

平成22年 5月18日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20710057
 研究課題名（和文） アルミダイカストの効率的リサイクルのための欠陥許容設計法に関する基礎的検討
 研究課題名（英文） Fundamental Study on Defect-Allowed Design Method of Aluminum Alloy Die Castings for Efficient Recycle
 研究代表者
 桑水流 理（KUWAZURU OSAMU）
 福井大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：40334362

研究成果の概要（和文）：アルミニウム合金ダイカストの効率的リサイクルを目指し、鑄造欠陥の影響を考慮した疲労寿命予測法開発の基礎的知見を得た。大きな寿命低下を招く鑄巣の塊（引け巣クラスター）の存在を明らかにし、X線CT画像および顕微鏡画像に基づく有限要素解析から、引け巣クラスターの発生機構および力学的特性への影響を解明した。また、疲労破壊挙動を解明する基盤技術として、X線CTを用いた3次元画像ひずみ計測法を開発し、その基礎的な性能を検証した。

研究成果の概要（英文）：To realize an efficient recycle of aluminum alloy die castings, we found some fundamental knowledge on the development of fatigue life estimation method considering the casting defects, that is, porosity. It was shown that the clustered shrinkage cavity sometimes appeared and drastically reduced the fatigue life. Its formation mechanism and mechanical effects were also clarified from the finite element analyses based on X-ray CT or optical microscope images. Moreover, a three-dimensional strain measurement method was developed, and its availability was examined.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	2,600,000	780,000	3,380,000
平成21年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学 ・ 環境技術・環境材料

キーワード：リサイクル技術

1. 研究開始当初の背景

アルミニウム合金ダイカストは高いリサイクル性を有しており、自動車部品などに多用されている。しかし、効率的リサイクルを実現するには、そのプランニングにおいて、安全性を確保した上で、リサイクルタイム、

つまり製品寿命を最大化することが望まれる。そのためには、寿命評価の高精度化が必要である。

アルミニウム合金ダイカストには、多数の鑄造欠陥が混入し、製品の疲労寿命に影響する。特に、鑄巣と呼ばれる空洞欠陥は、結晶

レベルの材料欠陥に比べて極めて大きいため、材料の機械的特性に与える影響が大きい。鑄巣には、混入ガス等の気泡が凝固した「ガス欠陥」と、凝固時の収縮により生成される「引け巣」があるが、ガス欠陥が球状の空洞であるのに対し、引け巣は表面にデンドライト組織が露出した複雑な形状の空洞である。

本研究の前段階として、疲労寿命への鑄巣の影響を定量的に評価するため、様々な鑄巣を含んだアルミニウム合金ダイカスト試験片を用いて、疲労試験を行った。そして、全ての試験片に対して、X線CT画像に基づく3次元有限要素解析を行い、鑄巣まわり応力集中係数を求めた。この応力集中係数を用いて、各試験片の実効的な最大応力振幅（局所応力振幅）を算出し、疲労寿命を整理したところ、ばらつきの極めて少ない疲労特性曲線を特定することができた。これにより、鑄巣のような巨視的な欠陥に対しては、応力集中係数による定量的な影響評価が有効であることが示された。

また実験結果から、比較的大きなガス欠陥のまわりに、微小なガス欠陥と引け巣が集合し、連結して巨視的なクラスターを形成することがわかった。本研究では、これを引け巣クラスターと呼ぶ。更に疲労試験の結果から、引け巣クラスターは、き裂発生あるいはき裂進展を早め、疲労寿命を著しく低下させることが明らかとなった。

引け巣クラスターからの疲労破壊のように、内部の鑄造欠陥を起点として、疲労き裂が発生し、破断に至る場合、複数の欠陥からき裂が発生し得るため、それらの相互作用や合体挙動なども把握する必要がある。しかし現状では、内部起点による複数き裂からの疲労破壊挙動はよくわかっていない。

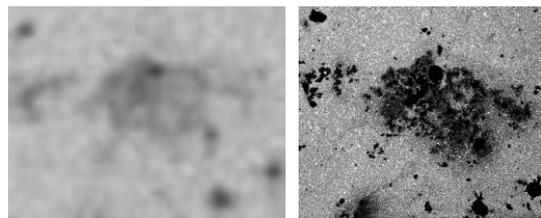
そこで、本研究では、引け巣クラスターからの疲労破壊挙動を解明することを目的に、X線CTによる疲労き裂進展挙動評価法の開発と、連続研磨断面画像を用いた引け巣クラスターの力学的特性評価を行った。

2. 研究の目的

鑄造材の複雑な疲労破壊挙動を検証するには、最終破断面の観察だけでは不十分であり、三次元的な内部状態を観察できるX線CTが有用である。しかし、汎用マイクロフォーカスX線CTでは、最小解像度が数十 μm 程度であり、き裂は明確には写らないため、X線CT画像から、目視により三次元き裂を検出するのは困難である。そこで、複数の三次元き裂の進展挙動を自動的に検出することを目的に、X線CT画像を用いた三次元画像相関法を開発した。本研究では、鑄巣の影響を受けないアルミニウム合金展伸材のき裂進展試験を行い、開発した手法による開口

き裂検出精度について検証した。

一方、き裂進展試験とは別に、引け巣クラスターの力学的影響についても詳細に考察した。引け巣クラスターは微小な鑄巣の集合体であるため、通常のマイクロフォーカスX線CTでは、その狭隘な鑄巣の詳細形状を解像できない。その例を図1に示す。図1(a)は引け巣クラスターのX線CT画像であり、図1(b)は研磨した同断面の顕微鏡画像である。図1(b)のように、引け巣クラスターは局所的な多孔質部位を形成するため、平均的なX線吸収率が低下し、CT画像の中では図1(a)のように、ぼやけた領域として写る。



(a) X線CT画像 (b) 顕微鏡画像

図1 引け巣クラスターの断面比較

本研究では、引け巣クラスターの疲労寿命への影響を明らかにするため、連続研磨断面画像に基づく有限要素解析により、引け巣クラスターの力学的特性評価を行った。等価弾性定数の評価には、均質化法を用い、その結果を応用して、単軸応力下での引け巣クラスターまわりの応力集中係数を明らかにした。

3. 研究の方法

(1) き裂進展試験

① 切欠試験片

計測精度検証のため、アルミニウム合金A5056Bを用いた。本研究で開発したX線CT用精密固定治具で負荷するため、丸棒試験片を使用し、図2に示すように、中央の試験片を厚さ10mmの平板状に加工し、深さ2mm、開き角 30° のV型切欠きを片側に挿入して、き裂進展試験片を作製した。

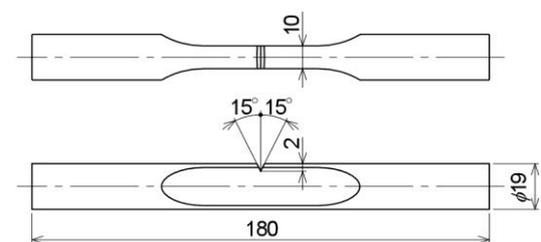


図2 き裂進展試験片

② 実験方法

油圧疲労試験機 (MTS Model 810) により疲労負荷を与え、片側表面のき裂進展量を読み取り顕微鏡で計測した。ただし、荷重振幅

を 14 kN (公称応力振幅 84.6 MPa), 応力比を -1 とした. 計測した表面き裂の長さが, 所定の長さとなったとき, 試験片を疲労試験機から取り外し, X 線 CT 付き引張試験機 (島津製作所 Force-X) を用いて, 9 kN (公称応力 54.4 MPa) の静的引張を与え, き裂を開口させた状態で CT 撮像した. コーンビーム CT により, 画像サイズ 1024×1024 (解像度 19.5 $\mu\text{m}/\text{pix}$), 画像ピッチ 19.5 μm , 撮像枚数 216 枚の三次元画像を取得した. また, 後述の画像解析のため, 疲労負荷前においても, 引張負荷無しで CT 撮像を行った.

③ 画像解析

CT 画像からのき裂検出には, 三次元画像相関法を援用する. 画像相関法は全視野ひずみ計測法のひとつであり, 初期画像と変形画像に関する画素輝度のマッピングから, 変位場を計算し, ひずみを算出する方法である. ただし, CT 画像は濃淡が不足するため, ひずみエネルギー制約をペナルティ関数として導入した. 得られた三次元ひずみ場から, き裂の進展および開口により生じる高ひずみの領域を抽出することにより, き裂を検出した.

(2) 連続研磨と有限要素解析

① 研磨試験片

使用したアルミニウム合金ダイカスト ADC12 の化学成分を表 1 に示す. 金型には疲労試験片用の鋳型を使用し, ガス欠陥の多い試験片を採用した. 予め試験片のマイクロフォーカス X 線 CT 撮像を行い, 三次元的に引け巣クラスタの位置を特定した. ただし, 使用した CT 装置は島津製作所 SMX-225CT, 採用した撮像条件での解像度は約 40 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ であった. その上で, 引け巣クラスタを含むように, 一辺の長さが約 10mm の立方体型研磨試験片を切り出した.

表 1 使用した ADC12 の化学成分 (wt%)

Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Mn	Al
10.8	2.03	0.69	0.21	0.70	0.18	Bal.

② 連続研磨

研磨試験片を固定治具に接着し, 同じ位置を金属顕微鏡で撮影できるようにする. 研磨条件は, 同材料の予備研磨を行い, 同じ研磨条件を 10 回繰り返したときの研磨厚さが約 100 μm となるように, 試行錯誤により同定した. つまり, 1 回の研磨量が約 10 μm になるように研磨条件を定めた. また, 予め撮像した CT 画像と顕微鏡画像の面が概ね平行になるように研磨面を設定した.

顕微鏡画像の画素サイズは 1200×1600 pixel, 解像度は 1.79 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ であった. CT 画像と顕微鏡画像を比較して, 引け巣クラスタ近傍まで, 位置出しの研磨を行った後, 同定した研磨条件での研磨を繰り返し, 合計 249 枚の断面画像を取得した. ただし, 1 回の平均研磨厚は 13.7 μm であった. よって, 取得したボリュームデータ領域の実寸法は, 縦 (y 方向) 2.148 mm×横 (x 方向) 2.864 mm×深さ (z 方向) 3.411 mm, 画素サイズで 1200×1600×249 である.

③ ボクセル有限要素解析

解析には Quint Voxelcon を用いた. 深さ方向の解像度不足によるボクセルモデルの異方性を排除するため, 研磨厚さ 13.7 μm に合わせて, 各画像を画素サイズ 150×200 pixel, 解像度 14.32 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ に縮小し, ほぼ立方体のボクセルにより有限要素モデルを作成した. つまり, このときの全ボクセル空間のサイズは 150×200×249 である.

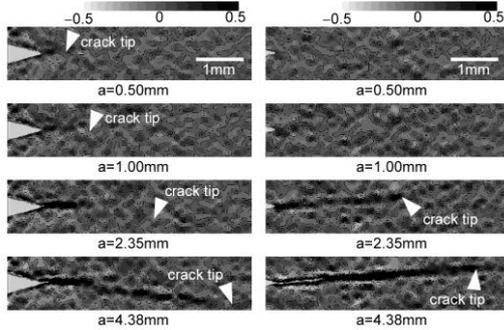
ここから, サイズの小さい部分空間モデルを複数採取し, 均質化法を適用するためのユニットセルとした. ただし, ユニットセルを切り出す位置は, 全空間に概ね一様に分布するように選定した. 複数のモデルの均質化解析を行うことにより, 等価弾性定数に対する, 部分空間のサイズの影響, 鋳体積率の影響, 切り出し位置の影響を調べた.

その後で, 均質化解析から得られた特性変位を用いて, 単軸引張応力下 (周期境界条件下単軸引張) におけるユニットセル内の引け巣まわり応力集中係数を調べ, ユニットセルと応力集中係数との関係を調べた. ただし, いずれの解析においても, 過去の実験結果に基づき, ADC12 の Young 率を $E = 74.5 \text{ GPa}$, Poisson 比を $\nu = 0.3$ とした.

4. 研究成果

(1) き裂進展試験によるき裂検出精度検証

表面き裂長さが 0.50 mm, 1.00 mm, 2.35 mm, 4.38 mm のとき, CT 撮像を行い, 画像相関法を適用した. 得られた軸引張ひずみの分布を図 3 に示す. 図 3(a) は観察面近傍の断面, 図 3(b) は中央断面での分布である. ここでは, 0.5 以上のひずみ領域をき裂面とみなす. 図 3(a) の矢印は, 表面き裂長さから予測されるき裂先端であり, 表面近傍での三次元画像相関法の精度不足がわかる. 一方, 図 3(b) の矢印は, ひずみ分布から検出されるき裂先端であり, CT 画像から予測されるき裂先端とほぼ一致した. よって, 2mm 以上成長した開口き裂であれば, 自動検出できることが明らかとなった.



(a) 観察表面近傍 (b) 内部中央面
図3 軸方向引張ひずみの分布

また、参考までに、表面き裂長さが4.38mmのときの3次的き裂進展の様子を図4に示す。同図はCT画像から等値面処理により抽出した材料表面である。撮影条件が良ければ、汎用X線CTでも、図4のように、き裂の可視化が可能となるが、本研究で対象とするダイカスト材の場合には、多数の鑄巣の間を、複数のき裂が進展するので、条件が非常に悪いため、上記の画像相関法の精度をより高めることにより、検出する必要があると考えられる。

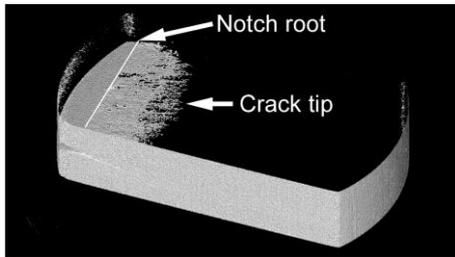


図4 き裂面の3次元可視化

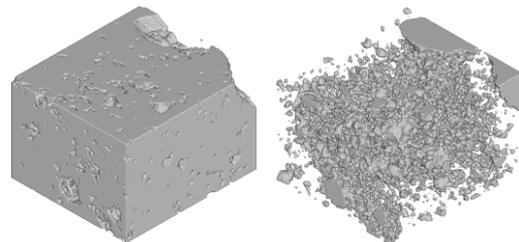
(2) 連続研磨による引け巣クラスター評価

部分空間モデルとして、ボクセルサイズで 140^3 のモデルを2つ、 120^3 のモデルを2つ、 100^3 のモデルを2つ、 80^3 のモデルを8つ、 40^3 のモデルを2つ、全体ボクセル空間の異なる位置から採取し、それぞれ有限要素解析を行った。ボクセル数から算出した鑄巣体積率 p を表2にまとめる。全体モデルの鑄巣体積率が12.8%であるのに対し、ユニットセルサイズが小さくなるに従って、局所的な鑄巣の偏りの影響を受け、鑄巣体積率のばらつきが大きくなることわかる。

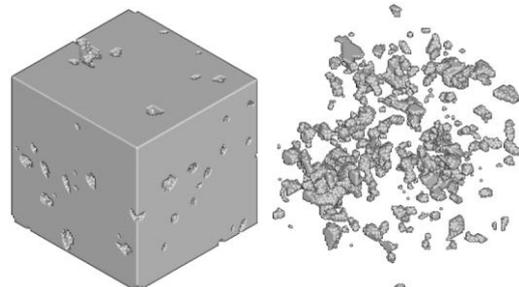
参考までに、全体モデルを図5に、 80^3 部分モデルの最低鑄巣体積率モデルを図6に、最高鑄巣体積率モデルを図7に示す。各図には、引け巣クラスターの形状がわかるように、鑄巣の空間をボクセル表示した図も示した。

表2 解析したモデルと鑄巣体積率

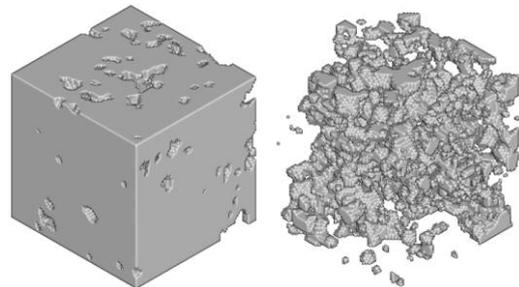
No.	Voxel size of unit cell	Porosity volume fraction p [%]
1	150×200×249	12.837
2	140×140×140	14.290
3	140×140×140	16.451
4	120×120×120	16.106
5	120×120×120	15.703
6	100×100×100	14.736
7	100×100×100	14.685
8	80×80×80	3.982
9	80×80×80	4.493
10	80×80×80	4.977
11	80×80×80	9.719
12	80×80×80	11.023
13	80×80×80	16.728
14	80×80×80	17.291
15	80×80×80	20.464
16	40×40×40	16.219
17	40×40×40	9.780
18	40×40×40	26.05



(a) 材料モデル (b) 空間モデル
図5 150×200×249全体モデル ($p = 12.8\%$)



(a) 材料モデル (b) 空間モデル
図6 等方性80×80×80部分モデル ($p = 4.0\%$)



(a) 材料モデル (b) 空間モデル
図7 異方性80×80×80部分モデル ($p = 20.5\%$)

均質化解析から得られた、3軸方向の等価Young率と等価Poisson比の、鋳巣体積率に対する変化を、それぞれ図8および図9に示す。ただし、等価Young率 E_i^H ($i = x, y, z$) は材料のYoung率 E で基準化してある。図8より、鋳巣体積率の増加に伴い、線形的に等価Young率が低下することがわかる。異方性に関しては、 z 方向(深さ方向)の等価Young率がやや低くなる傾向があるが、鋳巣体積率が10%以下になると、ほぼ等方性の等価弾性定数になる様子が見て取れる。図9の等価Poisson比も同様に、鋳巣体積率の増加とともに、低下する傾向を示すが、低下率は比較的小さい。

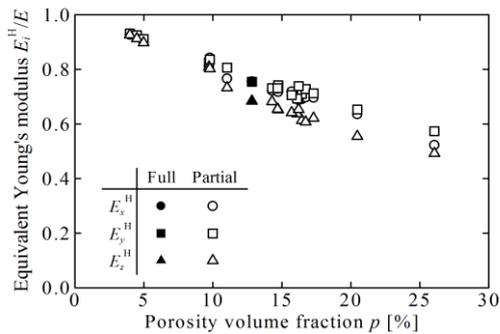


図8 等価Young率の変化

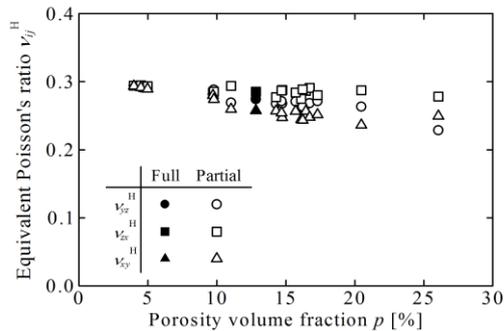


図9 等価Poisson比の変化

異方性の原因は、図5に示したように、大きなガス欠陥が解析領域に含まれているためと考えられ、全体モデルの等価弾性定数とその異方性を示している。一方、部分空間ユニットセルは、鋳巣体積率が10%以下のときに、ほぼ等方性を示しており、鋳巣が少なく、個々の鋳巣が孤立した状態に近づき、等方性になったと考えられる。逆に言えば、鋳巣体積率が増え、鋳巣通しが連結することにより、異方性が出ている可能性がある。よって、力学的異方性は、引けの方向性、つまり、溶湯の凝固方向と密接な関係があると考えられる。

一方、ユニットセルの切り出し位置の影響については、鋳巣の偏りの影響を受け、最終的には鋳巣体積率の違いとして考慮されたと

考えられる。つまり、図8および図9を見る限り、鋳巣体積率以外の因子が強く影響した痕跡はなく、等価弾性定数に対しては鋳巣体積率が支配的であると推察される。

ユニットセルサイズの影響についても、図8および図9を見る限り、サイズに関わらず、ほぼ同じ直線上に集まっており、サイズの影響はほとんど見られない。ただし、ユニットセルが小さい場合には、鋳巣体積率のばらつきの影響が大きくなるので注意が必要である。

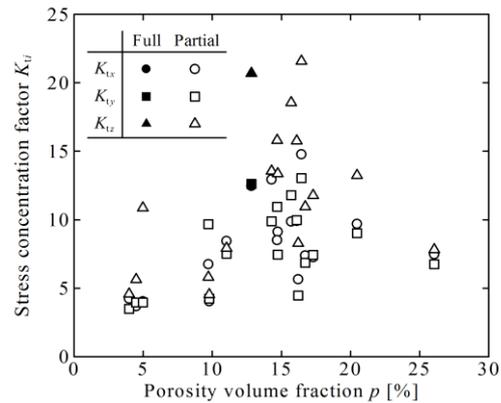


図10 応力集中係数の変化

次に、3軸方向それぞれに対して、単軸引張応力をユニットセルに負荷し、特性変位からユニットセル内の応力を求め、鋳巣まわりの応力集中係数を評価した。ただし、応力集中係数 K_i ($i = x, y, z$) は、公称応力(マクロ応力)と最大主応力(ミクロ第1主応力の最大値)の比として定義した。

得られた応力集中係数と鋳巣体積率の関係を図10に示す。等価弾性定数と異なり、大きくばらついている様子がわかる。ただし、 z 方向引張における応力集中係数が、多方向の引張に比べて、高くなる傾向があり、 z 方向の等価Young率が低くなる傾向と関係していることが予測されるが、ほぼ等方性を示した、鋳巣体積率10%以下のユニットセルにおいても、 z 方向引張の応力集中係数が高くなる場合があり、他の因子が大きく関与していることが示唆される。

応力集中に関与する最も重要な因子の1つとして、階段状の表面形状を持つボクセル有限要素モデルの表面形状誤差がある。応力集中係数は欠陥形状に大きく依存するのに対して、ボクセルモデルは滑らかな表面形状を表現できない。そのため、数値的な応力集中が発生し、図10のように、高い応力集中係数が評価されたと考えられる。

本研究の前段階で、ADC12のマクロ解析において、体積率で0.01%に相当する上位応力を、

数値誤差として無視することにより、より実効的な最大応力を簡便に評価する手法を提案し、その妥当性を示した。今後は、同手法を上述のマイクロ解析にも適用し、より実効的な引け巣クラスターの応力集中係数、ひいては疲労寿命への影響を評価する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計14件)

- ① 矢野貴之, アルミニウム合金ダイカスト内部の引け巣クラスターの三次元形状解明, 日本金属学会 2010 年春季大会, 2010 年 3 月 28 日, 茨城大学 (茨城).
- ② 矢野貴之, アルミニウム合金ダイカスト内部の引け巣クラスターの実態検出, 日本機械学会関東支部第 16 期総会講演会, 2010 年 3 月 11 日, 明治大学 (東京).
- ③ 吉川暢宏, シミュレーションを活用した疲労強度予測, 日本材料学会第 14 回破壊力学シンポジウム, 2009 年 10 月 24 日, 大濱信泉記念館 (沖縄).
- ④ 桑水流理, 汎用マイクロフォーカス X 線 CT による開口き裂検出精度に関する検討, 日本鑄造工学会第 155 回全国講演大会, 2009 年 10 月 18 日, 長崎大学.
- ⑤ 桑水流理, 三次元有限要素解析による内部鑄巣群まわりの弾性応力集中係数評価, 日本鑄造工学会第 155 回全国講演大会, 2009 年 10 月 18 日, 長崎大学.
- ⑥ 矢野貴之, 連続研磨による ADC12 内部の引け巣クラスターの三次元可視化, 日本鑄造工学会第 155 回全国講演大会, 2009 年 10 月 18 日, 長崎大学.
- ⑦ 桑水流理, 鑄巢の幾何学パラメータによる ADC12 の疲労破壊挙動予測の試み, 日本鑄造工学会第 153 回全国講演大会, 2008 年 10 月 25 日, 金沢工業大学.
- ⑧ 宇都宮登雄, 内部鑄巣群を有する ADC12 の軸力と回転曲げ疲労寿命の関係, 日本鑄造工学会第 153 回全国講演大会, 2008 年 10 月 25 日, 金沢工業大学.
- ⑨ 村田陽三, 鑄巢まわり応力場の有限要素解析に基づく ADC12 の疲労強度評価, 日本鑄造工学会第 153 回全国講演大会, 2008 年 10 月 25 日, 金沢工業大学.
- ⑩ 葛上昌司, X 線 CT によるアルミダイカスト内部のひずみ場の計測, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 16 日, 立命館大学.
- ⑪ 桑水流理, アルミ合金ダイカストの疲労強度に及ぼす鑄巢の形状・体積の影響, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス,

2008 年 9 月 16 日, 立命館大学.

- ⑫ 宇都宮登雄, アルミ合金ダイカストの疲労寿命に及ぼす内部鑄造欠陥群の影響, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 16 日, 立命館大学.
- ⑬ 村田陽三, アルミ合金ダイカストの疲労強度に及ぼす鑄肌の影響, 日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 16 日, 立命館大学.
- ⑭ 村田陽三, アルミニウム合金ダイカストの疲労寿命に及ぼす巨視的鑄造欠陥の影響, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008 年 8 月 6 日, 横浜国立大学.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等 なし.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

桑水流理 (KUWAZURU OSAMU)

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40334362