

高強度鋼板の成形性向上に係わる最適メゾ構造シミュレーション

茨城大学 システム工学科

教授 鈴木秀人

(平成 10 年度研究開発助成 AF-98007)

キーワード：スプリングバック，高強度鋼，メゾ構造シミュレーション

1. 緒言

現在，自動車業界では耐衝突性向上に加えて低燃費化を意図した超軽量化が重要な課題とされている。対応手段として，世界的規模で行われた ULSAB プロジェクト⁽¹⁾に代表されるように，骨格部材への高張力鋼板（引張り強さ 590N 以上）の使用が推進されている。一方，高張力鋼板の塑性加工では図 1 に示すように様々な成形性不具合が問題となっている。特に，問題となっているのが曲げ加工において成形負荷時と除荷時の製品形状が異なる形状凍結性不良（スプリングバック：以降 SB と称す）である。この問題は，き裂やしわといった，いわば「破壊」に分類される不具合とは異なり，素材の弾性回復挙動に起因している。スプリングバックは素材が高強度化するほど顕著に現れるため，今後最も注目される課題の一つである。

その対策として，強靱化 DP 鋼および TRIP 鋼に代表される組織制御によって高機能性を発現する「強靱化複合組織鋼」が注目されている。DP 鋼は，強度と成形性という対立した性質を，硬質相と軟質相から成る複合組織の調整によって両立させた材料である。

図 2 は DP 鋼に関する代表的な研究成果の模式図である。静的強度^{(2)~(4)}，疲労強度^{(5)~(7)}および衝撃吸収性^{(8)~(10)}に関する研究報告は多く，いずれも性質の改善が認められている。一方，強靱化 DP 鋼板の塑性加工における成形性や形状凍結性に関しては^{(11)~(13)}，良否相反する報告例もあり，統一の見解が得られていないのが現状である。



図 1 塑性加工における不具合

その原因として，塑性加工では，金型による素材の拘束条件や押し切り荷重といった形状凍結性に影響を与える因子が多数存在することが挙げられる。したがって，加工条件を単純化して DP 鋼最大の特徴である複合組織の効果について検討することが必要である。

そこで本研究では，単純な三点 V 曲げ試験により DP 鋼の形状凍結性の正確に評価をすることを試みる。次に，FEM 解析により形状凍結性に及ぼす複合組織の影響について検討し，DP 鋼による SB 量低減メカニズムを解明することを目的とする。

2. 強靱化 DP 鋼板の形状凍結性

2.1 供試材

供試材は DP 鋼板 DP590 (SPFC590Y : A 材) および強度の異なる析出硬化高張力鋼板 HT590 (SPFC590 : B 材)，HT490 (SPFC490 : C 材) の 3 種類である。高張力鋼は単相組織，DP 鋼は軟質相のフェライトと硬質相のマルテンサイトの 2 相から構成される複合組織となっている。それぞれの材料の組織写真を図 3 に，機械的性質を表 1 に示す。

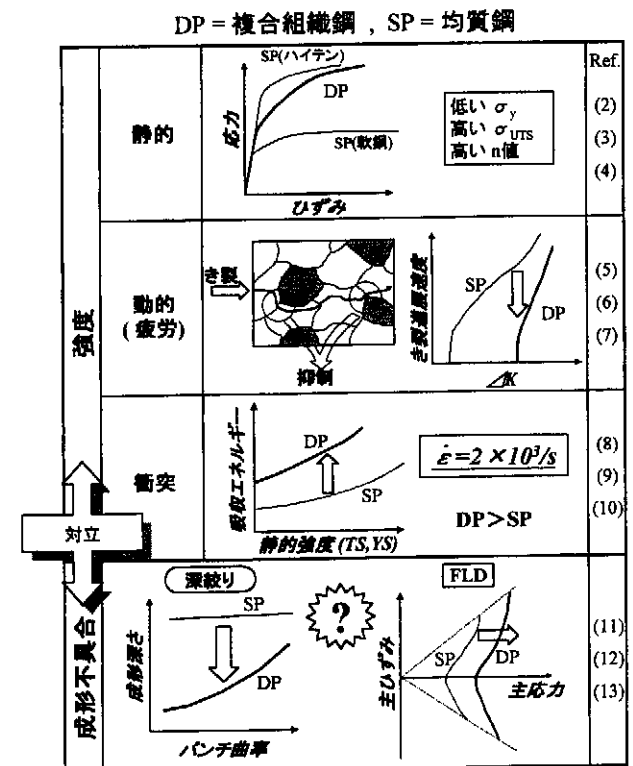


図 2 複合組織鋼に関する代表的成果

本研究では DP 鋼が有する特殊な機械的性質に着目した。すなわち、降伏比が低く、加工硬化指数 (n 値) が大きいという性質と形状凍結性の関連について検討するために、DP 鋼と降伏応力が同レベルである HT490 と引張強さが同レベルである HT590 をそれぞれモデル材として選定した。

これらの鋼板を、幅 150mm、奥行 30mm、板厚 1.6mm の寸法の試験片に機械加工した。なお、試験片の採取方向は圧延方向に平行とし

2.2 形状凍結性の評価方法とその定義

形状凍結性評価にあたって試験装置に求められる性能は、金型・素材間の摩擦や金型による拘束条件といった寸法精度に影響を及ぼす因子を除去し、素材が本来有する形状凍結性を正確に評価できることである。

図 4 に示すように、本試験法は素材を金型とパンチの三点で指示しながら加工する三点支持 V 曲げ加工を採用した。加えて加工の際に、ダイと素材の接触が無い、いわゆるエアベンディングを行った。すなわち、金型との接触面が少ないため、形状凍結性に影響を与える金型の影響を除去した。

図 5 は本試験の試験条件を表している。今回の試験では、曲げ角を 3 種類 ($\theta_1 = 60$ 度, 90 度, 120 度) に、2 種類のパンチ先端曲率半径 ($R=2, 20$) にそれぞれ設定した。また、素材の設置方向は素材の圧延方向と一致させた。なお、同図に示す定義より、本試験における曲げ角は加工量の大きさを示している。すなわち、曲げ角が大きいほど厳しい加工条件となる。図 6 に示すように本研究では、塑性変形後の弾性回復量 ($\Delta\theta$: スプリングバック) を形状凍結性の指標とした。ここで、同図における曲げ角 θ_1 はデジタルカメラにより測定をした。スプリングバックは加工誤差であり、これが少ない場合形状凍結性が良好であると解釈した。なお、評価試験には、プレスブレーキ (加圧能力: 25t) を使用した。

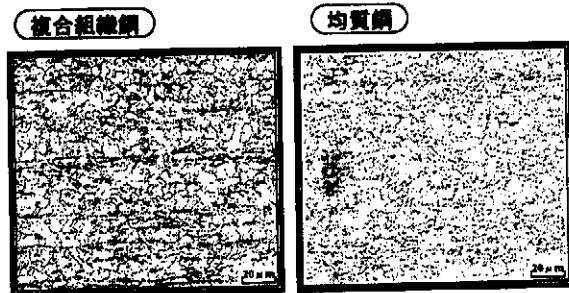


図 3 組織写真

表 1 機械的性質

	複合組織鋼		均質鋼	
	A	B	C	
	SAFC590Y	SPFC590	SANC490	
ヤング率 [MPa]	2.1×10^5	2.1×10^5	2.1×10^5	
降伏強さ [MPa]	327	427	333	
引張り強さ [MPa]	592	607	502	
n 値	0.18	0.15	0.162	
伸び [%]	27	28	31	

2.3 実験結果

パンチ $R=2$ の試験結果を図 7 (a) に、また $R=20$ の結果を図 7 (b) に示す。

同図より高張力鋼 (B 材および C 材) において、形状凍結性は引張強度に依存している。すなわち、引張強度の低い鋼材ほど形状凍結性が良好であった。しかしながら、DP 鋼板 (A 材) は引張強度 590MPa 級にもかかわらず、同等レベルの強度を持つ高張力鋼板 (B 材) よりも優れた形状凍結性を有していることが分かった。

曲げ角についても形状凍結性に差異が生じた。曲げ角は大きいほど、すなわち加工の厳しいが増すほどスプリングバック量が多くなることが理解される。また、DP 鋼板である A 材は、特定の試験条件において引張強度 490MPa 級の C 材と同等の形状凍結性を有するという特殊な様相を呈していた。

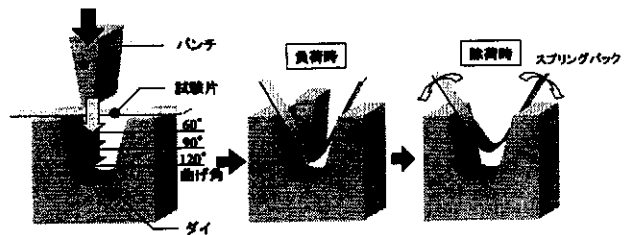


図 4 V 曲げ試験方法

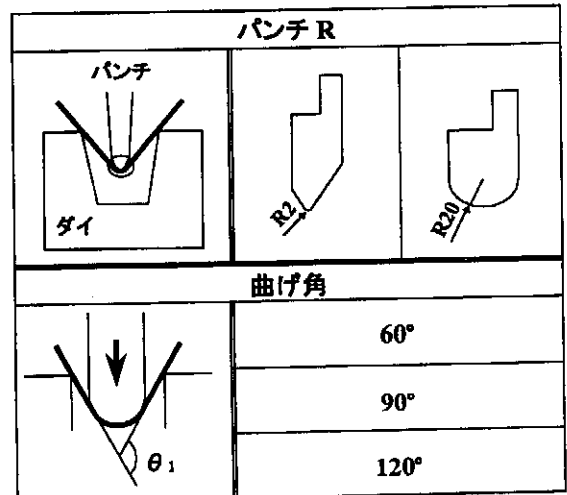


図 5 試験条件

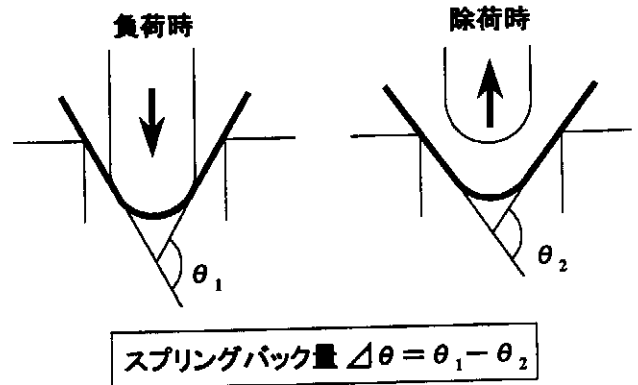


図 6 スプリングバック測定方法

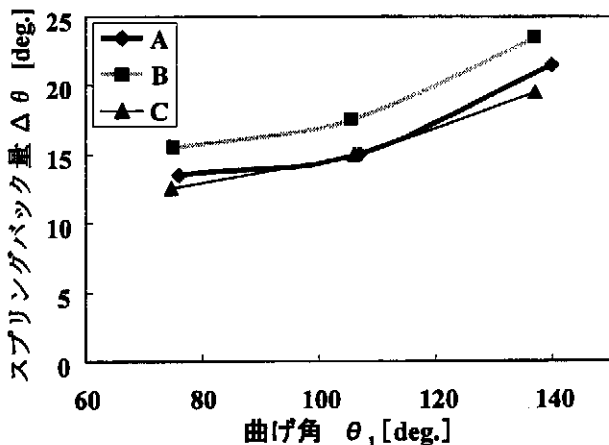
以上の結果より、本試験では金型や加工条件が形状凍結性に及ぼす影響を排除して基礎的なV曲げ試験を行い、素材が有する本来の形状凍結性を把握した。すなわち、DP鋼における複合組織の形状凍結性への影響を分離することに成功し、従来困難とされていたDP鋼鋼板の形状凍結性の評価を正確に行うことができたと言うよう。

また、DP鋼における良好な形状凍結性は複合組織による低降伏に起因している。図8はA材(DP鋼)、B材(HT590)、およびC材(HT490)の応力-ひずみ線図を比較した結果である。同図より、DP鋼の降伏応力は引張強度レベルが低いC材と同様であり、この低降伏応力に起因してスプリングバック量が低減されると考えられる。一方、構造設計では引張強さが基準とされる。DP鋼は高強度でありながら形状凍結性が良好であると言う理想的な構造材料であると理解される。

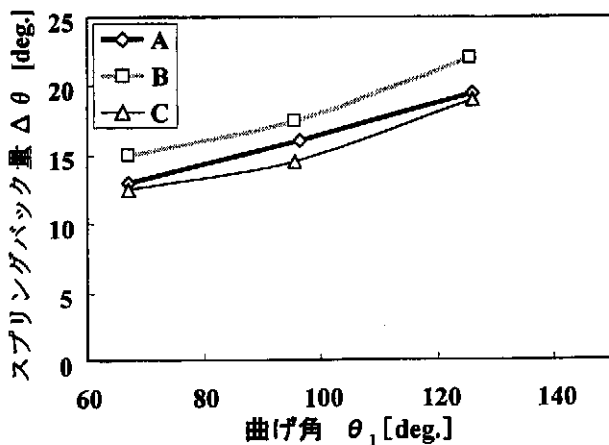
3. FEM シミュレーションによるSB量低減メカニズム解明

3.1 形状凍結性の物理的意味

前章ではDP鋼特有の形状凍結性に関する実証試験を行い、



(a) R=2



(b) R=20

図7 V曲げ試験結果

その特性を把握することに成功した。本章ではDP鋼の形状凍結性に及ぼす複合組織の影響について掘り下げて考察する。すなわち、形状凍結性を決定する力学的パラメータとして弾性ひずみの総和を定義し、密接な関係を持つことを示唆する。また、DP鋼における軟質相および硬質相の変形状態について検討し、その相互作用と形状凍結性の関連について考察する。

図9は曲げ加工における形状凍結性の物理的意味と弾性ひずみに関する説明図である。スプリングバックは負荷時に曲げ部で生じる弾性ひずみが除荷時に開放されることによって生じる。曲げ部にはひずみ勾配が生じており、表裏でひずみは反転している。そのすべてのひずみが部品全体のスプリングバック挙動を関連している。同図に示すように曲げ部を含めた素材内部に存在するすべての引張・圧縮ひずみを相当弾性ひずみに変換し、その総和が部品全体のスプリングバック量と密接な関係にあると考えた。また、総和を算出するという概念は「不均一曲げの理論」と深く関連している。すなわち、V曲げでは曲げ部と平坦部が存在するためにその境界においてせん断変形が生じる。これが不均一曲げである。したがってV曲げの場合、曲げ部だけでなく平坦部まで含めた計算が必要である。本研究におけるひずみの総和というパラメータは曲げ部だけでなく平坦部まで含めて生じたひずみを総和するので、「不均一曲げの理論」に基づいた、より精度の高いスプリングバック量の算出が可能である。

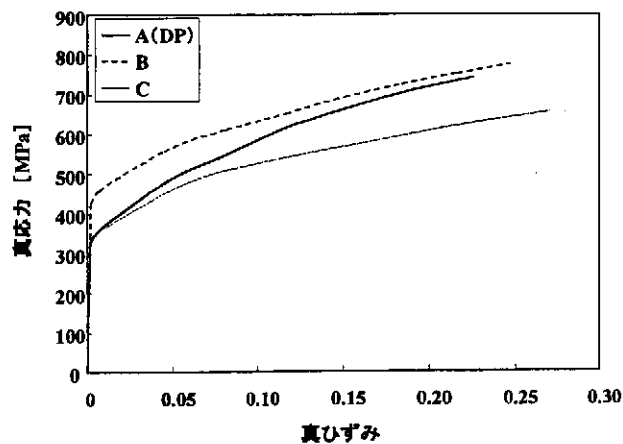


図8 真応力-真ひずみ線図

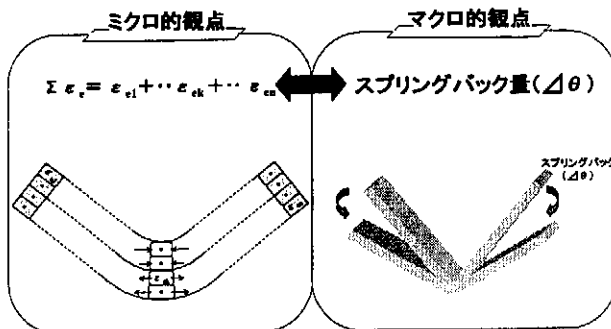


図9 形状凍結性の物理的意味

以上の考察を基にして、形状凍結性と関係を持つパラメータとして相当弾性ひずみの総和を選定した。その算出の際には、実験におけるV曲げ試験と全く同様の条件下でFEMシミュレーションを行った。

3.2 解析モデルおよび条件

本研究で用いるFEMシミュレーションの目的は、精度の追求ではなく簡易化・大衆化である^{(14)~(16)}。そこで汎用弾塑性解析ソフトを用い、さらに解析モデルを平面ひずみ・1/2モデルに簡略化することにより、計算時間とコスト面において大幅な短縮が見込めるハイパフォーマンス解析を行った。

解析モデルを図10に示す。要素は4接点平面ひずみ要素であり、等方性材料とした。要素数は600要素、節点数は755個とした。境界条件は、負荷時に節点①~⑤をX拘束、除荷時に節点①をXY拘束、節点②~⑤をX拘束とした。

解析には汎用弾塑性解析ソフトMSC-MARCを用いて、大変形・大ひずみを考慮したアップデート・ラグランジェ法により計算を行った。その際に、金型であるパンチ・ダイは剛体とした。変形体である素材の機械的性質は、実験で用いた材料の機械的性質(表1)を入力した。金型と素材との摩擦は無

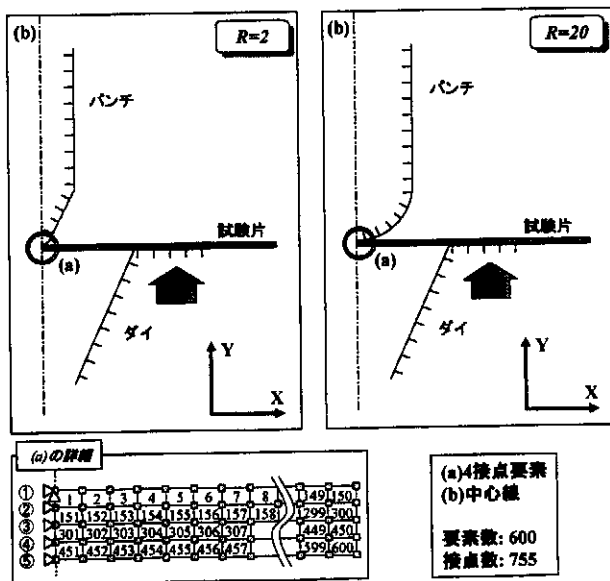


図10 解析モデル

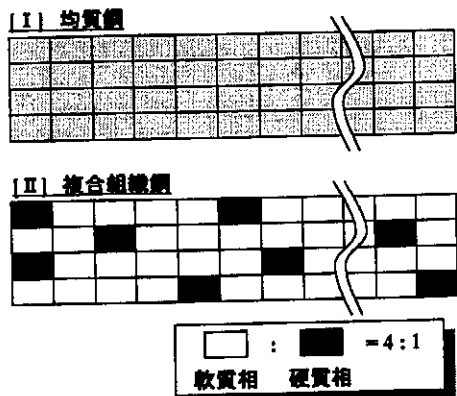


図11 複合組織を考慮したメソモデル

いものとし、加工条件は形状凍結性評価試験と同様とした(図5)。

また、本解析ではDP鋼における複合組織を考慮したモデル、すなわち図11に示すメソモデルを考慮しDP鋼の曲げ解析を実施した。複合組織を模擬して軟質相の中に硬質相が島状に存在するように格子状に要素を配置した。軟質相の要素にはフェライトに対応した軟鋼の機械的性質を、硬質相にはマルテンサイトに対応した高張力鋼の機械的性質を入力した。硬質相の体積率は実測値と同様に20%とした。

図12は、素材の中心からの距離と相当弾性ひずみの関係を示したものである。曲げ部およびその周辺の平坦部の各節点に生じた相当弾性ひずみ(全ての節点に生じた相当弾性ひずみ)の総和を求めた。

3.3 相当弾性ひずみと形状凍結性との関係

図13はFEMシミュレーションから得られた相当弾性ひずみの総和を横軸にとった結果である。縦軸には実験から得られたスプリングバック量を示した。

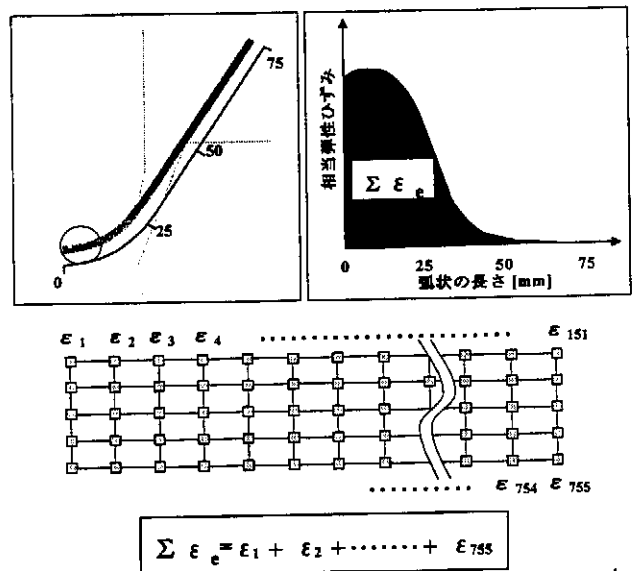


図12 相当弾性ひずみの総和の算出方法

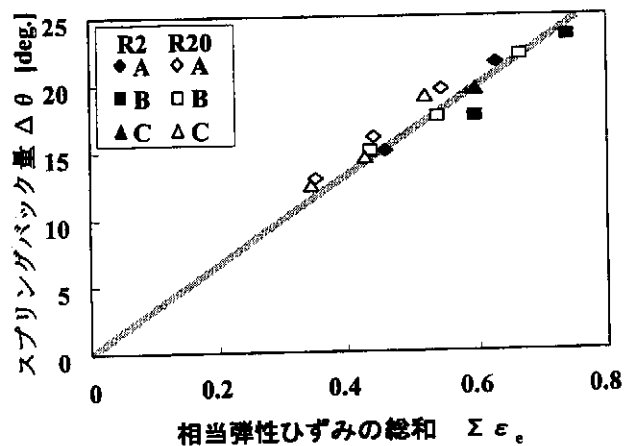


図13 統一的整理結果

同図よりひずみの総和とスプリングバック量の関係が線形的であることがわかる。すなわち、相当弾性ひずみの総和とスプリングバック量の相関が鉄系材料では種類によることなく線形関係であることが明らかとなった。この結果より、「弾性回復挙動は変形領域全体の弾性ひずみの総和で決定される」という前述の考察が妥当であることが理解される。

3.4 形状凍結性の及ぼす複合組織の影響

図13よりDP鋼(A材)の軟質相と硬質相の相当弾性ひずみの総和(単位面積当り)は、同強度の均質材(B材)に比べて小さい。従って、スプリングバック量も小さく形状凍結性が良好であると理解される。

さらに掘り下げた考察を行うために、各相の変形状態について検討した。図14は金型パンチR=20で加工した際の軟質相と硬質相の弾性ひずみについて求めた結果である。ただし、同図におけるひずみは「総和」ではなく「平均値」である。

図14より、DP鋼の軟質相および硬質相に蓄積されるひずみは特異な様相を示すことが判明した。同図より、個々の硬質相に蓄積される弾性ひずみは軟質相よりも大きい。しかしながら、その体積率は20%であるために軟質相とのひずみ和を算出すると均質鋼よりも小さくなる(図15)。複合組織鋼における各相の挙動の相違は、引張や疲労において数多く報告さ

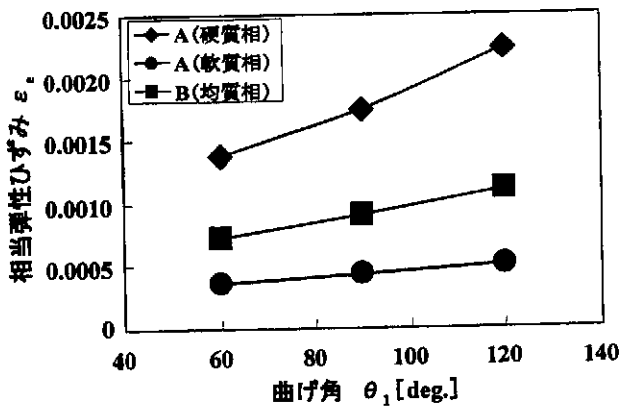


図14 ミクロ組織における相当弾性ひずみの平均

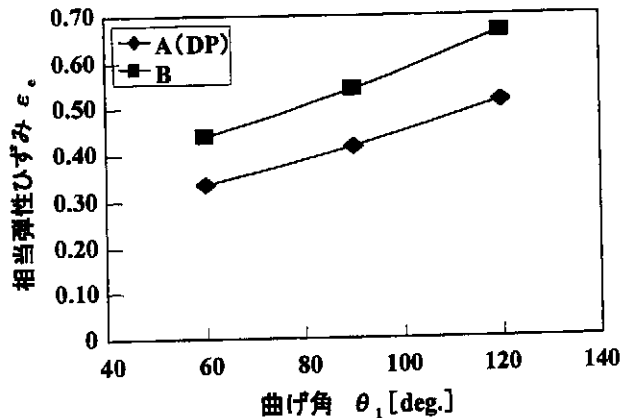


図15 相当弾性ひずみの総和

れており、機械的性質を決定する上で非常に重要であるとされている。

図16は本研究で得られた結果の模式図である。DP鋼における形状凍結性(スプリングバック)は微視組織(軟質相と硬質相)の相互作用に左右される。各相のひずみに注目して、その平均値および総和(単位面積当り)をとることによりDP鋼の形状凍結性が良好になることを示し、その相違が形状凍結性に影響を与えることを明らかにした。すなわち、DP鋼板の塑性加工(曲げ加工)における形状凍結性は、微視組織の調整によって最適に制御できることが示唆された。

4. 結論

- (1) DP鋼板の形状凍結性は同等レベルの引張強度を持つ高張力鋼板よりも優れ、490MPa級の鋼板と同等の形状凍結性を有するという特殊な様相を呈した。この良好な形状凍結性は複合材料による低降伏比に起因している。すなわち、DP鋼は高強度・良形状凍結性を両立するという理想的な構造材料であることが示唆された。
- (2) 金型や加工方法が形状凍結性に及ぼす影響を排除して基礎的なV曲げ試験を行うことによって、素材が有する本来の形状凍結性を把握することが可能である。
- (3) 塑性加工中に素材に蓄積される相当弾性ひずみの総和は、材料、金型および加工条件に左右されず、形状凍結性と密接な関係にある。
- (4) DP鋼板の形状凍結性は、軟質相と硬質相に蓄積される相当弾性ひずみ量の相違に起因している。すなわち、複合組織を最適に制御することによって、DP鋼板の塑性加工(曲げ加工)における形状凍結性を向上させることが可能であると示唆された。

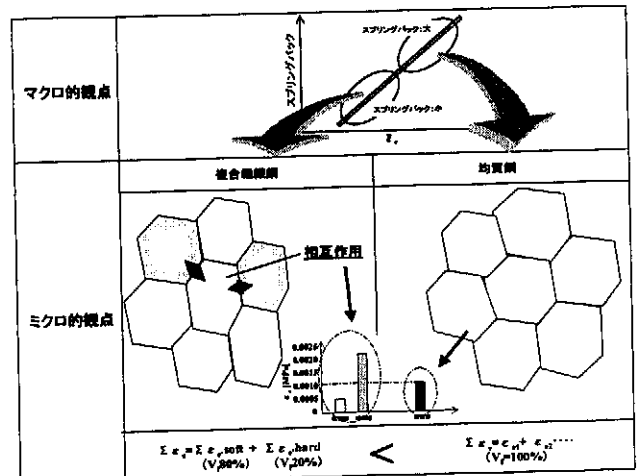


図16 形状凍結性におけるミクロ組織の影響

文 献

- (1) 鶴原吉郎・丸山正明, 日経メカニカル, 525(1998), 28-23.
- (2) 友田陽・田村今男, 鉄と鋼, 68-9, 1982, 1147-1158
- (3) 林央, 塑性と加工, 35-404, 1994, 1087-1092
- (4) 瀬戸一洋・坂田敬・加藤俊之, 塑性と加工, 35-404, 1994, 1042-1047
- (5) H. SUZUKI AND A. J. McEVILY METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 10A, 1979-APRIL, 475-481
- (6) A. M. SHERMAN AND R. G. DAVIES METALLURGICAL TRANSACTIONS A, 10A, 1979-JULY, 929-933
- (7) 水井正也・武智弘・関根知雄, 鉄と鋼, 76-3, 1990, 414-421
- (8) 高木周作ほか, 鉄と鋼, 83-11, 1997, 60-65
- (9) 中西栄三郎ほか, 自動車技術会, 学術講演会前刷集 973, 1997-5, 21-24
- (10) 福井清之ほか, 自動車技術会, 学術講演会前刷集 976, 1997-10, 255-258
- (11) 山崎一正ほか, 塑性と加工, 36-416, 1995, 973-978
- (12) 山崎一正ほか, 塑性と加工, 38-433, 1997, 159-164
- (13) 岩谷二郎・田中福輝・白沢秀則・宮原征行, 塑性と加工, 35-404, 1994, 1122-1127
- (14) 鈴木秀人・滝内希良・大屋邦雄・岸正幸, 機論, 63-605, A(1997), 132-137.
- (15) 鈴木秀人・滝内希良, 機論, 63-612, A(1997), 42-47.
- (16) 鈴木秀人・岸正幸・中村雅史, 機論, 62-602, A(1996), 1-6.