

連携記事

世界最大670ton鋼塊の製造技術と 超大型鋼塊の鍛造技術

The Production Technology of the World Largest 670ton Ingot and Forging
Technique for Ultra Large Size Steel Ingots

梶川 耕司
Koji Kajikawa

(株)日本製鋼所
室蘭製作所 室蘭研究所
所長

1 はじめに

鍛鋼品とは、JISハンドブックに「鋼塊、鋼塊を鍛造若しくは圧延した鋼材又は鋼塊に鍛造と圧延を組み合わせ製造した鋼材をプレス、ハンマ、鍛造ロール、リングミルなどによって熱間加工し、通常、所定の機械的性質を与えるために熱処理を施したもの」¹⁾と定義されているように、鉄鋼材料を熱間にて塑性加工したものを調質熱処理したものであり、鍛造加工だけの鍛工品とは区別されている。

身近にある鍛鋼品の例としては、自動車エンジンのクランク軸、ベアリングレース、ギヤ類、および鉄道用の車輪などがある。このように鍛鋼品は、優れた機械的性質と高い品質から、信頼性が要求される使用条件が厳しい部材に使用されている。鍛鋼品の中で大型のものは大型鍛鋼品と呼ばれており200tonを超えるサイズのものまで製造されている。大型鍛鋼品は一般には目にすることが少ないものの、大型機械・圧力容器・構造物の部材として各種産業設備に用いられ社会の基盤を支えている。

これまで設備の集約化やエネルギー効率の改善を目的として、火力発電では蒸気タービンの超々臨界圧化や大出力化が進められてきた。また原子力発電においても原子炉容器の大型化や単機発電機出力の増大が行われてきた。このような最新鋭の発電所においては、運転中の高い信頼性を確保するため一体化設計が採用されている。近年注目を浴びている地熱発電用の蒸気タービンもしかりである。そのため、設備の大型化とともに要求される鍛鋼品のサイズも大きくなってきた。さらに石油精製容器に使用される鍛鋼品も溶接部低減のために部材は大型化してきた。現在では大型鍛鋼品に使用される鋼塊サイズは最大で670tonにまで巨大化している(図1)。

2 600ton 超級鋼塊の製造技術

鋼塊の大型化に伴って製鋼技術上の困難さも増し、品質課題も顕著になってくる。この品質課題を解決するためには、不純物元素低減による高純度化、鋼塊内部における成分の均一化、マクロ偏析の低減、非金属介在物や微小空隙欠陥の低減が求められる。また水素脆化を起こしやすい鋼種においては極厚部における水素性欠陥の生成防止も重要となる。

不純物元素低減のためには、高純度原材料の使用と精錬工程の最適化による脱P、脱Sの徹底が対策として挙げられる。たとえばタービンロータ軸材では高温長時間供用中の焼戻脆化、原子炉圧力容器部材では中性子照射に伴う脆化が懸念され、P、S、As、Sn、SbやCuなどの不純物元素を極力低減する必要がある。As、Sn、Sb、Cuなどのトラップエレメントは精錬工程では低減させることが困難な元素であり、高純度

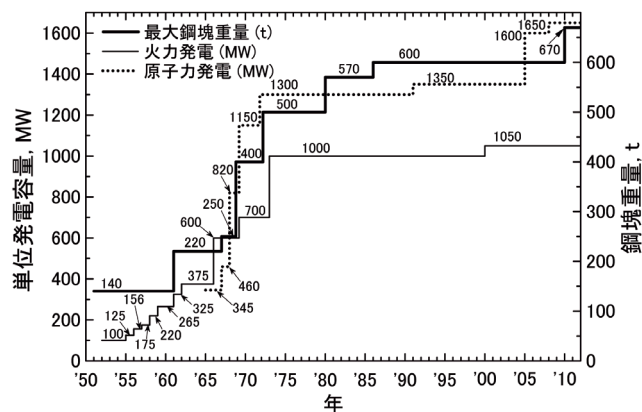


図1 発電用プラントの最大単機容量と日本製鋼所における最大鋼塊重量の推移

の原材料を使用することで低減が図られている。また水素、酸素、窒素等のガス成分低減のために、取鍋精錬炉 (Ladle Refining Furnace : LRF) での真空処理と真空中での鋳込みにて脱ガス処理を組み合わせる二回脱ガス法²⁾が開発されている。

図2³⁾に示す真空造塊法は1950年に西ドイツのBochumer Verein A.G.社が世界に先駆けて実用化⁴⁾したもので、真空タンク内に配置したインゴットケース内に上部より溶鋼を注入することにより造塊するときに脱ガスを実施する方法である。中間鍋を介して真空タンク内に注入された溶鋼は、タンク内の減圧雰囲気中に曝されるやいなや溶鋼中に含まれるCとOによるCOガス生成反応が促進され、この発生するCOガスによって溶鋼滴が飛散し、増大した溶鋼表面から窒素や水素の脱ガス反応が進行する。発生したCOガスは溶鋼から出た窒素や水素と共に真空ポンプによって系外に排出される。開発された当初は真空を引くのに機械式のポンプが使用されていたが、その後排気速度の速いスチームエジェクターに取って代わられた。

この真空造塊法では上述のように真空カーボン脱酸 (Vacuum Carbon Deoxidation : VCD) によって鋳込みの間に速やかに溶鋼の脱酸が行われる。この方法の利点は、脱酸元素としてAlやSiなどの活性金属を用いる方法と異なり、脱酸生成物が溶鋼中に残留せずCOガスとなって排出されるという点である。AlやSiを用いた場合には脱酸生成物の Al_2O_3 や SiO_2 が非金属介在物となって溶鋼中に残留しやすいため、高純度鋼を得るためには脱酸生成物の浮上分離、スラグへの吸収、耐火物への吸着、フィルター除去等の工夫が必要になる。その点、鋳込み中にCO反応で脱酸を行うVCDでは、脱酸生成物が溶鋼中に残留しないということのみならず、溶鋼は脱酸直後に直接鋳型に鋳込まれるため酸素ピックアップの要因となる耐火物との反応を最小限にできるという利点もある。

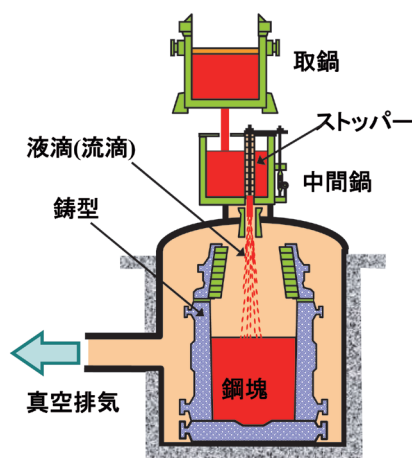


図2 真空造塊法

る。自由鍛造で製造する鍛鋼品の場合には圧延材のような大きな加工比を与えることは困難であるので、塑性加工によって介在物を分散・無害化することはできない。そのため鋼塊段階における介在物を最小限に抑えておく必要がある。しかしながら凝固時間が長くなる大型鋼塊では凝固途中に介在物が凝集粗大化しやすく、粗大化した介在物が鋼塊中に捕らわれて砂疵欠陥となりやすいという難しさがある。このため鋳込み時の溶鋼清浄度を一段高めておきたい大型鋼塊では、一般に造塊方法として真空造塊法が用いられている。

さらに溶鋼を散らして脱水素反応を進行させるために、中間鍋ストッパーからArガスを通気するMSD (Mold Stream Degassing) -Ar法と呼ばれる方法も開発されている⁵⁾。MSD-Ar法は中間鍋ストッパーからArガスを吹き込む手法である。ストッパー中心に配置されたパイプからArガスを流すとArガスは溶鋼流に巻き込まれ真空タンクに注入される。溶鋼と一緒に真空タンク内に注入されたArガスはタンク内の減圧雰囲気によって急速に膨張し、落下している溶鋼流をさらに飛散させる。このArガスの急速な膨張によって溶鋼流が飛散・微細化し、溶鋼流の分散をCOガスのみに頼るよりも溶鋼滴を小さくすることが可能となり、比表面積を増大することで脱ガス反応がより促進される。

精錬工程中のLRFにおける水素量変化のイメージを図3に示す。溶鋼中の水素量は電気炉から取鍋に受鋼した時点では3~5ppmと比較的高い。その後Ar攪拌しながら真空処理する間に約1ppmまで低下するが、成分調整と温度調整する間に徐々に増加する。この水素量増加は真空鋳込み直前の中間鍋まで進行する。しかしこれを真空鋳造すると一気に水素量が低下して<1.0ppmの極低水素量が得られる⁶⁾。近年では、溶鋼中水素量のその場分析システムが導入され、取鍋内水素量は精錬工程においてより厳密に管理されている⁷⁾。このような水素量の低減の取り組みにより水素系欠陥の生成防止につながっている。

日本製鋼所における600ton級の超大型鋼塊の製造プロセス

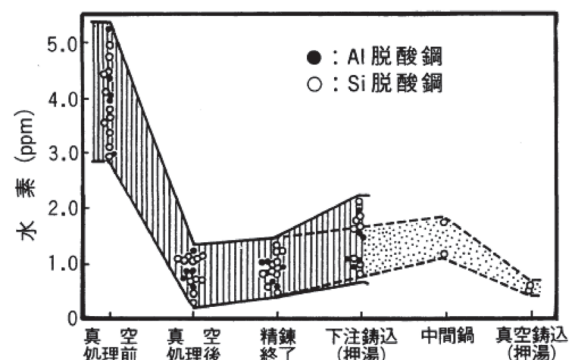


図3 取鍋精錬工程中の溶鋼中水素量変化

スを図4に示す。1基の120ton電気炉を用いて原料となるスクラップを溶解する。この際、酸素吹きを併用した酸化精錬によってPなどの不純物元素を除去する。その後取鍋に受鋼してLRFにて還元精錬によって脱酸、脱硫を行ってから、成分調整・温度調整を行う。電気炉は1基のみであるので、スクラップ溶解・酸化精錬を繰り返して5基の取鍋分の溶鋼を準備する。最初の取鍋受鋼から5基目の取鍋精錬完了まで10時間程度掛かるため、長時間の取鍋保持中の成分変動を考慮した成分制御が必要である。この後、真空タンク上に5基の取鍋を移送し、1基目から順繰りにタンク蓋上部に設置した中間鍋に注湯して、真空造塊を行う。一つの鑄型に複数の取鍋内の溶鋼を合わせて鑄込むことになるが、高品質の鋼塊を製造するためには成分調整以外にも各LRFにおける溶鋼温度、精錬終了のタイミングを合わせること、などの調整技術が不可欠である。

鋼塊の大型化により問題が顕著になってくるのが、マクロ偏析と中心部に生成するザクと呼ばれる大型の空隙欠陥であ

る。図5³⁾に鋼塊内部組織の模式図を示す。マクロ偏析には、軸心部に発生するV偏析、鋼塊中間層に生じる逆V偏析、沈殿晶部の負偏析および押湯部の溶質濃化が代表的なものとして知られている。ザクは主に軸心部のV偏析部に発生し、そのサイズも大きいものでは数10mmに及ぶことがある。

マクロ偏析は鋼塊大型化に伴う凝固の長時間化によって悪化する。マクロ偏析は、凝固前面に生じる固液分配による成分変動が局所的なもの（ミクロ偏析）に留まらず、その成分の不均一が鋼塊内部の長範囲に渡って表れたものである。鍛造用大型鋼塊はそのサイズの大きさから凝固に時間を要し、670ton鋼塊ともなると凝固完了まで5日掛かる。その間に凝固前面から排出された溶質元素は凝固進行とともに濃化し、溶質流動によって逆V偏析やV偏析といった局所的な成分濃化を生じる。また液相中の溶質元素の濃化によって鋼塊頂部の最終凝固部では、鑄込み成分から大幅な成分濃化を呈することになる。逆V偏析は大型鋼塊では不可避免的に生成するが、機械的性質にあまり悪影響を及ぼさない程度に済むように、脆化元素の低減や成分の最適化による軽減が図られている。またV偏析も鋼塊形状および押湯設計の工夫によって低減がなされている⁸⁾。

マクロ的な成分分布を予測するための数値シミュレーションの開発は1970年代から進められてきた。当初は流動を含まない二次元軸対称モデルが主体であったが、その後のコンピュータの計算速度の向上や解析モデルの発展によって、現在では溶鋼流動を考慮した逆V偏析発生まで再現できるモデルまで作られている⁹⁾。かつては解析研究者が自ら作成した自家版ソフトが主流であったが、解析手法の高度化に伴い専門のソフトウェア会社が作成した凝固解析ソフトが市販さ

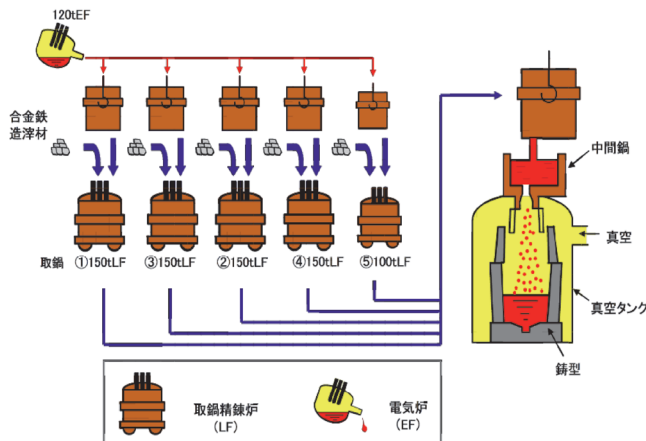


図4 650トン鋼塊の製造工程

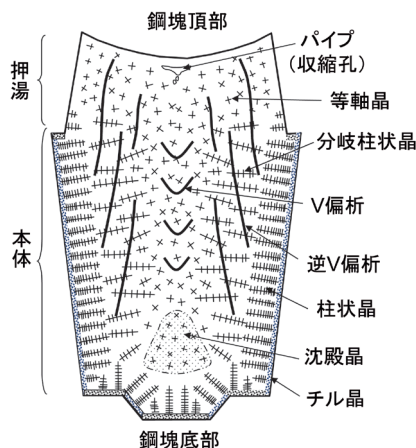


図5 鋼塊各部の組織

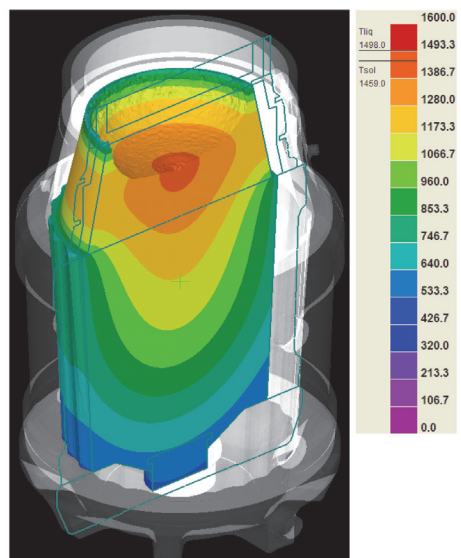


図6 650ton鋼塊の凝固中の温度分布

れるようになった。図6に市販ソフトによる凝固解析事例として650ton鋼塊の凝固途中の温度分布を示す。これらのシミュレーションソフトを駆使することによって、成分濃化程度の予測や切り捨て位置の最適化および製品各部位における要求機械的性質を満足できるかが判断できるようになってきている。図7に後述の650ton鋼塊の軸心部炭素濃度分布と凝固解析による成分分布予測結果との比較を示す。かなり良い精度で成分分布予測が出来ていることがわかる。

ザクは凝固末期に鋼塊が凝固する際に生じる凝固収縮に、液相の供給が十分に行われないために生成する一種の引け巣である。鋼塊上部に生成する二次パイプは最終凝固部の残液相が無いところで凝固収縮分の体積を補填できる液相がないためにできる引け巣であるが、鋼塊軸心部に生成するザクは、液相流動性の低い半凝固域が細長くなったために押し湯からの給湯が行き渡らなかったために生じる¹⁰⁾。ザクを抑制するためには、鋼塊の高径比（高さとの比率）を下げる、鋳型のテーパを大きくする、などの対策が取られる。しかし高径比の低下やテーパ増大は鋼塊径を大きくすることに繋がるため、ミクロ偏析の悪化、鍛造初加熱時間の増加など別方面に悪影響を及ぼす。現実的な解決策としては、ザクは鋼塊製造プロセスだけに解決を求めるのではなく、後述する鍛造工程とのコンビネーションで無害化を図るのが一般的である。

超大型鋼塊の内部性状の例として、650ton鋼塊の解体調査をした結果を以下に記す。本鋼塊は一体型低圧蒸気タービン用の軸材に供することを想定して製造されたものである。鋼塊の化学成分を表1に示す。この成分は低圧蒸気タービン

ンに広く用いられている3.5% NiCrMoV鋼と呼ばれる鋼種である¹¹⁾。650ton鋼塊の外観を図8に、この鋼塊の縦断面マクロ組織を図9に示す。柱状晶組織は、鋼塊表層からおおよそ300mmと底部から300~400mm程度の領域であった。それよりも軸芯側では等軸晶組織となっていた。また、押し湯部には肥大化した分岐柱状晶が認められている。逆V偏析は通常鋼塊が大型化するほど顕著になる傾向にあるが、本試作鋼塊に認められた逆V偏析は押し湯部の表層から1/2R近傍と底部から2000mm位置の軸心近傍に数本認められる程度であり、比較的軽微であった。

3 超大型鋼塊の鍛造技術

鍛造は金属の塑性加工法の一つであり、鑄込んだ際に生じるポロシティや気泡などの空隙を圧着して材料を密にし、



図8 世界最大の670ton鋼塊の外観

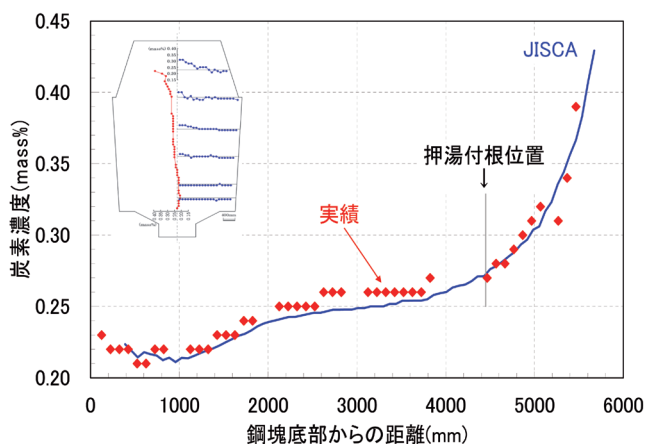


図7 鋼塊軸芯部における炭素濃度予測と実績

表1 650ton 試作鋼塊の化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
0.23	0.05	0.32	0.0031	0.0012	3.64	1.70	0.41	0.07



図9 650ton鋼塊の縦断面マクロ組織

鑄造組織をより微細で均質な組織に作り替える手法である。「鉄は熱いうちに打て」と言われるように、鋼は変形抵抗の小さくなる熱間で加工することによって比較的容易に任意の形状に変形させることが出来る。また熱間加工温度では、動的再結晶もしくは動的ひずみを与えた後の静的再結晶による結晶粒微細化や原子の拡散が早いことから固相接合による空隙の圧着ができる。鍛造と類似の言葉で鍛錬という語があるが、鍛錬という場合には単に熱間加工によって形状を変えるだけでなく、機械的性質の改善および鋼材の内部欠陥の是正などを目的にして行う鍛造作業を指すことに使われる¹²⁾。鋼塊内部は、図5に示したように、粗大な一次品及びマイクロ偏析、そしてマイクロポロシティやザクといった空隙欠陥などがあり均一ではない。鍛錬による材質の改善効果は、空隙欠陥を圧着によって消滅させることと粗大な凝固後の一次品を微細で均一な結晶粒にすることにある。

鍛鋼品の中で小型の製品はドロップハンマを用いて製造されるものもあるが、大型の鍛鋼品には一般に力量の大きな液圧プレス（図10）が使用される。大型鍛鋼品は少量多品種であることが通常であり、製品ごとに使用する工具・治具も異なる。製品の形状に合わせて加工に適した工具・治具を用いて鍛錬を行い、数回の加熱を繰り返して所期の形状になるように順次加工しながら成形をしていく。また重量が数10tonを超えるような製品になると、その重量からハンドリングの困難が生じてくるので、事前の段取り計画がより重要となってくる。

材料を圧縮した際に内部に生じるひずみ分布は場所によって異なる¹³⁾。内部の組織の均質化も鍛造の重要な目的であるので、この点にも注意を要する。特に複雑な形状の鍛鋼品の場合には、製品各部位に十分な鍛造効果を付与するために



図10 14000ton 自由鍛造用プレス

FEM解析などによって印加できるひずみ分布を把握しておくことが必要となる。

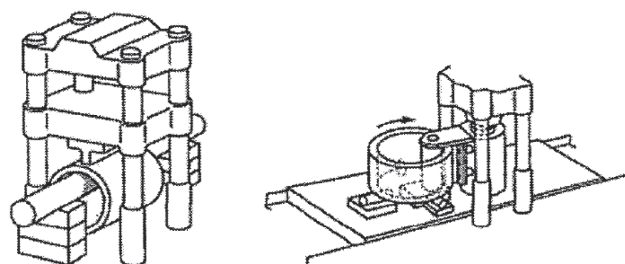
上述の鋼塊中心部に存在するザク以外にも比較的大型のポロシティが逆V偏析部に発生する。逆V偏析部は、溶質濃度が高いために液相線温度・固相線温度が低下して周囲よりも凝固が遅れるために引け巣発生サイトとなるためである。

金属内部に存在する空隙を変形させてその体積を小さくするにはひずみが、空隙の内表面同士を金属結合によって圧着させるには静水圧が有効であると言われている¹⁴⁾。この大型鋼塊内部の空隙圧着の判定基準として、静水圧応力比積分を目安にする手法が報告されている¹⁵⁾。ザクを圧着するための、鋼塊の軸心部まで十分なひずみと静水圧応力を作用させる特殊鍛錬法として、温間鍛錬法（JTS法）¹⁶⁾、FM鍛錬法¹⁷⁾、強圧下広幅拘束鍛錬法¹⁸⁾などの手法が報告されている。

650ton鋼塊の調査後に世界最大となる670ton鋼塊から一体型低圧タービン軸材が試作されている¹⁹⁾。このときも詳細な調査が行われており、外周部からの超音波探傷により検出できる欠陥がないこと、サンプル採取により各部位の機械的性質も目標の特性が得られていること、解体調査によって空隙状の欠陥は認められなかったこと、から670tonという超大型の鋼塊から製造した製品であっても鍛錬による圧着効果によってザクやポロシティが完全に消去できていることが確認されている。

4 リング鍛造品

信頼性が要求される圧力容器の分野では、周方向応力（フープ応力）のかかる部位に溶接部がある周継手を避けるためにリング鍛造品を組み合わせることが指向されてきた。1972年にプレス内での鍛錬が困難な大型部材を製造するために、機外鍛錬法（図11）が開発・工業化され、西ドイツ（当時）Biblis-B PWR向けの外径5,780mm、高さ2,500mmのリングが、400ton鋼塊から製造されている²⁰⁾。これは従来4個の鍛造材をESW（エレクトロスラグ溶接）で溶接して製造されて



(a)プレス機内鍛造

(b)プレス機外鍛造

図11 機外鍛錬法

いたものを大型鋼塊からの一体鍛造品として製造した事例であり、これが超大型鋼塊からの大型リング鍛鋼品の始まりとなった。

日本製鋼所では2010年に導入された14000ton プレスによって現在は外径約6mまでのリング材であれば、プレス機内でのマンドレル鍛造により製造が可能となっている。さらに鉛直方向のプレス荷重を水平方向に変換する特殊なアタッチメントを利用して、プレス機外に置いたリング材の孔広げ作業を可能にしている。この方法を利用することによって機内では外径6mまでしか製造できないプレス設備でも外径10m、高さ4.5mまでの大型リング材の製造が可能な技術が開発されている²¹⁾。

ロータリーキルンのタイヤのようなリング鍛造品は、タービンシャフトのような中実品に比べると比較的製品肉厚が薄いために調質熱処理の際の中心部の冷却速度を確保しやすい。しかしながら超大型のタイヤともなると肉厚が1000mm近くになるため、肉厚中心部の想定冷却速度から所定の機械的性質が得られるか十分な事前検討が必要となる。特に強度・靱性への影響が大きい元素に関しては、凝固シミュレーションも併用して当該部の成分濃度を推定してから強度予測をする必要がある。さらに大型化に伴って発生する熱応力や変態応力も大きくなるので、熱処理時の焼き割れや変形にも注意を払わなければならない。この熱処理割れを生じさせないための条件設定はこれまで経験則に依っていたが、大型鍛鋼品における熱処理時の変態応力を推定する技術が開発されてきており²²⁾、FEM解析を援用した判断が可能になってきている。

5 おわりに

大型鍛鋼品は、大型機械や大型装置の心臓部となる主要部分、また大型压力容器などの信頼性が要求される部材に今後とも用いられていくと思われる。科学技術の発展に伴い、現象が解明されそれが製造技術へと反映されてきた。しかしながらV偏析のように、概念的には理解がなされているものの、詳細は未だ明らかになっておらず数値シミュレーションに展開出来ていない課題が現在でも残っている。大型鍛鋼品はその大ききゆえに外部から人為的に強制冷却などの変化を与えても、凝固過程や熱処理工程では内部の熱伝導律速となり材料の物性値に支配され自由に制御することが困難という難しさがある。人為的な制御が困難な大型鍛鋼品では、実際に起きている現象を理解し、材料の持つ物性および物理・化学法則に従った工法を取ることによって初めて改善が出来る。より信頼性の高い鍛鋼品を製造するために今後も更に現象の理解が進められていくことが期待される。

参考文献

- 1) JISハンドブック 2018 鉄鋼I, 日本規格協会, (2018), 905.
- 2) T.Takenouchi, H.Yamada, Y.Iwabuchi, M.Funazaki and T.Takahashi : 11th International Forgemasters Meeting, Terni/Spoletto, (1991) II, 6.
- 3) 梶川耕司 : ふえらむ, 19 (2014) 10, 19.
- 4) A.Tix : Iron Steel, 29 (1956) 3, 81.
- 5) 特許第998322号
- 6) 竹之内朋夫, 舟崎光則, 山田人久, 一宮義昭 : まてりあ, 33 (1994) 4, 441.
- 7) 山根佑介, 関佑太, 生方貴, 鈴木忠, 上田奏 : 日本製鋼所技報, 64 (2013) 50.
- 8) たとえば, 赤堀公彦, 前野茂夫, 児玉英世, 森定祝雄, 大島俊彦 : 71 (1985) 1, 78.
- 9) T.Sawada and K.Kajikawa : Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting, Austin TX, (2013), 165.
- 10) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫, 岩淵義幸 : 鉄と鋼, 73 (1987) 14, 1706.
- 11) K.Kajikawa, S.Suzuki, F.Takahashi, S.Yamamoto, T.Suzuki, S.Ueda, T.Shibata and H.Yoshida : 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging, Aachen, (2012)
- 12) 近藤八三 : 鉄と鋼, 44 (1958) 6, 679.
- 13) 講座・現代の金属学 材料編11 金属加工, 日本金属学会編, (1986), 168.
- 14) 小野信市 : 鋳鋼と鍛鋼, 534 (2011), 4.
- 15) 小野信市, 南克之, 落合朋之, 岩館忠雄, 中田進一 : 日本機械学会論文集 (C編), 61 (1995) 585, 2141.
- 16) 舘野万吉, 鹿野昭一 : 塑性と加工, 7 (1966) 65, 299.
- 17) 中島浩衛, 渡辺和夫, 渡辺司郎, 田村至 : 塑性と加工, 35 (1933) 405, 1201.
- 18) 荒木重臣, 津田統, 松下富春, 佐藤隆夫, 落敏行 : 昭61春塑加講論, (1986), 383
- 19) T.Yamauchi, H.Kudo, Y.Kishi, S.Ueda, H.Yoshida, K.Kimura, K.Kajikawa and S.Suzuki : 19th International Forgemasters Meeting, Tokyo, (2014), 311.
- 20) S.Onodera, H.Tsukada, K.Suzuki, W.Debray and H.Cerjak : European Nuclear Conference, Paris, (1975)
- 21) 小山庸一, 佐々木友治, 中村毅, 栗原行, 村井悦夫 : 日本製鋼所技報, 56 (2005), 57.
- 22) Y.Yanagisawa, T.Hosoya, Y.Kishi and K.Sasaki : Mechanical Engineering Journal, 4 (2017), 266.

(2019年2月27日受付)