

特集 合成ゴム材料の疲労試験に対する考察*

Examination of the Synthetic Rubber Fatigue Test

柴田 治久

Haruhisa SHIBATA

上野 俊一

Syunichi UENO

Rubber vibration insulators used for accessories of cars tend to use synthetic rubber because the temperature of the environment is high and the required length of use is long. The purpose of this study is to predict the fatigue test results for rubber in a short time.

The fatigue mechanism of rubber is regarded as the phenomenon of reaching a break through the growth of micro cracks in rubber caused by cyclic stress. The following was estimated by developing J integral calculus that the crack growth rate indicates incline of fatigue diagram. We confirmed that this phenomenon occurs with synthetic rubber and examined the possibility of using this short-term fatigue method.

Key words: Synthetic rubber, Fatigue test

1. まえがき

自動車の補機等の部品に使用される防振用途のゴムは、熱的に厳しい環境で長期間使用され、かつ取りつけスペースが制限されるためゴムの体格がエンジンマウント等に比較してかなり小さくなることから耐熱的に優れる合成ゴムを主に使用している。

防振用途のゴムの疲労耐久性を確認する方法としては金属材料と同じく疲労線図を用いている。本方法の課題は使用可否判断までの時間を要することである。たとえば、エンジンの脈動に由来する振動に対する耐久性を確認するためには3ヶ月以上の時間が必要となり、製品開発の効率化に課題があった。本研究は短期間で合成ゴムの疲労寿命推定の可能性を検討することを狙った。

2. 検討の進め方

短期間で疲労寿命を推定するためにはゴムの疲労メカニズムに基づいた推定式を構築する必要があり、以下の手順で検討を実施した。

- STEP1: 疲労メカニズムの推定
- STEP2: 疲労寿命推定式の検討
- STEP3: 推定式の適用性確認
- STEP4: 短期疲労寿命推定方法の検討

3. 疲労メカニズムの推定

ゴムの疲労ステップはゴム中に破壊の核が発生・成長して最後に系全体が破壊されると考察されており(亀裂進展説)、それを裏付けるための研究がなされて

いる。今回、ゴム試験片を用いた疲労試験後の疲労破断面に初期では認められなかった欠陥の発生が認められる(Fig. 1)ことからゴムの疲労を亀裂進展に従うものとして取り扱うこととし、ゴムの疲労ステップの中で支配的な期間である「ゴムの破壊の核が成長する期間」の定量化検討を行うこととした。

破壊力学上の亀裂進展に関する理論は金属等の線形弾性体に対して適用されるエネルギー開放率 G (応力拡大係数 ΔK として用いられることが多い)とエネルギー開放率の考え方を非線形領域まで拡大したJ積分が存在する。名古屋大学の田中教授が天然ゴム材料に対してJ積分が成立し、亀裂進展速度 da/dN と ΔJ の間に直線関係があることを検証されている。¹⁾本研究では先生の研究を受けて、合成ゴムに関してもJ積分が成立する仮定をたてた。さらに疲労寿命推定式をJ積分より導出することを検討した。

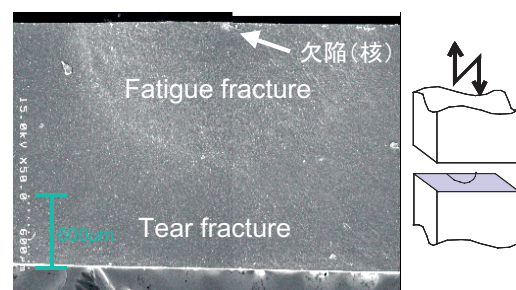


Fig. 1 Fatigue fracture of NBR rubber

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2006年春季大会学術講演会前刷集」No.17-06, 77より転載

4. 疲労寿命式の検討

J積分を用いた亀裂進展式は式(1)で表され、 ΔJ は式(2)で表される。

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta J)^m \quad (1)$$

$$\Delta J = \beta W a \quad (2)$$

ここで a : 傷の大きさ, N : 繰返し回数, ΔJ : 亀裂が da だけ成長したときのエネルギー変化量 (Table 1 参照), W : ひずみエネルギー, C, β, m : 係数である。式(1)に式(2)を代入することで式(3)が得られる。

$$\frac{da}{dN} = C (\beta W a)^m \quad (3)$$

式(3)は傷の大きさ a と繰返し回数 N および歪エネルギー W で式が構成されており (C, β, m は係数), 破断するときの繰返し回数 N (寿命) は W と a を用いて表せる可能性があると考えた。そこで, 式(3)を変形し式(4)とし, それを積分することで式(5)および式(6)を導いた。式(5), (6)における a_0 はゴム中の初期欠陥の大きさ, a_E は破断直前の亀裂の大きさ (Fig. 1におけるFatigue fractureの大きさ) と定義する。また破断した時の繰返し回数 N を普通の繰返し回数と区別するために式展開時のみ N_E と記載した。

$$dN = \frac{1}{C (\beta W a)^m} da \quad (4)$$

$$N_E = \frac{1}{C (\beta W)^m} \frac{1}{1-m} \left[a^{1-m} \right]_{a_0}^{a_E} \quad (5)$$

$$N_E = \frac{1}{C (\beta W)^m} \frac{1}{1-m} \left(a_E^{1-m} - a_0^{1-m} \right) \quad (6)$$

ここで, $a_E \gg a_0, m \geq 2$ と仮定すると式(7)が導かれる。 $a_E \gg a_0$ に関してはFig. 1に示されるように a_E は欠陥の20倍であり, 初期欠陥に比較するとそれ以上と考えられ, 十分 $a_E \gg a_0$ が成立すると考えられる。

$$\left(a_E^{1-m} - a_0^{1-m} \right) \approx -a_0^{1-m} \quad (7)$$

式(7)を式(6)に代入すると式(8)および式(9)が得られる。

$$N_E = \frac{1}{C (\beta W)^m} \frac{1}{m-1} a_0^{1-m} \quad (8)$$

$$\log N_E = \log \left(\frac{a_0^{1-m}}{C (m-1)\beta} \right) - m \log W \quad (9)$$

以上より, 亀裂進展による疲労寿命 N の寿命推定式は式(9)として求めることができた。

当然のことながら式(1)は亀裂進展の式としてFig. 2に示されるグラフを意味し, 式(9)はFig. 3に示されるグラフを意味する。ちなみに本式より, 亀裂進展が支配的原因となる疲労は両対数グラフで整理できることがわかる。式を展開したことから考えても両グラフの傾きに關与する m は当然同じ値となるはずであるが便宜上検討を進める上で亀裂進展試験より得られる m を m_c と呼び, 疲労試験より得られる m を m_f と呼んで区別する。

5. 推定式の適用性確認

疲労寿命推定式はJ積分が合成ゴムに対しても成立するという仮定と式(2)がゴムに対しても成立するという仮定のもと式を展開しており, それぞれの仮定の成立性確認を行う必要がある。

まず, J積分の合成ゴムへの適用性確認としてはFig. 2に示すように亀裂進展グラフの直線性を示すことが適用性確認となる。式(2)に対しては ΔJ vs $W \times a$ のグラフの直線性を示すことができれば成立したと判

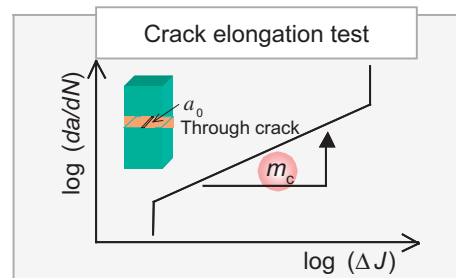


Fig. 2 Crack elongation test

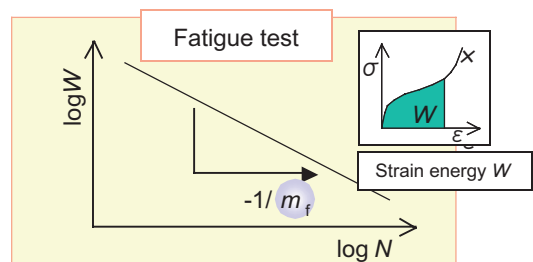


Fig. 3 Fatigue test

断できる。さらに亀裂進展の傾き m_c と疲労試験の傾きより得られる m_f が同一であればJ積分の適用性および式(2)の成立性を合わせて証明できると考え、Fig. 4に示す方法で亀裂進展試験を実施し、疲労疲労試験を実施し、推定式の適用性を確認した。式(2)の成立性に関しても亀裂進展試験中に得られる測定データより検証を行った。

亀裂進展試験は、故意に貫通亀裂を入れたサンプルを用いて亀裂進展試験を実施し、それぞれ N vs da/dN および N vs ΔJ の関係を求め、 N について整合すると da/dN vs ΔJ の関係を得ることができる。 N vs da/dN は繰返し負荷回数に対して亀裂大きさ (Fig. 4における a) の変化を測定することで求めることができる。一方、 N vs ΔJ に関しては、開口変位法を用いて算出する。開口変位法は負荷した応力 σ とその応力を負荷した時の開口変位 ϕ (Fig. 4における ϕ) より J を求める方法で、繰返し負荷回数に対し応力 σ と開口変位 ϕ を測定することで J が算出でき、そこから回数に対する J の変化量を求めることで N vs ΔJ の関係が得られる。以上二つのデータより da/dN vs ΔJ すなわち亀裂進展のグラフを求めることができ、傾きの直線性を確認するとともに傾き m_c を求めることができる。

疲労試験は亀裂進展試験に供したのと同じ傷を入れたサンプルを用いて疲労試験を行う。ただし、使用するデータとしては歪や応力の代わりに歪エネルギー W (Fig. 3に示されるStrain energy W) を用いる。数水準の歪エネルギーに対し破断までの回数 N を求め、傾き m_f を算出する。

式(2)に対しては亀裂進展試験の過程で W を測定しており、繰返し回数 i 回目に対する W_i の変化量が ΔJ_i

であり、亀裂の大きさ a_i も実測より得られるため、これらの関係をグラフ化することで ΔJ vs W_a が確認できる。

評価対象材料は防振ゴムに用いているEPDMゴムと、引裂強度が低いゴム材料の代表としてシリコンゴム (VMQ) を用いた。また、試験片形状はFig. 5に示すようにJISで規定されているダンベル5号片の中央に幅0.5mmの貫通亀裂を有するものを用いた。

EPDMを用いた確認試験結果をFig. 6に示す。本グラフより合成ゴム (EPDM) において直線性が認められ、合成ゴムに対してもJ積分が適用できると判断した。

次に、疲労試験結果をFig. 7に示す。前述したように、通常ゴム材料は ϵ (歪) - N (繰返し回数) 線図で表すが本グラフは前述のようにJ積分を展開しているため、 W (歪エネルギー) - N 線図を用いる。

本グラフの傾きより算出し $m_f=2.88$ が得られた。亀裂進展グラフ (Fig. 6) の傾きより得られた $m_c=2.73$ であり、亀裂進展試験の m_c と疲労試験より得られる m_f が一致することが確認された。J積分の適用性の成立および式(2)の成立が確認されたと考える。

既に式(2)の成立確認はできているが、式(2)の直接確認としてFig. 8に W_a vs J のグラフを示す。本結果より、ほぼ直線性が得られ合成ゴムに対しても $J \propto W_a$ が成立すると考える。

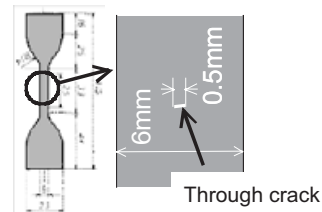


Fig. 5 Shape of sample

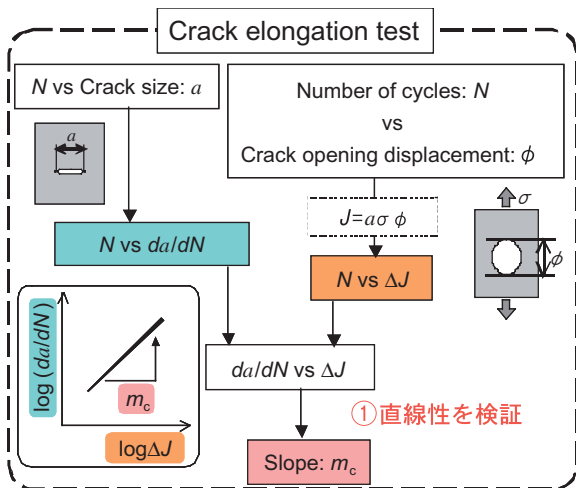


Fig. 4 Step of crack elongation test

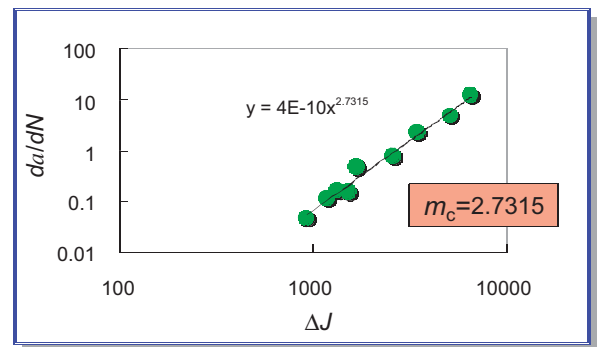


Fig. 6 Crack elongation test of EPDM

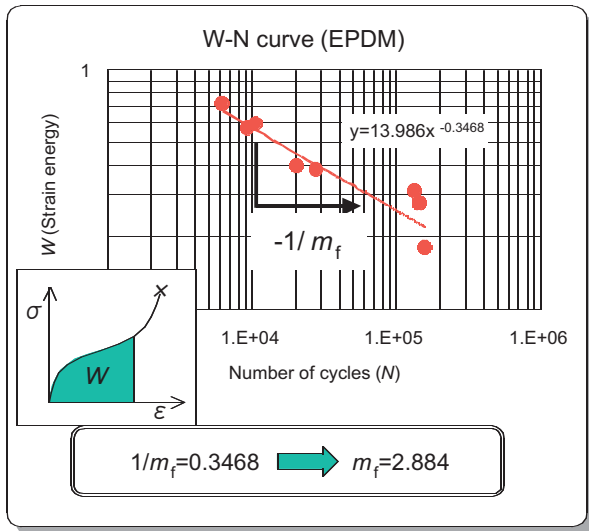


Fig. 7 Fatigue test of EPDM

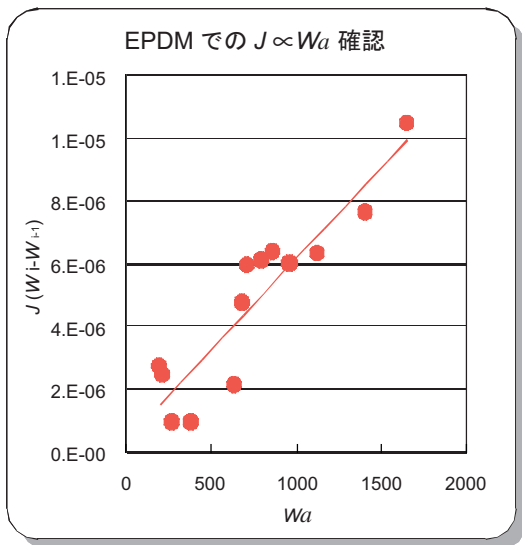


Fig. 8 $J \propto Wa$

同様に亀裂進展試験および疲労試験をシリコンゴム (VMQ) に対しても実施し、 m_c と m_f のよい一致が得られたことから (Table 1 参照)、J積分は合成ゴムに対しても適用でき、J積分を展開して求められた疲労寿命推定式の m_c はき裂進展試験より求められる m_f と同一であることが確認できた。以上の結果より短期疲労寿命推定方法を検討する。

Table 1 m_c vs m_f

	m_c	m_f	error
EPDM	2.73	2.88	+3%
VMQ	4.80	4.96	-3%

6. 短期疲労寿命推定方法の検討

疲労寿命式は前述の式(9)に示されるように、切片と傾き m で表される。

$$\log N = \log \left(\frac{a_0^{1-m}}{C(m-1)\beta^m} \right) - m \log W \quad (9)$$

今までの検討で、合成ゴムにもJ積分が適用できることおよび、亀裂進展試験より求まる m_c とWN線図より求まる m_f は同じ値となることが確認できており、WN線図の傾きを求めるために亀裂進展試験を行えばよい。あと線図を求めるためには切片に相当する $\log \left(\frac{a_0^{1-m}}{C(m-1)\beta^m} \right)$ を求める必要があるが、本式の構

成要素である a_0 (実際のゴム中に存在する初期欠陥)、係数 C 、係数 β を求めることは困難であるため、代用として貫通亀裂のないテストピースの疲労試験を1水準実施し (1点実測点を求め)、その点を通る傾き $-1/m$ 線を引けば寿命線となるため、比較的短時間で対応可能と考える。亀裂進展試験により傾きを求めるのに必要な日数として2日、切片代用として疲労試験で実測するのに約3日 (2 Hzで測定したとして約50万回相当) 必要とみなすと従来3ヶ月かけて測定していたものに対し、約1週間で疲労特性を予測できることになり、かなりの時間短縮となる。

本推定方法に関しては、ゴムの初期欠陥と故意に入れた貫通傷の傾きに及ぼす影響や、亀裂進展試験の精度アップ等課題が存在すると考えられるが、短期予測手法としては有効と考えられる。

謝辞

本研究の遂行において有益なご助言をいただきました名古屋大学大学院工学研究科・田中啓介教授に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 田中啓介・秋庭義明・來海博央・伊藤和之, 機論,
A (2003-4), pp. 69-680, pp. 758-765.



<著 者>



柴田 治久
(しばた はるひさ)
材料技術部
ゴム材料研究開発に従事



上野 俊一
(うえの しゅんいち)
生産推進センター
生産技術支援室
材料技術部を実験で支援
(主にゴム関連)