

© 1982 ISIJ

高強度熱延鋼板の自動車ホイールへの適用性

技術報告

日戸 元*・佐藤 泰一*・斎藤 亨*

水井 正也*・吉広 一秀*²・高橋 宏*²

High Strength Hot Rolled Sheet Steels for Automotive Wheel Use

Hajime NITTO, Taiichi SATOH, Tohru SAITOH

Masaya MIZUI, Kazuhide YOSHIHIRO, and Hiroshi TAKAHASHI

Synopsis:

Overall applicability of various types of high strength sheet steels to automotive wheels was investigated by means of conventional production tooling as well as laboratory forming and welding tests. Dual phase sheet steels, especially those of as hot rolled type, showed most hopeful potential in wheel discs forming because of their high workhardening, good elongation and uniform dispersion of second phase. Special improvements in flash butt welding and roll forming conditions were necessary to make high strength sheet steels usable for the production of wheel rims and HSLA steels which contained Nb revealed comparatively stable quality in joints and HAZ of flash butt welds. Centrifugal cornering fatigue tests suggested that high strength sheet steel of 60 kgf/mm² tensile strength could be substituted for mild sheet steel in wheels with weight saving as high as 25%. Influences of alloying elements on various properties and performances of sheet steels for wheel were summarized and utility of dual phase sheet steels was also discussed.

1. 緒 言

高強度薄鋼板を使用して重量の軽減化をはかるといふ自動車材料の大きな変革が進みつつあるが、自動車のホイールへの高強度鋼板の適用では他の部品への場合にみられない顕著な特徴がみられる。まず、ホイールの場合ディスクおよびリム共に受ける加工度が極めて大きい。次に鋼板に要求される特性および性能が成形性、溶接性、疲労特性、耐食性と極めて広範囲の上、成形性および溶接性の内容が多様である。さらにホイールへの高強度鋼板の適用においては高強度鋼板の高耐久性が利用される点が他のパネル類や強度部材に用いられる場合と特徴的に異なっている。

ホイールは単一種部品として高強度鋼板使用による重量軽減量が大きいので、高強度鋼板の開発がなされるようになったごく初期からホイールへの適用の試みが開始されている¹⁾。近年の複合組織鋼板に代表される良加工性高強度熱延鋼板の開発および試作段階においては実用化例の多くにホイールが取り上げられるのが世界的な風潮^{2)~4)}にもなった。しかしながら、その後良加工性高強度熱延鋼板のホイールへの本格的な量産実用化に成功し

たという例がまだほとんどみあたらない。本報告は最近開発された超低温巻き取りによる低合金熱延まま型複合組織鋼板⁵⁾を中心に各種高強度鋼板を用いてホイール実製造ラインによる試作テストならびに製品耐久テストを行つた結果と併行して進めたホイール製造における成形および溶接に関する各種シミュレーション実験結果をまとめたもので各種高強度鋼板のホイールへの適用の可能性を探ると同時にホイール用高強度鋼板としての材料設計方向をいささか考察するものである。

2. 供 試 鋼 板

本研究に用いた高強度熱延鋼板は 50 種を越えるが、代表的鋼板としてホイール試作テストに用いた鋼板の鋼種、成分および特性の 1 部を Table 1, Table 2 にまとめる。A~C は熱延まま型複合組織鋼板で引張強さの若干異なるものを選んでいく。D~F は熱処理型複合組織鋼板で引張強さはいずれも 60 kgf/mm² 級、Si と Mn の成分比が変わっている。G は米国等で試みられている析出強化元素含有タイプの熱処理型複合組織鋼板²⁾、H は従来から一般に使用されている Nb 添加高強度鋼板でいずれも引張強さ 60 kgf/mm² 級のものを選んだ。I

昭和 56 年 10 月 27 日受付 (Received Oct. 27, 1981)

* 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Product R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

*² トピー工業(株) (Topy Industries Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of tested hot rolled sheet steels.

	Strength & Characteristics	C (%)	Si (%)	Mn (%)	S* (%)	Other elements (%)
A	TS 70kgf/mm ² On-line D.P.	0.08	1.1	1.1	0.002	Cr 0.1
B	TS 60kgf/mm ² Oo-line D.P.	0.05	1.0	1.5	0.004	—
C	TS 55kgf/mm ² On-line D.P.	0.05	0.8	1.3	0.003	—
D	TS 60kgf/mm ² Off-line D. P.	0.08	1.1	1.5	0.004	—
E	ibid	0.08	0.5	1.5	0.003	—
F	ibid	0.08	<0.1	2.0	0.004	—
G	ibid	0.12	0.5	1.5	0.01	V 0.07 Nb 0.01
H	TS 60kgf/mm ² Nb bearing steel	0.08	0.3	1.3	0.003	Nb 0.04
I	TS 45kgf/mm ² Carbon steel	0.17	<0.1	0.6	0.01	—
J	Ordinary mild steel	0.04	<0.1	0.3	0.015	—

* Steel sheets A~F and H are S shape controlled by Ca or REM

Table 2. Mechanical properties of hot rolled sheet steels tested.

Sheet Steels	Thick-ness (mm)	Tensile Properties							Hole Expand Ratio
		Y P (kgf/mm ²)	T S (kgf/mm ²)	E l (%)	Y R** (%)	\bar{r}	\bar{n} (5-10%)		
A	d*	3.2	40	70	30	59	0.8	0.20	1.3
	r*	2.8	42	71	29	60	0.8	0.20	1.3
B	d	3.3	40	66	31	61	0.8	0.21	1.4
	r	2.9	43	64	33	67	0.8	0.21	1.4
C	d	3.3	36	58	33	61	0.7	0.21	1.4
	r	3.0	37	57	34	65	0.9	0.20	1.5
D	d	3.2	36	64	30	56	0.8	0.20	1.3
	r	2.9	35	65	35	53	0.8	0.26	1.4
E	d	3.3	41	67	30	60	0.9	0.21	1.4
	r	2.9	29	60	35	48	0.8	0.27	1.3
F	d	3.3	37	60	33	63	0.8	0.19	1.3
	r	2.9	36	66	31	55	0.8	0.20	1.3
G	d	3.1	37	63	31	59	0.9	0.20	1.2
	r	2.7	36	66	30	56	0.9	0.23	1.2
H	d	3.2	54	62	28	86	0.9	0.13	1.2
	r	2.8	55	64	27	85	0.9	0.14	1.2
I	d	3.3	36	50	34	72	1.0	0.17	1.2
	r	2.8	35	49	35	72	1.0	0.18	1.2
J	d	3.3	24	34	48	61	0.9	0.21	1.5
	r	2.9	25	35	47	70	0.9	0.21	1.4

* d for disc test, r for rim test ** Yield Ratio (YP/TS)

と J は比較材で SAPH 45 および SPHC である。

3. 実験条件

3.1 ホイール試作テスト

Fig. 1 は通常の 2 ピースホイールの 製造工程の概要を示す。本研究における試作テストはこの中のディスクプレス成形とリムの製造プロセスのフラッシュバット溶接とロール成形に重点を置いた。あらかじめ設定した主な実験条件は次のとおりである。(i)極めて標準的なホイールを選ぶこと,(ii)板厚は現行条件(ディスク 3.3 mm, リム 2.8 mm)とする。(iii)成形および溶接の条件も現行どおりとする。もし製造不能になる場合は別

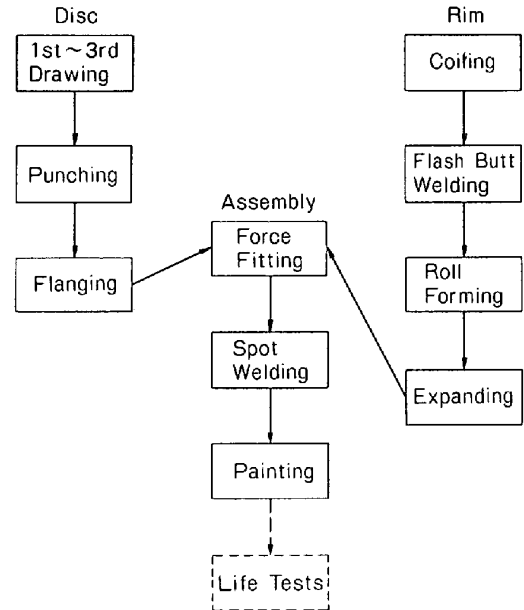


Fig. 1. An outline of automotive wheel manufacturing process.

Table 3. Various simulation tests for wheel disc press forming.

Tests	Simulation	Machines	Tools
1. Conical Drawing	Disc 1st Draw	400 ton Hydraulic Press	Die 200φ Punch 160φ
2. Conical Stretching	Nut-seats forming	30 ton Hydraulic test machine	Die 42φ Punch 27φ rp=rd=6
3. Cylindrical Ironing Flanging	Disc center bore burring	60 ton Mechanical Press	punching cl. 5~30% flanging 20~50% ironing 0~20%

途, 条件を検討する。(iv)試作個数は各材料につき 30 個以上とする。

3.2 実験室成形テストおよび溶接テスト

ディスクのプレス成形における全体成形および局部成形の最も重要な部分をシミュレートする Table 3 に示すような各種成形実験を試みた。一方, リムの試作テストの初期において現行の軟鋼板のフラッシュバット溶接条件では高強度鋼板のリム製造の不良率が極めて高くなることが判明したので, 実験的に最適フラッシュバット溶接条件を 求める方向で 実験室テストを進めた。使用した実験装置は空気加圧, 板カム式フラッシュ溶接機, 試験片幅を 100 mm とし接合後の不具合および変形能を Fig. 2 に示すような曲げ成形により評価, 判定した。

3.3 耐久テスト

ホイールの高強度鋼板適用検討が比較的やりやすい点

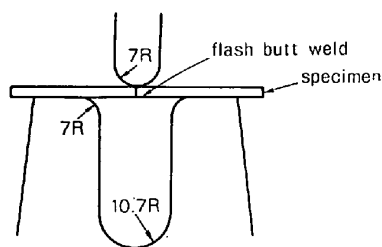


Fig. 2. Bending test apparatus for flash butt welds.

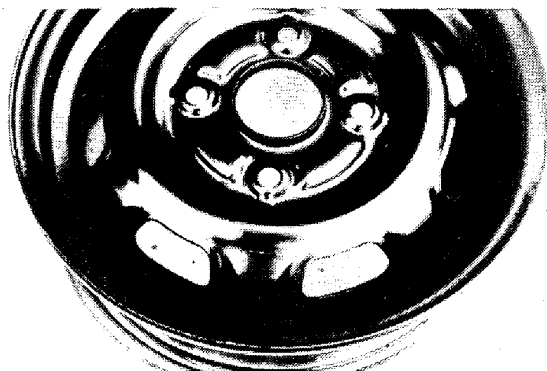


Photo. 1. An example of wheel which consists of high strength steel disc and mild steel rim.

は実際使用時に近い状態の完成部品耐久試験が可能なことである。ホイールの耐久試験として普通、曲げモーメント耐久試験と半径方向負荷耐久試験の2種類が用いられるが⁶⁾、本試作テストで製造された高強度鋼板によるディスクとリムをそれぞれ軟鋼板製のリムおよびディスクと組み合わせ完成ホイールとし、前者には曲げモーメント耐久試験、後者に半径方向負荷耐久試験を実施した。Photo. 1 に曲げモーメント耐久試験に用いたホイールを示す。なお、素材に対する実験室的な疲労試験としてシュンク型の疲労試験、スポット溶接部の剪断引張方向ならびに十字引張方向の疲労試験を行った。

3.4 耐食性

各鋼板素材の耐食性を SST 試験により実施。塗装条件は実際のホイールに用いられているものに合わせた。

4. 実験結果と考察

4.1 製造ラインにおけるディスク成形結果

ホイールディスクの成形は全体形状を形づくる数工程の絞り張り出し成形、穴打ち抜き、パーリングおよびコイニングにより構成される⁷⁾。本テストに用いたディスク成形では Table 1 のいずれの鋼板も割れ等の不具合が生じず、全体形状成形でも成形 OK であった。しかしながら SC 法による成形品の歪み分布測定結果と鋼

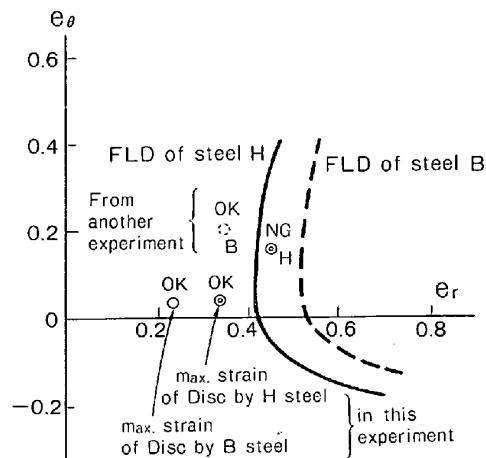


Fig. 3. Comparison of maximum strains in disc forming and Forming Limit Diagrams between dual phase steel sheet and Nb bearing ordinary type high strength steel sheet.

板の成形限界曲線の相対関係の対比では鋼板Hは最も変形の厳しい部分（1絞り円錐頂部）で割れ寸然の状態であった。Fig. 3 に鋼板HとBの比較例を示した。成形品上の最大歪み量と成形限界曲線の隔りとして表される成形余裕量が複合組織鋼板の場合、Nb 添加鋼板に較べて著しく大きくなっている。Fig. 3 にはより成形の困難な他種のディスクについての検討例も比較のため示してあるが、こちらの場合は鋼板Hは割れて NG であった。従来、ディスク成形のポイントは局所的な加工肉減りをいかに小さくするかにあるとされる。高強度鋼板を用いた本テストでは予想に反して強度の高い鋼板ほど肉減り量が小さく、鋼種依存性も少ない結果が得られた。特に低歪域高加工硬化性の極めて高い複合組織鋼板において歪みの均一化効果が加工肉減り低減に効いていないのは成形条件改善の余地を残すことを示唆している。

試作ホイールは全体形状成形は比較的成形容易であったが、中央のハブ穴周辺のフランジングは高く設定（15 mm）されている。Fig. 4 に試作成形テストにおけるフランジング（しごきパーリング）の各種鋼板についての成績を示した。硬化物の形態コントロールがなされていない鋼板 I, J, G 等の不良率が高くなっているのは、容易に理解できる。しかしながら熱処理型複合組織鋼板の不良率が熱延まま型複合組織鋼板に比してやや高い点は見逃せない。この差違は両者の S 含有量や硫化物の形態の違いによつて説明がつかないので次項に述べる再現テストにより詳しく調べることにした。

4.2 各種シミュレート成形実験結果

4.2.1 円錐台成形

ディスクの絞り成形の第一工程には円錐台成形が多く

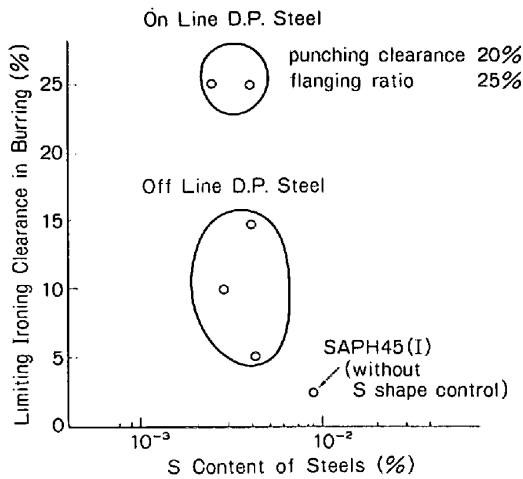


Fig. 4. Comparison of performances of test sheet steels in center bore ironing flanging at wheel disc forming process.

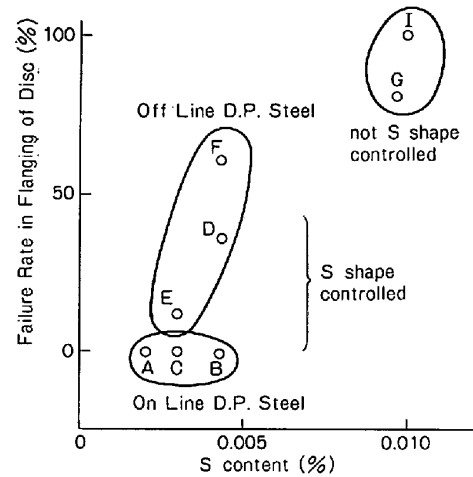


Fig. 6. Difference in ironing flangeability between on-line type dual-phase steels and off-line type dual-phase steels.

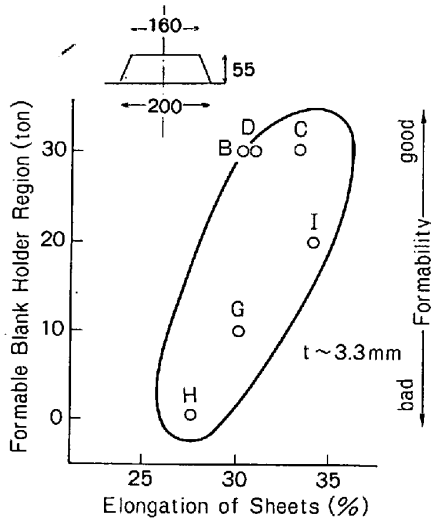


Fig. 5. Comparison of formability of sheet samples using disc 1st draw model conical drawing.

用いられる。ディスクの実部品製造テストにおいて絞り工程での鋼板材質の優劣の詳細が明確にできなかったのを補う目的で円錐台モデル成形を実施した。ディスク第一工程絞りにおいて円錐台の成形深さを増すことは中心部板厚維持のためには望ましい方向なので深く成形できる鋼板はより使いやすい材料と言える。Fig. 5 は通常行われる成形形状よりおよそ 10% 深い実形状と類似の円錐台成形実験の結果の一例を示しているが、成形条件を厳しくした結果、鋼板の材質差が明瞭になっている。特に複合組織鋼板の代表鋼種は引張り強さが 15 kgf/mm² も低い鋼板 I よりも広い成形可能域を示していることが注目される。

4.2.2 しごきパーリング成形

ディスクのハブ穴まわりのパーリング成形の再現テス

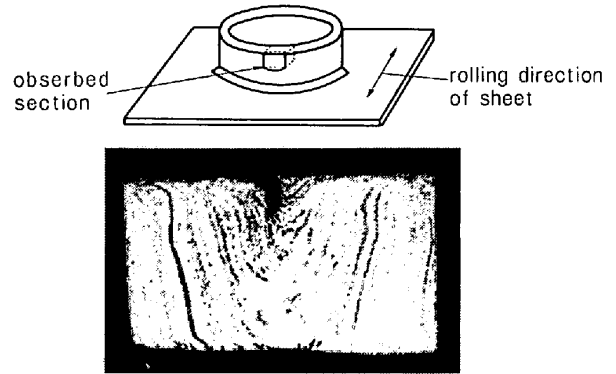


Photo. 2. Initiation of cracks at banded structure of off line type dual-phase steel during ironing flanging. (×10×1/2)

トを Table 3 の成形条件で試みた。Fig. 6 は実験結果の典型例であるが、熱処理型複合組織鋼板のしごきフランジ成形限界が熱延まま型複合組織鋼板のそれに較べて明らかに劣っている状況が再現されている。この差異の原因を解析するために行ったパーリング破断部の詳細観察結果例を Photo. 2 に示しているが、割れの発生点が層状のマルテンサイト部分であることが明確に認められる。熱処理型複合組織鋼板は製造条件上、熱延まま型に比較してマルテンサイト層状組織の発達した組織になりやすいのでしごきフランジのような強加工に用いる場合は成分あるいは熱処理条件上の注意が必要である。

4.3 実製造ラインにおけるリム試作

はじめに各供試鋼板による 30 個ずつの試作テストを現行の製造条件のまま行つた。その結果、いずれの高強度鋼板も数 10% に達する高不良率を示し鋼種による成績の差違も不明確であつた。不良の形態はいずれもフラ

ッシュバット溶接後の成形加工で溶接部に割れを生ずるもので割れの状況から判定して溶接前の巻き形状不良(不整合および間隔ばらつき)に起因するものと溶接接合面に形成される酸化物による不良とに大別できると推定した。鋼板を一次試作テストで比較的成績の良かったB材に固定して2つの原因の詰めを行つた。巻き形状の改善は巻き成形条件設定の峻厳化と鋼板ばらつき管理により実現しおよそ5%弱の不良率低下が達成できた。接合面品質改善の方は実ラインにおける電極加速速度の適正化と後述の基礎実験で得られた溶接時間および溶接電圧の適正選択による単独効果として約5%の不良率低減、巻き形状管理を複合して用いることにより計15%程の不良率改善が実現し、試作テストして満足すべき不良率レベル(2%以下)に達することができた。

4.4 フラッシュバット溶接基礎テスト

既に述べた実験室溶接機と接合部の加工による割れの検出評価法を用いて各種高強度鋼板のフラッシュバット溶接条件の適正化を模索した。Fig. 7は溶接時間に関する実験例で各種鋼板共通して溶接時間の短い方が接合部に酸化生成物が少なく成形に耐える溶接部が得られることを示唆している。接合部の酸化物生成量は酸化容易性合金元素SiおよびMnの高い鋼板A, B, D, Fに多くなる傾向が認められたが、実験室評価における割れ発生確率と酸化物量との間の定量関係は得られていない。

さらに溶接条件から接合面の品質を向上させる方法としてアプセット条件を高電流条件にして接合面の酸化物を押し出すようにすることが推奨される。しかしながらアプセット高電流条件の下では溶接熱影響部に軟化部分が広がり溶接後の加工時に局部的な肉減りが生じやすくなる。Fig. 8はこうした条件における各種鋼板の肉減

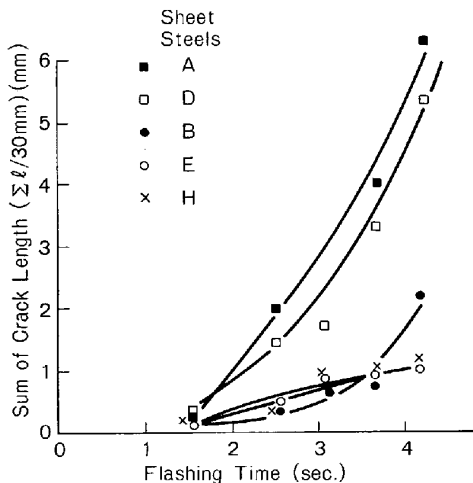


Fig. 7. Influence of flashing time on interfacial quality of flush butt welds.

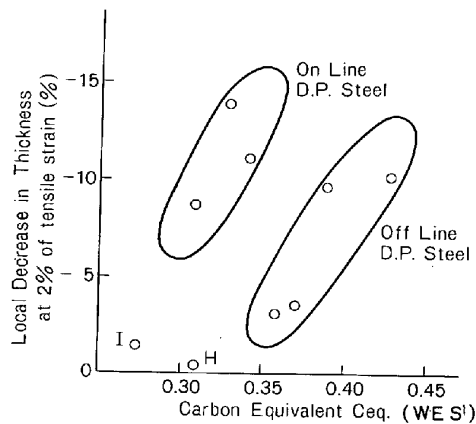


Fig. 8. Local decrease of thickness in HAZ of flash butt welds.

り挙動を鋼板の主要合金元素(炭素当量で表示)と関係づけて比較している。析出強化型鋼板においてはほとんど肉減りが生じないのに較べて複合組織高強度鋼板、特に熱延まま型鋼板の著しく肉減りしやすい傾向が特徴的である。肉減りしやすさはフラッシュバット溶接不適性を決定づけるものではないが、製造可能条件を狭化する特性と言えよう。

4.5 ディスクとリムの接合

ディスクとリムのスポット溶接はディスクおよびリムにそれぞれ高強度鋼板を適用したふた通りの実ライン溶接を行つた結果、特に問題を生じなかつた。

4.6 耐久性

4.6.1 素材の疲労特性

高強度鋼板を用いてホイールの軽量化をはかる場合の最大のキーポイントは耐久性の確保にある。実部品ホイールの耐久性は素材鋼板の疲労特性、成形時に受ける変形の様式と程度、成形形状ならびに接合形状、およびこれらの製造プロセスにより生ずる残留応力により決まる。当供試鋼板等について既に著者らが報告⁸⁾⁹⁾しているように素材の疲労限は低降伏点特性の顕著な複合組織鋼板を含めておおむね鋼板の引張強さに比例している。複合組織鋼板は軽度の子加工(5%以下)を加えても疲労限はほとんど上昇しない。この事実は複合組織鋼板が低降伏点にもかかわらず高疲労限を与える理由の説明¹⁰⁾一初期サイクル負荷の段階で高降伏点化する一を裏づける。

4.6.2 曲げモーメント耐久試験結果

実製造ラインによるディスク試作テストで不具合の生じなかつたディスクと軟鋼板を用いて製作したリムとを接合した完成品ホイールの曲げモーメント耐久試験を行つた。曲げモーメントを一定(M=150 kg·m)にして各

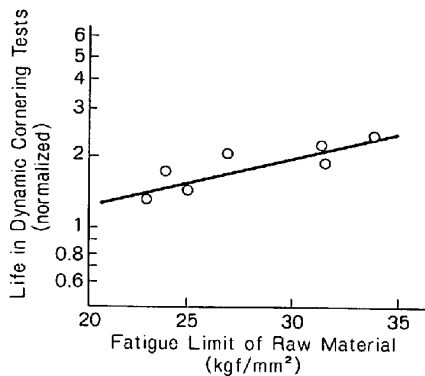


Fig. 9. Relation between fatigue limit of raw sheet materials and life in centrifugal dynamic cornering tests of wheels which are made of various high strength steel discs.

種鋼板によるホイールの耐久寿命を比較した結果例を Fig. 9 に示す。ディスクの疲労破断発生位置は鋼板によつてほとんど変わらずフラット R 部で対数目盛表示の耐久寿命は素材の疲労限に比例している。Fig. 9 ならびに前述した疲労限と素材の引張強さの比例関係からホイール耐久寿命 N と素材の引張強さ TS (kgf/mm^2) の間の関係式

$$N \propto (TS)^{2.4} \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

が得られた。一方、鋼種を固定し (B 材) 板厚の異なる鋼板を用意し ($t=3.1 \text{ mm}$ と 2.9 mm) 前述したものと同様のホイールを製作し同一の試験条件により耐久寿命を求めた結果、 $t=3.3 \text{ mm}$ の場合に比して $t=3.1 \text{ mm}$ および $t=2.9 \text{ mm}$ の場合、耐久寿命はそれぞれ $1/1.4$, $1/2.0$ に減少した。これらのデータにより (4-1) 式を補うと

$$N \propto (TS)^{2.4} \times t^{5.5} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

が得られる。高強度鋼板使用に際する板厚減少効率を表わす指標¹¹⁾は (4-2) 式の指数の比をとれば良いから $2.4/5.5=1/2.3$ となる。この値は補強部材への高強度鋼板適用の場合の値 ($\approx 1/2^{11}$) およびデント抵抗向上を目的とした適用のケース ($\approx 1/2.3^{12}$) とほぼ一致している。

(4-2) 式から本実験に用いた大部分の高強度鋼板つまり軟鋼板の 2 倍の強度の高強度鋼板を用いる場合、可能板厚減少量はおよそ 26% と計算される。

4.6.3 半径方向負荷耐久試験

リムにのみ高強度鋼板を使用した試作ホイールの半径方向負荷耐久試験を行った。高強度鋼板使用リムのホイールの本試験における耐久寿命はいずれも現行の軟鋼板製ホイールの基準耐久寿命の 2 倍の値を大きく越える成績を示した。また、ディスクの可能板厚減少量に近い約 20% の板厚減をはかつた H 材によるリムの耐久寿命が

基準耐久寿命をクリアーすることをかろうじて確かめた程度に本研究はとどまつている。

4.7 耐食性

本供試鋼板の成分範囲内では SST 試験の種々の条件における錆発生に対する成分の影響は小さく、最も危惧が持たれた Si についても 1% 前後の添加量でも鋼板の塗装後耐食性に特に有害となる効果は認められなかつた。

5. ホイール用高強度鋼板の成分設計と特性選択

高強度熱延鋼板の成分設計ならびに強度と成形性を中心とする特性設計法については既に数多くの報告^{3)13)~16)}がなされている。ここでは前章に述べた結果に基づいて利用対象をホイールに限定した場合における高強度鋼板の望ましい成分設計および各種特性の付与あるいは選択方向なかんずく複合組織化の功罪についてまとめる。

5.1 ディスク用高強度鋼板

ディスク用鋼板は成形性志向設計にならざるを得ない。既に述べたように初期工程の成形余裕を拡げるためにも平面歪張出し限界を高く確保する意味においても低降伏点で加工硬化性の高い複合組織鋼板がディスク用高強度鋼板として最適である。とりわけ低い Mn 量で複合組織化を可能にした熱延まま型複合組織鋼板がディスク成形におけるもうひとつのポイントであるしごきパーリング性にも優れ、総合的に成形性にバランスがとれている。ディスク用高強度鋼板の成分制約は緩やかと言える。C は成形性ならびにリムとの接合のためのスポット溶接性からの大きな制限はない。しかし複合組織鋼板を製造する場合には強度と伸びフランジ性の水準安定化のために低 C 化が有効であることが指摘されている¹⁶⁾。Si は熱延鋼板の場合、塗装耐食性への影響が小さく、添加コストが許す限り利用可能。Mn は多量に添加されると層状マルテンサイトを発生させやすくなり、しごきパーリング性を損なう。しごきパーリングの行われるディスク成形では添加量 1.5% を越えないようにすべきである。その他、ディスクには中央ハブ穴以外にも打抜き部分が多く、伸びフランジ性を高い水準に維持した特性設計が不可欠であり S の REM 添加等による形態コントロールを省くことはできない。

5.2 リム用高強度鋼板

リムの製造ではフラッシュバット溶接のような極めて複雑なプロセスが介在するため溶接条件の微妙な選択によつて鋼板の成分設計や特性選択も大きな影響を受けて

しまう。一般的には低Cおよび低酸化容易元素 (Si, Al Mn) を含有する鋼板のフラッシュバット性が良好なことは間違いないが、4.3項で述べたように鋼板Bのような比較的高Siの鋼板でも製造条件の適正化をはかれば低不良率のリム製造が可能になるし、さらにアプセット条件を高電流条件にした場合には熱影響部の加工肉減りの少ない鋼板の成分および特性設計が必要になる。さて、リムの溶接後のロール成形が比較的厳しくないことを考えると複合組織化は強度上昇以外に大きな意味を持たないので複合組織鋼板のリムへの適用は推奨されない。現在のところはむしろ低Si設計で加工肉減り現象が極小であるNb添加高強度鋼板をリムへ適用するのが得策である。

なお、ディスク、リム共に耐久性性能に対する成分設計および特性選択のおよぼす影響は小さい。

6. 結 論

良加工性高強度熱延鋼板の新製品である複合組織高強度鋼板を中心に各種高強度鋼板の自動車ホイールへの実用化の可否ならびにホイール製造条件適合性の検討を行った。結果をまとめると(1)ホイールへの高強度鋼板適用化における製造技術上のポイントはディスク成形におけるバーリング等の局部成形における不良回避とリム製造におけるフラッシュバット溶接部不良の克服であり、適当な材料と製造条件の選択によりこれらを解決して標準的なホイールへの引張強さ 60 kgf/mm² 級鋼板の実用化が可能である。(2)現有の高強度鋼板の中にはディスク製造には熱延まま型複合組織鋼板、リム製造にはNb添加鋼板がそれぞれ最適である。ディスクとリムへの鋼板材料設計または選択の分化は当分止むを得ない。(3)高強度鋼板を用いた試作ホイールの耐久試験結

果から引張強さ 60 kgf/mm² 級高強度鋼板使用によるホイールの可能板厚軽減量は現状軟鋼板ホイールに用いられている板厚のおよそ 25% 程度である。

文 献

- 1) J. A. LUMM, G. M. HUGHES, and B. J. BASTIAN: SAE Paper 740179, Feb. (1974)
- 2) M. S. RASHID and G. D. LAWRENCE: SAE Paper 780138, Feb. (1978)
- 3) M. S. RASHID: Proceedings of Seminar organized by VANITEC (1978), p. 32
- 4) E. J. DREWES and D. DAUB: Proceedings of Alloys for the 80s, p. 5-1
- 5) たとえば, 古川 敬, 武智 弘, 渡辺国雄, 戸来稔雄, 竹本長靖: 日本金属学会報, 19(1980) 7, p. 541
- 6) 丸山三郎, 甲谷 博, 中西祐治, 佐竹佳弘, 高橋行夫, 八本寿悦: 自動車技術, 30 (1976) 11, p. 959
- 7) 泉谷正隆, 宮下 悟: 昭和 56 年度塑性加工春期講演会講演論文集, p. 469
- 8) 日戸 元, 戸来稔雄, 佐藤泰一, 斉藤 亨, 水井正也: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 543
- 9) 日戸 元, 戸来稔雄, 佐藤泰一: 製鉄研究, (1981) 304, p. 120
- 10) A. M. SHERMAN and R. G. DAVIES: Met. Trans. 10A, (1979) 7, p. 929
- 11) S. DINDA, R. W. KARRY, and A. S. KASPER: SAE Paper 760207, Feb. (1976)
- 12) 柚鳥善之, 野村伸吾, 小久保一郎, 石垣秀生: 塑性と加工, 21 (1980) 2, p. 168
- 13) M. KORCHINSKY and H. S. STUART: Report in Symposium of low alloy high strength steels, (1970)
- 14) A. P. COLDREN and G. TITHER: J. Metals, 30 (1978) 4, p. 6
- 15) 国重和俊, 高橋政司, 杉沢精一, 増井淑郎: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1916
- 16) 古川 敬, 森川博文, 遠藤道雄: 鉄と鋼, 65 (1979), A 189