

高強度鋼の高サイクル疲労における破壊モード遷移について*

黒島 義人^{*1}, 清水 真佐男^{*2}, 川 崙 一 博^{*3}

Fracture Mode Transition in High Cycle Fatigue of High Strength Steel

Yoshihito KUROSHIMA, Masao SHIMIZU and Kazuhiro KAWASAKI

Rotating bending fatigue tests were carried out on quenched and low temperature tempered SAE 9254 spring steels having two kinds of microstructure in which either isolated defects (retained ferrite) or connected defects (proeutectoid ferrite) are dispersed, with a special interest in the transition of surface to subsurface fracture known as "Fish-eye fracture" in high strength steel. Discussions were made of the relationship between the fatigue fracture mode transition and the surface conditions, and also of the role of the microstructure in the formation of the Fish-eye pattern. Results show that (1) the fracture mode transition occurs in the material having isolated defects in the microstructure when a surface fracture mode is prevented by strengthening the surface layer with mechanical polishing and, (2) such a fracture mode transition is associated with the change in fatigue crack initiation process from slip band cracking of surface retained ferrite to cleavage cracking of internal retained ferrite.

Key Words: Fatigue, Fish-eye, High Strength Steel, Defect, Retained Ferrite, Proeutectoid Ferrite

1. 緒言

静的強度を著しく向上させた高強度鋼においては、(i) 疲労強度が静的強度から期待されるほど高くないこと、(ii) 疲労寿命のばらつきが大きいこと、等一般の鋼とは異なる疲労強度特性を有することが知られている。これらの特徴は、材料の欠陥感受性が高いために材料に含まれる非金属介在物等の欠陥が疲労強度に影響を与えるためと考えられており、著者らは、前報⁽¹⁾において、高強度鋼の疲労破壊において見られる広範な疲労寿命のばらつきが、疲労破壊の起点となる介在物寸法と介在物の寸法分布の関係から説明できることを報告した。また、このように疲労強度が欠陥に支配される場合には、長寿命域において材料内部の欠陥からき裂が発生、進展する Fish eye 破壊が生じることも知られており、近年、繰返し数が 10^9 回を越える超長寿命域においても Fish eye 破壊が生じ、明確な疲労限度が現れないこと

が報告されている⁽²⁾。このことは、Fish eye 破壊を生じる高強度鋼においては、これまでのように 10^7 回の疲労寿命に対応する応力振幅の域値を疲労限度として定めることができないことを示唆している。従って、高強度鋼の信頼性の向上や、さらなる疲労強度の改善のためには、Fish eye 破壊をも含めて、広範な寿命域における疲労破壊挙動を明らかにしなければならない。

従来、Fish eye 破壊が生じる高強度鋼においては、応力レベルの低下に伴い、破壊モードが表面破壊型から Fish eye を生じる内部破壊型へと遷移し、同時に S-N 曲線が 2 段に折れ曲がることが報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。前報の疲労試験(図1)においても同様の挙動が認められている。しかしながら、その遷移条件、遷移機構等は未だ不明である。一つの説明として、これまで表面破壊型の寿命曲線と Fish eye 破壊型の寿命曲線の競合関係に支配されて破壊モードの遷移が起きるとする可能性が論じられているが⁽⁵⁾、明確な答えは得られていない。

そこで本研究では、上述の破壊モードの遷移機構を明らかにする目的で通常は表面破壊が支配的である高強度鋼において、如何なる表面状態の変化に伴い Fish eye 破壊型の内部破壊が生じるかを調べた結果にもと

* 平成3年11月1日 材料力学講演会において講演、原稿受付 平成4年7月23日。

*¹ 正員、慶應義塾大学大学院 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

*² 正員、慶應義塾大学理工学部。

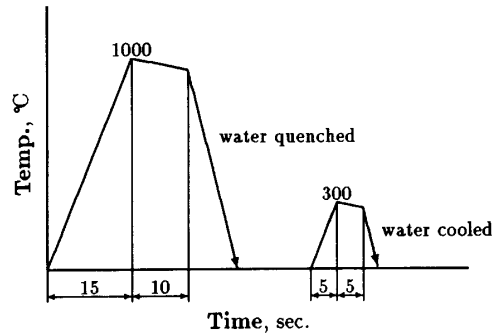
*³ (株)高周波熱錬 (〒254 平塚市田村5893)。

づいて、疲労破壊モードを支配する欠陥分布、表面状態の役割について検討した。

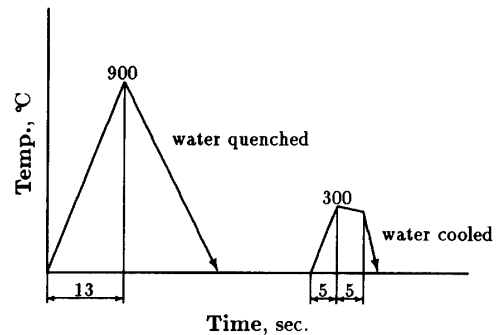
2. 実験方法

供試材としては、表 1 に示す化学成分を有する SAE 9254 鋼を用い、同材を前報と同様の試験片形状に機械加工後、図 2(a), (b) に示す熱処理により残留フェライトおよび初析フェライトの 2 種類の組織的弱部を含む不完全焼入れ組織を調整した。両組織の顕微鏡写真を図 3 に示すが、ここで残留フェライトを含む不完全焼入れ組織は、残留フェライトが極く少量マルテンサイト内に点在するかたちで組織中に分布しており、フェライト・マルテンサイト二相組織鋼のいわゆる連結材⁽⁶⁾において、フェライト相が極端に小さくなった場合に相当している。一方、初析フェライトは組織中に互いに近接して、それらの多くが連続的につながった状態で存在しており、残留フェライトとはその形態、及び分布状態に著しい相違が認められる。そこで、以後、残留フェライトを組織的欠陥として含む不完全焼入れ組織を孤立欠陥材、初析フェライトを含む不完全焼入れ組織を連続欠陥材と呼ぶことにする。疲労試験に先だて、孤立欠陥材の一部は、試験片 R 部の表面加工層の影響を除去するために電解研磨を施すことにより R 部を鏡面状に仕上げた。一方、残りの孤立欠陥材と連続欠陥材は、表面加工層が破壊形態の遷移に与える影響を検討する目的で、バフ研磨により R 部を鏡面状に仕上げた状態で疲労試験に供した。以後、孤立欠陥材について研磨方法の差異により電解研磨材、機械研磨材と呼ぶことにする。これらの試験片について、小野式回転曲げ疲れ試験機 (98kN, 2850rpm) により、回転曲げ疲

れ試験を行った。疲労試験後、破断した試験片については、破壊起点部、及びその近傍を走査型電子顕微鏡 (以下、SEM と記す) を用いて詳細に観察した。また、加



(a) 孤立欠陥材



(b) 連続欠陥材

図 2 熱処理条件

表 1 化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
SAE9254	0.55	1.44	0.60	0.028	0.004	0.67

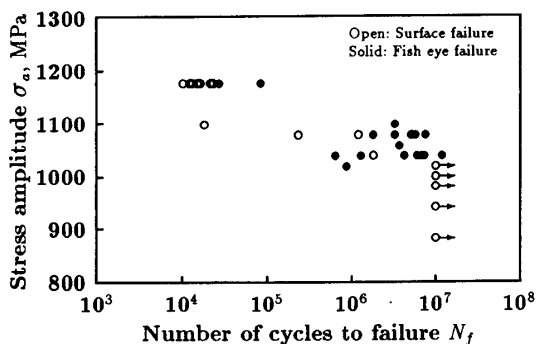
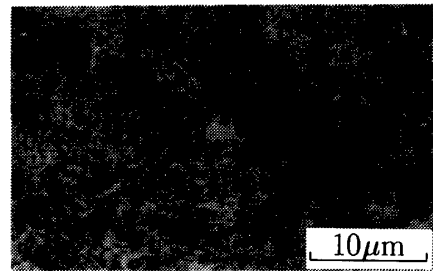
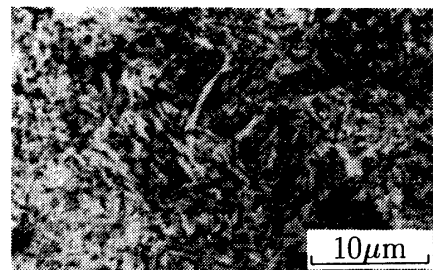


図 1 疲労試験結果⁽¹⁾



(a) 孤立欠陥材



(b) 連続欠陥材

図 3 組織様相

工層の有無を確認するため、電解研磨材、機械研磨材のマイクロビッカース硬さ(50g, 50点平均)と残留応力を測定した。残留応力測定は、理学電機製微小部X線応力測定装置(PSPCシステム, 測定領域 $\phi 0.15\sim 4\text{mm}$)により、測定領域 $\phi 1\text{mm}$ として行った

3. 結果および考察

3.1 電解研磨材の疲労破壊挙動 電解研磨材(表面を電解研磨した孤立欠陥材)の組織に含まれる残留フェライトは、以前、山田ら¹¹が不完全高周波焼入れ鋼の疲労破壊挙動を支配する組織因子として注目した残留フェライトとは異なり、その寸法が著しく小さく(約 $5\mu\text{m}$)、また、その周囲は $H_v\approx 700$ 近い高硬度のマルテンサイトに囲まれており、繰返し応力のもとですべり変形に対して大きな拘束を受けた状態にあるといえる。従って、かかる微細な残留フェライトが、これまで知られている残留フェライトの疲労破壊挙動と同様な挙動を示すかは、興味をもたれるところである。

図4に電解研磨材の疲労試験結果を示す。一本の試験片が介在物を起点とするFish eye破壊(図中●)を生じたが、他の試験片は全て表面破壊を生じ、その起点部には介在物の存在は一切認められなかった。

かかる表面破壊が組織中の如何なる部分から発生したか調べるために、破断起点部近傍を軽くナイタル腐食した後に、SEM観察したところ、図5に示すように、破断起点部として、扁平形状のフェライトが確認された。同時に、試験片表面の起点部近傍に顕著なすべりを生じている残留フェライトの存在が複数個、認められた。

本研究では、残留フェライト寸法が著しく微小なため、光学顕微鏡による疲労過程での残留フェライトのすべり変形挙動の直接観察は行い得なかったが、上述の観察結果より、電解研磨材の表面破壊は表面の微小な残留フェライトのすべりによって誘起されるものであるといえる。

3.2 孤立欠陥材の疲労挙動に及ぼす表面加工層の影響 機械研磨材では、加工層の影響(加工硬化及び残留応力)により、電解研磨材に比べて表面が実質的に強化されていると考えることが出来る。事実、表面硬さは、電解研磨材が $H_v=693(644\sim 780)$ であるのに対して、機械研磨材では、 $H_v=718(671\sim 795)$ と僅かに向上しており、一方、X線法により測定した表面の残留応力は、電解研磨材では殆ど認められないのに対して、機械

研磨材では、表面に約 $400\sim 600\text{MPa}$ の圧縮残留応力の存在が確認された。

このような加工層の存在が、孤立欠陥材の疲労破壊挙動に対して、如何なる影響を及ぼすかをみるために、機械研磨材の疲労試験結果(□, ■)を、前節の電解研磨材のそれ(○)と比較して図6に示す。これより、機械研磨材の疲労寿命は、加工層の影響によって約10倍程、改善されており、しかも、疲労破壊は表面からは発生せず、破面にFish eyeを形成する内部破壊となることが明かとなった(図7)。このことは、加工層による表面の強化が、残留フェライトからの表面き裂発生を抑制した結果、表面強化の影響が及ばない材料内部の欠陥から疲労破壊が生じるようになったためと考えるこ

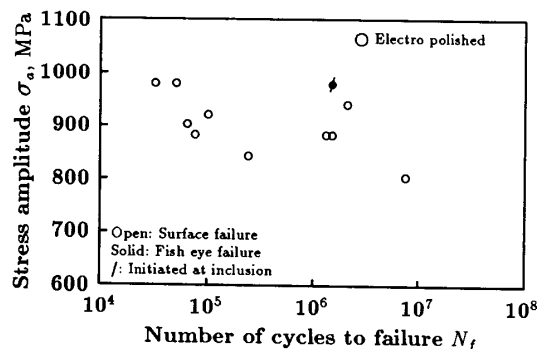


図4 疲労試験結果(電解研磨材)

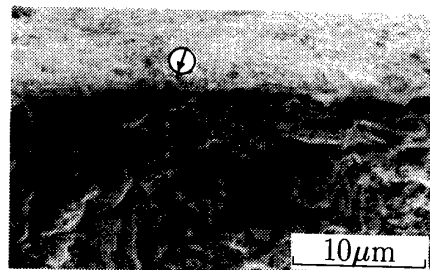


図5 破壊起点部に認められるフェライト

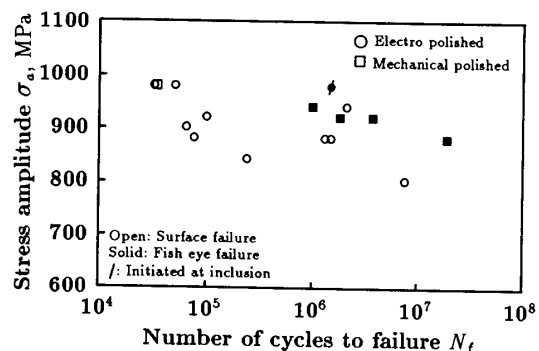


図6 疲労試験結果(機械研磨材)

¹¹山田らによれば、不完全焼入れ組織中の残留フェライト(粒径約 $50\mu\text{m}$)は、疲労過程で組織中の選択的なすべり変形箇所となり、そこに優先的にすべり帯き裂を生じて、疲労破壊起点となる⁽⁷⁾

とができる。

機械研磨材の疲労破壊起点となった、このような内部欠陥が何であるかをさらに調べるために、Fish eye の中心部を詳細に SEM 観察したところ、そこには介在物の存在は全く認められず、それに代わって図 8 に示すような、一結晶粒寸法程度 ($10\sim 15\mu\text{m}$) の大きさの無特徴なファセットが確認された。浸炭材等の Fish eye 破壊において、類似のファセットが Fish eye の起点となっている場合が報告されているが⁽⁶⁾、その形成機構についてはあまり言及されていない。そこで、次節では、かかるファセットの形成機構について検討を行う。

3.3 ファセットの形成機構 機械研磨材においては組織的弱部としてフェライトが存在することから、これがファセットと何らかの関係があるものと推測される。そこで、まず、ファセット部のマイクロピッカース硬さ (5g) を測定することにより、ファセット部の組織を推察した。その結果、(i) ファセット部の硬さは $Hv=200\sim 400$ であり、一方、その周辺組織の硬さは $Hv\approx 700$ であること、(ii) ファセット部の硬さ値は、周辺組織の影響を受けて、真の値より大きな値を示していると考えられること、さらに (iii) 相対する破面の双方に存在しているファセットが同程度の硬さであること、等から、Fish eye の起点となったファセットはフェライトの粒内割れによって形成されたものと考えられる。さらに、ファセット面の結晶方位をエッチピット法⁽⁹⁾によって測定した結果、ファセットにはへき開面 ($\{100\}$ 面) に対応する正方形の腐食孔が生じており¹²、かかるファセットがフェライトのへき開割れから生じたものであることが明かとなった (図 9)。へき開割れは、通常、低温下や衝撃荷重による破壊の場合に認められるが、本供試材のように周囲を硬いマルテンサイトに囲まれた孤立状のフェライトは、室温静荷重下といえども容易にへき開割れを生ずることが報告されている⁽⁶⁾。実際、本供試材とほぼ同様な孤立欠陥材に対して、疲労寿命 $N_f=10^7$

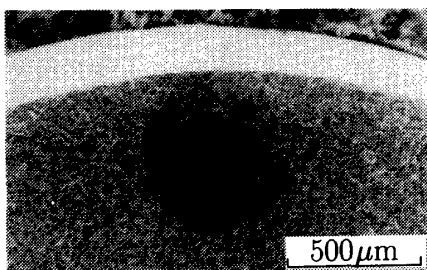


図 7 機械研磨材に生じた Fish eye

¹²ファセット表面は繰返し負荷によりつぶれているため、ピットの縁は不明確である

回に対応する疲労強度の直上の応力をただ一回負荷した場合、表面の残留フェライトにへき開割れが生じることが確認されている⁽¹⁰⁾。

以上のことから、機械研磨材においては、変形が拘束されたフェライトにへき開割れが生じ、ファセットが形成された後、そこからき裂が発生、進展し、疲労破壊が生じるといえる。

3.4 破壊モードの遷移機構 電解研磨材においては見られなかった Fish eye 破壊が機械研磨材において生じた原因は、前述したように表面が強化されたためであると考えられる。従来、浸炭材等の表面硬化材において、Fish eye を形成する内部破壊が生ずる機構として、図 10 のような、硬化層と母材部との間の強度差と応力分布の関係に基づく説明が行われている⁽¹¹⁾。このような機構によって Fish eye が形成される場合、Fish



図 8 Fish eye の起点部に認められたファセット

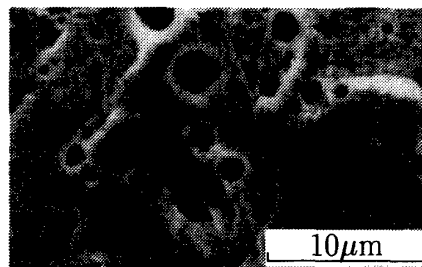


図 9 ファセットに生じた腐食孔

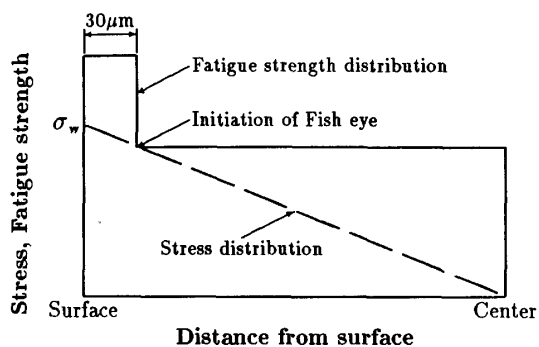


図 10 表面硬化材の Fish eye 形成機構⁽¹¹⁾

eyeの起点部深さは、硬化層深さと一致するはずであり、事実、浸炭材等では両者がよく一致すると報告されている⁽¹²⁾。本実験においては、表面を $30\mu\text{m}$ 程度除去した電解研磨材では、Fish eye破壊が生ぜず、残留応力が殆ど認められない等、加工層の影響は見られないことから、機械研磨材の加工層深さは $30\mu\text{m}$ 程度と考えられる。従って、内部破壊が図10の機構によるとすれば、Fish eyeの起点部深さも $30\mu\text{m}$ 程度になるものと推測される。そこで、疲労試験後、機械研磨材のFish eye破壊の起点部深さを測定したところ、起点部深さは表面から $50\sim 500\mu\text{m}$ の相当広い範囲にわたっていることが明かとなり、図10の機構では機械研磨材に生ずるFish eye破壊の形成挙動を説明することはできない。

しかしながら、機械研磨材の疲労寿命を電解研磨材のそれより延長させ、結果としてFish eye破壊を生ぜしめた原因は、加工層の存在が表面き裂の発生を抑制する要因として働いたことにあることは明白である。そこで、図10に代わる、機械研磨材における破壊モード遷移の説明として、図11のように、通常は表面破壊型の寿命曲線で疲労破壊が生じてしまう材料(電解研磨材)の表面破壊を加工層が抑制した結果、表面破壊型の寿命曲線が長寿命側に移動することにより、潜在的に長寿命側に位置していた表面強化の影響を受けない内部破壊(Fish eye破壊)型の寿命曲線が出現して、これが機械研磨材の現実のS-N曲線となった、と考えられる。

3.5 連続欠陥材の疲労破壊挙動 孤立欠陥材では表面破壊を抑制することにより、通常は現れない内部破壊(Fish eye破壊)型の寿命曲線が現れた。そこで、かかる現象が組織的弱部を有する高強度鋼において常に現れるものであるかを明らかにするために、弱部の組織(フェライト)は孤立欠陥材と同一であるが、その寸法・分布状態の異なる連続欠陥材について、破壊モードに及ぼす表面加工層の影響を調べた。

その結果、連続欠陥材においては、バフ研磨により表面に加工層を付与した場合にも、すべて表面破壊を生じ(図12, ○), Fish eye破壊型の内部破壊は現れないことが明かとなった。ここで、Fish eye破壊が生じない原因としては、複数個のフェライトが連続的にほぼつながった状態で分布している初析フェライトの場合、マルテンサイト組織からの変形拘束が充分でなく、Fish eye破壊の起点となるへき開割れが生じないためであると考えられる。また、かかる連続欠陥材の疲労強度は、それと殆ど同一レベルの表面硬さを有する前述の機械研磨材や電解研磨材に比べて著しく低いレベルにあるが、このような疲労強度の低下は、個々の欠陥寸法

(フェライトの寸法)は小さいが、複数個の初析フェライトが連続的にほぼつながった状態で分布しているため、2相組織鋼における孤立材(フェライト中にマルテンサイト組織が孤立している)と同様き裂の発生、進展が容易であるためと考えられる。

以上のことから、Fish eye型の内部破壊は、従来知られているように介在物を起点とするほか、組織中に大きい変形拘束を受けた状態で存在する残留フェライトのような組織的欠陥をも潜在的な発生源としており、実際例として微小な孤立状の残留フェライトを含む高強度鋼が、その表面を加工等によって強化された場合、現れることが明かとなった。

本研究では、人為的に表面を強化させることにより破壊モードの遷移を生ぜしめた。しかしながら、図1の疲労試験の際にみられたような介在物から破壊が生じる場合の破壊モードの遷移においては、如何なる表面破壊の抑制機構が働いているかは明確ではなく、今後の検討が必要である。

4. 結論

高強度鋼の疲労破壊において見られるFish eye破壊の形成条件を明らかにする目的で種々の形態の組織的

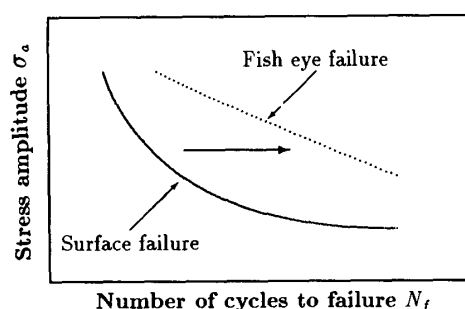


図11 表面破壊抑制による破壊モード遷移の模式図

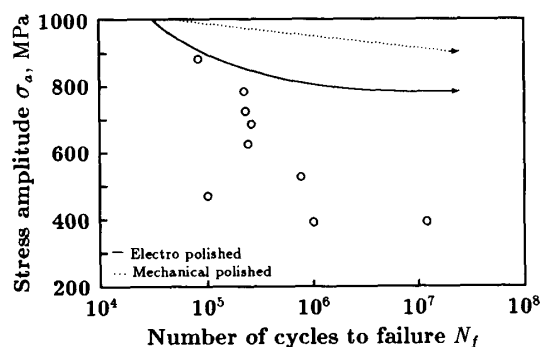


図12 疲労試験結果(連続欠陥材)

弱部を導入した試験片を用意し、疲労試験を行い、欠陥の分布、表面の状態と破壊形態の関係について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 高強度鋼の疲労破壊の特徴の一つとされる *Fish eye* 型の内部破壊は、従来知られているように介在物を起点とするほか、組織中に大きい変形拘束を受けた状態で存在する残留フェライトのような組織的欠陥をも潜在的発生源としている。その実際例として、表面を加工等によって強化された、微小な孤立状の残留フェライトを含む高強度鋼におけるフェライトのへき開割れを起点とする *Fish eye* 破壊の例が挙げられる。

(2) *Fish eye* 型内部破壊の生じる可能性のある高強度鋼においては、何等かの方法により表面破壊を抑制することによって潜在的な *Fish eye* 型の内部破壊の寿命曲線が出現して、それが長寿命域での現実の S-N 曲線となる、との考え方によって、その疲労寿命特性をよく説明することが出来る。

最後に本研究を遂行するに当たって、多大な助力をいただいた本塾、清水研究室、森山卓郎氏、助言を下された(株)高周波熱錬、高岡憲久氏に感謝致します。

文 献

- (1) 黒島・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, 56-529, A (1990), 1920.
- (2) 江村・浅見, 日本機械学会論文集, 55-509, A (1989), 45.
- (3) 増田・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, 52-476, A (1986), 847.
- (4) 小沼・古川, 材料, 38-433 (1988), 8.
- (5) 木村・ほか 3 名, 日本機械学会論文集, 37-300 (1971), 1475.
- (6) 鈴木・ほか 3 名, 日本機械学会論文集, 40-329 (1974), 23.
- (7) 山田・ほか 4 名, 日本機械学会論文集, 34-257 (1968), 31.
- (8) 増田・ほか 5 名, 日本機械学会論文集, 51-464, A (1985), 1193.
- (9) 早川・今村, 日本金属学会会報, 18 (1979), 282.
- (10) 黒島・ほか 2 名, 日本機械学会材料力学講演会にて講演予定 (1992).
- (11) 古川・ほか 2 名, 鉄と鋼, 72 (1986), 62.
- (12) 増田・ほか 2 名, 日本機械学会論文集, 49-440, A (1983), 413.