

アルミニウム合金の温間成形技術

Warm Forming of Aluminum Alloys

高 田 健*
Ken TAKATA

抄 録

温間成形によるアルミニウム合金の自動車用パネルへの適用の検討を行った。温間成形により深絞り成形の向上のみならずハット曲げ成形での形状凍結性も改善することが判明した。さらに、BHFを増大させることにより、アルミニウム合金の形状凍結性は軟鋼板並みに達した。従来、温間成形には二硫化モリブデン系潤滑剤が使用されていたが、専用の潤滑油が開発された。成形速度が増大すると動的回復量は低減し深絞り性は低下する。成形シミュレーション計算には熱・構造連成解析が適した方法の一つと考えられた。

Abstract

This study examines the application of warm forming of aluminum alloys for automotive panels. Warm forming improved not only the deep-drawing formability of aluminum alloys but also their shape fixability in hat-shaped bending. With increasing BHF, the shape fixability improved further and was comparable to that of steel. Although Molybdenum disulfide have been used in warm forming so far, oil for the exclusive use of this forming is developed. The amount of dynamic recovery reduces with increasing forming rate. A coupled thermo-mechanical finite-element analysis is an efficient method that can be used for forming simulation.

1. 緒 言

近年、自動車パネル用材料として鋼板に代わりアルミニウム合金が使用され、車体の軽量化ニーズを受けてその使用量は増大する傾向にある。パネル用材料に要求される特性は主に強度と成形性である。このうち成形性に関しては、アルミニウム合金の延性は従来使用されてきた軟鋼板の延性に比べて低いことが知られている。例えば、パネル用材料への実用実績がある 5000 系アルミニウム合金の規格である A5052 合金の焼鈍材の引張試験での全伸びは 25 %であり、軟鋼板 (JAC270D) の 40 ~ 49 % に比べて極めて低い。このように成形性が劣るため、アルミニウム合金のパネルへの適用に際しては適用するパネル形状に制約を設ける必要が生じ、アルミニウム合金の自動車材料としての適用範囲は限定される。

アルミニウム合金の適用範囲拡大へ向けた成形性の改善方法として通常の冷間成形に代わる成形方法の適用が検討されてきた。高温ブロー成形はその一つであり、従来の冷間成形以上の高い延性を得るために開発された成形方法で

ある。この方法では、アルミニウム合金は加熱された後に高圧のガスを用いて張出し成形がなされる。その結果、通常の冷間成形では成形不可能な形状の成形が可能となる²⁾。なお、高温ブロー成形では汎用材に比べて Mn, Cr の添加量を調整した材料を用いることで優れた張出し成形性が得られている。同様に熱を用いる成形方法として温間成形が検討されてきた。この方法は、事前に材料を加熱せず、代わりに加熱した金型を用いる深絞り成形であり、高温ブロー成形のような高い延性 (張出し性) を得ることはできないが、汎用のアルミニウム合金を使用して、冷間成形よりも高い深絞り性を得ることが可能となる³⁾⁹⁾。

温間成形は、今まで自動車部品に対して実用化はされてはいないが、汎用の冷間プレス機を使用して実施できることから設備投資は比較的少なくすむ可能性があり、自動車部品への実用化の可能性の高い成形方法と考えられる。

本論文では、アルミニウム合金板の温間成形技術の特徴を整理し、適用への課題の検討を行う。技術整理では、温間成形方法の概要と従来の深絞り性向上以外の特徴として形状凍結性の改善について記す。実用化への課題では、

* 鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主任研究員 理博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

様々な課題がある中、専用の潤滑油の開発、成形速度の影響、成形シミュレーション計算技術の開発の検討を記す。

2. 温間成形方法

温間成形は、図1に示すようなヒーター加熱等により一定温度に加熱したダイスとしわ押さえ、および水冷などにより室温に保持したパンチを用いた深絞り成形方法である^{3,9)}。ブランクは事前に加熱されずにこれら金型に挟持され、深絞り成形がなされる。A5182合金を用いた円筒金型による深絞り成形試験では、限界絞り比(LDR)は、室温にて約2.1であるが、ダイスとしわ押さえ金型の温度上昇にしたがい上昇し250℃にて約2.8に達する⁷⁾。A5083合金においても同様に、LDRは室温では約2.1であるが、200℃にて2.8を超える値を示す⁹⁾。このように、加熱金型を用いることで深絞り性は著しく向上する。

図2はブランクをこれら金型に挟持(パンチはブランクに接触)させた時のブランク内のパンチ接触部の温度とフランジ部の温度のダイスとしわ押さえ金型温度に対する変化を示した図である。使用したパンチは一边75mmの正方形形状であり、水冷により25℃に保持した。ブランクは一边150mmの正方形であり、素材は厚さ1mmのA5182合金である。温度はブランクに埋め込んだ熱電対により計測した。パンチ接触部の温度測定位置はパンチコーナー直辺部に接するパンチ底端部であり、フランジ部の温度測定位置はブランク端部の直辺中央から中心に向かって15mmの位置であり、フランジ端部からダイス肩部のほぼ中央部である。

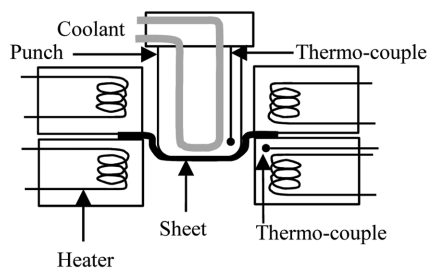


図1 温間成形装置図
Schematic illustration of warm forming

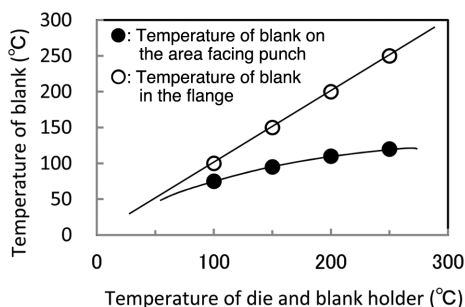


図2 ブランク温度の金型温度依存性
Temperature dependence of blank

フランジ部の温度はダイスとしわ押さえの金型温度と同じである。一方、パンチ部の温度は一定ではなく、これら金型からの伝熱により金型温度の昇温にしたがい上昇している。その上昇量はパンチによる抜熱のためフランジ部のそれよりも少ない。このように金型温度の上昇にしたがいブランク内の温度差は拡大する。この温度差の拡大にしたがいブランク内での材料特性差が拡大し、この材料特性差により高い深絞り性が得られると考えられる。

温間成形ではフランジ部は高温ゆえにその材料強度は低下し、その結果、深絞り成形での流入抵抗は低下する。大上らは高い深絞り性の発現をこのフランジ部の変形抵抗の低下と延性の増加のみとした解釈を報告している⁷⁾。中らは、ダイス端部とパンチ肩部の間の縦壁部の温度に対して単純な近似を行い、初等解析を用いてより詳細な解釈を報告している⁹⁾。いずれの解釈においても、フランジ部での流入抵抗とパンチ肩部あるいは縦壁部の応力との差の発現が高い深絞り性を発現させる。

3. 形状凍結性の改善

スプリングバック(形状凍結性)の不良低減は部品成形時の重要な課題である。最近、自動車車体への適用が増えている高強度鋼板でも形状凍結不良が課題となっており、対策技術が検討されている。例えば、縦壁部の張力を成形過程において変化させる可変ビードの採用により、690MPa級の高強度材でも390MPa材よりも優れた形状凍結性を確保することが可能である¹⁰⁾。さらに、温間成形による形状凍結性も調査されており、590MPa級の高張力鋼板では、400℃の高温で引張強度は低下し、同温度でのハット曲げ成形試験にて、その形状凍結性が440MPa材相当までに改善する¹⁰⁾。アルミニウム合金でも、温間成形温度域(100℃以上)では室温に比べて引張強度は大きく低減するため^{7,9,11)}、同様な形状凍結性の改善が温間成形においても期待される。そこで温間ハット曲げ成形試験による形状凍結性の改善の調査を、しわ押さえ力(BHF)による縦壁部の張力の影響と併せて行った。

使用したパンチ金型は肩Rが8mmの角筒金型であり、その温度は水冷により25℃に保持した。ダイスとしわ押さえ金型の温度は室温から250℃まで変化させ、各温度での形状凍結性を調査した。試料には、5.5wt%のMgを添加した5000系アルミニウム合金と軟鋼板を用いた。いずれの板厚も1mmである。計測は図3に示すハット曲げ成形品の開き幅、開き角、縦壁部の曲率半径である。

図4、図5、図6は、それぞれ、開き幅、2つの開き角、縦壁部の曲率半径の温度依存性を示したものである。図中、●と■はBHF10kNでのアルミニウム合金のハット曲げ成形品での値を示す。金型温度の上昇にしたがい、開き幅は減少し、形状凍結性が改善していることが分かる。温度上昇にしたがい2つの開き角の変化は曲率半径の変化よ

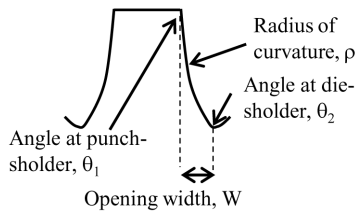


図3 ハット曲げ成形でのスプリングバック
Spring-back in hat-shaped bending

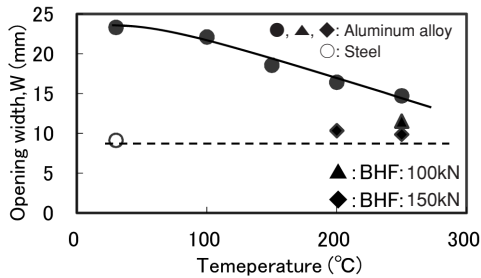


図4 開き幅の温度依存性
Temperature dependence of opening width

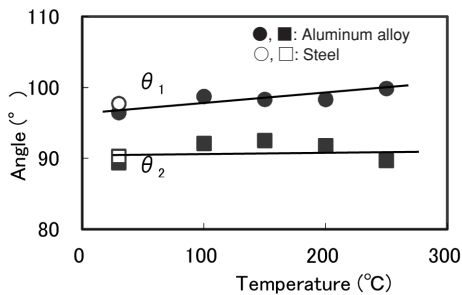


図5 開き角の温度依存性
Temperature dependence of angle

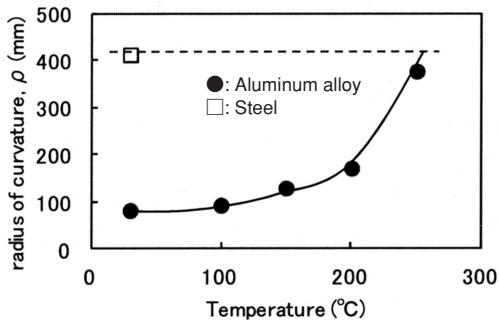


図6 曲率半径の温度依存性
Temperature dependence of radius of curvature

りも小さく、形状凍結性の改善は主に縦壁部の曲率半径の増大によるものと言える。縦壁部はハット曲げ成形時にはダイス肩部での曲げ—曲げ戻し変形を経ており、この変形後には縦壁部材料の両面間に応力差が発生する。温間でのハット曲げ成形では、ダイス肩部での曲げ—曲げ戻し変形後の縦壁部材料の両面間の応力差が冷間でのハット曲げ成形に比べて小さくなり形状凍結性が改善したと考えられる。

これら図中の○と□はBHF10kNにおける軟鋼板の冷間ハット曲げ成形品の値を示す。アルミニウム合金のハット曲げ成形での形状凍結性は、冷間では軟鋼板のそれよりも劣るが、温間では改善されて、その開き幅は軟鋼板の値に近づく。図5と図6より、冷間でのアルミニウム合金と軟鋼板のハット曲げ成形での形状凍結性の差異は主に縦壁部の曲率半径差であることが分かる。写真1はBHF10kNでのアルミニウム合金の冷間と温間のハット曲げ成形品、及び軟鋼板の冷間ハット曲げ成形品を示しており、温間により曲率半径が冷間でのそれよりも増大し、軟鋼板での値に近づくことが分かる。しかし、金型温度が250℃の温間成形であっても軟鋼板並みの形状凍結性には至っていない。

図4中の▲と◆はそれぞれBHF100kNとBHF150kNのアルミニウム合金でのハット曲げ成形品の開き幅である。温間でのハット曲げ成形に加えてBHF増による縦壁部への張力を付与することにより、アルミニウム合金の形状凍結性は軟鋼板並に改善することが分かる。写真2は温間におけるBHF10kNとBHF150kNでのアルミニウム合金と冷間におけるBHF10kNでの軟鋼板のハット曲げ成形品を示しており、BHF増によりアルミニウム合金での曲率半径が増大していることが分かる。

以上より、温間でのハット曲げ成形においては、アルミ



a: Aluminum alloy in cold forming
b: Aluminum alloy in warm forming at 250°C
c: Steel in cold forming

写真1 ハット曲げ成形試験片
Hat-shaped bending samples



a: Aluminum alloy in warm forming at 10kN in BHF
b: Aluminum alloy in warm forming at 150kN in BHF
c: Steel in cold forming at 10kN in BHF

写真2 ハット曲げ成形試験片
Hat-shaped bending samples

ニウム合金の形状凍結性は大きく改善することが判明した。その要因は主に、曲げー曲げ戻し変形後の縦壁部材料の曲げ内側と外側の応力差が低減し、これにより縦壁の曲率半径が増大したことと言える。さらに、BHFを増大させて縦壁部へ張力を付与することにより、その形状凍結性は軟鋼板並みにまで改善することが判明した。ただし、BHF増は流入抵抗を大きくして深絞り性を低減させるので、注意が必要である。実用的には、ビードの付与、もしくは、設備投資が高くなるが高張力鋼板での検討にて提案された可変ビードの設定¹⁰⁾が効果的と考える。

4. 適用課題とその検討

4.1 潤滑油

温間成形技術の実用化への課題は幾つか考えられ、その一つは専用の潤滑油が存在しないことである。従来は工業石鹸の水溶液に二硫化モリブデンもしくは二硫化モリブデン粉末を分散させたものを潤滑剤として使用していた⁶⁾⁹⁾。油の使用が可能となれば、現行の洗浄、脱脂工程を活用することで実用化への設備投資は少なく済む可能性がある。また、潤滑油使用では二硫化モリブデン系潤滑剤に比べて塗布および洗浄が容易に行えることも期待される。

温間成形用の潤滑油として必要な特性は主に耐熱性と成形性である。さらに、現行の洗浄と脱脂工程を活用するならば脱脂性も必要となる。新日本製鐵は、日本クーエカー・ケミカル株式会社と古河スカイ株式会社と共同でこれら3つの特性を満たす温間成形用潤滑油を開発した。

冷間成形以上の成形性を得るためには150℃以上が必要であるため、150℃以上の温度にて、耐熱性、成形性、脱脂性を兼備する油を開発した。

開発した潤滑油は、脂肪酸エステル、合成炭化水素、酸化防止剤、りん酸エステル、乳化剤を含む。その引火点は262℃である。動粘度は35mm²/s (40℃)である。

開発した潤滑油を用いて A5182 合金の角筒での温間成形試験を実施した。パンチは一辺が78mmの正形状であり、常に水冷により 25℃に保持した。ダイスとしわ押さえ金型は、冷間成形では室温に保持し、温間成形では200℃に保持した。破断およびフランジ部でのしわ発生がなく、絞り抜くことが可能な最大ブランクサイズを求めた。金型温度が 25℃と 200℃では、それぞれ、最大で1辺が120mmと160mmの正方形のブランクサイズまで絞ることができ(図7)、温間成形による成形性の向上が確認された。

脱脂性評価試験は以下の順に実施した。まず、A5182合金板表面に温間成形用潤滑油を刷毛塗りにより両面に0.5-1.0g/m²塗布し、更に加熱により温間成形油が飛散しないようにアルミ箔で覆い、200℃にて4分間保持した。保持後室温まで冷却し、40℃に保持した脱脂液に2分間浸漬した。最後に、スプレー水洗を30秒間実施して、直ちに垂

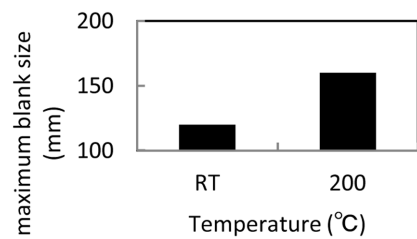


図7 潤滑油使用における深絞り性
Deep-drawing formability using lubricant oil

直に30秒間保持して試料表面の水濡れ面積を目視で評価した。アルカリ脱脂液はFC-E2082(日本パーカライジング製)に炭酸ガスによりpH=11.0に調整した。目視評価の結果、90%以上の水濡れ面積が確認され、本開発潤滑油は上記脱脂条件にて脱脂良好と判断した。

以上のように潤滑油を用いた温間成形の実施は可能であることが示された。なお、自動車製造ライン毎に脱脂条件は異なるため、実用化にはライン毎に本潤滑油を調整、あるいは新たに開発する必要がある。

4.2 成形速度の影響

実用化において高い生産性を得るためには成形速度と成形性の関係を把握することが必要である。

A5083合金を用いた温間深絞り成形試験では、150℃以上の温度では、LDRは温度上昇にしたがい増大するが、成形速度の増大にしたがいLDRの増加量は低減することが報告されている⁹⁾。同様な傾向はA5182合金においても見出されている⁸⁾。図8はA5182合金の歪速度ごとの引張強度の温度依存性を示す。いずれの歪速度においても100℃から温度上昇にしたがい強度は急激に低下し、各温度において、歪速度が大きいと強度は大きくなる。温間成形において、高温強度の低下は、フランジ部での流入抵抗を低下させて深絞り性を向上させる。それゆえ、成形速度増による深絞り性低下は歪速度増による強度増大に起因すると考えられる。

Ayresは、Mg添加量の異なるAl-Mg系合金での引張特性の温度と歪速度依存性を調査し、高温強度の歪速度依存性は動的回復によるものと報告している¹¹⁾。それゆえ、材

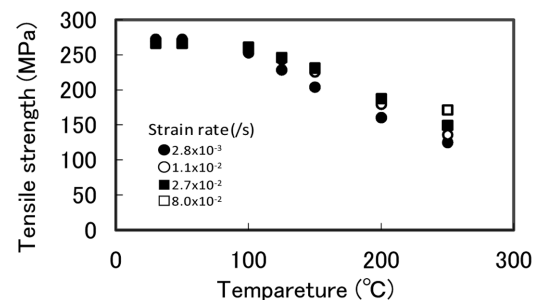


図8 引張強度の温度依存性
Temperature dependence of tensile strength

質制御により、成形速度増に従う LDR 低下を抑制することは困難と考えられる。実用において高い生産性を得るには、任意の形状の成形ごとに破断なく成形できる最大成形速度を把握することが必要と考える。

4.3 成形シミュレーション計算

計算機シミュレーションにより成形可否判定や成形状態の予測を行うことは、部品の設計や製造条件の決定において重要である。温間成形の実用化には温間成形用のシミュレーション計算技術を確認する必要がある。

温間成形において考慮すべきことはブランク内の熱伝導の取り扱い方法である。温間成形時、ブランク内での温度は均一ではなく、また、成形の進行に伴い、フランジ部は加熱されない縦壁部へと流入するためブランク内の温度分布は変化する。熱・構造連成解析は、成形過程ごとに各要素の温度を算出し、その温度に対応した材料特性値を用いて計算を行う方法であり、温間成形シミュレーションに適していることが予想される。そこで、熱・構造連成解析を用いた温間成形シミュレーション計算の適用検討を行った。

使用したパンチ金型は一辺が 78 mm の正形状の角筒である。ダイスとしわ押さえ金型の温度は 200℃とした。パンチの成形速度は 5mm/s、BHF は 10kN である。潤滑には開発した温間成形用の潤滑油を使用した。ブランクの素材は厚さ 1 mm の A5182 合金であり、その形状は 1 辺 140mm の正形状である。25mm 高さまで成形した成形品に対して、その成形品とシミュレーション計算結果の板厚を比較した。なお、冷間成形ではこの条件で 25mm 高さまで破断なく成形することはできない。

成形シミュレーション計算には LS-DYNA (Livermore Software Technology Corporation) を使用し、当ソフトウェア内にある熱・構造連成解析サブルーチン¹²⁾を用いた。ブランクメッシュサイズは 1 mm として、1/4 モデルにてブランク内の板厚を評価した。計算に使用した引張特性(応力-歪線図)は、同一素材にて成形速度と同じ引張速度にて測定された室温から 200℃ までの間の応力-歪線図である。

図 9 は成形シミュレーション計算により得られた成形品の板厚コンター図である。計算では、破断危険部位はパン

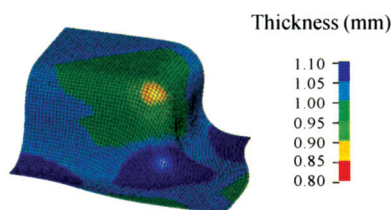


図 9 角筒成形品の板厚コンター図

Contour map of thickness in square shell calculated by forming simulation

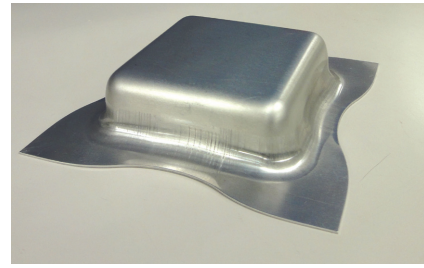


写真 3 角筒温間成形品
Square shell in warm forming

チコーナー直下であり、その位置での板厚は約 0.8mm であった。写真 3 は実成形成品を示す。板厚が最も小さくなる位置は計算結果と同じパンチコーナー直下であり、その値は約 0.8mm と計算とはほぼ同じ値であった。

このように、単純な角筒深絞り成形試験においては、温間成形での実成形と熱・構造連成解析を用いた計算での破断危険部位はほぼ同じであった。熱・構造連成解析は温間成形シミュレーション計算方法の一つと考えられる。しかし、実用化に際しては、破断判定基準の設定、破断危険部位以外での板厚分布や流入量の計算精度の冷間成形のレベルまでの向上等が必要となる。

5. 結 言

アルミニウム合金の成形性を向上させる技術として温間成形について、形状凍結性の改善、および、実用化への課題の検討を行った。温間成形では深絞り性が向上するのみならずハット曲げ成形での形状凍結性が改善することが判明した。温度上昇にしたがいハット曲げ成形での開き幅は減少し、その要因は主に温度上昇にしたがい縦壁部での曲率半径の増大によるものであった。冷間でのハット曲げ成形では、アルミニウム合金の形状凍結性は軟鋼板でのそれに比べて劣るが、温間と BHF 増による縦壁部への張力付与により、アルミニウム合金のハット曲げによる形状凍結性は軟鋼板並みまで改善することが判明した。適用課題の一つである潤滑に関しては、従来の潤滑剤に代わり専用の潤滑油を開発した。また、温間成形では成形速度の増大により深絞り性が低減する。この原因は材料の動的回復量が低減したことによるものであり、材質改善により、成形速度増に従う LDR 低下を抑制することは困難と考えられる。成形予測等に使用される成形シミュレーション計算においては、単純な角筒成形での検討結果から、熱・構造連成解析は温間成形のシミュレーション計算に適した方法の一つと考えられた。このような潤滑油と成形シミュレーション計算の利用は温間成形技術の実用化を進めるものと考えられる。

参考文献

- 1) 軽金属学会:アルミニウムの組織と性質. 初判. 東京, 軽金属

- 学会, 1991, p. 274
- 2) Furukawa-sky Review. (1), 40 (2005)
 - 3) 戸澤康寿: 塑性と加工. 1 (1), 23 (1960)
 - 4) 西村 尚, 川上芳正, 宮川松男: 塑性と加工. 16 (177), 955 (1975)
 - 5) 阿部佑二, 吉田正勝: 軽金属. 44, 240 (1994)
 - 6) 阿部佑二, 吉田正勝, 田形 勉, 松尾 守, 川並高雄: 軽金属. 50, 7 (2000)
 - 7) 大上哲郎, 高田 健, 佐賀 誠, 菊池正夫: 軽金属. 50, 451 (2000)
 - 8) 大上哲郎, 高田 健, 佐賀 誠, 菊池正夫: 軽金属. 51, 414 (2001)
 - 9) 中 哲夫, 日野降太郎, 吉田総仁: 塑性と加工. 43 (497), 551 (2002)
 - 10) 吉田 亨, 片山知久, 橋本浩二, 栗山幸久: 新日鉄技報. (378), 25 (2003)
 - 11) Ayres, R.A.: Metallurgical Transactions. 10A, 849 (1979)
 - 12) The Japan Research Institute, Ltd, LS-DYNA Ver.970 USER'S MANUAL Volume II: The Japan Research Institute, Ltd, 2003, p. 381



高田 健 Ken TAKATA
鉄鋼研究所 薄板材料研究部
主任研究員 理博
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511