

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420706

研究課題名(和文) 画像処理による金属および金属基複合材料の組織定量化法の開発

研究課題名(英文) Development of a quantitative method for evaluating the microstructure of metal and metal matrix composites by using image processing

研究代表者

杉尾 健次郎 (Kenjiro, Sugio)

広島大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90294545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：金属および金属基複合材料中の第2相の組織形態はその材料の機械的性質に大きな影響を与える。その組織形態を定量的に評価するための手法として3次元・2次元局所粒数(LN3D・LN2D)および画像の平均自由行程(IMFP)の提案を行い、さらに、それらを自動的に測定するためのソフトウェア群(機械学習を含む)の開発を行った。また、その測定値の統計的意味をコンピューター・シミュレーションにより明らかにし、さらに、材料の機械的性質とその測定値の関係について調査を行った。

研究成果の概要(英文)：The morphology of the second phase in the metal and metal matrix composites has a great influence on the mechanical properties of the material. We proposed the three-dimensional and the two-dimensional local number (LN3D and LN2D) and the image mean free path (IMFP) as a method for quantitatively evaluating the microstructure, and furthermore, we developed software component groups (including machine learning techniques) to measure these values automatically. In addition, the statistical meaning of the measured value was clarified by computer simulation, and the relationship between the mechanical properties of the material and its measured value was investigated.

研究分野：複合材料

キーワード：空間分布 粒子分散型複合材料 画像処理 有効熱伝導率 鋳造組織 機械学習 電気伝導率

1. 研究開始当初の背景

金属および金属基複合材料中の第2相の空間分布(分散度)はその材料の機械的性質に大きな影響を与える。これまで第2相組織の2次元空間分布を評価する方法として、ポロノイ多角形、相関関数、隣接粒子間の重心点間距離の頻度分布、接触分布、動径分布関数などを用いて評価する方法が提案されている。しかしながらこれらの手法は測定・評価が2次元に限られているため、3次元空間を正しく反映したものであるかどうかは明らかではない。現在では、走査型電子顕微鏡(SEM)像あるいは光学顕微鏡(OM)像を分析することにより第2相の空間分布を評価する方法が一般的である。また、第2相組織の3次元空間分布を評価する方法としてはシリアルセクションング、シンクロトンX線マイクロトモグラフィー、電子線トモグラフィーによって評価する方法があるが、これらの技術は複雑かつ高度であることから容易に用いることが難しい。このような現状の中で、コンピューターモデリングは第2相組織の3次元配置を容易に構築できることから、この手法を用いて2次元と3次元の空間分布の統計的な関係について調査することは有効である。もし2次元と3次元の空間分布から単純な統計的な関係が得られれば、SEM画像もしくはOM画像の分析により得られた2次元空間分布から3次元空間分布を予測できる可能性がある。これまで、我々は3次元局所粒数(LN3D)および2次元局所粒数(LN2D)という測定法を用いることにより、粒子分散複合材料の空間分布を2次元および3次元で定量的に評価できることを示してきた。

Al-Si系鋳造合金の機械的性質と微細組織との関係を明らかにするために、微細組織を定量的に評価するための測定法の開発が重要となっている。二次デンドライトアーム間隔(SDAS)の測定は、よく知られている方法の一つであり、多くの実験的研究がこの方法を採用している。しかしながら、Al-Si系合金の微細組織は、鉄、マンガンおよびストロンチウム等の添加元素の含有量によって共晶および金属間化合物の形態が大きく変化し、それらの影響を評価できる手法の開発が必要である。この課題に対応するため、我々は画像の平均自由行程(IMFP)という測定法を提案してきた。

2. 研究の目的

本研究では測定により得られる3次元・2次元局所粒数(LN3D・LN2D)および画像の平均自由行程(IMFP)の統計的意味をコンピューター・シミュレーションにより明らかにし、さらに、これら測定により得られた値と材料の機械的性質の関係について調査を行う。また、光学顕微鏡像、走査電子顕微鏡および透過電子顕微鏡像から2次元局所粒数(LN2D)および画像の平均自由行程を自動的に測定するソフトウェアの開発を行う。

3. 研究の方法

LN3Dとは図1に示すように、ある粒子の重心を中心として測定球を置いた場合のその測定球に含まれる粒子の重心の数と定義される。ここで、測定球の半径の取り方が重要となってくるが、LN3Dでは全粒子が図1(a)に示すような3次元最密構造に配列した状態を基準と考えて、最近接の粒子の重心を含むように測定球の半径を決定する。この測定球を全ての粒子の重心に置いて、測定球の中に含まれる粒子の重心の数を測定していくと、粒数に対する頻度分布が得られる。粒子が3次元に均一ランダムに分散している状態を上述の測定法で測定すると、平均14、分散13のポアソン分布が得られることが分かっている。もし、測定された頻度分布の分散が13より大きくなると粒子はクラスタリングしており、頻度分布の分散が13より小さければ粒子はオーダリング(規則化)していると考えられる。このような考え方により粒子の空間分布を定量的に評価することができる。

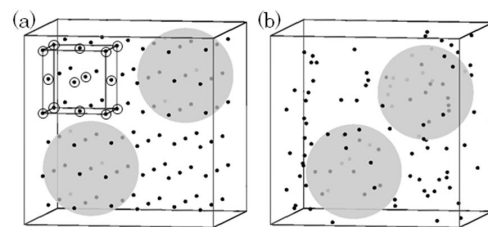


図1 LN3Dの定義

LN2Dとは図2に示すように、ある粒子の重心を中心として測定円を置いた場合のその測定球に含まれる粒子の重心の数と定義される。LN2Dでは全粒子が図2(a)に示すような2次元最密構造に配列した状態を基準と考えて、最近接の粒子の重心を含むように測定円の半径を決定する。粒子が2次元的に均一ランダムに分散している状態を上述の測定法で測定すると、平均8、分散7のポアソン分布が得られることが分かっている。

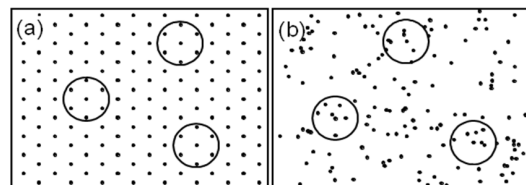


図2 LN2Dの定義

図3はAl-Si鋳造合金の光学顕微鏡組織を2値化処理した像である。画像の平均自由行程(IMFP)は次のように測定する。(1)画像中にランダムな始点Aを決める。(2)始点Aからランダムな方向に進み黒い部分に到達するまでの距離をaとし、aを「画像の平均自由行程」とする。ただし、画像の端に到達し

た場合は測定をやり直す。(3) 設定したサンプル数(300万回程度)になるまで(1)(2)の測定を繰り返して頻度分布を作り、頻度分布から「画像の平均自由行程」を求める。図3の黒い部分が共晶シリコンであり、このような材料では共晶シリコンにより転位の運動が阻害されるため、転位運動の平均自由行程が材料の機械的性質に大きな影響を与えられとされる。

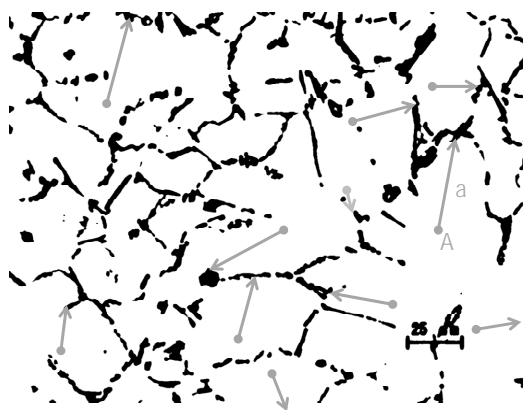


図3 画像の平均自由行程 (IMFP) の定義

4. 研究成果

(1) Al-TiB₂ 粒子分散型複合材料の第2相の空間分布を LN2D という測定法を用いて評価するために、第2相粒子の重心 (GC) を OM と SEM 画像から正確かつ自動的に抽出しなければならない。現状では、平滑化、閾値処理、形態変換および輪郭抽出等の画像処理技術を組み合わせて GC を抽出しているが、GC を正確に抽出するには手動による修正が必要である。本研究では、複合材料の第2相の GC を認識するために機械学習技術を適用した。本研究では OpenCV に実装されているカスケード分類器を粒子検出に使用した。Haar, HOG (Histogram of Oriented Gradients) および LBP (Local Binary Patterns) の3つの特徴量をカスケード分類器のトレーニングのために使用した。Harr 特徴を用いた場合、正解画像数が増加するにつれて検出率が増加し、最大検出率は 55% であった。HOG 特徴を用いた場合も、正解画像数が増加するにつれて検出率が増加し、最大検出率は 48% であった。Harr 特徴および HOG 特徴では、正解画像数が増えると誤検出率が増加した。HOG 特徴の誤検出率は Harr 特徴および LBP 特徴の誤検出率よりも小さかった。

(2) 機械学習技術を用いて Al-TiB₂ 粒子分散複合材料中の粒子を自動的に検出できるかどうかについて調査を行った。特徴抽出法として HOG (Histogram of Oriented Gradient) を用い、SVM (Support Vector Machine) を用いて得られた特徴量から分類器を作成した。SVM マージンを最適に設定すると検出率は 78%、誤検出率は 6% であった。

(3) Al-Si 系鋳造合金の画像の平均自由行程

(IMFP) と機械的性質との間の関係を調べた。IMFP は画像処理と統計的手法を用いて転位運動の平均自由行程を評価する新しい手法である。Al-Si および Al-xSi-Fe では、IMFP r は添加元素量が増加するにつれて減少した。機械的性質は $r^{-1/2}$ に比例した (Hall-Petch または逆 Hall-Petch 関係)。機械的特性に対する $r^{-1/2}$ プロットの直線の傾きは、各添加元素の機械的特性への影響の大きさの度合いを示す。このような分析手法を用いれば、添加元素が機械的特性に及ぼす影響の度合いを容易に推定することが可能である。

(4) 電気伝導シミュレーションを実行することにより、実際の微細組織画像からアルミニウム基粒子分散型複合材料の電気伝導率を計算することが可能なソフトウェアの開発を目的としている。そのために本研究では電気伝導シミュレーションを行うことにより、三次元電気伝導率と二次元電気伝導率との統計的関係の調査を行った。二次元断面の平均電気伝導率は三次元セルの平均電気伝導率よりも低く、その差は第2相の体積率の増加とともに増加する。マトリックスと強化材との間の電気伝導率の差が小さい場合、2次元電気伝導率と3次元電気伝導率の差は小さい。第2相の分散性を変化させても、2次元及び3次元電気伝導率の差は各体積分率において一定であった。2次元電気伝導率を3次元電気伝導率に変換するための補正式が提案された。また、実際の微細組織画像から電気伝導シミュレーションを実行することにより Al / TiB₂ の電気伝導率を評価することができた。

(5) マトリックスと強化材との間の界面熱抵抗は複合材料の有効熱伝導率に大きな影響を及ぼすと考えられる。界面熱抵抗の影響の度合いを調べるために、我々は界面熱抵抗を考慮して複合材料の有効熱伝導率を計算できる新しいシミュレーションコードを開発した。臨界要素サイズ L_{cr} は簡単な式 $L_{cr} = \lambda / h$ で定義することができる。ここで、 λ は強化材とマトリックスの熱伝導率の調和平均であり、 h は強化材とマトリックス間の界面熱伝達係数である。この臨界要素サイズは複合材料を設計する上で重要な指標となる。強化材のサイズが臨界要素サイズよりも小さい場合、有効熱伝導率は界面熱抵抗によって減少することが予測される。一方、強化材のサイズが十分に大きければ、有効熱伝導率は低下しない。Al/SiC, Al/TiB₂, Al/Al₂O₃ および Al/SiO₂ 複合材料の強化材のサイズ、体積分率および配置を変化させ、一連の計算を行った。これらの複合材料の臨界要素サイズの妥当性が確認された。

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5件)

1. Yongbum Choi, Zhefeng Zu, Kazuhiro Matsugi, Kenjiro Sugio, Gen Sasaki, Manufacturing of Carbon Nanotube Preform with High Porosity and Its Application in Metal Matrix Composites, 査読有, MATERIALS TRANSACTIONS, Vol. 58, 2017, p. 834-837, <http://doi.org/10.2320/matertrans.M2017018>
2. Kenjiro Sugio, Yong-Bum Choi, Gen Sasaki, Effect of the Interfacial Thermal Resistance on the Effective Thermal Conductivity of Aluminum Matrix Composites, MATERIALS TRANSACTIONS, 査読有, Vol. 57, 2016, p. 582-589, <http://doi.org/10.2320/matertrans.MC201505>
3. Kenjiro SUGIO, Nariaki KAWANO, Takaaki HIROSE, Yong-Bum CHOI, Gen SASAKI, Estimation of the electrical conductivity of TiB₂/Al composites by using image analysis, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 3, 2016, p. 15-00577, <http://doi.org/10.1299/mej.15-00577>
4. Kenjiro Sugio, Shota Furukawa, Taruho Kengai, Junji Tabata, Gen Sasaki, Image Processing Characterization of Microstructures of Al-Si Casting Alloy, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 783-786, 2014, pp240-245, [10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.240](http://www.scientific.net/MSF.783-786.240)
5. Gen Sasaki, Kota Ishikawa, Yonbum Choi, Kenjiro Sugio, Kazuhiro Matsugi, Effect of Dispersibility of TiB₂ Particles on Electrical Conductivity in TiB₂/Al Composites, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 783-786, 2014, pp1573-1578, [10.4028/www.scientific.net/MSF.783-786.1573](http://www.scientific.net/MSF.783-786.1573)

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 杉尾健次郎, 河野圭将, 崔龍範, 佐々木元, Al-SiC 粒子分散複合材料の粒子サイズと有効熱伝導率の関係, 日本金属学会, 2017-03-15 - 2017-03-17, 首都大学東京南大沢キャンパス (東京都)
2. 杉尾健次郎, 大谷洋介, 崔龍範, 佐々木元, 機械学習による画像認識を用いた粒子分散型複合材料の粒子空間分布評価, 日本機械学会 機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2016), 2016-11-25 - 2016-11-26, 早稲田大学国際会議場 (東京都)
3. 杉尾健次郎, 崔龍範, 佐々木元, 組織画像を用いた Al-SiC 粒子分散型複合材料の有効熱伝導率の評価, 軽金属学会, 2016-11-05 - 2016-11-06, 茨城大学水戸キャンパス (茨城県)
4. Kenjiro Sugio, Yong-Bum Choi and Gen Sasaki, Estimation of Effective Thermal

Conductivity of SiC/Al Composites by Using Image Analysis, 10th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM10), 2016-10-16 - 2016-10-19, Busan (Korea)

5. 杉尾健次郎, 崔龍範, 佐々木元, 画像解析による Al-SiC 粒子分散型複合材料の有効熱伝導率の算出, 日本金属学会, 2016-09-21 - 2016-09-23, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府)
 6. Kenjiro Sugio, Yousuke Ohtani, Yong-bun Choi and Gen Sasaki, Evaluation of Spatial Distribution of Second Phase in Composites with Machine Learning Technique, 9th Pacific Rim International Conference of Advanced Materials and Processing (PRICM9), 2016-08-01 - 2016-08-05, Kyoto (Japan)
 7. 杉尾健次郎, 山田理欧, 崔龍範, 佐々木元, Al/SiC 粒子分散型複合材料の粒子サイズと有効熱伝導率の関係, 日本金属学会, 2016-03-23 - 2016-03-25, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都)
 8. Kenjiro Sugio, Yonbum Choi, Gen Sasaki, Development of a Software of Evaluate Spatial Distribution of Second Phase, The 10th Korea-Japan Joint Symposium on Composite Materials, 2015-10-28 - 2015-10-30, Jeonju (Korea)
 9. 杉尾健次郎, 佐々木元, 粒子分散型複合材料の粒子空間分布評価ソフトウェアの開発, 日本金属学会, 2015-09-16 - 2015-09-18, 九州大学伊都キャンパス (福岡県)
 10. Kenjiro SUGIO, Nariaki KAWANO, Takaaki HIROSE, Yong-Bum CHOI and Gen SASAKI, ESTIMATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF TiB₂/Al COMPOSITES WITH IMAGE ANALYSIS, 4th Asian Symposium on Materials Processing (ASMP2015), 2015-08-10 - 2015-08-13, Lombok (Indonesia)
 11. Kenjiro Sugio, Rio Yamada and Gen Sasaki, EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITES WITH CONSIDERING INTERFACIAL THERMAL RESISTANCE, 20th International Conference on Composite Materials, 2015-07-19 - 2015-07-24, Copenhagen (Denmark)
 12. 杉尾健次郎, 河野成朗, 佐々木元, 画像処理による粒子分散複合材料の電気伝導率の算出, 日本金属学会, 2015-03-20, 東京大学駒場 I キャンパス (東京都)
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 杉尾 健次郎 (KENJIRO SUGIO)
 広島大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号: 90294545