

氏名	米村 繁
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第867号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	自動車鋼板の変形異方性と成形限界予測に関する研究
論文審査委員(主査)	白田 松男(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副主査)	北川 正義(自然科学研究科・教授), 平尾 政利(自然科学研究科・教授), 田中 一郎(自然科学研究科・教授), 児玉 昭雄(自然科学研究科・助教授)

Abstract:

In the present study, the strain-path effects on bake hardening properties have been examined by changing the direction of subsequent tensile tests after uniaxial tension, plane-strain and equi-biaxial stretching as prestrain for a ferrite based bake-hardenable (BH) steel sheet. The yield stress showed a strong anisotropy by prestraining. However, the anisotropy caused by prestraining was weakened by bake hardening treatments. The strain path changes can be characterized by a scalar product of previous and current strain-rate mode tensors. Furthermore, the work-hardening behavior under strain path changes for dual phase (DP) steel has been investigated by using simple shear sequences, in comparison with that for interstitial free (IF) steel. Analytical approaches to predict forming limit strain and stress in monotonic and orthogonal paths by using Hill criterion have been conducted. For IF steel, the localized necking is started just after the second loading in orthogonal sequence, which thus shows that even stress based forming limits are path dependent in IF steel. On the other hand, DP steel exhibits localized necking at the same amount of total strain both for monotonic and orthogonal paths and thus the stress based forming limits are path independent, which reflects differences in work-hardening under strain path changes in DP and IF steels.

学位論文要旨

近年、自動車産業においては、地球温暖化の原因であるCO₂排出量を低減するための燃費向上が急務となっている。そのためには、代替燃料による抜本的なCO₂排出削減に加えて、エンジンやトランスミッション効率の向上、さらには車体軽量化などの対策が必要となる。また、厳しくなる車両の安全規制のなか、衝突安全性に優れた車体を開発していくことも重要な課題である。衝突安全性向上の要求を低強度鋼板のみで達成するには、補強部材を多用するか、あるいは部品の板厚を厚くすることが必要であるが、いずれも重量増になるため、車体軽量化と両立させることは難しい。そこで、車体軽量化と衝突安全性の要求を同時に満足するために、自動車車体への高強度鋼板の適用が進められている。例えば、従来は引張強さが440MPa級の高強度鋼板が衝突安全部品に多用されていたが、最近では590MPa級の鋼板の採用が増え、980MPa級以上の鋼板も適用され始めている。自動車鋼板では、一般に、引張強さが270MPa以上のものを軟鋼板、340MPa以上のものを高強度鋼板(ハイテン)と分類しているが、こうした状況から、現在、車体への高強度鋼板の適用率は40%に達し、なかには50%を超える車もある。

以上のように、高強度鋼板の適用は板厚を増加させることなく、衝突時の吸収エネルギーや強度を高めることができる。また、アルミニウム合金や他の軽量化素材に比べれば、高強度鋼板を用いた部品加工や車体組立ては、設備や生産技術の大きな変革を要せず、生産コストへの負荷は比較的小さいと考えられている。しかしながら、これまでの自動車部品の製造に多用されてきたブ

レス加工の場合、鋼板の強度上昇とともに形状凍結不良(スプリングバック)やしわが増加し、部品の寸法精度の確保が困難となる。また、強度上昇にともなう延性の低下はプレス成形時の破断の危険性を高める。このように、高強度鋼板の適用は生産性の点では、従来の軟鋼板を多用した車体に比べれば容易ではなく、開発工期短縮や自動車製造コスト抑制と相まって量産開始までの生産技術開発の負荷を大きく高めている。

こうした生産性の問題点を解決するための材料側からのアプローチとして、高延性型(低降伏比型, TRIP型, 高曲げ型, 高バーリング型), 塗装焼付け硬化型など, 様々な高強度鋼板が開発されてきた。これらの鋼板では化学成分や微視的結晶組織を制御することにより, 変形・破壊挙動に特徴を持たせている。衝突安全性, 成形性をはじめ, 溶接性, 剛性, 防錆性, 耐久性など多岐にわたる要求を自動車部品や車体に対して満足させるためには, それぞれの材料の特徴を把握したうえで, 適切な材料を選定する必要がある。

さらに, 自動車用材料を選定する場合には, 部品の製造工程全体を考慮することが重要である。自動車部品は, 部品設計, プレス成形工程・金型設計, 金型製作・調整の工程を経て, 量産に至る。今後, 衝突安全性と車体軽量化を同時に満足した自動車車体を開発していくには部品設計・材料・工法を通じてトータルとして最適化を行う, いわゆる"Simultaneous engineering"が必須であり, その鍵となるのは成形性や部品強度の数値シミュレーションによる予測評価技術である。現状では, 有限要素法を用いた成形解析や衝突解析の予測評価は既に製品設計や工程設計の現場で実用化されつつある。これら予測評価技術は, テーラードブランクやハイドロフォーム, 温間成形などの新しい加工技術への応用とともに, スプリングバックの高精度予測や対策工法, 破断予測技術の開発, 将来は車体製造工程(プレス加工, 組立て, 塗装焼付けなど)を考慮した車体性能評価技術への拡張が望まれる。この課題の解決には, 材料の変形特性をより高精度で表現できる材料モデルの開発, 部品強度予測, 破断やスプリングバックなどの成形不具合を回避するための成形解析技術の高精度化が不可欠である。さらに, 部品設計・材料・工法の全体最適化を通じて自動車鋼板の開発の指針が提示され, 高強度鋼板の適用が促進されると思われる。

このような背景を踏まえ, 本論文では, まず自動車部品の強度特性とプレス成形性の向上に着目して, 高強度鋼板の変形にともなう塑性異方性と加工硬化特性の変化について様々な実験・解析を行い, 巨視的変形挙動と微視的構造変化の関係に基づき, それらの機構を検討した。さらに, 高強度鋼板を用いた部品開発を行う際に課題となることが多い破断について, CAE(Computer Aided Engineering)を活用した新たな予測評価方法を提案した。

第1章は序論であり, 本研究の目的, 位置づけおよび従来の研究結果を示した。

第2章では, 焼付け硬化型(BH: Bake Hardenable)鋼板を対象に, ひずみ経路を変化させたひずみ時効実験により, 加工で生じた降伏強さの強い異方性をBHが緩和するという事実を明らかにした。すなわち, 単軸引張りや平面ひずみ引張り予ひずみ材の降伏応力は強い異方性を示すが, 熱処理後のBHは予変形材の降伏応力の異方性を等方化する。一方, 等2軸引張り予ひずみ材では, 加工誘起異方性はほとんど観測されず, 熱処理後のBH量は小さく, 等方的に降伏応力を上昇させる。さらに, この現象は集合組織の変化では説明できず, 1次変形で形成された転位組織変化と2次変形で活動するすべり系の相互作用で統一的に解釈できることを明らかにした。すなわち, 単軸引張り, 平面ひずみ引張りなど予変形モードによらず, 加工誘起異方性とBHの異方性はひずみ経路変化を特徴付けるパラメータ $\cos\theta$ を用いて統一的に整理できることを示した。 $\cos\theta = A^1:A^2 = A^1_y A^2_y$ ただし, A^1 と A^2 はそれぞれ1次変形と2次変形の塑性ひずみ速度モードテンソ

ル ($A = D/||D||$ ここで D は塑性ひずみ速度テンソル)である。予ひずみ材の降伏応力は、 $\cos\theta=0$ となるひずみ経路変化で最も増加し、 $\cos\theta=-1$ 近傍で最小となる。一方、BHの異方性は、 $|\cos\theta|$ が1に近いひずみ経路変化でBH量は最大となり、 $\cos\theta=0$ でBH量は最小となる(Fig.1)。結晶塑性に基づく考察から $\cos\theta$ はすべりの重複度に対応すると考えられ、加工誘起異方性とBHの異方性は転位組織や内部応力とすべりの相互作用として解釈できる。今後、得られた知見は、ひずみ時効を活用した新たな鉄鋼商品ならびに利用技術の発展に寄与すると期待される。

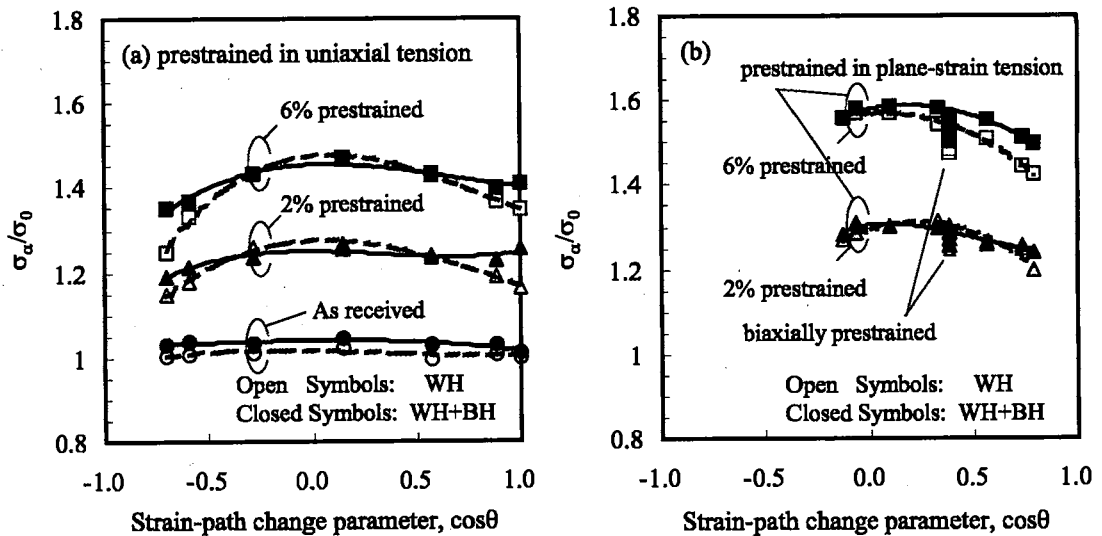


Fig.1: Effect of strain-path change parameter on 0.2% proof stress in a prestrained and baked bake-hardenable steel.

第3章では、現在、自動車産業で多用されている動的陽解法 FEM を用い、ひずみ経路が変化した材料の破断予測を簡便かつ高い精度で予測する方法を提案した。まず、590MPa 級の析出強化型高強度鋼板を対象に、ひずみ空間の FLD は変形経路に依存し破断限界線は大きく変化するが、応力空間に表記した成形限界応力 (応力 FLD) を用いると、変形経路によらず、破断限界をほぼ一義的に表現できることを確認した。さらに、動的陽解法 FEM を用い、経路変化下での材料の破断予測を予測する方法を検討し、以下の知見を得た。①FLD を破断クライテリアとして FEM により得られたひずみから破断を予測する場合、その結果は FLD 測定時の評点間距離や FEM の要素サイズに大きく影響される。ただし、くびれ発生までの挙動におよぼすこれらの影響は比較的小さいことから、局部くびれ発生限界をクライテリアとして用いれば予測結果が安定しやすい。②比例負荷経路と複合負荷経路について、応力 FLD による破断予測精度の検証を行った。成形限界高さを予測した結果、応力空間上の FLD を用いて予測すると複合変形経路での成形限界高さの予測精度が改善された。

第4章では、前章で提案した破断予測方法の適用限界について考察した。Hill の局部くびれ発生条件や 2 軸引張りでの Swift の拡散くびれ発生条件に対応する応力と加工硬化率の関係を破断のクライテリアと仮定する場合、相当応力-相当ひずみの関係がひずみ経路や応力経路によらず一定であれば、主応力空間にプロットした破断限界は経路によらない曲線で表せる。しかしながら、IF 鋼ではひずみ経路変化によっては相当応力-相当ひずみの関係が比例負荷の場合と異なる。例えば、 $\cos\theta$ が 0 に近い場合 (ひずみ経路が直交する場合)、加工硬化率は 2 次変形の開始とともに激減し、前述のくびれ発生のクライテリアを用いると、経路変化直後にくびれにいたる。従って、IF 鋼のように交差効果が観測されるひずみ経路の場合、応力空間での破断限界は一義に表

現できないことを明らかにした。一方、590MPa級の複合組織鋼では交差効果が観測されず、応力空間での破断限界は一義に表現できる。このように、変形経路変化をともなう破断を予測する際には、経路変化に応じた加工硬化挙動の再現が重要であると考えられる。また、このような応力 FLD の特徴を熟知したうえで活用すれば、汎用性の高い破断予測手法として実用性が期待できる。

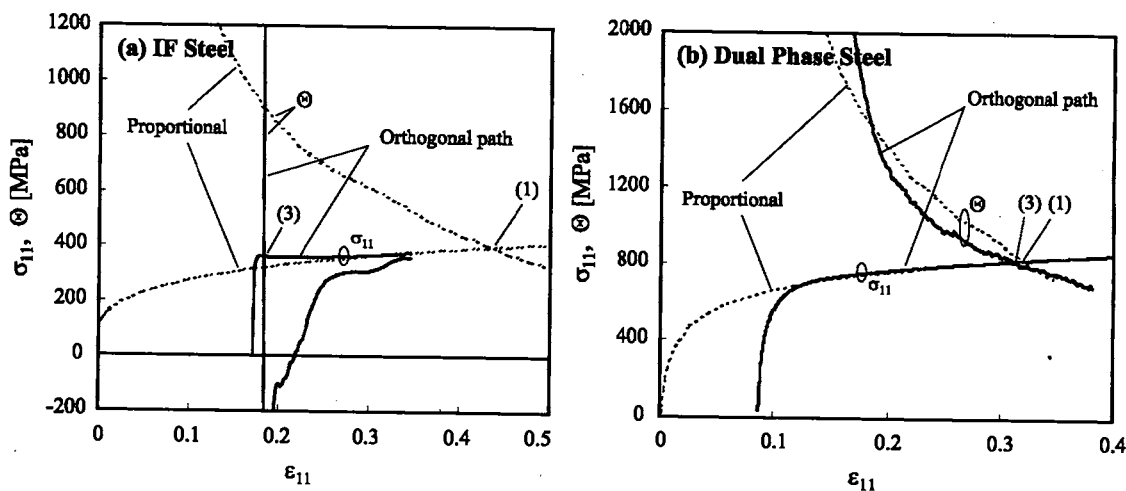


Fig.2: Flow stress σ_{11} and work-hardening rate θ of (a) IF steel and (b) Dual Phase steel obtained by simple shear tests. The second loading paths are assumed as uniaxial tension. The predicted localized necking points are shown by the (1) uniaxial tension in proportional path and (3) uniaxial tension in orthogonal path.

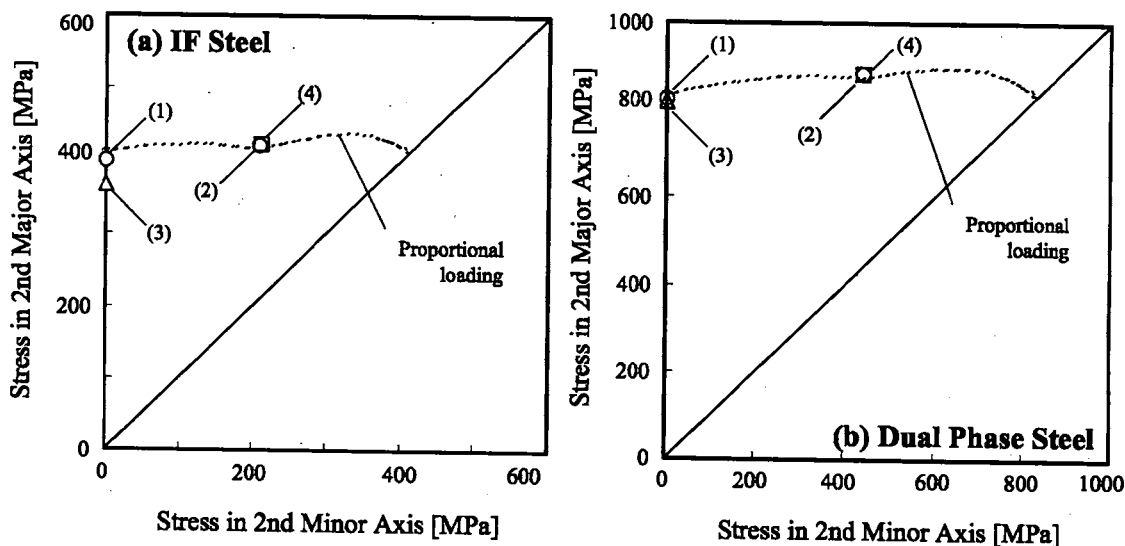


Fig.3: Stress based FLDs for (a)IF steel and (b)Dual Phase steel: (1) uniaxial tension (proportional path); (2) plane-strain stretching (proportional path); (3) plane-strain stretching followed by uniaxial tension along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path); (4) uniaxial tension followed by plane-strain stretching along the direction 90° different from the first loading (orthogonal path). Limit stresses presented in Fig.2 are used.

第5章は結論であり、以上の研究結果を総括した。

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成 19 年 1 月 31 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催し、平成 19 年 2 月 1 日に口頭発表ならびに第 2 回審査委員会を開催して審議した結果、以下のように判定した。

本論文は成形部品の強度特性と使用材料のプレス成形性の評価システムを開発することにより、自動車の軽量化を促進することを目指したものである。本研究では、各種の実験的手法を用いてボディ用高強度鋼板の変形後の降伏強度と変形様式との関係を定量的に表示すると共に、その機構に関しては加工誘起異方性と焼き付け硬化異方性が転位組織や内部応力とすべりの相互作用として解釈できることを明らかにした。また、メンバー用高強度鋼板のプレス成形性向上に関して、従来のひずみ空間とは異なり応力空間に表記した成形限界応力を用いると変形経路によらずに破断限界をほぼ一義的に表現できることを実験的に証明し、その機構を塑性不安定理論と高強度鋼板特有の転位組織の交差効果により推定した。さらに、動的陽解法 FEM を用いて変形経路が変化する成形における高強度鋼板のプレス成形限界を予測する方法を理論的・実験的に検討し、CAE (Computer Aided Engineering) を活用した新たな予測評価方法の基盤を提案した。

以上、本論文は自動車への高強度鋼板の適用方法を力学的・金属学的に示唆するものであり、極めて有益な論文と評価できる。したがって、その内容は博士(工学)論文に値するものと判定する。