

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420788

研究課題名(和文)フラクタルによる鋳造材のデンドライト組織の評価

研究課題名(英文)Evaluation of dendrite morphology using fractal dimension

研究代表者

大笹 憲一(Ohsasa, Kenichi)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90111153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：Al基合金の一方向凝固実験を行い、縦断面、斜断面および横断面のフラクタル次元を測定した。部分凝固時間が同じであれば各断面のフラクタル次元は等しい値となった。この結果は凝固組織から、凝固時の冷却速度を容易に見積もることを可能にする。また、デンドライト組織形態を評価する他のパラメータとして新たに無次元周囲長を検討した。フラクタル次元および無次元周囲長の異なる組織形態の試料の引っ張り試験を行った。フラクタル次元および無次元周囲長が増加すると、引っ張り強さが増加した。一方向凝固した試料の無次元周囲長から共晶凝固時の固相率における固液共存体の透過率を求めることが出来た。

研究成果の概要(英文)：Fractal dimensions of dendrites were measured at the transverse, longitudinal and oblique cross sections in unidirectionally solidified Al base alloys. Fractal dimension of dendrites at each section with same local solidification time showed same values. This result enables to estimate the cooling rate easily from the observed dendrite structures. Furthermore, a dimensionless perimeter was also examined as another parameter for expressing the complexity of dendrites. Tension test was carried out for the specimens having the structures with different fractal dimension and dimensionless perimeter. Along with increase in fractal dimension and dimensionless perimeter, tensile strength increased. Permeability of solid-liquid coexisting zone with the fraction of solid at the start of eutectic reaction can be estimated.

研究分野：凝固工学

キーワード：Al基合金 デンドライト組織 フラクタル次元 無次元周囲長 部分凝固時間 透過率

1. 研究開始当初の背景

(1) フラクタルの概念は 1970 年代半ばに数学者 Mandelbrot により自己相似性を有する図形を表すものとして提唱され、材料工学への応用としては金属破断面の解析、再結晶粒組織の評価、鋳鉄の黒鉛形状の解析などいくつかの研究例が報告されている。しかしながら、現在までに材料工学への実用的応用が十分に確立されてはいない。

(2) 合金の凝固組織は通常デンドライトで構成されており、そのデンドライト形態を評価する指標として一般にデンドライトアーム間隔 (Dendrite Arm Spacing, DAS) が用いられている。しかし、DAS を正確に測定するには一方向凝固試料が必要であり、通常の鋳込みで作成された等軸晶組織形態の DAS の測定が困難である。一方、デンドライトはフラクタル性を有する図形であることが報告されている。しかし、デンドライト形態とフラクタル次元との関係について、詳細に検討した例は今までにない。また、凝固過程で生じる重要な凝固欠陥であるマクロ偏析は、凝固過程でデンドライト間隙を成分元素や不純物元素の濃化した液相が長範囲に流動することにより生じる。デンドライト間隙の流動性を表すパラメータとして透過率が用いられ、マクロ偏析生成シミュレーションにはその正確な値が必要になる。デンドライト間隙の液相流動は、デンドライト形態を緻密にすることで抑制出来ることから、フラクタル次元の大きいデンドライトを作成できれば、マクロ偏析を抑制出来る。そのため、フラクタル次元と透過率を関係づけることが望まれる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、フラクタル次元が鋳造材のデンドライト組織形態の複雑性を評価するパラメータとして有効であることを示し、凝固組織評価へのフラクタルの工学的な応用を行うことである。デンドライト形態 (フラクタル次元) に影響をおよぼす因子を明らかにし、フラクタル次元から材料の機械的特性を予測すること、および、合金の凝固時のデンドライト間液相の透過率を鋳造材の実組織のフラクタル次元から求めることを行う。

3. 研究の方法

(1) フェーズフィールドシミュレーション
フェーズフィールド法によりデンドライトのフラクタル特性を調査する。フラクタルには自己相似フラクタルと自己アフィンフラクタルの 2 種類がある。シミュレーションで作成したデンドライト組織を調査し、合金のデンドライトがどちらのフラクタルに属するかを明らかにする。これにより、実測の組織のフラクタル次元の測定方法を確立する。

(2) 実験

デンドライト組織の初晶の抽出法

今回実験で用いる Al 基合金の凝固組織は初晶デンドライトとその間隙の共晶組織で構成されており、初晶デンドライトのフラクタル次元の測定のために、初晶デンドライトの形状を抽出する必要がある。これは従来目視で初晶をなぞることによって成されていたが、時間がかかること、及び個人差による誤差が発生することに問題があった。そこで、画像処理により自動的に共晶領域を塗りつぶし、初晶を抽出するアルゴリズムを開発する。

一方向凝固実験

Al-Si 合金および Al-Cu 合金を用いて一方向凝固実験を行う。余熱した内径 30mm、高さ 220mm の断熱性鋳型の底部に水冷チルを設置して試料溶湯を鋳込み、一方向凝固実験を行う。これにより、柱状晶、柱状晶-等軸晶遷移 (CET)、等軸晶からなる組織を有する試料を作成し、チルからの距離に沿ってそのフラクタル次元を測定する。部分凝固時間 (冷却速度) はチルからの距離に沿って変化するので、フラクタル次元におよぼす組織形態および部分凝固時間の影響を明らかにする。デンドライト組織形態を評価するパラメータとしてフラクタル次元とともに無次元周囲長の有効性についても検討する。従来の単一デンドライトに対する無次元周囲長の定義を拡張し、実組織の断面に 2 次元的に観察される複数の初晶の総面積とその総周囲長を測定し、その総面積と等しい円の周囲長との比として新たに定義する。

引っ張り試験

材質の異なる 3 種類の鋳型を用いて冷却速度を変化させることにより異なるフラクタル次元および無次元周囲長の組織形態を有する試料から引っ張り試験片を作成し、引っ張り試験を行う。鋳造材のフラクタル次元および無次元周囲長と機械的特性との関係を調査検討する。

透過率の評価

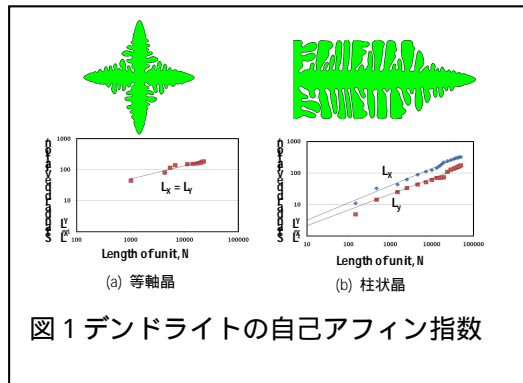
一方向凝固した試料の無次元周囲長から共晶凝固時の固相率における固液共存体の透過率を求める。固液共存体の毛細管モデルに基づき、モデル中の液相チャンネルの曲がり具合を表すパラメータ (tortuosity factor) に実測した無次元周囲長を適用することにより透過率を求める。

4. 研究成果

(1) デンドライトのフラクタル特性

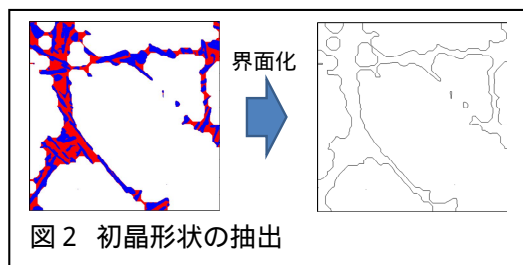
図 1 に示すようにフェーズフィールド法で等軸晶と柱状晶のデンドライトを作成し、その自己アフィン指数を測定した。等軸デンドライトの場合 x 方向と y 方向の自己アフィン指数は等しくなり、自己相似フラクタルであ

ることが分かった．一方，柱状 dendrait の場合 x 方向と y 方向の自己アフィン指数はそれぞれ 0.55 と 0.50 となり異方性を有することから自己アフィンフラクタルであることが分かった．しかし，その差はわずかであり，柱状 dendrait でも自己相似フラクタルとして取り扱っても問題はないと考えられる．



(2) 実験結果

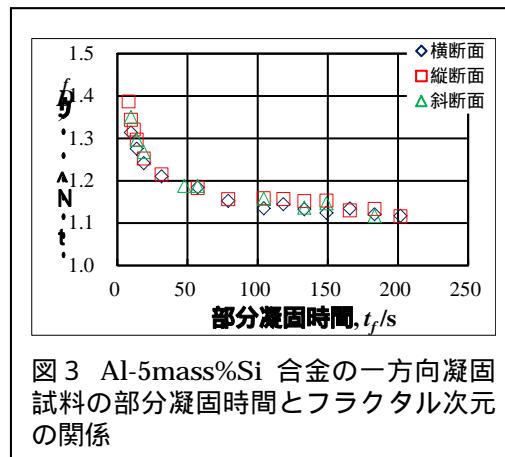
初晶の dendrait 抽出アルゴリズム
組織写真の RGB 値を取得し，しきい値を決めることにより Al-Si 合金の凝固組織中の固溶体相と共晶 Si 相を識別し，Si 相の膨張・収縮を繰り返すことにより共晶領域の固溶体相を図 2 のように塗りつぶして共晶領域を識別し，初晶 dendrait 形状を正確かつ迅速に抽出するアルゴリズムを開発した．これにより目視による場合の誤差を解消することが出来た．



部分凝固時間とフラクタル次元

一方向凝固実験により底部のチルから柱状晶が発達し，状晶-等軸晶遷移 (CET) が生じ，上部が等軸晶からなる組織を作成した．チルからの距離に沿った各位置での横断面，縦断面，斜断面の dendrait 組織のフラクタル次元と無次元周囲長を測定した．フラクタル次元の測定には自己相似フラクタルの測定法であるボックスカウント法を用いた．フラクタル次元の測定結果を部分凝固時間との関係で図 3 に示す．チルからの距離に沿って部分凝固時間が減少するとフラクタル次元，無次元周囲長は減少し，柱状晶，等軸晶の組織形態にかかわらず連続して減少する結果となっている．また，柱状晶領域では dendrait の成長方向に沿った縦断面では柱状 dendrait が観察されたが，横断面，斜断面では等軸的な形態が観察された．しかしな

がら，部分凝固時間が等しければ，縦断面，横断面，斜断面に観察される異なる形態の dendrait のフラクタル次元，部分凝固時間どちらも同じ値を示すことが分かった．この結果は，従来鋳片の冷却速度 (部分凝固時間) を凝固組織から推定するのに dendrait 2 次アーム間隔 (SDAS) の測定が必要であったが，SDAS の測定が困難な場合でも，任意の観察面のフラクタル次元あるいは無次元周囲長を測定することにより，容易に冷却速度を推定することが出来ることを示している．この成果は国内外を通して初めて得られた結果である．



引っ張り試験

Al-5mass%Si 合金溶湯を金型，アルミナ，イソライト製の 3 種の異なる鋳型に鋳込み，異なるフラクタル次元と無次元周囲長の dendrait を有する引っ張り試験片を作成した．この引っ張り試験片を用いて引っ張り試験を行った．引っ張り試験時のクロスヘッドスピードは 10mm/min で，各鋳型に関し，それぞれ 3 回の試験片を作成して引っ張り試験を行った．図 4 にフラクタル次元と引っ張り強さの関係を示す．フラクタル次元の増加と共に引っ張り強さが増加している．無次元周囲長の場合も同様の結果が得られた．このことより，フラクタル次元，無次元周囲長はともに，鋳造材の機械的強度と関係づけることが出来るパラメータであることが分かった．



透過率の評価

固液共存体を、液相チャンネルを毛細管の束として表すことにより、デンドライト間隙の液相の透過率 K は次の式で表される¹⁾。

$$K = \frac{f_L^2 \lambda_2^2}{8\pi\tau^3} \quad (1)$$

ここで f_L は液相率、 λ_2 はデンドライト 2 次アーム間隔である。 τ は液相チャンネル(デンドライト間隙)の曲がり具合を規定するパラメータ(tortuosity factor, ねじれ度)である。この τ に今回実測した無次元周囲長を適用することにより、透過率を求めた。図 5 に一方向凝固した試料のチルからの距離に沿った各位置での実測の凝固組織から求めた透過率の値を示す。チルからの距離に沿って透過率の値は増加している。これはチルからの距離に沿って無次元周囲長が減少することおよびデンドライトアーム間隔が増加することによる。今回求めた透過率と、過去に実測されている透過率値とを比較すると、過去に実測された透過率値は今回の評価値の間に入り、今回求めた透過率値の妥当性を示した。このように凝固後の凝固組織から透過率を求める新方法を確立した。今後、今まで測定が困難だった透過率の迅速な測定に寄与することが期待される。

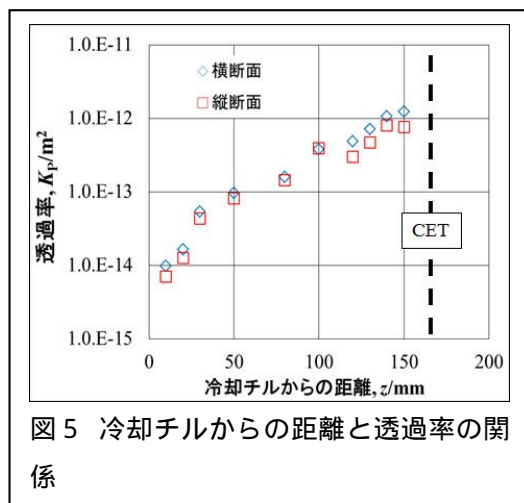


図 5 冷却チルからの距離と透過率の関係

引用文献

T.S.Piwonka and M.C. Flemings: Trans. Met. Soc., AIME,(1966), 1157-1165

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

K. Ohsasa, Y Natsume, T Sekiya and T Hatayama, Evaluation of dendrite morphology using fractal dimension and dimensionless perimeter in unidirectionally solidified Al-Si Alloys, 査読有, 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 84 012033

〔学会発表〕(計 8 件)

畑山 匠, 和川慎也, 棗 千修, 大笹憲二: Al 基合金の凝固組織形態の評価パラメータ, 日本鑄造工学会東北支部鑄造技術部会, 2016年02月15日, 秋田市.

畑山 匠, 棗 千修, 大笹憲二: 拡張した無次元周囲長を用いたデンドライト組織形態評価, 第 157 回日本金属学会秋期講演大会, 2015年09月17日, 福岡市.

K. Ohsasa: Evaluation of dendrite morphology using fractal dimension and dimensionless perimeter in unidirectionally solidified Al-Si Alloys, MCWASP2015, 2015年06月23日, 淡路島.

大笹憲二, 棗 千修, 畑山 匠, 下橋開: 合金の凝固組織形態の評価パラメータ, 日本鉄鋼協会マクロ偏析研究会, 2015年03月06日, 川崎市.

畑山 匠, 棗 千修, 大笹憲二: 合金の凝固組織形態の特性評価, 日本鉄鋼協会第 168 回秋季講演大会, 2014年09月25日, 名古屋市.

大笹憲二, 棗 千修, 関谷健史, 畑山匠: フラクタルによる合金の凝固組織形態の評価, 日本学術振興会製鋼第 19 委員会凝固プロセス研究会, 2014年05月21日, 大阪市.

関谷健史, 棗 千修, 大笹憲二: フラクタルを用いた凝固組織形態変化の評価, 日本金属学会東北支部講演大会, 2014年01月13日, 仙台市.

関谷健史, 棗 千修, 大笹憲二: フラクタルを用いた凝固組織形態変化の評価, 日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会, 2013年09月18日, 金沢市.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大笹 憲一 (OHSASA, Kenichi)

秋田大学・大学院工学資源学研究所・教授
研究者番号: 90111153