

赤外放射計による表面欠陥の検出

— 第2報 V溝およびスリット状欠陥の検出 —

岡本芳三*, 神永文人*, 刑部真弘*, 石井敏満*
大岡紀一**, 金谷邦夫**, 江藤芳丸**

(平成元年8月31日受理)

Surface Flaw Detection by Infrared Radiometer

Y. OKAMOTO*, F. KAMINAGA*, M. OSAKABE*, T. ISHII*
N. OHOKA**, K. KANAYA**, Y. ETOU**

Abstract—The surface crack detection method by using the infrared radiation (IR) sensor was proposed in previous studies. In the present study, the method was applied to metallic and ceramic plates with small slit-type artificial cracks. The crack width is small as the wave length of the detected infrared ray ($8\sim 13\mu\text{m}$). It is found that even hair crack of the ceramic plate with the width of $5\mu\text{m}$ can be detected by the infrared radiation sensor.

Slit crack and pinholes on stainless steel plate were also detected by the IR sensor. It was founded that the limiting parameters of flaw detection were determined by surface conditions, such as roughness, decontamination and oxidation layer.

1. まえがき

物体表面より放出される赤外放射エネルギーをとらえ、二次元のサーモ像として表示する遠赤外リモートセンシング技術は、産業の各分野において広く利用されている。また、構造材料に存在する欠陥を非破壊で検出する手法としては、X線、超音波、浸透などの手法が適用されている。しかしながら、遠隔、非接触で欠陥を検出するためには、新たな手法の確立を必要とする。

すでに、著者らは表面に存在する欠陥を検出するこ

とを目的として、赤外放射計を用いて欠陥部よりの放射熱流束が空洞放射効果により、表面の値より増加し、欠陥の検出に有益であること、および、X線透過および超音波法と比較して、すぐれた識別感度を有することを明らかにした。⁽¹⁾

また、金属および黒鉛材料表面に取り付けた、人口スリット状欠陥について検出限界を調べたところ、幅 $40\mu\text{m}$ で深さ $10\mu\text{m}$ までの検出が可能であることを示した。⁽²⁾さらに、表面に取り付けたピンホール孔、ビッカースおよびロックウェル法による圧痕について検出を行なったところ、直径 0.1mm 、深さ $20\mu\text{m}$ の点状欠

* 茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部 (茨城県東茨城郡大洗町成田町)

Japan Material testing Reactor, Ooarai Institute, Japan Atomic Energy Research Institute, Ooarai-machi, Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-13, Japan

陥の検出が可能であることを明らかにした。⁽³⁾

使用した赤外放射計は、Hg-Cd-Te製の光子放射計であり波長8~13μmの遠赤外域の放射能を検出する。一般に、欠陥を構成する空洞部の大きさが上記の波長域より、小さい領域においては、空洞放射の影響がどのようなか、また、表面粗さと相対的に等しい深さの表面線状欠陥を検出し得るかを調べた研究はなされていない。

本研究は、金属表面に機械加工により取り付けられたV溝状欠陥、およびセラミックス表面に熱衝撃作用により取り付けられた数μm程度の線状割れについて、赤外放射計による検出限界を調べ、熱流場を与えることにより上記の赤外線検出波長以下の微小欠陥の検出が可能であることを明らかにしたものである。

また、ステンレス鋼表面に取り付けられたスリットおよびスポット状の欠陥について試験を行なった結果、巾10μmで深さ20μmの線状および直径100μmで深さ20μm程度の点状欠陥を検出することが可能であった。

最後に放射計による欠陥を識別できる限界を評価すると共に、表面の放射温度のばらつきが、これらの識別限界に与える影響について調べたものである。

記号	添字
a : 射出率	A : 周囲
b : 欠陥の幅	B : 黒体
h : 欠陥の深さ	C : 欠陥
ε : 放射率	S : 表面
T : 温度	W : 試料
T' : 等価放射温度	

2. 欠陥検出の方法

試験片は、鋼、銅、アルミニウム、およびステンレス鋼の金属面に、機械およびレーザ加工により、スリット、V溝線状、および点状欠陥を取り付けたものと、SiCセラミックス板に熱衝撃により表面に微小な割れを発生させたものより成立っている。

試験片をヒータで加熱し、定常状態で、表面の放射エネルギーの分布をHg-Te-Cd検出器により検出し、その分布をCRT上に表示し、欠陥の放射温度を求めた。⁽⁴⁾

試料表面の熱流束は最大で、10³W/m²程度であり、自然対流で放熱を行い、く形試験片の温度T_wは一定

に保たれる。試験片表面および欠陥部のCRT上の放射等価温度T_s'、T_c'は、次のように表わされる。⁽⁴⁾

$$T_s' = \sqrt[4]{a_s} T_w, T_c' = \sqrt[4]{a_c} T_w \dots\dots\dots(1)$$

ここで、a_s、a_cは表面および欠陥部の反射を考慮に入れた射出率を示す。なお、T_s'、T_c'、a_s、a_cの詳細については、文献(2)、(3)を参照されたい。T_wとa_sの関係を示したのがFig.1である。周囲の温度は15~20°Cの範囲で測定したものである。T_wが周囲の温度T_aに等しいとa_s=1であり、T_wが外界の温度T_aより十分に大きくなると反射の影響が少なくなりa_s=ε_sとなる。

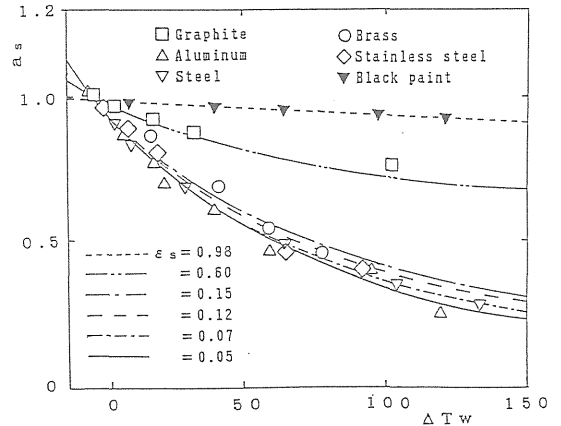


Fig. 1 Radiosity coefficient of tested material.

一般に、試験片が画くCRT上のサーモ像を見て欠陥を検出するには、放射温度差ΔT_c'=T_c'-T_s'をもって識別を行う。ここで式(1)より

$$\Delta T_c' = (\sqrt[4]{a_c} - \sqrt[4]{a_s}) T_w \dots\dots\dots(2)$$

であり、T_wの大なる程ΔT_c'は増加し、識別精度を向上させる。使用した赤外線放射計は、欠陥の幅bと試料と検出器までの距離をLとするとb/L=1.5×10⁻³であり、L=0.15mで最小b=0.2mmの欠陥を識別しFig.2のようにハッチングした領域が検出範囲になる。これに対してCRT上の画像より小さな欠陥は、試料を加熱してCRT上の画素より小さな微小欠陥のΔT_c'を増加させ、微小欠陥の画素内の放射温度の増幅効果をもたらし、実測範囲は、b/Lが1.5×10⁻³以下に拡大され識別感度を向上させることになる。

一般に、金属面は表面の粗さ、酸化膜、汚れなどにより、放射率にバラツキを生じ、欠陥中心温度の測定にあたり支障をきたし、常温付近で放射温度として1

～2 K (rms) のバラツキを生ずる。これに対して、黒鉛やセラミックスの面は金属に対してバラツキの値は少なく安定している。また、表面温度が増加するほど、バラツキの値は増加する。このため、実験に先立って、試験片表面を研磨洗浄するとともに、各欠陥周囲の平均表面温度をもって T_s' とし、バラツキを最小限に押えることとした。また、バラツキは温度と共に増加し、欠陥の識別限界値をこえる場合には、欠陥との区別ができず、欠陥の検出を困難にする。⁽⁶⁾

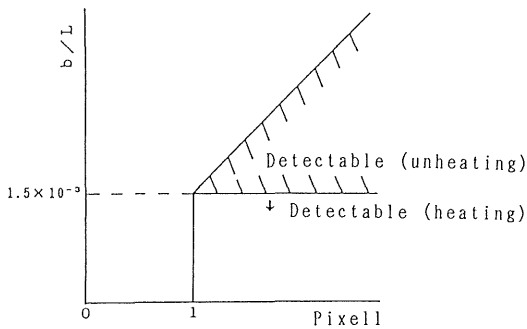


Fig. 2 The relation between frame number and b/L .

3. 試験結果

3.1 金属面上のV溝欠陥

鋼, 銅, アルミニウム板の表面に機械加工により、幅 8～200 μm 深さ 30～300 μm の V 溝線状欠陥を取り付けた。

Fig. 3 は銅板上の V 溝欠陥の放射温度を示す。下および左側の図は、写真のカーソル線状の温度分布を示したものである。V 溝に沿った温度分布は、表面より高い値を示す。上下の白い帯は、基準となる黒色ペンキの部分を示している。

Fig. 4 は表面をミーリング加工した炭素鋼板のサーモ像である。この試験片の表面には、平均粗さ 10 μm の方向性を有する一連の加工溝が観測され、肉眼や粗さ計では、表面に取り付けた深さ 20 μm の V 溝欠陥との間の区別はできなかったが、Fig. 4 に示すように、赤外放射計では加熱により明確な線状欠陥のサーモ像が識別できた。これは、欠陥部の放射率、および、反射率の表面の値との差、および、V 溝部の凹凸の変化などによるものと考えられるが今後検討を進める必要がある。

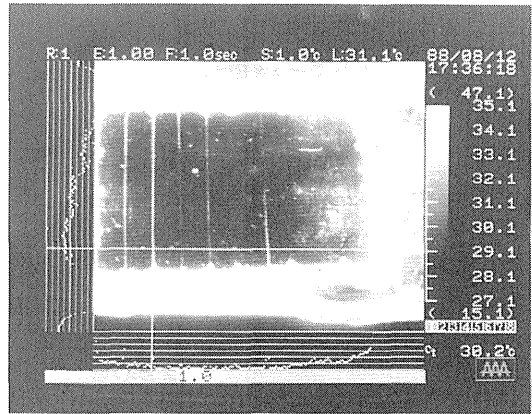


Fig. 3 Thermo-view of V-shaped cracks on the copper plate. ($T_w=53.0^\circ\text{C}$)

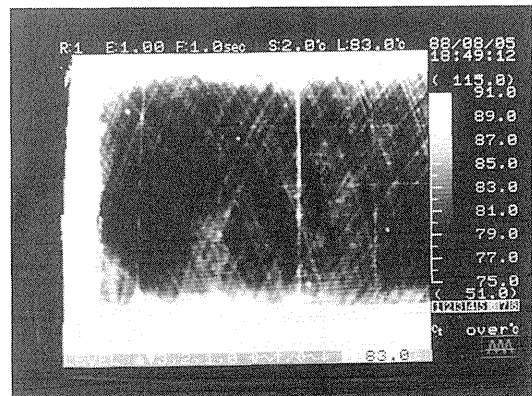


Fig. 4 Thermo-view of V-shaped cracks on the carbon steel surface by milling treatment ($T_w=238.9^\circ\text{C}$)

Fig. 5 と Fig. 6 は、銅と炭素鋼板上の欠陥の中 b と深さ h をパラメーターとした、 $\Delta T_c'$ と $\Delta T_w = T_w - T_a$ の関係を示したものである。CRT 上では、0.2～0.3K の $\Delta T_c'$ が存在すれば、線状欠陥部に山形の温度分布をもつ欠陥部のサーモ像が表れ、検出が可能となる。また、Fig. 5 と Fig. 6 からわかるように、巾 b 、深さ h 及び温度差 ΔT_w の大なるほど、 $\Delta T_c'$ が増加して欠陥部の映像が鮮明化する傾向にある。

また、Table. 1 と Table. 2 に各種試験片の温度 T_w と欠陥部の温度差 $\Delta T_c'$ の関係を示す。温度 T_w を大きくし、赤外放射計と試験片との距離 L を小さくすることにより、 $\Delta T_c'$ に有意な温度差が表れ、常温で見えない欠陥の識別を可能とする。また、 h/b (深さ/巾) 及び ΔT_w の大なるほど $\Delta T_c'$ は増加する傾向にある。

CRT 上では、0.2~0.3K の $\Delta T_c'$ が存在すれば、線状欠陥部に山形の温度分布をもつ欠陥像が表れ、検出が可能となる。Table. 3 に銅板上の V 溝欠陥の ΔT_w と a_s の関係を示す。 a_s は ΔT_w の大なるほど減少し、 h と b の大なるほど増加する傾向にあり、 a_s の極く僅かの変化が欠陥の検出と識別に有効な役割を示す。

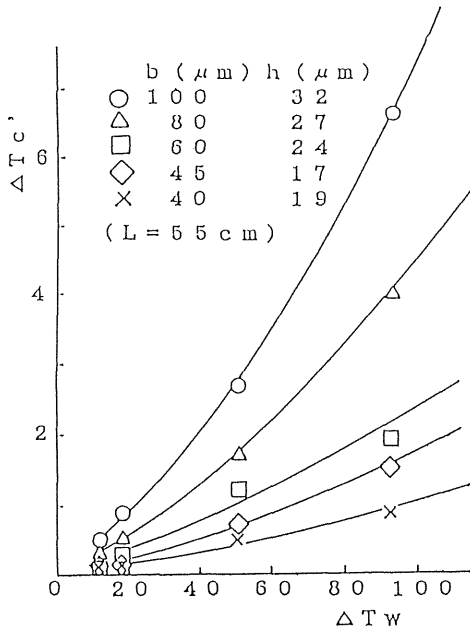


Fig. 5 The relation between ΔT_w and $\Delta T_c'$ (Copper, polished)

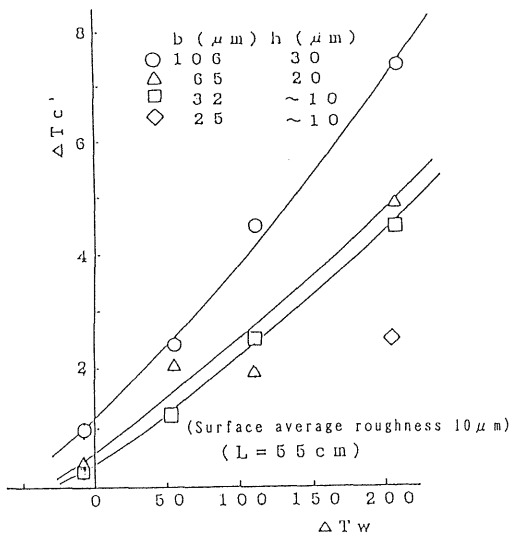


Fig. 6 The relation between ΔT_w and $\Delta T_c'$ (Carbon steel)

Table 1 $\Delta T_w'$ and $\Delta T_c'$ of V-shaped cracks on the carbon steel surface

(L=55cm)										
b(μm)	h(μm)	ΔT _w	0	5.9	12.8	30.4	64.8	104.0	133.5	206.5
1	190	8	---	---	---	0.2	0.6	0.7	1.2	1.6
2	83	8	---	---	0.1	0.4	1.2	1.1	0.6	2.3
3	70	4	---	---	0.1	0.0	0.3	0.3	0.6	0.6
4	64	4	---	---	---	---	0.2	0.0	0.2	0.5
5	63	11	---	---	---	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0
6	55	7	---	---	0.1	0.3	0.8	-0.1	0.8	1.4
7	51	2	---	---	---	---	---	---	0.6	1.3
8	50	10	---	---	0.2	0.3	0.7	0.8	1.0	1.5
9	48	6	---	0.1	0.2	0.2	1.2	0.9	1.9	1.4
10	45	11	---	0.2	0.3	0.4	0.8	1.0	2.4	3.4
11	43	8	---	---	---	0.2	0.2	0.3	0.7	1.4
12	36	11	---	0.0	0.2	0.5	0.9	1.0	1.1	2.4

Table 2 ΔT_w and $\Delta T_c'$ of V-shaped cracks on the copper surface

			L=55(cm)								L=15(cm)	
b(μm)	h(μm)	ΔT _w	-16.2	0	12.1	18.0	50.4	92.9	53.0			
1	100	32	-0.9	-0.1	0.5	0.9	2.7	6.6				
2	80	30	---	0.0	0.0	0.4	1.1	2.3				
3	80	27	---	0.0	0.3	0.5	1.7	4.0				
4	80	24	---	---	0.2	0.2	0.6	1.6				
5	60	24	---	---	0.3	0.3	1.2	1.9				
6	60	21	---	---	0.1	0.1	0.5	1.4				
7	45	17	---	---	0.1	0.2	0.7	1.5				
8	40	19	---	-0.1	0.1	0.2	0.6	0.9				
9	38	5	---	---	---	---	---	---			0.3	
10	20	1	---	---	---	---	---	---			0.2	

Table 3 $\Delta T_w'$ and a_s of V-shaped cracks on the copper surface

			L=55(cm)								L=15(cm)	
b(μm)	h(μm)	ΔT _w	-16.2	0	12.1	18.0	50.4	92.9	53.0			
1	100	32	1.162	1.000	0.865	0.771	0.539	0.344				
2	80	3	---	0.999	0.863	0.769	0.525	0.339				
3	80	27	---	1.000	0.864	0.770	0.533	0.337				
4	80	24	---	---	0.864	0.771	0.540	0.341				
5	60	24	---	---	0.862	0.769	0.534	0.337				
6	60	21	---	---	0.864	0.769	0.533	0.335				
7	45	17	---	---	0.863	0.768	0.537	0.340				
8	40	19	---	0.999	0.863	0.768	0.536	0.342				
9	38	5	---	---	---	---	---	---			0.458	
10	20	1	---	---	---	---	---	---			0.463	

3.2 セラミックスの微小欠陥

SiCセラミックス板に熱衝撃により微小な表面割れを発生させ、加熱状態での割れによる欠陥の発生状況の確認を行った。常温ではこれらの割れは、識別できなかったが、Fig. 7に示すように、L=0.15m、 $T_w=30^\circ\text{C}$ 以上の温度において、ひび割れの発生状況を確認することができた。その映像およびスケッチを Fig. 8

および Fig. 9 に示す。横方向に 2 本縦方向に 1 本のひび割れがはしっている模様がわかる。顕微鏡により、割れの幅を測定したところ、平均で 5 μm であることがわかった。

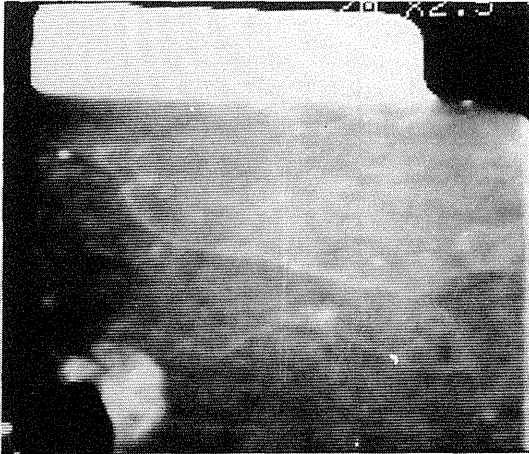


Fig. 7 Thermo-view of cracks on Ceramic Surface (SIC, $T_w = 110^\circ\text{C}$)

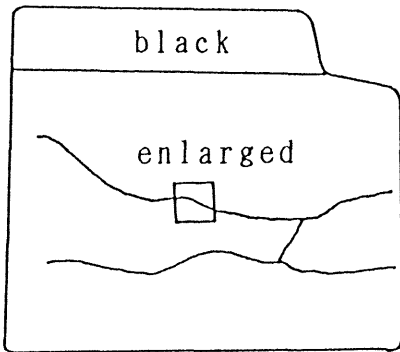


Fig. 8 Figure of lined cracks of the ceramic

Fig. 8 の四角で区画した微小部分の放射温度を、二次元の画素ごとに示したのが Fig. 9 である。表面温度に対して、0.1~0.4K の温度上昇があり、赤外線放射計の計測波長範囲以下の欠陥についても、加熱を行うことにより検出が可能であることを示した。また、Fig. 10 に Fig. 9 のひび割れに直角方向の粗さ計による断面図を示す。Fig. 10 の割れの左及び右側に段差があり、右側より見た場合には欠陥を見ることができたが、左側からは見ることができなかった。この結果は、加熱により、数 μm の欠陥まで検出が可能であることを

示した測定例として注目される。

37.3	37.3	37.3	37.2	37.1
37.6	37.5	37.2	37.3	37.3
37.7	37.5	37.3	37.3	37.3
37.5	37.4	37.3	37.3	37.2
37.2	37.3	37.3	37.3	37.1
37.1	37.3	37.2	37.3	37.3
37.3	37.2	37.2	37.4	37.4
37.2	37.3	37.3	37.3	37.4
37.2	37.2	37.1	37.2	37.4
37.3	37.3	37.1	37.2	37.3

Fig. 9 Distribution of $\Delta T_s'$ and $\Delta T_c'$ on enlarged section

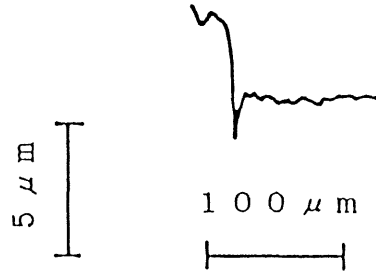


Fig. 10 Cross section of surface flaw by roughness meter

3.3 ステンレス鋼における点状および線状欠陥

試験に使用した試験片はステンレス鋼の矩形平板である。機械仕上げた表面に研削、放電およびレーザー加工により、スリット形線状および円柱形状の点状欠陥が取り付けられている。その寸法を Table. 4, 5 に示す。この試験片を加熱器の上に取り付け、定常加熱状態における試験片表面より放出される放射エネルギーの分布を、CRT 上に表示して求めた。⁽¹⁾

この際、常温近くのステンレス鋼では、その放射率 ϵ は 0.05 に近い値を持ち、周辺部よりステンレス鋼表面に入射し反射する放射エネルギーによって、ほぼ CRT 上の放射温度が決ることになり、表面温度のゆらぎや変動を起し、安定な温度測定を行うことが出来ない。このため、試験装置を黒色の暗幕で覆い、周辺温度の安定化をはかった。赤外線 (IR) 法による試験結果を Table. 4, 5 に示す。比較のために超音波 (UT)、透過 (XR) 法の結果を示す。いずれも IR 法は微小欠陥の検出には優れた特性を示している。IR 法では線状

欠陥ではすべての欠陥の検出が可能であった。また点状欠陥の場合には、素面の粗さの変化及び酸化膜の形成にもとずくと考えられる表面温度のむらが生じたが、0.2mmφ までの欠陥は明確に識別することが出来た。ステンレス鋼表面の T_s' のバラツキは、 $T_s' = 34.5 \pm 2.4^\circ\text{C}$ (rms) であり欠陥の識別限界を決める重要な制約因子となっている。(2),(3)

Fig. 11 は、試験片と大気との温度差 ΔT_w と、欠陥部と試験片表面の放射温度差 $\Delta T_c'$ の関係をステンレス C の板の種々の欠陥について示したものである。 ΔT_w 及び b の大なるほど $\Delta T_c'$ は増加する。また、 b が一定のときは h の大なるほど空洞放射効果により $\Delta T_c'$ は増加し、肉眼や常温では識別が容易でない欠陥の識別を可能にする。

Table 4 Test results of slit flaws

No	Width $b(\mu\text{m})$	Depth $h(\mu\text{m})$	Length (mm)	h/b	IR	UT	XR
1	120	2000	10	2.80	○	○	○
2	120	1270	10	1.76	○	○	○
3	700	860	10	1.23	○	○	○
4	670	390	10	0.58	○	○	○
5	570	170	10	0.30	○	○	○
6	100	400	10	4.00	○	○	○
7	90	180	10	2.00	○	○	○
8	90	100	10	1.11	○	○	×
9	80	60	10	0.75	○	×	×
10	50	200	10	4.00	○	○	×
11	44	100	10	2.30	○	○	×
12	40	40	10	1.00	○	×	×
13	40	20	10	0.50	○	×	×
14	34	60	10	1.76	○	×	×
15	30	40	10	1.33	○	×	×
16	24	20	10	0.83	○	×	×
17	24	10	10	0.41	△	×	×

Table 5 Test results of pen-hole flaw

No	Width $b(\mu\text{m})$	Depth $h(\mu\text{m})$	h/b	IR	UT	XR
18	1000	5000	5.00	○	○	○
19	1010	1980	1.96	○	○	○
20	990	1100	1.11	○	○	○
21	1020	480	0.47	○	○	○
22	510	2000	3.92	○	○	○
23	510	900	1.76	○	○	○
24	500	480	0.96	○	○	○
25	500	180	0.36	○	○	○
26	200	400	2.00	○	○	×
27	200	420	2.10	○	○	×
28	200	180	0.90	○	×	×
29	200	90	0.45	○	×	×
30	130	200	1.53	×	×	×
31	120	140	1.16	×	×	×
32	120	25	0.71	×	×	×
33	110	50	0.45	×	×	×

$L=15\text{cm}$, distance of test piece and sensor
 ○ visible
 △ visible with uncertainty
 × invisible

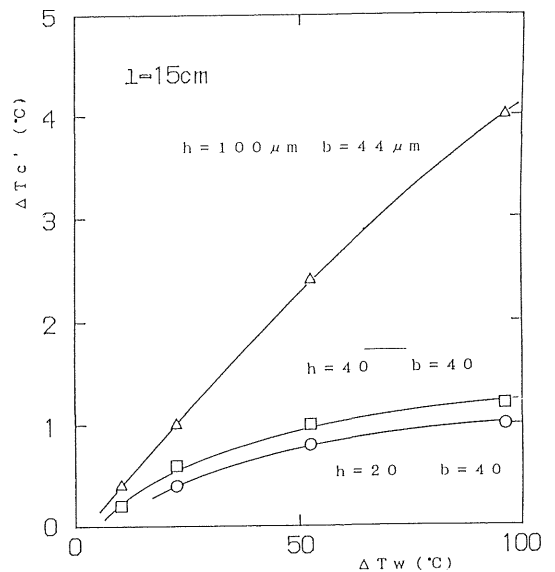


Fig. 11 The relation between ΔT_w and $\Delta T_c'$ with h and b as parameters (Stainless steel)

Fig. 12 は, ステンレス C の板で, 欠陥の深さと巾のアスペクト比 h/b と, 欠陥部と試験片表面の温度差 $\Delta T_c'$ の関係を, b をパラメーターとして, $\Delta T_w = 9.36^\circ\text{C}$ について示したものである。 h/b の大なるほど $\Delta T_c'$ は増加し, より鮮明な欠陥映像が得られる。

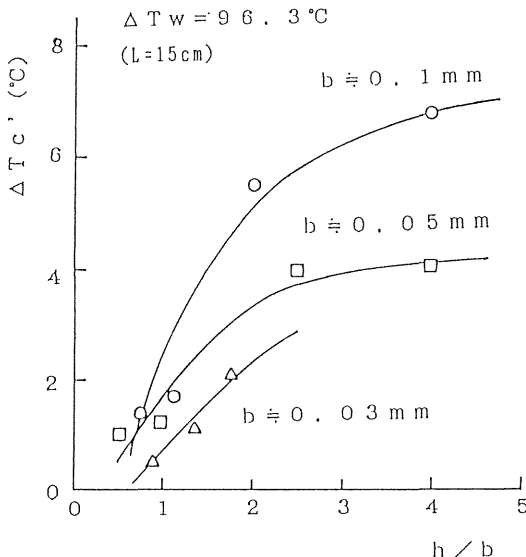


Fig. 12 The relation between h/c and $\Delta T_c'$ with b and a as parameters (Stainless steel)

Fig. 13 はステンレス板上に取り付けられた自然対流場の点状欠陥の温度分布のパターンが Fig. 14 の強制対流の温度パターンとどのように変化するかを求めたものである。熱流束は約 $0.5/0.1 (\text{W}/\text{cm}^2)$ と約 5°C の差があるが表面温度はほぼ同一である。上下のパターンにはほとんど差異がなく, 両者共に境界条件により影響を受けないことが明らかにされた。

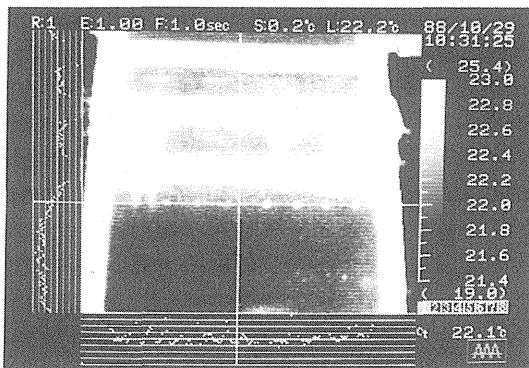


Fig. 13 Forced convection (velocity, $V=3.0\text{m/s}$
 $T_a=18.0^\circ\text{C}$ $T_w=44.6^\circ\text{C}$ $\Delta T=26.6^\circ\text{C}$)

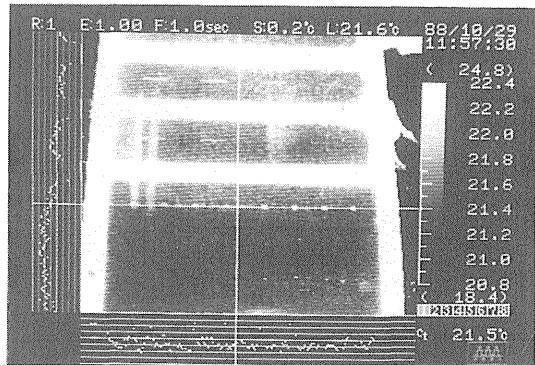


Fig. 14 Natural convection
 $T_a=18.0^\circ\text{C}$ $T_w=42.3^\circ\text{C}$

4. まとめ

- (1)赤外放射計を用いて, 試験片表面に存在する欠陥を検出することが出来た。検出は空洞放射効果によると考えられる。
- (2)試験片を加熱し試験片と周辺温度の温度差 ΔT_w を大きくすることにより, 欠陥部と欠陥部周辺の表面の温度差 $\Delta T_c'$ が増大し, CRT 上の欠陥映像が, より鮮明なものとなる。
- (3)欠陥のアスペクト比 h/b (h/d) が大きいほど, 欠陥部と欠陥部周辺の表面の温度差 $\Delta T_c'$ が増大し, 欠陥部の映像が鮮明であり, 検出が容易である。
- (4)加熱法により, 点状欠陥では, 直径 0.1mm ・深さ 0.01mm , V 溝線状欠陥では, 巾 0.02mm ・深さ 0.001mm , スリット状欠陥では, 巾 0.02mm ・深さ 0.02mm , セラミックスでは, 放射計の検出限界を下廻る $5\sim 10\mu\text{m}$ の微小な欠陥の検出が可能であった。
- (5)加熱することにより, 肉眼や粗さ計では検出できない, 表面加工された試験片の表面欠陥を CRT 上にサーモ像として検出することができた。これは, 欠陥部の放射率, 及び反射率の表面の値との差, 及び, V 溝部の凹凸の変化などによるものと考えられる。
- (6)表面の粗さおよび酸化膜の形成による放射温度のバラツキは, 欠陥部の放射温度差 $\Delta T_c'$ の検出にあたっての制約因子となり, とくに, $0.1\text{mm}\phi$ 以下の点状欠陥の識別を困難にする。

参 考 文 献

- (1) 岡本・他 4 名, 昭和63年年会予稿集, (1988-2), III-11 非破壊検査協会.
- (2) 岡本・他 5 名, センサ技術と応用シンポジウム講演論文集, 電気学会, (1988-5), C-2-1.
- (3) 岡本・他 4 名, 産業における画像センシングシンポジウム講演論文集, 非破壊検査協会, (1988-5), 3-5.
- (4) 岡本・他 6 名, 日本機械学会論文集, 55514A, (1989-6), 1324.
- (5) 岡本・他 6 名, 日本機械学会論文集, 55514A, (1989-6), 1319.
- (6) 岡本・他 6 名, 非破壊検査春期大会, (1989), M7, P219.