



入門講座

生産現場の金属学

ストレッチャーストレインの発生メカニズムとその防止対策

豊橋技術科学大学 生産システム工学系 教授 梅本 実 Minoru Umemoto

川崎製鉄(株) 薄板研究部門 主任研究員 登坂章男 Akio Tosaka

川崎製鉄(株) 研究企画業務部 部長 小原隆史 Takashi Obara

Formation Mechanism and Suppression Methods of Stretcher Strains

1 はじめに

大学での授業などにおいて、学生から「先生、この理論はどんなところに役に立っているのですか。」とか「この現象はどんなところに应用されているのですか。」という質問を受けるときがある。生産現場においても製造ラインの個々のプロセスがどのような理論的背景のもとに行われているのかを深く理解することは、品質の向上やラインの改善にとって重要である。理論とその応用を有機的に結びつけて理解することによって、現象や理論を身近なものに感じ、より深く理解できるようになる。しかし、学術的な論文と応用について書かれた記事は、それぞれ別の角度で書かれている場合が多く、ある現象や理論が現場ではどのように使われ、製品に生かされているか、あるいは生産現場でどのような理論を使って製品が作られているかについて書かれた本や記事は残念ながらほとんど見あたらない。

本誌のある読者の方から、生産の現場で学問がどのように生かされ、役に立っているかを紹介する記事の企画を立てて欲しいとの要望が寄せられた。そこで教科書にある理論や現象が、生産の現場でまた製品としてどのように利用されているか、あるいは生産現場で行われているプロセスがどのような理論や現象を踏まえて実施されているかについて具体的な例を紹介することを目的に、「生産現場の金属学」という名前でシリーズを始めることになった。今回はストレッチャーストレインを取り上げる。

2 鉄製の缶に見られる“しわ”

鉄製のキャンディーなどの化粧缶、エアゾール缶の底を見ると、図1に示すようなしわが見られることがある。いろいろな缶を調べてみると、同じような形の缶でもアルミ製のものにはそのようなしわは見られない。もしこのよう

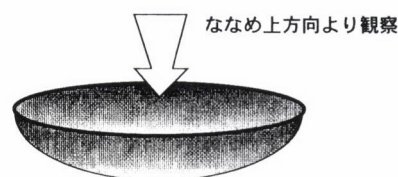
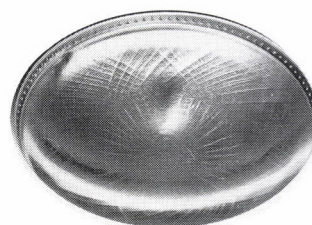


図1 スプレー缶の底に見られるストレッチャーストレイン

なしわが自動車のボンネットや冷蔵庫のドアなどにあると、商品としての価値を損ねてしまうことになる。さて、このようなしわが出来るのは加工の仕方に問題があるのだろうか、それとも材料特有の問題なのだろうか。ここでは鉄板を加工したときにできるしわの原因を学問的に考えてみるとともに、製造現場でこの問題に対していかに対応しているかについて、企業の側からの話をまとめた。

3 “しわ” とリューダース帯

鉄鋼材料学の教科書等にはこの“しわ”はストレッチャーストレイン(strecherstrain)という名前で出てくる。ストレッチャーストレインとは低炭素冷延鋼板をプレス加工したとき、比較的浅い絞り加工を受けた部分に発生するしわのことをいう。引張じわとも呼ばれるこのしわは、降伏点におけるリューダース伸びが原因である、と説明されている。

さてリュウダース伸びとは何だろう。軟鋼を引っ張って変形させると、図2のような応力・ひずみ曲線が得られる。すなわち、応力がある値Aに達すると塑性変形が急激に生じはじめて応力が急に低下し、塑性変形がBCのように進行する。このことを降伏現象(yielding)という。降伏を始める高い応力を上降伏点(upper yield point)、低下した後の応力を下降伏点(lower yield point)という。あらかじめ表面をよくみがいた引張試験片で、降伏時のようすを観察すると、上降伏点に達するや、試験片の一部から、塑性変形の大きい領域が引張方向に対して斜めになめらかに発達し、その領域が増加することによって、試験片は伸びてゆく。従って降伏伸び(図2のBC)では伸びは一樣ではない。この試験片上の塑性変形の大きい領域は、帯状なのでリュウダース帯(Luders band)と呼ばれる。リュウダース帯でのひずみは図2のC点に相当するひずみになっている。しかし、他の場所はB点のひずみのままである。このように、降伏時のひずみは、2種のひずみ状態の混合した状態であり、試験片全体としての伸びは、リュウダース帯の拡大によって生じる。全部がリュウダース帯でおおわれると、加工硬化が現れる。リュウダース帯の伝播で生じるひずみをリュウダースひずみ(またはリュウダース伸び)という。つまり、軟鋼板に降伏伸び以下の小さい変形を与えると、リュウダース帯という塑性変形の進んだ部分がまだらに現れ、それがしわとなって見えるのがストレッチャーストレインである。

4 リュウダース帯の発生原因

軟鋼板においてリュウダース変形が起こる機構については、2つの考え方がある。一つは「コットレル効果」による説明²⁾であり、もう一つはJohnston-Gilmanによる「塑性抵抗説」³⁾である。Cottrell²⁾は α -Fe中のC,N原子は刃状転位と強い弾性的相互作用をもつため、図3に示すように正の刃状転位の直下に濃縮すると考えた。転位をこの雰囲気(コットレル雰囲気)から離脱させるには大きな応力が必要となる。転位がコットレル雰囲気から抜け出すのに必要な応力が上降伏点に相当する。固着からはずれた転位はより小さい応力で動けるから、変形応力の低下が起こる。Cottrellは下降伏点は、多数の動きだした転位が応力集中によって連鎖反応的につぎつぎと固着された転位をはずして、リュウダース帯をひろげていく段階であると考えた。ある程度変形した試験片を除加重後直ちに再加重しても降伏点現象は現れないが、適当な温度に加熱するか、室温でも長時間放置すると、降伏点現象が再び現れるようになる。これは固着を外した転位に侵入型固溶原子が再び集ま

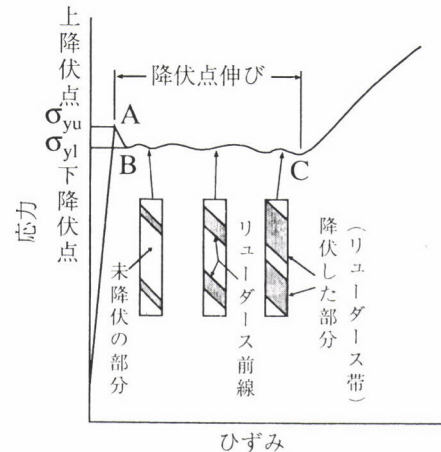


図2 軟鋼の降伏現象

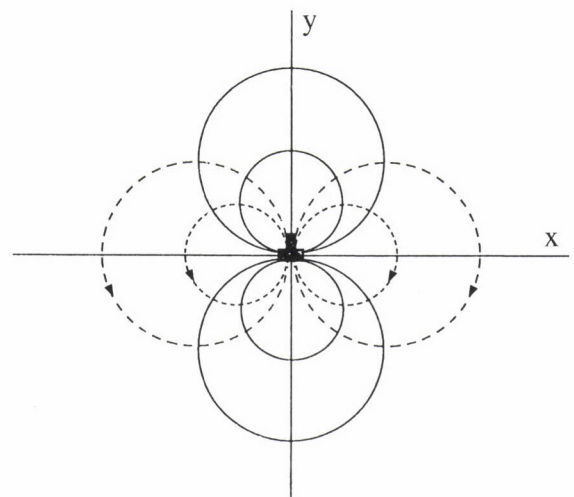


図3 刃状転位の周りの侵入型溶質原子の流れ
実線は等エネルギー線、破線は侵入型原子の流れを表す

るために起こると考えた。この理論は当初多くの研究者の賛同を得たが、より詳細な実験や計算から、侵入型原子による固着は非常に強く、上降伏点程度の応力では転位は固着から解放されないのではという疑問が生じた。そこで、Johnston-Gilman³⁾は降伏現象を以下のように説明した。転位の運動による剪断歪み速度は

$$\dot{\epsilon} = \rho b v \dots \dots \dots (1)$$

で表される。ここで ρ は可動転位密度、 b はバーガースベクトル、 v は転位の平均移動速度である。転位の速度 v は外部応力 σ (厳密には外部応力から内部応力を引いた有効応力)に依存し

$$v = v_0 (\sigma / \sigma_0)^m \dots \dots \dots (2)$$

で表される。ここで v_0 、 σ_0 、 m は定数である。外部応力が増加して、ある応力を越えれば、転位は増殖しながら運動

する。転位の増殖が始まると ρ が増加し、一定の歪み速度に対しては v は小さくなる。従って σ も小さくなり、これが降伏現象となって現れる。変形がさらに進めば加工硬化して変形応力は再び増加する。初期の転位密度が小さいほど降伏点現象は大きく現れる⁴⁾。軟鋼では炭素などの不純物原子によって転位が固着され、初期可動転位密度が低くなるので降伏点現象が現れるというのである。現在では、軟鋼における降伏点現象の説明として、この考え方を採用している研究者は非常に多い。しかしこの理論においても細粒になると降伏点現象が顕著になるなどの結晶粒径依存性を説明できないという問題が残っている。

リュウダース帯はオーステナイト鋼、アルミニウムや銅などの面心立方金属でも自由に運動しうる転位密度さえ低ければ起こり得るものと考えられるが、現実にはほとんど見られない。その理由はこれらの金属では転位が容易に動くことができ、応力とともに可動転位密度が増し、多結晶中の隣接結晶粒へのすべりの伝播も容易に起こるためと考えられている。

5 リュウダース変形の抑制方法

製品として不都合な引張りしわ(リュウダース帯)の発生を防止するためには降伏現象を示さないように改良すればよいが、それには次に示すいくつかの対策が考えられる。

- (1) 塑性変形を与えて可動転位の密度を増やす。
- (2) 鋼材中のC, Nの含有量を下げる。
- (3) C, Nを何らかの形で析出させ固溶C, Nの量を下げる。例えばTiCやAlNなどの安定炭化物や窒化物として析出させる方法と、平衡固溶量が温度によって減少することを利用して、ゆっくりと冷却することにより、炭素をセメントイトとして析出させる方法などがある。

6 生産現場におけるしわ発生抑制への対策

生産現場では上のストレッチャーストレインを発生させない方法として以下の対策がとられている。

1) スキンパス圧延

焼なましした軟鋼板に降伏現象が現れないように、スキンパス圧延(調質圧延ともいう)が行われる。この圧延での加工量はおよそ1%である。これによって動きやすい転位が比較的一様に生成されると同時に、鋼板の表面にリュウダース帯の発生場所が多量に導入され、リュウダース帯が均一微細化することで目立たなくする効果もある。しかし、また炭素や窒素は室温でも拡散が可能であるので長時間放

置しておく、再び降伏現象が生じる。これをひずみ時効という。ひずみ時効が現れる鋼を時効性鋼、現れない鋼を非時効性鋼という。

2) 鋼中の炭素量の低減

高炉一貫プロセスにおいては、製鋼段階での真空脱ガス技術の進歩に伴い近年炭素および窒素量は大きく低減できるようになった。転炉での酸素の吹き込みにより炭素濃度wtを0.02wt%程度まで下げられる。その後、RH脱ガス装置により脱炭、脱窒および成分調整が行われる。それによって、市販の冷延鋼板(いわゆる軟鋼板)における炭素、窒素の量は、低炭素アルミキルド鋼では0.02 0.06%C 0.002 0.005%N、極低炭素アルミキルド鋼では0.001 0.004%C 0.002 0.003%Nにまで低減されている。

3) 固溶窒素と炭素の析出による低減

冷延鋼板は現在、多くがアルミキルド鋼であり、鋼板を製造する段階で固溶状態の窒素は、大半がAlNとして固定されているため、歪み時効現象に寄与するのは主に炭素である。冷延鋼板は熱延後、冷間圧延されその後焼鈍される。従来から行われていた箱焼鈍(バッチ焼鈍、ベル焼鈍ともいう)法で処理された鋼板は、焼鈍後の冷却速度が小さいため、固溶状態の炭素は平衡濃度近くまで減少し、実質的にひずみ時効を起こさない。一方連続焼鈍法で処理された鋼板は焼鈍後の冷却速度が大きく、過飽和に炭素が残留するので、歪み時効を起こす。この種の鋼板の歪み時効性を低減するため、焼鈍後の冷却パターンを制御するいわゆる過時効処理が一般に行われるが、非時効性の鋼板の製造は容易ではない。しかし近年極低炭素鋼を素材とし、炭素を安定な炭化物として固定するためTiやNbを添加したIF(Intersititial atom Free)鋼が開発され、非時効性の鋼板として連続焼鈍法により高効率に製造されている。これらの鋼板はひずみ時効をおこさないことに加え、極めて高い r 値(ランクフォード値)と伸び値を有しており深絞り成形性に優れることから主として自動車用鋼板として広く用いられている。

以上のように、これまでの技術開発によりストレッチャーストレイン発生の問題はほぼ解消されたといえる。しかし、ひずみ時効現象による強度の上昇をより積極的に強化機構として使用する、あるいはより高能率な連続焼鈍工程の適用をさらに拡大したいという要求が高まり新たな技術的検討がなされている。

7 ストレッチャーストレイン Q&A

Q1. ストレッチャーストレインが問題になるようなところはあるのでしょうか。

A1.人の目にふれるところです。例えば自動車の外板パネル類のように「鏡」のような表面特性が要求されるところで問題になります。これらは光輝性とか鮮鋭性とかよばれます。機械的特性や耐食性といった点での問題ではありません。従って、同じ現象が起こっても薄板では問題になりますが、厚板ではほとんど問題になりません。また同じ薄板でもスプレー缶の容器の様にあまり気にしない場合もあります。

Q2.スキンプラスとは実際にどのようなことをするのですか。歪みの大きさはどのくらいですか。

A2.焼鈍後の鋼板に軽度の圧延を行います。この工程をスキンプラス圧延とか調質圧延とよびます。この工程はストレッチャーストレインが出ないようにするという目的の他に表面粗度の調整、形状矯正などもかねて行います。歪み量は一律には決められませんが、大体、板厚(mm)を%に変えた値程度です。0.8mmなら0.8%、1.0mmなら1.0%です。スキンプラス圧延の歪が表層に集中するためと思われませんが、この程度で降伏伸びは十分に消去可能です。すなわち(スキンプラス圧延加工量)>(引張変形時のリューダース伸び)になっています。スキンプラスので圧下を掛けすぎますと伸びの低下、降伏応力の増加によりプレス成形性が低下します。

Q3.スキンプラスはいつ行うのですか。またスキンプラス後成形までどのくらい時間の猶予がありますか。

A3.焼鈍を行ったのちすぐにスキンプラスまで行ってしまいます。図4に冷延鋼板の製造プロセスを示します。連続焼鈍法の場合、スキンプラスはインラインで行います。箱焼鈍の場合でも、できるだけ早期に実施します。ストレッチャーストレインを抑制するには、プレス成形の直前にスキンプラス圧延を行うのがベストですが、スキンプラス後の物流等で、ある程度の時間が経過することは不可避です。歪み時効は固溶原子C、Nの拡散に起因する現象ですので、スキンプラスによるストレッチャーストレインの抑制効果の有効な期

間は温度と時間と固溶量に依存します。だいたいの目安としては一般の鋼板で3ヶ月、極低CのIF鋼(連続焼鈍材)、低炭素アルミキルド鋼の箱焼鈍材であれば固溶C、N等が十分に低いため、ほぼ半永久的に大丈夫です。

Q4.鋼板中の固溶C、Nを析出などによって減らす方法を述べて下さい。

A4.Cは鋼中では平衡状態ではきわめて溶解度が低いため、焼鈍後、徐冷される箱焼鈍では固溶C量を実用上問題の無いレベルに低減可能です。またNは鋼中での溶解度が比較的大きいため、箱焼鈍程度の徐冷では固溶状態で大量に残留します。この場合はAlを添加することでAINとして固定できます。AINの析出は主として熱間圧延の巻取り工程and/or冷延後の焼鈍工程で起こります。従って、低炭素アルミキルド鋼を用いて箱焼鈍法で製造する場合には固溶C、固溶Nは容易に低減できます。一方、急速加熱、短時間の均熱、急速冷却を行う連続焼鈍においては、急冷を行うため平衡からのずれは大きく、Cを十分に析出させることが困難です。対策として、均熱後に急冷して、400℃程度の温度域で過時効処理を行うなどの工夫で固溶Cを低減することは行われていますが、自動車用鋼板など要求が厳しいものについては不十分です。数ppm 20ppm程度は残留していると思われます。しかし、Nは前述のAl添加でAINとして固定することが可能です。連続焼鈍法で固溶C、固溶Nを低減するには、Zr、Ti、Nbなどのいわゆる炭窒化物形成元素を添加し、安定な炭窒化物として固定する方法がとられます。

Q5.スキンプラスをしないでもしわが出ない加工方法がありますか。

A5.高歪速度(あるいは低温)の変形の場合はストレッチャーストレインはあまり目立たなくなります。例えば曲げ成形で低速度の成形では図5に示すように明瞭なリューダース帯(曲げ変形で生成するリューダース帯をフルーティングという)が観察されますが、高速度になるほどこれが不鮮明

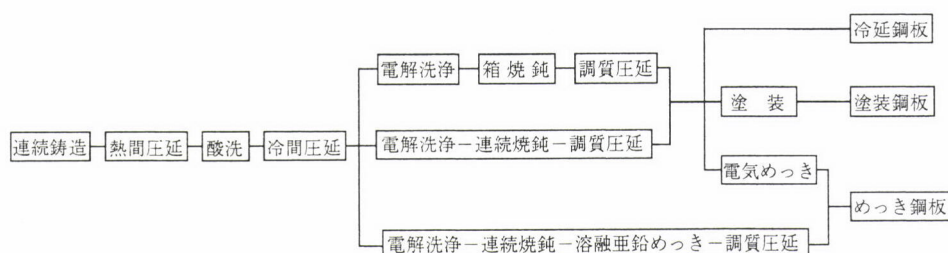


図4 薄鋼板の製造プロセス

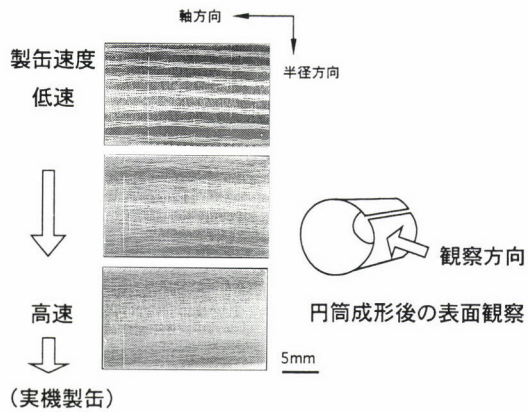


図5 フルーティングの形態におよぼす成形速度の影響

となり、ある速度を境にして実質的に消滅します⁵⁾。実際の飲料缶製造工程では製缶速度が極めて大きくリューダース変形を生じにくいことが知られています。この原理に基づき時効硬化性のある硬い(高強度の)鋼板が使えるため飲料缶の薄肉化が図られ省資源化に貢献しています。

Q6. ひずみ時効をうまく利用する方法はありませんか。

A6. あります。ひずみ時効を積極的に利用した新しい鋼板が現在脚光をあびています。いわゆるBH(Bake Hardening)鋼板と呼ばれる鋼板がそれです。この種の鋼板の応力-歪み曲線を模式的に図6に示します。これらの鋼板は製造工程の制御により「適性範囲の固溶C量」を残存させているのです。すなわち、固溶炭素量はプレス成形時にストレッチャーストレインを発生させない程度に少なく、一方、歪み時効による硬化が十分でるように多くということです。その結果、成形時は軟質で、リューダース変形を生ずることなく容易にプレス成形されますが、その後の塗装・焼き付け工程での加熱(概ね170℃×20分程度)により顕著な歪み時効硬化を起こし、十分な高い強度を確保できるものです。これらの鋼板は部品の薄肉化のための技術として有効に利用されています^{6,7)}。

Q7. 冷延鋼板の今後の開発目標とその具体的研究方向についてお伺いします。

A7. 加工性の向上と高強度化が永遠の開発目標テーマです。加工性の向上には高r値化と高延性化が重要で、この方向で開発されたものに、高純度鋼やIF鋼があります。また最近では温間強潤滑圧延法による超高r値鋼板(r値が3)が開発されています。高強度化については強度を向上させながら、いかに加工性の低下を抑えるかがポイントにな

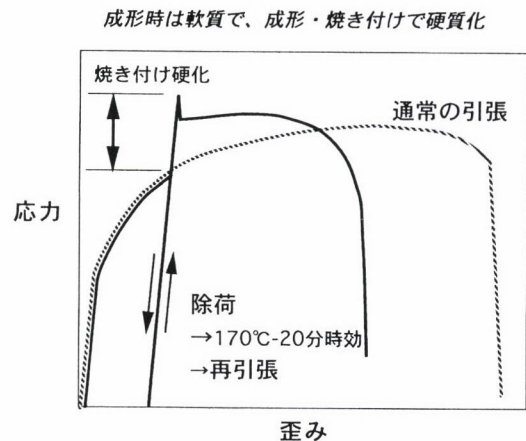


図6 BH鋼板利用の概念図

ります。強度の増加にともなって、伸びの低下、r値の低下および降伏点の上昇などにより加工性は低下します。これをブレイクスルーすべく、固溶強化型IF鋼(IF鋼をベースとしているため、r値が高い)、Dual Phase鋼(フェライト・マルテンサイト2相組織とすることで延性に優れる)、TRIP鋼(残留γによる変態誘起超塑性の利用)、BH鋼板(歪み時効硬化の利用)が開発されましたが、現在はこれらをさらに発展させるべく研究が行われています。

参考文献

- 1) たとえば、
門間改三：鉄鋼材料学 改訂版，実教出版，(1981)
降伏現象やストレッチャーストレインに関する解説のある本としては
幸田成康：金属物理学序論，コロナ社，(1964)
木村 宏：材料強度の考え方，アグネ技術センター，(1998)
周藤悦郎：ストレッチャー・ストレイン，金属学新書，日本金属学会，(1970)
- 2) A. H. Cottrell and B. A. Bilby：Proc. Phys. Soc., A62, (1949), 49.
- 3) W. G. Johnston and J. J. Gilman：J. Appl. Phys., 30, (1959), 129.
- 4) G. T. Harn：Acta Metall., 10 (1962), 727.
- 5) 荒谷昌利，登坂章男，古君 修，小原隆史，久々湊英雄：鉄と鋼，83 (1997), 251.
- 6) 佐藤 進，入江敏夫，橋本 修：鉄と鋼，68 (1982), 1362.
- 7) 黒沢光正，佐藤 進，小原隆史，角山浩三：川崎製鉄技報，19 (1987), 2119.

(1999年3月19日受付)