



アラカルト

若手研究者・技術者へのメッセージ-19

物性研究から材料開発に転じて

Turning about from Scientific Research to
Industrial Research of Metals

中嶋英雄

Hideo Nakajima

(公財) 若狭湾エネルギー研究センター 所長
大阪大学 名誉教授



1 材料科学研究の出発点

私が高校に在学中、金属工学・溶接工学の大家であられた関口春次郎先生（東北大学出身、名古屋大学教授）が母校・栃木高校で記念講演をなされ、それに啓発されて本多光太郎先生の伝統を引く東北大学の金属に進学した。1970年大学4年ではエレクトロマイグレーションの研究を平野賢一研究室において始めた。Massachusetts工科大学（MIT）からやってきた平野先生はMIT方式と称して完全な放任主義を貫き、学生は自立心とサバイバル技術を学ぶことになった。私の研究テーマをやっている人は国内ではほとんどいなく、大学院入学当時、与えられた研究テーマ「エレクトロマイグレーション」や拡散の世界的権威者であった米国Rensselaer工科大学（RPI）のH.B.Huntington先生にテーマに関する質問を手紙で送ったところ、実に懇切丁寧に質問に答えてくれた。博士課程修了までの数年間、多数の手紙のやり取りを行い先生が実は私の影の指導教官であったような気がする。

博士課程を修了した1977年に、Huntington先生に博士研究員で採用していただいた。Huntington先生はPrinceton大学のWigner先生（1963年ノーベル物理学賞受賞）の研究室の出身で、当時のSeitz助手と金属中の拡散機構が空孔であることを電子論を用いて初めて解明した研究でPh.D.を取得し拡散の世界的な権威者であった¹⁾。Huntington先生にはすでに6年間も文通をして指導を受けていたので、先生は私のことを教え子のように思っていた。渡米すると早速、Huntington先生から「語学のハンディは考慮しない。米国人と同等に扱うので、闘って生き残れ。」と厳しく言われた。Huntington研究室は4年前（1973年）にはノーベル物理学賞受賞者（Ivar Giaever）を輩出した名門研究室であり、いきなりそこの主任研究員になったことに緊張したことを思い出す。でもこの3年間私は、徹底的にHuntington先生から鍛え上げられたような気がする。Huntington先生はよく

私を昼食に誘った。先生は当時、粒界拡散や表面拡散の電子論に興味を持っていた。ある日の昼食時に雑談から突然、独り言が始まった。野原（マトリックス）に小川（粒界）が流れボール（原子）がどのようにジャンプしていったらエネルギー的に有利であるか、初めは私に説明していたのが、途中から独り言に替りどンドンとアイデアを語り掛けていった。そのまま研究室に戻った先生は夕方、私の実験室に来て、昼食の時のアイデアを論文にすると自慢そうに私に原稿を見せてくれた。研究者とはこうあるべきだということを見せつけられたような気がする。最近、我が国の若手研究者や学生の外国留学者数が激減していると聞いているが、海外の超一流の立派な先生の下で指導を受けることは、単なる研究以上に研究に対する厳しさと姿勢を学ぶことができ、その後の研究に大きな影響を及ぼす。この種の経験を積むことは研究者に必須のことと思われる。Huntington先生夫妻は私の家族をPennsylvaniaの別荘に連れて行ってくれたり、日本に帰国後、RPIを訪れた時には先生のお宅で寝泊まりさせていただいたり、師弟関係以上に私を息子のように思って接してくれたような気がする。Harvard大学のTurnbull先生と同様に英国風の厳格なgentlemanであった。Huntington先生の指導は厳しかっただけに研究室の学生の落伍者も多かった。先生は一度スタッフや学生に与えた研究テーマは何があろうと絶対に変えることはなかった。研究に妥協を許さない厳しい姿勢はWigner、Seitz（後Rockefeller大学学長）、Huntington先生に共通したものであったような気がする。

米国の3年間はその後の私の研究人生に大きな影響を及ぼすことになった。後年、特に、もの作り研究を開始してからできたもの、あるいは見つけた現象が単なるゴミか宝物か迷っても誰も教えてくれない時にHuntington先生ならどう判断したであろうか、といつも先生の立場に置き換えて決断してきたが、そう思うと同先生の存在は私の研究人生で実に大きな比重を占めてきたと感じる。オーバードクターの苦い

経験もその後の展開を考えると今となつては、何物にも代えがたい貴重な経験である。

2 拡散をはじめとする物性研究

帰国後の1980年7月東北大学金属材料研究所に助手として採用された。

2.1 拡散研究

チタンは耐熱、耐食性に優れた軽量新素材として注目されていた。その基礎研究としてのチタンのデータはほとんどなかった。チタンの単結晶を共同研究者と育成し α Ti単結晶中の拡散の研究を行い、遷移金属原子が異常に高速拡散することを見出した。HCP結晶構造を有するので、拡散に結晶方位に依存した異方性のあること、原子サイズの小さな金属原子ほど速い拡散をすること、Coの拡散に同位体効果があることなどを明らかにし高速拡散が格子間拡散機構によって起こることを解明した²⁾。

金属間化合物は高温構造材料としての期待がもたれその基礎研究として1980年後半からB2型、L1₂型、L1₀型金属間化合物における拡散の研究を始めた。安田秀幸先生(現 京都大学教授)の大学院学生時代の共同研究の成果であるが、L1₂型Ni₃Geの両元素の拡散を初めて測定して複雑な拡散機構を解明した³⁾。図1に示したように、A₃B化合物のA原子はA副格子を規則性を破らずに自由にジャンプできるが、B原子は規則性を破らないと最隣接間のジャンプを行えない、その結果、Ni原子はGe原子より速い拡散をすることを説明することができた。L1₀型のTiAl単結晶を用いて世界で初めてTiの拡散を測定し、TiもAl原子も共に規則性を破らない面内ジャンプが速く、[001]軸方向の拡散が遅いことを解明した。

L1₂型規則構造の金属間化合物

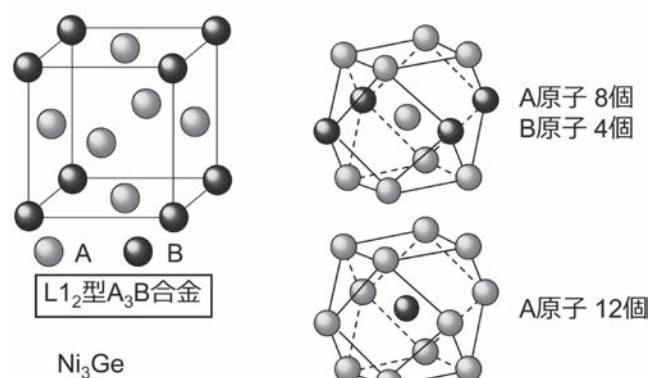


図1 左: L1₂型規則格子、右上: A原子の最隣接原子(8個のA原子と4個のB原子で構成されている)、右下: B原子の最隣接原子(12個のA原子で囲まれている)

チタンの放射化は難しく、放射性同位元素⁴⁴Tiを入手するのに10年の歳月を要した⁴⁾。

1985年Shechtman(2011年ノーベル化学賞受賞者)によって準結晶が発見されて以来、この新物質の自己拡散測定を本格的に行った研究は皆無であった。正20面体準結晶i-AlPdMn単結晶を用いてMnの自己拡散の測定を初めて行い、複雑な拡散機構を解明した。いずれの拡散の研究も国際的に高い評価を得ることができた⁵⁾。

2.2 人工格子多層膜の超伝導と磁性

スパッタリング法を用いてナノレベルで積層したMo/Si多層膜が、理想的な準2次元超伝導体を示すことを見出した。特に臨界電流密度が積層膜面に平行と垂直とで大きな異方性のあることを明らかにした⁶⁾。

また、AuとFeを単原子層ずつ分子線エピタキシー法で交互に積層し人為的なL1₀型AuFe規則合金を作製することに成功し、特異な磁気特性を見出した⁷⁾。この研究(文献7)の共同研究者P.Grunberg先生は2007年ノーベル物理学賞を受賞している。

2.3 核融合候補材料の中性子照射効果

核融合炉第1壁の低放射化材料としてバナジウム合金の使用が期待されていた。その基礎研究として高エネルギー中性子線照射を行いボイドスウェリング等の照射欠陥の生成機構に関する研究を行い、バナジウム中の遷移金属原子と点欠陥の相互作用を解明した⁸⁾。

以上のような物性研究のうち、特に拡散に関しては、他の研究者が単結晶などを作製し私が拡散を測定するという共同作業で研究を進めてきた。できればこれらの研究を自らの手で全工程を仕上げてみたいという願望を持つようになった。また、拡散の研究はかなり確立された学問分野で、いま、自分がやっているのは「落ち穂拾い」に過ぎないのではないかとミレーの絵画を見ながら思うようになってきた。また、当時の東北大学金属材料研究所には本多光太郎先生のもの作り研究の伝統があり、大きな影響を受けた。

3 ロータス型ポーラス金属の研究

1992年4月に岩手大学に教授として着任後、私には地場産業育成の期待がかけられた。岩手の特産品である南部鉄鉄の工場などを頻繁に見学する機会を得た。その際、地元企業の技術者から南部鉄鉄の引け巣や鑄造欠陥をなくす研究をしてくれと言われたが、今さら他の研究者と同じことをやっても埒が明かないと思い鑄造欠陥を利用した素材の研究をやることにした。

3.1 鋳型鋳造法と連続帯溶融法によるロータス金属の作製⁹⁾

ガス原子の熔融金属と固体金属における溶解度差を利用してロータス金属を作製することができる。熔融金属に水素などのガスを溶解させるには加圧の方がガスをよく溶かせるので加圧用の耐圧容器内でガス雰囲気中で金属を坩堝溶解させ、それを底部を冷却した鋳型に流し込んで一方向凝固させる。気孔はその方向に長く伸びて成長する(図2 (a) 参照)。熱伝導度の高い銅やマグネシウムでは均一な気孔サイズ、気孔率をもつロータス金属を作製することができるが、熱伝導度の低い金属の場合、冷却部に近い部分では凝固速度が速いが、遠ざかるにつれて放熱が不十分となり凝固速度が遅くなるために、上部の気孔の粗大化が起り均一な気孔サイズをもつロータス金属を作製することができなかった。この難点を克服するために、我々は「連続帯溶融法」を開発した(図2 (b) 参照)。この連続帯溶融法は夜自宅に思いついた。翌日、研究室へ行ってありあわせの銀ロッドをガスバーナーで一部を溶解させボンベからホースを引いて溶融部に酸素ガスを吹き付け針金で釣ったロッドを一定速度でバケツの水の中に入れて冷却した。ロッドを切断してみると均一な気孔サイズのポーラス銀ができていた。ロッドの速度を小刻みにいろいろと変えてしまうと不均一な気孔サイズのものしかできない。人為的に凝固速度を一定にすることが重要であることを知った。このようにして連続帯溶融法によって高圧ガスの下で金属ロッドを高周波加熱コイルで部分的に溶解させ連続的に移動させることにより一定の凝固速度で均一な気孔サイズと気孔率を有するロータス金属を作製することができた。このよ

うに斬新なアイデアを思いついたら手作りの装置で即座に実験をやって検証してみるとよい。うまくいけばそれから計画して本格的な実験装置を作っていけばよい。実際、その1年後、大型の連続帯溶融装置を製作し本格的に実験を進めることができた。しかしながら、この方法では試料サイズに制限があり、小さな部材しかできず、実用化を目指した量産化製造装置とはならなかった。

3.2 連続鋳造法によるロータス金属の作製

この問題を解決するために私は連続鋳造法の適用を考え始めた。大学の先輩で住友金属工業(株) 副社長だった戸崎泰之氏の計らいで鹿島製鉄所を見学させてもらったが、連続鋳造の鋳型は形状が決まっていて、溶融鉄鋼がその中を通るときには凝固収縮するので、スルスルと通り抜けることができる。私はそれを見て、ロータス金属は凝固時に異常に膨張を起こすので鋳型内で膨張したロータス金属が鋳型で固まってしまうだろうと考えて、失望した。でも鋳型に問題があれば、装置を作ってから後で固定式の鋳型から耐熱性のバネ(このようなものがあるだろうか?)を取り付けて鋳型も凝固材の膨張に対応できる形状可変型の鋳型に作り替えればよいだろう位に思って、まずロータス金属作製の連続鋳造装置を製作することにした。2階建の億単位の経費を要した装置が完成まじかになりつつある時に、もし失敗したら私は自己責任をどうとるかと思い悩んだ。

しかしながら、装置完成後(図3 (a) 参照)の第1回目の実験で意外にも図3 (b) に示したような気孔サイズと気孔率が

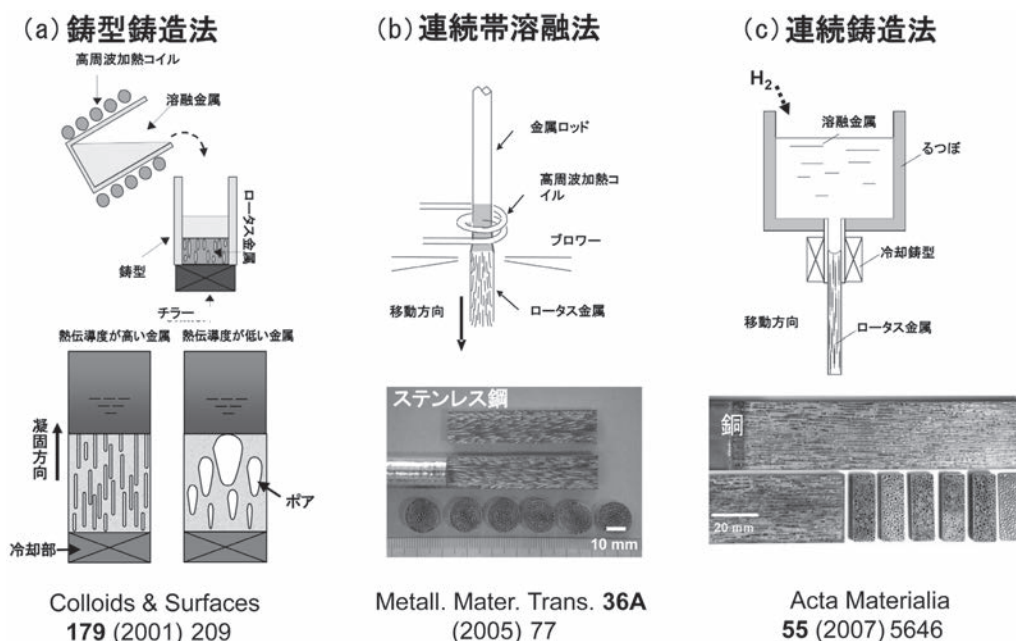


図2 (a) 鋳型鋳造法、(b) 連続帯溶融法および (c) 連続鋳造法の原理図および作製されたロータス金属 (生産技術振興協会・季刊誌「生産と技術」2012年第64巻79ページからの転載許可取得済み)

均一なきれいなロータス銅の作製に成功してしまった。これにはたいへん驚いた。実はポーラス化による大きな体積膨張は鋳型の両側に張り出していくのではなく、最も変形を受け入れやすい上部の熔融金属液面を押上げていくだけであることがわかった。装置設計から完成までの2年間以上もの間、悩んできたことが一気に晴れ、同時に自分の浅はかさを知ることとなった。きわどい綱渡りも一件落着である。

3.3 窒素によるロータス鉄

今から10年ほど前、ある新聞が紙面の半分を割いてロータス金属の特集記事を掲載してくれた。これを見た大手鉄鋼メーカー数社の幹部が別々に私の研究室を訪れてきた。共にロータス鉄鋼に関心をもっていた。高圧水素を用いて作製させることを知り実用化に不向きと皆同じことを言って帰った。それを聞いた私は心穏やかではなかった。それがきっかけで鉄中の窒素の溶解度の文献を調べてみるとポーラス化ができそうな感触をつかんだ。当時、大学院博士課程の玄丞均君に窒素を用いたロータス鉄の作製を試みさせると、見事に安全な窒素ガスでロータス鉄ができた。しかも、そのロータス鉄にはごくわずかの窒素が固溶するので、鉄が強化され気孔率50%の孔が空いていても強度は無垢の鉄と同等という画期的な成果を得ることができた⁹⁾。

3.4 ガス化合物の熱分解を利用したロータス金属の作製法の開発¹⁰⁾

高圧ガスを用いたロータス金属の量産化製造や実用化には、企業から2つの点で問題が指摘されていた。第1点は高圧ガス使用である。1MPa以上のガスを使用するには、高圧ガス取り扱いルールに則った都道府県の高圧ガスの事業認定

を受ける必要があり、しかも高圧容器は高価である。第2点は水素を用いることであり、わずかの酸素との混合によって爆爆性のガスになってしまう。安全取り扱いにも注意しなければならない。これらを克服しなければならないということは、私にとってプレッシャーとなっていた。今から8年ほど前、熔融金属に水素を添加するのに高圧水素ではなく、水素化合物を加えればよいではないか、高圧水素から水素を添加するよりもはるかに簡単に直接的ではないか、というアイデアを思いついた。製法があまりに簡単すぎるので、誰でもすぐに真似することができるだろう。研究室には企業の研究者も多数出入りしていたので、情報の漏えいを防ぐために、実験は博士課程の井手拓哉君だけにやらせ、この実験は夜中と週末にやること、私との研究打ち合わせは真夜中か週末にだけ行うことで進めてきた。私の予想通り、水素ガスを使わずに、熔融金属に水素化合物粉末を微量添加するだけでロータス金属ができ上った。

4 物性研究から材料開発に転じて

私は大学院を修了後、自分の研究環境が7か所も変り、その都度、新しい環境や人々からいろいろの影響を受けてきた。研究人生のちょうど中間地点で物性研究からもの作り開発研究への大きな方向転換を行ったが、大きな勇気が必要とした。流行を追わない人のやらないことをやり始めると、一見、フロントランナーのようで聞えは良いが、孤独なランナーであったような気がする。このような孤独には一人では耐えきれなかったが、幸いにも研究室の優秀なスタッフ、元気な学生、学内外の研究者、企業の方々に支えられてようやくここまでやって来られた。馬越佑吉先生(現 大阪大学名誉

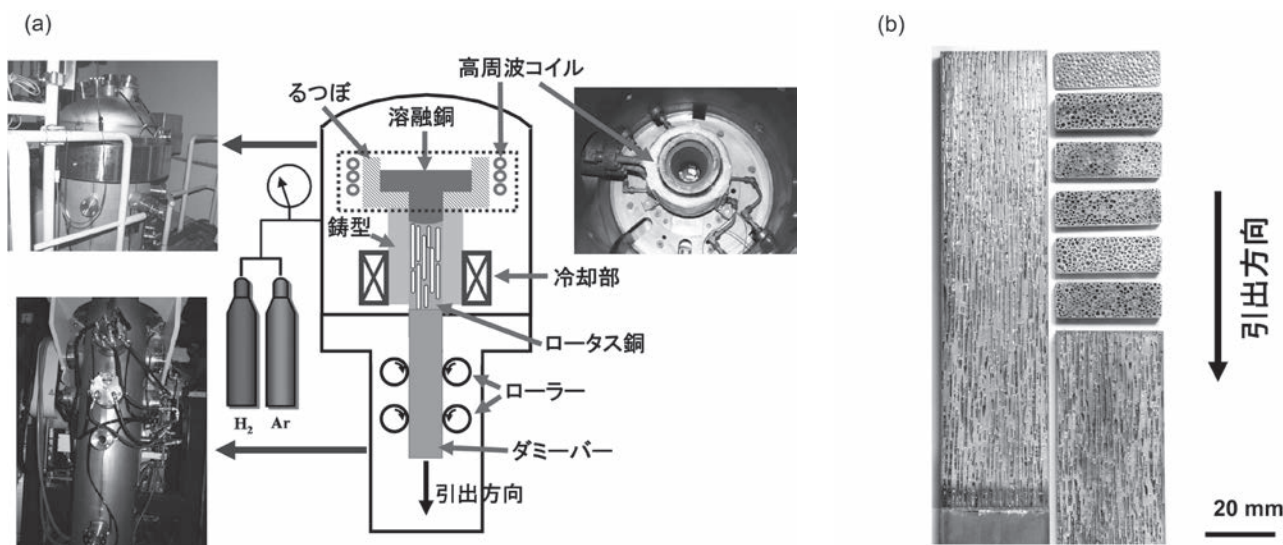


図3 (a) ロータス金属作製用連続鋳造装置と (b) 作製されたロータス銅

教授)は「使われてこそ材料」とよく言われていたが、もの作りとさらに実用化を目指すにはその道一筋に一直線に進んでいくしかないと感じた。それに対して、私の拡散研究は出現してくる新物質の拡散を測定するという研究手法であった。チタン単結晶、金属間化合物、準結晶…等の拡散研究を世界に先駆けて進めてきた。新しい物質に拡散研究者として飛び回って新知見を得てそれなりに楽しい研究であった。しかし、実用化を目指したものの作りとなると一か所に腰を落着けて脇目も振らずに突進していかなければならない。その過程で必ず難しい障壁がいくつもあり生き残っていくには強靱な精神力と忍耐が必要である。結局は自分との戦いであると言える。

5 若手研究者へのメッセージ

私は自分の研究人生の要所要所で大きな決断を迫られ、現状維持を破ってきたような気がする。現状維持に甘んじることでもできたが、私はそれを良しとせず、変化に富んだ研究人生を歩んできた。私の研究人生の初めの20年間は拡散あるいは拡散をベースとした材料の物性研究に専念した。岩手大学に転勤になったことが契機となって鍛造のものの作りの開発研究に転じることとなった。それより10数年前、私がRensselaer工科大学に勤務していた時に東北大学増本健先生が来られ、私に語ってくださったことがある。先生は数年前にご自身の鉄鋼材料研究からアモルファス研究に大きく方向転換する際に周囲から多くの反対があったこと、それを振り切って自分の決断で転身されたという苦労話をされた。自らの意志で新分野を拓いていく先生の強烈さに衝撃を受けるほどの感動を覚えた。私も例え小さいことであっても機会あれば、自らが拓く新分野に挑みたいと思うようになった。それから10数年後、たまたま、大学を替えたことが大きな転機となりゼロからの出発にも違和感を覚えなかった。鍛造欠陥の有効利用は私にとって大きな転身の機会であった。それ以降はわき目も振らずポーラス金属の研究のみに没頭した。不慣れなものの作り研究に転じた時、自分の研究人生の前半で習得した拡散の知識がたいへん役に立った。凝固や気孔の生成を中心としたポーラス金属作製に関わる現象は複雑で教科書を読んでも解決できないようなものばかりであったが、拡散という観点からそのような複雑系を眺めると意外にも難解な現象の仕組みが透けて見えてくるが多々あった。私は

研究人生の後半ではポーラス金属のものの作り研究者であったが、実は抜けきらず半分は物性研究者であったと思うことがある。ものの作りに徹していると目標のポーラス金属ができたか否かに気を取られがちだが、失敗作の不格好なポーラス金属を見ても拡散や凝固の単なる応用問題と捉えたと解決意欲が湧いてくる。応用問題を解くことが即ちものの作りの難関を克服することに通じていたからだ。

私の経験から言わせていただければ、若い時に材料の基礎の物性研究に打ち込み、研究人生の後半でその経験と知見を生かした材料のものの作りの開発研究に大きく方向転換すると大きな展開が開けてくるのではないかと。否、実は研究人生の前半で基礎をがっしりと固めた研究をやり、後半でそれを生かした応用開発をやっていくのは材料工学の本来のあるべき姿ではないか。若手研究者にはリスクを恐れないチャレンジ精神で常に飛躍を目指した研究に突き進んでいただきたいと願っている。

参考文献

- 1) H.B.Huntington and F.Seitz : Phys. Rev., 61 (1942), 315.
- 2) H.Nakajima, K.Koiwa, Y.Minonishi and S.Ono : Trans. Jpn. Inst. Met., 24 (1983), 655.
- 3) H.Yasuda, H.Nakajima and M.Koiwa : Defect and Diffusion Forum, 95-98 (1993), 823.
- 4) T.Ikeda, H.Kadowaki and H.Nakajima : Acta Mater., 49 (2001), 3475.
- 5) W.Sprengel, T.A.Lograsso and H.Nakajima : Phys. Rev. Lett., 77 (1996), 5233.
- 6) H.Nakajima, M.Ikebe, Y.Muto and H.Fujimori : J. Appl. Phys., 65 (1989), 1637.
- 7) S.Mitani, K.Takanashi, H.Nakajima, K.Sato, R.Schreiber, P.Grunberg and H.Fujimori : J. Magn. Magn. Mater., 156 (1996), 7.
- 8) H.Nakajima, S.Yoshida, Y.Kohno and H.Matsui : J. Nucl. Mater., 191-194 (1992), 952.
- 9) H.Nakajima : Prog. Mater. Sci., 52 (2007), 1091.
- 10) H.Nakajima and T.Ide : Metall. Mater. Trans., A39 (2008), 390.

(2013年8月19日受付)