

氏 名	よこ 横	ほり 堀	とし 壽	みつ 光
授 与 学 位	工 学 博 士			
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項			
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻			
学 位 論 文 題 目	金属の疲労き裂成長に関する動力学的研究			
指 導 教 官	東北大学教授 川崎 正			
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 川崎 正	東北大学教授 横堀 武夫		
	東北大学教授 渥美 光	東北大学教授 玉手 統		
	東北大学教授 萱場 孝雄			

## 論 文 内 容 要 旨

**第 1 章 緒言：** 従来，金属の疲労き裂成長に関する理論が多数提出されているが，これらの多くは巨視的かつ静的な取扱いである。疲労き裂成長機構としての微視的模型も提案されているが，この方は幾何学的模型が対象とされたものである。ところで疲労き裂成長速度は本来が動力学的性格を有するものであり，又格子欠陥等の微視的因子と密接に結びついたものである。しかしながら，このような因子を取り入れて動力学に疲労き裂成長理論を導く試みは従来知見されていない。そこで，本論文では，非定常的射出をとまなう転位群の動力学的挙動をコンピュータ・シミュレーションにより解析し，他方，外力の作用のもとで，き裂端から転位が射出される場合の不安定平衡問題を解き，さらにこれらの結果を用いて疲労き裂成長の動力学的理論を導き，著者の行った実験および従来多くの実験的特性を説明できることを示した。

**第2章：** 従来の転位の動力学は孤立単独転位に関するものである。転位群の運動についての解析的取扱もなされているが、この方法では特別な場合しか取扱えないばかりでなく、実際の転位群の動力学の諸挙動、および破壊の問題等において重要となる転位の非定常的湧き出しの効果を取り入れることができない。そこで、第2章～第4章では従来解析されていなかった転位源から転位が外力のもとで1つずつ非定常的に射出されて相互作用を及ぼしながら群運動する場合の射出と動力学の挙動をコンピュータ・シミュレーションにより解析した。第2章は一定負荷応力速度の場合についての研究である。シミュレーション線図の概略を図1に示す。その結果、種々の金属についてのシミュレーションにより、孤立転位に対する転位群中の各転位の有効応力比、速度比、位置比等の転位群中の各転位の動力学の挙動は、負荷応力速度と時間、および物性定数によって定まる(1式)に示す無次元数（動力学係数と名付けている。）によって規定され、この係

$$\Theta^* \equiv \left(\frac{\dot{\tau}}{\tau_0}\right)^{\frac{m+1}{m+2}} \frac{t}{t_0} \quad (\text{無次元形}) \quad \eta^* \equiv \dot{\tau}^{\frac{m+1}{m+2}} t \quad (\text{次元形}) \quad (1)$$

数の関数として(2)式のように表わされることがわかった。

$$\frac{\tau_{\text{eff},i}}{\tau_{\text{iso}}} = F_{1i}(\Theta^*), \quad \frac{V_i}{V_{\text{iso}}} = F_{2i}(\Theta^*), \quad \frac{x_i}{x_{\text{iso}}} = F_{3i}(\Theta^*) \quad (2)$$

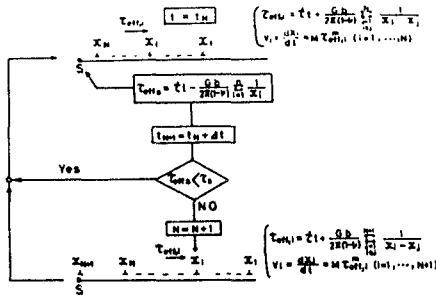


図1 シミュレーションによる解析線図

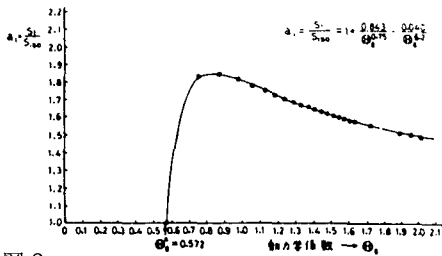


図2 動力学係数 $\Theta_0^*$ の関数としての $a_1$ の値（純粋鉄）  
黒丸印は、コンピュータによる数値解析結果

ここに、 $\dot{\tau}$ ：負荷応力速度、 $t$ ：時間、 $m$ ：孤立転位の運動速度  $V = M \tau_0^m = V_0 (\tau_a / \tau_0^*)^m$  における応力べき乗指数としての物性定数。  $V_0 = 1 \text{ cm/s}$ ,  $\tau_0^*$ ：1個の転位を  $1 \text{ cm/s}$  の速度で運動させるに要する物性定数としての剪断応力、 $M$ ：物性定数、 $M = V_0 (1/\tau_0^*)^m$ ,  $\tau_0 = 1 \text{ kg/mm}^2 \text{ s}$ ,

$$t_0 = \left\{ \frac{(m+1)\ell}{M \dot{\tau}_0^m} \right\}^{1/(m+1)}, \quad \ell: \text{無次元化長さ。}$$

一例として、純鉄の場合のシミュレーション結果を図2に示す。さらに、この動力学係数の物理的意味を考察し、種々の金属について、シミュレーションを行うことにより、任意の時刻までに転位源から非定常的に射出される射出転位数  $n$  もこの動力学係数によって規定され、任意の時刻における負荷応力と時間および物性定数の関数として(3)式および(4)式に示す一般的な関係式で与えられることがわかった。一例として純鉄の場合のシミュ

レーション結果を図3に示す。さらに孤立転位の速度が熱活性化過程に支配される金属では上記射出転位数が孤立転位の場合の定数倍の活性化エネルギーをもつ見掛上単一の速度過程の式で与えられることがわかった。

(i)  $n$  の小さい場合 (例えば純鉄では  $n < 20$ )

$$n = 3.38 m^{-1.34} \left( \frac{b}{t_a V_o} \right)^{-\frac{m}{m+2}} \left( \frac{\tau_o^*}{G} \right)^{-\frac{m^2}{m+2}} \left( \frac{\tau_a}{G} \right)^{\frac{m(m+1)}{m+2}} \quad (3)$$

(ii)  $n$  の大きい場合 (例えば純鉄では  $n > 20$ )

$$n = 1.396 m^{-1.45} \left( \frac{b}{t_a V_o} \right)^{-\frac{m+1}{m+2}} \left( \frac{\tau_o^*}{G} \right)^{-\frac{m(m+1)}{m+2}} \left( \frac{\tau_a}{G} \right)^{\frac{(m+1)^2}{m+2}} \quad (4)$$

ここに、 $b$  : バーガスベクトル,  $G$  : 剛性率,  $t_a, \tau_a : \tau_a = \dot{\gamma} t_a$  で関係づけられる時間および負荷応力である。

又、本シミュレーションから、転位源から射出されようとする転位に作用する back-stress のうちで転位源に最近接する転位が及ぼす back-stress は転位群中の転位全体の back-stress の約 50%~70% を占めていることがわかった。したがって転位源からの転位の射出には、転位群中の他の転位の影響も無視できないものの、転位源に最近接する転位との干渉が重要な役割をはたしていることがわかった。

**第3章 :** 本章では一定負荷応力の下で非定常的射出をともなう転位群の群運動について、コンピュータ・シミュレーションを行った。その結果、この場合は一定負荷応力の場合の動力学係数が導かれ、転位群中の各転位の動力学挙動および任意の時刻まで射出される転位数は、この係数の関数として一意的に定まり、さらに射出転位数については、負荷応力、時間、物質定数の関数として一般的な関係式で表わされることがわかった。

**第4章 :** 第2章、第3章では非定常的射出をともなう同符号転位群運動についてコンピュータ・シミュレーションにより解析を行った。しかしながら、内部で正負同数の転位が反対方向に自由射出運動する転位群の運動モデルも考えられる。本章では、このような転位群の運動モデルに従う時、一定負荷応力速度の下で非定常射出をともなう転位群の群運動における動力学挙動と、任意の時刻までに射出される射出転位数について、コンピュータ・シミュレーションにより解析した。その結果、孤立転位に対する転位群中の先頭転位の有効応力比、速度比、位置比等の動力学挙動は、同符号転位群運動の場合について提案した動力学係数  $\Theta^* \left( \equiv \left( \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_o \right)^{\frac{m+1}{m+2}} \frac{1}{k_0} \right)$  によっては規定され、同符号転位群運動の結果は正負の転位の運動を考えた場合の動力学挙動と定性的によく一致するばかりでなく、定量的にもかなり近い値となっていることがわかった。又、任意の時刻までに射出される射出転位数についてもシミュレーションの結果、同符号転位群

運動の結果と定性的によく一致するばかりでなく、定量的にもかなり近い値をとることがわかり、さらに種々の金属についてのシミュレーションを行い、両者の射出転位数を関係づける補正式を導いた。

**第5章：**本章では疲労き裂成長理論へ応用する際に必要となるき裂端での転位射出条件を応力要件とエネルギー要件の二つの面から考察した。応力要件からはき裂端近傍での負荷力、鏡像力、ledge力の三つの力の不安定平衡問題を解くことにより応力要件による臨界応力拡大係数、 $K_{I,cr,stress}$ を導いた。又エネルギー要件からは、転位の自己エネルギー、ledgeエネルギー、外力により転位ループが広がる際に必要となるエネルギーの三つのエネルギーによる不安定平衡問題を解くことにより、エネルギー要件による臨界応力拡大係数 $K_{I,cr,energy}$ を導いた。ところでき裂端から転位が図4に示すような、すべり面に沿って即時に射出されるには、応力要件とエネルギー要件の双方をみたすことが必要であり、(5式)、(6式)の両方を同時に満足する時、転位はき裂端より即時に射出され、き裂端のbluntingが起こる。本章では、このようなthreshold-stress intensity factorと関係すると思われるき裂端からの転位射出条件に関する臨界応力拡大係数を導びいた。

$$K_I > K_{I,cr,stress} \quad (5)$$

$$K_I > K_{I,cr,energy} \quad (6)$$

**第6章：**本章では第2章から第4章で解析した非定常的射出をとまなう転位群の群運動のシミュレーション結果と第5章のき裂端での転位即時射出条件の結果に基づいて転位群の動力学に基づくmode Iにおける疲労き裂成長理論を導き、応力拡大係数、応力周波数、および金属の物性定数依存性を簡単な形で含む、次のような疲労き裂成長速度式を導いた。

$$\frac{da}{dN} = 1.396 m^{-1.45} b \left( \frac{4fb}{V_0} \right)^{-\frac{m+1}{m+2}} \left( \frac{\tau_0^*}{G} \right)^{-\frac{m(m+1)}{m+2}} \times \left( \frac{\Delta K_I}{\sqrt{\epsilon} G} \right)^{\frac{(m+1)^2}{m+2}} \quad (7)$$

ここに、 $f$ ：応力周波数、 $\Delta K_I$ ：応力幅で表わした応力拡大係数、さらに個々の転位の運動が熱活性化過程に支配される時は、疲労き裂成長速度式は次のような見掛上、単一の熱活性化過程の式となることを示した。

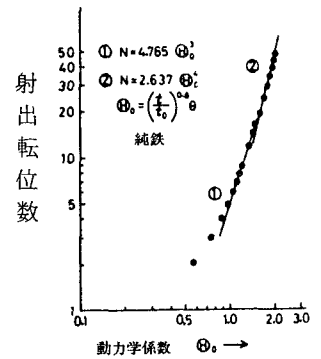


図3. 転位源から射出される転位数  $n$  と動力学係数  $\phi_0$  との関係。黒丸印はコンピュータによる数値解析結果

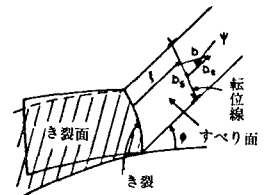


図4. き裂先端の開閉

$$\frac{da}{dN} = 1.396 m^{-1.45} b \left( \frac{A_1 \Delta K_I}{4 f b \sqrt{\epsilon} G} \right)^{\frac{m+1}{m+2}} \exp \left\{ \frac{- \left( \frac{m+1}{m+2} \right) H_k \ln \left( \frac{\tau_{00} \sqrt{\epsilon}}{\Delta K_I} \right)}{4 k T} \right\} \quad (8)$$

ここで、 $T$ ：絶対温度、 $k$ ：ボルツマン定数、 $H_k$ ：キンクエネルギー、 $A_1$ ：孤立転位の速度式  $V = A_1 \exp(-H_k/kT)$  における比例定数、 $m = H_k/4kT$ 、 $\tau_{00} = e^4 (16/\pi) \tau_p^0$ 、 $\tau_p^0 = 0^\circ\text{K}$  における Peierls 応力。又、き裂先端を弾塑性近似した場合と、さらに各繰り返し引張りの開始時にき裂先端が有限な開口変位 (COD) を有する場合について疲労き裂成長速度式を導き、繰り返し歪硬化指数、繰り返し初期降伏応力依存性や、有限な開口を有する場合の効果について論じた。次にこの理論が、従来の mode I における、応力拡大係数、温度、応力周波数等の実験特性を統一的によく説明することを示すと同時に本理論の適用限界について論じた。

**第 7 章：** mode II および剪断形の疲労試験は薄肉中空試験片に繰り返しねじり荷重を負荷することにより理想的に行うことができるが、この方法によって疲労き裂の初期および、その後の伝播挙動について詳細に実験的に調べた例は従来知見されない。そこで本章では 5083 P-O アルミニウム合金を用いて、この実験方法により、初期スリットに mode II 形の疲労荷重を負荷した時の疲労き裂の初期およびその後の伝播挙動について詳細に実験的に調べた。又、初期成長過程においては、局所応力条件と疲労き裂の微視的進展方向との対応を有限要素法による弾性および弾塑性応力解析により考察した。さらにこのような応力条件による疲労き裂成長挙動を mode I 負荷の場合の疲労き裂成長機構と対比し、第 6 章で提案した mode I 負荷の場合の疲労き裂成長理論の適用が可能であることをしめした。

**第 8 章：** 本章は本研究で得られた結論である。

## 審査結果の要旨

金属の疲労き裂成長に関する従来の理論は巨視的かつ静的なものが多い。疲労き裂成長機構の微視的模型も提案されているが、これらは主として幾何学的模型に関するものである。動力学的なものも若干提出されているが限られた範囲の実験結果の説明にとどまっている。本論文は非定常射出をともなう転位群の動力学的挙動をコンピュータ・シミュレーションにより解明し、他方、外力のもとでのき裂端からの転位射出の不安定問題を解き、これらの結果を用いて、き裂成長の動力学的理論を導き、著者による実験をはじめ、多くの実験的特性を統一的に説明できることをしめたもので全文8章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の目的と意義を述べている。第2～第4章は転位源から転位が外力のもとで非定常的に射出されて、相互作用を及ぼしながら群運動する場合の射出と動力学的諸挙動のコンピュータ・シミュレーションによる解析である第2章では一定負荷応力速度のもとで、き裂先端から任意の時刻までに射出される転位数、これら各転位の孤立転位に対する位置比、速度比、各転位に働く有効応力比などの分布を計算し、これらの諸量がいずれも応力速度、時間、物質定数からなる無次元数（動力学係数と名付けている）によって規定され、しかも射出転位数が簡単な表示式で精度よく与えられることを見出している。さらに孤立転位の速度が熱活性化過程に支配される金属では上記射出転位数が孤立転位の場合の定数倍の活性化エネルギーをもつ見掛上単一速度過程の式で与えられた。第3章は一定応力の場合に関するもので、この場合にも射出数と転位群の諸挙動を動力学係数によって定量的に表示する簡単で精度のよい式を与えた。第4章は試片内部からの転位の射出に関するもので、この場合にも射出数と転位群の諸挙動を近似的に動力学係数で表示する式を与えている。第2～第4章で得た結果は全く新しい知見で、基本的・応用的に有用な寄与である。第5章では外力のもとでのき裂端からの転位の射出の不安定問題を力およびエネルギー条件から解き、面心立方および体心立方金属の双方とも開口変位が生ずるという結果を得た。第6章では第2～第5章で得た結果にもとづいて金属疲労き裂成長の理論を導いた。すなわち、応力拡大係数、温度、周波数依存性を簡単な形でふくむき裂成長速度式を導いた。そして本式がMode Iにおけるこれら依存性に関する従来の実験特性と統一的に一致することをしめし、さらに本理論の適用限界を論じている。本理論は独創的であり、かつ実用的にも有用である。第7章では従来ほとんど資料のないMode II型疲労き裂成長に関して実験を行い、新しい知見を得たほか、他方、有限要素法による解析を行って本理論と合うことをしめしている。第8章は結論である。

以上要するに本論文は、従来未開拓であった非定常射出をともなう転位群の動力学的挙動に関する多くの重要な知見を与えただけでなく、多くの実験特性を統一的に説明し得る金属の疲労き裂成長の理論を提出したものであり、材料強度学ならびに機械工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。