

よる平衡組織の情報だけでは不十分であり、時間とともに変化する組織の予測手法が必要である。フェーズフィールド法は、組織の形態を濃度や規則度等の複数の変数で表現し、その時間・空間変化を発展方程式に基づいて計算することにより組織形成過程を解析する方法である。フェーズフィールド法により、現実の材料における様々な組織形成過程のダイナミクスが次々と解明され、実用的な合金系での組織予測が可能となりつつある(図4.6参照)。

有限要素法(FEM)による圧延プロセスシミュレーションは、剛塑性FEMにより、ほとんど全ての熱間圧延加工時の三次元定常塑性流動の解析が可能である。しかし、FEMによって計算されるひずみ速度、温度の分布を加工中の材質変化に反映させるのは簡単ではなく、動的再結晶、多パス加工時の再結晶等を考慮した解析がなされたのは1990年代に入ってからである。板圧延や鍛造における、オーステナイト相の結晶粒変化やフェライト・パーライト変態後の組織変化が解析されている。現在、FEMを核とした内部組織変化の解析を行う上で、再結晶速度定数、回復速度等の材料情報が不足している。この材料情報を化学組成の関数としてフェーズフィールド法、MD法等により理論的に求めることができればマクロな組織予測が飛躍的に進展する。機械的性質の予測に関しても、塑性変形の素過程を記述した上でマクロな変形をモデル化する様々な手法が開発されており、均質化法、結晶塑性理論、転位の拡散方程式を解析することで、結晶粒内部での転位分布やサブグレイン形成も含めた多結晶体の変形解析が可能となっている。

(5) 今後の展望

ミクロからマクロに渡る時間及び空間スケールを対象とする計算科学手法の進展について、できる限り鉄鋼材料に焦点を当てて紹介した。最近の計算科学手法の高度化、特にフェ

ーズフィールド法に代表される動力学解析法の進展により、実用的な合金系での組織予測が可能となりつつある。また、有限要素法を核とした組織や変形解析でも大きな進展がみられ、各スケールでの手法の有効なリンクにより、多くの現象が複雑に絡み合う鉄鋼材料においても、組織と特性の理論的なシミュレーションによる予測が手に届くところに来ている。

4.2 鋼種別鉄鋼材料および境界材料の進歩

4.2.1 薄鋼板

(1) この10年の研究動向

薄鋼板の材料開発のここ10年の歩みと現状を数例のホットな話題を入れて紹介する。ここ10年の間にISIJ Internationalと鉄と鋼に掲載された薄鋼板の材料開発に関する論文調査によると、ISIJ Internationalには約100編強、鉄と鋼にはその約半数が掲載されていた。掲載内容には以下のような特徴が認められた。①IF (Interstitial atom free) 鋼に関わる論文が一番多く、特に集合組織ならびに r 値を対象にした研究が多い。②次に多い鋼種はTRIP (Transformation induced plasticity) 鋼で大学を中心に特性の改善に関する論文が多い。③材質予測制御関連の論文が1990年代後半までは多かったが、その後は比較的少ない。④フェライト域熱延を対象にした論文も10編ほど見られた。この結果は明らかに最近の10年間の企業での研究開発活動の内容を反映していない。①、③、④はすでに10年前にピークを迎えた研究開発である。

実際の薄鋼板の研究開発の動向でみると、最近の各鉄鋼メーカーの技報に見られるように自動車車体の軽量化を実現するためのハイテンの開発が精力的に行われた。各自動車部位のハイテン化について自動車メーカーにアンケート調査した結果、アウターパネルは490 MPa、構造部材は980 MPa、足回り部材は780 MPa、そして補強材は1760 MPa材の適用が当面の数値目標として挙げられた。この目標を達成するには必要強度を有し、部品成形、組み立てに必要な成形性、溶接性を有する鋼板の開発がターゲットになる。以下に各部材のハイテン材の開発状況について注目技術を中心に紹介する。

(2) 外板パネル用鋼板

外板の板厚は指などで押された時に凹まない耐デント性が要求されるが、板厚を減じて、耐デント性を確保するには降伏強度YPを高める必要がある。しかし、YPが高くなると厳しい加工を受けた近傍に面ひずみが生じやすくなる。この耐

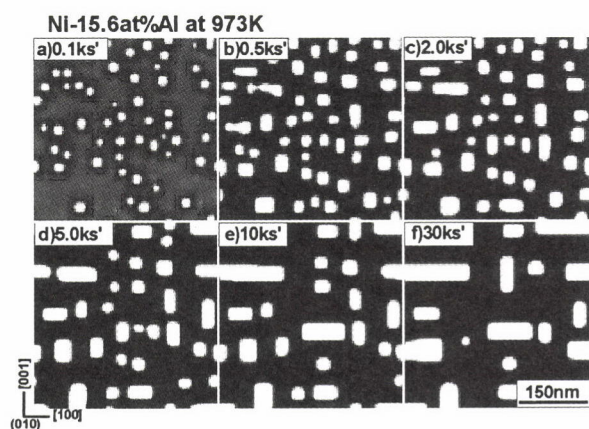


図4.6 Ni-Al合金における γ' 析出相組織形成過程のフェーズフィールド法による二次元シミュレーション。973K等温時効。(ふえらむ, 9 (2004), 497.)

面ひずみ性と耐デント性を両立し、板厚の低減を可能にした鋼板がBH (Bake hardened) 鋼板で、成形時に低YPであった鋼板が塗装焼付け処理で鋼中の固溶C、Nを拡散させて転位に固着し、転位の動きを阻害して、高YP化を実現している。ところが、このC、Nの拡散現象は室温近くの低い温度でも時間を掛ければ起きるので、プレスが行われるまでにこの現象が起きないように固溶C、N量は上限を限定され、そのためにBH量も制限される。最近、従来のBH鋼板にMoを0.025%程度添加することにより、自然時効温度域ではCとMoとの相互作用により時効が遅れるが、BH温度ではこの相互作用は弱くなり十分なBH量が得られるという新しい知見が報告された。自然時効が起こる固溶C量の上限が緩和されたため、高いBH量が得られる。また、同じBH量を得るのに低い固溶C量で済み、高温にさらされても自然時効が起こりにくいので、本BH鋼板は赤道を越える輸出用に適用されている。

パネル用高強度鋼板として2種類の440 MPa級の鋼板が開発されている。1つはIF鋼に固溶強化元素であるP、Mn、Siを適量添加して、n値0.24、r値2弱の優れた成形性を示す鋼板で、もう1つは同様に固溶強化元素は添加するものの、通常のIF鋼よりC量を3倍近く多く添加すると共にNbを0.1%程度添加して、組織の微細化と微細析出したNbCによる析出強化による強度アップも図っている。また、この鋼板の特徴は粒界にNbCが優先的に析出するため、粒界近傍ではNbの濃度が下がるため、微細な粒内析出物が生成しにくくなり、1 μm 程度の粒界近傍域で析出物がほとんど観察されない領域が生じる。この析出物がほとんど存在しない領域は加工を受けると低い荷重で降伏を起こすので、比較的低い降伏応力を示し、面ひずみの発生を抑制する方向に働いている。

(3) 中・高強度域の良成形性構造用ハイテン

中・高強度域の鋼板はメンバー類などの衝突安全部材やホイールなどの足回り部品が中心で部位によって主に優れた延性、あるいはバーリング性(穴広げ性や伸びフランジ性)を必要とする場合や、両特性を同時に必要とする場合があるため、両特性をマップにしたメニュー化が進められている。これらの特性は材料の組織によって大きく影響を受けるため、必要な特性を得るには組織制御が重要になる。

伸び重視型鋼板の代表はDP (Dual Phase) 鋼と残留オーステナイト鋼 (TRIP鋼) である。DP鋼は既に使用され四半世紀以上の歴史があり、学術的には新たな研究はあまりなされていないが、780 MPa級、980 MPa級と高強度化が進められるたびに成形性が最も良くなる成分並びに製造条件の最適化の研究開発が精力的に行われている。

一方、TRIP鋼は未だに世界的に研究対象になっており、国際会議も頻繁に行われている。最近のTRIP鋼に関わるトピックスは、①Ni、Cuを添加した新たな成分設計で鋼板の表面の界面反応を制御し、濡れ性および合金化の問題を解決し、その上、溶融めっきプロセスでは確保しにくかった残留オーステナイトの量ならびにその中のC濃度を確保することに成功し、耐食性に優れた合金化溶融亜鉛めっきTRIP鋼の実用化、②フェライト変態、ベイナイト変態、そしてその進行に伴うオーステナイト中のCの濃化とオーステナイト並びにベイナイト中のセメンタイトの析出を競合的にシミュレートでき、残留オーステナイト量やその中のC量などが計算で求められるTRIP鋼の材質予測モデルの実用化、③母相がベイナイトあるいは焼き戻しマルテンサイトで数%の残留オーステナイトを分散させた伸び一穴広げ性バランスの優れたTRIP鋼の研究、④低r値にも関わらず深絞り性が優れる理由を解明した加工誘起変態挙動に及ぼす変形様式の影響に関する研究、⑤TRIP鋼が衝突特性や疲労特性に優れる理由を明らかにした研究などが挙げられる。

最近、TRIP鋼を凌ぐ高延性ハイテンの研究も精力的に進められている。原理はMnを25%程度添加して組織をオーステナイトにし、変形時に加工誘起双晶を起こさせ、TRIP現象と同様に均一伸びを向上させるものである。この加工誘起双晶発現による変形挙動をTWIP (Twin induced plasticity) 現象と称されている。このTWIP現象に関してはモデル化も図られている。この種の鋼板の自動車用鋼板への適用が10年程前に韓国で検討され、日本にも紹介されたが、その後実用化には繋がらず日本ではほとんど研究がなされなかった。しかし、最近、再びヨーロッパを中心に精力的に研究が進められて、実用化も一部で図られている。機械的性質としては引張強度600 MPaで全伸びが90%を示すという報告もある。また、Mn量を減らすことによりMnが20%ではTRIP/TWIP現象を15%ではTRIP現象を用いることにより異なった強度一延性バランスを持つメニュー化も提案されている。また、これらの鋼に低比重元素であるAlとSiをそれぞれ3%ずつ添加した軽量化を狙った鋼板も開発されている。これらの鋼板はTRIPやTWIP現象の発現のお蔭で衝突エネルギーの吸収能も優れている。しかし、製造性、耐食性、化成処理性、溶融めっき性などに問題があるため、日本では実用化の段階には至っていない。

最近各社が精力的に開発を進めたのが伸び一穴広げ性バランスに優れた鋼板である。共通しているメタラジ的思想は母相を延性に優れたフェライト相あるいはベイニティックフェライト相とし、強度確保には穴広げ性の劣化の原因になる強度の不均一性が起こりにくい析出強化によって母相を強化しようとするもので、熱延鋼板ではTiCや(TiMo)Cを熱延

冷却時ならびに巻取時に大量に析出させたベイニティックフェライト組織の780 MPa級の鋼板やIF鋼ベースにCuを析出させた590 MPa級の鋼板が開発されている。前者の鋼板では冷却中に析出物が生成するので、冷却温度パターンにより析出量が異なり、強度や穴広げ性にばらつきが生じ易く安定製造に各社独自のノウハウがある。

ところで、構造用部材ではストレッチャーストレインが起こっても品質上は問題が無いので、パネル材よりも高いBH量を付与することが出来る。特に、構造用部材は衝突エネルギーの吸収能が問われるので、降伏時だけでなく応力ひずみ曲線全体をBH処理で高強度側にシフトすることが望まれる。このニーズに応じて、急冷して炭素のほかに窒素を過飽和に含んだ熱延鋼板に10%程度の予ひずみを加えBH処理することによりYPが80 MPa程度、TSが60 MPa程度上昇することが報告され、商品化が図られた。

シャーシー系部材で問題になるアーク溶接時に生成する溶接熱影響部(HAZ)の軟化を抑制するためにNbとMoを添加した鋼板が開発された。これらの元素はHAZ部の転位の消滅を抑制し、その転位上に炭化物として微細析出することによりHAZ軟化を軽減している。

また、シャーシー系部材の板厚を支配することの多い疲労特性を向上した鋼板として、Cu添加ハイテンが開発された。Cuの使い方としては固溶状態で鋼中に存在させると交差すべりが抑制され、表層に現れるすべりに伴う段差が小さくなり、疲労き裂の発生が抑制されることにより疲労限が高くなることが明らかにされた。

(4) 超高強度域の補強部材用ハイテンと

ホットプレスによる部品の超ハイテン化

980 MPa超級ハイテンのプレス成形は曲げ加工やハット型加工が多いが、曲げ性の向上には組織の均一性が重要であることが明らかにされ、それを実現する組織制御により曲げ性に優れた超ハイテンが開発された。また、最近ではより複雑形状の部材への超ハイテンの適用が要求され、DP系の延性重視型や延性一穴広げ性バランス型の鋼板が高度な組織制御によって実用化されている。

超ハイテン部品の製造方法は超ハイテン材をプレスあるいはロール成形による一般の成形方法の他に、低強度の鋼板を成形後に焼き入れ、焼き戻しをする方法などが知られているが、室温での成形は形状凍結性や金型の調整ならびに磨耗の問題があり、既プレス材を焼き入れる場合は、熱ひずみによる形状不良問題が避けられない。

そこで、最近注目を集めているのがホットプレスによる超ハイテン部品の製造方法である。ホットプレスとは鋼板を変態点以上に加熱し、プレス加工工程で金型の抜熱により焼き

を入れて高強度を得る技術で、極めて優れた形状凍結性が得られるのが特長である。ホットプレス部品のスプリングバックは皆無である。高温でのプレス成形なので優れた成形能を示し、センターピラーのリンフォースのような複雑形状の部品も製造されている。今後、ホットプレス用の成形技術も進展し、さらなるハイテン化にはホットプレスが重要な役割を果たす可能性が高い。

また、ホットプレス部品に耐食性を付加する方法としてアルミめっき鋼板が適用されている。純アルミの融点は660℃なので焼入れによる強化を前提にするホットプレスではAe3以上の加熱が不可欠であるので、アルミめっき鋼板の適用は不可能と考えられていた。しかし、加熱速度を制御することにより鋼板のFeとの合金化が進み、めっきの溶融を抑制し、プレス時にはめっきがほぼ固相状態で成形できることが確認された。そして、その際に形成される多層構造のFe-Al合金相をコントロールすることにより優れた耐食性が得られることも明らかにされた。また、アルミめっき鋼板はスケール剥離がないため、デスケリング工程が省略できる利点もある。一方、十分な耐食性の確保には至っていないが、デスケリング工程を省略する目的で溶融亜鉛めっき鋼板もスケール生成を阻止する目的で使用されている。しかし、亜鉛めっきは酸化し易いので、加熱温度の管理精度が要求される。

4.2.2 厚鋼板

(1) 需要分野別の厚鋼板の歩み

(i) 造船用鋼

造船分野では1980年代にTMCP鋼が他分野に先駆けて開発・実用化され、高張力鋼の使用が拡大された。近年の動向の特徴は溶接性の優れた高強度鋼に加え、厚肉化、超大入熱溶接性、腐食、疲労、アレスト特性、加工時の変形抑制など種々の特性に対応した新機能鋼板の開発がさかんなことである。近年増加しているコンテナ船では甲板の開口部が大きいため船側上部に厚肉の高強度厚鋼板を用いて船全体の強度を確保する構造であり、6000TEU (Twenty feet equivalent unit) を超える大型コンテナ船では船側上部に最大板厚65～80 mm、降伏強度390 MPa級の高張力厚鋼板が用いられる。またこの鋼板にはエレクトロガス溶接による1パス施工が適用され、その入熱は40から50 kJ/mmもの大入熱溶接になる。また造船用の高強度鋼として船積みタンク用のKD51 (降伏点500 MPa) が開発された。

(ii) 建築用鋼

建築分野では1995年の阪神淡路大震災以後、一層性能を重視する動きが進行している。梁など部材の塑性変形能力の確保が必要な主要部材では低降伏比(YR)化および、溶接性確保の観点からCeq、Pcmの低減が要求されている。また