

(論文)

高強度鋼の超高サイクル疲労破壊挙動に与える荷重形式の影響

Influence of Loading Type on Fracture Behavior of High Strength Steel under Very High Cycle Fatigue



三大寺悠介*
Yusuke SANDAIJI

In high-strength steel, fatigue fracture initiating from internal inclusions occurs in the very high-cycle fatigue region; however, the fracture behavior under cyclic shear stress has not been elucidated yet. In this study, ultrasonic torsional fatigue tests and ultrasonic axial fatigue tests were performed on the same bearing steel to compare the fracture behaviors. The effect of load type on very-high-cycle fatigue characteristics was also examined. Both the torsional and axial fatigue tests resulted in fracture originating from inclusions, and an optically dark area (ODA) was observed in the vicinity of each fracture origin; however, no difference in load type was recognized in the relationship between the ΔK value, obtained from the inclusion size and ODA size, and the number of cycles. Nevertheless, there are differences in the types of inclusions that cause fracture. It has been found that, in the case of the torsional fatigue test, inclusions elongated in the rolling direction tend to become the originating points of fractures.

まえがき = 自動車エンジンなどの輸送機械部品に用いられる軸受鋼やばね鋼のような超高強度鋼では、 10^7 サイクルを超える超高サイクル疲労寿命域において、鋼中の非金属介在物（以下、介在物という）を起点とした疲労破壊が生じることが知られており、そのメカニズム解明に数多くの研究がなされている^{1)~6)}。超高サイクル疲労では、介在物から生じたき裂が極低速で進展することで介在物の周囲にODA (Optically Dark Area)¹⁾などと呼ばれる特徴的な領域を形成し、その形成に全寿命の大部分が費やされる⁷⁾とされている。また、超高サイクル疲労特性は介在物のサイズや種類に影響されること⁸⁾などが報告されているが、その損傷過程は未だ不明な点が多い。

これらの研究は主に、回転曲げ疲労試験機を用いた繰返しの曲げ応力下、あるいは超音波軸力疲労試験機を用いた引張-圧縮応力下で行われてきた。いっぽう、コイルばねや軸受などで生じる繰返しせん断応力下の超高サイクル疲労破壊については、従来のねじり疲労試験機では現実的な時間内で超高サイクル疲労寿命域までの試験を実施した例がなく、破壊挙動やそのメカニズムは不明であった。しかし、超音波ねじり疲労試験機の開発によって検討が進んでおり^{9)~12)}、Xueらは同一の高強度鋼に対して超音波軸力疲労試験と超音波ねじり疲労試験を実施し、両試験で破壊起点となる介在物種が異なることを報告している¹⁰⁾。また筆者らは、介在物種を変えた軸受鋼に対して超音波ねじり疲労試験を実施し、破壊起点の介在物種によりき裂発生挙動が異なることを報告している¹²⁾。

本稿では、コイルばねや軸受などの繰返しせん断応力下で用いられる鉄鋼材料における介在物起点破壊抑制のための材料設計指針獲得に資するために、軸受鋼に対してねじり荷重を負荷する超音波ねじり疲労試験、および軸荷重を負荷する超音波軸力疲労試験を実施し、両者の破壊形態を比較することによって介在物起点疲労破壊挙動に与える荷重形式の影響を検討した。

1. 実験方法

1.1 供試材および試験片

酸化物を起点として内部起点破壊を生じさせやすくするために、溶鋼中の酸素濃度が高くなる大気溶解にて軸受鋼SUJ2の成分をベースとした鋳塊を作製し、熱間鍛造により $\phi 65$ の棒鋼に加工して供試材とした。表1に供試材の化学成分を示す。この供試材に対して球状化焼鈍を施した後、1,123Kにて20分間加熱して油焼入れし、438Kにて150分の焼戻しを行った。供試材の金属組織はマルテンサイトであり、ピッカース硬さは荷重98Nで698HVであった。なお、鏡面観察では酸化物と思われる球状介在物が多く観察された。疲労試験片は軸方向が供試材の鍛伸方向となるように採取し、図1に示す形状に機械加工した。なお、ねじり疲労試験では危険体積を

表1 化学成分

Table 1 Chemical compositions (mass%)

C	Si	Mn	S	Cr	Al	N	O
0.95	0.25	0.33	0.0015	1.47	0.019	0.033	0.0048

*1 技術開発本部 材料研究所

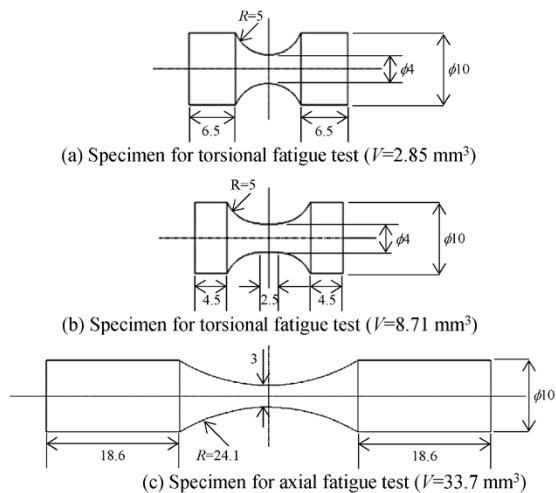


図1 疲労試験片形状
Fig. 1 Shapes of specimens

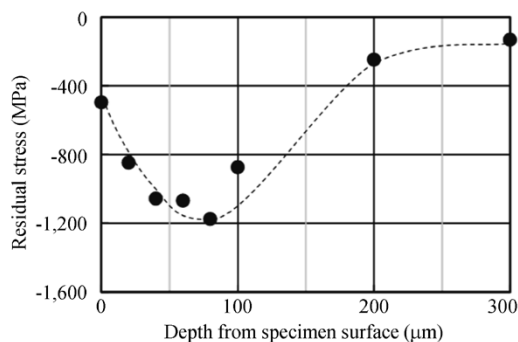


図2 残留応力分布
Fig. 2 Distribution of residual stresses

大きくして介在物起点破壊を生じやすくするために、図1 (a) に示す砂時計型試験片に加え、(b) に示す平行部をもつ試験片を使用した。最大応力の90%以上の応力が作用する領域を危険体積 V とすると、ねじり疲労試験片はそれぞれ 2.85 mm^3 および 8.71 mm^3 であり、軸力疲労試験片は 33.7 mm^3 である。試験片は鏡面研磨後ショットピーニング処理を行い、圧縮残留応力を付与した。試験片軸方向に対して 45° 方向の残留応力分布をX線回折法により測定した結果を図2に示す。残留応力は、試験片表面は約 500 MPa の圧縮応力であり、表層より $80\text{ }\mu\text{m}$ 深さにおいて最大圧縮応力約 $1,200\text{ MPa}$ となった。それより深くなるにつれて圧縮応力は減少し、 $300\text{ }\mu\text{m}$ の深さにおいて約 125 MPa であった。

1.2 疲労試験

疲労試験は、ねじり疲労試験および軸力疲労試験ともに島津製作所製超音波疲労試験機（ねじり：UFT-2000T、軸力：UFT-2000）を用い、両振りにて試験周波数 20 kHz で実施した。なお、疲労試験中に生じる発熱を抑制するため、圧縮空気を吹き付けて冷却した。さらに、事前試験にて発振時間 110 ms に対して停止時間を $440\sim 1,100\text{ ms}$ の範囲で変化させ、試験中の試験片表面の温度が 50°C 以下となる間欠条件を明らかにした上で疲労試験を行った。

1.3 破面観察

疲労破面の観察には走査型電子顕微鏡（SEM）と光学顕微鏡（OM）を用いた。破壊起点の介在物はエネルギー分散型X線分析（SEM-EDX）にて同定した。

エネルギー分散型X線分析（SEM-EDX）にて同定した。

介在物サイズ $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}}$ およびODAサイズ $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}}$ は、それぞれ破面に対して垂直な方向より撮影したSEM像およびOM像を用いて画像解析により実面積を測定し、その平方根の値とした。

2. 実験結果

2.1 疲労試験結果

図3にS-N曲線を示す。後述する破面観察の結果から、図中の白抜きプロットは表面起点破壊、黒塗りプロットは内部起点破壊を示す。また、付記のアルファベットは破壊起点となった介在物種を示し、Aは Al_2O_3 系介在物、MはMnS系介在物を示す。ねじり荷重下のS-N曲線は応力振幅の減少とともに寿命は増加し、 $\tau_a = 775\text{ MPa}$ で 2×10^7 回付近にて破断した点を除き、S-N曲線に危険体積の影響はみられなかった。また、後述する破面観察の結果、内部起点破壊と表面起点破壊が混在していた。Sakanakaらは、軸受鋼を用いてショットピーニング処理を施さずに超音波ねじり疲労試験を行ったところ、 $10^5\sim 10^9$ 回の寿命では表面起点破壊のみが生じることを報告している¹³⁾。本稿では、大気溶解により介在物を増加させ、さらにショットピーニング処理により表面を強化したため、内部起点破壊が生じやすくなったと考えられる。いっぽう、軸荷重下では応力振幅の低下とともに寿命は増加し、すべて内部起点破壊であった。

なお、本検討では介在物起点破壊挙動に着目するために、以降では介在物起点破壊が生じた結果について述べる。また、ねじり試験片において危険体積の影響はみられなかったため、両試験片の結果を区別せず扱う。

2.2 破面観察結果

図4に介在物起点破壊が生じたねじり試験片の破壊状況を示す。ねじり荷重下では、最大主応力方向に対し

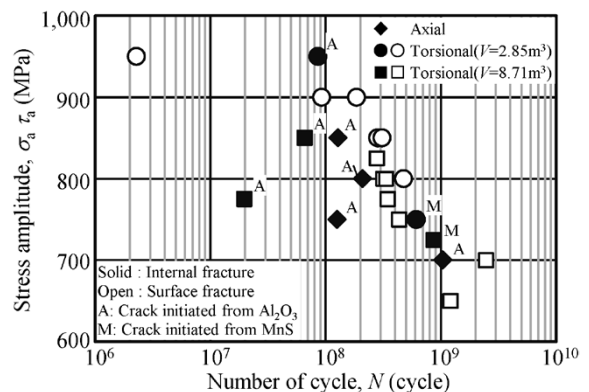


図3 疲労試験結果
Fig. 3 Results of fatigue tests

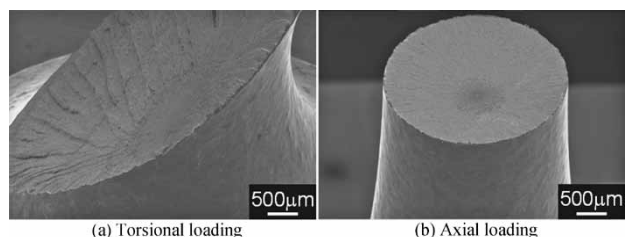


図4 破断疲労試験片の概観
Fig. 4 Overviews of fractured specimens

て垂直な方向である試験片の軸方向に対して約45°方向にき裂が進展しており、主応力型のき裂進展により破壊したと考えられる。図5は起点近傍のSEM像およびOM像である。内部起点破壊の起点はすべて介在物であり、ねじり荷重下の 2×10^7 回で破断した試験片を除くすべての起点介在物の周囲にODAが確認された。ねじり荷重下にて最大せん断応力の方向にき裂が進展する場合は、破面同士の摩擦により破面が平滑になる。しかしながら、本検討では起点近傍に平滑な破面は確認されず、軸荷重下と同様にODAが確認されたことから最大主応力により疲労き裂が進展したと考えられる。

いっぽう、軸荷重下の破壊挙動は過去の報告^{1), 4), 6), 7)}と同様に、介在物近傍にはODAが確認され、主応力型のき裂進展により破壊した。

図6に介在物サイズ $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}}$ と繰返し数 N の関係を示す。ねじり荷重下では $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}} = 10 \sim 80 \mu\text{m}$ 、軸荷重下では $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}} = 5 \sim 20 \mu\text{m}$ の介在物を起点として破壊したが、 10^8 回以上において $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}}$ は疲労寿命に対して大きく変化しなかった。図7にODAサイズ $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}}$ と N の関係を示す。ねじり荷重下では $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}} = 30 \sim 60 \mu\text{m}$ 、軸荷重下では $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}} = 20 \sim 40 \mu\text{m}$ のODAが形成されていたが、寿命と $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}}$ に明確な相関はみられなかった。

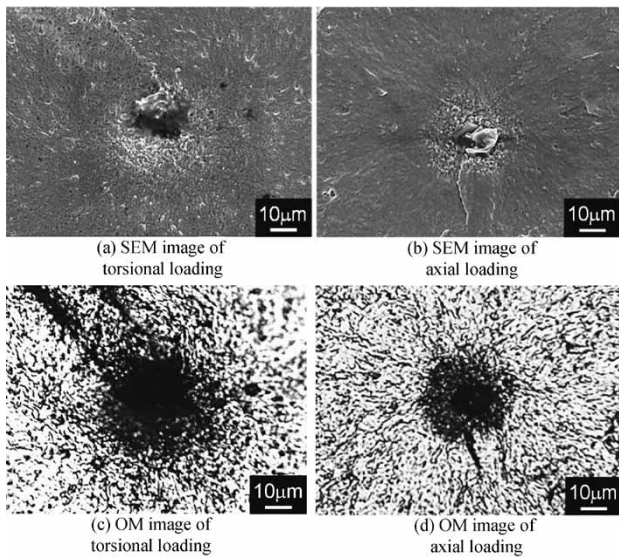


図5 破断疲労試験片の概観

Fig. 5 Overviews of fractured specimens

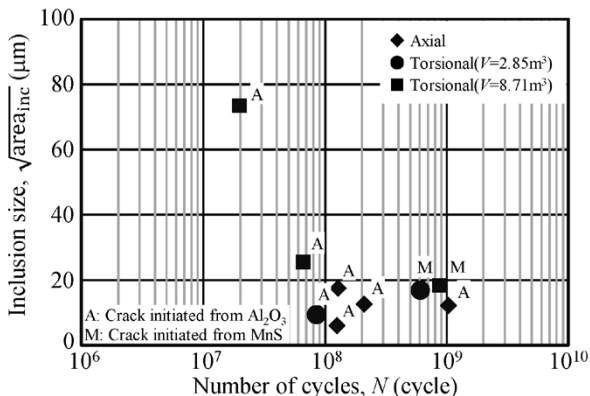


図6 介在物サイズと繰返し数の関係

Fig. 6 Relationship between number of cycles and inclusion sizes

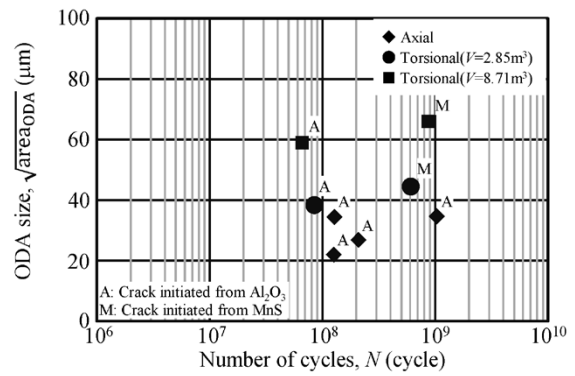


図7 ODAサイズと繰返し数の関係

Fig. 7 Relationship between number of cycles and ODA sizes

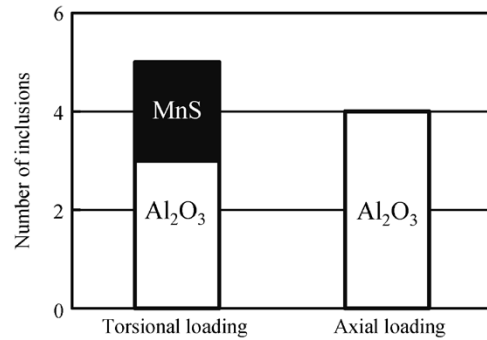


図8 起点介在物の種類

Fig. 8 Inclusion types of fracture origin

図8に破壊起点となった介在物の種類と内訳を示す。軸荷重下ではすべて Al_2O_3 系介在物が起点となったが、ねじり荷重下では Al_2O_3 系介在物とMnS系介在物がほぼ半数ずつとなった。

3. 考察

3.1 き裂発生挙動に与える荷重形式の影響

ねじり荷重下では Al_2O_3 系介在物に加えてMnS系介在物も破壊起点となった。起点の断面観察に基づき、ねじり荷重下において Al_2O_3 系介在物を起点とする場合は主応力型のき裂が発生、進展して破壊に至るが、MnS系介在物の場合はせん断型のき裂が発生した後、主応力型へ遷移し、破壊に至ることを筆者らは報告している¹²⁾。後者では、せん断型き裂は最大せん断応力方向に伸長したMnS系介在物の内部から生じており、最大せん断応力方向の投影面積が大きくなることでせん断型のき裂が生じたと考えられる。本検討では、鋼材の鍛伸方向と試験片の軸方向が一致するように試験片を採取しており、MnS系介在物は最大せん断応力方向に伸長して存在しているため、一部で起点になったと考えられる。反対に、軸荷重下では最大主応力方向に対する投影面積が小さくなるため、起点にならなかったと考えられる。

3.2 き裂進展に与える荷重形式の影響

き裂進展に与える荷重形式の影響を検討するために、ねじり荷重下と軸荷重下のそれぞれの起点介在物およびODAのサイズから求めた応力拡大係数範囲 ΔK と寿命の関係と比較した。軸荷重下およびねじり荷重下において、破壊起点の介在物とODAのサイズより求めた ΔK_{inc} および ΔK_{ODA} と寿命の関係をそれぞれ図9および図10

に示す。なお、 ΔK の計算には式(1)を用い、 $\sqrt{\text{area}}$ に $\sqrt{\text{area}_{\text{inc}}}$ と $\sqrt{\text{area}_{\text{ODA}}}$ をそれぞれ代入することで ΔK_{inc} と ΔK_{ODA} を求めた。

$$\Delta K = 0.5 \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\Delta \sigma$ はき裂に加わる応力範囲であるが、き裂進展には引張成分のみが作用すると考え、応力振幅を代入して求めた。なお、ねじり疲労試験は両振りで行っており、前述のとおり破壊状況からも最大主応力 σ_{pr} に対して垂直な方向に進展している。このため、式(2)が成り立つと考え、応力勾配を考慮して起点に生じた主応力振幅 $\sigma_{\text{pr,eff},a}$ を式(3)によって求め、その値を式(1)に代入することで求めた。

$$\sigma_{\text{pr},a} = \tau_a \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_{\text{pr,eff},a} = \tau_a \cdot (1 - D/R) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 τ_a は試験片表面における最大せん断応力振幅、 D は試験片表面からの起点の深さ、 R は試験片の半径である。

ねじり荷重下の ΔK_{inc} は寿命の増加とともに低下するが(図9)、 ΔK_{ODA} は寿命に依存せず3~5 MPa \cdot m^{1/2}でほぼ一定となり、介在物種による差異はみられなかった(図10)。この傾向および ΔK_{ODA} の値は軸荷重下と同様であり、これまでの報告²⁾とも一致している。これは、両振りのねじり荷重下では主応力型のき裂進展が生じるため、軸荷重下や曲げ荷重下と同様に、き裂はODAを形成しながら極低速で進展し、 ΔK_{ODA} が一定値に達するとODAを形成しない一般的なき裂進展へ遷移することを示唆している。すなわち、ねじり荷重下で介在物起点破壊が生じる場合、き裂発生は介在物の形状の影響を受

けて主応力型のき裂が生じる場合とせん断型のき裂が生じる場合があるが、いずれのき裂が生じた場合も主応力型のき裂進展により破壊に至る。また、起点の周囲にはODAが形成され、 ΔK_{ODA} が一定値に到達すると通常のき裂進展に遷移して破壊に至る。軸荷重下ではODAを形成するき裂進展に全寿命の大部分が費やされることが報告されており⁷⁾、ねじり荷重下でも同様にこのき裂進展が疲労寿命を支配していると考えられる。このため今後は、このき裂進展を抑制する金属組織的な因子を明らかにして組織設計指針の獲得を目指していく。また、ねじり荷重下では介在物の形状によって発生するき裂発生挙動が異なることから、例えば介在物形状や硬さなどがき裂発生寿命に影響を与える可能性があると考えられるため、金属組織だけではなく、介在物制御の観点からも検討を行っていく必要がある。

むすび = 軸受鋼を用いて超音波ねじり疲労試験および超音波軸力疲労試験を実施し、ねじり荷重下および軸荷重下の破壊挙動を比較することによって介在物起点破壊挙動に与える荷重形式の影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) ねじり荷重下のき裂発生では、MnS系介在物のように伸長した介在物を起点として疲労破壊する場合が確認された。
- (2) ねじり荷重下のき裂進展では、起点介在物種によらず、き裂は介在物周囲にODAを形成しながら主応力型で進展し、 ΔK_{ODA} が一定に達すると通常のき裂進展に遷移して破壊に至る。
- (3) ねじり荷重下と軸荷重下の ΔK_{ODA} 値は同程度である。これは、両荷重下ともに主応力型でき裂進展が生じたためと考えられる。

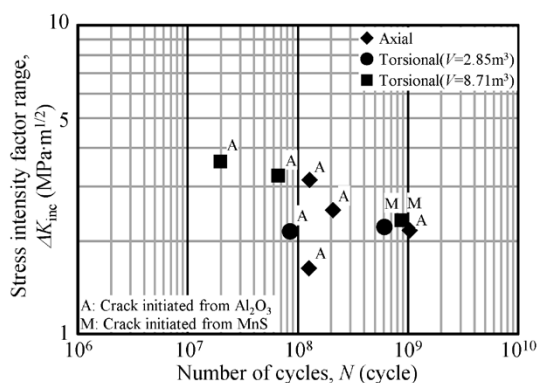


図9 繰り返し数と ΔK_{inc} の関係
Fig. 9 Relationship between number of cycles and ΔK_{inc}

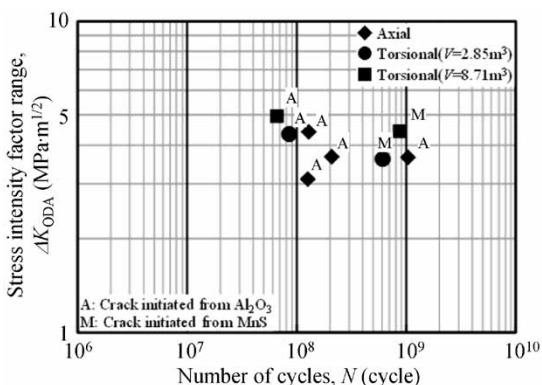


図10 繰り返し数と ΔK_{ODA} の関係
Fig.10 Relationship between number of cycles and ΔK_{ODA}

参考文献

- 1) Y. Murakami et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1999, Vol.22, p.581.
- 2) K. Tanaka et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2002, Vol.25, p.775.
- 3) C. Bathias. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1999, Vol.22, p.559.
- 4) H. Mayer et al. International Journal of Fatigue. 2009, Vol.31, p.242.
- 5) K. Shiozawa et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2001, Vol.24, p.781.
- 6) T. Sakai et al. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2002, Vol.25, p.765.
- 7) W. Ishida et al. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A. 2012 Vol.78, p.23.
- 8) Y. Furuya et al. Metallurgical and Materials Transactions A. 2007, Vol.38, p.1722.
- 9) S. E. Stanzl-Tschegg et al. Ultrasonics. 1993, Vol.31, p.275.
- 10) H. Q. Xue et al. Engineering Fracture Mechanics. 2010, Vol.77, p.1866.
- 11) Y. Shimamura et al. International Journal of Fatigue. 2014, Vol.60, p.57.
- 12) Y. Sandaiji et al. Procedia Materials Science. 2014, Vol.3, p.894.
- 13) N. Sakanaka et al. NTN TECHNICAL REVIEW. 2011, Vol.79, p.104.