

ウィーン大学での超音波疲れの研究について

石 井 友 之*

On the Studies of the Ultrasonic Fatigue at the University of Vienna

by Tomoyuki ISHII

The review is made on the studies of the ultrasonic fatigue at the University of Vienna, and the author's results on the fatigue properties of the 316 stainless steels are described.

Ultrasonic fatigue testing machine is light weight, its mechanism is simple and it makes high frequency alternate stressing possible. But it has some problems, that is, the temperature control of test piece and the measurement of stress distribution, however, the effort for the modification of the machine is now continued and some advanced works using this testing machine have been performed.

The results of 316 steels by the author indicate that the fatigue strength of the steels are improved by the thermo-mechanical treatment, and the S-N curves of those steels by the ultrasonic (20 kHz) and conventional (200 Hz) fatigue testing machine show almost same tendency. This results indicate that the former is time-saving.

1. 緒言

超音波を用いた疲れ試験については、日本においても多くの研究¹⁾²⁾ がなされてきた。事実それは通常の機械式、電磁式又は油圧式の疲れ試験機が1000Hz を越えることがまれであるのに対して、周波数が約20kHz と高く、短時間に多数の繰返し負荷を加えることができる。また、発振装置が比較的軽量かつ単純なため他の装置中に組入れて高温中、溶液中、真空中などでの測定が可能なことから注目を集めてきた。しかし、これを疲れ試験機として利用する場合なおいくつかの問題が残されている。例えば、周波数が高いために負荷にともなう材料の異常昇温があり、また応力分布の不均一性などである。そのため我国におけるこの方面の研究が一部の研究者に限られてきた。しかし、ウィーン大学のWeiss 博士、Lintner 教授、Stickler 教授らはこれらの諸問題を解決し、実用化への努力を続けている。著者もそのグループの中で、現在原子炉用材料として注目されている Mo を含む316ステンレス鋼の疲れ特性に関する研究にたずさわる機会があったので、ここにウィーン大学での超音波疲れに関する研究の成果を概説するとともに、今後に残された問

* 理工学部機械工学科講師 機械材料

題点を検討する。

2. 超音波疲れ試験機について

超音波疲れ試験機は共振を起した試験片に生じる変動応力を利用するものである。装置としては超音波振動子に増幅用のホーンを接続し、その先端に丸棒の試験片をとりつけたものである。試験片は発振とともに共振を起し、引張り、圧縮の繰返し応力を受ける。なお、本報告の範囲では超音波の発生源としては Sonifier J 17V タイプ (Branson Ins. 製) を用いて、振動子としてはチタン酸ジルコンを用いた。出力は75~200Wで周波数は約20kHzである。この試験機では試験片の発熱と応力分布が問題となるのでそれについて以下に述べる。

2.1 試験片の発熱について

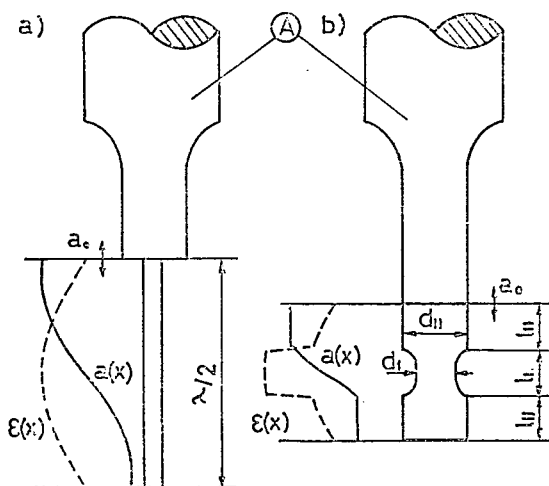
材料は繰返し負荷を受けることにより発熱するが、超音波は周波数が高いため特にその割合が大きい。これは材料の疲れ強さを測定する上で大きな障害となる。すなわち、昇温の度合いが少ない場合でも材料の変質が起り、さらに温度が高くなると高温の疲れ強さを測定することとなったり、異常加熱による破断を導くことがある。このことから、第1に考えられる昇温防止方法は水による周囲からの冷却であり、ある程度はその昇温を妨げることが可能である。また、Weiss 博士⁹⁾は中空の試験片を作り内部および周囲から冷却することにより、さらに効果を上げる試みをしている。しかし、この場合は試験片にかかる応力分布が複雑になることまで考慮すると、十分な実用性を持つとは言い難いが、それでも従来の方法に比較して昇温を軽減する効果は認められる。また水を用いた場合は金属材料においては冷却水の影響が無視できないことから、油またはインヒビターを用いるなどの方法により、水素あるいは腐食の問題を避けようとの試みもなされている。

しかし発熱を根本的に避ける方法としては、応力を小さくすることと負荷時間を短くすることであるが、前者は実用的な S-N 曲線を求める上で制約を受ける。そこで負荷時間を短くし、昇温を少なくし、試験片が冷却した後にもた負荷を加えることが考えられるが、Kromp 博士⁹⁾は電子制御により負荷および休止をパルスで与える装置を作製した。事実この装置により試料の異常昇温はかなり防止できるが、このパルス負荷が通常の連続負荷を行った場合とどのような対応を示し、妥当性を持つかについては個々の場合で検討する必要がある。

しかし以上ここで述べられた二つの方法、すなわち外部からの冷却およびパルスを用いた負荷を併用することにより、超音波疲れ試験機は実用的な価値を高めている。

2.2 応力分布の計算について

通常の疲れ試験の単軸引張り—圧縮、曲げ、回転曲げ、ねじりなどにおいては試験片にかかる応力は材料力学的に容易に評価される場合が多いが、超音波疲れの場合は試験片の平行部での応力が均一でなく、応力計の取り付けが困難なため、直接その負荷応力を測定することができない。そこで、実際には変位を測定しここから応力を算出することとなる。ここで明らかに等径の丸棒試験片を用いることが応力を計算する上で簡単であるが、こと疲れ強さということとなると、他の試験結果との対応性や再現性が問題となり、図—1のa)とb)を比較した場合通常の試験片に近いb)の形状のものの方が優れていることが経験的に明らかとなった。そこで図—1のa)およびb)について応力分布を求める計算式を Weiss 博士⁹⁾が明らかにした。その結果を表1に示す。またこの応力測定の基礎となる変



A:増幅ホーン a) 丸棒型 b) 試験片型

図-1 超音波疲れにおける伸び振幅(ε)と変位振幅(a). (B. Weiss ら⁵⁾による)表1 超音波共振試料の各因子の大きさ (Weissら⁵⁾による)

| | a) 丸棒型 | b) 試験片型 |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 試験片の長さ | $\ell = \lambda/2$ | $\ell_{11} = [\lambda/2\pi] \tan^{-1}[F_1/F_{11} \cdot \cot \ell_1/\lambda]$ |
| 伸び振幅 ϵ_0 | $\epsilon_0 = \frac{\pi a_0}{\ell}$ | $\epsilon_0 = \frac{2\pi a_0}{\lambda} \cdot K$ |
| 中央部伸び振幅 $\bar{\epsilon}_0$ | $\bar{\epsilon}_0 = \frac{2\epsilon_0}{\pi} = \frac{4a_0}{\lambda}$ | $\bar{\epsilon}_0 = \frac{4a_0}{\lambda} \cdot K$ |
| 伸び速度の振幅 $\dot{\epsilon}_0$ | $\dot{\epsilon}_0 = 2\pi \nu \epsilon_0$ | $\dot{\epsilon}_0 = 2\pi \nu \epsilon_0$ |
| 応力振幅 σ_0 | $\sigma_0 = E \cdot \epsilon_0 = \frac{\pi a_0}{\ell} \cdot E$ | $\sigma_0 = E \cdot \frac{2\pi a_0}{\lambda} \cdot K$ |
| 振動速さ | $U = \frac{da}{dt} = 2\pi \nu a_0$ | $U = 2\pi \nu a_0$ |
| 強化因子 | | $K = \frac{\cos 2\pi \ell / \lambda \cdot \sin \pi \ell / \lambda}{\frac{Z_{11}}{Z_1} \cdot \sin \frac{2\pi \ell}{\lambda} \cdot \frac{\cos \pi \ell}{\lambda}}$ |

ここで a) および b) は図-1の a) および b) に対応する

λ : 材料中の超音波の波長

a_0 : 変位振幅

ν : 振動周波数 (20k Hz)

E : 動的弾性係数

$Z = V \rho F$ 振動インピーダンス

ρ : 密度

V : 振動速度

F : 断面積

位測定については試験片の変位を測定したい個所の円周上に細い線を描く。この線は超音波負荷をかけることにより振動しある幅を持った線になる。この線の太さをスケールの入った光学顕微鏡により測定し、それが変位となる。同時にその場所に変位測定用のゾンドをセットし、その電圧変化をオシロスコープに表示させ、刻々の変位が明らかとなる。これにより試験片が破断に到ったり、異常が起った場合発振音に変化するのに加えてオシロスコープ上の電圧降下が異常を知らせることとなる。

2.3 両端発振と加負荷装置について

今まで述べてきた超音波疲れ試験機は一端を振動子に接続することにより試験片に繰返し応力を加える方式であったが、減衰能が大きな材料や大型の試験片では十分安定な振動を与えることができない場合があるので、Kromp 博士ら⁴⁾は両端に振動子をつけることとした。その装置の概略を図-2に示し、外観を写真1に示す。ここでは二本の水平に設置されたガイドレールの上に2つの発振器が乗っているため試験片の軸はつねに一定に保たれている。また写真1ではこのレールの上に、前節で述べた顕微鏡が固定でき随時変位測定 of 補正を行なうことができる。なおここで試験片は冷却のための円筒で覆われている。

二本のガイドレールに装置を設置したことにより、ある一定の引張り荷重下での疲れ試験が可能となった。すなわちガイドレール上の振動子の一方を固定し、他方を自由端として、それに鋼線を接続してロールベアリングを介して荷重を加える方式である。

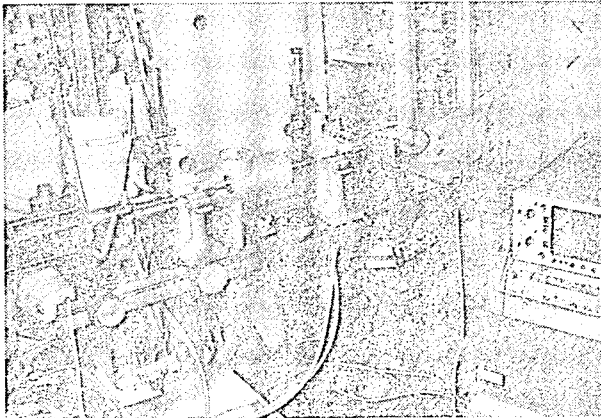


写真1
両端に振動子を取りつけた超音波疲れ試験機の外観 (Kromp 氏⁴⁾による)

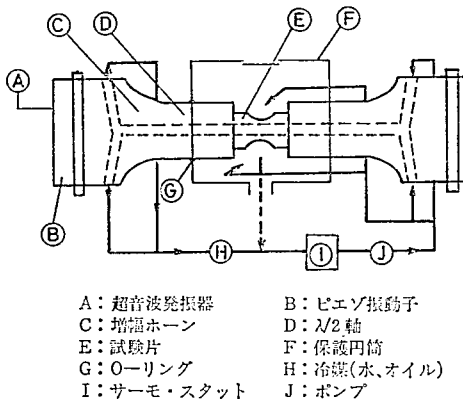


図-2 両端振動子型超音波疲れ試験機 (W. Kromp 氏⁴⁾による)

2.4 高温試験用の炉について

原子炉用，熱機関用，航空機用などの材料では常温での疲れ強さに加えて高温での疲れ強さが問題となる。そこで超音波疲れ試験機も高温用の炉を設置する努力が Stiaszny 氏らによってなされている。しかし，実用としては，なおいくつかの問題が残されている。例えば温度制御の問題であり，試験片は炉中での加熱に加えて疲れ試験による発熱を伴う点である。常温の場合と異なり，一定温度の水などによる冷却方式が採用できない。そのため昇温の比較的少ない低応力あるいは発振と休止の間隔を長くとったりする必要がある。

また高温の場合は周波数依存性が大きいことが考えられ，それは加工硬化組織の回復，析出現象，表面酸化などの組織因子が直接作用してくるためで，ここでは通常の低周波疲れ試験機との対応性の検討が必要となろう。

3. 応用研究分野について

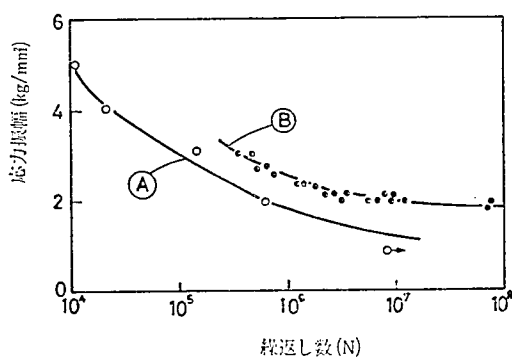
前節では主として疲れ試験機そのものについて述べてきたが，ここではこの疲れ試験機を用いてなされた金属学の分野での研究の数例について述べる。

3.1 微細組織におよぼす超音波疲れの影響について

材料は疲れ試験中に損傷を生じ，それがマイクロ・クラックやボイドの生成につながりやがては破断に到る。この組織変化の過程が通常の疲れと超音波疲れとで，どのように異なるかは興味ある問題である。Maurer 博士ら⁶⁾は純 Al および Al—Zn—Mg 合金を用いて，その疲れ挙動を超音波および電磁式 (160Hz) で試験し，微細組織におよぼす影響を検討している。純 Al についての両者の S-N 曲線を図—3 に示す。ここでは強度レベルに差が認められるが，疲れ挙動はよい対応を示している。また，微細組織を破断後の試料の薄膜透過電子顕微鏡で観察しているが，両者においては根本的な組織の違いはみとめられず，すなわち，低応力では転位のタングル，高応力では双極子，環状欠陥そしてセル化の傾向が認められることを述べている。このような結果から微細組織に関しては，超音波と他の疲れ試験法には大きな差がみられないようである。

3.2 超音波による加工硬化について

超音波による疲れも加工の一種とみなすことができ，これに関しては Stanzl 博士ら⁷⁾



A: 160Hz 疲れ試験 B: 超音波疲れ試験

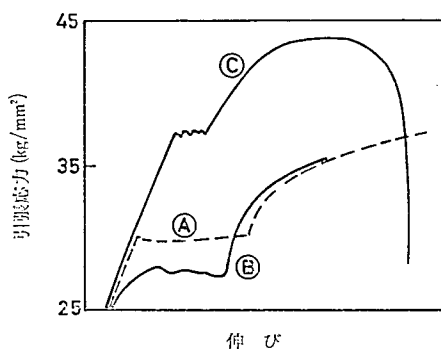
図—3 160Hz および超音波(20kHz)疲れ試験機による多結晶 Al の S-N 曲線(Maurer ら⁶⁾ による)

の研究がある。軟鋼を室温から300°Cの間で一定時間超音波処理し、その後室温で引張り試験をしてその影響を明らかにした。その模式的な結果の一部を図-4に示す。ここから室温での超音波処理は軟鋼の引張り性質をやや低下させるのに対して、300°Cでは顕著に増加させることが解る。これはある材料を部分的にまたは全体的にわたって硬化させたい場合、この処理を施すことによって容易に必要な性質を与えることができることを示しており、興味深い結果である。

3.3 対流作用を用いた疲れ試験について

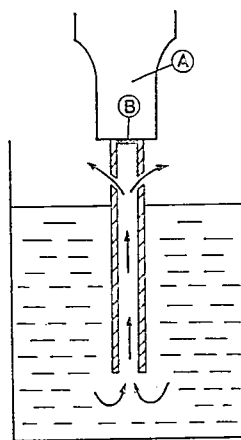
溶液中で空洞の試験片を用いた場合、超音波の振動により内部の溶液は上方に流れる傾向がある。この現象を利用して、Mitsche 教授ら⁶⁾は図-5に示すような実験を行なった。材料としては軟鋼を用い、円筒形に加工した後、 $\lambda/2$ に切断し、水の出口をあけ、ホーンの先端にハンダ付けした。これを用いて、恒温に保たれた水中で疲れ試験を行なうと水は図中に示された矢印の方向に循環するため、試験片の昇温は小さなものとなる。また場合によっては高温の液体を用いることにより、高い温度での疲れ試験が可能となる。

3.4 走査型電子顕微鏡中での疲れ試験



A: 未処理材 B: 20°C処理材 C: 300°C処理材

図-4 室温(20°C)および300°Cで超音波処理した軟鋼の室温引張り試験結果(Stanzl ら⁷⁾による)



A: 超音波増幅ホーン
B: 溶接部

図-5 表裏冷却又は加熱が可能な試験片による超音波疲れ試験(Mitsche ら⁸⁾による)

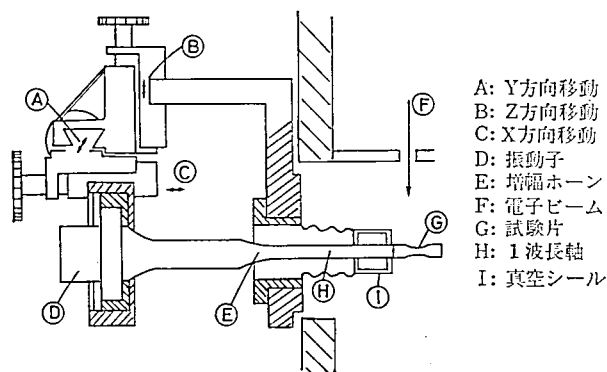


図-6 走査型電子顕微鏡中での超音波疲れ試験の試料移動装置(Kromp ら⁹⁾による)

疲れによって材料が破断に到る場合、どこからその亀裂が発生し、どのような経路で進展するかは興味深い問題である。そこでは肉眼や光学顕微鏡より走査型電顕が有効なことは論を待たない。事実、破断した試料の表面でのマイクロ・クラックの詳細な研究が走査型電顕を用いてなされているが、動的な研究はほとんどみられなかった。Kromp 博士ら⁹⁾は超音波疲れ試験機の構造が比較的簡単なことに注目して、これを走査型電顕内に設置し、疲れ試験を行なって、表面クラックの経時的様相を観察した。図-6にその装置の概略を示す。ここでは、試験片はX、YおよびZ方向の移動ならびに回転が可能のため、適時疲れ試験を停止して、表面を観察して、亀裂発生点を捜すものである。その結果、すべり線上に発生したクラックについて、その成長過程が報告されている。

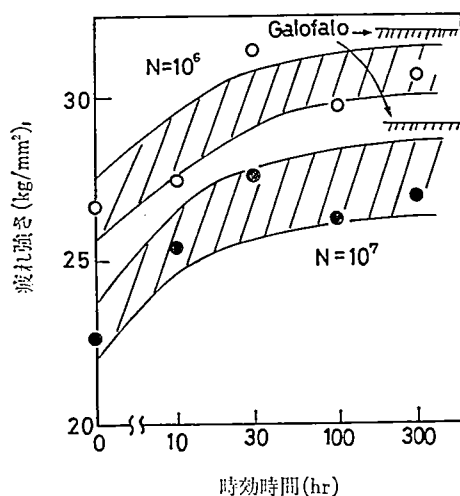


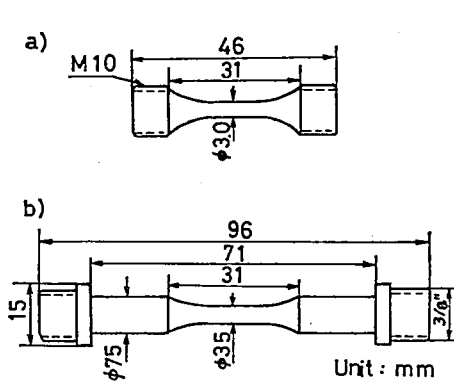
図-7 316 ステンレス鋼の疲れ強さにおよぼす加工後の熱処理時間の影響 (加工度20%、温度700°C)

4. 316ステンレス鋼の疲れ強さについて

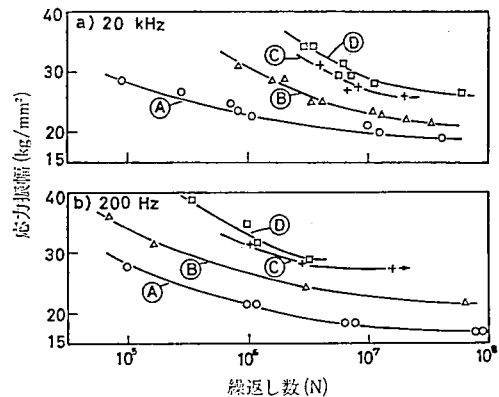
以上述べてきたように、ウィーン大学では超音波の疲れに関しては系統的な研究がなされてきているが、その中で、著者が実際にたずさわった研究¹⁰⁾について以下に述べる。

316鋼 (18%Cr—11%Ni—2%Mo) は原子炉用材料として注目されているが、高温でのクリープ特性や引張り特性に加えて、疲れ特性が問題となっており、より優れた材質が要望されている。Garofalo 氏ら¹¹⁾は316鋼のクリープ強さが加工熱処理をすることにより改善できることを報告していることから、我々も加工熱処理に注目して疲れ強さの改善を試みた。ここでは、加工度、熱処理温度、熱処理時間などの因子が問題となるが、まず通常の電磁式疲れ試験機 (200Hz) によって最適条件を捜したところ、加工度は大きいほど温度は600~700°C付近がよいことが明らかになったの

で、さらに、時効時間について調べた結果を図-7に示す。ここでは加工度は20%、時効温度は700°Cである。時効時間の増加とともに疲れ強さは増すが30~100hr程度で飽和する傾向にある。また、図中に横線で示した値はGarofaloの提案した2段加工熱処理(20%加工+480°C-24hr時効+700°C-216hr時効)材でもっとも高い疲れ強さを示しているが、その差はあまり大きくない。以上のことから加工熱処理が316鋼の疲れ強さを増加させることが明らかとなったが、その内の代表的な処理を施こした4鋼種について、超音波と通常の電磁式疲れ試験機との結果の比較を行なった。ここで、試験片は図-8に示すような形状のものを用いた。試験片は周囲からインヒビターを含む20°Cの水で冷却された。その結果を図-9に示す。両者の結果は応力の絶対値が少しく異なるが、傾向は同じである。このことから、超音波式の方が試験時間を短縮できるので、この実験のように多数の処理を施こした材料の優劣を評価する上で有効な手段であると考えられる。



a) 200 Hz 疲れ試験用
b) 超音波 20kHz 疲れ試験用



A: 溶体化まま B: 20%冷間加工
C: 20%加工+700°C-30hr 時効 D: Garofalo 処理⁽¹⁾

図-9 加工熱処理を施こした316ステンレス鋼のS-N曲線 (a)超音波式 (b)電磁式疲れ試験機による)

図-8 疲れ試験片の形状

5. 結言

超音波を用いた疲れ試験はその機構が比較的簡単で、軽量であり、高周波の繰返し負荷

が可能である反面、試験片の昇温や応力分布の不均一性などの問題を残している。ウィーン大学ではこれらの問題を解決する努力がなされており、両面冷却やパルス負荷などにより、実用に近づいている。さらに金属組織学的な研究もなされており、とりわけ、走査型電子顕微鏡中での疲れの直接観察は亀裂の研究に大きな貢献をすることが期待されている。著者がたずさわった 316 ステンレス鋼の疲れ強さにおよぼす加工熱処理の影響の研究でも超音波疲れ試験機が、その正確さ、迅速さで十分な実用性を持つことが明らかにされた。

今後は、試験片を周囲から冷却できない時でも昇温を防止する技術を確立し、高温炉中や真空中での試験を容易にすれば、さらなる応用研究が可能になるものと考えられる。

おわりに、本報告をまとめるに当り御協力いただいた Weiss 博士をはじめとするウィーン大学、第 2 物理学科の方々に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 菅野, 栗谷, 吉川; 日本金属学会誌, 23 (1959), p.505
- 2) 田中; 日本機械学会誌, 64 (1961), p.1498
- 3) B. Weiss and R. Stickler; Met. Transa., 1 (1970), p.1057
- 4) W. Kromp, K. Kromp, H. Bitt, H. Langer and B. Weiss; Proc. of Ultrasonics International, (1973)
- 5) B. Weiss; Aluminium, 48 (1972), p.741
- 6) K.L. Maurer, B. Weiss; Aluminium, 45 (1969), p.609
- 7) S. Stanzl, R. Mitsche and B. Weiss; Arch. f. d. Eisenhüttenw., 41 (1970) p.867
- 8) R. Mitsche and S. Stanzl; Z. Metallkunde, 62 (1971), p.863
- 9) W. Kromp, B. Weiss and R. Stickler; Met. Transa., 4 (1973), p.1167
- 10) T. Ishii, K. Kromp and B. Weiss; Arch. f. d. Eisenhüttenw., 45 (1974), p.803
- 11) F. Garofalo, F. von Gemmingen and W.F. Domis; Trans. ASM, 54 (1961), p.431

(昭和50年 9 月10日受理)