの大型部品やエンジン用のクランクシャフト・建設機械用などの中型部品には熱間鍛造が，自動車用を主とする小型部品には，冷間鍛造が多用されている．

本稿では，鍛造を用いた材料プロセス開発を概観する．材料プロセス開発の視点から見ると，冷間鍛造は熱処理が主で調質の役割を担っている．つまり，冷間鍛造時の塑性変形を受けて実施される，いうなれば Passive な材料プロセスとの位置にある．比較して熱間鍛造は，析出，再結晶および変態による内部組織制御を利用することで，機械的特性の制御を行うわけであるから，塑性変形と冷却履歴を組み合わせた，Active な材料プロセスに位置付けることが出来る．以下では，それぞれのプロセスで起こる現象について，材料プロセスを制御の枠組みで説明を試みる．

2．材料プロセスとしての冷間・熱間鍛造

図1 に冷間・熱間鍛造加工を，材料プロセスの観点から整理して示す。鍛造では，多工程で素形材を造形し，素形材製品に近い寸法，あるいは素形材製品寸法までの造形が行うことを特徴とする．なお**図1** では，多工程による鍛造加工を一つの枠で簡略化して記している．

冷間鍛造では，多くの場合熱処理が行われ，塑性加工により導入された転位による強化の影響を調質することで，求められる機械的特性を有する製品を得る．この場合には，塑性加工による塑性変形の付与を受けて行われる熱処理が，機械的特性を制御するための材料プロセスの主要な部分となっている．一方で，冷間鍛造のままで製品となる場合もあり，この場合には，機械的特性を制御するためのプロセスは，冷間鍛造である．所望の素形材製品の機械的特性が強度あるいは硬度のみで規定される場合には冷間鍛造での転位強化の度合いが十分であれば良い．一方で，じん性などの内部組織や結晶粒径に関連した機械的特性までを制御した素形材製品を冷間鍛造により加工する場合には，非調質鋼を利用することがある．

熱間鍛造では，再結晶温度以上で塑性変形を付与し，その後の冷却変態の組み合わせにより半製品を創成し，さらに熱処理で調質することで求められる機械的特性を有する素形材製品を得る．大型鍛造品については鋳造材を出発材とする場合もあり，加熱時に均質化処理が行われる．熱間鍛造後の工程は 3 種類に大別できる．放冷のままの場合，放冷後再加熱して熱処理を行なう場合，制御冷却を行う場合である．制御冷却時に塑性加工を組み合わせて行うことで，加工熱処理を行うことも原理的には可能であるが，鍛造では変形の不均一性が大きいため制御が難しく，さらに，温度制御も困難である．難易度は高いとはいえ，機械的特性を制御するための材料プロセスが，転位強化（硬化）に加え，再結晶，回復，析出といった素材の内部組織変化に深く関わっていることが熱間鍛造の特徴であり，これ熱間鍛造を Active な材料プロセスとしている所以である．

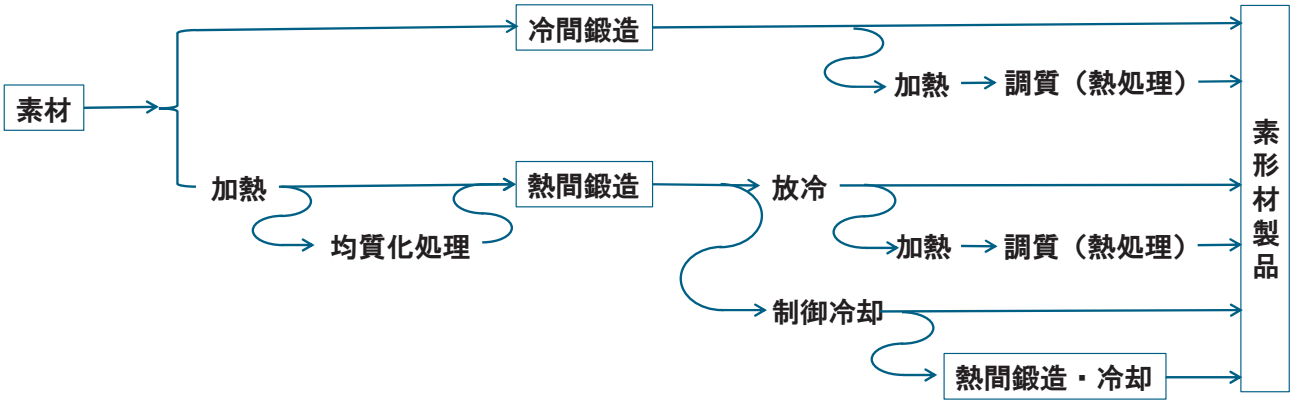

図1　材料プロセスの観点から見た冷間・熱間鍛造加工

* 東京大学大学院　工学系研究科　教授

３．冷間鍛造による材料プロセス

3.1　変形の制御

冷間鍛造の特徴の一つの特徴として，非切削であるがゆえに鍛流線[1]（Fiber flow）が途切れることなく，素形材製品の中に存在していることがある．鍛流線は塑性変形の結果であり，素形材製品の機械的特性である断面内での強度や硬度分布を支配するのであるから，鍛流線の制御も材料プロセス開発の一つの形態であると考えてもよい．鍛流線は，強度分布以外の機械的特性とも関連している．冷間鍛造材の疲労特性を鍛流線と関連付けて論じた研究[2]は，この様な事実の一例である．

鍛流線は断面の低倍率でのマクロ組織観察で観察することができ，多くの例を Web 上にて閲覧することができる．FEM 解析では，鍛流線は有限要素格子の変形として現れるので，CAE によるデジタル可視化の対象としては最も基本的な対象となっている．一方で，鍛造では多くの工程を経て素形材製品を製造するため，大きな変形が局所的に発生することが多く，FEM 解析といった材料の連続性を仮定したモデルでは解析が難しい場合が多かった．このことを解決したのが Remeshing 法である．Remeshing 法には，節点をある目的関数の下での最適な位置に移動していく r 法，内挿関数の次数を上げていく p 法，要素を細分化している h 法なども研究されたが，鍛造解析で成功しているのは Rezoning 法つまり要素を大域的に再分割し，状態量（剛塑性解析の場合には塑性ひずみなど）を引継ぎ，計算を再分割された要素について継続する方法である．この方法での鍛流線あるいは全変形量の可視化には，予め Monitoring 格子を定めて置き，この Monitoring 格子の位置を Remeshing の度ごとに引き継いでいけばよい．

図２は，1980 年代初頭の Battelle Columbus 研究所による鍛造解析結果である[3]．鍛造時の局所的大変形が捉えられていることがわかる．記念すべき第 1 回の塑性加工国際会議（1st ICTP）で発表されたこの計算手法は，その後世界中に広まり，現在でも利用されている．

3.2　熱処理

冷間鍛造後の半製品には，塑性変形を反映した塑性ひずみと，離型後の応力の再配置の結果生じる残留応力が存在している．その結果得られる素形材製品の機械的特性が要求特性を満足すればそのままで良いし，あるいは調質しないで済む非調質鋼を用いることで機械的特性を満足させる場合もある．

冷間鍛造では熱処理による調質を経て素形材製品を得る場合が多く，多様な熱処理が用いられている．**図３**は普通鋼について，CCT 線図（連続冷却変態線図）上に示した熱処理履歴（温度～時間履歴）と得られる製品の硬度である[4),5)]（本図は横浜国立大学　梅澤 修教授のご厚意による）．熱処理履歴により多様な硬度が得られる．この CCT 線図は後述する「材料ゲノム」の一種であり，予ひずみを受けていない普通鋼については**図３**で十分である．一方で，予ひずみを受ければ，後述する通り変態時の核生成頻度が塑性変形の影響を受けるため，CCT 線図各相の境界線の位置は微妙に移動するし，合金組成が変化すれば CCT の形も，得られる製品の硬度も変わる．ここに熱処理の難しさがあり，目的の多様性と相まって冷間鍛造後の調質・熱処理を複雑なものにしている[6]．

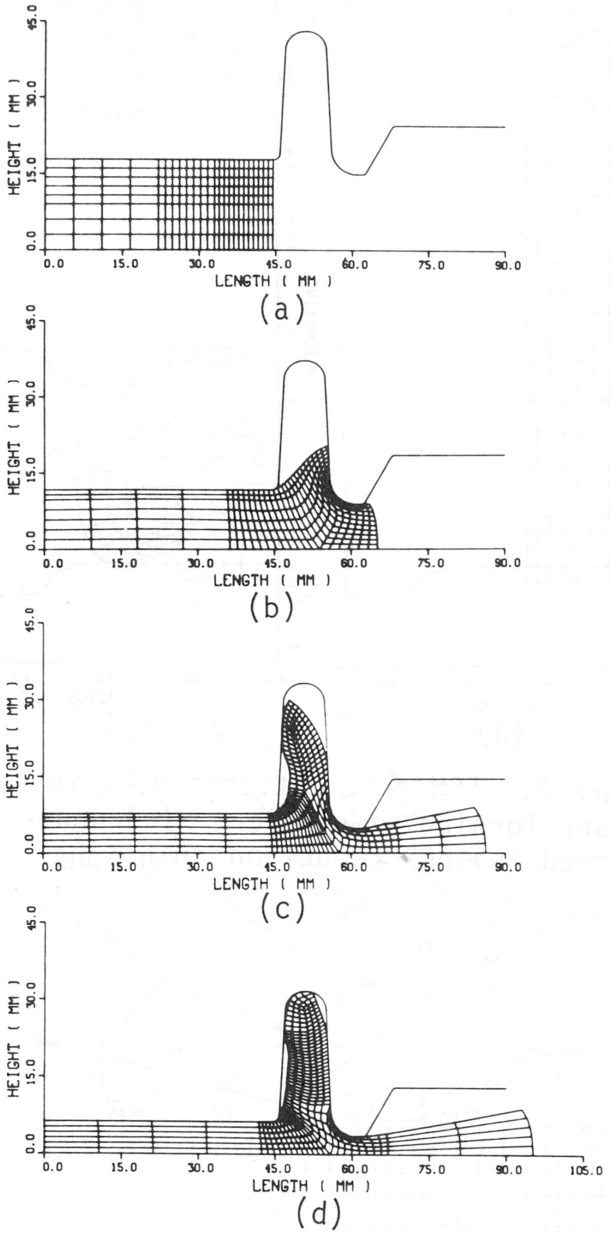

図２　Rezoning による鍛造の大変形解析[3]

４．熱間鍛造による材料プロセス

4.1　熱間加工組織制御

図４には，種々の材料プロセスの温度履歴を CCT 線図上に記した．厚板圧延を端緒として 1970 年代から発達した，制御塑性加工（圧延）～制御冷却からなる TMCP（Thermo-Mechanical Control Process）はやがて制御鍛造に発展し,航空機用大型鍛造部品の製造に広く利用されている．塑性加工では素形材製品あるいは半製品への造形が必

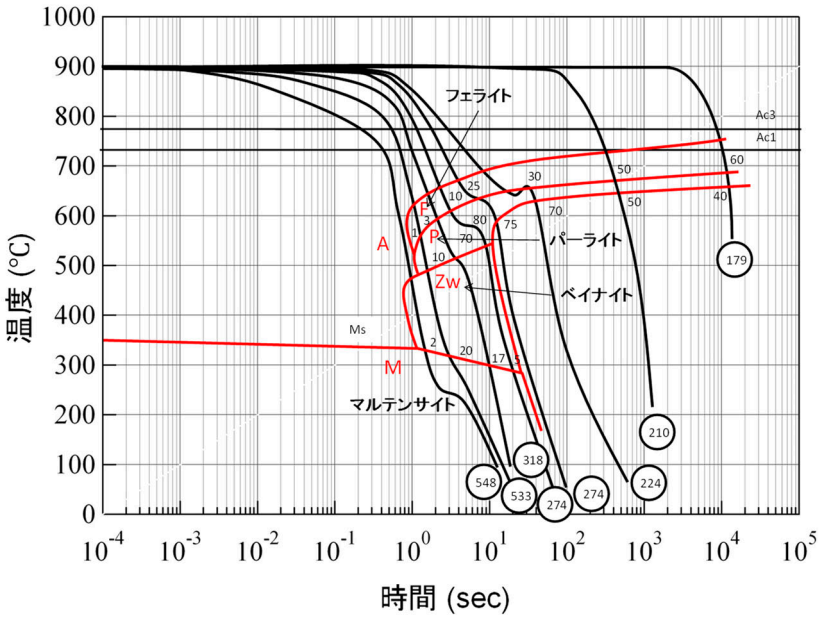

図３　普通鋼の CCT 線図と製品のビッカース硬度（横浜国立大学梅澤 修教授による）

須である．単に塑性変形を利用したのではなく，「目的とする形状に造形をしつつ内部組織を適正に制御することで所望の機械的特性を得る熱間加工」を，制御熱間加工であると定義し，以後の話を進める．

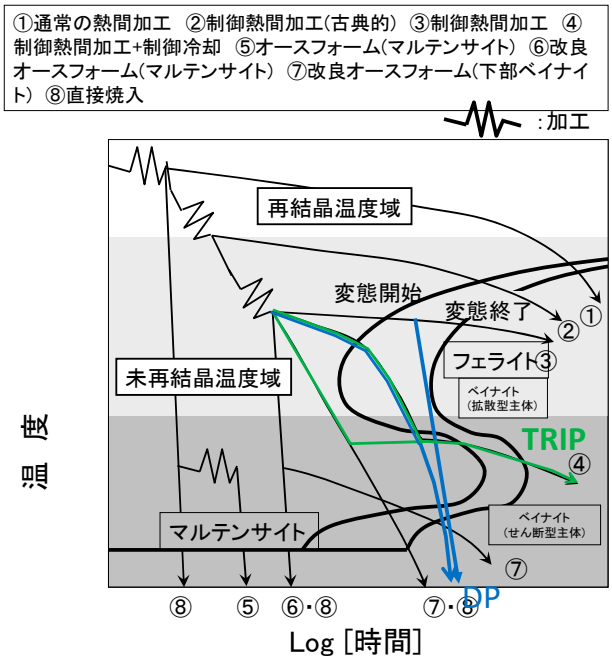

図４　CCT 線図と様々な制御加工

熱加工履歴による組織変化と，機械的特性の変化を制御することが熱間鍛造加工の目的である．一方で，制御熱間加工では，塑性変形と内部組織変化の相互作用を解明することが必然である．相互作用の定量的な解明には，何らかの解析手法が必須であり，先に述べた FEM による変形解析に加え，内部組織変化を解析する手法[7]，機械的特性を解析する手法，さらにこれらの解析手法を動作させるための材料ゲノム[8]が必要になる．

4.2　材料ゲノム

図５に，熱間加工を利用した材料プロセス開発を，生じている現象と併せて示す[8]．図には圧延プロセスが描かれているが，鍛造プロセスでも，生じている現象とメカニズム究明のための枠組みは同じである．

加熱炉では逆変態と粒成長が，熱間加工中には硬化，回復（動的，静的），再結晶（動的，静的），粒成長，析出，粒成長が，冷却中には相変化（変態）が生じている．熱間加工プロセス中には複数の現象が同時に生じていることが特徴である．材料プロセス開発のためには，この現象を定量的に解明しておく必要がある．熱間加工シミュレータによる物理シミュレーションによって，予め実験で解明しておくことが基本であるが，一歩進めて，材料プロセス開発のための計算機シミュレーションを，硬化，回復（動的，静的），再結晶（動的，静的），粒成長，析出について組み上げておき，これを材料の熱間組織変化を表す材料ゲノム[8]と組み合わせておくことで，鍛造プロセス条件（中間形状を含む造形工程，速度履歴，温度履歴，冷却条件）による内部組織変化の解析を行うことが出来る．計算機シミュレーションに載せておくことで，鍛造プロセス条件の変更の影響を知ることが出来れば，鍛造を用いた材料プロセス開発にとって有効なツールとなり得る．

材料ゲノムとしては，**図６**に示した普通鋼（C-Si-Mn 鋼）についてのデータが利用できる[9]．ほかの高合金系につい

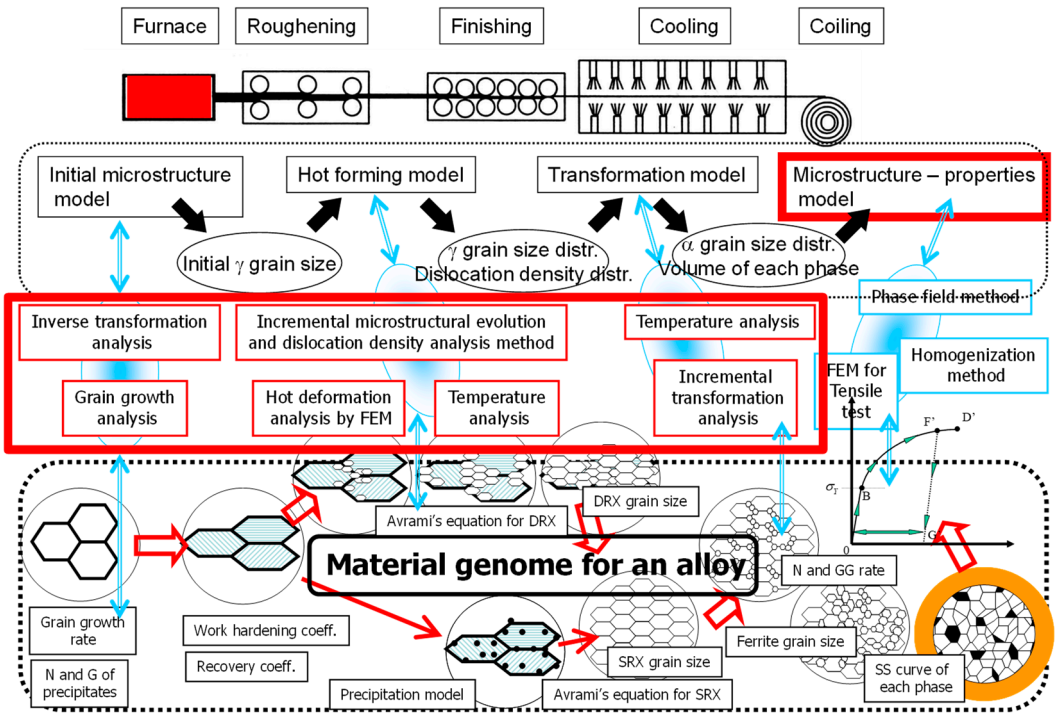

図5　熱間加工プロセスと内部組織変化および材料ゲノム

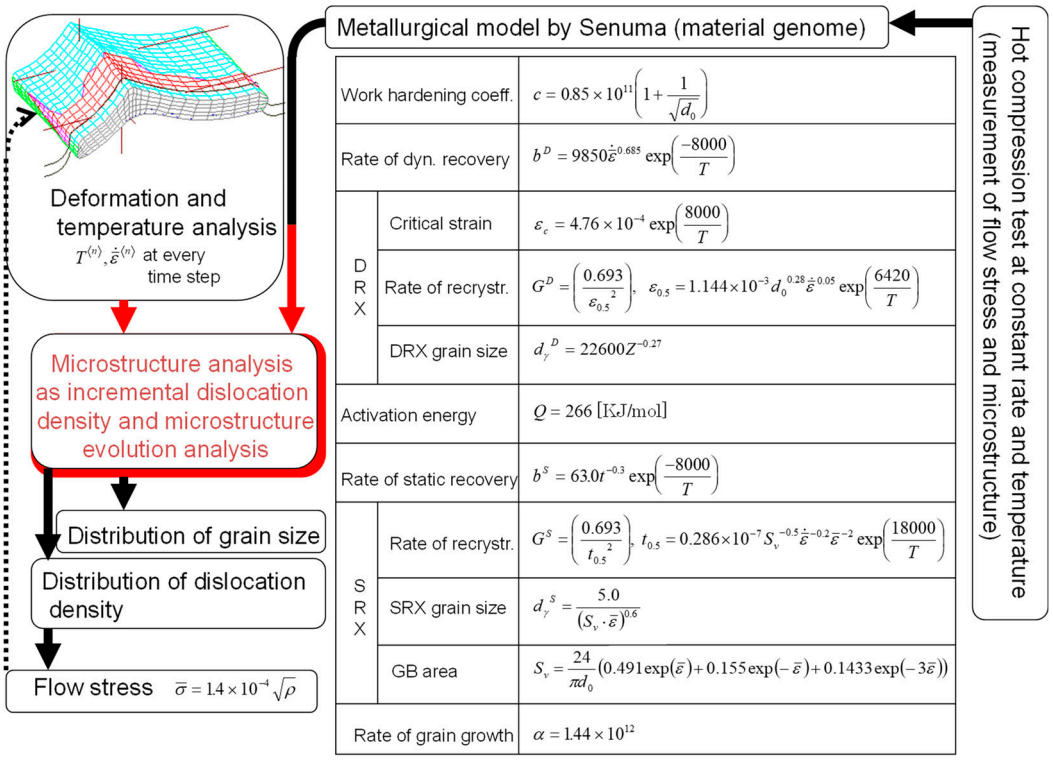

図6　C-Si-Mn 鋼の材料ゲノム [9)]

ても取得が試みられているが，いまだ一部に留まっている．**図3**に記した CCT 線図と硬度との関係も材料ゲノムの一種である．ただし変態による核生成速度は，**図7**に示した通り，変態前の塑性変形により与えられた塑性変形量を代表する転位密度 ρ によっても影響されるので，塑性変形の量によって CCT 線図および生成される機械的特性が変わることに留意せねばならない．

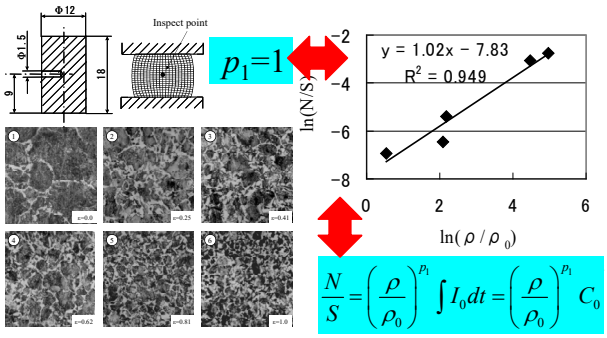

図７　フェライト核生成頻度の塑性変形量による変化

4.3　事例

制御鍛造プロセスの開発では，国プロジェクトが行われている．**図８**は制御鍛造プロセスによる組織制御のための解析による，予測結果の一例である[10]．最近では，航空機エンジン用耐熱合金である 718 合金および 720 合金の大型鍛造品の鍛造プロセス開発の事例が報告されている[11]．

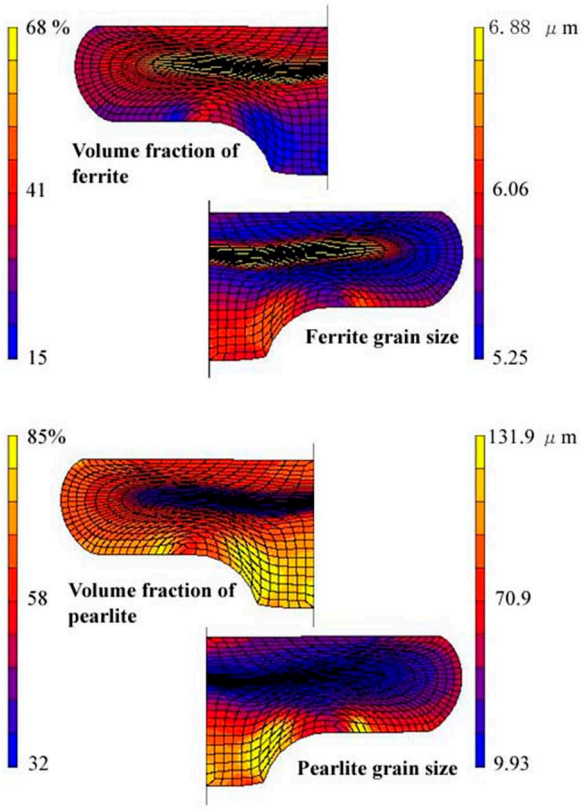

図８　制御鍛造プロセスの事例

５．まとめ

鍛造を用いた材料プロセス開発を概観し，述べた．

鍛造プロセスを利用した内部組織や機械的特性（材質）の創り込みは，工程の省略，より高品位な素形材製品の製造のために今後ますます重視されるであろう．実現には，造形を中心とした塑性加工プロセスの研究と，塑性変形を利用した材料組織制御および機械的特性（材質）の予測，さらに材料の組織変化および機械的特性変化を記述する材料ゲノムが必要である．今後の研究を大いに期待したい．

参考文献

1) 機械工学事典，https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=08:1008100
2) 早川邦夫：平成 19 年度天田財団助成研究成果報告書，**23**(2010)，94.
3) Oh, S.I., Tang J.P., Bodawy A. : Advanced Technology of Plasticity **2** (1984), 1051.
4) Atlas of Time-Temperature Transformation Diagrams for Iron and Steels, Ed. by F. Vander Voort, ASM Int., (1991).
5) 谷口尚司，村上俊之，渡辺敦，菊池淳：鉄と鋼，**74**-2(1988), 112.
6) 澤辺　弘：鉄と鋼，**76**-5(1990), 649.
7) Yanagimoto, J., Karhausen, K., Brand, A.J., Kopp, R. : *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **120**-2 (1998), 316.
8) J. Yanagimoto : *Materials Transactions*, **50**-7 (2009), 1620. https://doi.org/10.2320/matertrans.MF200906
9) 矢田　浩：塑性と加工，**28**-316(1987), 413.
10) 石川孝司：FORM TECH REVIEW, **19**-1 (2009), 38.
11) Ueshima, N., Aoki, A., Osada, T., Horikoshi, S., Yanagida, A., Murakami, H., Ishida, T., Yamabe-Mitarai, Y., Oikawa, K., Yukawa, N., Yanagimoto, J. : In. Superalloys 2020, S. Tin et al. (Ed.), The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham., (2020), 491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51834-9_48