

画像解析を用いた火花検査による 鋼種識別システムの開発

Development of a Steel Identification System by Spark Image Analysis Method

吉岡 孝宜*¹ 大場 康英*² 小林 宏*³

Takanori YOSHIOKA, Yasuhide OHBA, Hiroshi KOBAYASHI

Synopsis: Spark test is widely used in steel manufacturing plants to verify the steel grade. It requires high proficiency to distinguish the steel grades by the spark features. Therefore, the accuracy of the test results can be affected by the test operators. In order to eliminate the dependence on their skill, a computer-based identification system has been developed in this study.

It is known that burst of spark becomes more frequent with an increase in carbon content of steel. In this study, “burst density” which is the ratio of the number of burst to the amount of spark is used for representing the burst frequency. The relationship between burst density and carbon content is linear in a laboratory setting. This trend is also demonstrated in an actual inspection site. In addition, both silicon content and humidity influence the burst density. It was concluded that the developed image analysis system is applicable to steel grade identification in actual manufacturing plants.

Key words: spark test; steel identification; image analysis; carbon content; burst density

1. 緒言

火花試験は回転する砥石（研削機）と鋼材とを接触させ、研削中に飛散する火花を観察してその特徴（形状や色など）から鋼材に含まれる成分および含有量を識別する試験である。火花の形態や色から鋼材の種類を識別する方法はJISに規格化されている¹⁾ものの、火花の特徴を精度よく視認し識別するには検査員の高度な熟練技能が必要となる。加えて、火花試験は官能検査であることから、検査結果を記録することができない。これらの理由から、火花試験の機械による自動化が望まれていた。そこで本研究では、コンピュータを用いたデータ解析に基づいて識別する火花試験の機器試験化を目標とした。その手段として画像解析技術に着目し、鋼材の含有成分によって変化する火花を撮影してその特徴を画像解析によって捉え、鋼材に含まれるC%および合金元素含有量を識別する技術の開発を進めている²⁻¹²⁾。本報では、鋼材のC%識別技術および当技術の製造現場適用性の検証結果について報告する。

2. 実験方法

実験装置とテスト機構の概要図をFig.1, Fig.2に示す。実験にはφ35mmの鋼材を用い、鋼材端面に対して砥石を押し当て、発生する火花を高速度カメラにより撮像した。その後、得られた画像に対してFig.3に示す手順にて処理を行うことで火花の量および破裂を抽出した^{2-5, 8)}。火花画像の処理・解析において用いた特徴的な手法を以降に説明する。

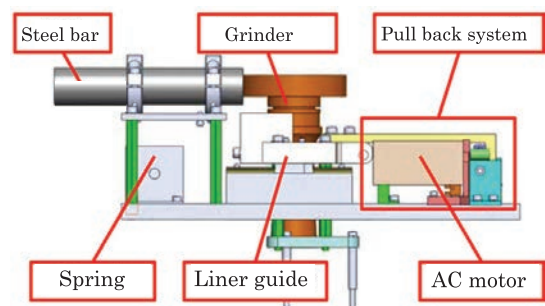


Fig.1 Schematic illustration of experimental apparatus.

*1 研究・開発センター 基盤研究室 プロセス研究グループ Ph.D.

*2 研究・開発センター 基盤研究室 プロセス研究グループ長 博士（工学）

*3 東京理科大学 工学部 機械工学科 教授

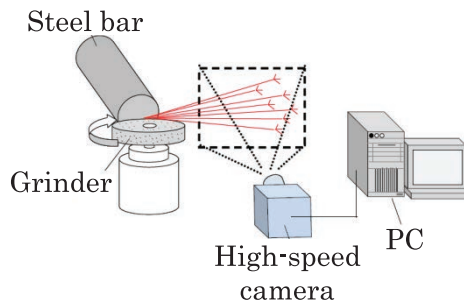


Fig.2 Schematic illustration of experimental device.



Fig.3 Procedure of image analysis (A: Photographing, B: Gray-scaling, C: Binarization, D: Short-line segment matching, E: Detection of burst point).^{2-5,8)}

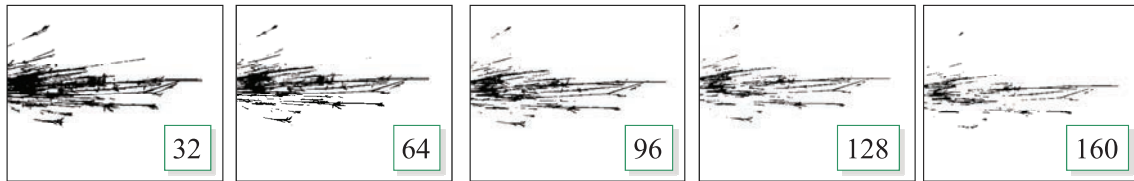


Fig.4 Effect of threshold value of brightness for a binarization of spark image.

(1) 画像処理:十字二値化^{2-5, 8)}

撮影した画像は、火花が密集している部分は明るく、その一方で火花が点在している部分は暗く写ってしまうため、ある決まった輝度閾値をもって画像の二値化を実施すると火花画像を精度良く抽出できない (Fig.4)。このような場所による輝度影響を避けるため、二値化処理領域が十字形状をした「十字二値化」という方法を採用した (Fig.5)。この方法は、十字の領域内で中心画素以外 (Fig.5, 緑枠) の平均輝度値から中心画素 (Fig.5, 赤枠) の輝度値を差し引き、その値がある閾値よりも大きいときに十字の中心画素を黒と処理する手法である。これにより、輝度の参照値がピクセルごとに設定されるため火花集中度に起因した輝度影響を受けることなく二値化が可能となり、正確に火花画像を抽出できた (Fig.6)。

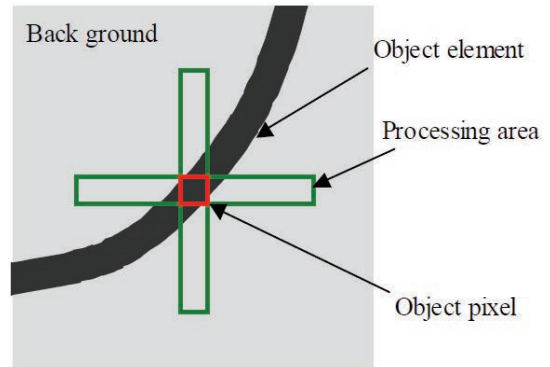


Fig.5 Binarization method with cross-shaped processing area.^{2-5,8)}

(2) 画像処理:短直線マッチング^{2-5, 8, 9)}

太さ 1pixel で所定の長さLを持つ短直線画像を37パターン用い、それを火花画像に当てはめることで火花形状の抽出を行った (Fig.7)。マッチする短直線の候補が複数個ある場合は、それ

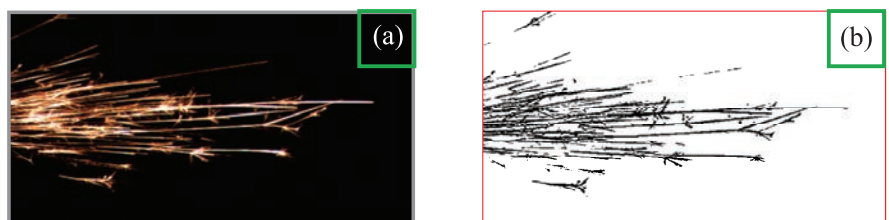


Fig.6 Binarization of a spark image with the cross-binarization method. (a: original image, b: after binarization)

らを仮想的に火花に沿うように延長し、最も長く続いたものを選ぶことで火花形状抽出の精度を高めた⁹⁾。この短直線マッチングにより、火花の総量をはじめ流線の角度や長さ等を定量的に表すことができた。また、マッチングされたテンプレートが任意の火花画像の範囲において所定の数以上であるところを火花の破裂部として抽出した^{8, 9)}。

(3) 画像解析:火花特徴の定量的抽出^{2-5, 8)}

鋼材C%の識別のためには火花の中に見られる「破裂」が有用な情報となり、定性的には鋼材中のC%が多いほど火花の破裂部が多く認められる¹³⁾。そこで、本研究では発生する火花の量に対する破裂の数を表す値として「破裂密度 (=検出した破裂数/マッチングした短直線数)」を定義し、C%識別指標として使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験室環境下での破裂密度とC%の関係

破裂密度を指標とした鋼材C%識別の可能性を検討すべく、まず実験室環境下にて種々の鋼種を対象とした火花画像の解析を行い、破裂密度と鋼材C%の関係を調査した⁵⁾。

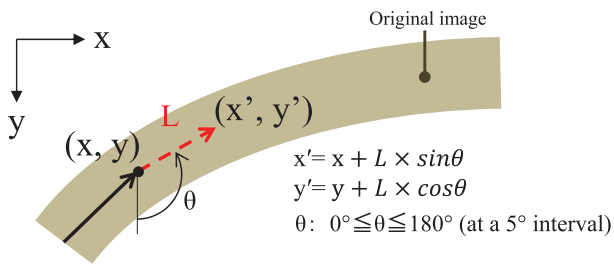


Fig.7 Short-line segment matching.^{2-5, 8, 9)}

実験結果をFig.8に示す。これより、0~0.6C%の範囲においてC%の増加とともに破裂密度が直線増加する傾向が認められ、破裂密度が鋼材C%の識別に対して有用であることが確認できた。また、破裂密度は鋼材のSi%や実験時の湿度によって影響を受け、Si%が高いほど、また湿度が高いほど破裂密度が低くなる傾向が見出された (Fig. 9, 10)¹⁴⁾。

砥石と鋼材が接触したとき、火花発生過程は以下の7つに分けられると報告¹⁴⁾されている (Fig.11)。

- ① 砥石が鋼材に接触し、鋼材が細かく削り取られる。
- ② 砥石が接触し続けることで、摩擦熱により切削粉の温度が上昇する。
- ③ 削り取られた直後の切削粉表面は活性 (酸化皮膜が無い状態) であり、空気中を飛散するときに燃焼する。
- ④ 切削粉のうち②と③とで得られる熱量の合計が溶融に必要な熱量を超えたものが溶融する。
- ⑤ 溶融した切削粉は表面張力により球状化し、さらに表面が酸化膜で覆われる。
- ⑥ 溶融した切削粉は依然高温であり、鋼中のCが酸化していく。

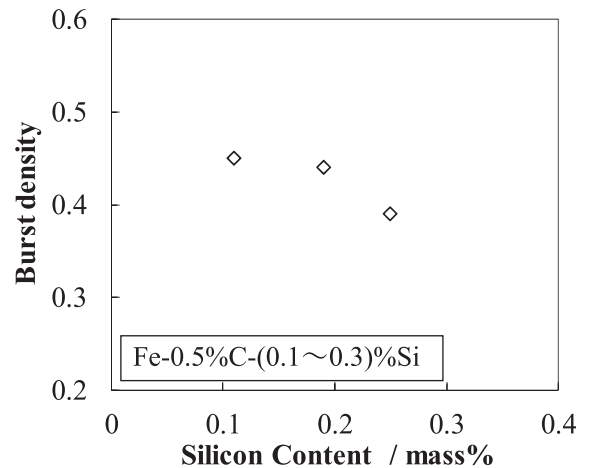


Fig.9 Relationship between burst density and Si% of steels.⁶⁾

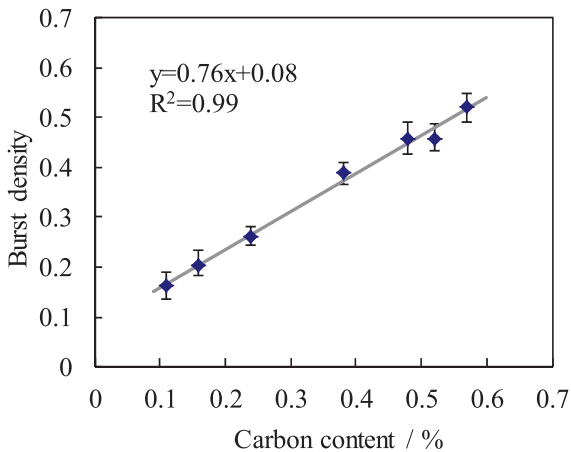


Fig.8 Relationship between burst density and C% of steel materials.⁵⁾

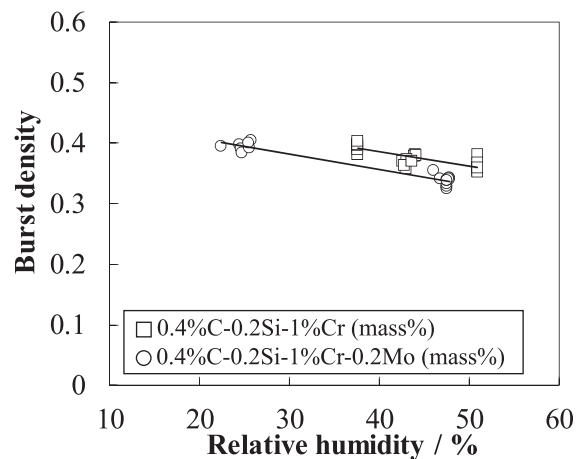


Fig.10 Relationship between burst density and relative humidity.⁶⁾

⑦ 発生したCO, CO₂ガスによって内部の圧力が大きくなると酸化膜を破り、破裂となる。

この各過程を考慮すると、Siによる破裂密度の低減は、切削物の熔融体表面に強固なSiO₂膜が生成されるため(過程⑦への作用)と考えられ^{13, 14)}、また、湿度の増加により破裂密度が低減したのは、大気中の水分が火花を冷却し、熔融体中Cの酸化を抑制したため(過程⑥への作用)¹⁰⁾と考えられる。

以上より、本研究で定義した破裂密度は鋼材C%ごとの

火花の破裂頻度を表しており、また、鋼材Si%や湿度が及ぼす火花の破裂抑制効果を定量的に把握できる指標であると考えられた。

3.2 C%識別技術の製品検査ライン適用性

当技術の鋼材製造現場適用性を検証することを目的とし、製品検査ラインに試験機を導入して破裂密度と鋼材C%の関係を調査した(Fig.12)⁷⁾。テストでは、製品検査ラインに搬送された鋼材の端面位置を機械にて合わせ、

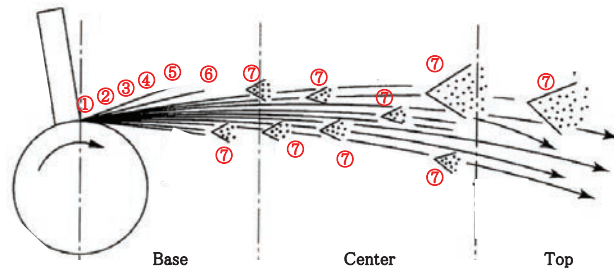


Fig.11 Schematic illustration of generation procedure of sparks and bursts.

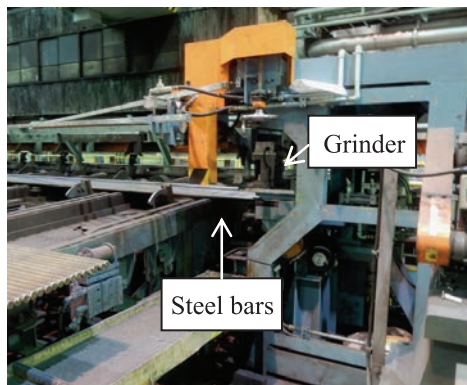


Fig.12 Test equipment for the steel identification applied to a production line.⁷⁾

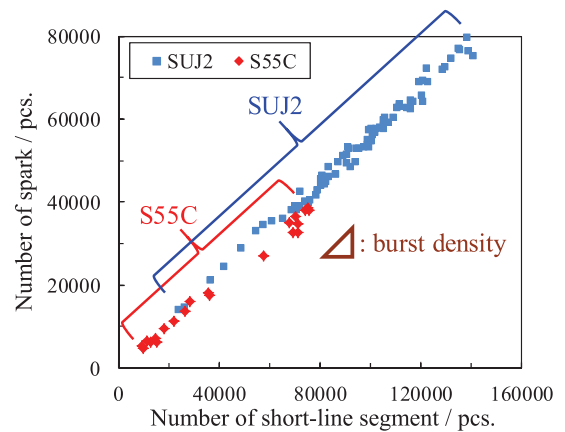


Fig.14 Comparison of the numbers of matched short-lines and burst counts in spark images between a middle-carbon steel and a high-carbon bearing steel.

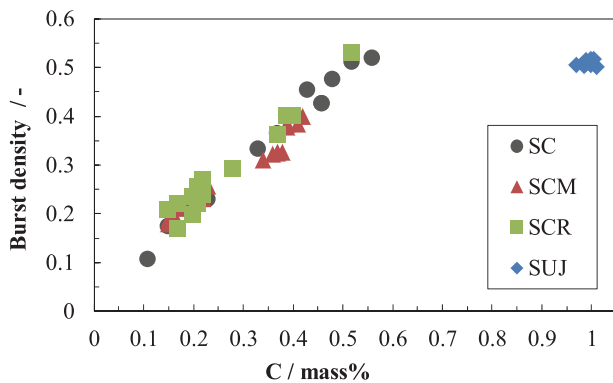


Fig.13 Relationship between C% and burst density for various steel grades.⁷⁾

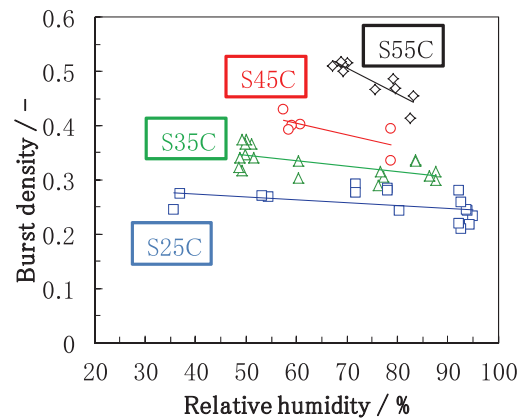


Fig.15 Relationship between relative humidity and burst density in different steel grades.⁷⁾

キッカーによって鋼材を上昇させてクランプし、鋼材端面に砥石を押し当て発生する火花を撮像し、この画像を解析することにより鋼種の識別を実施した。なお、本テストで使用した火花発生機構の構造は、前述した実験の時と同じ構造(Fig.1)とした。実験結果をFig.13に示す⁷⁾。これより、製品検査ラインでの実験においても破裂密度は鋼材C%とともに上昇し、前述(3.1)の実験結果と同様のデータを取得することができた。中炭鋼(C%≒0.5)とSUJ鋼(C%≒1.0)の破裂密度値はほぼ同等となったが、それぞれの鋼種で破裂数や短直線数の絶対値に差が認められており(Fig.14)、これらのデータを併用することで中～高C%の鋼種においても鋼種識別が可能と考えられた。また今回の実製造ラインでの試験にて、破裂密度値に及ぼす試験現場湿度の影響についても幅広い鋼種を対象として調査できており、湿度による影響は高C%ほど大きくなる傾向を捉えることができた(Fig.15)¹⁰⁾。得られる破裂密度に対して湿度の影響を補正することで、鋼材のC%識別精度を向上できると考えられる。

4. 結言

火花試験の機器試験化を目標とした画像解析による鋼材C%識別技術を開発し、その現場適用性を検証した。その結果、以下に示す結論を得た。

- (1) 本研究で定義した破裂密度はC%の増加とともに上昇する傾向が認められ、鋼材C%識別に対して破裂密度が有用な指標であることが確認できた。
- (2) 破裂密度は、鋼材Si%や実験環境の湿度が及ぼす火花の破裂抑制効果を定量的に把握できる指標であると考えられた。
- (3) 製品検査ラインに試験的に導入したC%識別装置において、鋼材C%と破裂密度の関係や破裂密度に及ぼす湿度影響は事前研究で得られていた結果を再現することができ、本技術の製造現場適用性を確認できた。

参考文献

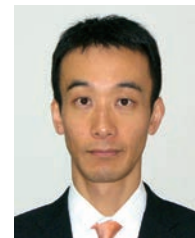
- 1) 日本工業規格, 社団法人日本鉄鋼連盟, “JIS G0566 鋼の火花試験方法”。
- 2) 長野新介, 橋本卓弥, 小林宏: ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2011), 2A1-L14.
- 3) 田中章寛, 橋本卓弥, 小林宏: 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (2011), 2E2-4.
- 4) 山下裕貴, 小林宏: ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2014), 2A1-V03.
- 5) 吉岡孝宜, 大場康英, 山下裕貴, 小林宏: CAMP-ISIJ, 28(2015), 202.

- 6) 島村祐太, 吉岡孝宜, 大場康英, 市川貴大, 小林宏: CAMP-ISIJ, 31(2018), 238.
- 7) 吉岡孝宜, 大場康英, 小林宏: CAMP-ISIJ, 32(2019), 204.
- 8) 特許第5706233号.
- 9) 特許第6403547号.
- 10) 特願2018-123449.
- 11) 特願2018-123450.
- 12) 特願2019-024808.
- 13) 三島徳七, 三橋鉄太郎: 鉄と鋼, 28(1942), 117.
- 14) 大和久重雄: 機会学会誌, 46(1943), 353.

■ 著者



吉岡 孝宜



大場 康英



小林 宏