

補強・シート部品用高強度鋼板 衝突安全性を飛躍的に高めることが可能な超高強度鋼板

Ultra High-Strength Steel Sheets for Bodies, Reinforcement Parts and Seat Frame Parts of Automobile —Ultra High-Strength Steel Sheets Leading to Great Improvement in Crashworthiness—

妻鹿 哲也 MEGA Tetsuya JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員(課長)
長谷川浩平 HASEGAWA Kohei JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員(課長)
川邊 英尚 KAWABE Hidetaka JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員(副課長)

要旨

JFE スチールは、車体構造部材あるいはシート骨格部材に適用して、軽量化と衝突安全性の飛躍的向上を図ることが可能な、優れた成形性、溶接性と材質安定性を有する TS780-1 470 MPa 級超高強度鋼板を開発し、商品化した。厳しい加工性要求に対しては、組織形態の変化および成形時の微小な亀裂の伝播を、基礎的かつ詳細に検討し、低 C 当量成分設計で従来よりも伸びと伸びフランジ性を著しく向上させた。特に、今後、適用の拡大が予想される TS980 MPa 級鋼板では、部材の適用部位、接合方法に応じた機械的特性バランスを 3 タイプに作り分けた製品をラインアップし、すでにユーザーの高い評価を得ている。

Abstract:

JFE Steel has developed and commercialized from TS780 to 1 470 MPa grade cold-rolled ultra high-strength steel sheets with excellent press-formability, spot-weldability and stability of mechanical properties, which lead to great improvement in the performance of safety in impacts, ultimate increase in fuel economy by applying to bodies and reinforcement of parts and seat frame parts of an automobile. In TS980 MPa grade steels, there are line-ups of 3 types of steels with different features of mechanical properties corresponding to the requirements of various automotive parts. In this paper, 2 types of TS980 MPa grade cold rolled steel sheets are mainly described, the one applied to mechanical joining and the other with excellent stretch-flange formability. Surface cracking at mechanical joining, which is strongly related to local formability, has been suppressed by attaining the single martensite phase.

1. 緒言

近年、乗員の安全性向上を達成させるため、自動車車体に対する要求が厳しくなる一方で、地球温暖化の原因となる CO₂ 排出の削減のための燃費向上の目的から、車体軽量化の要求も高まっている。このような要求に対し、鋼板の高強度化による部材の強度向上によって達成される薄肉化による軽量化を目的として、自動車車体への高強度鋼板の適用が増加している。

1990 年までは、このような衝突安全性の向上と軽量化の観点から、従来の軟鋼板に代えて、TS440-590 MPa 級の高強度鋼板の車体構造部品への適用が検討された。本鋼板は、プレス成形の困難さや溶接性、耐食性などの課題

を克服すべく改善がなされ、フロントサイドメンバーなどの衝突時に変形してエネルギーを吸収する前面衝突部材として重要な役割を果たしている。

1990 年代に入り、TS780 MPa 級以上の超高強度鋼板の検討が進められた。このような超高強度鋼板は従来、バンパー補強材、ドアインパクトビームなどのキャビン周りから離れた安全補強部品に適用されていたが、安全性と軽量化の厳しい要求から、ピラーおよびその補強部材などにその範囲が拡大されてきている。このような傾向は 1994 年から開始された世界 15 ヶ国 32 鉄鋼メーカーが共同で実施した ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) プロジェクトにおいても明確に示されており、自動車用構造部材のこれからの方向性と解釈できる¹⁾。

また、乗用車のシートにおいても、乗員の安全性向上を

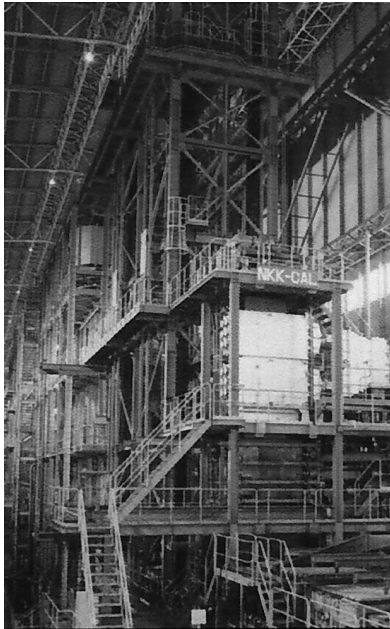


Photo 1 West Japan Works No. 3 continuous annealing line (WQ-CAL)

目的として、シート自身で衝突時の衝撃を支えて乗員を保護するような構造がとられるようになり、シート本体の強度と軽量化の両立が求められ、シート骨格部材への TS980 MPa 級冷間圧延鋼板の適用が増加している。

これに対して、JFE スチールでは、自動車市場が求める多様なニーズに応えるべく、世界をリードする自動車用鋼板の商品開発を進めてきた^{2,3)}。その中で、低合金成分で広範囲の強度 (TS780-1 470 MPa) と優れた材質が安定して得られる Photo 1 で示される水冷 (WQ) 機能を有する連続焼鈍設備 (CAL) を最大限活用し、上述した要求に対応した高成形性超高強度鋼板を商品化した⁴⁾。

本論文では、自動車車体のさらなる軽量化と衝突安全性を飛躍的に高めることのできる JFE スチールの TS780-1 470 MPa 級冷間圧延鋼板を紹介し、特に最近、車体構造部材およびシート部品に適用が拡大している TS980 MPa 級鋼板を中心に材料設計の基本的考え方と特性について概説する。

2. 超高強度冷間圧延鋼板の開発コンセプト

JFE スチールでは、独自開発した世界最高速 (1 000 /s 超) の冷却能力を有する WQ-CAL を活用することで TS780 MPa 級から 1 470 MPa 級までの超高強度冷間圧延鋼板の商品化に成功した。WQ-CAL により製造される鋼板は、以下の特徴を有する。

- 〔1〕幅広い強度と成形ニーズに対応できる TS780-1 470 MPa 級高成形性鋼板の品揃え
- 〔2〕低 C 当量成分設計による、優れたスポット溶接性と耐遅れ破壊特性
- 〔3〕WQ における均一冷却とフィードフォワード管理によ

る優れた材質安定性

WQ-CAL の熱サイクルを Fig. 1 に示す。焼鈍の温度条件により鋼の組織形態 (マルテンサイト単相組織、DP (dual phase) 組織) を制御することができる。さらに、DP 組織では、水焼入れ温度と焼戻し温度の適正化により、硬質第 2 相の体積分率と硬さを幅広く制御することが可能である。このような熱履歴を実現できる設備機能により、理想的な組織制御が達成され、幅広い強度と用途に応じた材質の作り分け技術が確立された (Table 1)。

また、WQ-CAL を活用することで、C をはじめとする添加元素を極限まで低減して、強度と成形性を確保すること、いわゆる低 C 当量成分設計が可能となり、超高強度鋼板で懸念される溶接部の健全性が維持できることも大きな特徴である。Fig. 2 に、スポット溶接部の十字引張特性に及ぼす添加元素の影響を示す。C、P および S 量の増加は、溶接部の十字引張試験時のナゲット内破断を助長し、接合強度の低下をもたらす。JFE スチールでは TS780 MPa を超えた超高強度鋼板においても破断がナゲット内で起こる形態を維持するため、C 当量を Fig. 2 に示される限界線範囲内 ($C_{eq} \leq 0.23$) に厳格管理した材料設計を行い、TS1 200 MPa 以上の超高強度鋼板で懸念される腐食環境下での遅れ破壊に関する、低 C 当量成分設計と焼戻しマルテンサイト組織の炭化物形態制御により克服した⁵⁾。

また、高強度鋼板のプレス成形時に課題となるスプリングバックにともなう部品寸法精度不良に対しては、WQ-CAL の特長である、急速かつ均一な冷却制御により、コイル内での強度のバラツキを抑え、コイル長手、幅方向の強度、材質の安定が得られた。さらに、コイル間の強度バラツキについては、鋼組成を高精度に制御する製鋼技術

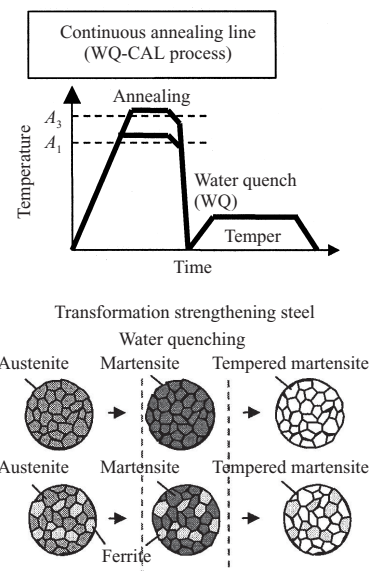


Fig. 1 Typical heat cycles of WQ-CAL, and schematic microstructures

Table 1 Line up of TS780-1 470 MPa grade cold rolled high strength steel sheets

TS grade	JFE Steel Standard	JFS Standard*1	Type	Thickness (mm)	Mechanical properties*2				C _{eq} *4 (mass%)
					YP(MPa)	TS(MPa)	El(%)	λ(%)*3	
780	JFE-CA780Y2	JSC780Y	Low YR	1.4	430	810	22	30	0.15
	JFE-CA780SF		High λ	1.2	600	830	19	80	0.12
980	JFE-CA980Y2	JSC980Y	Low YR	1.2	610	1 010	18	30	0.18
	JFE-CA980SF		High λ	1.2	740	1 020	15	60	0.18
	JFE-CA980SF2	-	Super λ	1.2	900	1 020	7	100	0.09
1 180	JFE-CA1180Y2	JSC1180Y	Low YR	1.2	950	1 210	14	30	0.23
	JFE-CA1180SF	-	High λ	1.6	1 030	1 230	7	60	0.17
1 370	JFE-CA1370	-	-	1.6	1 130	1 450	7	60	0.23
1 470	JFE-CA1470	-	-	1.6	1 200	1 510	7	60	0.23

*1 The Japan Iron and Steel Federation Standard
 *2 Tensile specimen: Transverse direction, JIS No. 5
 *3 λ: Hole expanding ratio according to JFS T 1001
 *4 Carbon equivalent for spot welding: C_{eq} = 1.5C + P + 3S

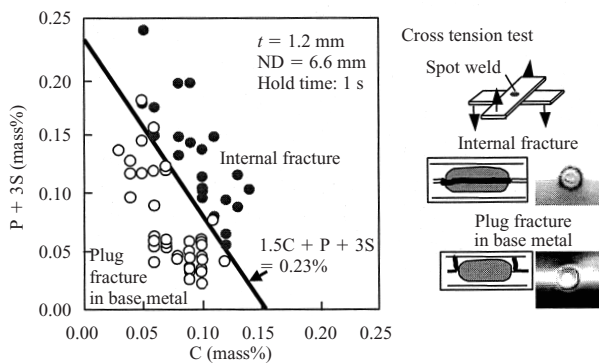


Fig. 2 Effects of C, P, and S contents on fracture type of spot-welded joint in cross tension test

と、熱間圧延から連続焼鈍に至る一貫製造プロセスでの強度変動因子の制御により、TS780-1 470 MPa 級の超高強度鋼板においても TS590 MPa 級冷間圧延鋼板と同程度までの強度変動を抑制している。

3. 最新の TS980 MPa 級超高強度冷間圧延鋼板の開発状況

3.1 車体構造（補強）部品・シート骨格部材に適した TS980 MPa 級冷間圧延鋼板

JFE スチールでは、最近の自動車用部材の幅広い要求に応じた高成形性 TS980 MPa 級冷間圧延鋼板を開発した。

部材に特有の要求特性に適応しうるように Table 2 に示す特性の異なる、低 YR (yield ratio) 型、高 λ (穴拡げ率) 型、および超高 λ 型の 3 タイプの TS980 MPa 級鋼を商品化した。低 YR 型は、YP (yield point) が低く、高延性でピラー部材などの張出し成形部材を対象とした高延性 DP 組織鋼板である。高 λ 型も DP 組織であるが、YP が高く伸びと穴拡げ性で評価される伸びフランジ成形のバランスに優れており、張出し成形部材やシート部材などに幅広く適用されている。超高 λ 型鋼板は、TS440 MPa 級冷間圧延鋼板を凌ぐ穴拡げ率を達成し、従来、軟鋼やアルミなど低強度材に限定されていた機械かしめにも適しており、自動車用シートフレームの軽量化などとともに、溶接工程の省略による部品製造コスト低減も実現し、新たな分野で適用できるようになった⁶⁾。Fig. 3 に、El-λ バランスをベースとした品種展開を示す。これら 3 タイプの TS980 MPa 級冷間圧延鋼板は、従来材に比べて、El-λ バランスが、大幅に改善されている。一般に、複合組織型高強度鋼板では全伸びを向上させると、穴拡げ率が劣化する傾向にあり両特性はトレードオフの相関関係にある。高 λ 型の TS980 MPa 級鋼板は、DP 組織をベースとし、フェライトとマルテンサイトの強度差を低減し、マルテンサイトの体積分率を適正化することによって、良好な伸びを維持しつつ、TS590 MPa 級冷間圧延鋼板と同程度の高い伸びフランジ性を維持している。これは、組織間の硬度差低減によ

Table 2 Features of mechanical properties of 3 types of TS980 MPa grade cold rolled ultra-high strength steel sheets and their application to automotive parts

Type	Mechanical properties			Applicable parts
	YP	El	λ	
Low YR	Low	High	Low	· Structural parts of body in white ex. Center pillar (Reinforcement)
High λ	Medium	Medium	Medium	· Bumper reinforcement · Seat frame, Seat rail
Extra high λ	High	Low	High	· Seat parts (Mechanical clinch)

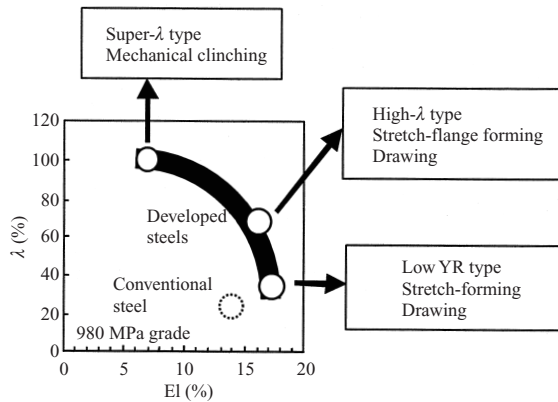


Fig. 3 Typical El-λ balance for newly developed TS980 MPa grade ultra-high strength steels

り、打ち抜き時のせん断端面近傍での初期マイクロポイド発生が抑制されるとともに、穴拡げ加工時のマイクロポイド生成と連結が抑制されたこと、フェライトの存在により、適度な延性が維持されることによるものと考えられる^{7,8)}。鋼板および部材としての高速変形時における吸収エネルギーは、TSの増加にともない増加する。一方、同じTSであっても、DP組織の鋼板は、他の強化機構をベースとする鋼板に比べて、吸収エネルギーが高いことが知られている⁹⁾。

3.2 機械接合が可能な TS980 MPa 級超高強度冷間圧延鋼板

機械接合法は、成形工程で複数の部分を同時に機械的に接合する方法で、別工程で実施する溶接工程を省略でき部品製造コスト削減効果の観点から、自動車部品へも採用され始めている¹⁰⁾。機械接合の例としてTOX社¹¹⁾のTOX接合法が広く知られている。しかしながら、機械接合法では、接合部分の加工度が高く、加工性の乏しい高強度鋼板は加工部に割れが発生し、接合強度が低下することから、軟鋼、Alなど低強度の材料に適用が制限されてきた。JFEスチールでは、高強度鋼板の機械接合における割れ発生を支配する金属組織的因子を基礎的に検討し、機械接合が可能なTS980 MPa級高強度冷間圧延鋼板を開発した。

開発鋼の材料設計コンセプトについて以下に述べる。

機械接合における高強度鋼板の割れの発生を詳細に調査したところ、引張試験の伸びとは相関がなく、切削加工穴の限界穴広げ率とよい相関があるという知見を得た⁶⁾。切削加工穴の限界穴広げ率は、(社)日本鉄鋼連盟規格穴広げ試験方法(JFST1001-1996)での穴の打ち抜き工程を切削加工により実施したもので、材料の局部延性の評価指標として知られている。したがって、機械接合での割れを改善するためには、局部延性の向上が有効であることが分かる。

割れが発生したDP組織を有する高λ型TS980 MPa級鋼板(以下DP型鋼)の割れ付近の断面加工組織を調査し

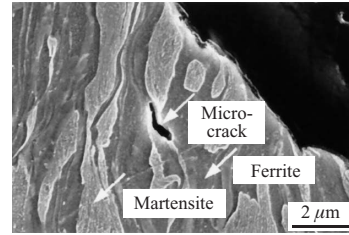


Photo 2 Cross-sectional microstructure of dual phase type steel at the mechanical joint

たところ、機械接合による割れは Photo 2 に示すようにフェライトとマルテンサイトの2相界面で生じたマイクロクラックを起点としていた。また軟らかいフェライトが硬いマルテンサイトに比べて、より展伸しており、2相の加工度の差がマイクロクラック発生の原因と考えられた。したがって、機械接合性を向上させるためには、局部延性低下の原因となるマイクロクラック発生抑制のためミクロ的にも均一な組織が最適と考え、開発鋼はマルテンサイト単相組織化によるミクロ組織の均一化を目指した。

Photo 3 に開発鋼の金属組織をDP型鋼と比較して示す。DP型鋼はフェライトとマルテンサイトが混在する組織であるのに対し、開発鋼はマルテンサイト単相である。

開発鋼の機械的特性は、Table 1 のTS980 MPa級鋼の超高λ型に示すように、穴拡げ率が100%と340-440 MPa級鋼相当の非常に良好な値を示す。

ポンチ径：5.6 mmの試験用接合金型を用いて機械接合性を評価した。Photo 4 に機械接合部のダイ側鋼板表面外観を示す。DP型鋼は割れが放射状に観察されるが、開発鋼は割れない良好な外観を示した。

Photo 5 に、板厚1.2 mmで最適な接合条件の場合と工具をそのまま板厚を1.0 mmと薄くすることで工具のクリアランスを過大にした場合の接合部断面を示す。最適

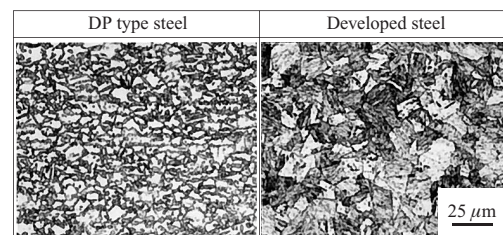


Photo 3 Optical micrographs of TS980 MPa grade steels

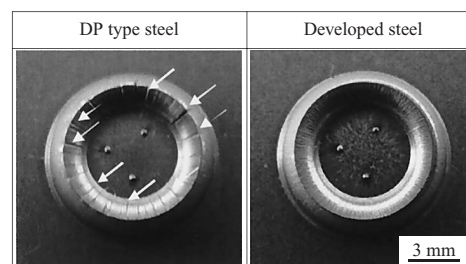


Photo 4 Surface appearance of the mechanical joint

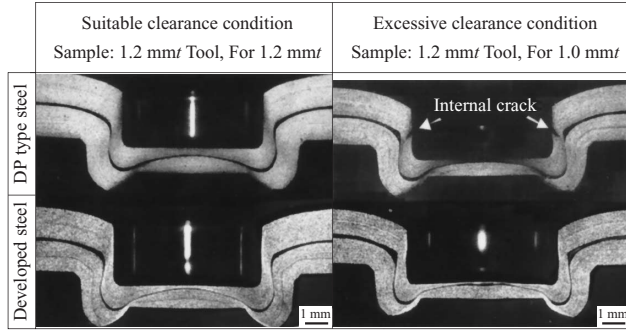


Photo 5 Cross section of mechanical joint

接合条件ではいずれの鋼板も良好な接合断面を示すが、クリアランス過大の場合、従来鋼ではポンチ側鋼板において割れが発生するが、開発鋼は良好な接合断面を維持している。実生産工程では、工具の偏心、磨耗などによりこのようなクリアランスの変動が予想される。内部割れが発生すると接合強度が低下するので¹²⁾、割れ感受性の低い材料が望ましく、開発鋼は接合強度の安定性において優位である。

スポット溶接の場合、継手の疲労強度は、ナゲット径が一定であれば材料の強度レベルによらず、1本のS-N曲線で整理されることが知られているが、機械接合部の継ぎ手の疲労強度は、高応力側の疲労強度は静的強度に対応して低いが、低応力側では、むしろスポット溶接よりも高くなる。これは、開発鋼での機械接合部が、スポット溶接より応力集中の少ないことを示すものである¹³⁾。

4. 開発鋼の適用事例の紹介

開発鋼が、自動車用シート骨格部材として適用された例をPhoto 6に示す。本シートの特長であるバックサイドフレームには、超高λ型TS980 MPa級鋼板が適用されて

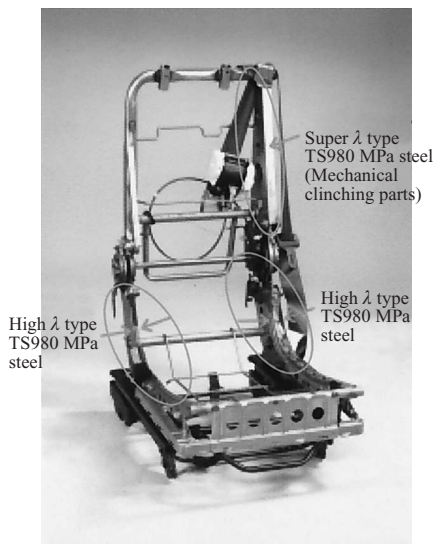


Photo 6 Automotive seat frame to which newly developed TS980 MPa steel sheets were applied



Photo 7 Applied example for center pillar reinforcement of TS980 MPa steel sheet (low YR type) (Formed by the experimental stamping tools in JFE Steel)

おり、1枚の鋼板を曲げ加工後、機械接合でBOX構造としている。また、クッションサイドフレーム部には、高λ型TS980 MPa級鋼板が適用されている。

Photo 7には、低YR型TS980 MPa級鋼板を用いてセンターピラーアウターを模した実験金型でプレス成形した結果を示す。加工の厳しい絞り成形部品への適用も十分可能である。

5. 結言

本稿では、最近開発した自動車の軽量化と衝突安全性の向上に貢献する、成形性に優れたTS980 MPa級超高強度冷間圧延鋼板の特長と適用事例を紹介した。

- 1] 開発鋼は、優れた特性と、適用される部位に合わせた特長ある材質の製品を取り揃えており、お客様にご満足いただいている。
- 2] 機械接合可能な超高λ型TS980 MPa級鋼板では、新しいシートの設計と新接合方法の採用によって、自動車の安全性向上、軽量化、低コスト化の一助となっている。
- 3] JFE スチールは、ユーザーとの協力関係を深めつつさらなる技術開発を進め、地球環境問題解決に寄与できる低燃費で、人にやさしい安全快適な自動車車体の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- 1] 吉武明英, 岩瀬耕二. Proc. of the 2000 Annual Meeting of JSAE/MMD, WS(2)-4, 2000
- 2] 実川正治, 細谷佳弘. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 36-44
- 3] 安田顕, 古君修, 清野芳一. 川崎製鉄技報. vol. 32, no. 1, 2000, p. 1-6

- 4) 関田貴司, 金藤秀司, 蓮野貞夫, 佐藤昭夫, 小川隆生, 小倉邦明
JFE 技報 . no. 2, 2003, p. 1-16
- 5) 長滝康伸, 津山青史, 細谷佳弘, 金藤秀司, 奥山健 . 日本金属学会
会報 . vol. 32, no. 4, 1993, p. 238-240
- 6) 長谷川浩平, 占部俊明, 山崎喜政, 吉武明英, 細谷佳弘 . までりあ
vol. 42, no. 1, 2003, p. 76-78
- 7) 中村展之, 占部俊明, 細谷佳弘, 海津亨 . CAMP-ISIJ . vol. 13
2000, p. 391-394
- 8) 河村健二, 長谷川浩平, 占部俊明, 細谷佳弘 . CAMP-ISIJ . vol. 15
2002, p. 1229
- 9) 清水哲雄, 比良隆明, 飯塚栄治 . 川崎製鉄技報 . vol. 32, no. 1
2000, p. 14-20
- 10) Liebig, Von Hanns Peter; Bober, Jan; Mutschler, Jorg. VDI-Z. vol. 131,
1989, p. 95.
- 11) Bnder Bleche Rohre. 2000-09, p. 54.
- 12) Hasegawa, K.; Kawamura, K.; Urabe, T.; Hosoya, Y. SAE Technical
Paper, 2001-01-3359.
- 13) たとえば, 日本鋼管 . 特開 2002-161336 .



妻鹿 哲也



長谷川浩平



川邊 英尚