金属表面接着銅膜材の疲労損傷形態の特徴とその支配要因 (膜材の変位場と樹脂接着層に注目して)[†]

鳥居 太始之* 馬 東 輝**
松 葉 朗*** 清 水 憲 一*

Fatigue Damage Behavior and Its Controlling Factor in Copper Films Bonded to Base Metal — Noting Displacement Field in Films and Resin Bonding Layer —

by

Tashiyuki TORII*, DongHui MA**, Akira MATSUBA*** and Kenichi SHIMIZU*

As model specimens of surface film-bonded materials, pure copper films with the thickness of 100, 50, 30 μm were bonded to the surface of steel base plate by epoxy resin bonding or by diffusion bonding. As a result of fracture surface observation for the fatigue crack initiation at the notch root, there was a tendency for the fracture surface morphology to show fracture with intergranular cracking for the epoxy-bonded copper film but shear type with transgranular cracking for the diffusion-bonded film, respectively. Moreover, many fatigue cracks with very few slips were caused only on the surface film at the multiple sites sufficiently away from the notch root on the epoxy-bonded films. In contrast, on the diffusion-bonded film, a fatigue crack with many slips was caused only at the notch root and propagated through the thickness including the base plate. Furthermore, some thin extrusion-like bulging could be observed partially along the fatigue crack on the epoxy-bonded film, while many pairs of “intrusion” and “extrusion” were observed predominantly at the slip band near the fatigue crack on the diffusion-bonded film as well as on the bulk metal specimens. The difference in fatigue damage behavior between the epoxy-bonded and diffusion-bonded films was discussed in terms of elastic displacement field propagated by wave into the films from the base plate subjected to cyclic deformation.

Key words : Fatigue damage, Crack initiation, Slip lines, Pure copper film, Surface film-bonding, Epoxy resin, Film thickness

1 緒 言

最近、マイクロマシーン、電子部品および機能性部品など膜接着材料が多く使用され、例えばプリント基板の疲労寿命について検討されているが、^{1)~3)}膜接着界面に注目した接着薄膜材の疲労特性についての報告はほとんどみられない。一方、基板に接着した薄膜材の力学的特性に注目すると、例えば応力やひずみを介して薄膜材とバルク材を比較しても、その幾何学的構造支配因子が違う点に注意が必要である。すなわち、バルク材では3次元自由に広がりを持つが、基板接着薄膜^{4), 5)}は、薄い寸法とともに片側に接着界面を持つ構造となっている。特に、接合界面の影響は表面膜が薄くなるほど幾何学的寄与の割合は大きく、小型化製品の信頼性を確保する上で重要な課題であると考えられる。

著者らは、このような幾何学的構造支配因子が薄膜材の疲労損傷に与える影響を明らかにするため、これまでに厚さ 100 μm の工業用純鉄膜および厚さ 100 μm と 50 μm の純銅膜を、母材にエポキシ樹脂接着する場合と直接金属同士を拡散接合する場合の二種類のモデル試験

片を製作した。両材の疲労試験結果の比較によって、切欠き底からの疲労き裂伝ば挙動に及ぼす樹脂接着層の影響について検討した。^{6)~8)}その結果、中間層である樹脂接着層は表面膜に生じた疲労き裂が内部母材へ伝ばするのを抑制するために、樹脂接着材全体の疲労寿命は拡散接合材のそれと比較して増加することを示した。しかし、表面膜上の疲労き裂発生寿命は早くなり、またその接着膜自身の疲労損傷形態の特徴については十分明らかでなかった。そこで、表面銅膜自身の疲労によるすべりおよびき裂発生に対して高倍率で表面観察を行い、また疲労破面観察において接着界面の影響を調べ、疲労損傷形態の特徴を検討した。さらに実験結果に対しては、母材から銅膜材への変位の伝達に及ぼす樹脂接着界面の影響に注目し、疲労損傷形態の特徴について考察した。

2 実験方法

2・1 試験片

供試材の化学成分を Table 1 に示す。膜材には厚さ t_f が 100, 50, 30 μm の3種類の純銅膜を、また母材には S45C を用いた。母材と膜材の接着には一液性エポキシ

[†] 原稿受理 平成 19 年 2 月 13 日 Received Feb. 13, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻 〒700-8530 岡山市津島中, Graduate School of Natural Sci. and Tech., Okayama Univ., Tsushima-naka, Okayama, 700-8530

** 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中, Graduate School of Natural Sci. and Tech., Okayama Univ., Tsushima-naka, Okayama, 700-8530

*** 正 会 員 広島県立東部工業技術センター 〒721-0974 福山市東深津町, East. Hiroshima Pref. Indust. Res. Inst., Higashifukatsu-cho, Fukuyama, 721-0974

(スリーボンド製 2242) を用いた。樹脂の縦弾性係数は $E = 5.4\text{GPa}$ であり、膜 (銅) の $E = 123\text{GPa}$ および母材 (S45C) $E = 206\text{GPa}$ よりかなり小さい。試験片は膜材および母材を Fig. 1 の寸法に機械加工後、膜材を 873K-1h 保持、母材を 1173K-1h 保持の条件でそれぞれ焼なましを行い、373K-40 分保持の条件で両材をエポキシ接着した。その後、試験片中央に直径 0.5mm の貫通穴を開け、これを樹脂接着材とした。各膜厚の断面観察結果を Fig. 2 に示すように、膜材と母材はほぼ様な樹脂層厚さを介して接合されている。さらに、結晶粒径については、膜厚 $100\mu\text{m}$ で 3~4 個、 $50\mu\text{m}$ で 2~3 個、および $30\mu\text{m}$ で 1 個程度であった。一方、比較のため形状寸法が同一の膜材と母材を温度 1073K-1h 保持の条件で拡散接合後 873K-1h 保持で焼なましをした試験片も製作した。ただし、その結晶粒径は平均して樹脂接着銅膜の結晶粒径より 2~3 倍程度で大きくなったが、樹脂接着層の有無による定性的説明の比較に用いた。なお、拡散接合にはこれまでと同様に^{(6)~(8)}治具を用いて拘束された試験片に真空加熱による圧縮熱応力を発生させる方法を用いた。

2・2 疲労試験

疲労試験は、電気油圧式疲労試験機サーボベット Lab5

Table 1 Chemical composition.

	mass %						
	Al	Ni	Sn	Pb	Fe	Zn	Mn
Cu (film)	0.00005>	0.00005>	0.00005>	0.00005>	0.00005>	0.00005>	0.00004
	C	Si	Mn	P	S		
S45C (base)	0.45	0.18	0.78	0.012	0.006

Fig. 1 Dimension of epoxy-bonded specimen.

Fig. 2 Optical micrograph through the thickness of the epoxy-bonded film.

(島津製) を使用し、母材のチャック部に応力振幅 $\sigma_a = 140\text{MPa}$ 、応力比 $R = -1$ 、繰返し速度 20Hz、正弦波形の条件で行った。き裂長さの測定には、試験機に取り付けた倍率 100 倍の移動式光学顕微鏡を用いた。

3 実験結果

3・1 疲労過程の膜上ひずみ計測

Fig. 1 の寸法形状で穴のない試験片中央に長さ 1mm のひずみゲージを貼り、疲労過程での最大軸方向ひずみを計測した。その結果について膜厚 $t_f = 100\mu\text{m}$ の例を Fig. 3 に示す。これより、疲労過程でほぼ一定であり、樹脂接着材 (接着層厚さ $t_s = 22\mu\text{m}$) と拡散接合材でひずみの差はないことがわかる。このような縦方向のひずみは、膜厚 $t_f = 50\mu\text{m}$ の試験片の両接合材についても、同様であった。

3・2 中央切欠きからの疲労き裂伝ば挙動

Fig. 4 は膜表面で測定した膜厚 $t_f = 100, 50$ および $30\mu\text{m}$ の樹脂接着材の疲労き裂伝ば曲線であり、図中 A, B は試験片の両面を意味している。これより、拡散接合材では母材単体と同様のき裂伝ば挙動となるが、樹脂接着材ではき裂発生直後の伝ばは速く、その後徐々に伝ばが遅くなり疲労寿命が増加することがわかる。その傾向は $t_f = 50$ および $30\mu\text{m}$ と薄膜化に伴って顕著になり、き裂はほぼ停留していることがわかる。

次に、膜厚 $t_f = 100\mu\text{m}$ の樹脂接着試験片 ($t_s = 47\mu\text{m}$) および拡散接合材に対して疲労破面を観察した。その結

Fig. 3 Maximum longitudinal strain during fatigue. ($t_f = 100\mu\text{m}$)

Fig. 4 Fatigue crack propagation curves from the notch root.

果をそれぞれ Fig. 5 および Fig. 6 に示す。両図において、(a) はき裂の発生起点である切欠き底を含む破面のマクロ観察、さらに、(b) は A, B 領域を拡大して観察した結果である。Fig. 5 より、樹脂接着された銅膜では、粒状破面が多く観察され、特にき裂発生直後の領域である切欠き底付近において、明瞭な粒界ファセットが生じていることがわかる。一方、Fig. 6 の拡散接合された銅膜の破面写真では、結晶粒に対応した比較的大きく平坦な領域が観察され、Fig. 5 の結果とは相違している。また、Fig. 6 の破面を走査電子顕微鏡 (SEM) 上で傾けて斜めから観察した結果、荷重軸に対してある角度で傾斜していたので、この領域はすべり面に沿うせん断支配の破面であると考えられる。このように、拡散接合銅膜ではせん断支配の粒内延性破面であるのに対し、樹脂接着銅膜では粒界破面を含み、割れが支配的な破面であることがわかる。

3・3 複数疲労き裂の観察

膜厚 $t_f = 50\mu\text{m}$ の樹脂接着膜および拡散接合膜の表面において、中央付近の広い領域で観察した疲労き裂の例として、それぞれ応力繰返し数 $N = 1.0 \times 10^7$ および $N = 7.3 \times 10^5$ で得られた結果を Fig. 7 (a) および (b) に示す。これより、図 (b) の拡散接合膜では中央穴からのみき裂は伝ばし、すべりを伴っているが、図 (a) の樹脂接着膜では、中央からのき裂は小さく、すべりも少ないことがわかる。また、樹脂接着膜材では中央穴からのき裂以外に周辺以外の場所にもすべりを伴わないき裂が多数発生している。このような観察される多数のき裂を“複数き裂”と呼ぶ。なお、膜厚 $t_f = 100\mu\text{m}$ および $30\mu\text{m}$ についても同様であった。

さらに、複数き裂の膜厚さ方向について調べるため、膜厚 $t_f = 50\mu\text{m}$ の樹脂接着材を用い、軸方向に切断した膜断面上において行った複数き裂の観察例を Fig. 8 に示す。このように複数き裂の厚さ方向には、図 (a) の銅膜を貫通しているもの (Type A) と図 (b) の貫通していないもの (Type B) とがあるが、いずれもき裂は表面銅膜

のみに生じており、樹脂接着層および内部母材にはき裂は生じていないことがわかる。

次に、樹脂接着膜表面の複数き裂が応力繰返しなどの時期に発生するかを調べるため、疲労過程の膜上のレプリカをとり、長さが $50\mu\text{m}$ 以上のき裂を光学顕微鏡により中央 $10 \times 10\text{mm}^2$ の範囲で計測した。その結果を中央穴以外のき裂の発生個数 n として Fig. 9 に示す。これより、各膜厚とも、すべりを伴わない多数のき裂は疲労過程のかなり早い時期に発生していることがわかる。また、膜厚さによる影響として、測定された疲労き裂の数は $t_f = 100\mu\text{m}$ が最も多く、膜厚の低下に伴って減少している。また、き裂の寸法を調べるため、繰返し数 $N = 1.0 \times 10^6$ において、Fig. 9 に示した複数疲労き裂の全長 $2a$ を測定した。その繰返し数におけるき裂長さのヒストグラムを Fig. 10 に示す。これより、樹脂接着膜上で生じやすい疲労き裂は長いき裂となりにくいことがわかる。また、膜厚で比較すると、膜厚が小さいほどき裂長さは短いことがわかる。

3・4 き裂周辺の高倍率観察および凹凸測定

Fig. 7 の光学顕微鏡観察 ($t_f = 50\mu\text{m}$) においてき裂周辺のすべりは、樹脂接着膜上と拡散接合膜上では著しい相違がみられたので、中央き裂付近に示されている図中 (a) の記号 C および (b) の E の領域の SEM 観察を行い、その結果を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。なお、Fig. 7 の記号 C および E の位置では、膜接着条件およびき裂長さが違うので、厳密な破壊力学パラメータ K の比較はできないが、き裂長さが違っても樹脂接着層の有無による観察結果の特徴は大きく変わらないと考えている。これより、樹脂接着膜 (Fig. 11) では、き裂周辺で“突き出し”に似た薄い舌状の押出し部分が観察されるのに対して、拡散接合膜 (Fig. 12) では通常のすべり形態と同様な“突き出し”と“入り込み”が対になっていることがわかる。このような両膜材で異なる SEM 観察結果に対して、Fig. 11 (a) および Fig. 12 (a) それぞれの破線 (sf) 部分においてレーザー顕微鏡による膜表面の凹凸形状を測定した。

(a) Macroscopic view.

(b) Detail of A.

Fig. 5 Fracture surface observed near notch root of epoxy-bonded plate. ($t_f = 100\mu\text{m}$)

(a) Macroscopic view.

(b) Detail of B.

Fig. 6 Fracture surface observed near notch root of diffusion-bonded plate. ($t_f = 100\mu\text{m}$)

(a) Epoxy-bonded film ($\sigma_a = 140\text{MPa}$, $N = 1.0 \times 10^7$). (b) Diffusion-bonded film ($\sigma_a = 140\text{MPa}$, $N = 7.3 \times 10^5$).Fig. 7 Fatigue crack observation on the copper film. ($t_f = 50\mu\text{m}$) Fig. 8 Optical micrograph of multiple fatigue cracks through the thickness of epoxy-bonded film. ($t_f = 50\mu\text{m}$, $N = 1 \times 10^7$)

Fig. 9 Number of initiated cracks during fatigue on the epoxy-bonded film.

その結果を Fig. 13 に示す。図において、a、b および s、f はそれぞれ Fig. 11 (a) および Fig. 12 (a) の記号に対応している。これより、樹脂接着材の特徴としては、盛り上がりを生じた領域中 (ab) の中にき裂はへこみとなっており、全体としては入り込みのようなくぼみはなく凹凸の少ない比較的平坦な表面となっている。それに対して、

拡散接合材では、き裂はすべりによるとと思われる段差が著しい領域にあり、また広い領域において“突き出し”と“入り込み”の対に対応する凹凸が数多く形成されている。

さらに、Fig. 7 (a) の樹脂接着膜上において、中央き裂から離れた複数き裂 (記号 D) 領域の SEM 観察を行った。

Fig. 10 Distribution of crack length for multiple fatigue cracks on the epoxy-bonded film. ($N = 1.0 \times 10^6$)

(a) Observation near the crack.

(b) Detail of [F].

Fig. 11 SEM micrograph of slip band near the fatigue crack observed at [C] shown in Fig. 7 (a). (Epoxy bonding, $t_f = 50 \mu\text{m}$)

他の膜厚さについても同様に複数き裂の SEM 観察を行い、膜厚さ $t_f = 100, 50, 30 \mu\text{m}$ の結果を、それぞれ Fig. 14, Fig. 15 および Fig. 16 に示す。これより、複数き裂は細い溝のようなへこみはあるが、各図 (b) の矢印に示すように“突き出し”に似た箔状の押し出し部がみられる。また、これは Fig. 11 (b) で示した $t_f = 50 \mu\text{m}$ 樹脂接着膜の中央き裂周辺の観察結果と同様であることがわかる。このように、樹脂接着した銅膜上のき裂周辺では、すべりによる凹凸は小さいがかなりの領域で盛り上がりを生じており、凹凸の激しい拡散接合した銅膜上の通常のすべり模様とは相違している。なお、樹脂接合膜および拡散接合膜では引張残留応力が生じており、⁸⁾ き裂はすきまになることが考えられるが、盛り上がりに関連した疲労損傷を生じる別の要因として、以下に考察を加えた。

(a) Observation near the crack.

(b) Detail of [G].

Fig. 12 SEM micrograph of slip band near the fatigue crack observed at [E] shown in Fig. 7 (b). (Diffusion bonding, $t_f = 50 \mu\text{m}$)

Fig. 13 Surface profile near the fatigue crack measured by laser microscope.

4 考 察

4・1 膜材への変位伝達の考え方

実験結果において、樹脂接着膜と拡散接合膜では、同じ繰返しひずみ条件下においてもその疲労損傷形態は異なっていた。また、樹脂接着膜では通常の拡散接合膜材や金属パルク材に見られるすべり変形が生じにくく、また疲労後には膜表面の凹凸は小さい。また疲労破面において割れタイプの様相を呈した。これより、樹脂接着膜では母材から膜への変位伝達の過程において、樹脂中間層のない拡散接合膜に比べて、せん断変形が抑制されている結果になったと考えられる。このように軸方向ひずみが同じでも樹脂接着層の有無による変位伝達の違いが生じる理由について、変位は波として伝達されること⁹⁾に着目した。

(a) Observation of a fatigue crack.

(b) Detail of [H].

Fig. 14 SEM micrograph of a multiple fatigue crack observed on epoxy-bonded film. ($t_f = 100\mu\text{m}$)

(a) Observation of a fatigue crack.

(b) Detail of [I].

Fig. 15 SEM micrograph of a multiple fatigue crack observed at [D] shown in Fig. 7 (a). (Epoxy bonding, $t_f = 50\mu\text{m}$)

等方弾性体としての変位は、Fig. 17 のように進行方向に振動する縦波と進行方向に直角方向に振動する2つの横波によって表されることが知られている。⁹⁾すなわち、図 (a) のように荷重方向では縦波いわゆる粗密波であり、

(a) Observation of a fatigue crack.

(b) Detail of [J].

Fig. 16 SEM micrograph of multiple fatigue cracks observed on epoxy-bonded film. ($t_f = 30\mu\text{m}$)

(a) Longitudinal wave.

(b) Transverse wave.

Fig. 17 Displacement behavior due to plane elastic wave with longitudinal propagation.

粗の部分では格子は広がり密な部分では格子間隔は狭く、空間的な周期性により変位が伝達される。¹⁰⁾一方、図 (b) のように横波は波の進行方向とは直角に変位のずれを生じさせるせん断波である。通常では、両方の波が重畳されるけれども、せん断の変位は生じない条件があると考えられる。縦波だけが強く現われる結果になると考えられる。このような母材からの変位の波が膜材にどのように伝達されるかは接合界面の物性および力学的な性質に影響されることが考えられる。本実験結果において、樹脂接着膜では、横波成分の抑制によってすべり変形が生じにくくなること、その一方で縦波成分により割れタイプのき裂が生じやすくなったと推測される。実際、Fig. 6 の疲労破面において樹脂層付近の膜材では粒界割れなどの破壊の様相が顕著にみられた。このように、樹脂接着により積層膜材の疲労特性が変化するという実験結果について、樹脂接着層が横波としての弾性変位を伝えにくい性質を仮定すれば理解できる。この妥当性については、金

属接合界面とは違って, 界面樹脂層が粘弾性的性質を持つためか, あるいは規則的な原子配列でないためか, などにより波を伝達しにくい性質との関連があると推測しているが, 引き続き検討が必要である。

4・2 疲労損傷の特徴とその解釈

前項において, 樹脂接着膜材における変位は縦波による粗(膨張)・密(圧縮)が周期的に変化している可能性を示した。この負荷時の周期的変化を伴うエネルギーが, 除荷過程で材料内に吸収され, 応力繰返しごとの重ね合わせにより疲労損傷を生じる可能性が考えられる。¹¹⁾

さて, 固体内で縦波により格子が粗あるいは密になれば, 局所的には圧縮が生じている場所が存在している。その場所では盛り上がりが生じ, また圧縮による割れが Fig. 18 のモデルに示すように, せん断を介して生じることが考えられる。すなわち, 2つのせん断により小さなファセットに碎かれて破壊する場合,¹²⁾あるいは切欠き部より離れて変形量が大きくない場所での複数き裂では, 1つのせん断による“突き出し”のみが生じる場合もあると考えられる。また, このような損傷の特徴として, 圧縮のため盛り上がり, その場所のき裂は進展しにくいことが推測される。実際に, 樹脂接着材の実験結果において, 中央き裂周辺では塊状の表面凹凸 (Fig. 11) がみられ, 破面観察でも小さなファセットを伴う塊状(粒状)呈していること (Fig. 5), また複数疲労き裂は小さくその周辺は盛り上がり, “突き出し”に似た箔状の押し出し部が観察された結果 (Fig. 11, 14, 15 および 16) を理解できる。

5 結 言

膜厚を変えた銅膜を樹脂接着および拡散接合した積層銅膜試験片を製作し, 表面銅膜上の疲労損傷形態について検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 中央切欠きより発生した疲労き裂の破面観察において, 拡散接合銅膜では粒内延性破面が支配的であった。一方, 樹脂接着膜では粒界を含む塊状(粒状)破面となり, 割れが支配的な破壊様相を示すことがわかった。
- (2) 拡散接合銅膜では, 中央切欠きより疲労き裂発生・伝ばという通常単体で見られる挙動と同じであった。一方樹脂接着銅膜材では, 中央切欠き以外にも多数の疲労き裂が疲労初期に発生したが, き裂は成長することなく, 樹脂接着膜材全体の疲労寿命は増加した。
- (3) 拡散接合銅膜上の疲労き裂周辺では, “突き出し”および“入り込み”の対となったすべりが多く観察された。一方, 樹脂接着銅膜上では小さなき裂が多数観察され, そのき裂周辺には部分的に盛り上がり, すべりをあ

まり伴わないこと, また細かい溝がき裂として観察され, 周辺に“突き出し”に似た薄状の押し出し部分が特徴的にみられた。

(4) 応力繰返しを受ける母材から樹脂接着された銅膜への変位伝達において, すべりを生じる横波が伝わりにくいこと, さらに縦波の密(圧縮)による破壊が生じることが実験結果から推測されることを, 等方弾性体の波が持つ性質に基づいて説明した。

終わりに, 本研究は科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 16360056) の援助のもとに行った。記して謝意を表する。また, 実験に協力いただいた当時岡山大学大学院生岡本健児君および片山喜理君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) A. J. Scholand, R. E. Fulton and B. Bras, “An Investigation of PWB layout by genetic algorithms to maximize fatigue life”, Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.121, No.1, pp.31-36 (1999).
- 2) Sidharth and D. B. Barker, “Vibration induced fatigue life estimation of corner leads of peripheral leaded components”, Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.118, No.4, pp.244-249 (1996).
- 3) R. S. Li, “A methodology for fatigue prediction of electronic components under random vibration load”, Transactions of the ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.123, No.4, pp.394-400 (2001).
- 4) E. Sato, Y. Ikezoe and J. Kato, “Metal core copper clad Laminates”, Hitachi Chemical Technical Report, Vol.8, pp.15-18 (1987).
- 5) X. Fan, “Combined thermal and thermomechanical modeling for a multi-chip QFN package with metal-core printed circuit board”, Proceedings of The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Vol.2, pp.377-382 (2004) IEEE.
- 6) T. Torii, A. Matsuba and S. Watanabe, “Effects of adhesive resin layer on fatigue crack propagation behavior in film-bonded plates”, Materials System, Vol.17, pp.89-95 (1988).
- 7) A. Matsuba, T. Torii and Y. Yamada, “Fatigue crack propagation behavior in surface film-bonded materials with resin bonding layer - for pure copper and commercial grade iron films”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.51, No.3, pp.286-292 (2002).
- 8) T. Torii and A. Matsuba, “Fatigue crack propagation in surface film-bonded materials using pure copper and commercial grade iron films”, JSME International Journal Series A, Vol.47, No.3, pp.389-396 (2004).
- 9) Y. Takahashi, “A pedestrian approach to quantum field theory from classical field theory (in Japanese)”, pp.37-44 (1985) Kodansha-Scientific Publishers.
- 10) K. Nakamura, “Ultrasonics”, pp.13-21, p.7 (2001) Corona Publishers.
- 11) Y. Takahashi, “Quantum field theory for solid state physics study (in Japanese)”, pp.48-72 (1995) Baifukan Publishers.
- 12) J. E. Gordon, “Structures or why things don't fall down”, translated by H. Ishikawa, pp.258-261 (1991) Maruzen Publishers.

(a) Before deformation. (b) After deformation.

Fig. 18 Compressive deformation model with two slips.