

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560720

研究課題名（和文） 音響特性を利用した切断品質診断システムの開発

研究課題名（英文） Study on cut quality diagnosis system using acoustic characteristics

研究代表者

楠元 一臣（KUSUMOTO KAZUOMI）

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80221927

研究成果の概要：

プラズマアーク切断中に発生する切断音は、熔融金属排出状態およびドロス付着状態と密接に関係する。特に、ドロスフリー切断時に発生する切断音は、熔融金属の排出面積、傾き角および開き角の時系列変化と同様に規則的に変化することが分かった。

また、LabVIEW を用いて製作した切断品質診断システムは、ドロス付着状態を判別することが可能であり、今後のプラズマアーク切断品質診断システムの開発に向けた基礎資料を得ることができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：溶接工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：プラズマアーク切断、切断音、ドロス、熔融金属排出、切断品質、診断

1. 研究開始当初の背景

プラズマアーク切断は、高温・高速プラズマ気流を熱源するものであり、ガス切断やレーザ切断と同様に金属材料の切断には欠かすことのできない切断法の一つである。造船・橋梁などの比較的厚い鋼板から板金等の薄板まで広く使用されている。また、プラズマアーク切断は鉄鋼をはじめ、ステンレス鋼やアルミニウム合金などのガス切断では困難な材種の高速切断が可能である。

国内の切断現場での問題を調査した資料によると、切断品質（ドロス付着、粗さ、ベベル

角など）の改善が求められている。そのなかでも「ドロスの付着」は最も改善が指摘されている項目である。

さらに、長尺切断の場合には、切断機本体はNCやロボット機器の導入によって自動化や無人化が進んでいる。しかし、切断後の切断部材の検査は作業員による目視によって進められているのが現状である。このように作業員による検査作業は大変であり、非合理的である。しかしながら、有効な切断品質の自動検出手法はみられず、人手による目視検査に取って代わるインプロセスで検出および診断

できる技術が求められている。

プラズマアーク切断では大きな騒音をともない、厚板材では更に大きな騒音となる。そのため、環境問題や労働問題の観点からの改善が求められており、今後の対応が待たれている。今日の加工貿易を主たるとする我が国においては、生産性や経済性の向上は重要な課題でもある。

このような背景のもとに、当研究室ではプラズマアーク切断の切断品質、切断現象、制御技術に関する一連の研究をベースに、切断品質診断技術に関する研究を行っている。

2. 研究の目的

本研究は、切断中に発生する切断音をただ単に騒音と捉えるのではなく、切断音に含まれている信号を分析・解析して、切断品質（ドロス付着状態を中心）との関連を精度よく対応させて、切断中の切断品質状態をインプロセス（切断作業中）で検出できる自動切断品質診断システムの開発を行うものである。

研究期間は2年間であり、初年度は切断中に発生する音の音響特性と切断現象との関連性について検討する。高速ビデオカメラを用いて被切断材裏面から排出される溶融金属の様子を観察し、切断音の解析結果と合わせて検討する。切断条件、切断品質（ドロス付着）、切断音特性および溶融金属排出状態との関連性を明らかにする。

2年度は前半部で得られた切断音の解析を継続して行うと同時に、良好な切断（ドロスフリー）時に発する切断音の特徴的な周波数域に着目したバンドパスフィルターを設計・試作して、切断音による切断品質診断システムの開発を行う。

3. 研究の方法

本研究は、第1に切断実験装置および音響計測実験装置を見直して実験系の計測精度を向上させた後、切断音響特性と溶融金属排出状態との関連性を明らかにする。第2に切断音を用いた切断品質（特にドロス付着の有無）をインプロセスで診断できるシステムを構築する。

研究期間は2年間である。研究体制は本研究代表者（楠元一臣）および学生4名で実施した。

(1) 溶融金属排出状態の撮影および切断音の収録

使用した実験装置は、インバータプラズマアーク切断装置、試験片移動部、音響測定部および画像撮影部から構成している。画像撮影および集音精度を高めるためにトーチを固定して被切断材側を移動させて、切断速度、切断電流およびトーチ高さを変化させて実験を行った。被切断材は板厚6mm、外寸120x40mm

の軟鋼板（SS400）である。切断ガスは酸素である。

被切断材の側面と正面に設置した2台の高速デジタルビデオカメラによって、フレームレート400 (fps)、シャッター速度10000 (1/s) でフィルターを介して被切断材裏面から排出される溶融金属の様子を撮影した。

切断音は無指向性マイクロホン（0.1~100kHz）を用いて集音し、画像データと同期させてパーソナルコンピュータに記録した。集音位置は、トーチの中心から水平方向に700mm、床面から高さ900mmの位置とした。サンプリングレートは200kHzである。

その後、1秒間の切断音と排出画像データを抽出し、信号解析ソフトMATLABおよび画像解析ソフト、2次元動画計測ソフトを用いて解析した。

(2) 切断音・溶融金属排出画像の解析

切断条件（切断速度、切断電流、トーチ高さ）を変化させて切断したときの音響信号を周波数解析（FFT）ソフトで解析した。特徴的な周波数ピークを探しだし、ドロス付着状態（Type I）、ドロスがまったく付かないドロスフリー（Type II）、分離不可能の場合（Type III）の3タイプとの関連性を検討した。

ドロスの付着は溶融金属の排出状態と密接に関係するので、溶融金属の排出状態を開き角、傾き角および溶融金属排出状態を画像解析ソフトで計測した。得られた溶融金属排出画像と切断音の音響信号を比較して検討した。

(3) 切断音の特徴抽出

切断音の周波数解析結果および溶融金属排出状態の高速ビデオ画像信号解析結果を基に、両者間の相関性について検討した。

ウェーブレット変換を使用して切断音信号の特徴を抽出した。ここでは、信号の周波数解析および時間変化特性の抽出が容易な離散ウェーブレット変換の拡張であるウェーブレットパッケージを使用した。本研究ではDaubechiesのdb8変換を用いて発生する音響信号のデータを3レベルに変換し、プラズマアーク切断音の時間周波数解析を行った。

(4) 切断音による切断品質診断システムの検討

切断中に発生する音は、ノズルから噴出するプラズマや作動ガスの流体音、切断溝開拓時に発生する切断加工音および被切断材裏面から排出される溶融金属、プラズマ流および作動ガス音が複雑に絡み合っている。本研究では高周波領域に現れるノズルからの噴出流体音は除外して、周波数の低い領域（100Hz以下程度）に存在する切断溝開拓過程および溶融金属排出の変動周期に支配されると思われる特徴周波数に着目して、20Hz付近の低周波

領域を中心にバンドパスフィルターを作成した。バンドパスフィルターは、LabVIEWおよびMatLab信号処理ソフトを用いて試作した。

使用した汎用プログラミングシステムLabVIEWは、モジュール化されたプログラミングの概念が導入されているため、複雑なプログラムであっても単純なモジュールに分割して仮想計測器を作成して組み合わせることによって実現できるので、音響信号による切断品質診断システムを構築する上で便利である。本研究に採用したLabVIEWは、データ計測、処理、表示、ファイル出力から構成する。まず、ドロス付着状態と関連する切断音響信号の特徴周波数の関係から、切断音信号のなかから特徴的な有益な信号を取り出すためのデジタルフィルターを作成した。その後、LabVIEWのフロントパネルを作成して試験を行い、本システムの有能性を検証した。

4. 研究成果

プラズマーク切断中に発生する切断音に含まれている信号を分析・解析して、切断品質状態をインプロセスで検出できる自動切断品質診断システムを構築するための研究を行った。

以下、溶融金属の排出状態の観察結果、切断音の解析結果および試作した切断品質診断システムの有効性について述べる。

(1) 溶融金属排出挙動の観察

切断中に発生する切断音は、切断中に排出される溶融金属の挙動と密接に関係した。2台の高速度ビデオカメラによる撮影結果から、被切断材裏面から排出される溶融金属の排出面積、開き角および傾き角は、時間の経過に伴って変化した。

ドロスが付着する低速切断速度の場合、溶融金属は広範囲に飛散し被切断材裏面に多くのドロスが付着する。ドロスフリーが実現できる速度域の場合、溶融金属は細く絞られた状態で排出される。さらに、高速切断速度の場合、溶融金属はさらに細くなり切断方向に対して後方に流れいく。

溶融金属の排出面積、傾き角および開き角の時系列な変化の様子から、低速切断時には不規則に変化するのに対して、ドロスフリー切断には周期的に変動することが分かった。

(2) 切断音および溶融金属排出の解析

プラズマーク切断中に発生する騒音をただ単に騒音と捉えるのではなく、この騒音に含まれる信号と溶融金属排出状態との関係を高速ビデオ画像から解析した。

プラズマーク切断装置を用いて切断条件を変化させて被切断材(軟鋼板SS400)を切断し、無指向性マイクロホンを用いて切断音を

集音すると同時にデジタルビデオカメラ2台を用いて溶融金属排出状態を記録し、信号解析ソフトおよび画像解析ソフトにより溶融金属排出状態を解析した。

切断速度変化による切断音と溶融金属排出挙動の変化をみると、切断速度90cm/minの場合、音圧、溶融金属排出の面積、傾き角および開き角は不規則に変動しており、それぞれのピークには対応性がなく、溶融金属の排出面積は断続的な挙動を呈した。一方、ドロスフリーが実現できた切断速度150cm/minの場合、時間の経過に伴って微小な変動があるものの安定した排出が進行し音圧レベルが最大となった。

FFT解析結果によると、ドロスフリーが実現できた150と180cm/minの場合、切断音と溶融金属排出面積の両方において20Hz付近に特徴的なピークが出現することが得られた。

このことより、切断音の特性は溶融金属排出挙動およびドロス付着状態と密接に関係することから、今後の切断品質診断システムの構築に向けた基礎資料を得ることができた。

(3) ウェーブレット変換による切断音の解析

切断音の高周波範囲での特徴を抽出するために、ウェーブレット変換を利用して検討した。サンプリング周波数20kHzに設定して、解析周波数範囲1~10kHzとしたとき、ブルグ法により推定した切断音のパワースペクトル密度は、特定の周波数域にピークを持つことが分かった。また、この特定周波数範囲の音響信号エネルギーを計算し、切断速度との関係をみると、ドロスフリーが実現できる速度範囲で最も大きくなることが分かった。

切断中に発せられる切断音の音響信号エネルギーから、ドロス付着状態を判別することが可能であることが分かった。

(4) 切断品質診断システムの構築

音響信号による切断品質診断システムの構築には、汎用プログラミングシステムLabVIEWを使用した。プログラミングの作成にはグラフィカルデータフロープログラミング言語Gを使用した。

フロントパネルにFFT解析による波形、数値フィールドや音響信号グラフなどの表示を作成した。

ここでは、ドロス付着状態と特徴周波数の関係から、ドロスがまったく付かないドロスフリー時に現れる特徴周波数域(16-24Hz)で分離可能なデジタルフィルターを作成した。

本システムの有効性を検証するために、切断音信号を入力して切断品質の診断を試みた。その結果、ドロスフリー状態とドロス付着状態とを効率よく判別することができた。

しかし、抽出した特徴周波数域は低周波域の信号であることから、外乱からのノイズ等の影響を受けるため、信頼性の点で改良が求められる。

以上、本研究で構築したプラズマアーク切断の切断品質診断システムは、切断中のドロスフリー/付着状態の診断に有効的であることが得られた。

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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① K. Kusumoto, T. Ishikawa and W. Xue, Cutting Sound and Molten Metal Movement during Plasma Arc Cutting, International Welding Symposium, 2008.2.13 New Delhi, India.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

楠元 一臣 (KUSUMTO KAZUOMI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：80221927

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし