

# 変形挙動解析と幾何学理論で迫る キンク強化機構

松村 隆太郎\*

## 1. はじめに

この度はこのような寄稿の機会をいただき、大変光栄です。私は幾何学理論と変形挙動解析を軸に、キンク組織の形成・強化に関する研究を行っております。2023年に東京工業大学(現 東京科学大学)で博士号を取得し、同大学の科学技術創成研究院で研究員を務めたのち、現在は同大学総合研究院で助教を務めております。本稿では、次世代軽量金属材料として期待される長周期積層型(LPSO)Mg合金におけるキンク組織による強化に関する研究成果について、ご紹介いたします。

## 2. 背景

キンク変形は、活動するすべり系が層面上のただ一つに限定される層状構造材等において均一なすべり変形と層自体の剛体回転が同時に起こる塑性変形である<sup>(1)-(3)</sup>。以後、層面上のすべり変形を“底面すべり”とよぶ。キンク変形により塑性座屈に類似した形態であるキンクが発生・連結し、キンク組織が形成される<sup>(3)</sup>。ここでキンクはキンクバンド、リッジキンク、オルソキンクを指す<sup>(3)</sup>。キンク変形は1942年にOrowan<sup>(1)</sup>によって金属材料のCd単結晶においてはじめて発見された。その後、岩石、木材、雲母、グラファイト、ポリマーなどの様々な材料で発見されてきたが<sup>(4)-(8)</sup>、材料工学的な価値は見出されていなかったことから、キンク変形に関する研究は活性化されることはなかった。ところが近年、熱間押し出しによって多量のキンクが導入された長周期積層型(LPSO)Mg合金が異常に高い強度を持つことが発見さ

れ<sup>(9)-(11)</sup>、キンクが再注目されている。LPSO-Mg合金の容易すべり系は六方最密充填(hcp)構造の底面である(0001)底面に限定されているため、キンク変形が生じる<sup>(12)</sup>。予変形によりキンクを形成させたLPSO-Mg合金を用いて、外力によりキンクをすべり変形させる実験では、キンクやキンクバンド間の界面であるキンク界面がすべり変形に対して変形抵抗として働いており、キンクの存在自体が強化に寄与することが明らかにされている<sup>(13)-(15)</sup>。こうした多量のキンクの導入により降伏応力が顕著に上昇する現象は「キンク強化」と呼ばれている。LPSO-Mg合金を社会実装するためや層状構造を有するあらゆる材料群に対してキンク強化を応用展開するために、キンクによる強化原理の解明が強く望まれている。

これに対して著者は、強化原理を構築する際の土台となる強化機構の幾何学的側面を明らかにするために、連続体力学を基盤とする変形の連続性を表すrank-1接続を用いてキンクの形成・強化に関する研究を行ってきた<sup>(16)-(19)</sup>。Rank-1接続とは、物体に相異なる均一な変形勾配 $A, B$ が施されたときの界面 $\hat{l}$ において変形の連続性を保つための必要十分条件 $A - B = c \otimes \hat{l}$ ( $c$ は変形勾配の不連続性を表すベクトル)である<sup>(20)</sup>。Rank-1接続を用いたキンクの幾何学解析はInamura<sup>(21)</sup>によってすべり系が一つに限定された場合のキンク形成を対象としてはじめて行われ、キンク形成の幾何学が体系的に定式化された。解析の結果、キンクバンドどうしが結合すると結合面の端部に回転型の格子欠陥である回位が形成され、さらに回位が強化機構として働くことが示された。Rank-1接続を用いたキンクの幾何学解析の妥当性は著者によって実験的に示されており<sup>(17)</sup>、回位の存在も実験的に示唆されている<sup>(22)</sup>。Rank-1接続を用いたキンクの幾何学解

\* 東京科学大学総合研究院フロンティア材料研究所; 助教(〒226-8501 横浜市緑区長津田町4259 J3-22)  
Study on Kink Strengthening Mechanism Based on Geometry and Deformation Behaviour; Ryutaro Matsumura (Institute of Integrated Research, Institute of Science Tokyo, Yokohama)  
Keywords: *kink microstructure, kink strengthening, LPSO-Mg alloy, rank-1 connection*  
2024年10月31日受理[doi:10.2320/materia.63.836]



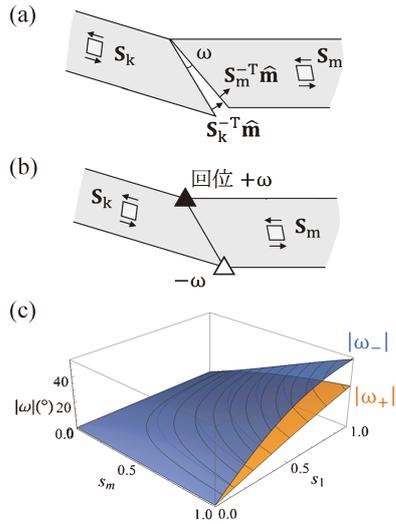


図2 衝突してくるせん断領域とキックバンドを貫通するせん断領域の模式図。(a) せん断領域どうしの結合部で角度 $\omega$ の隙間が生じる。(b) 隙間を埋めるために結合面の端部に回位が形成される。(c) 回位強度の $s_1, s_m$ 依存性。(オンラインカラー)

せん断領域どうしが結合すると、結合部で剛体回転 $\mathbf{W}$ の回転角 $\omega$ に相当する回転性の隙間が生じる。この隙間を埋めるためには、図2(b)に示すように回位強度 $\omega$ の回位対が生じなければならない。 $\mathbf{W}$ の回転軸に角 $\omega$ を掛けたベクトルはフランクベクトルである。フランクベクトルは $s_1, s_m$ に依らず $\mathbf{e}_x$ に平行であるため、形成される回位の種類は楔型である。図2(c)に $|\omega_+|, |\omega_-|$ の $s_1, s_m$ 依存性を示す。 $s_1 \neq 0, s_m \neq 0$ であるとき、 $|\omega_+|, |\omega_-|$ は常にゼロでない値であった。これはせん断領域どうしの結合面の端部には回位対が必ず形成されることを示している。

図3(a)はせん断領域がキックバンドを貫通した模式図である。現配置での結合面の法線( $\hat{\mathbf{m}}_k$ )は $\hat{\mathbf{n}}_1$ と角度 $\delta$ をなすため、図3(a)の点線部においてキック界面は途切れる。キック界面が途切れることなく繋がるためには、図3(a)の矢印が示すように、せん断領域より下側の既存のキック界面に平行移動が要求される。以後、このキック界面の移動をもたらす変形を連携変形と呼ぶ。 $\delta$ は $\hat{\mathbf{m}}_k, \hat{\mathbf{n}}_1$ を用いると

$$\delta = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\mathbf{n}}_1 \cdot \hat{\mathbf{m}}_k}{|\hat{\mathbf{n}}_1| |\hat{\mathbf{m}}_k|} \right) \quad (8)$$

である。図1で示すキック界面とせん断領域の交差部の長さ( $d/\cos \phi$ )が $\delta$ 角変化するため、連携変形によるキック界面の移動量( $x$ )は、

$$x = \frac{d \tan \delta}{\cos \phi} \quad (9)$$

で与えられる。 $d$ は変数であり、 $\phi$ は $s_1$ により一意的に定ま

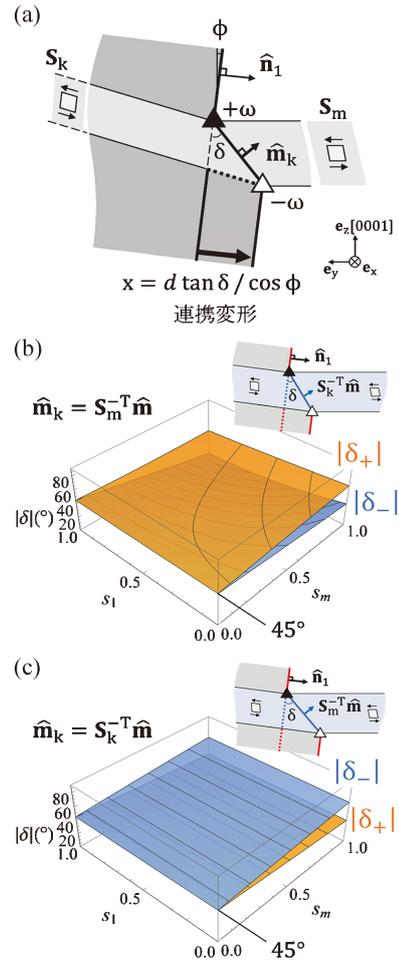


図3 (a) せん断領域とキック界面の交差部の模式図。キック界面が途切れることなく繋がるためには、キック界面が結合面の下端まで平行移動する(連携変形)。 $\mathbf{S}_k^{-T} \hat{\mathbf{m}}$  (b),  $\mathbf{S}_m^{-T} \hat{\mathbf{m}}$  (c)のときの $|\delta_+|, |\delta_-|$ の $s_m$ と $s_1$ 依存性。(オンラインカラー)

るため、 $s_m$ と $s_1$ に依存する項は $\delta$ のみである。図2(a)に示すように、せん断領域どうしの隙間が回位によって埋められるとき、 $\hat{\mathbf{m}}_k$ は $\hat{\mathbf{m}}_k$ のとりえる範囲の両端である $\mathbf{S}_k^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ と $\mathbf{S}_m^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ とみなした。図3(b), (c)はそれぞれ、 $\mathbf{S}_k^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ および $\mathbf{S}_m^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ のときの $|\delta_+|, |\delta_-|$ の $s_m, s_1$ 依存性を示している。 $\hat{\mathbf{m}}_k$ が $\mathbf{S}_k^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ と $\mathbf{S}_m^{-T} \hat{\mathbf{m}}$ のどちらの場合でも、 $s_m$ が十分に小さな値では $|\delta_+|, |\delta_-|$ はほぼ $45^\circ$ であり、 $s_1, s_m$ が増加すると $|\delta_+|, |\delta_-|$ は緩やかに単調に変化した。そのため、式(9)より衝突してくるせん断領域のせん断量 $s_m$ が極めてわずかであっても、キック界面の移動量はせん断領域の厚み程度になる。

キック界面とせん断領域の交差部で回位と連携変形が発生することを明らかにした。回位の周りの弾性場の存在により回位は弾性エネルギーを蓄える<sup>(24)</sup>。連携変形では、キック界面の移動による塑性仕事が生じる。回位や連携変形が生じるためにはこれらエネルギーに相当する仕事が外部から供給されなければならない。よって回位と連携変形は変形応力の上昇をもたらすことになる。回位の弾性エネルギーは回位強

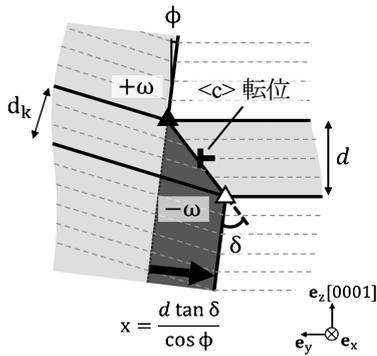


図4 せん断領域とキンク界面の交差部の模式図。連携変形が発生するためには、 $\langle c \rangle$ 転位が発生しなければならない。

度の二乗に比例するため、回位による強化量は必ずゼロでない値になる。一方、連携変形に必要な塑性仕事は、キンク界面が移動した領域の面積とキンク界面の移動に必要な応力( $\tau_k$ )を掛けることで求められる。連携変形が生じる場合、図4に示すようにキンクバンド内部を貫くせん断領域の厚み( $d_k$ )は衝突してくるせん断領域の厚み( $d$ )と一致しない。これは、各々のせん断領域で層面の数が一致しないため、結合面において $\langle c \rangle$ 転位が発生しなければならないことを示している。LPSO-Mg合金において $\langle c \rangle$ 転位を発生させるためには、硬質層を切断する変形が生じなければならない。硬質層を切断する変形は容易に生じないため<sup>(10)(25)(26)</sup>、 $\tau_k$ は底面 $\langle a \rangle$ すべりの室温での臨界分解せん断応力と比較して非常に大きな値であると推測される。 $s_m$ がわずかな値でもキンク界面の移動量が大きくなることも踏まえると、連携変形による塑性仕事は莫大になると考えられる。最新の研究では、キンクバンド内部に働くせん断量が減衰することで連携変形が生じず、回位のみが強化に寄与する状況が存在することが明らかにされている<sup>(27)</sup>。どちらの状況も発生しうると考えられるが、いずれもすべり変形とキンク界面の交差部に生じる回位と連携変形が強化機構として寄与する。

#### 4. 外力によりすべり変形されたキンク組織の変形挙動解析

Rank-1 接続を用いたキンク形成の幾何学解析では、ひとたび形成されたキンク組織に対して外力を負荷し、高いシュミット因子をもつキンクバンド内部ですべり変形が生じた場合、変形の連続性を保つためにキンクバンドどうしは連携的に変形せざるを得ないことが示唆されている<sup>(21)</sup>。この連携変形は連結する全てのキンクバンドに波及する。すべり係が一つに限定されたLPSO-Mg合金においてキンク界面で割れや剥離を生じさせないためには、連結したキンクバンドのうち一部のキンクバンドでは外力に逆らった変形(逆変形)が強制されると考えられる。こうしたキンクバンドが存在するならば、逆変形を生じさせるために外部から余分な仕事を供給する必要があるため、これもまた変形応力の上昇をもたらす

強化機構として働くと考えられる。本節では、外力によってすべり変形されたキンク組織において各キンクバンドで生じる変形を、電子線後方散乱回折(EBSD)測定によるキンクバンドの結晶方位および集束イオンビーム(FIB)加工によって試料表面に導入したメッシュ痕を用いて定量的に評価することで、逆変形したキンクバンドが存在することを実証した研究について紹介する。なお詳細な実験条件や結果については原著論文<sup>(19)</sup>を参照いただきたい。

本実験では、18R LPSO 相単相から構成された公称組成  $Mg_{85}Zn_6Y_9$ (at%)の一方方向凝固(DS)材を使用した<sup>(28)</sup>。DS材はAr雰囲気下でブリッジマン法を用いて誘導溶解によって作製されたインゴットを再凝固させることによって作製された。このとき(0001)面は成長方向と平行になっている。底面にはほぼ平行な方向に圧縮荷重が負荷されると(0°方向圧縮)、キンク変形が生じる。一方で、底面に45°傾いた方向から試料が圧縮されると(45°方向圧縮)、シュミット因子がほぼ最大となるため底面すべりが生じる。これらの特徴を利用して、図5に示すようにLPSO相で形成されたキンク組織をすべり変形させる二重圧縮試験をDS材に施した。

EBSD測定を用いた結晶方位解析では、45°方向圧縮前後で同一箇所において未変形部に対するキンクバンドの結晶回転の変化量( $\Delta\theta$ )、キンク界面法線の回転量( $\Delta\phi$ )を求めた。このとき、紙面奥行き方向に右ねじが進む方向を回転の正方向とした。さらに、45°方向圧縮前にFIB装置を用いてメッシュの水平方向が底面に沿って平行になるようにメッシュ加工を施した。メッシュの水平方向はLPSO相での主要な変形モードである底面すべりに平行になっている。45°方向圧縮前後における各メッシュの辺の長さとの相対的な角度からせん断ひずみ量( $\epsilon$ )を微小変形近似で求めた。

図6(a)~(c)は、0°方向圧縮後の注目するキンクのIQ(Image Quality)マップ、未変形部に対する結晶回転量の分布、模式図である。図6(c)に示すようにキンク界面をK1, K2、未変形部をM1, M2、キンクバンド部をKB1, KB2としている。各キンクバンドはそれぞれ紙面内の単一の底面すべりで形成されていた<sup>(19)</sup>。この場合、せん断変形のシュミット因子も紙面内でのせん断が最大となるため、変形は観察面内の平面歪となる。図6(d)~(f)は注目しているキンクの

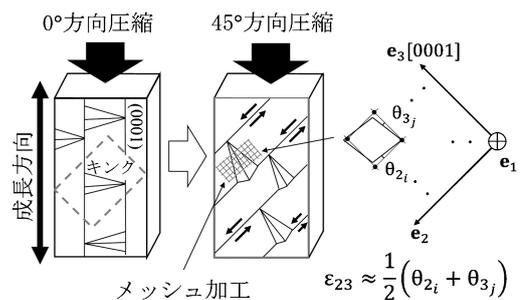


図5 二重圧縮試験の模式図。45°方向圧縮前にメッシュ加工を施し、45°方向圧縮により働いたせん断ひずみ量を評価した。

45°方向圧縮後のIQマップ，未変形部に対する結晶回転量の分布，模式図である．図6(d)，(f)の右上に圧縮時にシュミット因子が0.5となる底面すべり方向が示されている．0°方向圧縮により形成されたKB1は上下方向に三分割されており，45°方向圧縮によりKB1の結晶回転量とK1のキング界面の法線はそれぞれ，上部では $\Delta\theta = -12^\circ$ ， $\Delta\phi = -6^\circ$ ，中央部では $\Delta\theta = -13^\circ$ ， $\Delta\phi = -12^\circ$ ，下部では $\Delta\theta = -12^\circ$ ， $\Delta\phi = -6^\circ$ 変化した．詳細は文献<sup>(19)</sup>を参照いただきたいが，これらの変化をrank-1接続により半定量的に評価すると，KB1において $\Delta\theta$ と $\Delta\phi$ が負の値であるためには45°方向圧縮によって未変形部に働くせん断とは逆方向のせん断がKB1で生じなければならなかった．

図7(a)，(b)はそれぞれ45°方向圧縮前後におけるメッシュ痕のBSE像，図7(c)は $\epsilon$ の分布である．図7(c)の左上に圧縮時にシュミット因子が0.5となる底面すべり方向が示されている．M1，M2とKB2における $\epsilon$ はいずれも0.05以上であった． $\epsilon$ の平均値はM1，M2では0.149，0.11であり，KB2においては0.109であり，働いたせん断は外力によるせん断方向と一致していた．一方，KB1における $\epsilon$ の平均値は0であった．図7(c)の拡大図が示すように，部分的に $\epsilon$ が負となるせん断が生じた領域が存在していた．すなわちKB1で働いたせん断は部分的に外力によるせん断方向とは逆であり，実際に逆変形が生じていたことが確認された．

結晶方位解析とメッシュ痕によるせん断ひずみ量の解析結果から，キング組織を外力によってすべり変形させると一部のキングバンドでは外力に逆らった変形が生じることが明らかにされた．こうした変形はすべり系が一つに限定されたキング組織において剥離や割れを生じさせないために生じていると考えられる．Rank-1接続を用いた最新の研究では，キ

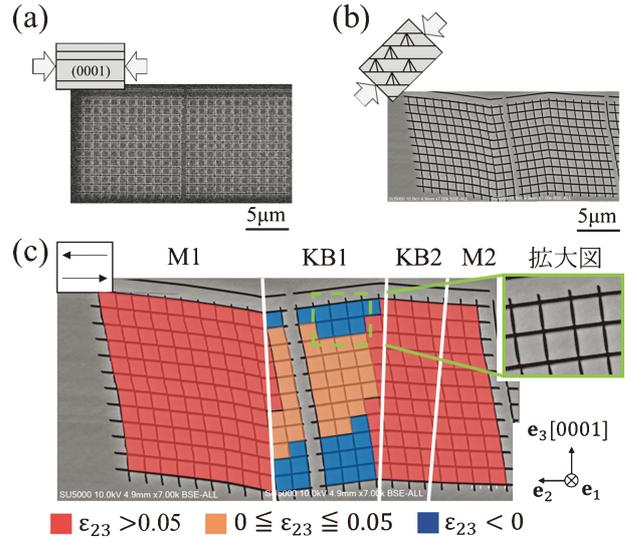


図7 メッシュ痕のBSE像．(a)，(b) 45°方向圧縮前と後．(c) せん断ひずみ量のマッピング．赤色は $\epsilon > 0.05$ ，オレンジ色は $0.05 \geq \epsilon \geq 0$ であり外力によるせん断応力と同符号，青色は $\epsilon < 0$ であり，外力によるせん断応力と逆符号である．(オンラインカラー)

ング組織が変形の連続性を保ったまま外力によりすべり変形されるためには，外力に逆らった変形が一部のキングバンドで生じる必要があることが理論的に示されている<sup>(29)</sup>．外力に逆らった変形が強制されたキングバンドは変形応力の上昇をもたらすため，このようなキングバンドはキング強化の一因になると考えられる．

## 5. ま と め

Rank-1接続を用いたキングの幾何学解析と変形挙動解析により，①キング界面とすべり変形の交差部に回位が形成される，②それら交差部ではキング界面の平行移動が強制される，③外力に逆らった変形を強制されるキングバンドが存在する，ことの3つを見出し，さらにそれらが強化機構として働くことを明らかにした．この強化は材料組織の構成単位(本研究ではキングバンド)の形状変化に依存する強化であり，塑性変形素過程の障害による強化とは別物で共存し得るので，従来の転位論的強化に重畳して発現することは強調しておきたい．これらの強化機構は，いずれもすべり系が限定され，層面の切断が容易でない層状構造物において変形の連続性を保つために課される変形の拘束に起因して発生する．この共通点は，キング強化をもたらす条件を考察する上で重要な特徴であると考えられる．現在は，rank-1接続を用いた幾何学理論とデジタル画像相関法を用いた変形挙動解析によりこれら強化機構の解明を目指している．

本稿で紹介した研究は東京科学大学，稲邑朋也教授のご指導，ご助言のもと院生の上田佑理氏，鞆嶋春輝氏と共同で遂行されました．また，電気通信大学の篠原百合准教授にも多

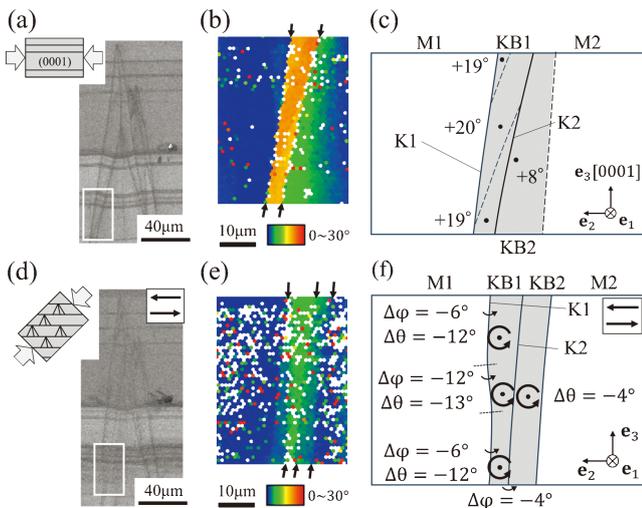


図6 圧縮試験後のキング組織．(a)-(c)は0°方向圧縮後の注目するキングのIQマップ(a)，未変形部に対する結晶回転量の分布(b)，模式図(c)である．(d)-(f)は45°方向圧縮後のキングのIQマップ(d)，未変形部に対する結晶回転量の分布(e)，模式図(f)である．(オンラインカラー)

