

赤外線映像装置によるき裂の検知*

白鳥正樹^{*1}, 三好俊郎^{*2}
野田哲司^{*3}, 中西孝^{*4}Detection of Cracks by Infrared Thermal
Video SystemMasaki SHIRATORI, Toshiro MIYOSHI
Tetsuji NODA, and Takashi NAKANISHI

Three methods for detecting cracks embedded in the structural members by an infrared thermal video system have been proposed. The device used in the present study is TVS (Thermal Video System)-3300, by which the distribution of temperature on the surface of the specimen can be measured and processed to express its real time pictures. The methods proposed are (1) internal heating method where increase of temperature due to plastic deformation at the crack tip is detected, (2) external heating method by high frequency electric current, and (3) laser heating method. The above three methods have been compared each other. Finally the authors have discussed the applicability of the proposed method to the practical problems.

Key Words: Strength of Materials, Nondestructive Inspection, Detection of Cracks, Thermal Video System, Picture Processing

1. 緒言

現在の産業界においては、構造物のき裂や欠陥の発見が重要な問題となってきた。現在では、超音波探傷法や磁粉探傷法などの各種非破壊検査法が用いられているが、これらの方法は大形構造物の広範囲の検査には多大の労力と時間を要し、より簡便な手法の開発が望まれる。そこで本研究では、一画面0.05秒で物体表面の温度測定が可能なりアルタイム赤外線温度測定装置を用いて⁽¹⁾⁽²⁾、非接触でき裂や欠陥を検知する新たな手法の可能性について検討した。まず、き裂のある試験片に外部から負荷を与え、き裂先端の塑性変形による内部発熱を捉え、き裂を検知した。次に、試験片に外部より熱を与え、き裂や欠陥部に生じる温度変動を可視像として捉え、得られた熱画像よりき裂や欠陥を検知した。得られた結果より、各々の手法に対し工業上の有効性についての考察を行った。

2. 赤外線映像装置

2.1 特徴 実験に使用した赤外線映像装置は、日本アビオニクス社製 TVS (Thermal Video System)-3300 で、対象物の各点から放射される赤外線を赤外線検出器によって検出し、温度分布を可視像として再構成している。以下に TVS-3300 の主な性能を示す。

- | | |
|-------------|----------------|
| (1) 測定温度範囲 | : -40°C~280°C |
| (2) 温度分解能 | : 0.1°C |
| (3) 測定視野 | : 垂直 10°×15° |
| (4) 走査線数 | : 検出部 100 本 |
| (5) 水平画像分解能 | : 256 ドット/LINE |
| (6) フレーム数 | : 20 フレーム/s |
| (7) 検出器 | : インジウムアンチモン |
| (8) 検出器冷却 | : アルゴンガス冷却 |

2.2 検出部 検出部は対象物の放射エネルギー分布像を得るためのものである。高速回転10面ミラーと10素子検出器を使用し、図1に示すような構造で、回転ミラー1回転により対象物の水平15度、垂直10度の範囲のサーモグラムを形成するのに必要な信号が検出器より得られる。なお、回転ミラーは、1秒20回転であり0.05秒で1フレームのリアルタイムサーモ

* 昭和63年3月18日 関西支部第63期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月6日。

^{*1} 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

^{*2} 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

^{*3} 学生員、横浜国立大学大学院。

^{*4} 日本アビオニクス(株) (〒246 横浜市瀬谷区本郷2-28-2)。

グラム信号が得られる。同時に、画像処理部で像再生に必要な水平、垂直同期信号、および検出器から得られた電気信号量を、温度量に変換するために必要となる周囲温度信号を出力する。

2・3 画像処理部 画像処理部では、増幅された信号が各データをもとに A/D 変換器で 4 ビット (16 レベル) のデジタル量に変換され、フレームメモリーに蓄えられる。メモリー上で 1 フレームの情報量は、水平 256、垂直 100 の画素と深さ 4 ビットで構成されており、熱画像データは 1 ライン 128 バイトで 100 ラインの 12 800 バイトで構成される。

このフレームメモリーの信号は、TV 同期信号を基に順次読みだされて TV 信号に変換されたカラーモニタに表示される。また、この熱画像のデータは、時刻や温度レンジ等の付加情報 (63 バイト) を合わせ、1 フレーム 12 863 バイトの情報をフロッピーディスクに記録することができ、後にパーソナルコンピュータを用いて、フロッピーディスクからデータを読みだし種々の処理や解析ができる。

3. き裂検知の方法

3・1 き裂検知の方法 赤外線映像装置を用いてき裂の検知を行うには、大きく分けて以下の二つの方法が、考えられる。

- [1] 構造物の変形に伴う内部発熱を検知する方法、
- [2] 構造物を外部から加熱し、得られる熱画像よりき裂を検知する方法。

そこで、本研究においては図 2 に示すように、

- (1) 塑性変形による発熱を検知する方法：塑性発熱法
 - (2) 高周波発振器を用いて加熱する方法：高周波加熱法
 - (3) レーザにより加熱する方法：レーザ加熱法
- の 3 通りの方法で実験を行い、それぞれの方法に対しての有効性の考察を行った。

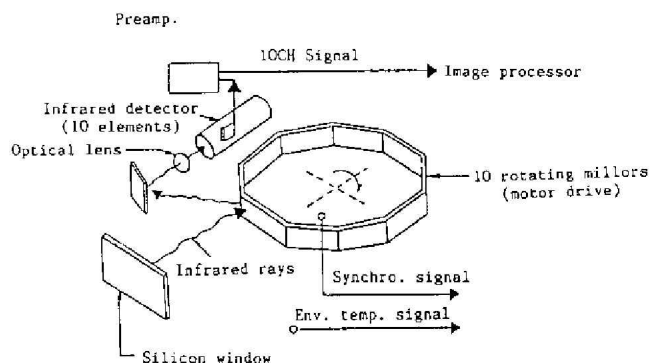


図 1 TVS-3300 の検出部の構造

3・2 き裂検知システムの構成 き裂検知システムの構成は図 2 に示すように、構造物に外部より負荷もしくは加熱を行い、この時に生じる温度の変動を赤外線カメラで捉え TVS のカラーモニタ TV 上にリアルタイムで映し出す。また、カラーモニタ TV に VTR を接続することでリアルタイムの画像を保存できる。

この時の熱画像のデータは、付属のフレームレコーダを用いて任意の時点でフロッピーディスクに記録できる。さらに、短時間の現象を記録するには、付属のリアルタイムレコーダを用いて、内部のハードディスクに最高 10 フレーム/s の速さで記録でき、フレームレコーダを介してフロッピーディスクに記録できる。後に、パーソナルコンピュータを使用して種々のデータ処理や、カラーイメージレコーダを用いて熱画像の写真撮影も可能である。

4. 塑性発熱法

4・1 実験方法 荷重装置は鷺宮製作所製油圧サーボ疲労試験機 (± 30 t, ± 100 t) を使用した。試験片は図 3 に示すような、スリット試験片、表面切欠試験片を用い、繰返し荷重で負荷しき裂を進展させた。き裂が十分進展したのを確認の後、TVS で現象をリアルタイムでモニタし VTR に録画した。また、試験機からの荷重信号を同期させてフレームレコーダに入力し最大荷重時および最小荷重時の熱画像データを記録した。

4・2 実験結果と考察 図 4 は、スリット試験片に $\pm 1.47 \times 10^4$ N の両振り繰返し荷重を負荷した時の熱画像である。図 5 はこの熱画像のリガメント部 (図中 A-B) の温度データをパーソナルコンピュータ上で取り出しグラフにしたものである。この図は、最大荷

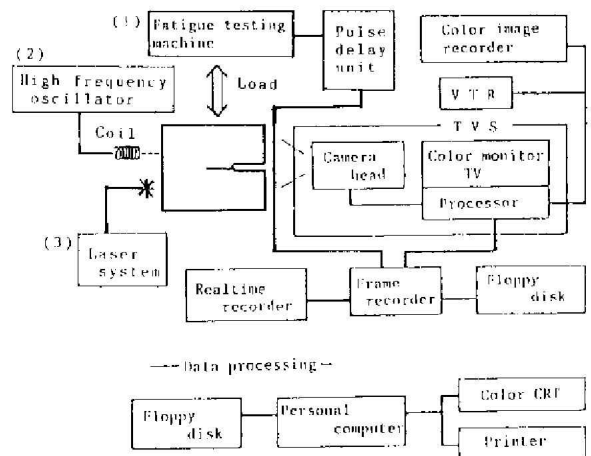


図 2 き裂検知システムの構成

重時の熱画像であるにもかかわらず疲労き裂先端で温度上昇が見られる。また、図6は表面切欠試験片(図中の $a=8\text{ mm}$, $c=20\text{ mm}$)に $\Delta P=3.43 \times 10^5\text{ N}$ の片振り繰返し荷重を負荷し、き裂が裏側へ貫通する直前を裏側から撮ったものであり、やはり疲労き裂先端で温度上昇がみられる。これは、き裂先端の塑性域において塑性変形による発熱があるためであり、この発熱を

TVSで捉えき裂の位置を確認することができる。しかし、この方法は非接触でき裂を検知できる利点はあるが、構造物に大きな荷重を与える必要があるのと、TVSで発熱を確認したときは既に不安定破壊直前であることから工業上実用的であるとは言えない。

5. 高周波加熱法

5.1 実験方法 実験に使用した高周波発振器は島田理化学工業製(SIH-2.5 CW-4 A)で、図7に示すようにコイルに対して垂直に試験片のき裂部分を約10 mmまで近付け、高周波発振器を用いてコイルに430 kHzの高周波電流を流した。この時の試験片表面の温度変動をコイルの反対側にセットしたTVSの赤外線カメラで捉え、カラーモニターTV上でリアルタイムでモニタした。また、TV画面上の熱画像はフレームレ

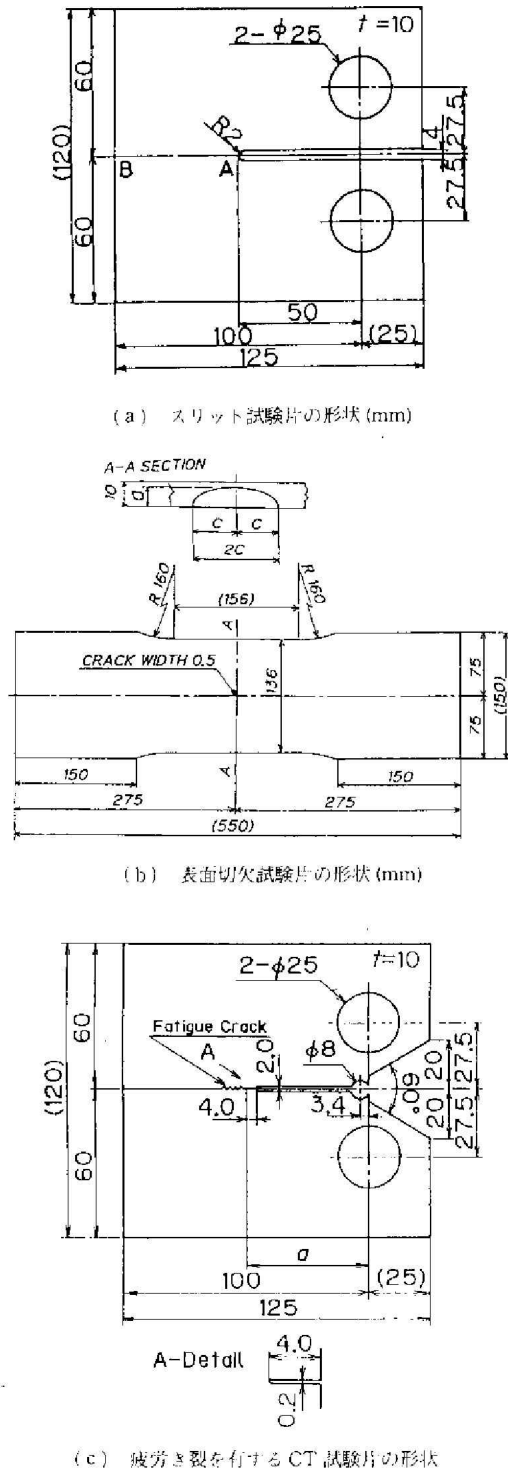


図3

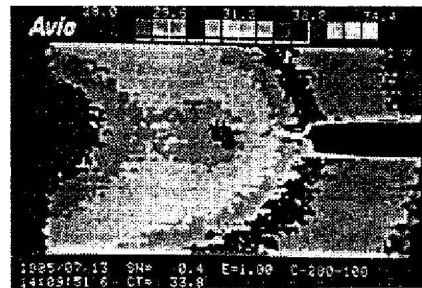


図4 き裂先端の発熱を検知した熱画像

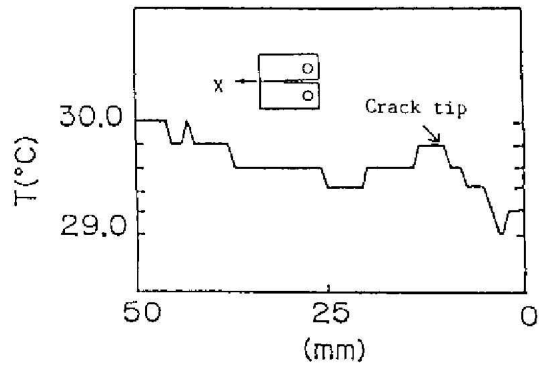


図5 リガメント上の温度分布



図6 き裂が裏側へ貫通する直前の熱画像

コーダでフロッピーディスクに記録し VTR にも録画した。

5.2 実験結果と考察 図8は、図3に示すような疲労き裂(約4mm)の入ったCT試験片を高周波加熱法で加熱した時の画像である。疲労き裂は、4.2節の試験片と同じ荷重条件で導入されたもので、き裂検知を行う除荷時には、き裂が閉じて、き裂面が互いに接触しているものと思われる。この図を見るとコイルの中央辺りでき裂に沿って温度上昇が見られる。これは、コイル内部にできた磁界の影響で試験片表面に高周波渦電流が流れると表面は加熱されるが、き裂部は不連続であるため他の部分より抵抗値が大きく、より大きなジュール熱による発熱があるためと思われる。そこ

で、この発熱を TVS で捉えき裂の大きさや位置を正確に検知することができる。この方法は構造物に荷荷を与えずに非接触でき裂の検知ができる。また、かなり小さなき裂まで正確に検知できる点で有望である。しかし、非接触と言ってもコイルを近付ける必要があるため構造物全体を検査するにはあまり適していない。

6. レーザ加熱法

6.1 実験方融 実験に使用したレーザ発振器は、

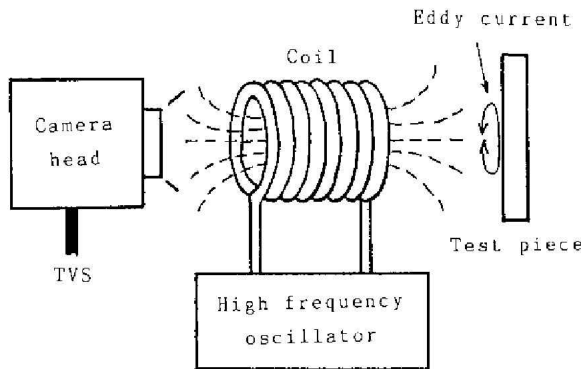


図7 高周波加熱法の実験システム

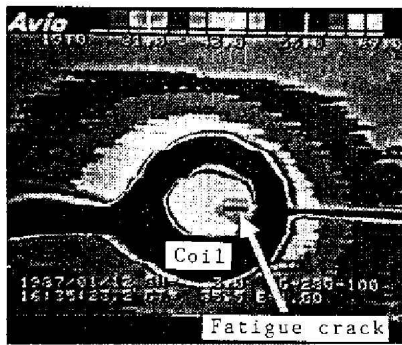


図8 高周波加熱法による画像例(疲労き裂)

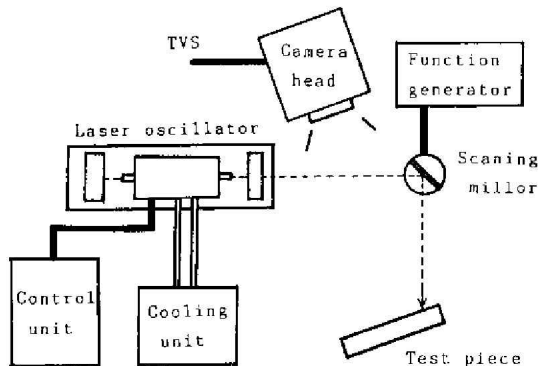
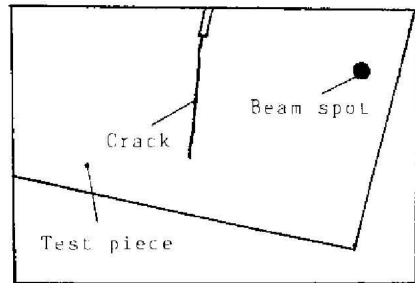
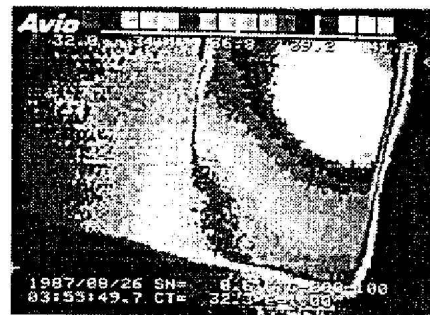
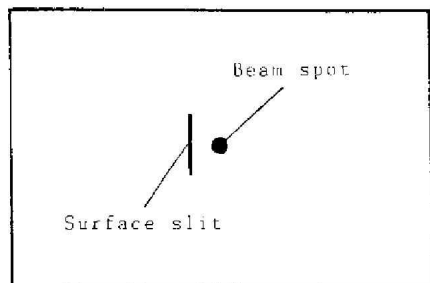
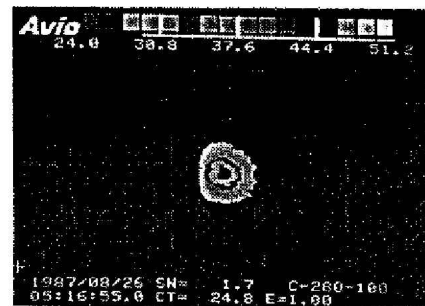


図9 レーザ加熱法の実験システム

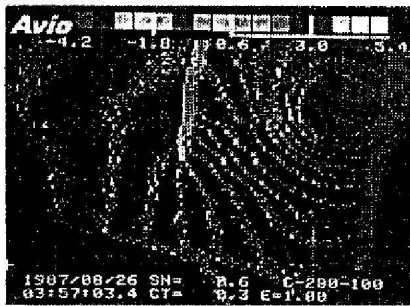


(a) 貫通き裂

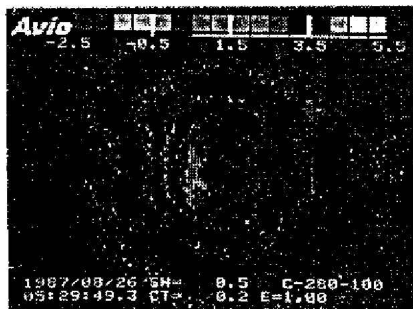


(b) 表面スリット

図10 レーザ加熱法による熱画像



(a) 貫通き裂



(b) 表面スリット

図 11 画像処理を施した画像

日本高周波製 Yag レーザ発振器で、実験システムを図 9 に示す。Yag レーザ発振器 (最大出力 20 W) より放射されたレーザは、スキャニングミラーを介して試験片表面に照射され表面を加熱する。この時、スキャニングミラーの角度を交流発振器で変化させ、試験片の表面全体をスキャンすることができる。この時の温度変動を TVS でモニタし VTR およびリアルタイムレコーダに 0.1 秒おきに記録した。

6.2 実験結果と考察 図 10(a) は、中央部に延性破壊によるき裂 (約 35 mm) の入った試験片の右端に出力 20 W の Yag レーザを照射し続け、約 20 秒後の定常状態になった時の熱画像である。この延性き裂は疲労き裂と異なり、除荷時においてもき裂面が一部開口したままとまっていることが観察されている。また、図 11(a) は、図 3 に示すような表面切欠試験片 (図中 $a=4$ mm, $c=10$ mm) の表面切欠部の片側に出力 20 W の Yag レーザを照射した時の熱画像である。これらの図を見ると中央のき裂部ではき裂により熱伝導が阻止されて温度分布が不連続になっているのがわ

かる。そこで、これらの熱画像のデータをパーソナルコンピュータ上で、1 ラインごとに左端から順に隣合うデータ間の温度差をとる処理 (微分処理) を施し、温度の不連続部を強調させたのが図 10(b)、図 11(b) である。これらを見ると試験片の中央にき裂が存在するのが良くわかる。この方法は、構造物全体を遠方から短時間で検査できる。しかし、疲労き裂のようなき裂が閉じているようなものに対しては、温度分布の不連続が明確に現れないこともある。また、検査システムが大がかりになり、また、高出力のレーザを使用するため危険を伴うなどの欠点がある。

7. ま と め

赤外線映像装置による各種き裂検知法の長所、短所を以下に示す。

	長 所	短 所
塑性発熱法	非接触で欠陥が検知できる。	構造物に大きな負荷を与える必要がある。不安定破壊直前しか検知できない。
高周波加熱法	簡単に欠陥が検知できる。小さな疲労き裂も検知できる。	非接触ではあるが、コイルを構造物に近付ける必要がある。
レーザー加熱法	非接触で遠方より欠陥が検知できる。	設備が大がかりであり、危険を伴う。

また、これまでの実験結果より欠陥の種類における各種検知法の比較を以下に示す。

欠陥の種類	塑性発熱法	高周波加熱法	レーザー加熱法
小さな疲労き裂 (4mm 程度)	不可	可	不可
大きな疲労き裂	破壊直前可	可	未確認
表面き裂 (表側から) 図中の $a=4$ mm, $c=10$ mm	不可	可	スリットは可
表面き裂 (裏側から) 図中の $a=8$ mm, $c=20$ mm	貫通直前可	不可	不可
延性破壊によるき裂 (35mm 程度)	破壊直前可	可	可

本研究においては、三菱重工業株式会社広島研究所の梶本勝也氏および村井亮介氏の助力を得た。ここに記して謝意を表す。また本研究の一部は、昭和 61~62 年度文部省科学研究費 (試験研究 1) の援助で行った。

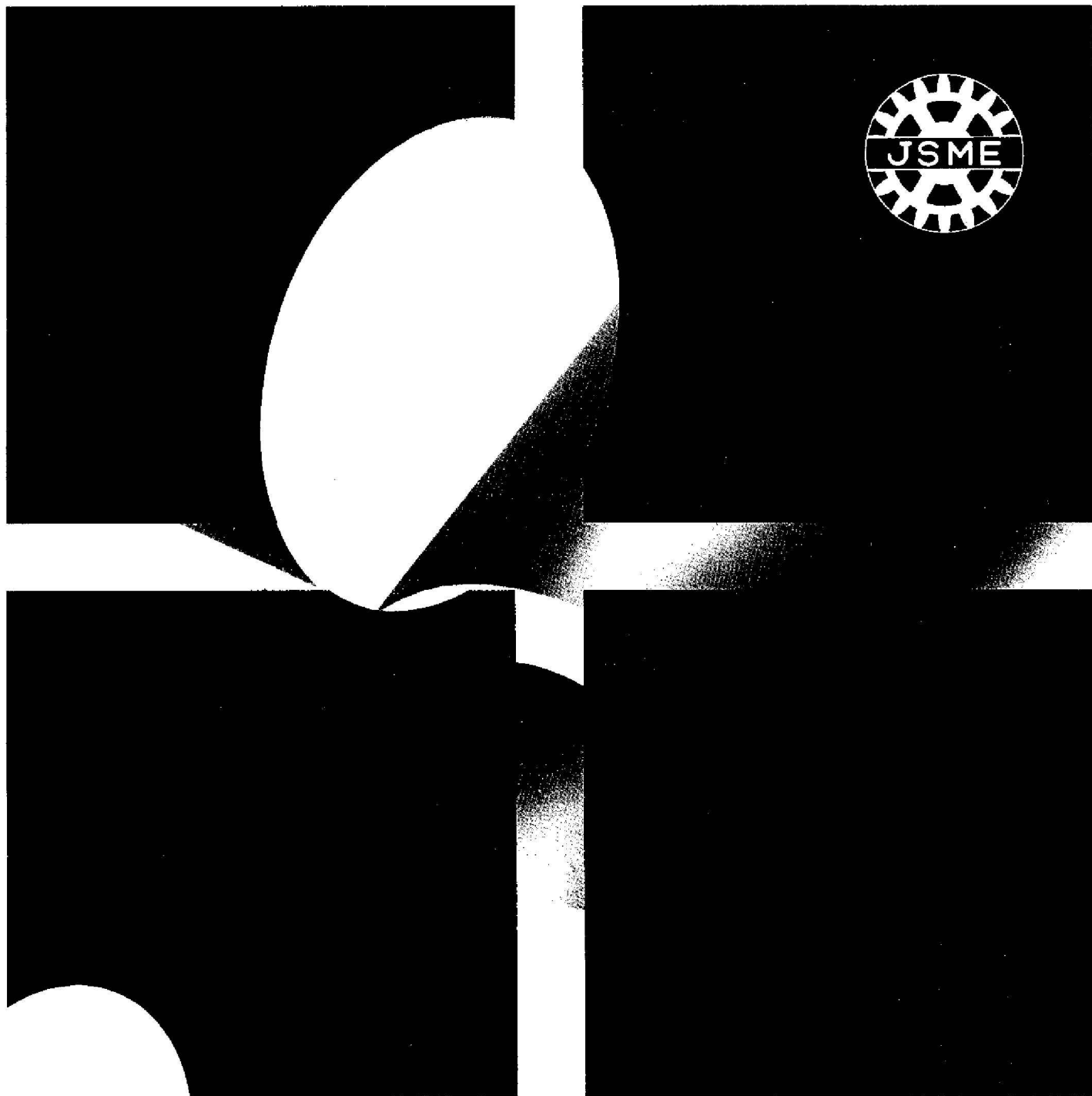
文 献

- (1) 白鳥・ほか 3 名, 機論, 52-478, A (1986), 1557.
- (2) 白鳥・ほか 3 名, 機論, 52-492, A (1987), 1699.

平成元年3月

第511号 A編

日本機械学会論文集



**TRANSACTIONS OF
THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**

March, 1989

日本機械学会

