繰返し遠心力をうける鋳鉄回転円板の低サイクル疲労*

式田 昌弘^{*1}, 金山 幸雄^{*1}
坂根 政男^{*2}, 大南 正瑛^{*2}

Low-Cycle Fatigue of a Cast Iron Rotating Disk Subjected to Cyclic Centrifugal Force

Masahiro SHIKIDA, Yukio KANAYAMA,
Masao SAKANE, and Masateru OHNAMI

This paper describes the low-cycle fatigue of a cast iron disk in a cyclic rotating test and a uniaxial zero-to-tension fatigue test. In order to correlate the data, cyclic-elastic-plastic FEM analysis was made and the stress/strain amplitude was obtained. The low-cycle fatigue strength was accurately estimated from the uniaxial test when we used the average tangential stress theory with a slight modification. The number of broken fragments and SEM observations were also discussed in connection with the stress dependency of the rotating disk.

Key Words: Fatigue Strength, Fracture, FEM Analysis, Cast Iron, Stress Concentration, Fractography, Rotating Disk, Centrifugal Force, Average Stress, Pulsating Tension

1. 緒 言

鋳鉄が回転体に用いられる代表例としてはフライホイールがある。小形乗用車のエンジンに用いられるフライホイールの最高回転速度は6000 rpm前後であり、この約2倍の回転速度で一方向負荷による遠心破壊が起こるとされている。また、回転の起動-停止による疲労破壊はそれよりもっと低い回転速度のもとで起こると予想される。したがって、エンジンの軽量化を目的としてフライホイールアーム部の薄肉化が検討されている現状においては、その疲労強度は重要な問題となっている。

近年、ガスタービンに代表される高速回転機械の発達にともなって遠心破壊強度に対する研究が重視されるようになり、このための基礎研究として回転円板の破壊強さに関する研究が数多く報告されている⁽¹⁾。しかし、これまでの研究は回転円板の一方向負荷による破壊を取扱ったものが多く、回転の起動-停止を繰返す低サイクル疲労の研究は少ない^{(2)~(4)}。また、材質面

ではSNCMなどの実用ロータ材を用いたものが比較的多く、鋳鉄円板を用いた研究報告は非常に少ない⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本研究では実働負荷条件下での実用金属材料を用いた回転円板の破壊強さに関する研究の一環として、まず鋳鉄円板を単調に回転上昇させる一方向負荷のものでの回転試験を行い、その破壊強さについて調べた。併せて回転円板の低サイクル疲労試験を行い、疲労強度と破壊特性についても調べた。また、円板素材から切り出した単軸試験片を用いて片振引張疲労試験を行い、その結果と回転円板の低サイクル疲労強度との対応関係を検討した。さらに、SEMによる破面観察を行って回転円板の破面の特徴についても調べた。

2. 供試材料および実験方法

本研究に用いた供試材料は表1に示す化学成分を有するFC10級片状黒鉛鋳鉄である。素材は $\phi 210 \times 1000$ mmの丸棒として鋳造されたので中心部の黒鉛形状は外周部よりも少し粗大となり、このため機械的性質にも若干の差が認められた。図1に供試材料の中心部と外周部の光学顕微鏡による組織写真を示す。基体は少量のフェライトを含むパーライト組織である。素材の中心部とそれに隣接する外側部分からJIS 6

* 平成元年4月3日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年9月2日。

^{*1} 正員、大阪産業大学工学部 (〒574 大東市中垣内3-1-1)。

^{*2} 正員、立命館大学理工学部 (〒603 京都市北区等持院北町56-1)。

号試験片に準ずる形状寸法の試験片を採取し静的引張試験を行った。図2の実線は引張試験から得た外側部分の応力-ひずみ関係である。表2には素材中心部と外周部の基地組織に対する黒鉛面積率と機械的性質を示す。

供試円板は図3(a)に示す等厚中空円板であり、片振引張疲労試験には図3(b)に示す砂時計形試験片を用いた。円板の一方向回転試験および低サイクル疲労試験には空気タービン駆動の回転強度試験機⁽⁷⁾(スピテスタ)を使用した。低サイクル疲労試験には上、下限回転数が設定できる制御回路付デジタル回転計を使用した。上限回転数は15 000 rpm から19 000 rpm の間で種々変化させ、下限回転数は供試体の一次の危険速度より少し上の5 000 rpm 一定とした。回転降下時にはタービンに空気制動をかけて回転数の降下速度が上昇速度(12 rps²)と等しくなるようにした。片振引張疲労試験は容量30 kNの電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて荷重制御のもとで応力比零、試験周波数2 Hzで実施した。

本研究での回転円板の張塑性応力解析は有限要素法(FEM)によった。解析にははん用構造解析プログラムADINAを使用し、構成関係は図2の破線で示すように、素材の応力-ひずみ関係を降伏応力45 MPaとして、6本の折れ線で多直線近似したものをを用いた。解

析に用いた要素は八節点アイソパラメトリック四角形リング要素で、1要素内に3×3のガウス積分点を有している。円板断面を内半径から外半径まで9等分したので、要素数および節点数はそれぞれ9および48となる。回転円板の低サイクル疲労試験は下限回転数を5 000 rpm とする片振負荷であることから、解析は1.5サイクルまで実施した。また、硬化則は等硬化則を用いた。

3. 実験結果および考察

3・1 一方向回転試験(加速破壊試験) 表3は円板の回転数を単調に上昇させる一方向負荷のもとでの破壊試験結果をまとめたもので、5回の実験における負荷速度はほぼ同一となるように留意した。破壊回転

表3 一方向回転試験結果

Disk No.	1	2	3	4	5
n_B rpm	19600	19900	19300	19900	19700
Fragments	4	4	4	4	4

図2 材料の引張応力-ひずみ関係

表1 材料の化学成分(Wt.%)

C	Si	Mn	P	S
3.14	2.10	0.33	0.074	0.081

表2 組織の黒鉛面積率と機械的性質

Portion of material casted	Percentage of graphite area α (%)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Brinell hardness H_B
Center part	12.9	128.5	0.40	160
Outer part	10.8	132.4	0.44	167

(a) 中心部 (b) 外周部

図1 材料の顕微鏡組織

(a) 円板試験片

(b) 片振引張疲労試験片

図3 試験片の形状寸法

数 n_B には若干のばらつきがあるため、それらの平均値 19 700 rpm を供試円板の破壊回転数とした。表 3 に示すように、一方向回転試験による円板の破片数はいずれの実験においても 4 個となった。

図 4 は回転数を単調に上昇させた場合の円板の半径上における接線応力 σ_θ 、半径応力 σ_r および Mises の相当応力 σ_{eq} の分布状態を回転数ごとに示したものである。 σ_θ の分布曲線より、回転数が 10 000 rpm では円板の大部分が弾性的であるが、15 000 rpm になると逆に大部分が塑性域となる。さらに、19 000 rpm になると内周近傍の接線応力は計算上、材料の引張強さより大きい値となることから、この領域はもはや破壊したのと同然の状態にあるが、外周部からの支持効果により円板は破壊をまぬがれていると考えられる。

図 5 は円板回転数の増加にともなう円板内周上での応力集中率の変化を示したものである。図 5 の縦軸は内周上の最大接線応力 $(\sigma_\theta)_{\max}$ を接線応力の半径上の平均値(平均接線応力) $\bar{\sigma}_\theta$ で除したものを示しており、

図 4 回転円板の応力分布(FEM)

図 5 円板内周上での応力集中率の変化(FEM)

横軸は円板の回転数 n と実験結果より得た破壊回転数 $n_B (=19\,700\text{ rpm})$ の比を表している。図 5 から、回転数の上昇にともなう内周における応力集中は緩和され、応力分布が次第に平均化されていくのがわかる。

図 6 は図 4 の応力分布に対応する各ひずみ成分の半径方向への分布を表す。接線ひずみ ϵ_θ と Mises の相当ひずみ ϵ_{eq} はいずれの回転数においても円板内周上で大きく集中している。また、半径ひずみ ϵ_r は内外周近傍で負の値をとる。図 7 に円板内周上の最大接線ひずみ(内径の広がり)の実測結果と FEM 解析結果との比較を示す。破線と実線は FEM 解析より求めた負荷時と除荷時の計算値であり、白丸と黒丸は回転停止後に円板の内径を測定して求めた 2 回の実験値である。除荷時における計算値と実験値の比較より、実際の回

図 6 回転円板のひずみ分布(FEM)

図 7 最大接線ひずみの変化

転試験においては内径の広がり徐々進行するのではなく、破壊回転数に比較的近い 17 000 rpm まではあまり変化せず、その後急に増大して破壊⁽⁷⁾にいたることがわかる。また、計算値は実験値と近似的に一致することから、本研究に用いた FEM による回転円板の応力解析はその有用性が確かめられたといえる。

回転円板の実用上簡便な破壊条件として歴史的には平均応力説があり、それを修正したものとして回転円輪の破壊強さを基準にした修正平均応力説⁽⁸⁾がある。これまでの研究によれば、前者は等方性軟鋼などの延性材料⁽⁷⁾⁽⁹⁾に、また後者は鋳鉄のような比較的脆性な材料⁽¹⁰⁾によく一致する。いま、供試材料の引張強さとして $\sigma_B = 130.4$ MPa (素材径 $\phi 210$ の中心部と隣接部の平均値) を用いて回転円輪の破壊強さを $0.9\sigma_B = 117.4$ MPa と見積もれば⁽⁸⁾、平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta = 117.4$ MPa の関係より、予想破壊回転数 $n_{PB} = 20\,030$ rpm となる。この回転数は実験より求めた破壊回転数 $n_B = 19\,700$ rpm に極めて近く (誤差は約 1.7%)、修正平均応力説は実際の破壊回転数を精度よく予測するといえる。

3.2 回転円板の低サイクル疲労試験 回転疲労試験において基本データとなる上限回転数 n_1 と破壊繰返し数 N_f との関係を図 8 に示す。20 回の実験のうち、比較的長寿命域での実験点のばらつきが認められるものの、実線で示すように $N_f = 2 \times 10^2$ サイクルあたりを境にして実験結果はこう配の異なる 2 本の直線で表すことができる。図 9 は上限回転数 n_1 が 15 000, 17 000, 19 000 rpm, 下限回転数 n_2 がいずれも 5 000 rpm の場合の円板内周上における FEM 解析による応力-ひずみ関係を示し、実線は $\sigma_\theta - \varepsilon_\theta$ 関係、破線は $\sigma_{eq} - \varepsilon_{eq}$ 関係である。図 9 のように、上限回転数が 15 000 rpm の場合はほぼ完全片振りとなっているが、上限回転数が増加するにしたがって次第に圧縮側負荷が大きくなって部分両振り状態となる。しかし、最大上限回

図 8 上限回転数と破壊繰返し数の関係

転数 19 000 rpm においても引張側の応力振幅は圧縮側に比べて大きく、3.3 節で示すように単軸応力下の基礎データから回転円板の疲労強度を推定する場合、近似的には基礎データとしては完全片振りのものを用いればよいことがわかる。図 10 は上限回転数 n_1 が 19 000 rpm の場合の半径上の各点における応力-ひずみ関係を示す。ここで、 r は円板中心からの距離である。内周上では部分的に両振り負荷となっているものの、内周から 10 mm 外寄りの点 ($r = 20$ mm) ではほぼ完全な片振りとなる。このことも基礎データとしては完全片振りでありよいことを示していると考えられる。

回転円板の破壊には内周上の最大接線応力と半径上

図 9 内周上の繰返し応力-ひずみ関係 (FEM)

図 10 半径上の繰返し応力-ひずみ関係 (FEM)

の平均接線応力が大きなかかわりを持っており、特に後者は一方向回転に対する破壊条件としての平均応力説を検討する場合によく用いられることから、回転疲労試験結果の整理においても有効である。図 11 は図 8 に示した実験結果を横軸に、FEM 解析より求めた平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta$ を縦軸にとって表したものである。ここで、 $\bar{\sigma}_\theta$ の計算には除荷時の応力(たとえば内周上の圧縮応力)は考慮していない。図 11 には参考のため、一方向回転試験結果を黒丸で示し、また線図を延長して 10^5 サイクルの疲労強度 ($\bar{\sigma}_\theta = 50$ MPa) も求めてみた。図 8 でも述べたように、線図は $N_f = 2 \times 10^2$ サイクルあたりを屈曲点としてこう配の異なる 2 直線で表されることから、屈曲点前後の二つの領域では異なった破壊形態が予想される。疲労破壊した円板の破片数を調べたところ、屈曲点以前の高応力負荷のもとでは破片は一方向回転試験の場合と同様すべて 4 個となった。これに対し、屈曲点以後の低応力負荷のもとでは半数が 3 個となり、特に $\bar{\sigma}_\theta = 75$ MPa ($n_1 = 16000$ rpm) 以下の 3 枚の長寿命円板はすべて 3 個の破片となった。図 12 は回転疲労によって破壊した円板の破片を示し、図 12(a) は高応力となる $n_1 = 19000$ rpm のもとで 4 個となった例、図 12(b) は低応力側の $n_1 = 17000$ rpm のもとで 3 個となった例である。

佐藤らの研究⁽⁵⁾によれば、鋳鉄回転円輪の破壊過程は遠心力による半径断面の開放とその後の曲げ破壊によって説明されており、本研究の場合も同様の考え方が適用できる。図 13 は破片数によって異なる破壊形態をモデル的に表したもので、その破壊過程は次のような考え方に基づく。一般に、回転疲労をうける鋳鉄円板においては最初、内周縁に疲労主き裂が入ると、その開口の影響をうけて反対側の対称位置に別の疲労き裂(Subcrack と呼ぶ)が発生するが、疲労主き裂が優先的に伝ばして外周に達し、半径断面の開放後は遠心力による曲げモーメントを受けて Subcrack の広がり

と伝ばおよび中間断面での曲げ破壊によって円板はほぼ均等な大きさの 4 個の破片に分かれる。しかし上限回転数が小さく、したがって応力振幅の小さい条件下では対称位置で Subcrack は発生せず最初の主き裂のみが伝ばして外周に達することがあり、このような場合には回転円輪と同様の破壊形態をとり、しかも円板外周の単位長さ当たりに作用する遠心力が小さいために破片寸法は大きくなって、円板は 3 個の破片に分かれる。この考え方を図 13 で説明すれば、高応力のもとでは図 13(a) のように疲労主き裂が外周に達して点 A, B が分離し半径断面が開放されたとき、点 C まで進んだ Subcrack は遠心力によって広げられて開口が進み、同時に中間断面 DE でも遠心力による曲げ破壊が起こって、円板は 4 個の破片に分かれる。これに対し、図 13(b) のように低応力のうちでも疲労主き裂が単独に伝ばする場合には、点 A', B' が分離して半径断面が開放されたとき、回転速度は $\omega' < \omega$ であるから外周 A'C' 上の単位長さ当たりの遠心力 F' は外周 AD 上のその値 F よりも小さく、したがって図 13(a) の場合と同じ大きさの応力で曲げ破壊が起こるためには外周長さが $A'C' > AD$ でなければならず、図 13(b) の場合の破片寸法は大きくなると推察される。同様に回転方向と反対側の対称部分についても、

図 12 疲労破壊した円板の破片

図 11 平均接線応力と破壊繰返し数の関係

図 13 異なる破壊形態のモデル化

B'D' > BE となり、しかもこの場合 Subcrack が発生しないとすれば円板の破片は 3 個になると考えられる。なお、低応力においても破片数が 4 個になることがある。鋳鉄円板の内周縁には黒鉛の露出した部分を含んでおり、多くの場合その部分が疲労き裂の起点となりうる。よって、低応力においても Subcrack の発生は十分に考えられ、そのような場合には円板の破片は 4 個になると考えられる。

3.3 片振引張疲労試験 回転円板の破壊は応力集中の大きい円板内周近傍から発生するので、円板素材の内周近傍部分の単軸片振引張疲労強度を知ることは重要であり、併せてその値を回転円板の低サイクル疲労強度と関連づけることも有意義と考える。図 14 は円板素材の中心部とそれに隣接する外側部分から採取した試験片による片振引張疲労試験結果であり、縦軸は最大引張応力 σ_{max} 、横軸は破壊繰返し数 N_f を示している。図 14 からわかるように、中心部 B の疲労強度は外側の A よりもやや小さい傾向にあるが、近似的に両者に違いはないとみなして 1 本の曲線で表すことができる。また、図 14 中には静的引張強度もプロットしており、 10^5 サイクルの疲労強度は引張強度の約 1/

2 となる。

図 15 は回転円板の低サイクル疲労試験結果と片振引張疲労試験結果を同一図中に示したもので、縦軸は疲労強度 σ を静的強度 σ_B で除した強度比として示す。すなわち上下の実線はそれぞれ FEM 解析から得られた円板の最大接線応力 $(\sigma_\theta)_{max}$ および平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta$ を引張強度 σ_B で除したものを示している。また、中央の実線は片振引張疲労試験での最大引張応力 σ_{max} を引張強度 σ_B で除したものである。図 15 からわかるように、円板の疲労強度を $\bar{\sigma}_\theta/\sigma_B$ で表すと最下段の曲線のように片振引張疲労試験結果に対して大きく短寿命側にくる。一方、円板内周上の $(\sigma_\theta)_{max}/\sigma_B$ を用いて表すと最上段の曲線のようにあまりにも長寿命側にくるので、両パラメータとも単軸の片振疲労データを回転円板のそれと相関させる良好なパラメータとはいえない。しかるに、円板の疲労強度を一方向回転試験における破壊時の平均接線応力 $\bar{\sigma}_{\theta B}$ および最大接線応力 $(\sigma_{\theta B})_{max}$ で除して無次元表示すると片振疲労データに接近した対応関係が得られる。特に一点鎖線のように、平均接線応力 $\bar{\sigma}_\theta$ で表した低サイクル疲労強度を一方向回転破壊時の平均接線応力 $\bar{\sigma}_{\theta B}$ で除して、強度比 $\bar{\sigma}_\theta/\bar{\sigma}_{\theta B}$ として表示する場合には近似的により一致が得られる。したがって、回転円板の低サイクル疲労強度は一方向回転破壊試験を行うだけで片振引張疲労強度から類推することが可能となる。

3.4 破面観察 鋳鉄の中でも球状黒鉛鋳鉄は強度部材として広く使用されていることもあってフラクトグラフィによる破壊機構の解明が進んでおり、疲労破面において鮮明なストライエーション⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を観察することができる。しかし、片状黒鉛鋳鉄は強度部材として使用されることは少なく、また破面解析が難しいためにフラクトグラフィに関する研究報告は極めて少ない⁽¹³⁾。さらに、回転円板の破面観察の報告は非常に少なく、鋳鉄円板については皆無である。

図 16(a) は一方向回転破壊、図 16(b) は低サイクル疲労破壊した円板の破面の一例を示す。図の円板はいずれも 4 個の破片に分かれたが、SEM による破面観察はき裂の起点となる円板の内周縁(写真の左端)から外周に向かって約 1 mm の範囲について行った。観察した A, B, C, D 部分のうち図に示さない部分についてもほぼ同様の破面形態となった。片状黒鉛鋳鉄の破面はき裂の黒鉛内貫通および黒鉛と基地のはく離が大部分であり、特に一方向回転破壊ではその傾向が強く、しかも一部の破面に図 16(a) のような放射状の花びら模様が現れるのが大きな特徴である。このような模様は低サイクル疲労の破面には見られないことか

図 14 片振引張疲労試験結果

図 15 二つの疲労試験結果の関連

図 16 回転円板の破面

図 17 単軸試験片の破面

表 4 黒鉛破面率の比較

Type of test		Percentage of graphite fracture surface (%)				
		A	B	C	D	Average
Rotating test	Accelerating burst	88.3	84.7	87.5	87.7	87.1
	Low-cycle fatigue	78.2	79.3	78.6	71.4	76.9
Uniaxial test	Static tension	83.5	86.5	----	----	85.0
	Pulsating fatigue	100 MPa	65.8	75.2	----	70.5
		90 MPa	67.4	65.9	----	66.7

ら、一方向回転破壊におけるき裂の発生・進展がいかに急激であるかがうかがえる。図 17 は円板から採取した単軸試験片の破面の一例で、試験片の外縁(写真の左端)より約 1mm 内側までの A, B 部分を SEM 観察した結果である。この場合も黒鉛割れおよび黒鉛と基地のはく離が大部分であるものの、少ないフェライト地内のデインブル模様やパーライト地でのへき開破面も一部に認められた。B 部分についてもほぼ同様の破面形態となったので、ここでは省略する。

表 4 は図 16, 17 の中に示す破壊した回転円板の A, B, C, D 部分および単軸試験片の A, B 部分の SEM 観察結果をもとにして求めた黒鉛破面率である。ここで黒鉛破面率とは、き裂が黒鉛内を通る(黒鉛割れ)か、または黒鉛と基地の境界を通る(黒鉛のはく離)場合のいずれも含めて、破面中に占める黒鉛面積の割合をいう。表 4 より、2 種類の試験ともに疲労破面よりも静的破面のほうが黒鉛破面率が高くなることから、西田ら⁽¹³⁾が片状黒鉛鋳鉄の片振平面曲げ疲労の研究で述べるように、静的破面のき裂は黒鉛と黒鉛の最短距離をぬうように伝ばするのに対し、疲労破面のき裂は基地組織の中を伝ばする傾向が強くなることが推察される。また、回転試験の黒鉛破面率は単軸試験のものに比べて相対的に高く、疲労においても片振引張疲労より回転疲労のほうが高い値を示すが、これは回転試験の破壊はき裂伝ば過程が短い急速破壊であることを意味している。さらに、同じ片振引張疲労でも負荷応力が小さいほど黒鉛破面率は低くなって疲労破面の特徴をいっそう増す傾向が認められる。

4. 結 言

FC 10 級鋳鉄回転円板を用いて一方向回転試験および低サイクル疲労試験を行った。また、円板から採取した試験片による片振引張疲労試験も実施した。得られた結果は次のとおりである。

(1) 一方向回転破壊における円板の破片数はすべての実験で 4 個となった。また、回転数の単調な上昇にともなう円板内径の広がりの実測値は FEM 解析による計算値と近似的に一致することから、はん用構造解析プログラムを用いた FEM による回転円板の弾塑性応力解析の妥当性が確かめられた。

(2) 回転円板の低サイクル疲労試験から得た S-N 線図は負荷応力の大きさによってこう配の異なる 2 直線で表すことができ、これに対応して破壊形態も異なるものとなった。すなわち、高応力負荷のもとでは円板の破片はすべて 4 個となるのに対し、低応力負荷のもとでは 3 個となる傾向がみられた。

(3) 回転円板の低サイクル疲労強度と単軸試験片による片振引張疲労強度とを関連づけるに際して、平均接線応力や最大接線応力を引張強さで除したもので評価すると、回転円板の強度はそれぞれ大きく短寿命側および長寿命側に外れた。しかし、回転円板の一方向回転破壊強度で除したものをを用いると、両者ともよい評価となるが、特に平均接線応力を用いたものの対応関係が良好であった。

(4) 回転円板の黒鉛破面率は単軸試験片のものより若干高くなった。また、両試験ともにき裂の伝ば経路のちがいに起因して、黒鉛破面率は静的破面より疲労破面のほうが低くなった。さらに、片振引張疲労試験においては負荷応力が小さいほど黒鉛破面率は低くなって疲労破面の特徴がいつそう顕著に現れた。

終わりに、本研究を遂行するうえでスピテスタの運用に関して有益なご助言と多大のご協力を賜った丸和電機(株)の柴崎司郎氏、田口英知氏に厚く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 回転体の強さ試験研究分科会報告書, (1977), 日本機械学会。
- (2) 穂原, 機論, 31-222 (1965), 173.
- (3) 白鳥・吉田, 機論, 46-409, A (1980), 968.
- (4) 白鳥・ほか 3 名, 機論, 51-466, A (1985), 1521.
- (5) 佐藤・永井, 機誌, 69-575 (1966), 1617.
- (6) 野口・松下, 日本材料学会第 25 期学術講演会前刷集, (1976), 85.
- (7) 式田・ほか 2 名, 機論, 45-399 (1979), 1323.
- (8) 中西, 機論, 18-75 (1952), 44.
- (9) 鶴戸口, 機誌, 64-513 (1961), 1432.
- (10) 佐藤, 航空誌, 10-105 (1962), 322.
- (11) Shikida, M., ほか 2 名, *Proc. 29th Jpn. Congr. Mater. Res.*, (1986), 23.
- (12) 式田・ほか 2 名, 材料, 36-404 (1987), 455.
- (13) 西田・ほか 2 名, 材料, 31-348 (1982), 922.