

平成 21年 3月31日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間： 2007 ~ 2008

課題番号： 19860059

研究課題名（和文） 多結晶金属材料の脆性 - 延性遷移への破壊物理的アプローチ

研究課題名（英文） Physics of fracture to the brittle-ductile transition in poly-crystalline metals.

研究代表者

田中 将己 (TANAKA MASAKI)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40452809

研究成果の概要：

体心立方金属は低温で脆くなり、時に重大な破壊事故を引き起こす。低温靱性向上の方法の一つとして結晶粒の微細化が挙げられるが、その結晶粒微細化による遷移温度低下メカニズムについては未だ明らかになっていないと難しい。本研究では、結晶粒微細化による遷移温度低下の起因は、熱活性過程に起因する転位易動度の変化によるものではなく、結晶粒が転位源として働くことにあることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：金属物性

キーワード：き裂，脆性 - 延性遷移，応力遮蔽効果

## 1. 研究開始当初の背景

近年、構造用金属材料の機械的性質の飛躍的向上が望まれるようになってきている。一般に金属材料の強化機構には、転位強化、結晶粒微細化強化、固溶強化、析出・分散強化がある。その中でも、近年材料の延性・靱性を損なわずに強度を向上させることができる

結晶粒微細化強化に注目があつまっている。そのような中で IF 鋼を用いてシャルピー衝撃試験結果に及ぼす繰返し重ね接合圧延 (Accumulative Roll Bonding: ARB) の効果を測定したところ、通常の焼き鈍し材では低温で急激に吸収エネルギーの低下が起こるのに対して、ARB 材ではそのような低下は起こらな

い事が報告された。換言すれば脆性-延性遷移温度 (Brittle-to-ductile transition, BDTT) が低温側に移行し、低温靱性が向上したということを示している。これは一般に結晶粒微細化効果による BDTT の低下として知られているが、そのメカニズムについてはほとんど何も明らかになっていないといっても過言ではない。

材料の破壊はクラックの生成・伝播によって起こる。このため材料の破壊強度は、原子間結合力の大きさばかりではなく、微視的に導入されたクラックなどによる応力集中やその塑性緩和過程に大きく依存する。この緩和機構として、従来いくつかの考え方が示されているが、Thomson はその物理的側面から、転位による遮蔽効果という考え方を提案した。この遮蔽理論を用いて、BDT 現象を説明しようという試みが Si 結晶をモデル材として St. John による先駆的な仕事以来、様々なグループにより行われてきた。その結果、BDT の活性化エネルギーの値は、研究者によらず一致し、転位運動の活性化エネルギーの値と等しいことから BDT は転位の移動律速である事が明らかとなった。しかし、遷移温度そのものは、各研究者ごとに異なっており、BDTT はクラック先端での転位の生成・増殖や転位分布・間隔に大きく影響を受けるいわゆる Structure sensitive であることが次第に明らかになってきた。当研究室でも、これまで Si 単結晶を用いた研究で BDT が転位の移動律速であることを示してきた。これらの事より BDT は熱活性化過程である転位の移動と、熱活性化過程とは関係せず材料組織の一部である転位源密度で決定付けられると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ARB による結晶粒微細化による低温靱性向上のメカニズムを明らかにする

目的をもって、まず転位の易動度に及ぼす ARB の効果を調べた。そのため結晶粒微細化した低炭素鋼を種々の変形速度で四点曲げし、破壊靱性値を算出して BDT 曲線を作成した。そして、BDT の活性化エネルギーを算出することで強加工を施す前後で転位の易動度に変化が生じないことを明らかにした。そこで次に、転位源間隔を考慮した擬二次元転位動力学シミュレーションを行い、BDT 曲線を再現し、転位源密度が遷移温度低下を引き起こす要因について考察した。

## 3. 研究の方法

### (1) ARB (Accumulative Roll-Bonding) 法

ARB 法とは複数の金属板を積層し、所定の板厚まで圧延接合を行い、その板を長手方向に切断して再結晶温度未満で回復が起こる温度まで加熱し、重ね合わせたあと再度圧延することを繰り返して行う方法である。

以下 ARB 法を用いた実験方法について述べる。本研究では供試材として Fe0.02% C を用いた。なお、ARB によって BDT 温度の大きな低下が期待され、BDT 温度が四点曲げ試験が可能な温度以下になる可能性があるため、Fe0.02% C 鋼にはあえてリンが添加してある材料を用いた。

### (2) みかけの破壊靱性試験

ARB を施した試料を  $1 \times 1 \times 12 \text{ mm}^3$  に切り出し 77K ~ 300K の温度でみかけの破壊靱性の温度依存性を種々のクロスヘッドスピード (0.5, 2.5, 12.5 mm/min) で行った。また、試料が延性的になり破断しなかったものにおいては、降伏応力を用いてみかけの破壊靱性値を形式的に算出した。

#### 4. 研究成果

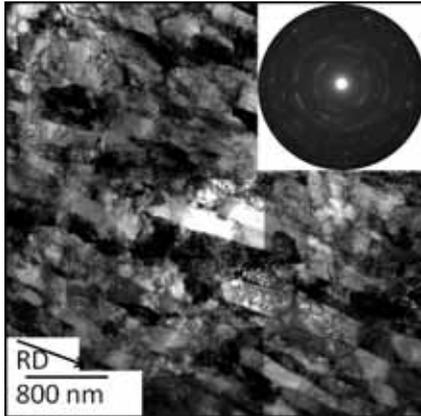


図1 ARB ままの TEM 像 (観察面:TD)

図1にARBのままの試料をTDから観察したTEM像を示す。結晶粒がRDに伸張している典型的な圧延組織であることが分かる。更に、RDに平行な方向の結晶粒径は約200nmであることがわかる。制限視野回折パターンより、これらの結晶粒界は大角粒界であることが分かる。

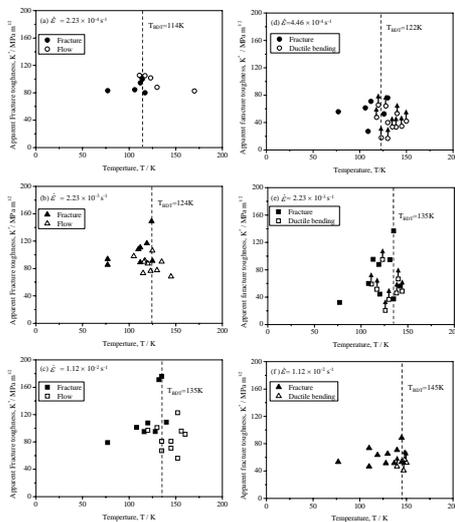


図2 みかけの破壊靱性値の温度依存性 (a)-(c)ARB まま材, (d)-(f)スタート材

図4 (a)-(c)にARB まま材, (d)-(f)にスタート材におけるみかけの破壊靱性値の温度依存性を示す。何れのカロスヘッドスピードに

おいても、ARB 後に BDT 温度が低下していることが分かる。また、BDT 温度はクロスヘッドスピードの上昇と共に増加することから、BDT を律速している素過程は熱活性化過程であることが分かる。そこで、ARB 前後でこの熱活性化過程に変化が生じるか否かを検討するため、BDT 温度の逆数と変形速度の対数をとった。その結果を図3に示す。スタート材、ARB 材の何れの場合においても活性化エネルギーに変化がないことが分かった。このことは、BDT 挙動を支配する熱活性化過程には変化がないことを示している。

そこで、遷移温度の低下は、結晶粒界での新たな転位の発生に起因すると考え、離散的動力学シミュレーションにより、転位源の数と脆性-延性遷移挙動の関係を検討した。このシミュレーションにおける転位の生成条件は、クラックコアの半径以上に置いた転位に作用する力  $f_d$  (外部からの力  $f_{Kd}$  と亀裂鏡像力  $f_{dd}$  の和) が転位運動に対する摩擦力より大きくなる時であるとした。転位運動速度は、転位にかかる剪断応力の  $m$  乗に比例することとする。二番目以降に生成された転位は以上の事に加え、先行する転位からの相互作用も受ける事を考慮した。既に生成された転位の運動についても、他の転位との相互作用を考慮して、その運動を記述した。亀裂先端の転位に関する応力関数は Thomson の提案した応力関数を用いた。結晶粒径による転位増殖のし易さをコードに反映させるため、Roberts らが提唱した擬三次元モデルを用いて、結晶粒径の減少を転位源間隔の低下とみなし、破壊靱性値の温度依存性を計算した。その結果、図4が示すように転位源間隔が低下すると、遷移温度が低下する傾向が見られ、結晶粒微細化による遷移温度の低下は、結晶粒界での転位の発生がその支配機構であることが明らかとなった。

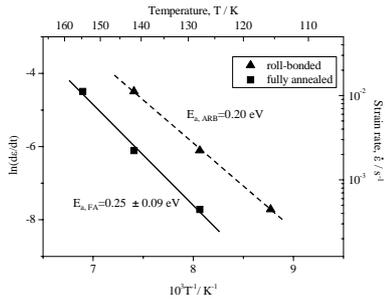


図 3 脆性 - 延性遷移温度の逆数と変形速度のアレニウスプロット

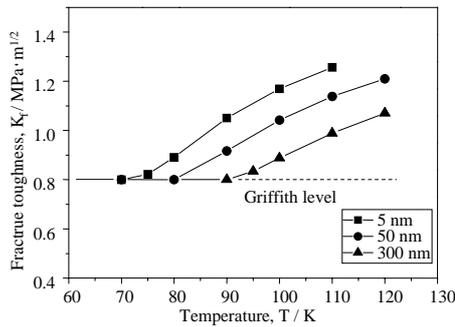


図 4 転位源間隔を考慮した破壊靱性値の温度依存性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

M. Tanaka, K. Higashida, T. Shimokawa, T. Morikawa, "Brittle-ductile transition in low carbon steel deformed by the accumulative roll bonding process", Mater. Trans., **50**, pp.56-63, 2009, (査読有).

M. Tanaka, N. Fujimoto, T. Yokote, K. Higashida, "Fracture toughness enhanced by severe plastic deformation in low carbon steel", Mater. Sci. Forum, **584-586**, pp.637-642, 2008, (査読有).

[学会発表](計 7 件)

S. Horiuchi, M. Tanaka, T. Yokote, K. Higashida, "Brittle-to-ductile transition in severely deformed ferrite steel", International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Materials (GSAM-2008), Nov.21, 2008: Fukuoka, Japan.

K. Higashida, M. Tanaka, S. Horiuchi, T. Shimokawa, "The effect of severe plastic deformation of the brittle-ductile transition in low carbon steel", International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Materials (GSAM-2008), Nov.21, 2008: Fukuoka, Japan.

強加工を施したフェライト鋼における脆性 - 延性遷移挙動, 堀内聡, 田中将己, 東田賢二, 日本鉄鋼協会156秋期講演大会, 熊本大学, 2008年9月24日.

M. Tanaka, N. Fujimoto, T. Yokote, K. Higashida, "Fracture toughness enhanced by severe plastic deformation in low carbon steel.", The 4th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation (NanoSPD4), Aug.18, 2008: Goslar, Germany.

ARBを施した低炭素鋼における脆性 - 延性遷移挙動,

田中将己, 東田賢二, 堀内聡先進材料の高温強度と組織研究会「平成20年度夏の学校」, 超塑性研究会136回研究会, 日本大学軽井沢研究所, 2008年8月10日.

繰り返し重ね接合圧延を施した低炭素鋼  
における変形挙動の解析，  
堀内聡，藤本直樹，田中將己，横手達夫，  
東田賢二，平成20年度日本金属学会九州  
支部・日本鉄鋼協会九州支部合同学術講  
演大会，九州大学筑紫キャンパス，2008  
年6月7日．

ARB を施した低炭素鋼における脆性-延  
性遷移挙動，  
田中將己，藤本直樹，堀内聡，東田賢  
二日本金属学会 142 回春期大会，武蔵野  
工大，2008 年 3 月 28 日．

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

田中 將己 (TANAKA MASAKI )  
九州大学・工学研究院・助教  
研究者番号：40452809