

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560146

研究課題名（和文）：半熔融成形加工された傾斜機能材料の摩耗特性

研究課題名（英文）：Wear Characteristic of Thixoformed Functionally Graded Material

研究代表者：熊澤 典良（KUMAZAWA NORIYOSHI）

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60284907

研究成果の概要（和文）：本研究で扱う材料は Al-Al₃Ni 傾斜機能材料であり，遠心鋳造法により作製された傾斜機能材料に対して半熔融状態下において成型加工が施される．半熔融加工を用いると，傾斜機能材料の成形以外にも傾斜分布する金属間化合物粒子が微細化され，耐摩耗性も向上することが実験により明らかになりつつある．本研究は，半熔融加工温度により変化する材料の耐摩耗特性を，摩耗試験システムから得られる AE データのウェーブレット解析の結果から検討した．

研究成果の概要（英文）：In this research, Al-Al₃Ni functionally graded materials (FGMs) were used. The FGMs manufactured by the centrifugal method were thixoformed at the temperature just above the eutectic melting point. The product under the suitable condition is found to have refined Al₃Ni grains, which change from coarse grains and are expected to improve the mechanical properties. We discuss the wear properties of the FGM by the result of the Wavelet analysis applied to the AE signals measured in our wear testing system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：複合材料・物性，ウェーブレット

1. 研究開始当初の背景

(1) 金属-金属間化合物系傾斜機能材料は、材料の組成・組合せを設計に応じて変化させるという新しい概念の材料である。とくに、遠心鑄造法により作製した傾斜機能材料においては、母材中に分布する金属間化合物は境界面をもたず、優れた機能の保持が期待されている。構造材料としての用途において、傾斜機能材料ゆえの硬くて脆い性質のため、従来の熱処理的な加工を適用することは困難である。適切な加工を施すには、母材である金属は液体、金属間化合物は固体といった状態下における半熔融成形加工が有効であり、その加工条件について検討が始められていた。

(2) 半熔融加工を用いると、傾斜機能材料の成形以外にも傾斜分布する金属間化合物粒子が微細化され、耐摩耗性も向上することが実験により明らかになりつつある。この半熔融状態下における成形加工には、加工温度を精密に制御することが必要であり、加工により変化する材料の機械的性質としての耐摩耗特性との関係を検討することが重要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、新しい材料として注目されている金属-金属間化合物系傾斜機能材料の特性や品質を制御し、より望ましい性質をもつ安定した材料を供給することを見据え、半熔融加工下における加工温度を適切に制御することを目的とする。しかし、傾斜機能材料そのものの性質のほとんどが未知であることから、従来知られている測定方法や解析方法の改良が必要であるし、半熔融加工後の材料特性も併せて検討する必要がある。

(2) 本研究に用いる金属-金属間化合物傾斜機能材料は、母材としてのアルミニウム (Al) および Al とニッケル (Ni) との金属間化合物 Al_3Ni の複合材料であり、その組成は遠心鑄造法により傾斜分布している。母材中に Al_3Ni が分布する Al- Al_3Ni 傾斜機能材料の組織の様相は、図 1(a) に示す通りであり、その体積分率は図 1(b) である。この Al- Al_3Ni 傾斜機能材料の要素・構成材料としての実用化を見据え、材料の組織の様相と材料の接触部に発生する摩擦・摩耗現象との関係を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 摩擦・摩耗形態を把握するために、図 2 に示すブロック・オン・リング摩耗試験機を作製した。FGM ブロック試験片はアーム中央に Al_3Ni 側がリング (SKD11) に接するように取り付けられ、アーム先端に固定された重錘

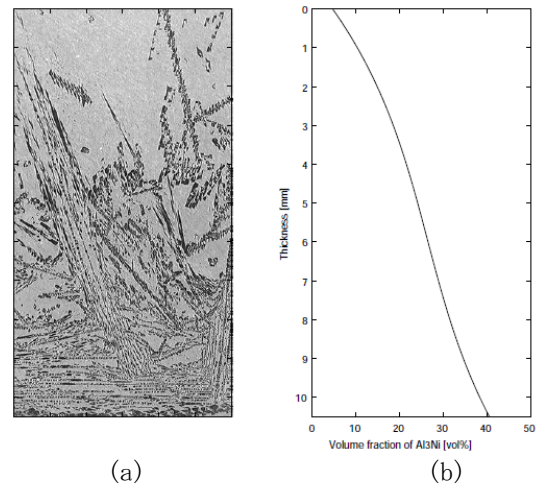


図 1. 傾斜機能材料の組織の様相

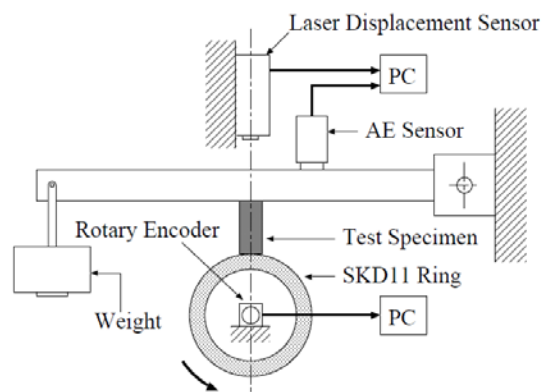


図 2. 摩耗試験機の概略図

により 59.5N の負荷が与えられる。リングの表面は、中心線平均あらさ (Ra) $0.08 \mu m$ 、最大高さ (Rmax) $0.94 \mu m$ に仕上げられており、FGM 試験片と接し摩耗・摩耗現象が生じる。しゅう動速度は、定常摩耗の状態において摩耗率が一定となるように、サーボモータを用いて $1.236m/s$ (回転速度 400rpm) に設定し、リングの回転数は回転軸に取り付けられたロータリ・エンコーダを用いて計測している。

(2) FGM 試験片の摩耗量は、摩耗面に対して鉛直軸上に取り付けられたレーザ変位計によって測定される軸変位とブロック試験片の断面積との積によって計算できる。

(3) 摩耗実験時に発生する AE 信号は、アームに取り付けられた AE センサにより検出され、A/D ボード (分解能 12bit, サンプルング周波数 1MHz) を用いてリング 100 回転毎に 1 サイクルの AE 信号を PC に保存した。

(4) 摩耗試験機を用いて計測された AE 信号に対して、つぎのウェーブレット解析を施す。

$$W(a, b) := \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $f(t)$ は解析対象の信号であり、 ϕ 、 a 、 b はそれぞれ、マザー・ウェーブレット、スケールパラメータ、シフトパラメータと呼ばれている。本研究では、我々が実際に扱う周波数[Hz]との明確な対応づけを考慮し、マザー・ウェーブレット ϕ をつぎの Gabor 関数:

$$\psi(t) := \sqrt{\pi f_b} e^{-\frac{t^2}{f_b}} e^{j2\pi f_c t} \quad (2)$$

として与える。Gabor 関数(2)は、窓付きフーリエ変換の窓に用いられており、 f_b はバンド幅、 f_c は中心周波数と呼ばれる。

(5) Al-Al₃NiFGM の摩耗現象を把握するために、計測された AE 信号に対してウェーブレット解析(1)を施し、それらの全てについて個別に検討するよりも、摩耗の進行に対する解析結果の傾向を巨視的に議論することが摩耗形態の変化や母材中に含まれる Al₃Ni 粒子の傾斜分布の把握には適当であると考えられる。(2)式のマザー・ウェーブレットを用いてウェーブレット解析を実施すると、得られる係数 $W(a, b)$ は複素数になる。 $W(a, b)$ の絶対値は、AE 信号のもつ周波数 a のエネルギーであり、エネルギーの最大値を用いて

$$W_m(a) := \max_{(i=1, 2, \dots, n)} |W(a, b_i)| \quad (3)$$

により、全ての AE 信号を検討する。ここで、 n は 1 サイクルとして保存された AE 信号のデータ数である。また、1 サイクルあたりの AE 波がもつ周波数 a のエネルギー全体を考える場合は、ウェーブレット係数のシフトパラメータ方向の平均をとり

$$W_a(a) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W(a, b_i)| \quad (4)$$

として、 $W(a, b)$ の平均値 $W_a(a)$ を用いて検討する。

4. 研究成果

(1) 式(3)から得られる係数 $W_m(a)$ を図3にコンターを用いて示す。縦軸は周波数であり、横軸は無次元化された摩擦距離 D である。図3における摩耗試験初期の係数 W_m について考える。0 ≤ D < 0.03 の範囲の摩耗距離において、 W_m は 30kHz で大きな値を示し、その後 43kHz 付近の周波数域に W_m のピークは移行している。AE のエネルギーが 30kHz から 43kHz に移行していく様子確かめるために、図4にその時の AE 信号とウェーブレット解析結果を示す。図4(a)~(c)は、 $D=0.027, 0.032, 0.037$

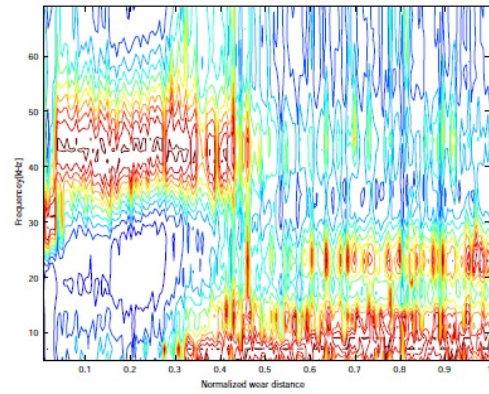
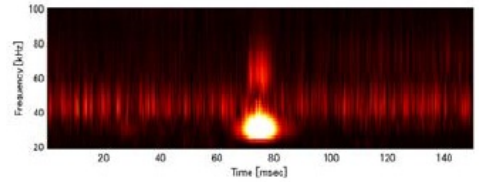
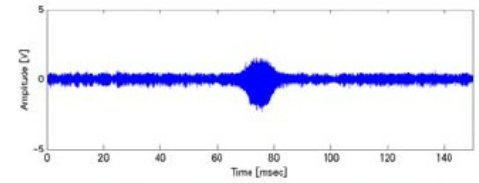
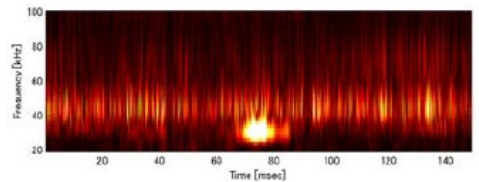
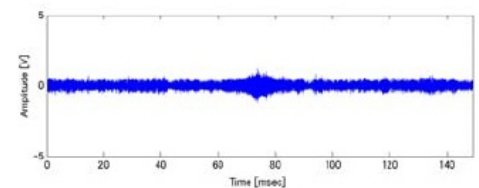


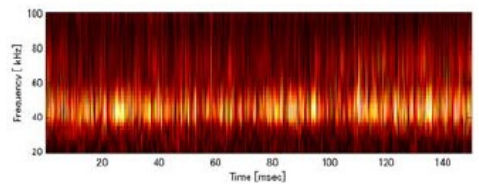
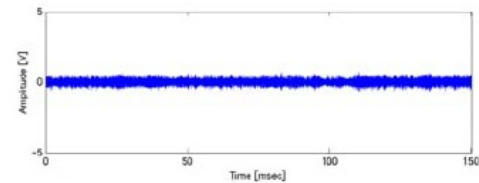
図3. 摩耗距離に対する $W_m(a)$ 値



(a) $D = 0.027$



(b) $D = 0.032$



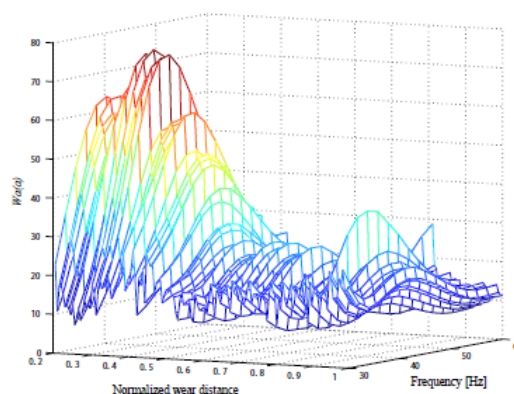
(c) $D = 0.037$

図4. AE 信号のウェーブレット解析結果

の AE 波形とそのウェーブレット解析結果であり、信号中に含まれる周波数成分のエネルギーの大小をそれぞれ淡色および濃色で表している。図 3 および図 4(a) から、摩耗試験初期の AE 信号には、30kHz の周波数帯において短時間に大きなエネルギーが集中している。図 4(b), (c) からわかるように、さらに摩耗距離を大きくすると AE 信号にはエネルギー集中は見られず全体に分散する形に移行し、そのエネルギーは 30kHz のみならず 43kHz をも含み、最後には 43kHz に強く表れるようになる。

(2) 同条件下において金属間化合物粒子を含まない Al 試験片を用いて実施した摩耗試験では、これらの周波数成分が AE 信号に含まず、母材中に含まれる Al₃Ni 粒子が影響を与えており、図 3 に示される 43kHz のエネルギーが FGM の Al₃Ni 粒子と深く関係があることがわかった。図 1 のように傾斜分布する Al₃Ni 粒子との関係をさらに明らかにするために、(4)式を用いて検討する。図 5 は、図 3 における 30~60kHz の範囲のエネルギーの最大値 Wm(a) をエネルギーの平均 Wa(a) に変え、その大きさを鉛直軸方向にとり、3-D 表示したものである。図 5 において、アブレシブ摩耗の後、43kHz のエネルギーは D=0.3 に至るまで増加し、その後なだらかに減少している。図 1(b) の傾斜分布と摩耗量から、摩耗距離 D に対する Al₃Ni 粒子の体積分率を計算し、横軸に摩耗距離、縦軸に体積分率をとると図 6 の結果を得た。AE 信号をウェーブレット解析し、(4)式によって得られる 43kHz の Wa(図 5) と図 6 の相関を計算すると、相関係数は 0.85 となり、極めて強い正の相関関係を得る。よって、摩耗試験時に発生する AE 波に含まれる 43kHz の周波数の信号は、Al マトリクスと Al₃Ni 粒子の結合力によるものであり、ウェーブレット変換による係数 Wa の大きさは母材中に分布する Al₃Ni 粒子の体積分率に対応して減少することがわかった。

(3) 本研究では、Al-Al₃NiFGM の摩耗試験を実施し、摩擦・摩耗時に発生する AE 信号を計測した。得られた AE に対してウェーブレット解析を施し、提案する 2 つの巨視的ウェーブレット解析法により、AE 信号と FGM の摩耗について検討した。さらに、ウェーブレット係数を平均化することによって、変化する摩耗形態を把握できる可能性を確認した。解析結果より、AE 信号に含まれる特定の周波数成分は、①Al₃Ni による凝着摩耗 ②Al による凝着摩耗 ③Al₃Ni によるアブレシブ摩耗 ④剥離に対応することがわかった。係数 Wa を用いることによって、AE 信号の微視的な解析値を集め、それらを変化する摩耗形態と巨視



的に比較することができた。

図 5. Wa(a) の計算結果 (30~60kHz)

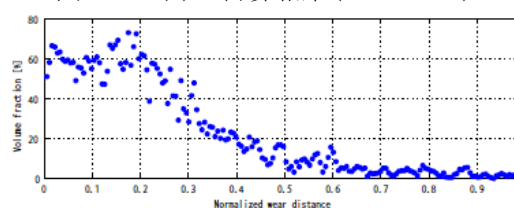


図 6. 摩耗距離に対する Al₃Ni の体積分率

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 1 件)

- ① Noriyoshi Kumazawa, Yasuyoshi Fukui and Daisaku Nara, Novel Concept to Detect an Optimum Thixoforming Condition of Al-Al₃Ni Functionally Graded Material by Wavelet Analysis for Online Operation, Materials, 査読有, Volume 4, Issue 12, 2011, pp. 2183-2196, DOI:10.3390/ma4122183

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊澤 典良 (KUMAZAWA NORIYOSHI)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60284907