

Age-hardening Behavior and Dent Resistance of a Bake-hardenable and Extra Deep-drawable Steel Sheet



黒沢 光正
Mitsumasa Kurosawa
鉄鋼研究所 水島研究
部 主任研究員(部長)



佐藤 進
Susumu Satoh
鉄鋼研究所 薄板研究
部 薄板研究室 主任研
究員(部長)



小原 隆史
Takashi Obara
鉄鋼研究所 薄板研究
部 薄板研究室 主任研
究員(部長)



角山 浩三
Kozo Tsunoyama
鉄鋼研究所 薄板研究
部 薄板研究室 室長(部
長補)・工博

1 緒 言

高張力鋼板の使用による板厚の低減は、自動車の軽量化を可能にしてきた。しかしながら従来の高張力鋼板では、リアフェンダーのような優れた深絞り性を要求される部位への適用は困難であった。また、板厚を低減することによる耐デント性の劣化は一般に避けることができなかった。優れた深絞り性と耐デント性の双方を満足しうよう開発されたのが焼付硬化性鋼板であり、プレス時には優れた成形性を有し、焼付塗装後は鋼板の降伏応力が増すことで耐デント性が改善される特徴を示す。

現在、自動車用鋼板はかつてのリムド鋼に代わりそのほとんどがA1キルド鋼に代替されている。リムド鋼では、鋼中の固溶Nが残存するため、しばしば歪時効によるストレッチャー・ストレインと呼ばれるプレス時に生じる表面欠陥が問題であった。一方で、歪時効は、鋼板の降伏応力を上昇させるため耐デント性に関しては有利な面を持つ。しかし、A1キルド鋼は、固溶CとNがすべて析出固定

要旨

超深絞り性を有する焼付硬化性鋼板のプレス後の時効硬化挙動を、モデルプレス品における耐デント性の測定および引張試験における強度変化測定により検討した。その結果、以下のことが確認された。(1) 引張試験で得られるBH量はプレス成形品における耐デント性改善効果とよい相関を示す。(2) 焼付温度が低くても十分な耐デント性改善効果が得られる。(3) いったん加工歪が加わると時効硬化が急速に進む。その硬化速度は歪量および固溶C量が増すほど大きくなる。

Synopsis:

Age hardening behavior of a deep-drawable and bake-hardenable steel sheet was examined by measuring dent resistance and strength change of a model panel in a tensile test. Obtained results are as follows: (1) Bake hardenability in a tensile test was in good agreement with the dent resistance of a pressed part, (2) sufficient hardening effect was obtained even at a lower temperature, (3) once the steel sheet was deformed, age hardening started. Hardening was accelerated with increasing strain and the increased amount of solute carbon.

されているためこのような性質は示さない。焼付硬化性鋼板 Bake hardenable (BH) steel sheet の強化機構は、歪時効を利用した点でリムド鋼と同様であるが、その大きな違いは固溶元素の量を十分制御しているか否かにある。いかに固溶元素を制御するかが、そのままBH鋼板の製造方法となる^{1,2)}。

通常の焼付塗装条件は170°Cで20分程度であるが、焼付温度の低下は省エネルギー、あるいはプラスチック部品の併用が増すにつれ今後とも考慮される問題である。このような状況下で、BH鋼板を有効に使用してゆくためにはその性質を十分理解しておくことが必要である。

本報ではBH鋼板の耐デント性改善効果および硬化挙動について述べる。

2 実験方法と結果

2.1 供試材

供試材として、Nb添加の極低炭素鋼(C≤0.002%)に連続焼鈍でBH性を付与した超深絞り用BH鋼板(CHRX-BH)を用いた。Fig.1に、供試材の材質バランスを低炭素鋼のバッチ焼鈍材と比較して示す。供試材は、自動車の外板をはじめとする成形難度の高い部位への適用を目的としたもので、優れた r 値、伸びを特徴とする。BH量は引張り予歪後の170°Cで20分間の時効処理前後の応力差(ΔYS)とし、その測定方法およびBHとWH(Work hardenability)

* 昭和62年3月5日原稿受付

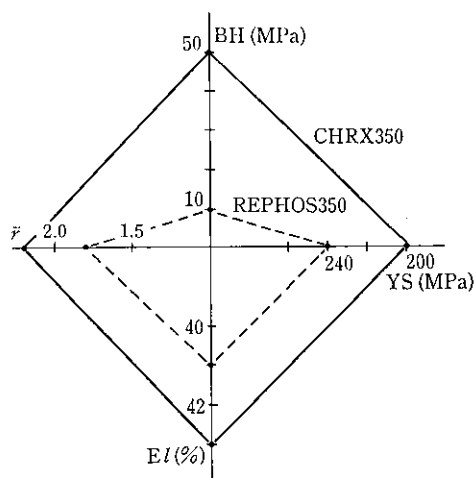


Fig. 1 Features of mechanical properties of CHR350 and rephosphorized high strength steel (TS grade: 350 MPa)

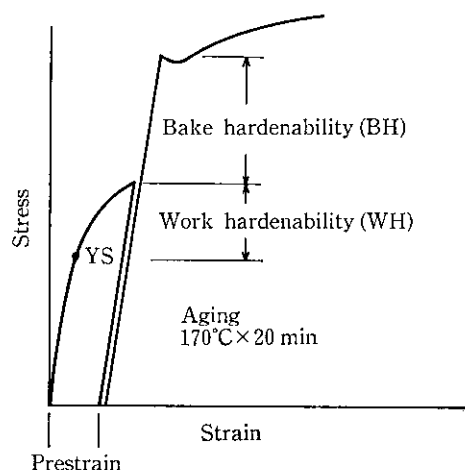


Fig. 2 Measuring method of bake hardenability (BH) and work hardenability (WH) by tensile test

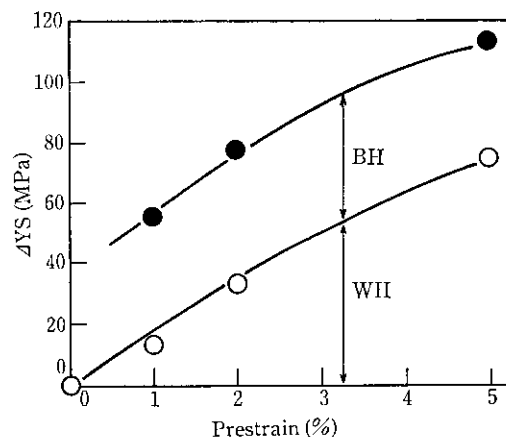


Fig. 3 Effect of tensile prestrain on work hardening and bake hardening after aging at 170°C for 20 min (Prestrain and tensile test were performed in the cross-rolling direction.)

の関係をそれぞれ Fig. 2 および 3 に示す。昭和 61 年に制定された自動車用冷延高張力鋼板の JIS 規格 G3135 の付属書によれば予歪量 2% で BH 量を定義する。

連続焼鈍を用いた BH 鋼板の製造には、通常つぎの二つの方法が挙げられる。ひとつは、低炭 Al キルド鋼を過時効処理することにより適度の固溶 C を残す方法である。しかしながら、パッチ焼鈍と異なり AlN を利用した {111} 集合組織の集積を図ることが難しく、超深絞り性を付与することができない。次に、極低炭素鋼に C に対する相当量の Ti を添加して固溶 C を残す方法があるが、成分の調整が難しく固溶 C 量の制御法としては不十分である。さらに冷間圧延前に固溶 C が存在することは {111} 集合組織の発達に好ましくないため、 r 値の劣化を招く。一方供試材は、上記の難点を克服するために高温焼鈍により NbC の解離固溶を利用して固溶 C を制御する方法を採用し製造されたものである。Fig. 4 に、製造方法を模式的に示す^{1,3)}。

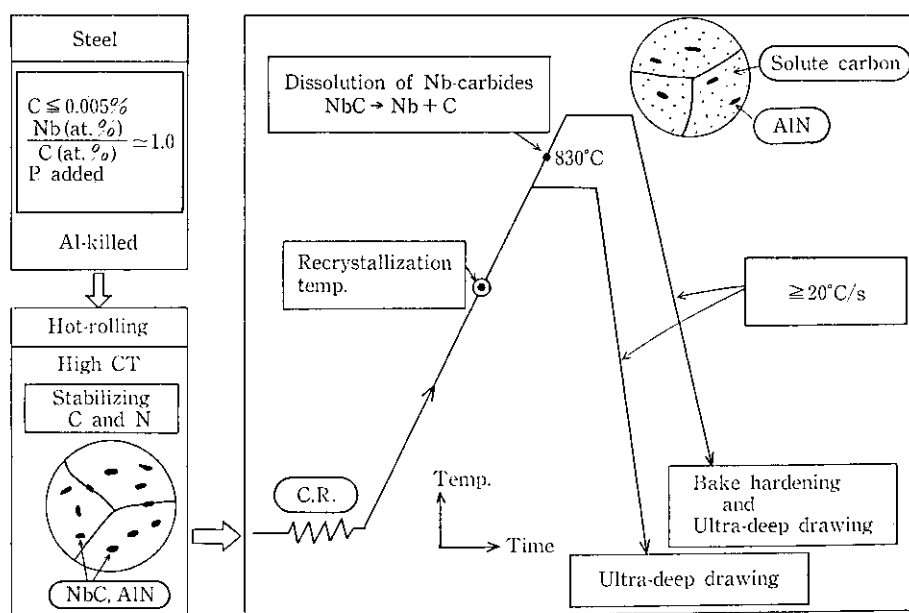


Fig. 4 Schematic illustration of metallurgical factors for producing CHR3 by a continuous annealing process

2.2 BH 鋼板の耐デント性

BH 鋼板を外板パネルに適用した場合の耐デント性に及ぼす改善効果を調べるために、供試材を用いて実験室の油圧プレス機でカマボコ状の小型パネルを作製し静的デント試験を行った。実験パネルには、プレス機のしわ押え力を変えることにより種々の平面歪を付与した。Fig. 5 に、実験方法とパネルの作製条件を示す。デント性は、鋼球の先端を 20 kg の荷重でパネル面に押付けたあとに生じるへこみの深さを測定して評価した。

デント試験はプレス直後および 170°C で 20 分間の時効処理を施した各々のパネルについて行った。また室温に 3 日および 7 日間それぞれ放置後のパネルについても同様の試験を行った。Fig. 6 にデント深さとパネルに付与された歪量の関係を示す。耐デント性は、パネルに付与された歪量が増すにしたがい改善された。これは加工

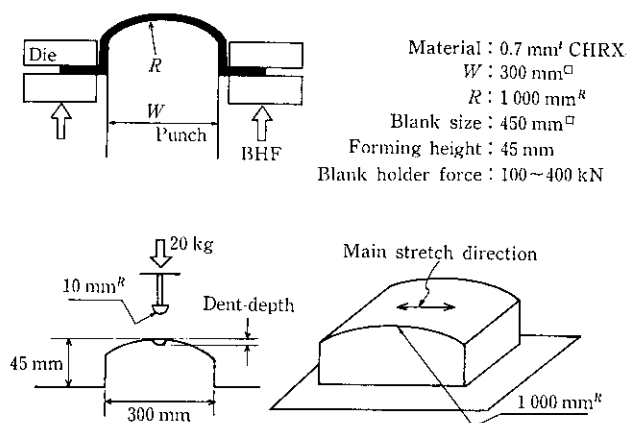


Fig. 5 Schematic illustration of static denting test

硬化により鋼板の降伏応力が増すためである。また耐デント性は時効処理により顕著に改善された。Fig. 3 に示した引張試験で確認された硬化量が、実際のプレスパネルにおいても耐デント性改善に有効に作用することがわかった。一方、室温に放置しておいた実験パネルは、170°C で 20 分間の時効処理を施さなくとも徐々に耐デント性が向上し、歪量の多いところでは時効処理したパネルと同等なデント深さを示した。

以上の結果より、プレスパネルに BH 鋼板を用いることで耐デント性の改善が可能であることはもちろんであるが、従来より低温の焼付処理でも十分その効果を得ることが期待できることがわかった。

3 BH 鋼板の硬化挙動

一般に金属が加工しやすいのは、転位と呼ばれる局所的な原子配列の乱れが存在するためである。変形は、この原子配列の乱れが次々に伝播したり、新たな乱れが生じたりすることで起こる。加工硬化現象を微視的にとらえると、これらの増殖した転位同士がからみあってお互いに動きづらくなるために生じた抵抗が応力上昇として観察される。一方、固溶 C, N などは鋼板内を拡散しやすい元素（侵入型元素）として知られ、とくに原子配列の乱れがあるとその近傍の結晶格子がひずむため、固溶元素がその位置に安定して存在しやすくなる性質を示す。転位の周囲に固溶元素が集まると、転位の移動を妨げるため変形に必要とする応力が増す。転位が固溶元素に固着されるにつれ硬化が進む現象は歪時効と呼ばれ、降伏応力の上昇と降伏伸びをとらないストレッチャー・ストレインの原因となる。Fig. 7 に、これらの過程を模式的に示す。

通常 A1 キルド鋼板では、固溶 C, N は析出物として固定されているためこのような現象は生じない。BH 鋼板では、歪時効の進行

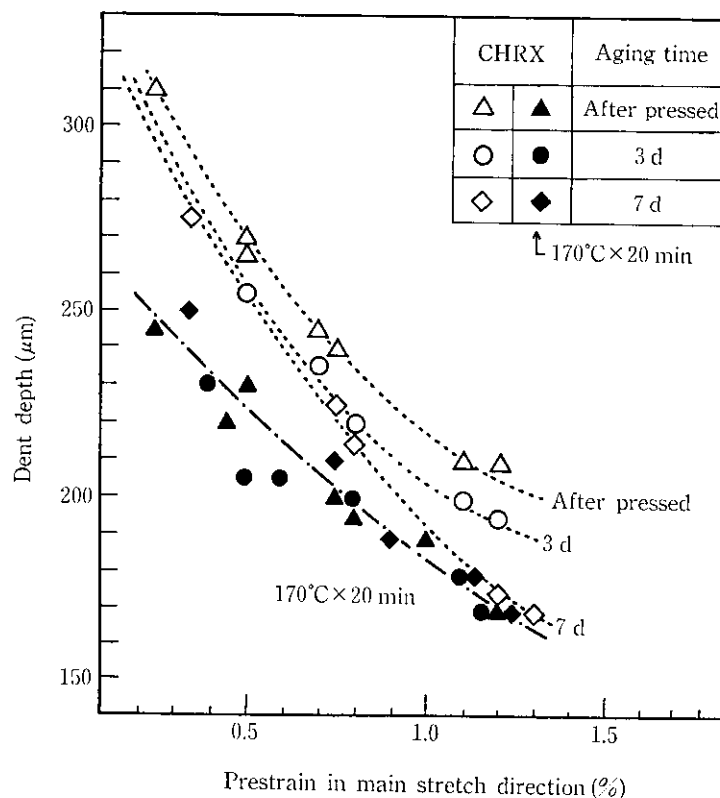


Fig. 6 Residual dent-depth plotted against plane prestrain in the stretch direction of stamped panels (Aging treatment were carried out at 170°C for 20 min and room temperature, 30~40°C, for 3 to 7 days.)

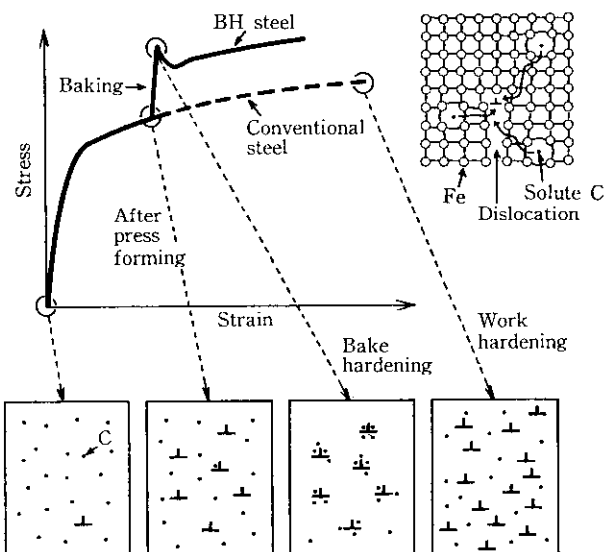


Fig. 7 Schematic illustration of a metallurgical principle of bake hardening

Table 1 Aging conditions

	Aging temperature and time	Tensile prestrain*
No. 1	70, 100, 130, 170°C × 20 min	0** & 1%
No. 2	70°C × 20 min → 30°C × 1, 3, 7 day	0** & 1%
No. 3	30°C × 1, 3, 10, 24, 72, 168, 504 h	1, 2, 5, 10%

* Tensile test: 0.7 mm thick, JIS No. 5 specimen, crosshead speed 10 mm/min

** As temper rolled

が室温で問題にならない程度に固溶C量を制御し、加工後の焼付塗装時の温度で時効を促進することにより強度を高めている。したがって、BH鋼板の実用上、その硬化挙動に関する知見が重要となる。すでに述べたように、引張試験により得られたBH量が耐デント性改善の指標になることがわかったので、引張試験によりBH鋼板の硬化挙動を調べた。パネルを作製した同一供試材を用いて引張り予歪を付与した試料および調質圧延のままの試料について、種々の温度で20分間の時効処理を行ったときの硬化量の変化、さらにその後室温(30°C)に保持した場合の変化を調べた。また予歪量を変えたときの室温時効挙動についても調査した。Table 1に実験条件を示す。硬化量(ΔYS)は、予歪後の流動応力(FS)と引き続き時効処理後の上降伏点(YS')の差として表した。

$$\Delta YS = YS' - FS$$

ただし、予歪を付与しない試料については調質圧延後の0.2%耐力をFSとした。試料は供試材の圧延方向に対し直角方向から採取したJIS5号試験片を用い、引張り予歪後はただちにドライアイスアルコール中に凍結し、その後時効処理を施した。

Fig. 8に、種々の温度で20分間の時効処理を施したときの試料の硬化量を示す。時効温度の上昇により固溶Cの拡散が活発になり、歪時効は促進される。調質圧延のままの試料では100°Cまでは時効しても硬化しなかったが、1%の引張り予歪を付与した試料ではわずか70°Cの時効処理で硬化が顕著となった。170°Cで20分間の時効処理を施した場合両者ともほぼ同じ硬化量に達した。予歪の付与が低温域での時効を促進することがわかった。

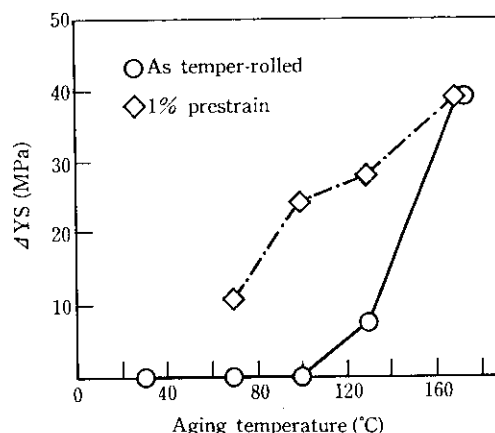


Fig. 8 Strain-aging effect of prestrained bake hardenable steel aged at various temperature for 20 min (Specimens were in the cross-rolling direction)

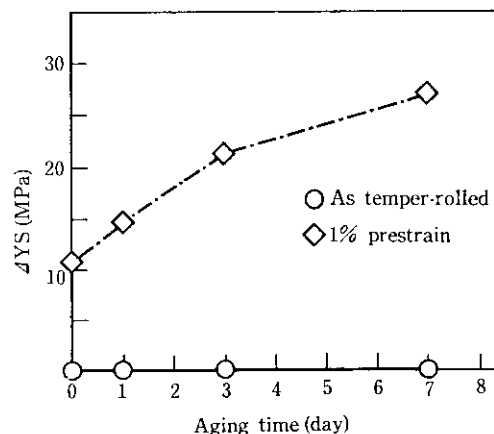


Fig. 9 Strain-aging effect of prestrained bake hardenable steel at 30°C aging after aging treatment at 70°C for 20 min (Specimens were in the cross-rolling direction)

Fig. 9に、70°Cで20分間の時効処理を施した同様の試料をさらに30°Cで保持したときの硬化量の変化を示す。調質圧延のままの試料では1週間後も何ら変化は現れないが、1%の引張り予歪を付与した試料では70°Cから30°Cへ時効温度を低下したにもかかわらず保持時間とともに硬化量が増し、1週間後には170°Cで20分間の時効処理で得られた硬化量の80%にまで達した。ひとたび引張り予歪が付与されると室温でも時効硬化が進むことが判明した。

Fig. 10は、予歪量を変えた試料を30°Cに保持したときの時効硬化量を硬化率で表したものである。硬化率は、室温時効による硬化量をそれぞれの予歪後170°Cで20分間の時効処理で得られた硬化量 $\Delta YS(BH)$ で規格化したものである。ここで時効指数(AI)は、7.5%予歪後100°Cで30分間の時効処理で得られる降伏応力の差であり、鋼板中の固溶C量の目安として用いている。通常AI=50 MPa以内に固溶C量を制御することで、実用上の問題がないことが経験的に知られている。供試材(AI=25 MPa)および固溶Cをより多く含む同種のBH鋼板(AI=45 MPa)について実験結果を示す。予歪量が増すほど、また固溶C量が多いほど硬化率が大きい。これは歪時効硬化が、鋼板中の転位と固溶Cの相互作用に起因することから予想されることである。つまり、固溶Cが多いほど転位に固着される頻度が増し、短時間で時効が進行する。歪付与に関し

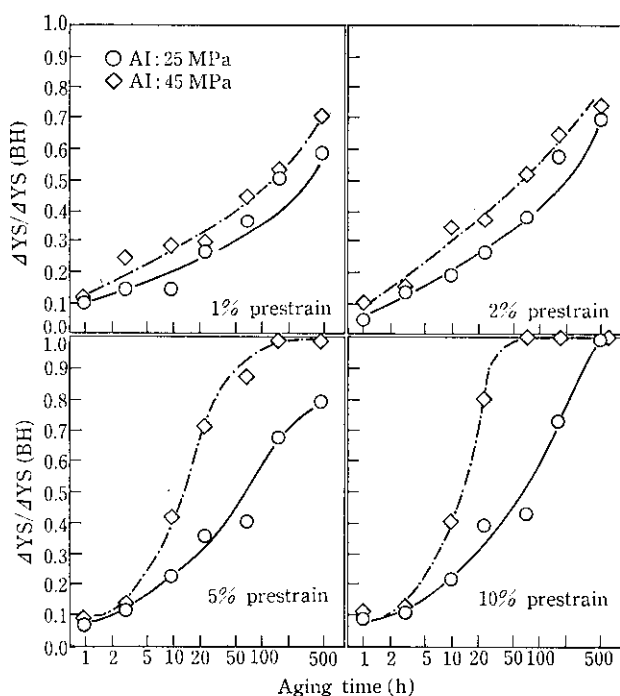


Fig. 10 Influence of aging index on strain-aging behavior of bake hardenable steel aged at 30°C after various amount of prestraining (Prestrained specimens were in the cross-rolling direction)

ても、歪量が増すほど鋼板内に導入される転位が増し、固溶Cが転位に固着されるまでに必要とされる拡散距離が短くなるため時効が促進されると考えられる。

以上の結果は、Fig. 6に示したプレスパネルの耐デント性が、室温に放置しただけでも改善されたことを裏付けるものである。

このようにBH鋼板の硬化挙動は、引張り予歪の存在に大きく依存する。一方、調質圧延による歪は時効硬化を抑制する。このことが、焼付硬化性を理解するうえで混乱を生じた一因となっている。調質圧延は、本来降伏伸びを消失させるために施されるもので、鋼板に付与される歪の形態が引張りや張出しによる変形とは異なる。引張りや張出しによる歪は、一般に板厚内に均一に分布すると考え

られるのに対し、調質圧延では、圧延ロールによる拘束と加工による歪が表層に優先的に導入される。調質圧延が歪時効を遅らせる理由として、鋼板内に残留応力場を形成し、固溶元素による転位周辺の雰囲気形成を抑制したり、降伏応力を局所的に下げる効果を持つこと、あるいは表層に限られた部分で集中的に転位密度が高くなり固溶元素に固着されない可動転位が十分長時間存在するため変形時に低応力で転位が移動できること、などが考えられる。また、絞り用鋼板の場合、調質圧延は降伏応力を不必要に上げないように1%前後であるが、さらに数%の調質圧延を施しても時効性を損なうことはない。しかし引張り場合は小さな歪でも時効硬化が促進される。これは、引張りが比較的単純な変形モードのため局所的に高い転位密度が再配列により鋼板内で均質化され、調質圧延により形成された残留応力場を解消し、固溶Cの拡散による転位の固着が効果的に起こるためと考えられる。したがって、調質圧延後のBH鋼板の取扱い方にも少なからず注意が必要となる。例えば、コイルの巻き直しあるいは表面処理などで高張力下でのライン通板はもとより、受入れ側でもレベラー処理後長時間放置しておくこと歪時効の促進により降伏応力の上昇や降伏伸びが再現することが考えられる。つまりプレス成形される前に、長時間高温にさらされる状態で保存したり何らかの歪とくに引張り歪が付与されることは好ましくない。

4 まとめ

実験室のプレス機を用いて、BH鋼板の耐デント性改善効果を実車パネルに近い状態で評価することを試みた。本実験により以下の点が確認できた。

- (1) BH鋼板の使用により実プレス品の耐デント性は向上する。
- (2) プレス後は、室温でもデント性が改善される。
- (3) 調質圧延により時効性を損なうことはないが、いったん加工歪が付与されると急速に時効硬化する。
- (4) 時効硬化は、加工歪量および固溶C量が増すほど急速に進む。

以上の結果より、BH鋼板を効果的に利用してゆくには、製造側における素材の固溶C量の厳密な管理はもとより、使用者側においても付与される加工歪の状態を十分制御してゆくことが重要であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Irie, S. Satoh, A. Yasuda, and O. Hashimoto: "Metallurgy of Continuous-Annealed Sheet Steel", Proceedings of the TMS-AIME Symposium, Dallas, USA (1983), 151-171
- 2) A. Okamoto, Y. Hayashi, M. Takahashi, and S. Sugiyama: "Society of Automotive Engineers", International Congress and Exposition,

Detroit (USA), 820018, (1982)

- 3) S. Satoh, T. Irie, T. Obara, and M. Nishida: International Journal of Vehicle Design", IAVD Congress on Vehicle Design and Component, Vol. 2 (1984), T1-T16