

# 溶鋼鍋側壁キャストブルにおけるリング拘束熱衝撃試験の検討

## Study of ring-constrained thermal shock test on castables for ladle

森田 翔\*, 平峯大志\*\*, 徳永竜二\*\*\*, 神尾英俊\*\*\*\*,  
後藤 潔\*\*\*\*\*, 森川勝美\*\*\*\*\*

Sho MORITA\*, Taishi HIRAMINE\*\*, Ryuji TOKUNAGA\*\*\*, Hidetoshi KAMIO\*\*\*\*  
Kiyoshi GOTO\*\*\*\*\* and Katsumi MORIKAWA\*\*\*\*\*

### 要 旨

溶鋼鍋の高い拘束状態を模擬した熱衝撃試験によるサンプルの評価をラボスケールで行うために、比較的簡便な方法であるリング拘束熱衝撃試験を実施した。その結果、リングサンプルには加熱面から180°対称方向の垂直な亀裂、内部（加熱面側）に加熱面に対して平行な亀裂、背面から垂直な亀裂が発生し、実機使用後の側壁材でも確認されるような複数種類の亀裂が発生することが分かった。FEM解析の結果から各亀裂の位置に応じて高い応力が発生していることが分かった。また、各亀裂の程度に違いが見られたが、これは発生した応力の持続性及び亀裂の伝達のしやすさに原因があると推察された。

### Abstract

In order to evaluate samples by a thermal shock test simulating the high constrained condition of a ladle in a laboratory scale, we conducted a ring-constrained thermal shock test that is comparatively simple method. As a result, it was found that vertical crack with 180°symmetry on the heating surface, parallel crack near the heating surface, and vertical crack on the back surface were generated in the ring sample, which were consistent with the actual after-use side wall products in ladle. The results of the FEM analysis showed that high stresses were generated at the each crack locations, and it was estimated that differences of stress durability and crack propagation were related to the size of each crack.

### 1 緒言

取鍋側壁キャストブルは、稼働中に亀裂・剥離が繰り返し発生し、これが損耗の主要因となっている。図1に示すように、発生する亀裂は主に、稼働面に対して垂直な亀裂が稼働面側および背面（鉄皮側）から発生し、稼働面に対して平行な亀裂が側壁材内部に発生する。稼働面側および背面から発生した垂直な亀裂は取鍋背面における地金差しの原因となり、側壁材内部に発生した平行な亀裂は剥離の原因となる。特に後者の平行な亀裂は剥離を引き起こすため、図2のように側壁材を大

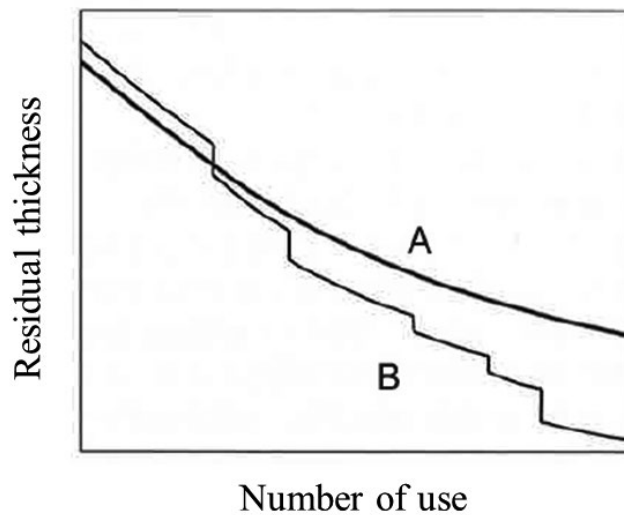
### 1 Introduction

Ladle sidewall castables receive damage due to generation of crack and spalling during operation. As shown in Fig. 1, the cracks mainly occur vertical to the heating surface from the heating surface side and back (steel shell) side, in addition, parallel cracks to the heating surface occur inside the sidewall material. Vertical cracks that occur from the heating surface side and from the back side cause skull penetration on the back side of the ladle, while parallel cracks occurred inside the sidewall material cause spalling. In particular, as shown in Fig. 2, the parallel cracks cause spalling, which leads to significant damage to the sidewall material. Therefore, their cracks

\* 技術研究所 製品プロセス研究センター Product R&D Center, Technical Research Labs.  
\*\* 不定形製造事業部 木更津不定形工場 Kisarazu Monolithic Refractories Plant, Monolithic Refractories Div.  
\*\*\* 技術研究所 製品プロセス研究センター アシスタントマネージャー Assistant Manager, Product R&D Center, Technical Research Labs.  
\*\*\*\* 技術研究所 共通基盤研究センター マネージャー Manager, Product Fundamental Technology Research Center, Technical Research Labs.  
\*\*\*\*\* 技術研究所 副所長 Deputy Senior General Manager, Technical Research Labs.  
\*\*\*\*\* フェロー 技術研究所 所長 Fellow, Senior General Manager, Technical Research Labs.



**Fig. 1 Cross section of alumina-magnesia castable after using.**<sup>1)</sup>  
(The upper side of the image is the hot surface)



**Fig. 2 Schematic illustration of the change in residual thickness of molten steel ladle by (A) erosion and (B) spalling.**<sup>1)</sup>

きく損耗させていく要因となり、耐火物の耐用を著しく低下させる。

鍋の側壁はスラグラインレンが及びキャストブルが施工されるが、稼働中、これらの耐火物は取鍋上部にある天端及び周方向の鉄皮によって自身の熱膨張が拘束された状態で使用される。そのため、側壁材には非常に高い圧縮応力が発生することが予想され、平行亀裂はこの高い圧縮応力によって発生すると考えられる。よって、実機における側壁キャストブルの耐用を評価するためには、そのような高い拘束状態を模擬した試験が必要である。

significantly decrease the service life of the refractory material.

In ladle, the sidewalls are constructed of slag line bricks and castables, but during operation, these refractories are constrained by steel anchor at the top of ladle and circumferential steel shell. Therefore, very high compressive stresses are expected to occur in the sidewall materials, and these high compressive stresses are expected to cause parallel cracks. Thus, in order to evaluate the durability of castables in ladles, there is need for thermal shock tests that simulate such a high constrained condition.

耐火物の急激な温度変化によって発生した亀裂の比較は熱衝撃試験によって行われるが、先述のような拘束状態を模擬した熱衝撃試験をラボスケールで行うことは容易でない。そこで本報告では、円筒状のキャストブルを鉄製のリングを用いて外側から拘束することで、比較的簡便に高い拘束力を掛けられる熱衝撃試験の方法を考案した。今回はこの方法を用いて、取鍋の拘束状態を模擬した熱衝撃試験の内容を報告する。

## 2 実験方法

### 2.1 試験サンプルの作製

試験サンプルには、(取鍋側壁材に用いられる) アルミナ-マグネシア質キャストブルを用いた。作製したサンプルを図3に示す。サンプル形状、内径150 mm、外径270 mm、高さ50 mmのリング形状となるように、厚さ4.3 mmのリング状の金枠に鋳込み、サンプルを作製した。サンプル数はN=4で作製した。また、各サンプルは図3のように内側のキャストブルサンプルを固定するために、リング状金枠の外側からボルトを挿入した状態で鋳込んだ。作製したサンプルは110 °Cで24 h乾燥後、さらに300 °Cで5 h乾燥させ、熱衝撃試験に供した。

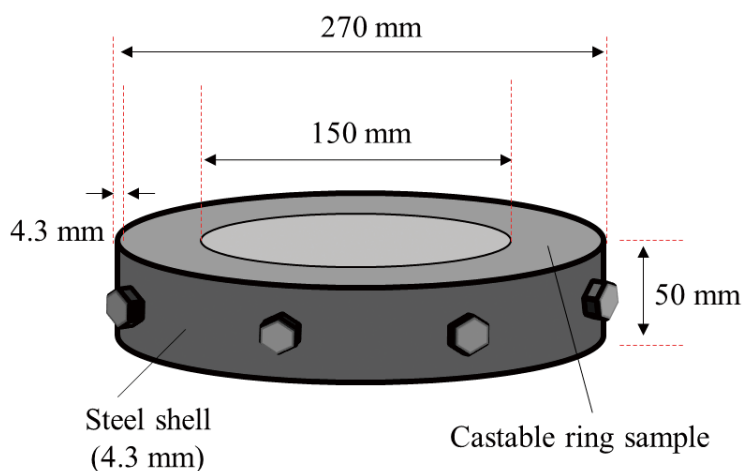


Fig. 3 Schematic illustration of the ring sample of thermal shock test.

Although thermal shock tests are used to evaluation and comparison of cracks caused by rapid temperature changes in refractories, it is not easy to simulate thermal shock tests like the above-mentioned constraint conditions on a laboratory scale. In this study, we developed a comparatively simple method of thermal shock testing, in which a cylindrical castable is constrained from the outside using a steel ring to apply a high constraining force. We report details of the thermal shock test using this method to simulate ladle constraint conditions.

## 2 Experimental

### 2.1 Preparation of test samples

Alumina-magnesia castables (general used for ladle sidewall material) were used as test samples. The samples were cast to form a ring shape with inner diameter of 150 mm, outer diameter of 270 mm, and height of 50 mm, in a 4.3 mm thick ring-shaped metal frame. The number of samples were prepared with  $n = 4$ . As shown in Fig. 3, each sample was cast with a bolt inserted from the outside of the ring-shaped metal frame to fix the castable sample. The produced samples were dried at 110 °C for 24 h, and then further dried at 300 °C for 5 h, and subjected to thermal shock testing.

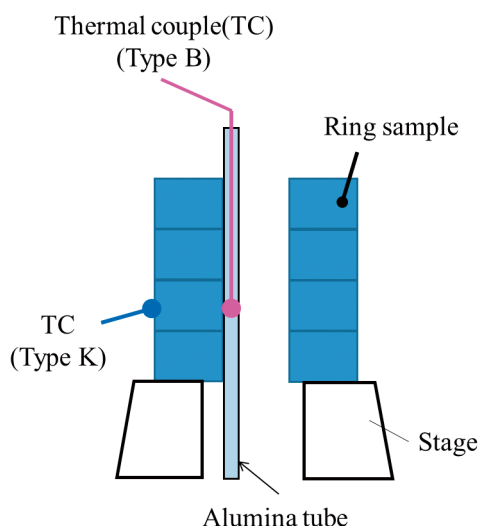


Fig. 4 Experimental set up of ring-constrain thermal shock test.

## 2・2 リング拘束熱衝撃試験

図4に作製したリング状サンプルを用いて熱衝撃試験を実施した様子を示す。熱衝撃試験はリング状の金枠を付けたまま、サンプルの外側を拘束した状態で行った。図4に示すように、作製したサンプルを4段重ね、中心側の面(加熱面)を、ガスバーナーを用いて1600℃まで1hで急加熱することにより熱衝撃を与え、その後放冷した。また、試験中の温度を測定するために、加熱面側及び背面側に熱電対を設置し、サンプルの温度データを記録した。

## 2・3 サンプルの評価

サンプルに発生した亀裂を評価するために、デジタル画像相関法(DICM)<sup>2)</sup>を用いて亀裂の評価を行った。DICMは変形前の画像パターンを取得し、これを変形後の画像パターンと比較することで変位量、ひずみ量を算出し、ひずみ分布図を取得する方法である。ひずみ量検出イメージを図5に示す。サンプルに亀裂が生じた場合、DICMで算出したひずみ量が急激に増加するため、亀裂はひずみ分布図においてひずみ量が大きい領域として現れる。よって、ひずみ分布図から亀裂の発生位置

## 2・2 Experimental of ring-constrained thermal shock test

Figure 4 shows the ring-restrained thermal shock test conducted on the produced ring-shaped sample. The thermal shock test was carried out with the ring metal frame attached and the outside of sample constrained. As shown in Fig. 4, four layers of ring samples were stacked, and these samples were given a thermal shock by rapidly heating the center side (heated surface) to 1600℃ for 1 h using a gas burner, and then cooling at room temperature. In addition, thermocouples were set up on the heating surface side and on the back side to measure the temperature during the test, and the temperature data of the samples were recorded.

## 2・3 Evaluation of samples

In order to evaluate the cracks in the sample, a digital image correlation method (DICM)<sup>2)</sup> was used. DICM is a method to calculate the amount of displacement and strain by obtaining the image pattern before deformation and comparing it with the image pattern after deformation. In this way, a strain distribution figure of the sample after the test can be obtained. An image of strain amount detection by DICM is shown in Fig. 5. When a crack generates in the sample, the amount of strain increases rapidly, and the crack is displayed as a region with a large amount of strain in the calculated strain distribution figure. Thus, the evaluation of location, width and

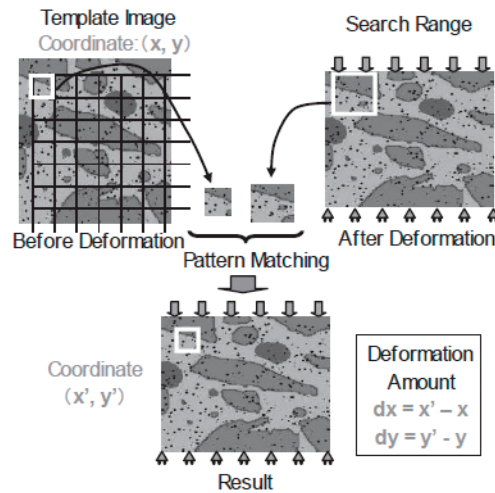


Fig. 5 Schematic diagram of digital image correlation method (DICM).<sup>2)</sup>

及び亀裂幅や長さの評価が可能となる。今回、熱衝撃試験前にリング状サンプルの上下面に耐熱黒色スプレーを用いて模様をつけて写真を撮影し、熱衝撃試験後に再度写真を撮影して DICM によってひずみ量を算出した。

また、上から3段目の位置に設置したサンプルの一部を切り出し、X線CTを用いてサンプルの内部に発生した亀裂の確認を行った。

### 3 結果と考察

#### 3.1 熱衝撃試験の結果

測温結果を図6に示す。加熱面側は約1600℃、背面側は約400℃まで上昇していることが分かった。図7にリング拘束熱衝撃試験後の各サンプルのDICMによるひずみ分布画像を示す。すべてのサンプルにおいて加熱面から大きい垂直な亀裂①が発生し、この亀裂は180°対称方向に発生することが分かった(図8(c)①)。また、上から1, 3段目のサンプルに見受けられるように、リングサンプルの背面(鉄皮側)から垂直な亀裂が発生していることが確認された。

次に、上から3段目のリングサンプルの一部から採取した小片のX線CT画像を図8に示す。X線CTによって内部の亀裂を確認したところ、DICMによって確認できた背面側から発生した垂直な亀裂③の他、加熱面から内部約10mmの位

length of the crack can be made from the strain distribution figure. In the ring-constrained thermal shock test, a DICM pattern was applied to the top surface of the ring sample using heat-resistant black spray before the thermal shock test, and a photograph of the sample was taken. After the thermal shock test, the photograph was taken again and the amount of strain was calculated by DICM.

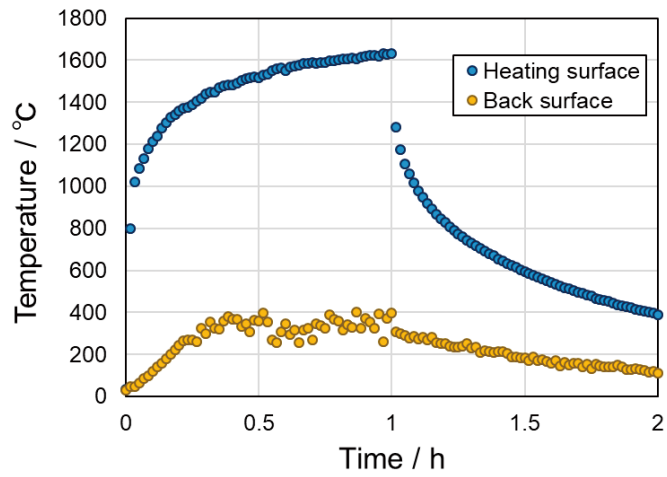
In addition, a part of the sample in the third position from the top was cut out and X-ray CT was used to check for cracks that were generated inside the ring sample.

### 3 Result and discussion

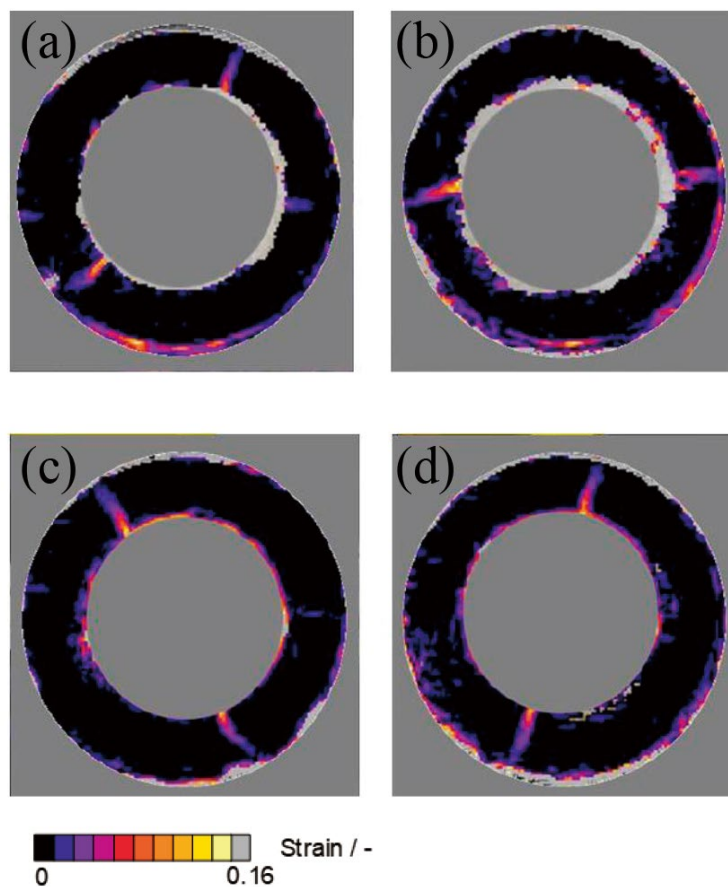
#### 3.1 Crack initiation in ring-constrained thermal shock test

Figure 6 shows the temperature measurement results. The temperature of the heating surface side increased to about 1600°C, and the back side increased to about 400°C. Figure 7 shows DICM strain distribution images of each sample after the ring-constrained thermal shock test. Large vertical crack (1) from the heating surface were observed in all samples, and these cracks generated in 180° symmetrical directions (Fig. 8(c)(1)). In addition, as shown in the first and third samples from the top, vertical cracks from the back (steel shell) side of the ring sample were observed.

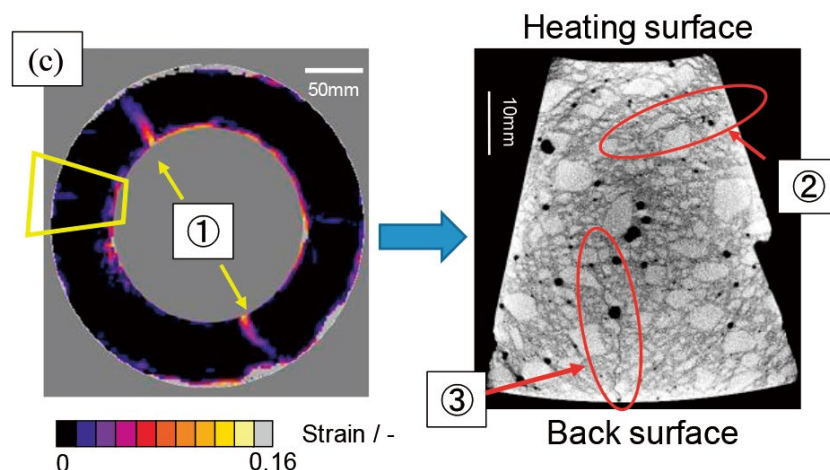
Next, in Fig. 8, X-ray CT images of a small piece taken from the third section from the top of the ring sample are indicated. The X-ray CT image shows a vertical crack (3) generated from the back side, which was confirmed by DICM. In addition, a relatively small crack (2) parallel to the heating



**Fig. 6** Temperature changes of heating and back surfaces during the ring-constrain thermal shock test.



**Fig. 7** Strain distribution image with DICM of each ring sample ((a) first, (b) second, (c) third, and (d) fourth from the top).



**Fig. 8 Strain distribution image with DICM in sample(c) in Fig.7 and X-ray CT image of the same sample.  
(Crack 1: 180° symmetrical vertical crack, Crack 2: parallel crack at heating surface, and Crack 3: vertical crack from the back surface.)**

置に、加熱面に対して平行な比較的小さい亀裂②が確認された。

上記のリング拘束熱衝撃試験において発生した亀裂をまとめると以下ようになった。

- ・亀裂①：加熱面に対して垂直な亀裂（大きな亀裂）
- ・亀裂②：加熱面から約10 mm内部の位置の加熱面に対して平行な亀裂（小さな亀裂）
- ・亀裂③：背面に対して垂直な亀裂（中程度の亀裂）

以上のことから、リング拘束熱衝撃試験において発生した①～③の亀裂の位置は、取鍋の稼働面から発生する垂直な亀裂、背面（鉄皮側）から発生する垂直な亀裂、側壁材内部に発生する（稼働面に対して）平行な亀裂の位置と概ね傾向が一致することが分かった。

### 3・2 有限要素法 (FEM) 解析による亀裂発生メカニズムの推定

次にこれらの亀裂発生メカニズムを推定するため、熱衝撃試験における加熱面、背面における温度計測データ（図 6）を用いて有限要素法 (FEM) 解析を行った。モデルは図 9 に示すように、軸対称モデルを用いて、非定常状態の熱応力解析を行っ

surface was confirmed at a position about 10 mm inside from the heating surface.

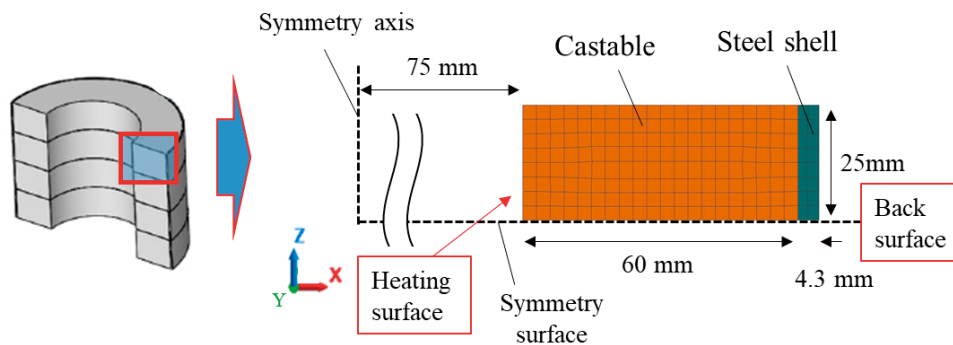
The cracks observed in the ring-restrained thermal shock test are summarized as follows：

- Crack (1)：Vertical crack from the heating surface (large crack).
- Crack (2)：Parallel crack to heating surface located about 10 mm inside the heating surface side (small crack).
- Crack (3)：Vertical crack from the back surface (medium crack).

As a result, the locations of cracks (1) through (3) in the ring-constrained thermal shock test were generally consistent with the locations of vertical cracks generated from the heating surface, vertical cracks from the back surface (steel shell) and parallel cracks (to the heating surface) inside the sidewall material in ladle.

### 3・2 Estimation of crack initiation mechanism by Finite Element Method (FEM) analysis

In order to investigate the mechanism of these crack initiation, Finite Element Method (FEM) analysis was carried out using the temperature measurement data (Fig. 6) at the heated surface and the back surface in the thermal shock test. As shown in Fig. 9, the FEM analysis was conducted using an axisymmetric model for unsteady-state thermal stress



**Fig. 9 FEM analysis model for the ring-constrained thermal shock test.**

た。また、Norton-Bailey 式<sup>3)</sup>を用いて、クリープひずみを考慮した計算を行った。解析結果を図 10 に示す。

まず加熱中の挙動について着目する。加熱面の最小主応力のグラフ(図 10(c))より、加熱開始から約 20 分後、加熱面からおよそ 10 mm 内部の位置に、約 250 MPa 程度の非常に高い圧縮応力が発生していることが分かった。また背面の最大主応力のグラフ(図 10(b))より、背面側には約 100 MPa の引張応力が発生することが分かった。これらのことから、加熱面付近に発生した平行な亀裂②は高い圧縮応力によって発生したものであること、また、背面付近に発生した垂直な亀裂③は引張応力によって発生したものと推察された。

一方で、冷却中においては、加熱面の最大主応力のグラフ(図 10(b))から加熱面側に約 130 MPa 程度の高い引張応力が発生していることが分かった。これはクリープ収縮に伴う残留引張応力が発生していることが原因と考えられる。リングサンプルは加熱中に外側を鉄皮で拘束されているため、加熱面付近に高い圧縮応力がかかった状態となりひずみが蓄積される。また、加熱面は高温であるためクリープ変形し、この時に蓄積されたひずみによって冷却時に引張応力が発生すると考えられる。よって、図 5 において各サンプルに発生した 180° 対称方向の大きい垂直な亀裂①は、このクリープ収縮に伴う残留引張応力によって生じたものと推察される。

analysis. The Norton-Bailey equation<sup>3)</sup> was also used to consider creep strain.

**Figure 10** shows the results of the FEM analysis. First, we focus on the behavior during heating. The graph of the minimum principal stress on the heating surface (**Fig. 10(c)**) shows that about 20 minutes after the start of heating, extremely high compressive stress of about 250 MPa is generated at the position about 10 mm inside from the heating surface. In addition, the graph of the maximum principal stress on the back surface (**Fig. 10(b)**) shows that the tensile stress of about 100 MPa is generated. From these results, it was estimated that the parallel cracks(2) generated near the heating surface were caused by the high compressive stress at the heating surface. Moreover, the vertical cracks(3) on the back surface were considered to be caused by tensile stress.

Next, during cooling, the graph of maximum principal stress on the heated surface (**Fig. 10(b)**) shows that high tensile stress of about 130 MPa is generated. The reason of this high tensile stress is considered to be the generation of residual tensile stress due to creep shrinkage. The ring sample is constrained on the outside by the steel shell during heating, so high compressive stress is induced near the heating surface, and then strain is accumulated. In addition, the heating surface was at a high temperature, which causes creep deformation, and the accumulated strain is thought to generate tensile stress during cooling. Therefore, in **Fig. 5**, the large 180° symmetrical vertical cracks (1) in each sample are estimated to be caused by residual tensile stress due to this creep shrinkage.



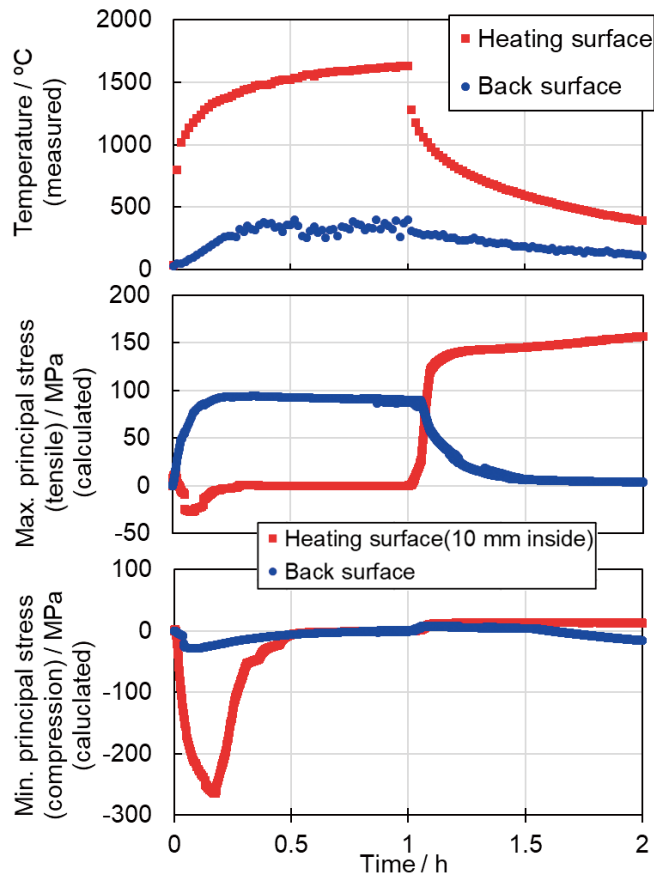


Fig. 10 Measured temperature (a) and the maximum and minimum stresses (b) and (c) calculated in the ring sample by FEM analysis.

### 3.3 亀裂の程度及び伝播について

リング拘束熱衝撃試験において発生した亀裂は、実機で発生する亀裂の位置と概ね一致していたが、亀裂の大小を比較すると、亀裂①>亀裂③>亀裂②となり、剥離の主原因と考えられている亀裂②(平行な亀裂)の程度は小さかった。この理由としては、応力の持続性の影響が考えられる。図10(b),(c)より、加熱面及び背面の引張応力は長い時間発生しているのに対して、加熱面付近の圧縮応力は短い時間しか発生していないことが分かる。このことから、亀裂①及び③は、亀裂が発生した後も持続的に引張応力が働くようなひずみが生じるため、亀裂が拡大する傾向を示したと考えられ、一方で、亀裂②は非常に高い圧縮応力によって発生したが、一時的なものであったため、それ以降は進展できず、亀裂が小さいまま残存したと推測される。実機で使われる耐火物は繰り返し熱

### 3.3 Crack size and propagation

The cracks generated in the ring-constrained thermal shock test were generally consistent with the location of cracks in the ladle. However, a comparison of the size of the cracks showed that crack (1) > crack (3) > crack (2), the size of crack (2) (parallel cracks), which is considered to be the main cause of spalling, was smaller. A possible reason for this is the influence of stress durability. Figs. 10(b) and (c) show that tensile stresses on the heating surface and the back surface were generated for a long time, while compressive stresses near the heating surface were generated for only short period. Therefore, cracks (1) and (3) are considered to exhibit a tendency to grow because of the strain that caused the continuous tensile stress after the crack initiation. On the other hand, crack (2) was generated by very high compressive stress, but only temporarily, thus it is assumed that the crack could not grow thereafter and remained as a small crack. Actually, the refractory materials used in ladles are repeatedly exposed to thermal shock, thus it is considered that spalling is

衝撃を受けているため、実際はこのような小さい平行亀裂の蓄積によって剥離が生じると考えられる。

#### 4 結言

取鍋の高い拘束状態を模擬した熱衝撃試験による評価を行うために、リング状キャストブルの外側を鉄皮で拘束した熱衝撃試験（リング拘束熱衝撃試験）を行った。その結果、リングサンプルには①加熱面から180°対称方向の垂直な亀裂、②内部（加熱面側）に加熱面に対して平行な亀裂、③背面から垂直な亀裂が発生することが分かった。各亀裂の発生要因をFEM解析によって推定した結果、180°対称方向の垂直な亀裂は冷却時におけるクリープ収縮に伴う残留引張応力、加熱面に対して平行な亀裂は加熱時における加熱面の高い圧縮応力、そして背面から垂直な亀裂は加熱時における背面の引張応力によるものと推察された。また、各亀裂の程度にも違いが見られたが、これは発生した応力の持続性及び亀裂の伝達のしやすさに原因があると推察された。

#### 文 献

- 1) 耐火物技術協会編：耐火物手帳 改訂12版，耐火物技術協会（2015）pp.22-27.
- 2) 神尾英俊他：耐火物，**68** [10] 466-476 (2016).
- 3) F. H. Norton, The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw-Hill (1929).

本論文は以下の報文に加筆・再構成して転載したものである。

森田他：耐火物，**74** [3] 103 (2022).

caused by the accumulation of such small parallel cracks.

#### 4 Conclusion

In order to evaluate by thermal shock test simulating the high constrained condition of the ladle, a ring-restrained thermal shock test was conducted with the outside of the ring-shaped castable constrained. As a result, it was found that (1) vertical crack with 180° symmetry on the heating surface, (2) parallel crack near the heating surface, and (3) vertical crack on the back surface were generated in the ring sample. In addition, FEM analysis was used to estimate the cause of each crack. It was suggested that 180° symmetry vertical crack on the heating surface was caused during cooling by residual tensile stress due to creep shrinkage, parallel crack was caused by high compressive stress on the heated surface and vertical crack on the back surface was caused by tensile stress on the back surface during heating. Furthermore, differences in the size of these cracks were observed, which was estimated to be caused by the durability of the generated stresses and the ease of crack propagation.

#### References

- 1) TARJ ed., Refractories Handbook, Revised 12th edition, Technical Association of Refractories, Japan (2015) pp.22-27.
- 2) H. Kamio et. al.: Taikabutsu, **68** [10] 466-476 (2016).
- 3) F. H. Norton, The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw-Hill (1929).

This paper is reprinted with some additions and reconstructions to the following paper:

S.Morita et. al.: Taikabutsu, **74** [3] 103 (2022).