

赤外放射計による表面欠陥の検出

第3報 周辺温度による検出限界の影響

岡本芳三*, 神永文人*, 石井敏満**, 衛藤基邦***,
大岡紀一****, 金谷邦雄****, 江藤芳丸****, 黒川 賢*****

(平成2年8月28日受理)

Surface Flaw Detection by Means of Infrared Radiometer Part 3. Detection Limit Influenced by An Environment Temperature

Yoshizo OKAMOTO*, Fumito KAMINAGA*, Toshimitsu ISHII*, Motokuni ETO**,
Norikazu OHOKA***, Kunio KANAYA***, Yoshimaru ETO***, Takashi KUROKAWA*****

ABSTRACT—Infrared radiometer had been used for detecting the surface flaw of the material used. In case of visualizing the thermo graph of the radiometer, the isotherm pattern on the CRT display shows the total radiation energy and its correlated radiation temperature including emitted and reflective energy. The reports shows the properties of the total radiation energy which we call the radiosity and its properties for use in detecting surface flaws.

1. まえがき

赤外放射計は物体表面より放出される放射エネルギーをとらえ、遠隔リモートセンシングで、CRT上

に二次元のサーモ像として表示することが可能であり、最近産業の各分野において、盛んに利用されるようになってきた。

一般に、赤外放射計を用いて比較的放射率が低い材

*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

**茨城大学大学院工学研究科機械工学第二専攻（日立市中成沢町）

Graduate Student. Department of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering. Ibaraki University. Hitachi 316. Japan

***日本原子力研究所東海研究所高温工学部（茨城県那珂郡東海村白方）

Department of High-temperature Engineering. Toukai Institute. Japan Atomic Energy Research Institute. Toukaimura. Naka-gun. Ibaraki 319-11. 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）

Division of Japan Material Testing Reactor, Ooarai Institute, Japan Atomic Energy Research Institute. Ooarai-machi. Higashiibaraki-gun. Ibaraki 311-13. Japan

*****日本電気三栄（東京都小平市大沼町）

Nippon denki Sanei LTD.Co. Kodaira. Tokyo 187. Japan

料表面の放射エネルギーを測定する場合には、表面より放射するエネルギーと周辺より試料に入射し表面で反射するエネルギーの和としての、いわゆる射度 (Radiosity) を測定することになる。また、常温付近では、反射の割合が支配的になる場合が生ずる。その結果、放射計の支持する反射を考慮に入れた見かけの放射温度と、実際の温度との間には、差異が生ずる。また、周辺壁の温度 T_w が一定せず、反射性の高い面で構成される場合には、構成する面の間の多重反射の影響によって、試料表面の放射温度は、周辺壁の温度、放射および射出率等の関数となり正確な温度を求めることができなくなる。

このような状態の下での温度計測は、周辺の温度により大きな影響を受け、温度のむらや、ゆらぎを生じ、正確な温度の計測を行えない場合が多い。⁽³⁾ このような影響を考慮に入れて、著者らは、センサーと試料の間に、黒体壁より構成される周辺壁を設置し、その温度を一定に保つことにより、放射エネルギーを一定にし、放射温度計測の安定化をはかることが出来た。⁽²⁾

また、この手法を材料表面欠陥の検出に応用して、赤外放射計により、表面の微細な欠陥の検出に、すぐれた特性を示すことを明らかにした。^{(4)・(5)}

本報告は、センサーとして、Hg-Cd-Te よりなる光量子型放射温度計を用いて、赤外域波長における検出感度を考慮に入れた放射計の、温度による依存性を求めた。また、灰色近似の成立つ、種々の材料について、常温から400 K 付近までの放射温度を計測し、射出率および放射率を求めた。さらにこれまで計測されなかった、試料面上の射出率および放射率のばらつきについて測定した。また、周辺の温度を安定させた場における、赤外放射計の見る、表面および欠陥の見かけの放射温度 T'_s 、 T'_c 、および射出率 a_s 、 a_c の特性について検討したものである。また、これらの性質を利用して、周辺壁の温度 T_w を変えることにより、材料表面に存在する欠陥の検出感度の向上に応用した結果について報告する。

2. 実験装置と方法

Fig.1は実験装置の概略を示したものである。

実験に使用した試料は、放射率のばらつきを測定するために用いた試料としては、黒鉛、炭素繊維コンポジット (CCG)、Si-SiCセラミック、および黒色塗料面である。試料を加熱板上に設置し、常温~130℃の範囲で温度 T_s を変化させると共に、周辺壁温度

(T_w) が20~40℃の範囲で放射エネルギーを測定し、射出率 a と放射率 ϵ を求めた。⁽⁵⁾

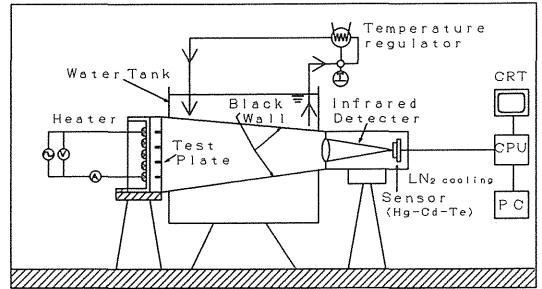


Fig.1 Test Rig

また、欠陥用試験片として表面にレーザー加工で各種形状の欠陥を取付けたステンレス鋼を用いた。

試料をヒーターで加熱し、一定温度に保持する。周辺壁を構成するフードの左端に試料を取付け、周辺壁温度 T_w を5~50℃の範囲で調節する。フードの内面には黒色のベルベット布が取付けられており、周辺壁を一定温度 T_w の黒体壁で構成するようにした。黒体フードの右端には、液体窒素で冷却したHg-Cd-Teの光量子型放射センサーが取付けられており、8~13μmの遠赤外域での放射エネルギーを検出し、2次元のサーモ像としてCRT上に表示する。

周辺壁よりの反射を考慮に入れた試料表面Sおよび欠陥部Cより放射されるエネルギー J_s 、 J_c は、次の様に表される。

$$J_s = \sigma \epsilon_s T_s^4 + \sigma \rho_s T_w^4 = \sigma a_s T_s^4 = \sigma T'_s$$

$$J_c = \sigma \epsilon_c T_c^4 + \sigma \rho_c T_w^4 = \sigma a_c T_c^4 = \sigma T'_c$$

ここで、 T は絶対温度、 σ はステファンボルツマン定数、 ϵ は放射率、 ρ は反射率、サフィックスのS、Cは試料表面および欠陥部を示す。また、 ϵ_s は試料の垂直方向より θ° 傾いた方向の指向性放射率、 ρ_s は黒体周辺壁より入射し、同じ方向に反射する指向性反射率を示す。 a_s 、 a_c は反射を考慮に入れた放射率、すなわち射出率、 T'_s 、 T'_c は見かけの放射温度を示しており、 ϵ_s 、 ϵ_c 、 ρ_s 、 ρ_c 、 T_s 、 T_c 、 T_w 、 θ の関数であり、真の温度 T_s とは異なった表示をする。一般に、灰色近似の成立する面では $\epsilon_s + \rho_s = 1$ である。この場合には、 $T_s = T_w$ では $a_s = 1$ である。

一般にセンサーであるHg-Cd-Teは $\lambda = 8 \sim 13 \mu m$ の波長範囲で、Fig.2に示すような山形の分布をもつ検出特性を有している。300 Kにおける波長に対

する分光放射エネルギー $E_B(\lambda)$ とセンサーの検出エネルギー $E(\lambda)$ の分布を図に示す。

各温度 T における $E(\lambda)$ および $E_B(\lambda)$ より, 全波長で積分した黒体およびセンサーの放射エネルギー q_B, q を求めたのが Fig.3 である。図より明らかなように, q/q_B は温度と共に増加し, 約 400 K 付近で最大値を持つ曲線となる。

その結果, 一般に黒体のステファンボルツマンの式 $q_B = \sigma T^4$ に対して, 実際の検出エネルギー q は $q' = AT^n$ の関係で示される曲線となる。Fig.4 は $E(\lambda)$ を 8~13 μ の波長範囲で積分して求めたエネルギー q と (3) 式より求めたエネルギー q' の比と T の関係について示したものである。

$$q' = 1.0^{-8.11} T^{4.09} \dots (3)$$

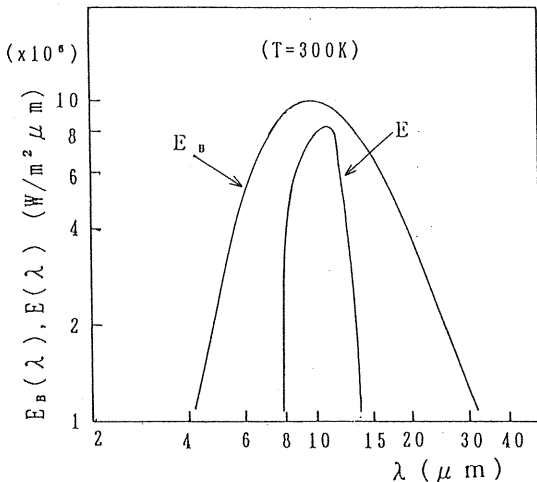


Fig.2 Radiation energy distribution of black body and Hg-Cd-Te Sensor

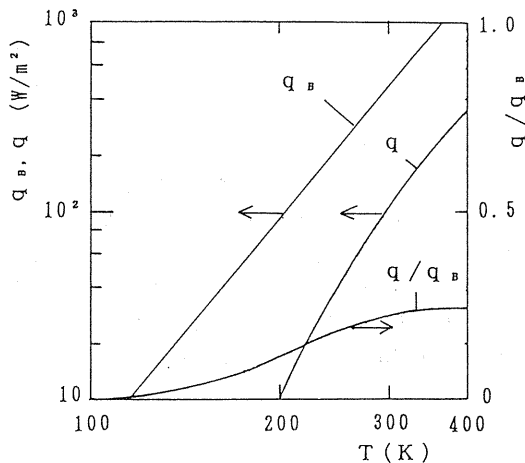


Fig.3 The relation between T and $q_B, q, q/q_B$

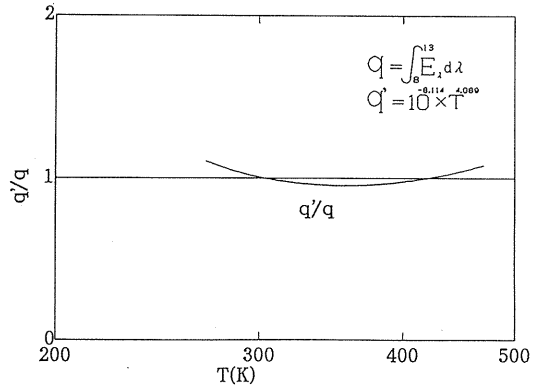


Fig.4 The relation between T and q'/q

3. 赤外放射計の検出特性

測定に使用した光量子型放射温度計は, 液体窒素により冷却された, Hg-Cd-Te センサーより成っており, 主要仕様を以下に示す。

検出波長帯 ; 8~13 μ m

許容温度範囲 ; -50~2000°C

計測誤差 ; 0.1~70°C

焦点距離 ; 15cm~ ∞

4. 放射温度 T_s と射出率 a_s の特性

灰色近似の成立する材料について, 0~1000°C の範囲で ϵ_s が一定であると仮定して種々の ϵ_s, T_s, T_a に対して, T_s, a_s がどのような特性を示すか検討する。(1) 式は次のように表される。

$$a_s = \epsilon_s + (1 - \epsilon_s) (T_a / T_s)^4 \dots (4)$$

Fig.5 は, 射出率 a_s が, T_s と ϵ_s によりどのような値にあるかを示したものであり, 周辺の温度 $T_a = 20$ °C の場合である。一般に, a_s は, T_s が大きくなると共に減少する。 T_a より T_s が十分に大きいと, a_s は, 実線に示すように ϵ に漸近する曲線となる。また, T_s が T_a に等しくなると, $a_s = 1$ となる。 T_s が減少すると a_s は 1 より大きくなり, ϵ の大なる程, 小さい値を示す。一点鎖線は a_s / ϵ_s を一定にした場合の曲線である。 a_s / ϵ_s の値は ϵ が小さくなる程, T_s は高温側にずれる。 $a_s / \epsilon_s = 1.02$ の場合, すなわち, a_s と ϵ_s の差が 2% 生ずるときの T_s は $\epsilon_s = 0.2$ では 820°C, $\epsilon_s = 0.8$ では 230°C である。この様に, 放射温度は, 放射率が低いほどかなりの高温にまで及び, 反射の影響を避けることはできないことを示している。

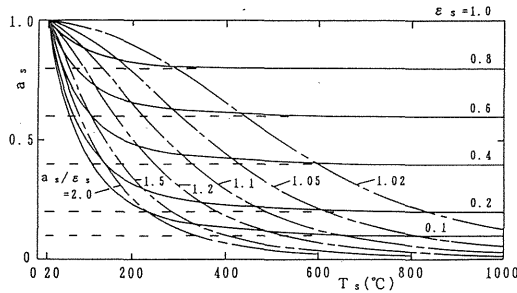


Fig.5 The relation between T_s and a_s .

Fig.6は周辺温度 T_s が 20°C の場合の、試料の温度 T_s' と放射温度 T_s' の関係を示したものである。 $\epsilon_s = 1$ では反射の影響がないために、 $T_s = T_s'$ となる。 T_s が 20°C 以上では ϵ_s が小さくなると、 T_s' の値は低下し、 $\epsilon_s = 0.1$ では反射の影響が強く表れるために、 T_s を増加しても、 T_s' の値はそれほど、増加しない。

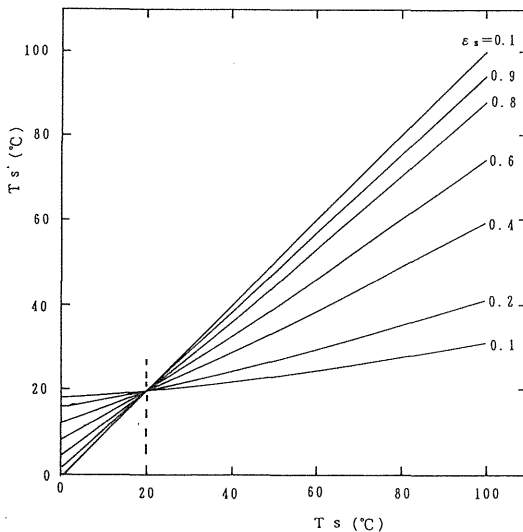


Fig.6 The relation between T_s and ΔT_s ($T_s = 20^\circ\text{C}$)

Fig.7は $T_s = 20^\circ\text{C}$ の場合の室温 T_a と反射を考慮に入れた放射温度 T_s' と考慮しない場合の温度 T_s との差 $\Delta T_s'$ の間の関係を示す。 $\Delta T_s'$ は次の様に表される。

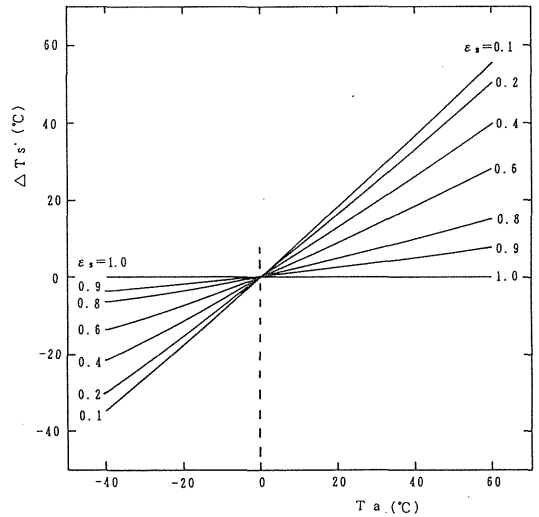


Fig.7 The relation between T_a and $\Delta T_s'$ ($T_s = 20^\circ\text{C}$)

$$\Delta T_s' = T_s - T_{s0}' = \left(\sqrt[4]{\epsilon_s + (1 - \epsilon_s) \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4} - \sqrt[4]{\epsilon_s} \right) \cdot T_s \dots (5)$$

$T_s = 20^\circ\text{C}$ と室温 T_a の差が大なる程、反射の影響により $\Delta T_s'$ は増加し、 $T_s = 20^\circ\text{C}$ を境にして、 $\Delta T_s'$ はマイナスからプラスに逆転して増加している。また、 ϵ が小さくなる程、反射の影響が強く表われ $\Delta T_s'$ は大きい値を示すようになる。

5. 射出率、放射率のばらつきに関する実験結果

Fig.8は試料壁温 T_s と射出率 a の関係を4種の材料について求めたものであり、壁温 T_s は約 28°C である。白印はステファンボルツマンの式 ($n = 4$) で整理した値であり、黒印は n がFig.4に示したように T の関数である場合の結果である。いずれの場合も、 $T_s = 28^\circ\text{C}$ の $a = 1$ の値より単調に減少し、 T_s が大なる程、放射率 ϵ に漸近する曲線となっている。また、白印と黒印の値は1%以内で一致しており、両者の間の差はほとんど表れず、この温度範囲ではステファンボルツマンの式が使用出来ることを示している。

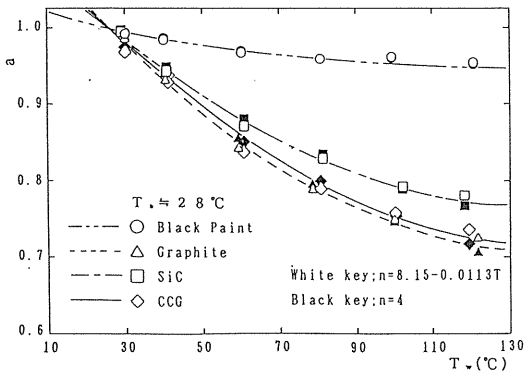


Fig.8 The relation between T_s and a

試料の放射率を ϵ , および反射率を ρ とすると, 今回使用した灰色近似の成立つ材料では, $\epsilon + \rho = 1$ であり a と ϵ , ρ の間に次の関係が成立する。

$$a = \epsilon + \rho (T_a^4 / T_s^4) = \epsilon + (1 - \epsilon) (T_a^4 / T_s^4)$$

この式から

$$\epsilon = \frac{a - (T_a^4 / T_s^4)}{1 - (T_a^4 / T_s^4)}$$

が求まる。

Fig.9は T_s が40~120°Cの範囲における, 放射率 ϵ の値を示す。指数 n に温度依存がある場合と $n = 4$ の場合との間にはほとんど差は表れていない。いずれも, 温度と共に漸次増加する値を示している。また, 実験結果によれば, T_s と T_a との差が20°C以下では ϵ のばらつきが大きく, 常温付近では T_s と T_a との差は少なくとも20°C以上とる必要があることがわかった。

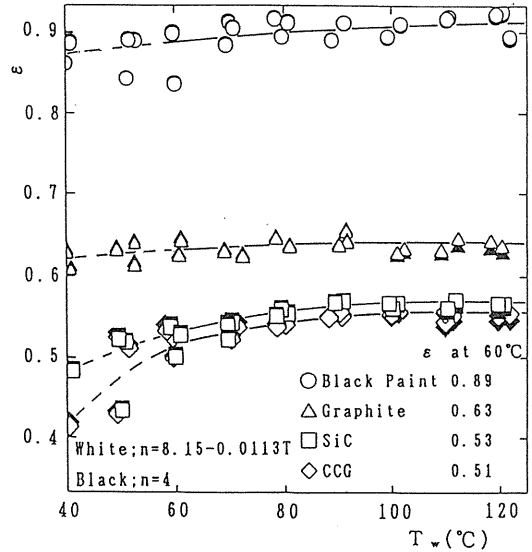


Fig.9 The relation between T_s and ϵ ($T_a = 20, 30, 40^\circ\text{C}$)

Fig.10は, CRT上に表示されたサーモ像より, 数列の水平線上の20点の a の分布より求めたばらつき Δa (rms) の温度による依存性を示す。黒鉛とCCGの場合は温度と共に Δa は増加しているが, SiCと黒色ペンキの値はわずかに増加しその値は小さい。

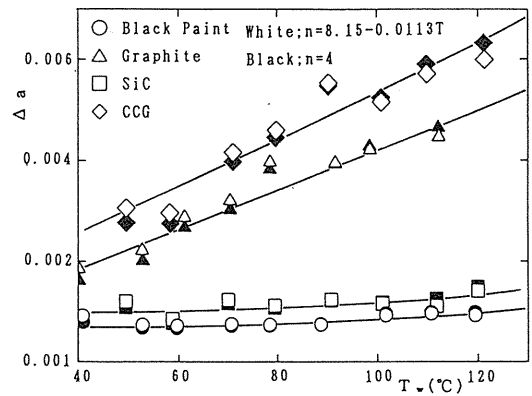


Fig.10 The relation between T_s and Δa (rms) ($T_a = 20^\circ\text{C}$)

Fig.11は a より求めた ϵ のばらつき $\Delta \epsilon$ (rms) と T_s の関係を示す, ばらつきの最も大きいのは, CCGであり, 炭素繊維の網目の粗さの分布が放射温度のばらつきとして表れている。 $\Delta \epsilon$ は, 黒鉛, SiC, 黒色ペンキの順に小さくなる。 T_s が60°Cでは, CCGの $\Delta \epsilon / \epsilon$ は1.5%の値をとり, 最もばらつきの少ない黒色ペンキでは, $\Delta \epsilon / \epsilon$ は, 0.1%程度の値をとる。

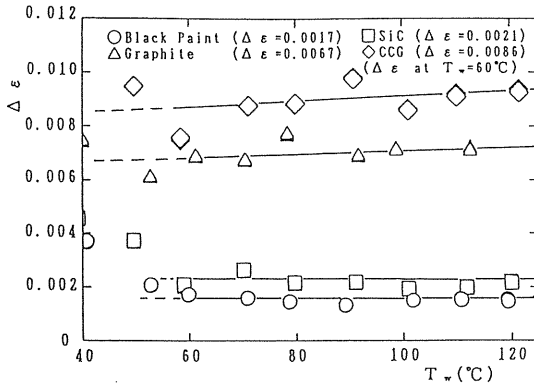


Fig.11 The relation between T_s and $\Delta \epsilon$ (rms) ($T_a=20^\circ\text{C}$)

6. 欠陥付きステンレス鋼の放射率 a_s と見かけの放射温度 T'_s

著者らはこれまで、赤外放射計を使用して、表面欠陥まわりの放射エネルギーの分布を計測し、試料を加熱・冷却するなど熱流場を与えることにより、映像を鮮明化することが可能であることを示した。(6)・(7)

これに対して、試料を加熱・冷却することなく、映像感度を向上させるためには、試料温度 T_s と周辺の温度 T_a の間に適当な差を与える方法が考えられる。今回は、周辺壁の温度 T_a を変えることにより、欠陥部の検出限界が向上する方法について検討した。試料の温度 T_s を 20°C に保ち、 T_a を $10\sim 50^\circ\text{C}$ 変化させて、欠陥の放射温度 T'_s と試料表面の放射温度 T_s の差 $\Delta T'_{c-s}$ を計測した。その結果をFig.12,13に示す。

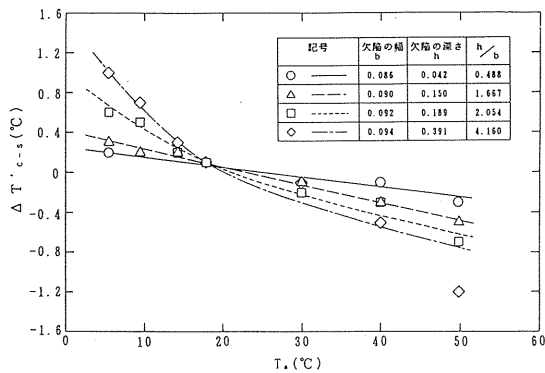


Fig.12 The relation between T_s and $\Delta T'_{c-s}$ (slit flaws, $T_a=20^\circ\text{C}$)

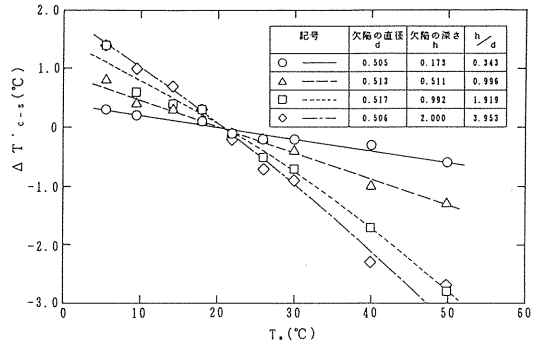


Fig.13 The relation between T_s and $\Delta T'_{c-s}$ (pinhole flaws, $T_a=20^\circ\text{C}$)

線上及び点上欠陥は T_s を大にすることによりほぼ、 $T_s=20^\circ\text{C}$ に近い温度で $\Delta T'_{c-s}$ はプラスからマイナスに変化し、 T_s と T_a の温度差の大なる程、 $\Delta T'_{c-s}$ は大になり、欠陥の映像は鮮明化し検出限界を向上させる。また、 T_s が 20°C 附近になると、 $\Delta T'_{c-s}$ がゼロになり、CRT上の欠陥映像は消えて一様な温度画像となる。試料を加熱・冷却することなく、周辺温度 T_a を変えることにより、欠陥の識別限界を向上させる有効な手段である。

7. むすび

(1) 赤外放射計により、周辺の温度として、均一温度の黒体壁を構成せしめ、反射を含む射度を計測した。測定は $T_s - T_a = 20^\circ\text{C}$ 以上で実験を行う必要がある。

(2) 射出率 a より、放射率 ϵ の値が、計測された。また、波長依存性を考慮した場合と $n=4$ のステファンボルツマンとの結果の間にはほとんど差異のないことを明らかにした。

(3) 表面の空間上のバラツキを測定したところ、凹凸の多いCCG面では Δa 、 ϵ は共に大きい値をとり、 $\Delta \epsilon / \epsilon$ は1.5%であるのに対して、黒色ペンキではその値が0.1%程度でばらつきの少ないことを明らかにした。

(4) 欠陥付きステンレス鋼について、放射率 a_s と見かけの放射温度を計測した。その結果、 $T_s=T_a$ において $T'_s=T_s$ となり両者の a_s は一致し、識別に限界を与えることを明らかにした。

参 考 文 献

- (1) 日本写真計測学会; 遠赤外リモートセンシング
(鹿島出版), (1987).
- (2) 岡本他; 第26回日本伝熱シンポジウム (1989),
D-111, P178.
- (3) 岡本他; S I C E' 89 (1989), J S, 44-2, 1'
443.
- (4) 岡本他; 機論, (1989), 514A, N o, 88-1407 B
P1319.
- (5) 岡本他; 機論, (1989), 514A, N o, 88-1655
B, P1324.
- (6) 岡本他; 日立地方講演会' 06 (1989), P106.
- (7) 岡本他; 第27回日本伝熱シンポジウム (1990).