

エンジン揺動吸収部の極低温環境下における ゴムチューブ寿命予測手法の構築

Development of Method of Prediction of Lifespan of Rubber Tubes in Oscillation-absorbing
Sections of Automotive Engines in Extremely Low-temperature Environments

若 松 健*
Takeshi WAKAMATSU
戎 井 順 子*
Junko EBISUI

臼 井 英 正*
Hidemasa USUI
橋 本 勝 史*
Katsushi HASHIMOTO

花 房 寛 史*
Hirofumi HANAFUSA

要 旨

効率的な開発に有効なエンジン揺動を吸収するエアクリーナとエンジンをつなぐゴム製 Air Flow Tube の寿命予測手法を構築した。

まず、ゴムの変位挙動、ひずみを数値的にシミュレーション可能なソフトウェアを選定し、ゴム材料の非線形性を模擬できる解析モデルとして弾塑性 CAE モデルを用いた。

次に材料の応力ひずみ特性の引張試験をおこない、CAE 物性データへの反映をおこなった。この結果を単体蛇腹ピースを用いた繰り返し単体揺動による破断するまでの回数から S-N 線図を求めた。

実機試験と CAE 予測値との相関係数 (蛇腹挙動、蛇腹クラック部位) を検証したところ、決定係数:0.92 となる強い相関関係を達成できた。

本手法により、CAE の応力値から破断回数を予測する解析技術を確認し寿命予測が可能となった。

ABSTRACT

A method of prediction of the lifespan of rubber air flow tubes that connect the air cleaner and the engine and absorb engine oscillation that will contribute to efficient development has been developed.

First, software was selected that would make it possible to numerically simulate the displacement behavior of rubber and the strain generated in the material, and an elastic-plastic CAE model was employed as an analytic model to enable simulation of the nonlinearity of rubber materials.

Tensile tests were then conducted in order to determine the stress-strain characteristics of the materials, and the results were reflected in CAE property data. S-N diagrams were formulated based on the results and results for number of cycles to fracture in unit bellows test pieces in response to repeated oscillation.

Study of the correlation between actual test results and CAE predictions (for bellows behavior and the position of cracks in the bellows) indicated a strong correlation, with a coefficient of determination of 0.92.

The developed method has provided an analytic technique for the prediction of the number of cycles to fracture in air flow tubes based on CAE stress values, making it possible to predict the lifespan of the products.

1. ま え が き

自動車の開発において、エンジンルーム内 (Fig. 1) に装着されている Air Flow Tube (以下 AFT) (Fig. 2) はエンジン揺動を吸収する機能を備えているが、使用環境条件は地域ごと、車ごとに異なるためその条件に適した AFT の開発が求められる。また、AFT の材料であるポリ塩化ビニルが混合されたアクリロニトリルブタジエンゴム (以下

NBR/PVC)、アクリルゴム (以下 ACM)、エピクロルヒドリンゴム (以下 ECO) を使用している場合は、ガラス転移温度が -35℃ から -45℃ 付近となる。そのため極低温環境 (-20℃ から -35℃ まで) 下で使用する場合は完全な弾性域とはならない。

従来からエンジン負圧に対する剛性予測については超弾性域を用いた CAE 技術が活用されてきたが、ゴム材は温度環境が異なることで材料特性が変化しエンジン揺動

* 四輪 R&D センター

による材料寿命の予測手法が明確でないため、各環境条件でエンジン揺動を吸収する様子を机上で検討することは容易ではない。特に極低温環境下におけるゴムの挙動は、従来 CAE にて使用されている超弾性モデルでは精度良く再現できず、CAE による机上検討は容易ではないとされてきた。

したがって、AFT を効率的に開発するためには、各環境条件における蛇腹部の寿命予測技術が求められる。

過去の研究⁽¹⁾⁻⁽³⁾では極低温環境下における寿命予測手法が議論されていなかったが、本研究では、極低温環境下における蛇腹単体揺動試験、弾塑性モデルを用いたシミュレーションという手法を新たに検討した。

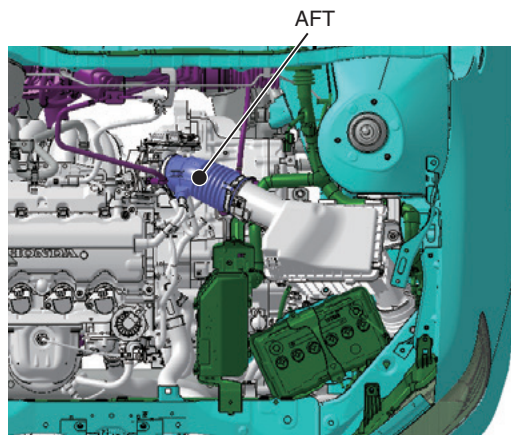


Fig. 1 Engine chamber

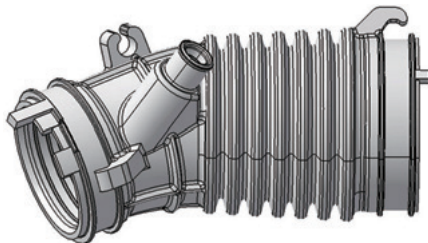


Fig. 2 AFT

2. 弾塑性モデルの考え方

2.1. 選定の考え方

2.1.1. 解析手法選定

エンジン揺動吸収部である AFT の極低温環境下における寿命を精度良く予測するためには、ゴム材料の物性値を正確に把握する必要がある。AFT がエンジン揺動を受けると蛇腹部が変形してひずみが生じる。従来の知見では、材料寿命を判断する際は、オゾン濃度が 50 pphm、温度は 40℃ にて一定環境下⁽⁴⁾におけるひずみと破断回数の関係を用いてきた。しかし、ゴム材料は形状や温度環境によっ

てひずみに対する発生応力が大きく変わってしまう⁽⁵⁾ため、ひずみだけでは寿命は判断できない。

そこで、応力と温度の関係に着目し、本研究では応力と破断回数の関係を明らかにすることとした。

2.1.2. 弾塑性モデルの選定理由

一般的なゴム材料テストピース引張り試験における応力とひずみの関係を Fig. 3 に示す。エンジン揺動量は車両のマウントシステムによって抑制されており、AFT に発生するひずみ量は 50% 以下であることがわかっている。一方、従来のゴム材料の CAE で使用している超弾性モデルは Fig. 3 に示すような二つの変曲点をもつ曲線をモデル化するパラメータを使用する。しかし、解析パラメータのゴム材料の AFT が一般的に用いられるこの領域は、Fig. 3 の破線の四角枠で示す第一変曲点付近である。この変曲点を持つ応力ひずみ曲線は、Fig. 4 に示す弾塑性体の応力ひずみ曲線と特徴が近似している。そこで本研究では、ひずみ 50% 以下の領域に着目し、ゴム材料の材料非線形性を精度よく再現するために、弾性域についてはゴムの応力ひずみ特性に用いられる弾性モデルを用いて、塑性域については樹脂の応力ひずみ特性に用いられる塑性モデルを用いて、ゴムのモデルの選定としては弾塑性モデルが適切であると考えた。

2.2. 弾塑性モデル用応力ひずみ線図の取得

極低温環境下における弾塑性モデル用応力ひずみ線図

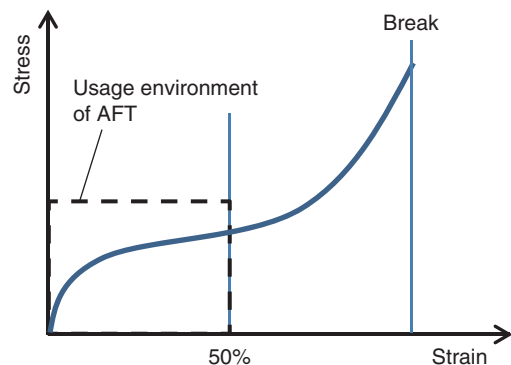


Fig. 3 Stress-strain curve for rubber

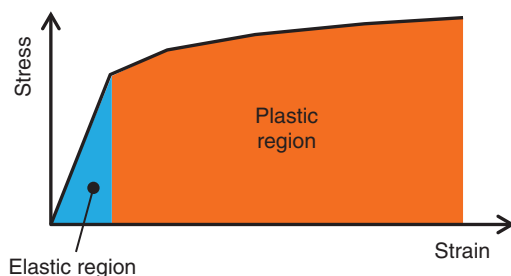


Fig. 4 Elastic-plastic model

を作成するために、ゴム材料テストピースはダンベル形状ではなく短冊形状を使用した (Fig. 5)。ダンベル形状で試験をおこなうと、ガラス転移温度付近では Fig. 6 のようにネック領域による断面積変化から、応力分布が偏ってしまう、引張り応力のずれが発生してしまう。短冊形状のテストピースを使用すると各変位における断面積が計算しやすく、解析に必要な真応力を算出しやすい。引張速度は、発熱を抑えるため 12.5 mm/min の低速でおこなった。実験

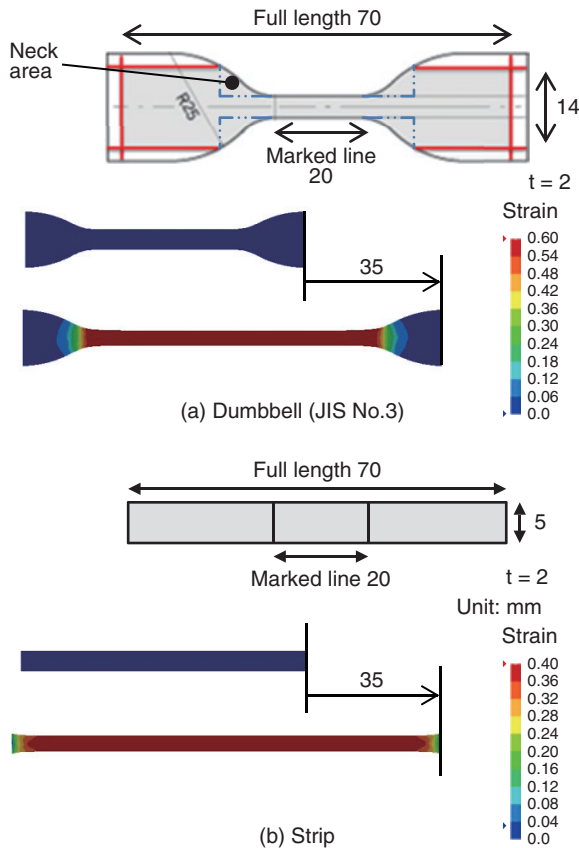


Fig. 5 Test piece

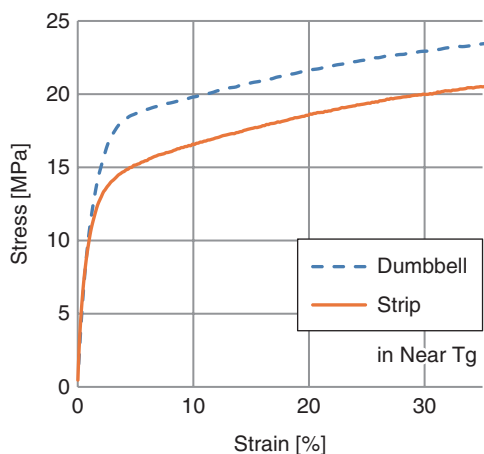


Fig. 6 Difference in stress

により得られた温度別の応力ひずみ線図を Fig. 9 に実線で示す。

2.3. 実験値と CAE のコリレーション

CAE は, Abaqus for CATIA V5 を用いて実施した。

ゴム材料の応力ひずみ特性を CAE にて再現するために採用した弾塑性モデルは、弾性域と塑性域の二つの領域における材料物性パラメータを有している。コリレーションについては、Fig. 7 の JIS 引張試験とそれを模擬した試験を CAE (Fig. 8) にておこない、Fig. 9 に示す -25℃ から -35℃ までの温度別の引張り試験結果を取得した。

Fig. 3 からひずみ 2% までを弾性域、それ以降を塑性域とし、弾性域では初期弾性率とヤング率で弾性域を定義し、塑性域では複数点の塑性ひずみに対する真応力のテーブルデータで塑性域を定義した。この弾塑性モデルの入力値に対して、各材料別、各温度別の応力ひずみ特性の実験値に対する CAE 解析値を比較検証しながら、パラメータのフィッティングによる相関性の検証をおこなった。

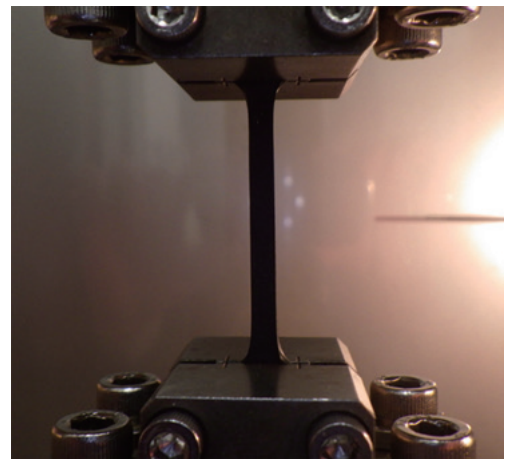


Fig. 7 JIS tensile test

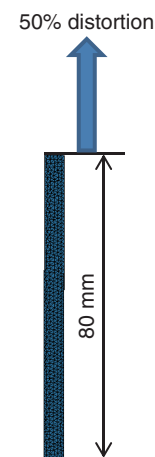
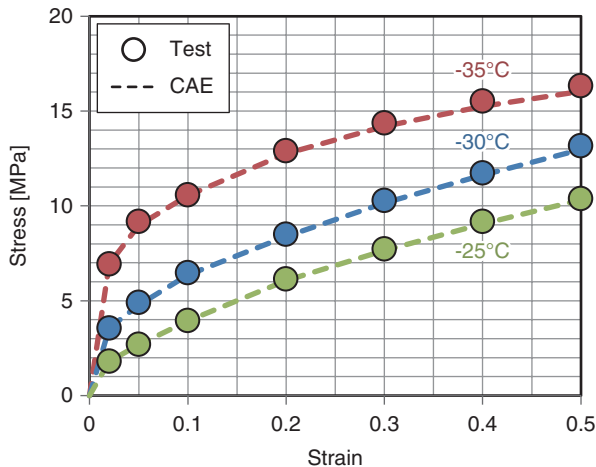
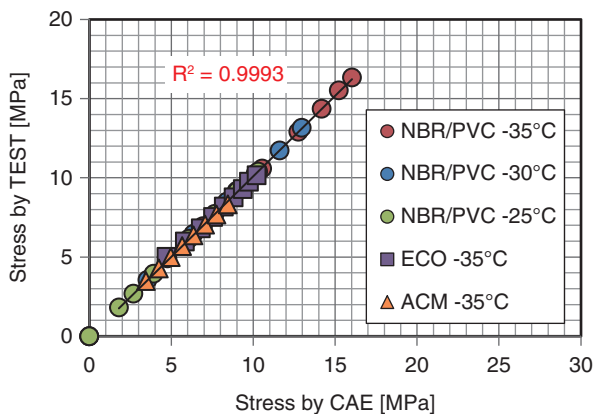


Fig. 8 JIS tensile test (CAE)

Fig. 9(a) に NBR/PVC の各温度別の引張り試験の実験結果と CAE 解析結果のひずみ応力線図を示す。Fig. 9(b) は各材料別および温度別の引張り試験の各ひずみ量に対する実験応力値と CAE 応力解析値の相関性を示すグラフであり、実験結果と CAE の相関性を検証した結果、決定係数: 0.99 となる強い相関関係となった。



(a) Stress-Strain Curve



(b) Correlation between CAE and test results for each material

Fig. 9 Results of tensile test

3. 実験方法

3.1. 極低温単体蛇腹揺動試験

本試験は、正確な蛇腹部の形状変化および破断回数を把握するために、Fig. 10 に示すような蛇腹三つ (3 山) の直管形状のゴムチューブを作成し、低温恒温槽付きのサーボバルサ (Fig. 11 株式会社島津製作所製 EHF-LV010KI-A04SP) を用いて極低温単体蛇腹揺動試験をおこなった。

方向別の挙動および破断回数を確認するために、Fig. 12 に示す引張りと圧縮の荷重がかかる上下 [Fig. 12(a)] 方向 (0°), せん断荷重のかかる左右 [Fig. 12(b)] 方向 (90°), 引張りと圧縮とせん断の複合的な荷重のかかる斜め [Fig. 12(c)]

方向 (45°) に取り付け位置を基準として揺動させ、試験を実施した。さらにこれらの方向に対し、温度別に試験を実施し、各方向に対し挙動、破断回数の温度依存性の確認をおこない、これらの試験条件を NBR/PVC, ACM, ECO の材料別でおこなった。また、揺動波形は Fig. 13 に示すように実際の加速、制動時のエンジン揺動挙動を測定し、その挙動を模擬するためにプラトー時間を有する台形波でおこなった。

3.2. 極低温 AFT 製品揺動試験

複雑な製品形状 (Fig. 2) においても CAE との相関性を確認するために、極低温環境下にて振動試験 (Fig. 14) をおこなった。

試験は、-35°C 環境条件下でおこない、周波数は正弦波 2 Hz, 振幅とその方向はエンジン揺動の最大変位量とした。



Fig. 10 Unit body bellows test piece

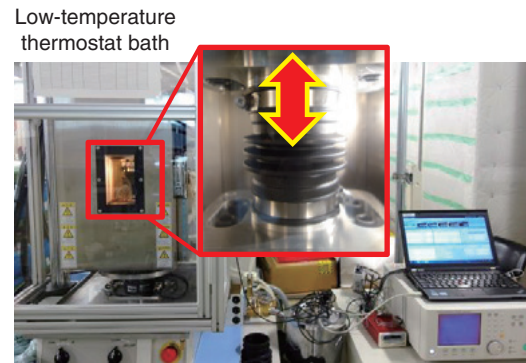


Fig. 11 Strength-testing apparatus

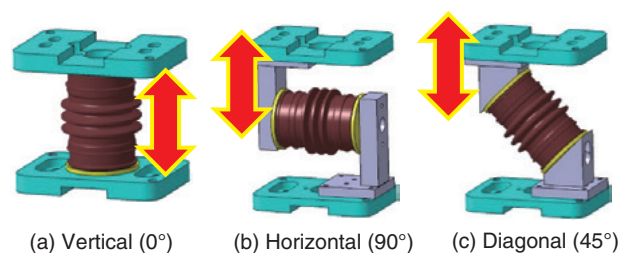


Fig. 12 Direction of oscillation

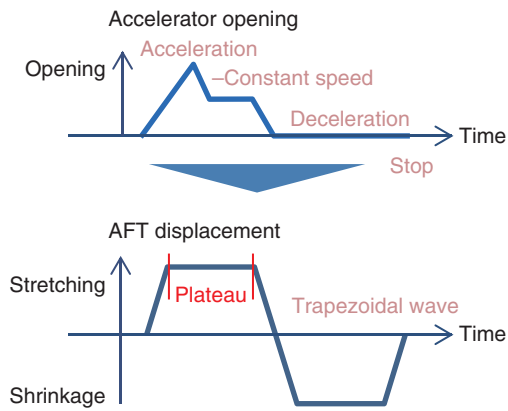


Fig. 13 Waveform for oscillation test

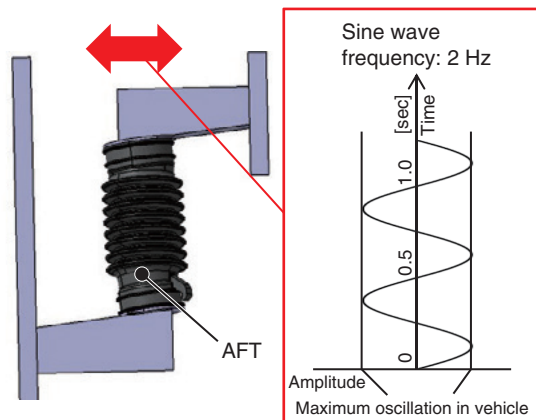


Fig. 14 Strength-testing apparatus for actual AFT

4. 実験結果と考察

4.1. 実験結果

単体蛇腹テストピースを用いて、極低温環境下にて蛇腹に対して、上述の3パターンの変位方向で繰り返し揺動試験をおこない、AFTが破断するまでの揺動回数を計測した結果をFig. 15に示す。

また、Fig. 16に各揺動試験後の破断部位の写真を示す。

4.2. CAE 解析結果

4.1. 節と同様に3パターンの変位方向にて、CAEを用いて単体蛇腹テストピースに強制変位入力を加えた時の蛇腹に発生するミーゼス応力(最大発生応力)の解析結果をFig. 16に示す。また、Fig. 16に各揺動条件での発生応力のコンター図を示す。

4.3. 考察

実験結果では、破断するまでの回数が少ない揺動方向は、斜め[Fig. 12(c)]方向から上下[Fig. 12(a)]方向から左右[Fig. 12(b)]方向という順番となった。一方、CAE解析結果においても、応力値が高い揺動方向は、斜め方向、上下方

向、左右方向という順番となり、応力値が高いほど、破断するまでの回数は少ないという結果となった。また、Fig. 16には各揺動方向による破断部位と最大応力の結果から最大応力部位と破断部位が一致していることがわかる。

Fig. 15とFig. 17の結果から、CAEにて解析した発生応力と実機試験による破断するまでの回数の関係をプロットしたグラフをS-N線図としFig. 18(a)に示す。このグラフ

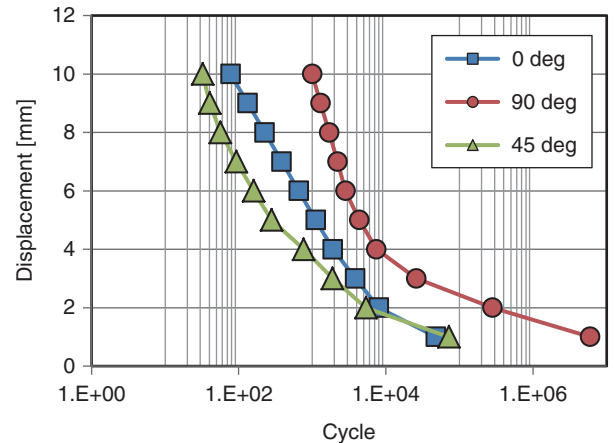


Fig. 15 Results of oscillation test

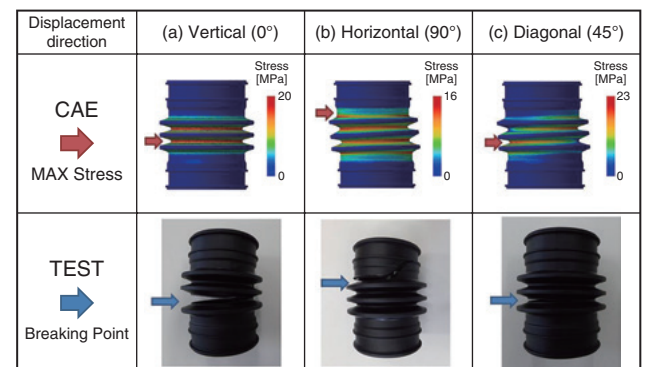


Fig. 16 Comparison between oscillation test results for test and CAE

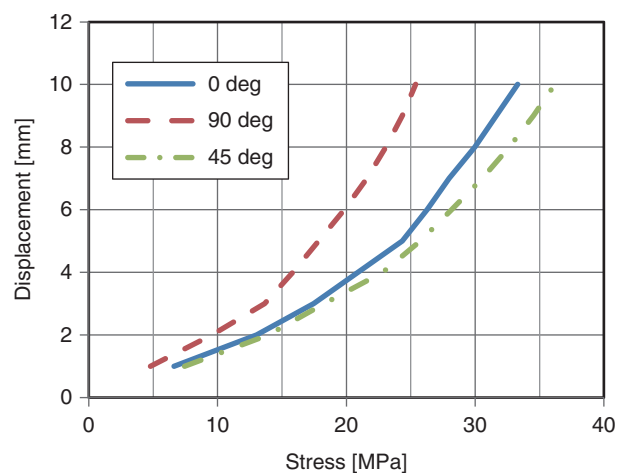
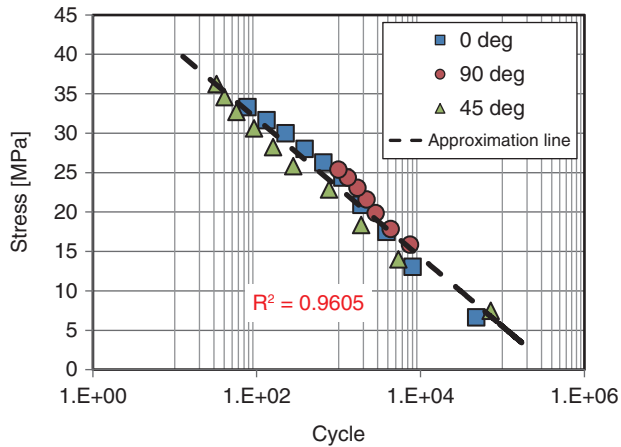


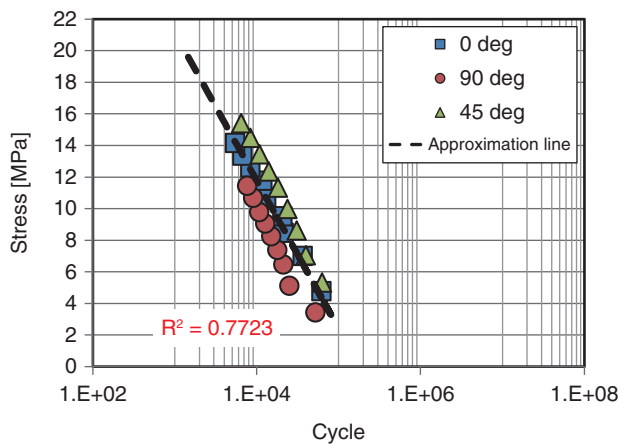
Fig. 17 CAE results

から、応力と破断するまでの回数は図に示す通り、決定係数:0.96 となり強い相関関係があることがわかる。

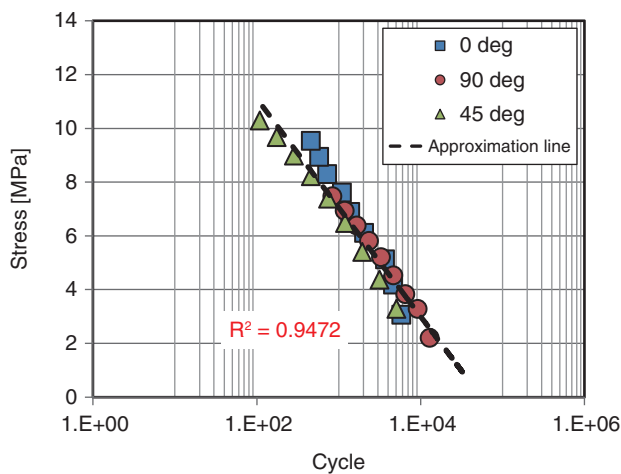
本寿命線を各材料ごと [Fig. 18(b), Fig. 18(c)] に作成することで、AFT の揺動に対する寿命を CAE を用いて応力値を算出することで材料の破断するまでの回数を予測することができると考えた。



(a) Results for NBR/PVC



(b) Results for ACM



(c) Results for ECO

Fig. 18 Stress and number of cycles to fracture for each material

5. 検証

この寿命線の妥当性を確認するために、実際に AFT の製品形状 (Fig. 2) にて応力解析と極低温 AFT 製品揺動試験 (Fig. 14) をおこなった。Fig. 19 が予測寿命線に対する実機揺動試験の AFT が破断するまでの回数の結果をプロットしたグラフである。

また、Fig. 20 には極低温単体蛇腹揺動試験 (Fig. 11) の破断回数と CAE 応力値から推定される破断するまでの回数 [Fig. 18(a)] の相関性を示しているが、決定係数:0.92 となり強い相関関係を達成できた。

以上の結果から、AFT の開発において極低温環境下での繰り返し揺動による耐久性について、事前に製品形状にて CAE を用いた発生応力の数値解析結果から、材料ごとの発生応力と破断するまでの回数の寿命線を用いることで破断するまでの回数が予測可能となった。

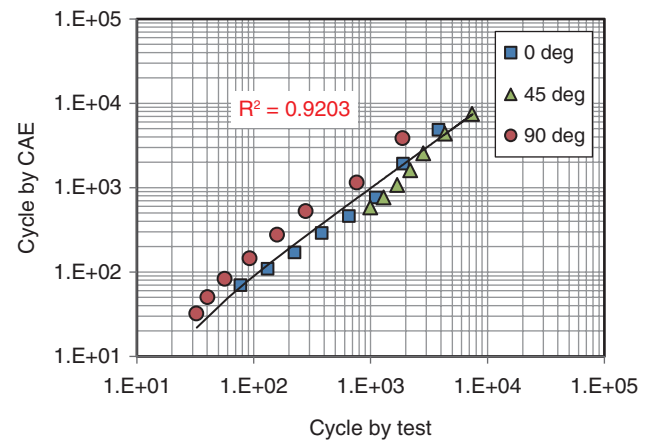


Fig. 19 Correlation between CAE and test for each material

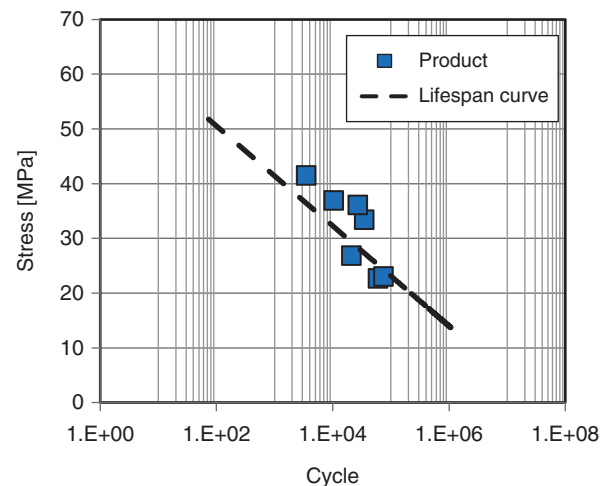


Fig. 20 Lifespan curve and test results

6. まとめ

本研究による、極低温環境下における AFT 蛇腹部寿命予測値は、実験結果と良く一致することがわかった。

- (1) 極低温環境下の測定手法改良により、精度の高い材料特性線図を取得できた。
- (2) 単体蛇腹テストピースを用いた極低温揺動試験を構築できた。
- (3) 単体テストと CAE を用いて S-N 線図を取得できた。

以上のことから、AFT 製品 (Fig. 2) での CAE を用いた発生応力の数値解析結果から、AFT の破断するまでの回数の予測が可能となった。

参考文献

- (1) 深堀美英:破壊があぶりだすゴムの正体(その2)ゴム弾性論が裏づけるゴムの疲労破壊の本質, 日本ゴム協会誌, Vol. 87, No. 11, p. 454-459, (2014)
- (2) Shangguan, W-B., Wang, X-L., Deng J-X., Yu, B.: Experiment and modeling of uniaxial tension fatigue performances for filled natural rubbers, Materials and Design, Vol. 58, p. 65-73, (2014)
- (3) Sidhu, R. S., Ali, A., Hassan, M. R.: Experimental Determination of Fatigue Life of Automotive Jounce Bumper, Key Engineering Materials, Vol. 462/463, p. 634-638, (2011)
- (4) JIS K 6259-1:2015, 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー耐オゾン性の求め方ー第1部:静的オゾン劣化試験及び動的オゾン劣化試験
- (5) 日本ゴム協会:新版ゴム技術の基礎, 380.p, (2002)

■ 著 者 ■



若松 健



白井 英正



花房 寛史



戎井 順子



橋本 勝史