小形エンジンのシリンダ材料中のき裂, 空孔および 介在物の引張下応力拡大係数*

佐々木 秀定^{*1}, 江 角 務^{*2}, 佐 藤 運 男^{*3}

A Study on Stress Intensity Factor of the Material for a Cylinder of Small Output Engine of Having a Crack, a Circle-Hole or an Inclusion Subjected to Tensile Load

Shuutei SASAKI^{*4}, Tsutomu EZUMI and Kazuo SATOH

^{**}Graduate School, Shibaura Institute of Technology,
3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

Recently, there are a lot of thing to make the recyclable resource as a raw material in various fields. The reason for the earth resource is that there is a limit. The recyclable resource is used as for two-cycle engine for a small output. The cylinder is undertaken to the high temperature and the high pressure while the engine is working. As a result, the thermal deformation occurs in the cylinder. The bubble might come to be mixed when the crack occurs in the cylinder for the aged deterioration and while the engine is casting. The stress concentration is caused at the edge of this crack, and it becomes one of the reason for destruction when the crack progresses. There is a method that evaluates from the viewpoint of the destructive power study to the stress intensity factor to see the stress change by the position of the crack and the bubble from thinning the thickness of the cylinder wall to lighten it. The deformation of the cylinder was measured and the behavior of the cylinder was simulated by the FEM method. This research is the evaluation of the stress change seen by the crack because of the deformation of the cylinder and the position of the bubble by the photoelasticity method and the caustics method.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Stress Intensity Factor, Small Output Engine, Crack and Hole or Inclusion, Photoelasticity, Caustics Method

1. 結 論

最近資源の再生利用が叫ばれているなか、自動車産業においても同様に部品の再生利用が盛んである。エンジンの主流は4サイクルであるが、小形のものは2サイクルエンジンが利用され、2サイクルエンジンの原料を再生品で使用することが多くなってきた。主に鋳造段階で、可視できないき裂、空孔また異物が混入することがあり、これは再生原料として避けられない。また経年劣化およびエンジンが稼働中は、シリンダ壁に高温および高圧での過酷な環境下にさらされシリンダ壁にき裂が生じ、き裂先端に応力集中を生じてき裂が進展する。さらにシリンダ壁は高温と高圧力の状態で熱変形する。き裂のほかに、空孔また異物が混入またはシリンダ壁にあるき裂の先端では応力がさらに高くなる。き裂先端近傍には応力が集中しき裂進展が起こり、破壊に至ることが破壊力学から予測される。このような悪条件での環境下におけるシリンダの

熱変形については、報告されてきた^{(1)~(5)}。しかし2サイクルエンジンでの報告は少ない。小形のエンジンとしての2サイクルエンジンは、将来的に見て利用価値が十分にあると考えられる。そのためには、2サイクルエンジンにおけるシリンダの熱変形を破壊力学の観点から、これらをさらに究明することは必要不可欠であるものと考えられる。

本研究は、高温下でのシリンダ変形を調べ、計算シミュレーションを試み、シリンダ内の温度および圧力との関係を検討した。エンジン稼働中の温度での熱変形を再現して実験を行うことが不可能であるため、常温において実験解析を試みた。さらに破壊力学の観点から、光学的手法の光弾性法とコースティックス法から無次元化応力拡大係数^{(6)~(15)}を求め評価した。

また応力状態について、シミュレーションの結果により実験値と比較検討した。

2. 前進差分法と応力拡大係数の 算定方法

シリンダ内の温度変化および圧力変化については、式(1)により前進差分法を用いて計算した。計算で用いた式は、連続の式、 x, y, z 方向速度、 u, v, w に関する運動方程式、エネルギー方程式、燃料・空気・NO

* 原稿受付 2005 年 7 月 27 日。

^{*1} 学生員、芝浦工業大学大学院工学研究科(〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)。

^{*2} 正員、芝浦工業大学工学部。

^{*3} 正員、芝浦工業大学名誉教授。

E-mail: m603102@sic.shibaura-it.ac.jp

のモル濃度に関する拡散方程式, 乱流モデル高 Re 形 $k-\epsilon$ モデルを用いた。式(1)の ϕ は従属変数, q は粘性項, S_ϕ は生成項とする。粘性項は, シリンダ壁との間に生じるものである。熱伝導率 λ_e は式(6)で補正される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = q + S_\phi \quad (1)$$

$$\phi = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho C_v T \\ C_{\text{fuel}} \\ C_{\text{air}} \\ C_{\text{no}} \\ \rho k \\ \rho \epsilon \end{Bmatrix}, \quad q = \begin{Bmatrix} 0 \\ \mu_e \left(\nabla^2 u + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \nabla \cdot v \right) \\ \mu_e \left(\nabla^2 v + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} \nabla \cdot v \right) \\ \mu_e \left(\nabla^2 w + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \nabla \cdot v \right) \\ \lambda_e \nabla^2 T \\ D_{\text{fuel}} \nabla^2 C_{\text{fuel}} \\ D_{\text{air}} \nabla^2 C_{\text{air}} \\ D_{\text{no}} \nabla^2 C_{\text{no}} \\ \frac{\mu_e}{\sigma_k} \nabla^2 k \\ \frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon} \nabla^2 \epsilon \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$S_\phi = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial x} \\ -\frac{\partial P}{\partial y} \\ -\frac{\partial P}{\partial z} \\ -T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\mu (\nabla \cdot v) + G + H_u R_{\text{fuel}} \\ + \frac{1}{V} \frac{dq_{sp}}{dt} - \frac{1}{V} \frac{dq_{ht}}{dt} \\ -R_{\text{fuel}} \\ -R_{\text{air}} \\ -R_{\text{no}} \\ G - \rho \epsilon \\ \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) + C_3 \rho \epsilon \nabla \cdot v \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$G = -\mu_e \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

$$-\frac{2}{3} (\nabla \cdot v)^2 \left\} - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot v \quad (4)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \rho k^2 / \epsilon \quad (5)$$

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_t = \lambda + C_p \mu_t / Pr_t \quad (6)$$

t : 時間, u, v, w : x, y, z 方向の速度成分, ρ : 密度, C_{fuel} : 燃料のモル濃度, C_{air} : 空気のモル濃度, C_{no} : NO のモル濃度, D_{fuel} : 燃料拡散係数, D_{air} : 空気拡散係数, D_{no} : NO の拡散係数, p : 圧力, T : 温度, k : 乱流エネルギー, ϵ : 乱流エネルギー消散率, μ : 層流粘性係数, μ_t : 乱流粘性係数, λ : 熱伝導率, λ_t : 乱流熱伝導率, C_p : 定圧比熱, C_v : 定容比熱, dq_{sp} : 放電エネルギー, H_u : 燃料の低位発熱量, Pr_t : プラントル数高 Re 形 $k-\epsilon$ モデルの定数を表 1⁽¹⁶⁾ に示す。この表 1 は一般に知られている実験値より算出したものである。

シリング材料中の欠陥を模して, コースティックス法による応力拡大係数 K_I, K_{II} を求めた。

算定方法⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ はいくつかあるが, 一般に使われている外挿法を用いて式(7)より算出した。

ここで, λ は発散光を使用した際のコースティック像の倍率で $\lambda = (z_0 + z_i) / z_i$ である。 z_i, z_0 はそれぞれ光の収束点の焦点の位置から試験片までの距離である。本実験では, $z_i = 1\,000\text{ mm}$, $z_0 = 2\,000\text{ mm}$ である。光弾性感度の高い材料において, 得られるコースティック像は二重像となるため最内側の径を測った。 K_{II} は, 最大直径 D_{max} , 最小直径 D_{min} , き裂と直角方向の直径 D を求める。これより $(D_{\text{max}} - D_{\text{min}}) / D_{\text{max}}$ の値を算定する。これを理論グラフから μ, δ を決め, 式(8)に代入して無次元化応力拡大係数を求めた。

$$K_I = \frac{1.671}{z_0 t |C_0|} \times \frac{1}{\lambda^{2/3}} \times \left(\frac{D}{\delta} \right)^{5/2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \left\{ \right. \\ K_{II} = \frac{1.671}{z_0 t |C_0|} \times \frac{1}{\lambda^{2/3}} \times \left(\frac{D}{\delta} \right)^{5/2} \times \frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \left. \right\} \quad (7)$$

$$F_I = \frac{K_I}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}}, \quad F_{II} = \frac{K_{II}}{\sigma_0 \sqrt{\pi a}} \quad (8)$$

σ_0 は, き裂のない試験片の中央断面の応力である。 K_I のみのき裂先端に発生する等色線しまループは, き裂の延長線に対して垂直で, コースティック像はほぼ真円になる。 K_I, K_{II} の混合モードである場合は, 等色線しまループは非対称な傾斜した像となり, コースティック像は真円からくずれた渦巻き状の像となる。

3. エンジンモデルと試験片

3・1 シリンダの熱変形 図 1 は 2 サイクルエンジンの側面図である。右下側が排気口である。表 2 にエンジンの仕様を示す。図 2 はシリンダの熱変形を測

Table 1 Constant of $k-\epsilon$

C_1	C_2	C_3	C_μ	σ_ϵ	σ_k	σ_ϵ	Pr_t
1.44	1.92	-0.373	0.09	1.0	1.0	13	0.9

Table 2 The specimen of engine

Total displacement	249cc
Bore stroke B*S	70×64.8(mm)
Connecting rod length L	112.5(mm)
Compression ratio	8.64
Fuel	Propane
Scavenging port Opening angle S.O	138deg A.T.D.C
Scavenging port Closing angle S.C	138deg B.T.D.C
Exhaust port Opening angle E.O	117deg A.T.D.C
Exhaust port Closing angle E.C	117deg B.T.D.C

Table 3 Optical constants of the material

Material	δ	ζ	$C_0(\text{m}^2/\text{N})$	$\alpha(\text{m/N})$
Polycarbonate	3.05	0.27	1.598×10^{-10}	1.374×10^{-4}

Fig. 1 2 Small output engine

Fig. 3 Specimen and position of circle hole, inclusion and crack

Fig. 2 Measurement of cylinder wall by dialgauge

定するためにダイヤルゲージを取付けた模式図である。測定場所として、排気口が高温の排気ガスによる変形が大きい位置でダイヤルゲージを使用した。円周方向に10刻みで測定した。

3・2 引張実験による試験片 図3に試験片の形状およびき裂, 円孔また円形介在物を示す。引張負荷方向図の矢印の方向である。引張試験における試験片の形状は50 mm×140 mm×6 mmとし、き裂は幅

0.15 mm, 長さ10 mmである。円孔の直径は8 mmとした。母材としてポリカーボネート(透明)を使用し、き裂と円孔また円形介在物の挿入位置については、円孔はこのき裂先端からの距離と角度を変数にして位置を決定し円孔をあけた。

表3にポリカーボネートの光学定数, 表4にポリカーボネートとエポキシ樹脂の物性値, ヤング率およびポアソン比を示す。円孔や介在物の位置がき裂に及ぼす影響を調べるために、き裂と円孔の中心までの距離 $r=10, 20, 30$ mm 3種類, 回転角は $\theta=0, 15, 30, 45, 60, 75, 90^\circ$ の7種類とした。加工後の試験片の残留応力を除去するために、アニーリング処理を行った。

3・3 引張対象部分および引張方向 引張対象部分について、シリンダ部で最大の変形が生じるシリンダ部分の排気ポート部を選定した。この部分は、排気ガスなどにより絶えず加熱されているために変形が大きい。図4に熱変形測定結果の一部を示したように、引張試験の引張方向は、熱変形が大きい方向を想定し

Table 4 Material properties

Materials	Maker announcement value				Ultrasonic inspection	
	Tensile strength [MPa]	Expansion Rate [%]	Bend elastic constant [MPa]	Bending strength [MPa]	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Polycarbonate	63(ASTM)	90(ASTM)	2600(ASTM)	94(ASTM)	2979	0.380
Epoxy resin	81(JIS)	7.2(JIS)	2786(JIS)	103(JIS)	4010	0.356

Fig. 4 Thermal deformation of cylinder (4 000 rpm)

て引張荷重をかけた。用いた引張試験機は、インテスコ製小形万能引張試験機 model 210 形を用いて行った。引張速度は 0.2 mm/min とした。

4. 実験結果および考察

4.1 シリンダの熱変形およびシミュレーションの結果 シリンダの熱変形は、均等に変形をしないことがわかった。0°が排気口近傍であり、変形が大きいことがわかった。また、変形を少なくするためにフィンの間隔を狭くすると熱が滞留するようになり、冷却作用が落ちる。そのためフィンの間隔には細心の注意が重要であると考え。図 5 および図 6 に 2 サイクルエンジンの排気量 175 cc、燃料としてプロパンガスを使用したシミュレーションによるシリンダ内の圧力変化と温度変化を示す。 η_s は掃気効率である。これらの結果から最高温度はおおよそ 2 600 K ほどであり、圧力は最高で約 6.8 MPa に上がる。掃気効率が高くなるに従って温度および圧力が高くなる。

4.2 引張実験の結果 コースティック像および等色線しまループの発生状況からき裂の変形様式を判断し、 K_I モードではコースティック像の形状がほぼ真円であり、またき裂先端近傍における像のずれもなかった。等色線しまループでは、き裂先端に近いしまほどき裂を境に上下対称に発生しており、 K_I モードの

Fig. 5 Comparison of pressure in cylinder

Fig. 6 Comparison of temperature in cylinder

応力拡大係数が発生していることが確認された。図 7 は、円孔のコースティック像と等色線しまループ写真の一例である。図 8 は、円形介在物のコースティック像と等色線しまループ写真の一例である。これらはいずれも最大荷重時 $P=2.45$ kN のものである。

図 9 は、き裂と円孔の K_I と K_{II} の無次元化した混合モード比の結果である。き裂先端と円孔との距離が小さい場合、き裂先端と円孔との角度が 45°を超えてくると 90°付近までは水平に近い曲線になっている。また、き裂先端と円孔との距離により大きく変化していることがわかる。

図 10 は、き裂と円形介在物の K_I と K_{II} の無次元化した混合モード比の結果である。介在物がある場合は、介在物が母材とはく離するまで一体で変化し、また角度においてもあまり変化なく、距離にはあまり影響がないと思われる。はく離すると図 9 のようになり、円孔があるときよりも安定した変化となる。これらは介在物の剛性により変化するものと考えられる。

図 11 は、き裂と円孔または円形介在物の位置と無

Fig. 7 Example of photographs obtained by experiment (crack and circular hole, $r=10$ mm, $F=2.45$ kN)

Fig. 8 Example of photographs obtained by experiment (crack and inclusion, $r=10$ mm, $F=2.45$ kN)

次元化応力拡大係数の関係を示したものである。 K_I の値は距離が短い場合, 角度 0° と 75° 付近で大きくなり変化が大きい。距離が長くなるに従って変化が小さくなっている。 K_{II} については, 距離が短くなると変化が大きくなり, 距離が長くなると変化が小さい。図 12

Fig. 9 Tendency of mixed-mode ratio (circular hole)

Fig. 10 Tendency of mixed-mode ratio (inclusion)

Fig. 11 Relations between non-dimensional stress intensity factor F and angle θ for circular hole

Fig. 12 Relations between non-dimensional stress intensity factor F and angle θ for inclusion

Fig. 13 Isochromatic fringe pattern of circle hole $P=2.45$ kN

Fig. 15 Isochromatic fringe pattern of crack and inclusion

Fig. 14 Close-up of surroig for circular hole

Fig. 16 Close-up of surrounding for inclusion

は、き裂と円形介在物の位置と無次元化応力拡大係数の関係を示したものである。円形介在物がある場合、 K_I と K_{II} の変化は各角度において距離の影響が少なく、変化が小さいことがわかった。はく離するまで母材と円形介在物が一体となるような挙動を示す。したがって、介在物が混入する場合のほうが、円孔のような空孔が存在するときより全体的に安全と考えられる。円孔では、き裂先端との距離が短い場合は K_I と K_{II} の変化が大きく、安全性は下がることがわかった。

5. 有限要素法による結果

実験結果を有限要素法により検証した。円孔の直径は 8 mm、き裂の幅 0.15 mm、長さ 10 mm である。引張荷重は 2.45 kN である。計算は ABAQUS/Standard VERSION 6.4-1、要素 17 088、節点 26 370 により得られたものである。

図 13 は有限要素法により得られたき裂と円孔の等色線しまの一例であり、図 14 は円孔周辺部の拡大図である。この結果から円孔の上部と下部と比較すると、淡白色の部分が応力が大きいことを示している。図 15 は有限要素法により得られたき裂と円形介在物の等色線しまループの一例であり、図 16 は円形介在物の周辺部の拡大図である。これらの図から、円孔の上部と下部の応力が左右に広がっていることがわかる。き裂や円孔近傍の特異場に発生する光弾性しまループが、有限要素解析結果と全体的によく類似していることがわかった。

6. 結 言

本研究では、シリンダ材料中のき裂先端の近傍にあ

る円孔および円形介在物における影響について実験解析を行った。解析は、光弾性法とコースティックス法により無次元化応力拡大係数を求めて評価比較検討したものであり、以下の結果を得た。

(1) シリンダは、高温と高圧力のために排気口近傍の変形が大きいことがわかった。

(2) き裂と円孔を有する場合、応力拡大係数は片側き裂のみの実験値より大きい値を示す。

(3) き裂と円孔の距離が離れた場合は、角度による応力拡大係数に影響がほとんどない。シリンダ内のき裂と円孔はそれぞれ単純に存在するように働き、影響は見られない。

(4) 母材に介在物が存在すると、はく離するまで母材と介在物が一体となるような挙動を示し、き裂の応力拡大係数は低下する。はく離すると円孔と同じ挙動を示し不安定となる。

文 献

- (1) Flow, Y. and Arseault, R. J., Deformation in Al-SiC Composites due to Thermal Stress, *Water Sci Eng.*, Vol. 75, No. 1/2 (1985), pp. 151-167.
- (2) Itoh, A. et al., Study of Measurement of Deformation of Piston for Rotating Cylinder in Operating, *JSEA*, Vol. 25, No. 2 (1994), pp. 93-98.
- (3) May, H., *Undesirability Plastic Deformation of Piton Ring Motor Tec.*, Vol. 49, No. 3 (1988), pp. 101-104.
- (4) Hiraizumi, K. and Tanabe, A., Ablation of 2 Cycle Engine, *Traipolojis*, Vol. 39, No. 2 (1994), pp. 145-152.
- (5) Fujimoto, H. et al., Measurement of Cylinder Bone Formation by Means of a Turning Piston with a Gap Sensor During Engine Operation, *JSME*, Vol. 56, No. 523, B (1990), pp. 851-856.
- (6) Fujimoto, K. and Hashimoto, Y., Elastic Analysis of Interaction between Circular Inclusion and Crack,

- JSME*, Vol. 61, No. 581, A (1995), pp. 20-27.
- (7) Takahashi, S. and Shimizu, K., Theory and Application of Caustics Method (1), *Investigation of Mechanics*, Vol. 37, No. 4 (1985), pp. 25-30.
- (8) Ueno, K. et al., *Basic Study Concerning of Mutual Effect of Crack*, Vol. 20, No. 1 (2000), pp. 27-32.
- (9) Kitagawa, H. et al., Growth Behavior of Fatigue from Crack of Mixed Mode K_I , K_{II} , *JSME*, Vol. 47, No. 424, A (1981), pp. 1283-1292.
- (10) Nogata, H. et al., Stress Intensity Factor of Crack with Plural Parallel on Band Plate, *JSMS*, Vol. 21, No. 3 (1986), pp. 96-107.
- (11) Ishida, M., Analysis of Notch Crack and Branch Crack on Semi-Infinite Plate, *JSME*, Vol. 45, No. 392, A (1979) pp. 306-317.
- (12) Abe, T. et al., On the Energy Release Rate of a Crack with a Parallel Interacting Crack, *JSME*, Vol. 64, No. 623, A (1998), pp. 1837-1843.
- (13) Andoh, K. et al., Tiredness Crack Spread Longevity Evaluation from Plural Surface Crack, *JMST*, Vol. 153 (1983), pp. 352-363.
- (14) Fujimoto, K. and Hashimoto, Y., Elastic Analysis of Interface Problem Circular Inclusion and Crack, *JSME*, Vol. 61, No. 581, A (1995), pp. 20-27.
- (15) Ezumi, T. and Takahashi, S., Effect of Crack Tip Shapes on Evaluation of Stress Intensity Factors (Examination by the Photoelastic and Caustics Methods), *The Japan Society for Photoelasticity*, Vol. 20, No. 1 (2000), pp. 7-13.
- (16) Satoh, K., *Engineering*, (1991), p. 225, Soubunsha.
- (17) Takahashi, S. et al., *Photomechanics*, (1997), p. 16, Sankaido.
- (18) Takahashi, S. et al., Photoelastic Determination of Stress Intensity Factors for Outer Surface Crack of Internally Pressurized Thick-walled Vessels, *The Japan Society for Photoelasticity*, Vol. 3, No. 1 (1981), pp. 24-29.