

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 6月18日現在

機関番号：57103

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560817

研究課題名（和文）粒子衝突音の周波数特性を用いた高効率風力選別システム

研究課題名（英文）High efficient air classifier system using frequency characteristic of collision noise

研究代表者

太屋岡 篤憲（TAYAOKA ATSUNORI）

北九州工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授

研究者番号：60236768

研究成果の概要（和文）：廃被覆電線はCuとPVCの粒子に粉碎され、風力により選別されている。本研究では、アコースティック・エミッション（AE）センサを風力選別機に設置し、両粉碎粒子の衝撃音を測定し、両粒子を識別することを試みた。本研究では、AEセンサより得られたCuとPVCのパワースペクトルを用いて、未知の粒子を識別した。更に、歩留まりの制御に先立ち、比例積分制御及び一般化最小分散制御を用いて風力制御を行い、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）： In recycling plant of the covered cable, the cable was crushed into two materials, Cu and PVC. The wind-force has been used to separate two particles according to the difference of specific gravity. If Acoustic emission (AE) sensor is installed in the air classifier, it is possible to monitor the collision noise of the particles. This study purpose is to measure an impact sound of the particles, and to construct the system to identify Cu or PVC. In this study, the criterion power spectra were employed to discriminate unknown particles. Furthermore, we had controlled the airflow rate before controlling the yield. It presents a comparison of the performances of the generalized minimum variance control with that of conventional proportional and integral control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：廃棄物再資源化、衝突音、Acoustic Emission センサ、周波数解析、風力選別、制御工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 被覆電線を粉碎した被選別原料には、製品となる銅と不純物の塩ビの粉碎物が混在しており、実際の選別プロセスでは、両者の比重の違いを利用した風力選別機が用いられている。風力選別機のイメージは、円筒のパイプ上部に、ブロアと呼ばれる空気を吸い

込む装置を置き、被選別原料をパイプ内に連続的に供給し、空気流量を調整しながら、比重の大きい銅粉碎物を下部に、比重の小さい塩ビ粉碎物を上部に回収するものである。

(2) 現在の風力選別プロセスでは、選別室内の銅と塩ビの混合比をオンラインでモニタ

リングする手法がないため、オペレータが回収箱の状況を観察し、勘や経験に基づき、マニュアルで一日に数回空気流速を調整している。しかし、選別室内に供給される選別原料の混合比は収集された被選別原料により変動し、銅の回収率も高々80%程度に留まり、残りは、廃棄費用を支払い、塩ビと共に処分されている。このような状況の中、現場では、選別状況をオンラインモニタリングし、銅の回収率を制御するフィードバック制御系の開発が強く望まれている。

(3) 平島ら(北海道大学)は、ナイロン、SUJ、ガラス球をモデル粒子として、それら1個の粒子をAcoustic Emission センサ(以下、AEと略す)が取り付けられた金属円板に落下させた際の衝突音から粒子を識別する関係式を導き出している。さらに、平島らは、PET粉砕試料(PET ボトル本体と印刷ラベルの粉砕混合物)を選別室内に連続的に供給した際の衝突音についても検討し、PET粉砕試料の場合、粒子1個の単発的な衝突波形と異なり、多数の粒子の内壁への衝突が同時に起こり、衝突音が連続的なノイズ波形になるが、この連続ノイズ波形の平均値を衝突エネルギーとして計測することにより、PET粉砕物の産物量のオンラインモニタリングが可能であることを示している。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、家電リサイクル工場において、被覆電線を粉砕した銅と被覆塩ビの粉砕混合物から、風力選別機を用いて、銅を回収する際の回収率を、従来の高々80%程度から95%と大幅に向上させる“高効率風力選別機”のモデル実験装置を試作することを目的とした。

(2) 本研究では、風力選別において、両粉砕物粒子が選別室内壁に、同時に衝突する際に生じるノイズ的な衝突音を、AEセンサを用いて測定し、衝突音の周波数成分の時間変化を解析し、両粒子の混合比をオンラインモニタリングした。さらに、この混合比をもとに、銅の回収率を制御するフィードバック制御系を構成し、次世代の高効率風力選別システム研究の基礎を築くことを試みた。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、主に、プログラム作成を太屋岡、実験装置の作製を吉野が担当する形で研究を進めた。

(2) 二種類の疑似試料を用いて、基本的な粒子の周波数成分の時間推移特性を検討した。次に、リサイクル工場より採取した銅及び塩ビの粉砕混合物の衝突音の周波数特性をも

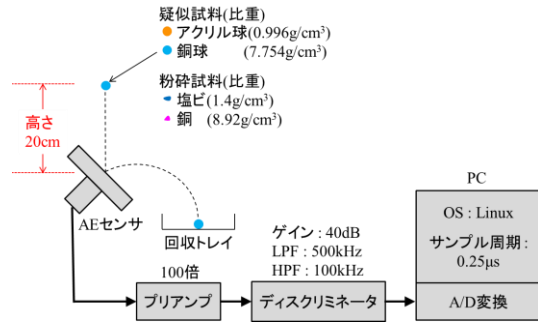


図1 衝突音測定装置の概要

とに、既存のアナログフィルタを併用することで、衝突音から両粒子の混合比を算出する手法を検討した。

図1に、本研究で用いた粒子衝突音測定装置の概要を示す。

(3) 操作量である風力から制御量である銅回収率までの伝達関数をシステム同定により決定し、その伝達関数をもとにフィードバック制御系を設計し、本制御系の有効性を検討した。

4. 研究成果

(1) アクリル及び銅製の直径6mmの二種類の疑似試料(比重 0.996g/cm^3 、 7.754g/cm^3)を、AEセンサが取り付けられたセンサヘッドである直径100mmの真鍮製円板に落下させた際の衝突音を、サンプル周期 $0.25\mu\text{s}$ のA/D変換ボードを用いて測定した。

その際、真鍮製円板の厚さを5mm~25mmと変化させ、また、真鍮製円板の中心鉛直上の試料落下位置を0mm~30mmと変化させ、衝突音波形への影響を調べた。

その結果、落下高さは測定波形の振幅に影響することがわかった。また、同一条件で試料を落下させた場合、衝突音の測定波形は、同一であることがわかった。図2に、アクリル樹脂球を高さ20cmからセンサヘッドの中心に落下させた際のAE波形を示す。

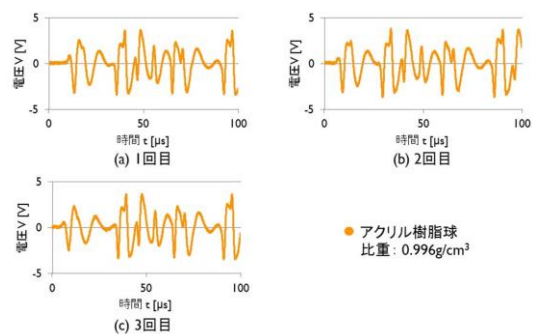


図2 同一条件で落下させた場合のAE波形

(2) 窓付き離散フーリエ変換(discrete Fourier transformation, 以下 DFT と略す)を用いて、発生した衝突音の周波数解析を行った。

図 3 に、リサイクル工場より採取した粉碎された銅と塩ビ粒子、それぞれ 10 個の DFT の結果を平均して求めた周波数特性を示す。図 3 より、衝突音の各周波数成分の強さを示す両粒子のパワースペクトルには重なる成分があるものの、塩ビ粒子は比較的低い周波数成分、銅粒子は高い周波数成分を有することがわかった。

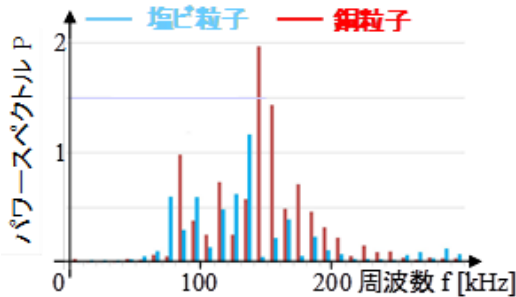


図 3 両粒子のパワースペクトル

(3) 両粒子のパワースペクトルの違いを明確にし、未知の衝突粒子が銅/塩ビのどちらの粒子かを判定するために、図 4 に示すように、各パワースペクトルの最大値を 1 とする正規化及びある閾値以下を 0 とする処理を行い、各々の粒子固有の基準スペクトルを作成した。

さらに、図 5 に示すように、各々 10 個の未知の銅/塩ビ粒子と各々の基準スペクトルを比較し、適応度(M)を算出して判定した結果、銅粒子、塩ビ粒子共に 10 個が正しく判定された。表 1 に、各粒子の適応度と判定結果を示す。表 1 より、粉碎粒子においても粒子判別が可能であることが分かった。



図 4 正規化と閾値処理

(4) 実際の風力選別機において、粒子は、センサヘッドの中心に落下するとは限らない。そこで、本研究では、センサヘッドの中心以外に落下した場合についても、未知試料の識別が可能であるかを検討した。

そこで、図 6 に示すような天板をセンサヘッドから高さ 20cm の位置に用意し、中心か

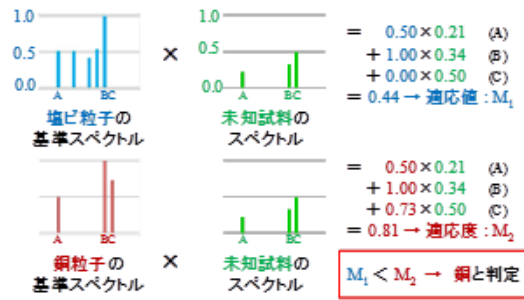


図 5 適応度を用いた両粒子の判定

表 1 各粒子の適応度と判定結果

実際の粒子	No.	適合値		判別結果
		塩化ビニル	銅	
塩化ビニル	1	1.990	1.540	塩化ビニル
	2	3.700	3.523	塩化ビニル
	3	3.282	2.764	塩化ビニル
	4	2.568	0.317	塩化ビニル
	5	2.444	1.679	塩化ビニル
	6	2.889	1.759	塩化ビニル
	7	2.615	1.529	塩化ビニル
	8	2.288	2.063	塩化ビニル
	9	3.159	2.635	塩化ビニル
	10	2.078	0.385	塩化ビニル
銅	11	0.356	3.091	銅
	12	1.893	5.356	銅
	13	1.818	5.700	銅
	14	1.691	4.325	銅
	15	3.578	4.045	銅
	16	0.915	4.227	銅
	17	1.618	5.755	銅
	18	3.155	5.234	銅
	19	1.943	4.454	銅
	20	2.791	5.720	銅

ら左右 10mm~20mm 離れた以外に粒子が落下させた場合の AE 波形を測定した。

表 2 に、中心から 20mm 離れた位置に落下させた場合の両粉碎粒子の判別結果を示す。表 2 より、塩化ビニルに誤判定が一つあるものの、落下位置の粉碎流の判別が可能であることがわかった。

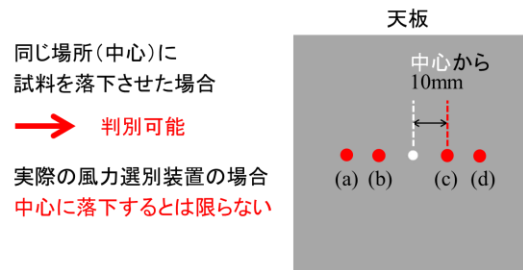


図 6 落下位置の AE 波形への影響の検討

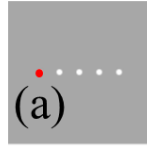
(5) AE センサを用いた歩留まりや産物品位の制御に先立ち、流量センサを用いてブローが発生する風の流量制御を行った。

まず、拡張最小二乗法を用いて、ブロー内のファンの設定周波数から流量センサの出力電圧までの伝達特性及び制御系に加わる雑音の数式モデルを推定するシステム同定を行った。

図7に、システム同定の結果を示す。

表2 中心から離れた位置での判定結果

天板



実際の粒子	No.	適合値		判別結果
		塩化ビニル	銅	
塩化ビニル	1	3.491	1.788	塩化ビニル
	2	2.940	2.275	塩化ビニル
	3	2.691	0.145	塩化ビニル
	4	2.792	0.154	塩化ビニル
	5	5.214	3.089	塩化ビニル
	6	4.964	3.081	塩化ビニル
	7	2.665	3.468	銅
	8	3.916	2.354	塩化ビニル
	9	2.774	0.343	塩化ビニル
	10	4.474	1.952	塩化ビニル
銅	11	0.392	2.747	銅
	12	0.434	3.987	銅
	13	0.093	2.558	銅
	14	0.643	3.990	銅
	15	1.104	4.129	銅
	16	1.252	6.603	銅
	17	2.259	5.788	銅
	18	3.226	7.882	銅
	19	0.074	2.674	銅
	20	0.842	4.473	銅

図7の上段は、同定入力であるACサーボアンプへの設定周波数を1500, 2500rpmの2値で繰り返したM系列信号、下段の破線は同定出力である流量センサの出力電圧の実測値を示す。図7の下段は、システム同定により得られた数式モデルに、実験で用いたものと同じM系列信号を入力し、計算機上で算出した出力を実線で示す。図より、両出力値はほぼ一致し、拡大最小二乗法により、大まか

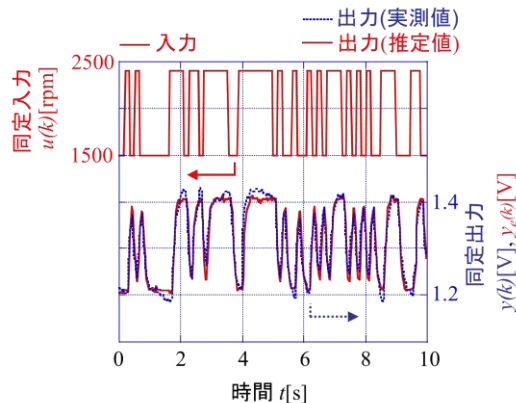


図7 制御対象の数式モデルの同定

ではあるが、雑音を含めた制御対象の数式モデルを同定できることがわかった。

(6) 推定された数式モデルをもとに、従来、プロセス制御で用いられてきた比例積分制御と雑音を考慮した制御系を構成できる一般化最小分散制御について検討を行った。

図8に、比例積分(Proportional and Integral)制御及び一般化最小分散 (Generalized Minimum Variance)制御を用いた場合のステップ応答の実験結果を示す。図の上段にPI制御の制御量、下段にGMV制御の制御量を実線で示す。この実験では、図中の破線の目標値は、実験開始後7分で1.2[V]から1.4[V]に、14分で1.4[V]から1.2[V]にステップ状に変化させた。図8より、両制御の制御量は、ともに目標値の辺りで振動しているが、GMV制御がPI制御より分散が小さく、また、GMV制御がPI制御よりも立ち上がり時間が短いことがわかった。

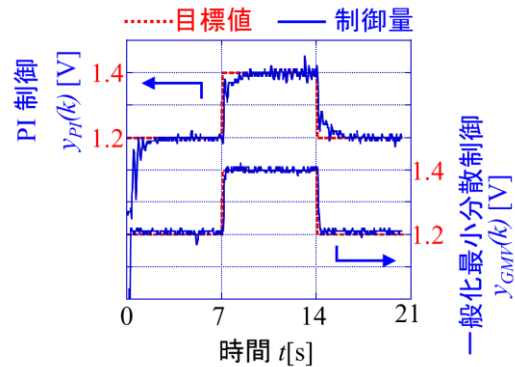


図8 PI制御と一般化最小分散制御のステップ応答

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3件)

(1) Atsunori Tayaoka, Kuwata Masayuki, Hirajima Tsuyoshi and Sasaki Keiko, Improvement of Control System of Air Classification Using AE Sensor, Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2011, Refereed

(2) Atsunori Tayaoka, Kuwata Masayuki, Hirajima Tsuyoshi and Sasaki Keiko, Improvement of Control System of Air Classification Using AE Sensor, The 11th International Symposium on East Asia Resources Recycling Technology, 2011, pp.776-779, Refereed

(3) Atsunori Tayaoka, Kuwata Masayuki, Hirajima Tsuyoshi and Sasaki Keiko, Identification of Air Classifier Using AE Sensor, Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2010, pp.189-192, Refereed

〔学会発表〕(計2件)

(1) 太屋岡篤憲、桑田真之、平島剛、佐々木圭子、“流量センサを用いた風力選別機の同定と制御”、平成24年度資源・素材学会春季大会、平成24年3月26日、東京大学

(2) 太屋岡篤憲、桑田真之、平島剛、佐々木圭子、“AEを用いた風力選別機の同定と制御”、資源・素材学会秋季大会、平成22年9月15日、九州大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

太屋岡 篤憲 (TAYAOKA ATSUNORI)
北九州工業高等専門学校・電子制御工学科・准教授
研究者番号：60236768

(2)研究分担者

吉野 慶一 (YOSHINO KEIICHI)
北九州工業高等専門学校・電子制御工学科・教授
研究者番号：40249876