分光放射輝度の方向依存性を利用した放射率補正放射測温法†

井 内 徹*・鶴川屋 智之**・田 添 晃*

Emissivity Compensated Radiation Thermometry Using Directional Radiances

Tohru IUCHI*, Tomoyuki TSURUKAWAYA** and Akira TAZOE*

Emissivity of a metal is fairly low in general. Due to an oxidation film formed on the metal surface, however, its emissivity changes rapidly, and large errors in the temperature measurement can be caused. This is a serious problem for the radiation thermometry of metals. In order to eliminate the error due to surface conditions of the targets, the authors propose a new method based on their findings that the apparent emissivity of a metal surface depends on the direction from which the target is looked at. This means that the radiance of the target does not obey Lambert law. The proposed method uses the ratio of radiance measurements taken at two different angles to compensate the emissivity or the emissivity ratio. This method is promising for the in-line use at metal manufacturing processes such as steels or aluminums.

Key Words: radiation thermometry, emissivity, metal, oxidation film, temperature

1. はじめに

放射測温技術において放射率の変化は測温誤差を生じさせる深刻な問題である。そのために放射測温法に関する多くの研究は放射率問題を克服する手法、すなわち放射率問題低減法に関わっている。放射率問題低減法には2つの手法に大別できる。1つは測定対象と反射体を何らかの幾何学的配置に設定して、その間の放射と反射の相互作用から対象物の放射率を推定するかまたは放射率の影響を小さくする、いわゆるハイブリッド手法とよばれる手法である^{1,2)}。もう1つは2波長ないしそれ以上の波長における放射輝度スペクトル情報から対象物の温度を計算する、いわゆる多波長温度計とよばれている手法である^{3~5)}。

本研究は金属を対象として、その放射輝度の角度依存性を利用して対象物体の放射率を求め、真温度を計算する新しい原理に基づく放射測温法に関するものであり後者の範疇に属する手法である^{6~8)}。

金属の放射率は一般に小さいが、その面法線から測った天頂角 θ が 60° あたりから徐々に増大し、 80° すぎでピーク(法線方向の放射率の数倍)に達し、その後急激に減少する。一方、金属表面の酸化により酸化被膜が生成したとき、放射率は一

般に大きな値を示すが、同時に角度 θ の増大とともに単調に減少する。これらの性質は金属が電気導電体として、また酸化金属表面は電気的不導体として、それぞれ光学定数の変化に対応しており、Maxwellの電磁波理論によって説明できる現象である⁹⁾。また、これら試料は放射輝度に関してLambertの法則に従わない放射体であることを示している。そこで、2つの異なる角度、たとえば 20° と 80° での対象物の分光放射輝度の比をとると、その値は金属酸化による表面状態に強く依存しており、したがって対象物の分光放射率を推定する優れた指標となる。

上述した現象に基づいて、筆者らは放射率補正放射測温法を提案した。この方法は鉄鋼やアルミニウムなど金属製造工程でのオンライン温度計測に有望である。

2. 原理

光学的に滑らかで均質な物質表面に電磁波が入射する場合、その反射率はMaxwellの電磁波方程式を解くことによって、各偏光成分について求められている¹⁰⁾。この解から、物質表面法線に対し θ 方向の波長 λ における分光放射率 $\epsilon_\lambda(\theta)$ は次式のように示される。

$$\epsilon_\lambda(\theta) = \frac{1}{2} \epsilon_{\lambda,s}(\theta) \left[1 + \frac{a^2 + b^2 + \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta \cdot (a^2 + b^2 + 2a \sin \theta \tan \theta + \sin^2 \theta \cdot \tan^2 \theta)} \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_{\lambda,s}(\theta) = \frac{4a \cdot \cos \theta}{a^2 + b^2 + 2a \cdot \cos \theta + \cos^2 \theta} \quad (2)$$

† 第34回計測自動制御学会学術講演会で発表(1995・7)

* 東洋大学工学部 川越市鯨井2100

** (株)ミットヨ 川崎市高津区坂戸1-20-1

* Faculty of Mechanical Engineering, Toyo University, Kawagoe

** Mitutoyo Co., Takatsu-ku, Kawasaki

(Received March 13, 1997)

(Revised November 28, 1997)

ここで、 $\varepsilon_{\lambda,s}(\theta)$ は入射面に対し垂直方向に偏光した角度 θ の放射率。a, bは θ と複素屈折率 $\tilde{n}=n-i\kappa$ の関数で次式で表せる。

$$2a^2 = \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2\kappa^2} + (n^2 - \kappa^2 - \sin^2\theta) \quad (3)$$

$$2b^2 = \sqrt{(n^2 - \kappa^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2\kappa^2} - (n^2 - \kappa^2 - \sin^2\theta) \quad (4)$$

(1)式において、複素屈折率の実数部分の屈折率 n および虚数部分の減衰係数 κ を具体的に与えれば放射率の方向特性を知ることができる。一般に、 κ が大きければ物質は金属的(導電的)性質を示し、逆に κ が小さくなるにつれて絶縁的(誘電的)性質を示すようになる。Fig.1(a)に放射率 $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ の方向特性が複素屈折率によって変化する特徴を示す。

金属のような導電体の方向放射率は一般に低い角度 θ の大きいところで最大値をとる。一方、金属酸化物のような非導電体では方向放射率は高く、角度 θ が 60° くらいまでは一定の値を示し、その後急激に零に収斂する。Fig.1(b)はこの現象を垂直方向の放射率 $\varepsilon(0)$ を基準にして規格化した指標 $R_e = \varepsilon_{\lambda}(\theta)/\varepsilon_{\lambda}(0)$ で示した。金属的性質は、試料面法線に対し角度 θ が 60° を越えるあたりから R_e が急激に増大し、 80° 付近で最大になる。一方、金属酸化物のような絶縁体は θ の増大とともに R_e が単調に減少する。

$$L_{\lambda}(\theta_1) = \varepsilon_{\lambda}(\theta_1) \cdot L_{\lambda,b}(T) \quad (5)$$

$$L_{\lambda}(\theta_2) = \varepsilon_{\lambda}(\theta_2) \cdot L_{\lambda,b}(T) \quad (6)$$

ここで、 $L_{\lambda,b}(T)$ は波長 λ 、温度 T における黒体分光放射輝度である。

上2式の分光放射輝度比を R_e とすると、次式のように角度 θ_2, θ_1 方向の放射率の比になる。

$$R_e = L_{\lambda}(\theta_2)/L_{\lambda}(\theta_1) = \varepsilon_{\lambda}(\theta_2)/\varepsilon_{\lambda}(\theta_1) \quad (7)$$

金属表面の酸化が進行すると、分光放射率 $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ はFig.2に示すように増大すると予想される。

したがって、金属酸化の進行に伴って、 R_e と $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ の関係はFig.1とFig.2の特性からFig.4(a)のようであることが予測される。また、Fig.2の特性から2つの波長 λ_1 と λ_2 (ただし $\lambda_1 < \lambda_2$)での放射率比 $\varepsilon_R = \varepsilon_{\lambda_1}(\theta)/\varepsilon_{\lambda_2}(\theta)$ は酸化の進行とともにFig.3のように減少する傾向を示すから、 R_e と ε_R の関係はFig.4(b)のようになると推定できる。

上述のような金属酸化の進行に伴って、Fig.4(a)または(b)の関係を構築することができれば、分光放射輝度比 R_e を測定

Fig. 1 Directional emissivity

鋼板のような実用金属の表面は、厳密な意味で光学的に滑らかであるとはいえないが、酸化前の状態は上記放射率特性について金属的性質の特徴を保持すると考えられる。一方、金属が加熱され、表面酸化が進行するにつれ、表面は金属的な性質から絶縁体的な性質に変化する。特に角度 θ の大きなところで R_e の変化が大きい。

そこで、温度 T の試料について、異なる2つの角度 θ_1, θ_2 方向の、波長 λ の分光放射輝度をそれぞれ $L_{\lambda}(\theta_1)$ 、 $L_{\lambda}(\theta_2)$ とすると($\theta_1 < \theta_2$),

すれば直ちに分光放射率 $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$ を求めることができ、この値を(5)式ないし(6)式に代入して真温度 T が得られる。これを ε_{λ} -補正放射测温法とよぶことにする。同様に R_e の測定から放射率比 ε_R を求めることもできる。この場合、(8)式のよく知られた2色比放射計の公式に ε_R を代入することにより真の温度 T が得られる⁶⁾。これを ε_R -補正放射测温法とよぶことにする。

$$R = \frac{L_{\lambda_1}(\theta)}{L_{\lambda_2}(\theta)} = \varepsilon_R \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp\left(-\frac{c_2}{\Lambda T}\right) \quad (8)$$

ここで、 $\Lambda = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ 、 c_2 =Planckの第2定数。

Fig. 2 Change of ϵ_λ with increasing oxidation Fig. 3 Change of ϵ_R with increasing oxidation (a) R_e and ϵ_λ (b) R_e and ϵ_R Fig. 4 Predicted relation (a) between R_e and ϵ_λ (b) between R_e and ϵ_R

R_e は金属が酸化していく過程で導電体からしだいに非導電体に変化していくときに、放射率の方向特性がその物性的変化に対応して変化することを無次元の指標で表したものである。したがって、 R_e は温度計測とは別に表面酸化挙動の指標として利用できる可能性もある。

3. 実験

Fig.5は測定原理を確認するための実験装置である。測定のために3台の放射計を用いた。波長 λ_1 と λ_2 における放射率比を測定するために角度 $\theta_1=20^\circ$ に2台の放射計を設置した。その1つの放射計のセンサはInGaAsで実効検出波長 λ_1 は $1.5\mu\text{m}$ 、もう1つの放射計はLiTaO₃焦電素子をセンサとし、実効検出波長 λ_2 は $3.4\mu\text{m}$ である。第3番目の放射計は同様に実効検出波長 λ_2 を $3.4\mu\text{m}$ としたLiTaO₃焦電素子で角度 $\theta_2=80^\circ$ に設置した。

$\theta_1=20^\circ$ と $\theta_2=80^\circ$ での分光放射輝度 $L_{\lambda_2}(\theta_1)$ 、 $L_{\lambda_2}(\theta_2)$ は後2台の放射計(LiTaO₃)で測定してその比 $R_e=L_{\lambda_2}(\theta_2)/L_{\lambda_2}(\theta_1)$ を得た。2波長放射率比 $\epsilon_R=\epsilon_{\lambda_1}(\theta_1)/\epsilon_{\lambda_2}(\theta_1)$ は前2台の放射計(InGaAsとLiTaO₃)による $\theta_1=20^\circ$ での測定から得た。真温度の計測は試料表面に融着させたK型熱電対で求めた。角度が 80° でも放射計による受光面積に充分余裕を持つために試料サイ

Fig. 5 Experimental apparatus

ズを直径88mmにした。試料として酸化しやすく放射率が大幅に変化する冷延銅板を選んだ。試料面の温度800Kあたりで、温度分布は中心から30mm以内で $\pm 5\text{K}$ 程度であった。熱電対による温度指示誤差を見積もるために試料に黒色塗料を塗布し、InGaAs放射温度計で表面温度を測定し、これを真温度とみなしてK型熱電対による温度指示と比較した。両者の温度差は、800K付近で約7Kである。試料表面の温度および

試料面内温度分布はほぼ定常的な偏りとみなされるので、常に試料面の一定位置にK型熱電対を溶接することによって測定の実験に際し温度補正措置はとらなかった。Table1の放射率が実際より若干高い値を示しているところに温度補正をしなかった影響が表れているが、誤差評価に大きな誤差を生じることはない。垂直方向から見た場合の放射計の受光面積は直径5mmであるが、角度80°方向からみた場合、受光面積は長楕円になり、長軸の長さは約28mmになる。

Fig.6は試料を723Kまで加熱させたときの、酸化の進行とともに方向放射率 $\epsilon_\lambda(\theta_1)$ と $\epsilon_\lambda(\theta_2)$ の変化およびその比 R_e の変化をプロットしたものである。酸化の初期において角度80°での放射率は20°での放射率より高く、(7)式の R_e は高い値にある。酸化の進行とともに放射率の方向特性は急速に変化し、

Fig. 6 Experimental results of $\epsilon_\lambda(\theta_1)$ and $\epsilon_\lambda(\theta_2)$ at $\lambda=3.4\mu\text{m}$ and the ratio $R_e=\epsilon_\lambda(\theta_1)/\epsilon_\lambda(\theta_2)$

20°での放射率値が80°の放射率値を逆転する。したがって、 R_e は高い値から急速に減少する。これらの結果は、Fig.4(a)の測定原理の予測に一致する。

Fig.7はFig.6と同様に試料の酸化進行に対して角度20°での分光放射率 $\epsilon_{\lambda 1}(\theta_1)$ と $\epsilon_{\lambda 2}(\theta_1)$ の変化およびその比 ϵ_R の変化をプロットしたものである。この場合も試料表面の酸化の成長とともに分光放射率 $\epsilon_{\lambda 1}(\theta_1)$ と $\epsilon_{\lambda 2}(\theta_1)$ は急激に増大した。短波長の $\epsilon_{\lambda 1}(\theta_1)$ はピーク値をとった後、減少した。一方、長波長の $\epsilon_{\lambda 2}(\theta_1)$ はピーク値をとることなく増加し続けた。この現象のため、分光放射率比 ϵ_R は酸化初期には急速に上昇するものの、ピーク値を示した後、減少に向かった。この現象は原理に基づくFig.3の予測と異なるが、その原因を詳細に考察した(4. 考察を参照)。

Fig. 7 Experimental results of $\epsilon_{\lambda 1}$ and $\epsilon_{\lambda 2}$ at $\theta=20^\circ$ and the ratio $\epsilon_R=\epsilon_{\lambda 1}/\epsilon_{\lambda 2}$

Fig. 8 Experimental relation between R_e and ϵ_λ

Fig. 9 Experimental relation between R_e and ϵ_R

Fig. 10 Online measurement of ϵ_λ and T

Fig.8にFig.6とFig.7から得られる R_e と $\epsilon_\lambda(\theta)$ の間の特性式を示した。ここでは、 R_e と角度 20° での分光放射率 $\epsilon_{\lambda_1}(\theta_1)$ 、 $\epsilon_{\lambda_2}(\theta_1)$ 、および角度 80° での分光放射率 $\epsilon_{\lambda_2}(\theta_2)$ の関係式がプロットされている。この関係は原理の予測Fig.4(a)に対応するものである。この関係式から分光放射輝度の測定から R_e を求めれば、放射率 ϵ_λ が得られ、放射率補正による放射测温法が可能であることが示された。

Fig.9は同様にFig.6とFig.7から得られる R_e と ϵ_R の特性式である。この場合も R_e を計測することによって2色温度計の放射率比 ϵ_R を求めることができる。

Fig.10はFig.8の関係をもとにして温度 T と放射率 $\epsilon_\lambda(\theta)$ のオンライン測定実験した結果の例である。K型熱電対によって測定された温度とそれにより計算された放射率と、本原理に基づいて得られた温度と放射率が試料の加熱とともに変化する様子をとらえた。放射率 ϵ_λ の大幅な変化にもかかわらず原理に基づく温度値が実際の温度によく一致することが示されている。Fig.11は同様にFig.9の関係をもとにした温度 T と放射率比 ϵ_R のオンライン測定実験結果である。ここでも ϵ_R の大幅な変化に対して原理に基づく温度と実際の温度がよく一致している。

4. 考察

Fig.7で ϵ_R にピーク値を生じる原因は酸化膜成長に伴う干渉現象によるものと考えられる¹¹⁾。すなわち波長 λ_1 と λ_2 の放射率値がいずれも酸化膜生成とともに増大するが、酸化膜厚と波長との関係で短波長 λ_1 の放射率の方が先に干渉によるピーク値現象をとったあと減少に向かい、一方長波長 λ_2 の放射率は増大し続けるために生じていることが明らかである。しかし、Fig.9の R_e と ϵ_R の特性式は R_e の測定値に対し ϵ_R は1つの値しか存在しないので本測定原理は成立する。

Fig. 11 Online measurement of ϵ_R and T

Fig.6をみると R_e は酸化の進行とともに減少するが、最後は約0.55に収斂した。この値のところでFig.8およびFig.9に示されるように分光放射率 $\epsilon_{\lambda_1}(\theta)$ と $\epsilon_{\lambda_2}(\theta)$ 、および分光放射率比 ϵ_R は変動する。この現象もまた酸化膜による干渉によって生じていると考えられるが、この R_e 値のところでは放射率がかなり高くなっているため、あるいは放射率比の変化が大きくないため、温度に変換したときの测温誤差はそれほど大きくはならない。しかし、この干渉現象は本測定原理にとって好ましいことではないので、この現象を避ける手法が必要である。その有力な手法の1つはFig.7に2波長の分光放射率の挙動から推定できるように長波長側のセンサを利用することである。この点に関して詳細な議論と手法の開発は別途報告する¹²⁾。

Table 1に多量の冷延鋼板を用いて再現実験を試みた結果をまとめた。ダル表面とブライト表面では初期条件としての地肌の違いが特性曲線に若干の差を生じるので別々にまとめた。ダル鋼板を例にとると試料の放射率が0.28から0.86まで大幅に変化する間に、本原理による測定で $\lambda_1 = 1.5\mu\text{m}$ での放射率の測定相対誤差 $|\Delta\epsilon/\epsilon|$ および温度800Kでの相対誤差 $|\Delta T/T|$ はそれぞれ6.5%、0.5%であった。同様に2波長 $1.5\mu\text{m}$ と $3.4\mu\text{m}$ を用いたとき、試料の放射率比 ϵ_R は3から0.7まで変化するが、 ϵ_R の測定相対変化 $|\Delta\epsilon_R/\epsilon_R|$ は5.6%でそれによる温度の相対誤差 $|\Delta T/T|$ は0.8%であった。ここで相対誤差 $|\Delta\epsilon/\epsilon|$ はFig.8の R_e と $\epsilon_\lambda(\theta)$ の間の特性式を用い、 R_e の測定から得られる $\epsilon_\lambda(\theta)$ 値と、別途熱電対による温度測定とそのときの放射計出力から計算で求められる放射率の差を $\Delta\epsilon$ とし、 $\epsilon_\lambda(\theta)$ 値を分母の ϵ としたものである。

同様に相対誤差 $|\Delta\epsilon_R/\epsilon_R|$ は、Fig.9の R_e と ϵ_R の間の特性式を用い、 R_e の測定から得られる ϵ_R 値と、別途熱電対による温度測定とそのときの放射計出力から計算で求められる放射率比の差を $\Delta\epsilon_R$ とし、前記 ϵ_R 値を分母として求めた。温度の相対誤

Table 1 Measurement errors by the method for bright and dull surface of cold rolled steel sheets (T=800K)

ϵ_λ -compensated pyrometer	Wavelength $\lambda(\mu\text{m})$	Specimen type	Emissivity ϵ_λ	Emissivity error $\left \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \right _{\text{max}}$	Temperature error $\left \frac{\Delta T}{T} \right _{\text{max}}$
	1.5	dull	0.28 ~ 0.86	6.5%	0.5%
		bright	0.25 ~ 0.94	10.1%	0.8%
	3.4	dull	0.15 ~ 0.96	9.3%	1.6%
		bright	0.14 ~ 0.97	8.0%	1.4%
ϵ_R -compensated pyrometer	Wavelength $\lambda_1, \lambda_2(\mu\text{m})$	Specimen type	Emissivity ratio ϵ_R	Error of emissivity ratio $\left \frac{\Delta\epsilon_R}{\epsilon_R} \right _{\text{max}}$	Temperature error $\left \frac{\Delta T}{T} \right _{\text{max}}$
	1.5	dull	0.7 ~ 3.0	5.6%	0.8%
	3.4	bright	0.8 ~ 2.9	8.1%	1.2%

差 $|\Delta T/T|$ は、熱電対の指示値 $T=800\text{K}$ を真値とし、本原理によって得られる温度との差を ΔT として、熱電対の指示値 T を分母にして求めたものである。

ϵ_R -補正放射测温法は、 ϵ_λ -補正放射测温法とほぼ同等の測定精度を確保しているが、計算処理の煩雑さから、 ϵ_λ -補正法以上に積極的に採用すべき手法ではないことは、通常の2色比放射测温法と同様である。

5. 結論

本方法、すなわち2つの異なる方向から分光放射輝度を測定しその比 R_ϵ を用いて測定対象の分光放射率を補正する放射测温法 (ϵ_λ -補正放射测温法) または分光放射率比を補正する2色型放射测温法 (ϵ_R -補正放射测温法) は酸化プロセスにおける金属の新しい原理に基づく温度計測技術として有望であることを確認した。本方法において分解能の観点から、放射計の第1の設定角度 θ_1 は試料面法線方向から 60° まで、特に法線方向から 30° までが望ましい。また第2の設定角度 θ_2 は 60° から 85° になければならないが、実用的な観点からは 70° から 80° の範囲が望ましい。本測定原理は金属を測定対象としているが、必然的に酸化膜成長に伴う干渉による放射率変動を生ずる。この変動を避ける手だてが本原理を広く応用に供するためには必要である。 R_ϵ を求める波長域を長波長にすることで干渉現象生起を大幅に緩和することができる¹²⁾。実験では冷延鋼板を使用した。干渉現象が冷延鋼板より顕著に生ずる他金属では、本手法はより効果を発揮できると予想される。また、本原理と同等な方法を偏光を利用しても実現できることを確認しているし、方向性と偏光特性の組み合わせで応用範囲の拡大も期待できる^{13,14)}。基本的な問題点としては試料表面の初期条件(粗さ、材質など)による特性の変化を定量的に解析すること、およびその影響を緩和する手法を見いだすことなどであり、今後に残された課題である。

本原理の実用化のために、光ファイバによる計測系のコンパクト化を計画している。

本研究は平成1995年度文部省科研費補助金(一般研究(C) 課題番号06650481)、1995年度川鉄21世紀財団技術研究助成金、平成1995~6年度東洋大学特別研究助成金などの援助を得て実施された。

参考文献

- 1) T.Iuchi and R.Kusaka : Two methods for simultaneous measurement of temperature and emittance by using multiple reflection and specular reflection, and their applications to industrial processes, TEMPERATURE, 5, 491/503 (1982)
- 2) T. Iuchi : Applications of RADIATION THERMOMETRY, (Edited by J.C.Richmond and D.P.DeWitt), ASTM STP 895, 121/150 (1986)
- 3) M.A. Pellerin, B.K.Tsai, D.P. DeWitt, and G.J. Dail : Emissivity compensated methods for aluminum alloy temperature determination, TEMPERATURE, 6, 871/876 (1992)
- 4) F. Tanaka and H. Ohira : Thermometry Reestablished by Automatic Compensation of Emissivity ; The TRACE method, TEMPERATURE, 6, 895/900 (1992)
- 5) D.Y. Svet : Some new methods and systems of pyrometry and their application, TEMPERATURE, 4, 587/597 (1972)
- 6) 鶴川屋, 井内 : 放射率比変化を補正する新しい放射测温法, 第12回センシングフォーラム, 3-6, 79/84 (1995)
- 7) 鶴川屋, 中台, 井内 : 放射率の角度依存性を利用した新放射测温法, SICE'95, 212A-3, 647/648 (1995)
- 8) T.Iuchi T.Tsurukaway : New radiation thermometry using directional emissivity, TEMPMEKO'96, Torino, to be published (1996)
- 9) R.Siegel and J.R. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, 82, McGraw-Hill, (1972)
- 10) E.M.Sparrow and R.D. Cess : Radiation Heat Transfer, 64, Hemisphere, (1978)
- 11) G. Neuer : On the influence of radiation properties when measuring temperatures of oxidized metals and ceramics, Practical Surface Pyrometry Workshop, Delft, Topic-6, 1/12 (1993)
- 12) 井内 徹 : 計測自動制御学会論文集投稿準備中
- 13) 鶴川屋, 古川, 井内 : 角度と偏光を利用した放射率補正放射测温法, SICE'96, 111A-5, 319/320 (1996)
- 14) T. Iuchi, T. Furukawa and T. Tsurukaway : Measurement of polarization properties of metals and its application to radiation thermometry, 14th IMEKO World Congress, Tampere in Finland, to be published (1997)

[著者紹介]

井内 徹 (正会員)

68年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年八幡製鉄(株)(現新日鐵)に入社。理博。91年より東洋大学機械工学科教授。計測、光物性などの研究に従事。応用物理学会、Optical Society of Americaなどの会員。

鶴川屋 智之 (正会員)

95年東洋大学工学部機械工学科卒業。97年東洋大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。同年(ミットヨ)に入社。

田 添 晃 (学生会員)

1996年東洋大学工学部機械工学科卒業。98年東洋大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了予定。放射測温の研究を行う。同年島田理化工業(株)入社予定。日本鉄鋼協会学生会員。