

解説

Review



自動車部品の材料・熱処理・表面改質技術動向

鮎谷清司*

Trends in Materials, Heat Treatment and Surface Modification of Automotive Components

Kiyoshi Funatani

Synopsis

Heat treatment and surface modification are the key technology to give optimum properties in automotive and mechanical components. And industry is paying every possible effort to implement maximum performance to their products. However, weakening research and development power became serious problems at various companies who reduced researchers and R & D spending during past decade.

In this paper, the world trends in national and industrial R & D efforts are compared to remind the basic problems lying behind the trends of competitiveness. And, considering the advancement of power train design and further car weight reduction with the impact of oil prices, some of the typical examples in Automotive materials and processing technologies are introduced to accelerate necessary R & D efforts.

1. 緒 言

世界的な人口増加と BRICS に代表される途上国の工業化の進展により、地球を取り巻く環境が変化し、自動車の製造、使用面にも厳しい要求が生れている。社会経済を持続的に発展させるためには、車の性能・安全・快適性の向上にもまして、環境適合性・省エネルギー技術が要求されている。

中国、インド、東南アジアの自動車産業の発展は同時に膨大なエネルギー消費と温暖化ガスの排出を伴う結果が予想され京都で開催されたCOP3を上回る温暖化対策が必要になるものとおもわれる。ここでは世界的な産業の状態と研究開発力の比較、自動車生産能力や市場の変化も参考にして、欧米の熱処理技術の訪問調査などを通じた自動車用材料や表面改質技術の現状と熱処理技術レベルの比較および今後の技術開発課題について解説する。

2. 主要国の産業と研究開発力の現状

2. 1 地球環境と温暖化

地球上の平均温度は年々上昇しており、この傾向が続けば海面水位の上昇による海岸線の侵食が起き、陸地の減少が懸念されているし、すでに海面の温度上昇による異常気象、台風やハリケーン数の増加と大型化による被害が各地で問題として認識されるようになっていく。

温暖化ガスの増加により引き起こされる年平均温度の上昇を Fig.1¹⁾ に示す。この主原因の一つである炭酸ガスCO₂の排出量は Fig.2 に示すように、依然としてアメリカが突出しているが、現在では中国の排出量が大きな問題になっている²⁾。今後はBRICS各国の工業化進展によりさらに深刻な温暖化傾向が予測され、世界が協力して対策を進める必要があるにもかかわらず、自国の産業振興のみに力点を置いて、協定に参加しようとししないアメリカ、中国および BRICS 諸国の姿勢が世界的な問題になってくると考えられる。

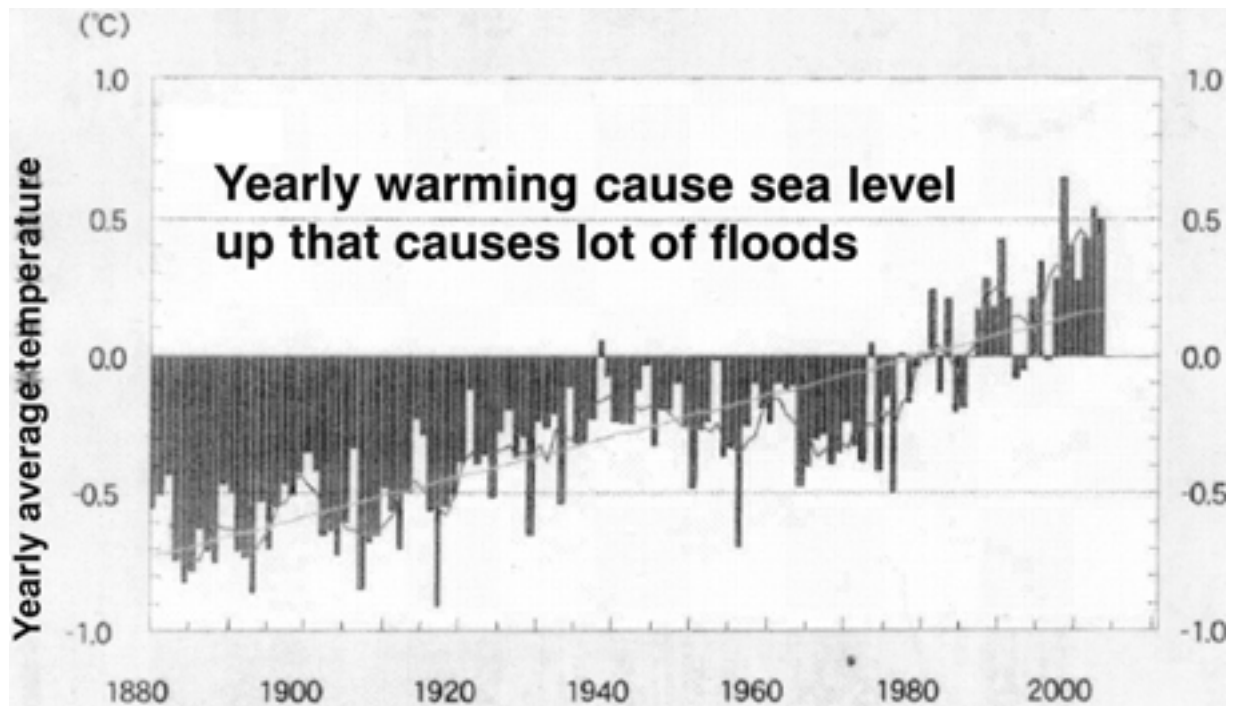


Fig.1. World yearly climate change in average temperature ¹⁾.

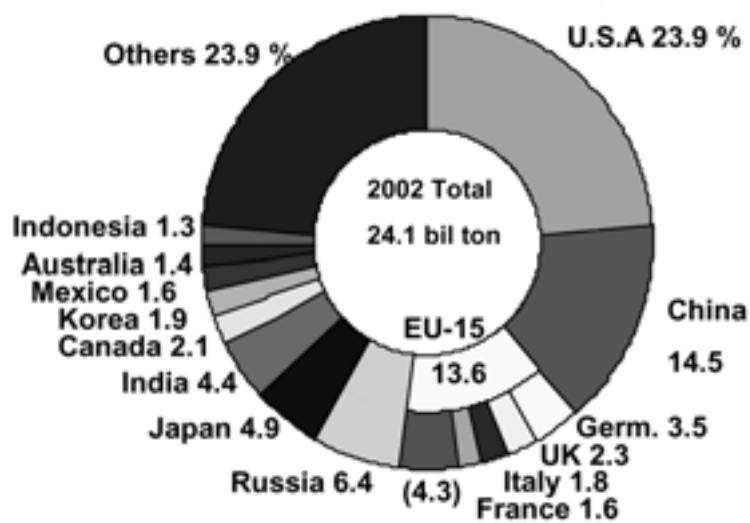


Fig.2. CO2 emission(2002) of leading countries. (Oakridge National Laboratory) ²⁾.

2. 2 主要国の研究開発と産業

研究開発費を国別で比較してみると、Fig.3 で読み取れるようにアメリカは大きな変動があったが、近年研究開発費が増大して常にトップの位置を占めている。冷戦終結後、研究開発体制が大きく変化し、かつては防衛省 (DoD - Department of Defense) が 8 ないし 9 割を抑えていたが、そ

の後エネルギー省 (DoE - Department of Energy) が産業強化施策として研究開発の中心となり国の研究開発費の約 8 割を産業強化のために使用している。

欧州は国別では日本を下回るが、EU で総合するとアメリカについて 2 位のレベルにある。

わが国の研究開発費は着実に増加傾向を示しており、

日、米、欧の三極評価を見ると、Table 1 に示すように、金額としてはもっとも低いが、特許取得数と率ではトップを占めている。これは、国費による研究開発費と産業努力との比率が日本では産業が8割を占めるのに対して、欧米では前者の比率が高く、また、防衛関係にかなりの研究開発費が投入されている。したがって、研究開発投資の回収・効率の点では、日本の産業界は有利な立場にあり、しかも自主努力の成果をあげてきた。

最近の世界の技術開発力の変化には注目する必要がある。今年の科学技術白書で触れているように、今まで注目されていなかった中国の研究開発力は、国費による修士・博士の育成努力が効果を挙げてきている上に、為替価値との関係で過小評価されてきたと考えられ、実質金額では日本を超える研究開発費が投入されていることを認識する

必要がある。

自動車は数多くの国の中心産業として技術経済面でも注目されているが、産業の競争力に関する研究開発費の状態は、Fig.4 に示すようにドイツとフランスでは自動車がトップの位置にあり、かつては圧倒的なトップを占めていたアメリカは自動車工業が第3位の位置に低下してきている。日本では電子・電気・情報機器工業がトップにあり、自動車産業とともに研究開発や経済の進展に大きな影響を与える位置にある。

主な産業の研究開発力の世界的な比較として MIT の調査によるトップ 15 社の研究開発予算を見ると、Table 2 のように自動車産業の研究開発がトップを占めており、通信・電子・電器工業と、医薬品工業の競合関係が読み取れる³⁾。金額としてアメリカの自動車会社の投資額が圧倒的に多

Table 1. State of R & D of three zones ¹⁾.

	U.S.A.		EU		Japan	
Population	2.9 × 10 ⁸	(1)	3.8 × 10 ⁸	(1.3)	1.3 × 10 ⁸	(0.45)
GDP - bill \$	11628	(1)	8531	(0.73)	4407	(0.38)
R & D - bill \$	323.9	(1)	164.6	(0.51)	147.8	(0.46)
R & D population	126 × 10 ⁶	(1)	97 × 10 ⁶	(0.77)	76 × 10 ⁶	(0.60)
Applied Patents	373.6 × 10 ⁴	(1)	317.0 × 10 ⁴	(0.84)	113.3 × 10 ⁴	(0.30)
Patent Registered	18.4 × 10 ⁴ 4.85%	(1)	20.1 × 10 ⁴ 6.34%	(1.09)	18.6 × 10 ⁴ 16.4%	(1.01)

i) Numbers in parentheses means ratio to USA.

ii) Percentage in bottom row means ratio of registered patents.

(1) IMF為替レート換算

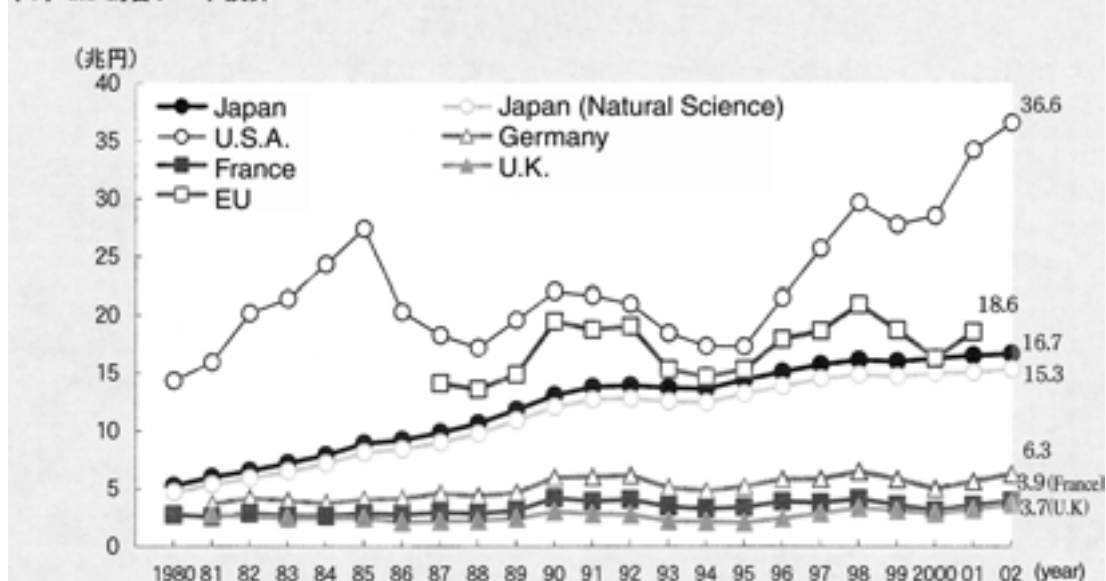
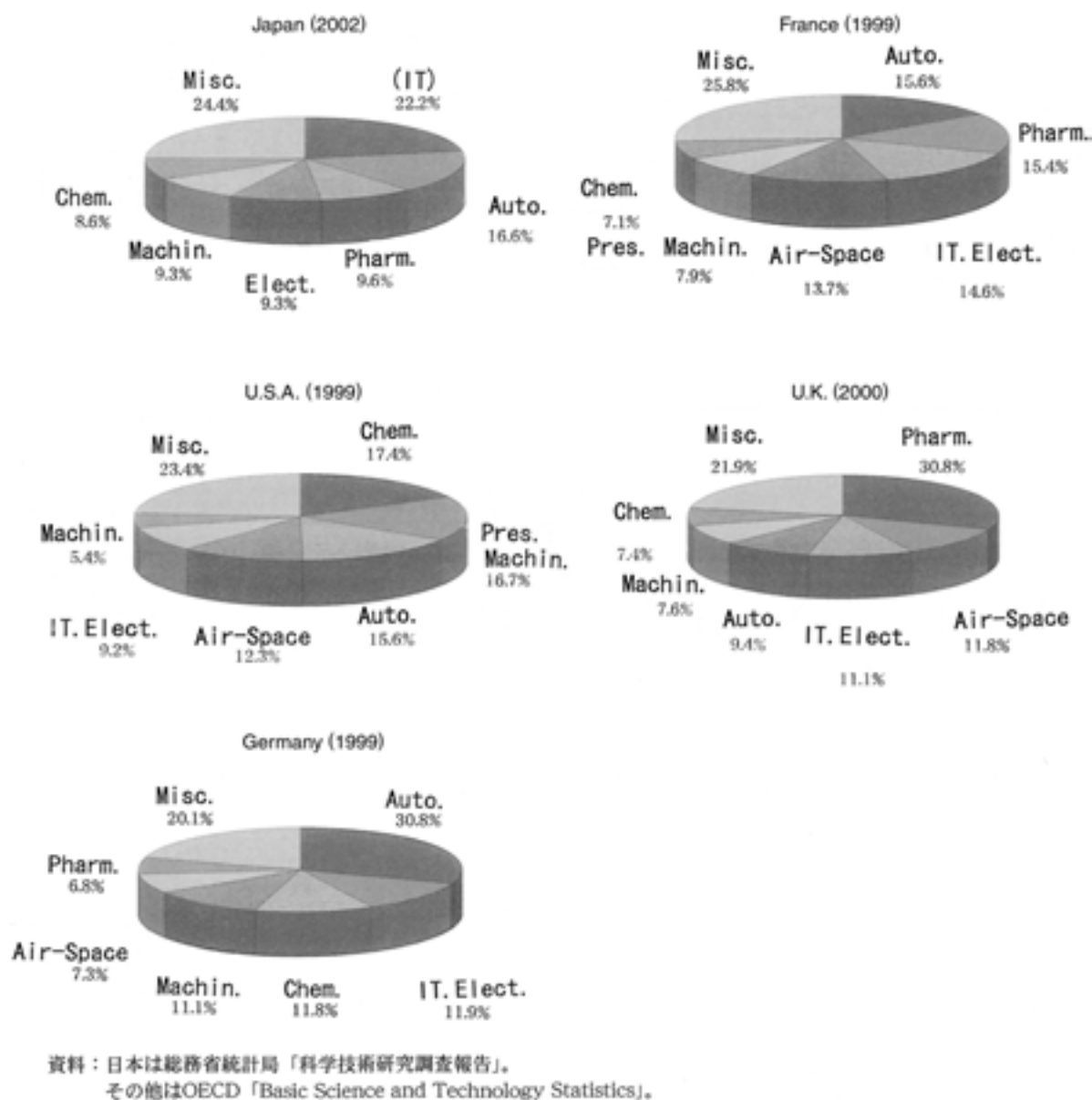


Fig.3. Total R & D expenditure of main countries (According to IMF exchange rate) ¹⁾.

Fig.4. R & D expenditure by Industry of main country ¹⁾.

いものの、年々減少する傾向があるのと、開発効率の低さが市場占拠率低下の原因になり、自動車会社の技術経営策 (MoT - Management of Technology) の劣勢が如実にあらわれている。過去のビジネスコースの教育方法に関する議論や、十数年来ビッグ3をたびたび訪問して議論して感じたことであるが、その技術陣の縦割りの構造の問題と、短期的投資回収に偏った経営戦略が明らかに誤っていることを示している。これを他山の石としないで、誤れるアメリカ式経営に惑わされず、社会貢献を通じて継続的に存在価値を実現できる経営を重視すべきであろう。

2. 3 自動車産業の現状

アメリカ市場ではビッグ3の占拠率が低下し、日本車が増加しているが、世界的に見ると一般の観測を超える大きな変化が生じている。Table 3の乗用車の生産台数を見ると、トヨタがトップになっているが、2位には韓国の現代自動車が付けており⁴⁾、ドイツのV. ワーゲンや、フランスのプジョーなどにも肉薄する技術力・生産力を付けてきた点を見落としてはならない。長年の輸入車制限で守られてきた韓国の市場とはいえ、その7割を占め、さらにアメリカや欧州の市場でも認められる競争力を付けてきたことを忘れてはならない。

世界の中でアメリカの市場は特殊な構造を持ち、

SUV(Sports Utility Vehicles)の比率は1.2倍と乗用車数を上回っており⁵⁾、しかも、大排気量のエンジンを搭載している車が多く、CO₂排出量の増加に高い寄与率を持っているという問題を解決する取組が望まれる。

長年世界をリードしてきたアメリカの技術は、宇宙・防衛分野ではまだ確保されているものの、一般製造産業では競争力の低下が著しい。これは短期利益追求型の経営や弁護士依存型の防衛策などに偏ったマネージメントコース教育の欠点として、二十年前から述べてきたことである。

さらに、研究開発費や研究陣容の縮小策を進め始めた近年はその実力低下が著しく、国際会議などにおける発表内容でもきわめて憂うべき様相を示している。

現在、国内の経営問題や業界の再編成の面でも企業理念のない、短期利益追求型の経営施策は長期にわたる競争力の維持が不可能であることを示しているといえよう。

日本の技術競争力の点では、戦後技術導入を続けてきた歴史から抜け出し、約15年前から技術輸出が輸入を上回り始め、特に自動車技術ではTable 4のようにアメリカを

Table 2. World top 15 R & D budget ³⁾.

Company	Cuntry	R & D 2003 \$ mil	R & D change	Absolute Change \$ mil.
Ford Motor	United Stated-1	\$ 7500	-3%	\$- 200
Pfizer	United Stated-2	\$ 7131	38%	\$ 1955
Daimler Chrysler	Germany-1	\$ 6689	-8%	\$- 600
Toyota Motor	Japan-1	\$ 6210	2%	\$ 97
Siemens	Germany-2	\$ 6084	-13%	\$- 903
General Motors	Unites States-3	\$ 5700	-2%	\$- 100
Matsushita Electric	Japan-2	\$ 5272	5%	\$ 257
IBM	United States-4	\$ 5068	7%	\$ 318
Glaxosmithkline	United Kingdom-1	\$ 4910	-4%	\$- 192
Johnson and Johnson	United States-5	\$ 4684	18%	\$ 727
Sony	Japan-3	\$ 4683	16%	\$ 649
Microsoft	United States-6	\$ 4659	8%	\$ 352
Nokia	Finland-1	\$ 4514	23%	\$ 850
Intel	United States-7	\$ 4360	8%	\$ 326
Volkswagen	Germany-3	\$ 4233	22%	\$ 762

Table 3. World top 12 passenger car production ⁴⁾ (Association of Automotive Industry).

Rank in 2003	Rank in 2002	Maker	Country	2003	2002	03/02(%)
1	1	Toyota	Japan	3,082,044	3,070,450	100.4
2	2	Hyundai	Korea	2,119,163	2,119,051	100.0
3	4	VW group	Germany	1,830,422	1,797,527	101.8
4	3	PSA	France	1,806,391	1,883,293	95.7
5	5	GM	USA	1,385,045	1,672,987	82.8
6	7	Nissan	Japan	1,242,481	1,192,770	104.2
7	6	Honda	Japan	1,117,120	1,328,640	84.1
8	8	Renault	France	1,076,945	1,125,355	95.7
9	11	Benz	Germany	983,365	979,237	100.4
10	10	Fiat group	Italy	963,380	1,066,191	90.4
11	12	Opal	Germany	848,030	868,752	97.6
12	9	Ford	USA	821,680	1,072,389	76.6

Table 4. Patent trade balance in Automotive technology ¹⁾.

	a) Tech. Export	b) Tech. Import	a - b
U.S.A	4189	56	4134
U.K.	424	8	416
Thailand	386	-	386
Taiwan	155	-	155
China	120	0	120
Korea	60	2	57
Others	2348	36	2312
Total	7682	102	7580

含むすべての国に対して輸出 / 輸入がプラスになっている。すなわち、継続的な技術開発投資と開発効率の追求が国際的な競争力の維持・向上にきわめて重要であることが実証されたといえることができる。

3. 材料・熱処理・表面改質技術

3. 1 欧米の概況

工業用材料、熱処理、表面改質の面では、アメリカに比べて欧州の歴史的な強さが目立ち、新技術開発の面でも、欧州に注目すべき状態になっている。特にドイツの AWT: Arbeitsgemeinschaft Waermebehandlung und Werkstofftechnik は HTM: Haertereitechnische Mitteilungen に掲載する研究論文を中心に材料・熱処理技術の面でもずばぬけた実績を示しており、材料熱処理分野では必見の技術資料である。

我が国の競争力は、欧米から導入した技術を身につけ、実際の「ものづくり」の点で地に足の着いた人づくりの上に種々の改良努力を積み重ねてきたことが製造品質面で優れた強さになっていることを忘れず、世界的な競争力維持につとめなくてはならない。

一方では、学術研究分野を見ると、学内紛争以来の産学の乖離で長年、「ものづくり」につながった材料技術から離れた研究が中心になってきた問題は、かなり回復傾向になりつつあるが基本的にはいまだに、解決されていない。その間、技術開発の中心は産業界の自主努力で現在の実力が確立されたとしても、今後の研究開発力と技術力の進歩

を図るには、もう一度科学的理解力をベースにした技術立国を実現できる研究開発体制の整備が必要であり、その意味で欧州の研究体制の現状に注目する必要がある。

3. 2 国際会議の傾向

国際会議の傾向として、アメリカの ASM (元 American Society for Metals, 現 ASM International) を中心とする会議では学術的に評価される発表が激減している。逆に、欧州では歴史的な背景を持った数多くの大学や研究所があり、しかも欧州共同体の研究開発プログラムとも連携する国境をこえた共同研究が実績をもっている。たとえば、浸炭焼入れ、窒化・軟窒化などの表面硬化技術でも種々の優れた研究が多いし、真空浸炭・加圧ガス焼入れ、あるいは、イオン・プラズマ熱処理でも、そのほとんどが欧州発の状態である。

国際的には毎年の年次大会と展示会で大勢の参加者を集めていた ASM 主導から、欧州中心の国際熱処理・表面技術連盟 IFHTSE- [International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering] に転換されていて、欧州のみならず中国まで含め種々の国際会議を主催あるいは共催している。これらの国際会議は、欧州では各国の学会が受け皿になって得意な分野の会議を開くことが多く、アメリカ一国ではなく、数多くの国の参加があり、技術交流がはかられている。参考に、IFHTSE の国際会議とシンポジウムの実績と会議予定を Table 5 に示す。

日本における研究は材料分野が強いが、今ひとつ「詰

Table 5. Past and future Congress and Symposium organized by IFHTSE.

第 1 回～ 第 10 回	Congress	ポーランド・ワルシャワ, イタリア・フィレンツェ, 中国・上海, ドイツ・ベルリン, ハンガリー・ブダペスト, アメリカ・シカゴ, ロシア・モスクー, 日本・京都, フランス・ニース, イギリス・ブライトン.
1998 年	第 11 回	Congress イタリア・フィレンツェ
1999 年	第 7 回	Seminar 韓国・慶州
2000 年	第 12 回	Congress オーストラリア・メルボルン
2001 年	第 8 回	Seminar クロアチア・カプタット
2002 年	第 13 回	Congress アメリカ・コロンバス
2003 年	第 1 回	自動車部品の熱処理・表面技術国際会議 タイ・バンコック
	第 2 回	熱プロセスモデリング国際会議 フランス・ナンシー
	第 9 回	Seminar ポーランド・ワルシャワ
	第 4 回	焼入れと歪制御国際会議 中国・北京
2004 年	第 14 回	Congress 中国・上海
2005 年	第 2 回	自動車部品の熱処理・表面技術国際会議 イタリア・リバデルガルダ
	第 3 回	アジア熱処理・表面技術国際会議 韓国・慶州
今後の予定		
2006 年	第 15 回	Congress オーストリア・ウィーン
	第 3 回	熱プロセスモデリング国際会議 ハンガリー・ブダペスト
2007 年	第 16 回	Congress オーストラリア・ブリズベン
2008 年	第 17 回	Congress 日本・神戸
2010 年	第 18 回	Congress ブラジル, リオデジャネイロ

め」が甘く、原理に遡る基本的な研究姿勢が不足している。幸い、国のプロジェクトで進めてきた鉄鋼など、いくつかのテーマで成果を出してきたことは大きな救いであり、さらなる強化を望みたい。

4. 自動車用材料・熱処理・表面改質

自動車の燃料消費率の向上には車両の軽量化が不可欠であり、第一次のオイルショック以来長年にわたる軽量化努力が続けられてきた。その中心は、車体重量の低減に端を発し、その他の構成部品の軽量化が進められ、低比重材料の採用、部品の一体化などあらゆる可能性が追求されてきた。しかし、Table 6 に示したように、車体の軽量化が進んでも種々の計装部品増加により、車の重量は増加している。

軽量化を図るためにアルミや樹脂の使用量が増加し、鉄鋼材料の中では鋳鉄の減少が顕著である。鋼板の量は減少しているが、高強度化により最も高い貢献をしている。今後も低比重材料への転換が進む傾向は否めないが、強度、衝突・安全、騒音・振動の対策と資源リサイクルなどの要求にこたえるために、より複合的な技術の開発が必要になるとおもわれる。

4. 1 鋼板の高強度化

鋼板はベークハードニング鋼板をはじめとして、薄板・高強度化技術の進歩によりボディの軽量化に貢献してきたが、さらに、「超軽量全鋼板車体 (ULSAB - Ultra Light Steel Auto Body)」の開発プログラムの中では、材料強度レベルで 1470 MPa のウルトラハイテン鋼板が使用されるなど軽量化には不可欠な材料である⁶⁾。しかし、このような高強度化の延長線では充足が難しい高強度化ニーズに対しては、ホットフォーミングや部分熱処理など技術採用が必要となっている^{7), 8)}。

4. 2 構造用鋼

特殊鋼はエンジンおよびパワートレインを中心にした

強度部品に使用されていて、その使用比率が高まる傾向を示しており、年々高出力化されるエンジンに対応して鋼材部品の冶金学的な高強度化技術による対応が実績を上げてきた。今後も同様な傾向が続くものと思われ、引き続いて熱処理技術の進歩向上に適合できる鋼種開発や、微細粒・高強度組織材の実用化、残留応力付与などによる更なる高強度化技術の汎用化が必要になってきている。この目的を満たすためには、後述する熱処理技術の改良のみならず、最適鋼種の開発ならびに、前後の関連工程を総合化した材料技術開発が必要である⁸⁾。

4. 2. 1 歯車用鋼

浸炭・浸炭窒化用の鋼種は従来熱処理技術面では一応のニーズは満たしているが、新しい熱処理技術の進歩に伴い、高濃度浸炭や、低・定歪み熱処理化とこれに関連して浸炭焼入れから窒化処理への転換などが進むものと思われる。高面圧・長寿命化のニーズを満足する新鋼種、さらに、高温度浸炭における結晶粒成長抑制や浸炭あるいは窒化速度の向上を目的とした鋼種の開発が望まれていて、すでに特殊鋼メーカーと特定ユーザーの間で、この種の鋼材が一部で流通し始めている動きに注目すべきであろう。

減圧浸炭・加圧ガス焼入れの実用化が進んでいる欧州では、これに適した鋼種開発例が見られるように、これらのニーズに対応できる鋼材の改良・開発が不可欠である^{9)~11)}。

4. 2. 2 耐熱鋼

エンジン出力の向上やチタン材料との競合が進むエンジン部品でも、排気バルブをはじめとして、高強度・性能で軽量な弁類の製造を実現するための鋼材開発が継続されている。窒化処理などの表面硬化プロセス技術との組合せを考えた開発に取り組む必要がある⁸⁾。

4. 2. 3 減圧（真空・高温度）浸炭用鋼

高温度浸炭などにおける「結晶粒度の粗大化抑制」技術が研究され始めてから数十年を経ており、Nb, Ti, V, Al などの添加による制御技術が進んでいる。さらに、温度と時間の限界をさらに拡大する材料技術の要求があり、逆に、

Table 6. Past change of materials in Toyota Mark II.

年度	鉄鋼 (%)	鋼板 (%)	条 鋼 (%)	鋳 鉄 (%)	非 鉄 (%)	樹 脂 (%)	ゴ ム (%)	無機材 (%)	雑 材 (%)	重量 (kg)
1968	75.0	46.9	14.3	13.8	6.0	3.6	5.0	3.0	3.6	1020
1978	75.7	44.1	20.2	11.4	7.8	5.0	5.6	2.4	2.4	1144
1988	73.7	42.5	20.8	10.4	7.2	7.1	3.9	2.6	2.6	1300
1992	71.7	37.5	23.9	10.3	9.2	7.5	4.2	3.1	3.1	1290
1996	69.8	35.5	23.7	10.2	10.4	9.2	4.1	2.9	2.9	1313
2000	68.7	36.6	23.9	8.2	10.6	9.0	5.1	2.6	2.6	1371
2000 / 1978	— 0.908	— 0.830	1.183 —	— 0.719	1.359 —	1.800 —	— 1.911	1.083 —	1.206 —	1.198 —

「表面硬化処理時間の短縮」を可能にするために、炭素や窒素の「拡散速度を向上」を実現する RE(Rare Earth) を用いた合金設計など適用面からのニーズはさらに高度化している^{12) ~ 17)}。一方、高濃度浸炭やこれに伴う炭化物の粒状化処理技術との組合せで適切な鋼種の開発が望まれている。

真空浸炭と「加圧ガス冷却」の組合せが実用されているが、油に比較して非常に低い冷却能力を補うには、圧力を高くする方法と、鋼材の焼入性を高める方法のいずれかが必要であり、欧州の共同研究の結果、Fig.5 に示すように、従来多用されてきた 16MnCr5 では不足する焼入性を、主として炭素量を増量した鋼材「23MnCrMo5」の焼入性向上により6気圧のガス焼入れでほぼ同等の硬化深さが得られるとしている^{9), 18)}。

4. 2. 4 軟窒化・窒化用鋼

自動車のパワートレイン技術の進歩により、自動変速機化に伴う歯車設計の変化、無段変速機 (CVT - Continuously Variable Transmission) やハイブリッド駆動機構の採用など、鋼材と表面硬化技術にたいするニーズが大きく変化している。特に軽量化と騒音、振動の低減のための低歪み技術のニーズはきわめて高く、変態硬化を伴う浸炭・浸炭浸窒焼入れなどに換えて、低温度で表面硬化できる軟窒化・窒化処理への転換が進むものと考えられ、すでに新しい鋼材の採用が始まっている。今後さらに処理時間の短縮と硬化深さの増大を実現できる鋼材が要求されている。これら

のニーズに対応する希土類元素をはじめとした各種合金成分の研究が各国ですすめられ、新しい窒化用鋼が市場に流通し始めている^{19) ~ 21)}。

5. 熱処理技術

鉄鋼材料は鋼板も含めてその熱処理技術の進歩により自動車性能、耐久性、軽量化などの向上に大きな貢献を果たしてきた。過去 40 年の実績の中で培われた技術が標準として確立されてきたが、技術確立に携わった人材の定年により、製造技術のブラックボックス化が進んでいる。一方、定常化してきた熱処理技術にも基礎科学的な進歩を取り入れたレベルアップが必要になっている、など多大に問題が現出してきている。ここでは、主な熱処理技術について、現状と課題を取り上げてみる。

5. 1 浸炭・浸炭窒化技術

5. 1. 1 浸炭焼入れ

浸炭、特にガス浸炭法は歯車などの自動車部品の生産には不可欠で普遍的な熱処理技術である。しかし、その実態を見ると潜在的な課題が残されている。さらに、新しい技術として未完成な真空（低圧）浸炭・加圧ガス焼入れ技術の台頭に伴い、新技術の導入・転換に関する基本的な課題の解決が必要になっている。

ガス浸炭焼入れにおける最適制御技術・鋼材と処理温度、炭素ポテンシャル管理、表面炭素量、硬化深さ、残留応力制御などの点で最適な浸炭焼入技術が定常的に採用

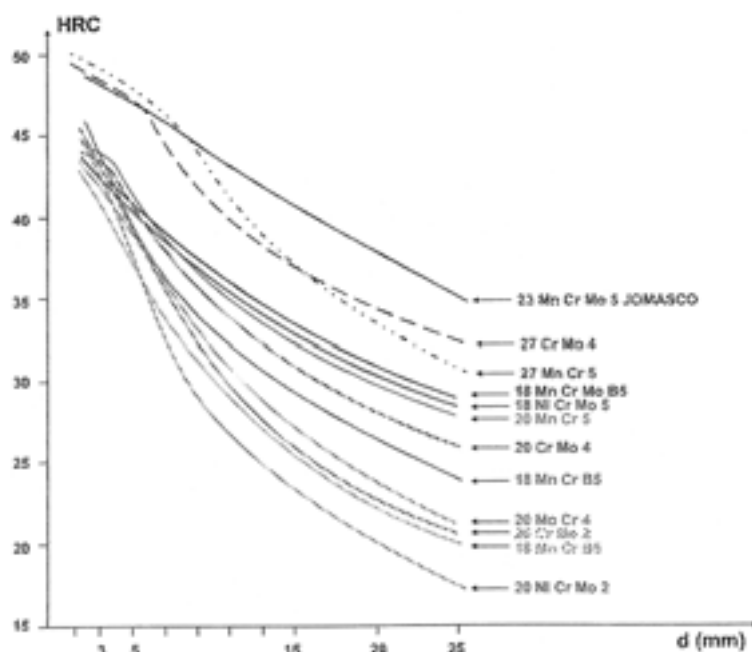


Fig.5. Comparison of Jominy curves of various case hardening steels and 23MnCrMo5¹⁸⁾.

されているところは少なく、硬さや硬化深さの不足、あるいは軟化抵抗不十分などにより、間接的に低寿命やクレームの原因になるなど、欧米でも同様な課題が残されている。

5. 1. 2 浸炭窒化・浸炭浸窒焼入れ

浸炭窒化は、当初安価な炭素鋼でも合金鋼並の性能を発揮させる熱処理法として自動車部品の熱処理に用いられてきたが、最近では Fig.6²²⁾ に示す窒素による焼入性および耐熱性向上と軟化抑制効果を活かす手法として変速機部品、特に高面圧、転動疲労寿命を必要とする部品類への採用が進むものと思われる^{23), 24)}。

5. 2 減圧（真空）浸炭技術

5. 2. 1 浸炭プロセスの制御

ガス、減圧、いずれの浸炭技術も基本的には、雰囲気炭素ポテンシャルに基づいた制御技術の確立が必要で世界的にも研究途上である。特に、真空浸炭では、ガス浸炭より速度が速いと誤った説明をされているが、真空浸炭が速度を上げているのではなく、高温処理が容易であることと、生ガスの送入により急激な炭素ポテンシャル上昇でセメントライトが生成され、これを拡散しながら表面炭素量を調節する、いわゆる「ブースト・ディフューズ」にならざるをえない訳で、原理的には炭素ポテンシャルの制御が

困難で、炭化水素ガスを on-off 供給する方式を経験的に整理している状態である。つまり、ガス浸炭に比べて極めて未完成の技術である。ガス浸炭でも同様の処理が可能なので、その比較では Fig. 7 に示すように、浸炭期の炭素ポテンシャルが拡散速度に関連して処理時間の短縮のために大切である²⁵⁾。

真空浸炭用ガスの選択の点では日本のメーカーが IPSEN 社に特許のライセンス使用権をあたえているが、この浸炭ガスの分解特性についての研究では、過去の常識的な発刊物に記載されているガス反応では不十分であり、浸炭のためのガス分解のみならず、炉内の諸条件が満足しないと自己分解や重合反応を生じることを理解した制御方法が必要である²⁶⁾。

また、浸炭の炭素ポテンシャル制御システムも未完成でトライアンドエラー式の処理条件設定の段階を出ていない。各種センサーの活用やモニターシステムの研究とあわせて減圧システムの制御を考えた研究開発が必要である²⁷⁾。

欧州ではすでに複数の多室型減圧炉が稼動し始めているが、効率的なレベルに到達していない。すなわち、減圧浸炭法の特徴を活かした、高温・短時間処理が実現されていない。また、現在使用されはじめている多室型減圧炉では、従来の連続ガス浸炭炉の単なる延長としての使用方

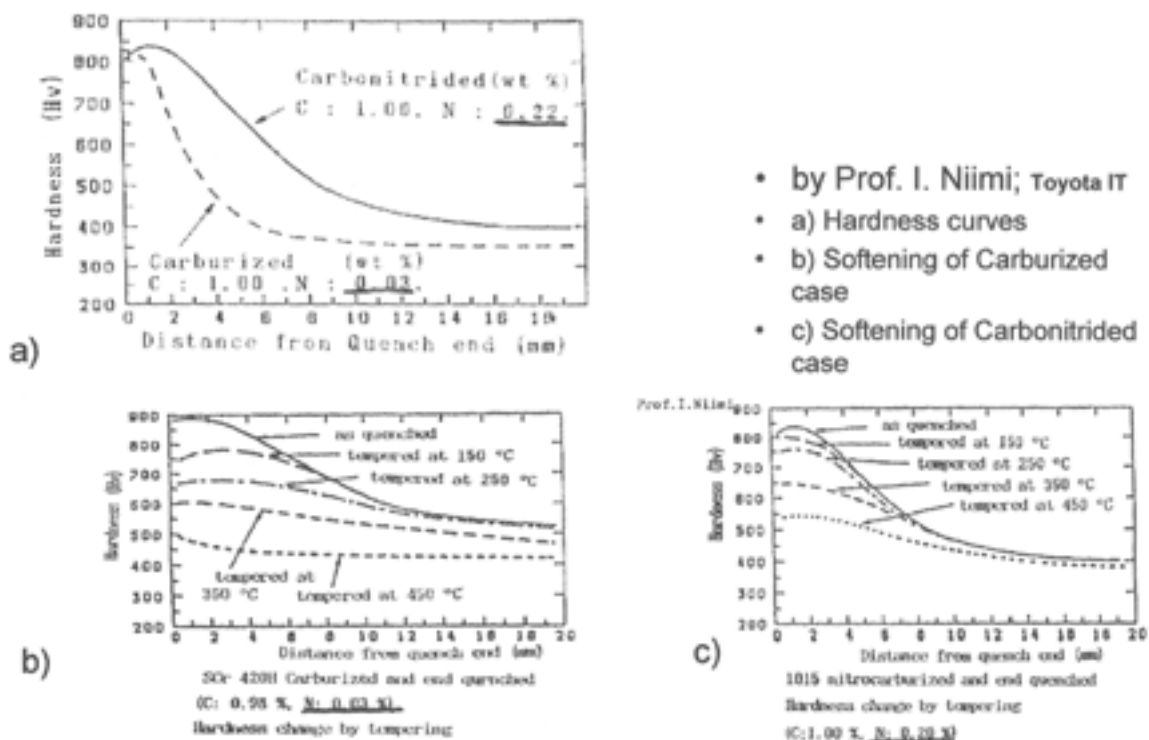


Fig.6. Hardenability and softening of carburized and Carbonitrided cases²⁴⁾.

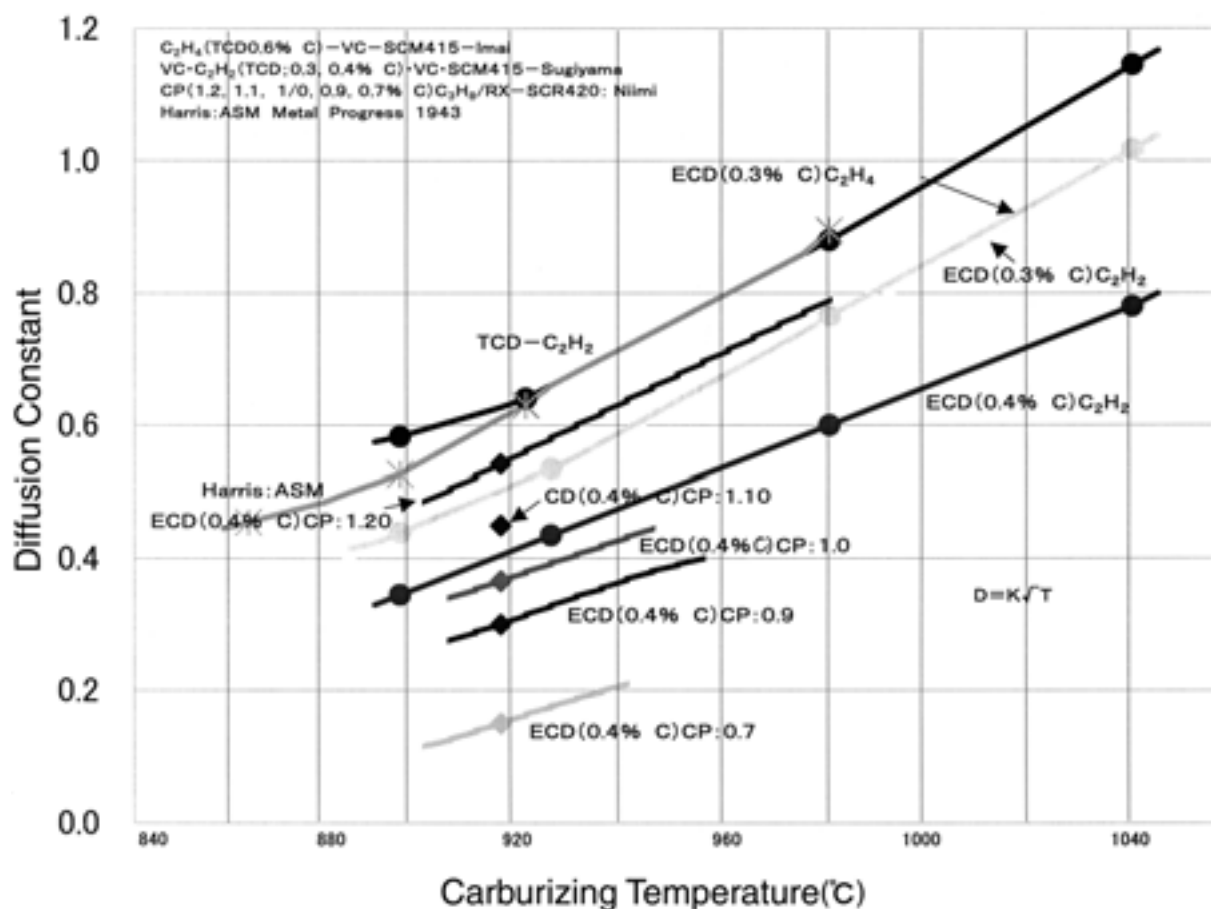


Fig.7. Diffusion constant and Carbon potential in carburizing processes ²⁵⁾.

法ではスペース効率が悪いし、熱処理部品を一箇所に集める方式は理想的ではなく、次世代の熱処理プロセス設計としての根本的な発想の転換が必要とされている。

5. 2. 2 加圧ガス焼入れ

減圧浸炭・加圧ガス焼入れが実用され始めたが、ガスの冷却能はきわめて低い、従来の冷却剤との比較を Fig. 8 に示した ²⁸⁾。冷却能が低いため従来の鋼種では硬化深さも浅くなり、芯・内部の硬さも不足するので焼入性を改良した専用の鋼材が必要となる。欧州における -NITRUVID, ASCOMETAL, IPSEN- の共同研究では、二年にわたる真空浸炭後加圧ガス冷却条件を研究した結果、6 気圧の加圧ガスでは、従来鋼種では焼入性不足で硬化深さや内部硬さが規格レベルに達しないので、最終的に炭素量や合金量を増やした鋼種が必要である結果が出ている ¹⁸⁾。わが国では安全基準との関係で 10 気圧を超える加圧ガス冷却室の保全には毎年の分解点検などの費用がかかり、高い設備投資額に加えて保全費の面でも工業的利用の障害になってい

る。

また、IWT（ドイツブレーメンの材料技術研究所）で熱処理歪み対策と合わせて、単品シャフトの加圧ガスノズル焼入法などを研究しているが、単品処理であり、従来のガス浸炭焼入れのレベルとの差はきわめて大きく量産技術としての可能性が十分であるとはいえない ^{28), 29)}。

5. 3 軟窒化・窒化技術

ガス窒化の歴史は古いが、自動車部品への展開は 1960 年頃からの塩浴軟窒化がリードして来た。それ以来、塩浴軟窒化法に基づいた数多くのデータが DEGUSSA 社から供給され、自動車部品への軟窒化の応用が拡大してきた。しかし、1970 年代には、環境衛生問題がクローズアップされるに伴い、軟窒化に使用する塩浴の毒性が障害となり、塩浴法が縮小し、ガス法への転換が進んだ。現在、ガス法による軟窒化が過半数を占めている。一方、塩浴技術も時代のニーズを捉えて改良され 1970 年には無毒のシアン酸塩をベースにした処理法が開発され徐々に転換が進

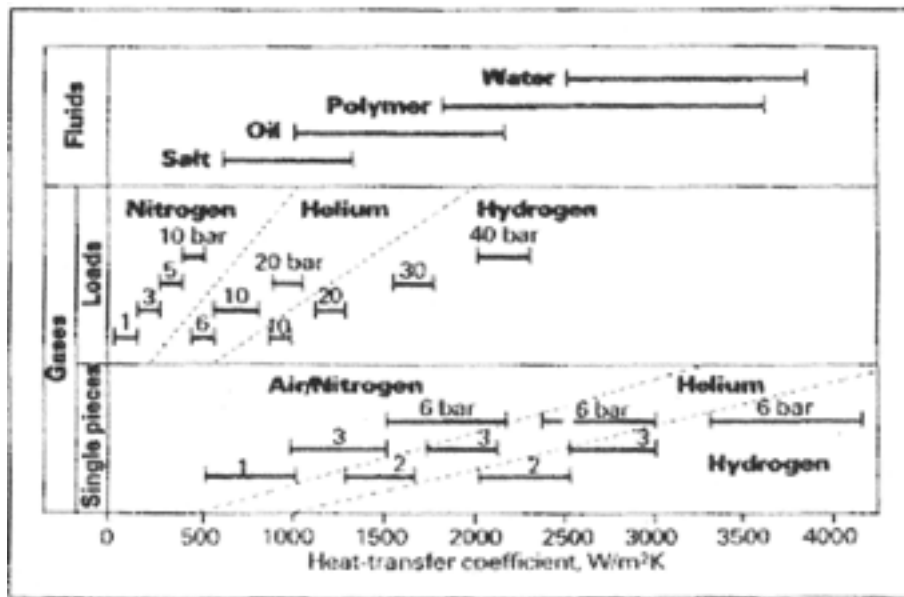


Fig.8. High pressure gas quench - bulk and single components ²⁶⁾.

められてきた。その処理技術も関連技術の改良に伴い、当初の 570℃から、580℃へ、さらに材質に応じて 480～630℃へと処理条件幅が拡大し、耐熱鋼バルブなどを含めた各種自動車部品の表面硬化に使用されている³⁰⁾。

さらに、近年の改良技術開発の結果、400℃まで処理温度の幅がひろがり、ステンレスの耐食性を失わない表面硬化処理も可能になっている^{31),32)}。競合する技術としては、欧州を中心に新しいイオン、プラズマ窒化処理が展開されているが、塩浴独自の熱容量の大きさと、処理品表面での接触表面における窒化反応の活性度が高く、Table 7, Table 8 に示したように処理効率の面で優れている点が今後再評価されるものとおもわれる³³⁾。

5. 3. 1 軟窒化・ガス窒化の生成化合物層

軟窒化あるいは窒化により生成される白色の化合物層は、薄い硝酸アルコール腐食では区別はできないが、Fig.9 に示したように、適切な腐食液を用いれば、窒化・軟窒化の過程で形成される化合物層の経時的变化を観察することができる。ガス窒化では Fe₄N(γ) 相が中心の層が生成し、窒化時間の延長とともに窒素濃度の高い Fe₂-3N(ε) 相が形成される。一方、塩浴法では初期に生成される Fe₃C(θ) 相の窒素固溶量が大きく、これに短時間で窒素が固溶されて塩浴挿入後さきわめて短時間で ε 層が生成することが解明されている^{34),35)}。一方、この化合物層の成分が耐食性や耐摩耗性にも影響を与える研究報告があることも忘れてはならない^{36),37)}。

5. 3. 2 イオン、プラズマ窒化法

減圧された窒素雰囲気炉内の製品表面で放電させることによる発熱およびイオン化効果を用いて窒化するイオン窒化法は、環境適合性の点で高い評価を受け、欧州を中心に使用例が増えている³⁸⁾。これらの放電現象を利用した窒化法は、原子炉用のステンレス管などの耐摩耗性、寿命向上する方法としてフランスではすでに実績を持ち、さらに進んだ方法として、RF(Radio Frequency) プラズマによる長尺配管の窒化にも採用されている³⁹⁾。

プラズマ窒化に不可欠な放電であるが、当初のイオン窒化法の欠点として、温度ムラ、窒化ムラ、ホローカソード現象などの問題があった。その後、外部加熱機構、プラズマ放電条件の制御など種々の改良により、進歩してきたが、さらに、その窒化機構について研究の結果、イオン化した窒素ではなく、乖離した原子状の窒素が主体となる窒化であることが解明されている³⁸⁾。今後は製品表面での放電を必要としない TC Plasma (Through Cage Plasma あるいは Active Screen Plasma とも呼ばれる) が主流になるものと思われる。

5. 3. 3 窒化・軟窒化と拡張オーステナイト組織

従来、主流であった窒化法ではほとんどの場合表面に窒化物層が生成するが、ステンレス鋼にこの窒化処理を施すと、窒化クロムの形成により表面のクロム成分が固定されて耐食性が損なわれることが知られている。そこで、窒化物層を作らず、窒素あるいは炭素の浸入のみによる表面硬化技術によりオーステナイト系ステンレスの耐食性を損

Table 7. Comparisons of various Nitriding and Nitrocarburizing processes³³⁾.

Nit, & Nitro-carb Methods	Temperature K (°C)	Steel type	Compound (μm)	Diffusion (μm)	Reference
SB Nitro-carb.	853 (580)	1045	ε -13	780	TF-1 Tenif-mitt.
SB Nitro-carb.	843 (570)	1015	ε -13	780	NS-1 Eiraku,
Gas Nitriding	843 (570)	SS 2250	γ' + ε	353	Mattison, et al
High P Gas	823 (550) × 2h	X40CrMoV5	γ' + ε (6)	85	Minarski et al
Gas Nitro-carb.	793 (520)	38CrMoAl	γ' + ε (5)	78-97	Junyi et al
Gas Nitriding	773 (500)	SAE 9254	ε + γ' (5)	49	Kondo et al
Plasma Nitriding	793 pulse 793 DC	722M24 × 12h	- - -	72	J. George
Plasma Nitriding	833 (560)	En40B × 2h	1 (γ')	100	T. Bell et al
	803 (530)	En 19 × 2h	6 (γ')	110	
	793 (520)	Nitraps × 2h	- -	46	
SB Nitro-carb.	843 (570)	SKD 61	ε (4) + CrN	150	Eiraku et al
	753 (480)	SKD 61	ε (1.5)	106	
SB Nitro-carb.	843 (570)	SCM 435	ε (4)	200	Eiraku et a
	753 (480)	SCM 435	ε - -	141	

Table 8. Efficiency of various Nitriding and Nitrocarburizing processes³³⁾.

Materials	Temperature (K)	Duration (h)	Case depth (μm)	Hour rate (μm)	Condition	References
NCF47W Maraging	GN-F(NV) 853 (580 °C)	2	50	21.1	Fluoride pretreatment	Air Water(23)
SUS 304	Gas Nit 833.	9	35	10.8	Pre-oxidation	NihonTechno S-nite PSN
	Gas Nit 833.	25	150	30	- - - - -	
YAG 250	SB Nit. 798	0.33	17.5	30.5		J. Pat Honda(3)
YAG 260	Gas Nit.753	5 +	12.5	5.6	Pre-oxidation	NihonTechn
YAG 250 Maraging	Gas NC 753 FB- NC 773	0.25 ---	(2-30) (R.S. 126 kg)	---	Rx-NH ₃ NH ₃ =1/200 NH ₃ -N ₂ -C ₃ H ₈ +CO ₂	J. Pat S59, J.Pat-H1- Toyota
Maraging	Gas Nit.753	2.5 +	30	18.9		VD
YAG Maraging	SB Nit 723.(450 °C)	1	30	30		Palsonite
Maraging	Gas Nit. 713 (440 °C)	(+ 3) (+ 6)	20 (106 kg) 85 (152 kg)	(11.5) (34.7)	[NH3=96%] [" "]	J. Pat, H7, Toyota CRL
YAG 250 Maraging	SB Nit. 713 (440 °C)	1	30	30		NP Palsonite

なわずに表面硬化する技術が開発され、今後の新しい用途開発が期待されている^{32),40)}。

最近のガス窒化技術でも、この窒化クロムを作らせない窒化技術が注目され、窒化ポテンシャルを制御して適用する鋼材の用途が必要とする性能に応じて窒化力を制御することができるようになっている^{32),40)}。

5. 3. 4 新しい窒化・軟窒化の適用部品

最近のパワートレイン部品の変化を見ると、トランスミッションの構造が大きく変化し、乗用車では手動ミッションの比率は減少し、その8割以上が自動変速機になっている。これに伴い、使用する歯車は小モジュール化が進

んでいる。また、CVT(Continuously Variable Transmission)の採用などにより使用する歯車数が減少している。このような設計の変化に伴い採用例が増大している遊星歯車機構ではさらに小モジュール化、長寿命化が顕著であり、高性能な窒化処理の開発が期待されるレベルになっている。

さらに、ハイブリッドでも変速歯車の数が減る傾向であり、これらの部品の材料や表面硬化法の見直しが必要になっている。

また、CVT用のベルトも窒化処理が必要であるが、マルエージング鋼のガス窒化についても最適の技術開発が必要であり、その他、燃料系やエンジンバルブなどでも、

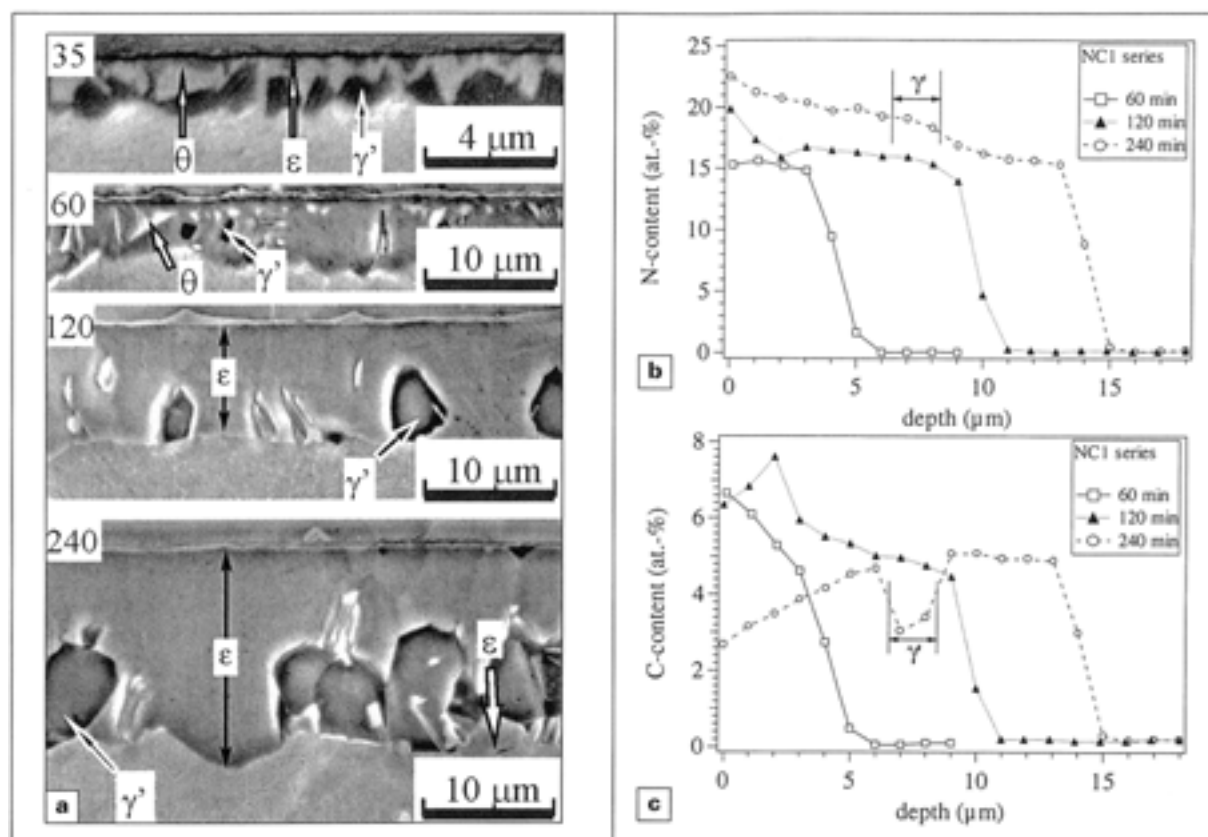


Fig.9. Micrographs of cross sections of the compound layers formed in NC1 series³⁵⁾.

耐食性を維持しながら表面硬化する技術を適用できる部品が増加している。

このような背景で自動車部品を見直すと、JIS, JASO の規格にある窒化鋼ではきわめて不十分であり、効率の良い窒化・軟窒化処理が可能な鋼種の開発が必要である。

5. 4 高周波熱処理技術と鋼材

高周波焼入れは数多くの自動車部品に利用されてきた。さらに最近ではボディー部品への部分硬化処理が採用され始めている。しかも、部分的に硬化が可能なので、非常に高い圧縮残留応力を得ることができるので、従来の応用範囲を超えた自動車部品への応用研究が必要である。

複数周波数の使用によりパターン焼入れ技術は歯車などへの応用の可能性をもっているものの、転動疲労寿命などを考えると現状のままではその用途やニーズを満たすことができない。加工過程における被切削性と両立できる鋼種の開発や切削技術の改良とあわせたアプローチが必要になっている。

また、転動疲労寿命などを考えると、雰囲気中の高温加熱で短時間に浸炭あるいは窒化する技術との複合技術の開発が望まれる。

5. 5 複合熱処理

従来用いてきた各種の表面硬化技術は、着実な進歩を上げているが、用途面で要求される性能のレベルはその技術レベルをはるかに超えるところまで来ている。したがって単一の表面硬化法のみではその要求を満たせないで、複数の熱処理、表面改質技術を採用する「複合熱処理・表面改質」を適用している例が増えている⁴¹⁾。

たとえば、浸炭焼入れと軟窒化、軟窒化と高周波焼入れ、浸炭焼入れ後の浸炭窒化との組合せなどがかなりの部品に採用されている。さらに、自動車燃費の向上を図るためには、摩擦係数の低減が極めて大切になってきており、熱処理の組合せだけではなく、表面硬化した上に、固体潤滑膜や硬質蒸着膜を付与する方法が採用されはじめている。

このように部品性能を満足させるには、強度を支える鋼材の熱処理といった単純な発想ではなく、自動車部品として必要とされる性能を、鋼材から成型、加工、表面改質の全プロセスを総合的にみて、「省工程、省エネルギーで安定に最適品質を作りこむ」という考え方で、鋼材メーカーと部品メーカーの密接な協力関係の確立と情報交換が不可欠になっている。

6. あとがき

国際的な競争をリードできる自動車部品の「ものづくり」には、過去の技術をベースにした上で科学的・技術的に基本を大切に、必要性能を無駄なく、無理なく安定につくりこんでいくための基礎技術の維持、向上を図る必要がある。さらに、自動車の性能が向上するに伴い、強度・寿命を支える部品に用いられている特殊鋼に期待される性能はますます厳しいものになってくる。

このような背景を考え、世界的な競争を勝ち抜いていくためには、ユーザーニーズを十分に満たすため、自動車サイドと鋼材メーカー間で、より深い情報交換と研究開発面での協力が必要である。過去のテーマにとらわれず現在から未来への技術展望をしっかりと捉えた協力関係の確立が望まれる。

(文 献)

- 1) 科学技術白書平成16年度版, 21, 137, 138, 141, 143, 155, 200.
- 2) エネルギー・経済統計要覧版より中日新聞2005.12.11.
- 3) Technology Review Dec.2004, 62.
- 4) 日本自動車工業会資料, 2004年.
- 5) 日経産業新聞2005年1月18日, 日本自動車工業会資料.
- 6) 吉武昭英, 山崎雄司, 占部敏明. 自動車技術会材料フォーラム20044497.
- 7) 荻野恵司, 自動車部品の熱処理国際会議 タイ・バンコック 2003.1.
- 8) 小嶋啓達: 自動車技術会材料フォーラム 20044499.
- 9) B. Lefever: Proc. Proc. AIM2005 Heat treatment and Surface engineering of automotive applications, 2005.6.
- 10) 荻野恵司, 藤原康之: 日熱技 中部総会講演 H15.11. 1.
- 11) 渡辺陽一: 第57回日本熱処理技術協会講演大会概要集 (2003), 61.
- 12) P. Stratton and E. K. Chang: Proc. 12th Congress IFHTSE (2000), 201.
- 13) M. Yan, J. Yan, Z. Liu: IFHTSE 2000, Shanghai Jiatong Univ. E-5,1, 310.
- 14) W. Junyi, P. Lin, Z. Hui: Proc. Asian Conf. HT of Materials(1998),57.
- 15) L. Hu, X. Wang, Y. Wei, Y. Wang and Y. Huang: IFHTSE 2000, Shanghai Jiatong Univ. E-5, 1, 68.
- 16) J. Xiong, D. Yin, Y. Zhang, X. Jjiang: IFHTSE 2000, Shanghai Jiatong Univ. E-5,1, 86.
- 17) M. Yan and Z. Lu: IFHTSE 2000, Shanghai Jiatong Univ. E-5,1, 120.
- 18) J. P. Lebrun, L. Poirier, C. Pichard, D. Forest and P. Cazenave: ATTT 2000, 1st European Congress. Heat Treatment Surface Mechanical Treatment.
- 19) 柴田伸也: 月刊トライボロジー1993.4, 10.
- 20) 荻野恵司: 熱処理 42, 4, 234.
- 21) 渡辺陽一: 鋼の表面硬化・表面改質技術に関する講習会2005.2.10.
- 22) 新美格: 豊田工業大学講義資料 1990.11, 2.
- 23) 渡辺陽一: 第57回日本熱処理技術協会講演大会概要集 (2003), 61.
- 24) 磯谷武史, 伊藤隆彦: 自動車技術会 9932386.
- 25) K. Funatani: Proc. 8th Seminar IFHTSE 2001.9.193.
- 26) W. Graefen: HTM 58, (2003),5, 235.
- 27) B. Edenhofer: Heat Treatment of Metals 26, 1(1999), 5.
- 28) B. Edenhofer: HTM 56(2001), 1,14.
- 29) F. T. Hoffmann, T. Luebben, P. Mayr : Heat Treatment of Metals 1999.1, 26, 63.
- 30) M. Higashi, K. Shinkawa & K. Kurosawa: Stainless Steel 2000, 407.
- 31) J. R. Eastarday, : NITREX Nitriding Symposium, May 2005 1.
- 32) M. A. J. Somers: NITREX Symposium, 2005,5.26.
- 33) K. Funatani: NITREX Symposium, 2005.5.26.
- 34) M. A. J. Somers and E. J. Mittemeijer: MS Forum V. 102-104 (1992), 223.
- 35) M. A. J. Somers: Heat Treatment of Metals 2000.4, 92.
- 36) Degussa Duferrit 資料 6937.
- 37) C. Razim, U. Rodrian: (ZWT 1299), HTM 40(1985),4.
- 38) J. George: Proc. 12 Congress of IFHTSE, V1, 229.
- 39) O. Pacheco, D. Hertz, J. P. Lebrun, H. Michel: Proc. 2nd IC on Carburizing and Nitriding ASM 1995, 269.
- 40) Christiansen and M. A. J. Somers: HTM 60(2005) 4, 207.
- 41) 鮎谷清司: 熱処理, 24 (1984), 5, 246.