走査型熱顕微鏡における能動式温度計測カンチレバーの高性能化

正員 中別府 修* 非会員 神田 孝浩**

Improvement of an Active Temperature Measurement Cantilever of a Scanning Thermal Microscope

Osamu Nakabeppu*, Member, Takahiro Kanda**, Non-member

Scanning Thermal Microscope with a thermal feedback system is capable of taking topological and quantitative temperature images simultaneously with sub-micron spatial resolution with the micro-fabricated special cantilever having thermopile, heater and thermocouple on it. Since high sensitivity of the thermopile in heat flow detection is required for accurate temperature measurement, we tried to make the cantilever more sensitive by reducing its thickness. As a result, thermal resistance of the cantilever increased one order of magnitude, and then sensitivity in temperature measurement and applicability to low thermal conductive material were improved. Moreover, temperature distribution of a wave guide optical switch including low thermal conductive polymer and metal heater was visualized quantitatively with the improved cantilever.

キーワード：走査型熱顕微鏡，AFM，カンチレバー，温度計測，微細加工

Keywords：Scanning Thermal Microscope, AFM, Cantilever, Temperature Measurement, Micro fabrication

1. はじめに

走査型熱顕微鏡 (SThM, Scanning Thermal Microscope) とは、AFM や STM に温度計測機能を付加しサブミクロン空間分解能で温度や熱物性値を計測する顕微鏡である^{(1)~(3)}。マイクロ・ナノテクノロジーの進展に伴い、ナノスケールの電子デバイスやナノ構造を持つ材料の温度や物性分布計測のニーズが増している⁽⁴⁾⁽⁵⁾のに対し、従来の赤外放射⁽⁶⁾や集光レーザー⁽⁷⁾⁽⁸⁾を利用する遠視野光学的な微小スケール温度計測法は適用限界を迎えており、針状プローブ先端と試料の微小な接触部を通じて熱情報を計測する近接型の SThM は数 10nm の空間分解能を持つ唯一の局所温度計測法として期待されている。

これまで、AFM ベースの SThM では、カンチレバープローブを試料へ接触させ、測温抵抗体 (RTD)⁽⁹⁾や熱電対などのカンチレバー上温度センサーの出力を計測する受動的方法において、センサーの微小化により、熱画像計測の空間分解能は 10nm 程度まで向上することが報告されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし、受動的方法では計測量は温度ではなく、試料・カンチレバー間の熱流であり、温度、熱物性画像は

定性的なものとなることが課題であった。これは、熱流が温度差と接触熱コンダクタンスに比例し、熱コンダクタンスが形状や物性、接触荷重に依存し、同定が難しいことに起因する問題である。

そこで、筆者らは、SThM において正確な温度計測を可能とする能動式温度計測法を開発し、半導体微細加工技術を用いた温度計測カンチレバー、熱フィードバック回路を製作し、空間分解能 30nm、時間分解能 20ms、温度精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の性能で、SThM による定量的な温度計測が可能であることを示してきた^{(12)~(16)}。しかし、能動法においても、計測感度が不十分な場合、低熱伝導率試料に対する温度計測が難しい、研究室での数個ずつのバッチ製作ではばらつきが大きく最高性能の再現が難しいという問題が残されていた。

本研究では、SThM における能動式温度計測の高性能化と計測対象の拡大を目指し、カンチレバーの薄型化による温度計測精度の向上を試みた。また、高感度化したカンチレバープローブにより、従来は困難であった低熱伝導率材の樹脂と金属で構成された導波路式光スイッチの温度分布計測を試みることにした。

以下、本論文では SThM における能動式温度計測法の概要を述べ、カンチレバーの高感度化に関する実験結果と考察を示し、導波路式光スイッチの温度分布計測を通じて提案する SThM の利点、問題点を考察する。

* 東京工業大学大学院 理工学研究科 機械物理工学専攻
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1
Tokyo Institute of Technology
2-12-1 Ohokayama Meguro-ku, Tokyo 152-8552

** 東京工業大学 工学部 機械宇宙学科

2. SThM の能動式温度計測法

〈2・1〉 計測原理 カンチレバーの先端が試料に接触すると、試料・カンチレバー間の温度差と接触熱コンダクタンスに応じ両者間に熱流が生じる。先端部に計測接点を根元部に基準接点を持つ熱電対を搭載したカンチレバー（図1左）では、ボディの熱コンダクタンスは一定であり、熱電対は熱流に比例した信号を出力する。この受動的計測法では、計測温度は温度差のみならず接触状態に依存し、接触状態を正確に把握しない限り定量的な温度計測が出来ない。能動計測法では、カンチレバー上に熱流を検出するサーモパイル、温度を計測する熱電対、温度を制御するヒーターを搭載し、サーモパイル信号に比例した発熱をカンチレバーに与える熱フィードバックを実施し、カンチレバーと試料の温度を一致させた状態でカンチレバー温度を計測する（図1右）。熱流検出感度が十分であれば接触状態変化の影響を受けない定量的な温度計測が原理的に可能である。また、この能動法は零位法に属し、深部体温計測に用いられる熱流補償法⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁸⁾と同じ原理に基づいている。さらに、接触点を通しての熱情報のみを計測するため、即ち、温度計測の空間分解能を接触点サイズ（10nm 程度）に高めるため、周囲圧力を 10^{-4} Torr 程度に減圧し、空気による熱伝導を低減する必要がある。

〈2・2〉 温度計測カンチレバー 能動式温度計測法を SThM 上で実現するには、微小なカンチレバーに上述の3つの機能を搭載する必要がある。図2に、これまで開発した温度計測カンチレバーの SEM 写真を示す。カンチレバーは、Si 基板上の厚さ $2\mu\text{m}$ の SiO_2 層の上に、クロム、ニッケルの薄膜でサーモパイル、熱電対、ヒーターをリフトオフ

図1 SThMにおける受動および能動温度計測

Fig. 1. Passive and active temperature measurement method on SThM.

図2 温度計測カンチレバー

Fig. 2. Temperature Measurement Cantilever.

法により形成し、TMAHによりSi基板をウェットエッチすることで製作されている。カンチレバー長さは約 $260\mu\text{m}$ であり、パターン上に蒸着された SiO_2 の保護膜、背面に蒸着するAu反射膜を含め、約 $3\mu\text{m}$ の厚さを持っている。製作方法の詳細は参考文献(16)に示している。

また、原理の説明（図1）では針状突起を持つカンチレバーを想定していたが、本研究では、製作上の簡便さから、針状突起を持たない平板型のカンチレバーを製作、使用した。このため、後述のように、温度計測精度は良いが、空間計測精度は接触点変化の影響で低下し、画像計測にアーティファクト（偽の分布）が現れる弊害が残っている。

〈2・3〉 温度計測システム 能動式温度計測には、図3に示す自作のアナログ回路による熱フィードバック系を使用する。回路では、サーモパイル信号 V_{TP} が計装用オペアンプで G_1 倍に増幅され、2次ローパスフィルタでノイズをカットし、入力平方根を取り G_2 倍する平方根回路、ゲイン G_3 のパワーアンプを経てヒータへ電力が供給される。画像計測時は、熱フィードバックをかけながら、カンチレバーとベース部の温度差を示す熱電対信号 $T_m - T_b$ を形状信

図3 能動式温度計測システム

Fig. 3. Active temperature measurement system.

図4 ポイント計測による温度測定

Fig. 4. Local temperature determination by varying thermal feedback gain in point measurement.

号と同時に AFM で記録し、ベース部温度 T_b を別途通常の熱電対で計測する。

この系は、試料・カンチレバー間の熱流 Q_{sc} [W] を入力とし、 G_Q 倍に増幅し、ヒーターで発熱 Q_{HT} [W] を出力する熱的に線形なフィードバック系である。一方、動作確認に使うサーモパイル信号 V_{TP} [V] とヒーター電圧 V_{HT} [V] には、次式の非線形な関係があり、電圧増幅率 G_V が V_{TP} を含み便宜的に定義される。系の安定動作を示す G_V の最大値は 10^6 程度 ($V_{TP}=1\mu\text{V}$) であった。

$$V_{HT} = G_3 G_2 \sqrt{G_1 \cdot V_{TP}} = G_3 G_2 \sqrt{G_1 / V_{TP}} \cdot V_{TP} = G_V \cdot V_{TP} \dots (1)$$

図4は、銅ブロック試料にカンチレバーを接触させ走査しない状態で、電圧増幅率 G_V を変化させ温度測定（ポイント計測）を行った例である。 G_V の増加と共に、サーモパイル出力は低下し、熱電対出力は一定値へ漸近し、この操作により、カンチレバーが試料と同一温度へ達したことが分かる。現状では、サブミクロンスケールでの温度計測手段が他に無いため、増幅率の増加に対する計測温度の飽和を確認する操作が接触点の局所温度を定量的に同定する唯一の方法であると言える。

3. カンチレバーの高感度化

〈3・1〉 高感度化指針 図5に示す能動式温度計測における熱バランスを集中定数モデルにより解析すると、計測温度は次式で与えられる。

図5 能動式温度計測時の熱バランスモデル

Fig. 5. Thermal model of a cantilever and sample system in active temperature measurement mode.

$$\frac{T_m - T_b}{T_s - T_b} = \frac{1 + G_Q}{1 + \eta + G_Q} \dots (2)$$

$$\eta = \frac{R_{sc} + R_{TP}}{R_{cb}} \dots (3)$$

$$G_Q = \frac{Q_{HT}}{Q_{SC}} = \frac{G_3^2 G_2^2 G_1 \alpha_{TP} R_{TP}}{R_{HT}^e} \dots (4)$$

ここで、 R_{sc} は試料・カンチレバー間の接触熱抵抗、 R_{TP} はサーモパイル部の熱抵抗、 R_{cb} はサーモパイルとベース間のカンチレバーボディの熱抵抗、 α_{TP} はサーモパイルの感度（熱起電力）、 R_{HT}^e はヒーターの電気抵抗である。

式(2)から、定量的な温度計測には、熱抵抗比 η が小さいこと、熱流ゲイン G_Q が大きいことが必要になる。さらに式(3)より R_{cb} の増加で η は低下し、式(4)より G_Q の増加には、 G_1 , G_2 , G_3 , α_{TP} , R_{TP} の増加、 R_{HT}^e の低下が挙げられる。回路の増幅率は、発振やオフセット誤差の問題で現状からの増加は難しい。 α_{TP} は、既に熱起電力の大きな材料の組合せを選定し、カンチレバー上でのターン数も制限されており、向上は難しい。 R_{HT}^e も電圧制御の容易さ、製作プロセスの都合で決めているため、変更は容易ではない。結局、 η の低下と合わせ、最も現実的な改善はカンチレバーの薄型化による熱抵抗の増加ということになる。

〈3・2〉 薄型化による高感度化 カンチレバーの熱抵抗を増やすため、基板となる SiO_2 層と Ni , Cr の薄膜パターン、さらに背面のレーザー反射用 Au 膜の厚さを減らし、表1に示す3種類のカンチレバーを製作した。従来の製作工程の前に Si 基板上的熱酸化膜を RIE によりエッチングし薄くする工程を入れ、以降は同じ工程で製作した。Type-A は従来型、Type-B, Type-C は合計厚さが従来型の79%, 62%へ薄型化し、カンチレバーの熱抵抗は約2.6倍, 4.8倍へ増加することが見込まれる。

〈3・3〉 熱抵抗、熱容量評価 カンチレバーを真空環境へ置き、ヒーターへ直流、および交流を供給し温度変化量をカンチレバー上の熱電対で計測し、熱抵抗と熱容量を評価した。設計値に基づく予測と計測結果を表1の右側へ示す。設計値からは、薄型化により最大で熱抵抗は約5倍、熱容量は約60%と予測されたが、実際の評価では、最大で熱抵抗が約20倍、熱容量は50%と示された。予測と実験の差は、 $\pm 10\%$ 程度の各層の厚さのばらつき、特に、基板 Si のエッチング精度が低く $\pm 50\%$ 近いヒーター・ベース間距離

表1 試作カンチレバーの諸元および評価結果

Table 1. Specifications of cantilever probes.

	Design						Prediction		Experiment	
	SiO_2 Body (μm)	Ni Line (nm)	Cr Line (nm)	SiO_2 Coat (μm)	Au Mirror (nm)	Total Thickness (μm), [%]	Thermal Resistance (K/W), [ratio]	Heat Capacity (J/K), [%]	Thermal Resistance (K/W), [ratio]	Heat Capacity (J/K), [%]
Type-A	2	150	200	1	160	3.4, [100]	16×10^3 , [1]	2.0×10^{-7} , [100]	8.5×10^3 , [1]	4.2×10^{-7} , [100]
Type-B	1.5	75	100	1	50	2.7, [79]	42×10^3 , [2.6]	1.6×10^{-7} , [80]	44×10^3 , [5]	4.1×10^{-7} , [98]
Type-C	1	75	100	1	20	2.1, [62]	76×10^3 , [4.8]	1.3×10^{-7} , [63]	180×10^3 , [20]	2.1×10^{-7} , [50]

Type-A: current cantilever

のばらつきが原因に挙げられる。設計値に対する厚さや距離の誤差の割合は熱抵抗の変化率と等しく、製作精度の問題が大きいと考えられる。全体として、実験結果は薄型化により熱抵抗を1桁程度増加できたことを示している。

〈3・4〉 高感度化の総合評価 総合的な能動式温度計測の感度は、熱抵抗比 η が小さく、いかに小さな G_Q で正しい温度が計測できるかで評価される。 η や G_Q の直接計測は難しいため、ヒータ発熱量 Q_{HT} とサーモパイル信号 V_{TP} の比として次式で定義されるゲイン G_T に対して、測定温度を比較し評価を行った。

$$G_T = \frac{Q_{HT}}{V_{TP}} = \frac{V_{HT}^2}{R_{HT}\alpha_{TP}\Delta T_{TP}} = \frac{G_Q}{\alpha_{TP}R_{TP}} \left[\frac{W}{V} \right] \dots\dots\dots(5)$$

カンチレバーを既知温度の銅ブロック試料に接触させ、回路の増幅率を調整し G_T と計測温度をプロットすると図6となる。データに式(2)をフィッティングさせ、熱抵抗比 η と、無次元計測温度が90%となるために必要なゲイン $G_{T,90}$ 熱流ゲイン $G_{Q,90}$ を求めた(表2)。

図6 温度計測感度の比較

Fig. 6. Comparison of sensitivity in temp. meas.

表2 温度計測感度評価

Table 2. Evaluation of Sensitivities.

	η , [ratio]	G_{T90}	G_{Q90}	Ratio of Sensitivity.
Type-A	28, [1]	105	250	1
Type-B	3.6, [1/8]	9.0	31	8
Type-C	1.7, [1/16]	2.1	14	17

表3 温度計測能力の向上

Table 3. Prediction of temperature measurement performance.

Cantilever	R_{cb}	$G_{Q,max}$	Metal ($\lambda=100$ W/mK)				Polymer ($\lambda=0.1$ W/mK)			
			R_{sc}^*	η	$G_{Q,99}$	Meas.	R_{sc}^*	η	$G_{Q,99}$	Meas.
Original	10^4	10^3	10^4	2	10^2	○	10^7	10^3	10^5	×
Modified	10^5	10^4	10^4	1	10^2	○	10^7	10^2	10^4	○

*Contact radius: 10nm

薄型化により、Type-A の値に対して Type-B, Type-C は熱抵抗比で約 1/8, 1/16 倍、必要ゲイン $G_{Q,90}$ も同程度の割合で減少しており、 $G_{Q,90}$ の逆数を感度とすると、それぞれ約 8 倍, 17 倍の感度向上という結果が得られた。

カンチレバー熱抵抗が従来型の 10^4 K/W の桁から薄型化により 10^5 K/W の桁へ増加したことは、大きな接触熱抵抗を示す低熱伝導試料への適応性の拡大をもたらす。表3に、金属(熱伝導率 ~ 100 W/mK)とポリマー(熱伝導率 ~ 0.1 W/mK)試料に対し、誤差1%の温度計測に必要なゲイン $G_{Q,99}$ を予測し、可能な最大ゲイン $G_{Q,max}$ と比較した結果を示す。ここで $G_{Q,99}$ は $G_{Q,90}$ の約10倍である。金属試料では接触熱抵抗が 10^4 K/W程度と小さいため、従来型、薄型とも計測に必要なゲイン $G_{Q,99}$ が小さく、定量的な温度計測が可能である。一方、ポリマー試料では接触熱抵抗が 10^7 K/W程度になり、従来型では熱抵抗比 η が大きくなり、計測に必要なゲイン $G_{Q,99}$ は最大ゲイン $G_{Q,max}$ を超え、温度計測は不完全と予測される。薄型カンチレバーでは、熱抵抗比が抑えられ、最大ゲインも増加するため、ポリマー試料に対しても必要ゲインは最大ゲイン程度であり、温度計測可能と判定される。

4. 導波路式光スイッチの温度計測

熱光学効果を利用した導波路式光スイッチは、導波路を含むポリマー層上にヒーターを配置した構造を持ち、ヒータ加熱による温度変化で導波路の屈折率を変化させ、信号のスイッチを行う光デバイスである。デバイスの温度分布計測は動作特性を調べる上で重要であるが、 $10\mu\text{m}$ 程度の微細な構造、ポリマーと金属という熱、光特性が大きく異なる材料で構成されており、赤外線温度計測等の従来の微小スケール温度計測法の適用が難しく、高感度化したSThMによる正確な温度分布計測を試みた。

図7には、光スイッチの模式図、同時計測された形状と温度画像、また、図8に温度画像中白線で示す領域の平均温度・高さ分布を示す。計測では、 $10\mu\text{m}$ 幅のヒーターを中心に約 $50\mu\text{m}$ 四方の領域を 0.025Hz の低速でスキャンした。

形状像には、実際よりも幅が広くエッジ付近にピークを持つヒーター像と複数の粒子状物質が見られる。温度画像では、約 35°C のポリマー層上のヒーターは約 30°C の温度上昇を示し、ヒーター近辺のポリマー層も 10°C 弱の温度上昇を示している。また、粒子状物質の部分は、熱伝達が極端に低下し温度画像中にもダークスポットとして表れている。高温領域も実際のヒーター幅より広く表れている。

図7 導波路式光スイッチの模式図と SThM 計測結果

Fig. 7. Schematic and SThM images of a wave guide type optical switch.

図8 導波路式光スイッチ表面の温度分布および形状

Fig. 8. Temperature and height distribution on the wave guide type optical switch measured with the SThM.

図8で、ヒーターの幅が実際よりも広く計測される理由は、カンチレバー (Type-B) が針状突起を持たない平板型であり、ヒーターの左側エッジにカンチレバー先端部の複数箇所が順次接触するためと考えられる。同じ原因で、温度分布にも左側エッジ付近でヒーターの幅を超えて高温領域が計測されるアーティファクトが現れている。図中に加筆した破線が本来の温度分布に近いと推測される。カンチレバーの同一特定部が接触する試料平坦部 (ヒーター上面の中央部やヒーターから離れたポリマー部) では、真の温度を計測すると期待される。また、本来ヒーターに関して対称な温度分布が形成されるはずが、ヒーターより左側の温度が若干高い分布が計測されている。これは、カンチレバーが図中右側をベースに左側を先端として配置され、ヒーターの左側を計測している時に、ボディが直下のヒーターにより残存ガスによる熱伝導で加熱される影響が現れて

図9 温度画像の定量性の検証

Fig. 9. Verification of the temperature imaging.

いるためと考えられる。これらの考察から、ヒーターの右側に現れている計測結果が本来の温度分布に最も近いと考えられる。

また、高さ分布に表れたヒーターエッジ部のピークに関しては、急激な温度変動によるカンチレバーの熱変形が原因となったアーティファクトであり、実際のヒーター形状はほぼ矩形である。

段差部に表れる複数接触点の影響は、既存技術を導入しカンチレバーに針状突起を持たせることで解決可能である。また、形状中のアーティファクトは、カンチレバーの熱変形を低減する積層構造の導入、サーモパイル、ヒーター、熱電対をカンチレバー先端部にさらに集中させ、温度変化する領域を狭めることで、低減されると考えられる。

次に、温度画像計測の定量性を調べるため、画像中のデータと、カンチレバーを特定の位置に固定し、熱フィードバックゲインを変えて試料温度を同定するポイント計測の

結果の比較を行った。比較位置は、画像中で最も高い温度を示すヒーター上の点 ($x=0\mu\text{m}$) と $5\mu\text{m}$ 離れたポリマー上の点である (図 7 形状画像参照)。ヒーター発熱量に対し各点の計測温度を図 9 に示す。画像計測 (スキャン) 中に計測した温度は、ポイント計測の結果とほぼ一致し、また、発熱量に比例した温度上昇を示し、合理的である。この結果は、能動式温度計測ではフィードバックゲインを変えて計測温度の飽和を確認することで試料表面の局所温度を同定でき、また、画像計測においても温度計測の定量性が確認されたことを示している。

5. まとめ

SThM の能動式温度計測に関し、カンチレバーの薄型化による温度計測感度の向上を試み、以下の結論を得た。

従来に比べ、厚さで約 60% ($2\mu\text{m}$) の温度計測カンチレバーの試作に成功した。この薄型化によりカンチレバーの熱抵抗を 1 桁増加させ、 10^5 K/W オーダーとすることで、小さな熱流ゲインで定量的な温度計測が可能となった。さらに、正確な温度計測が可能な計測対象をポリマー等の低熱伝導固体へ拡張することが可能となった。

また、難計測試料への適用実験として導波路式光スイッチの温度分布計測を行い、カンチレバー形状からくるアーティファクトの問題はあるものの、定量的な温度画像計測が可能なが示された。

試作カンチレバーは針状突起の無い平板状であり、凹凸のある試料に対してアーティファクトが発生し空間分解能の低下が見られ、さらに、カンチレバーの熱変形が形状計測へ影響する欠点が見られた。今後、熱変形しにくい突起付き温度計測カンチレバーの開発が必要である。

謝 辞

本研究の遂行に当り、カンチレバーの製作には東工大精密工学研究所メカノマイクロプロセス室を使用し、サンプルは松下電工(株)より提供して頂きました。関係者に深く謝意を表します。また、本研究の一部は東工大挑戦的研究賞により行われました。ここに謝意を表します。

(平成 16 年 4 月 1 日受付, 平成 16 年 7 月 6 日再受付)

文 献

- (1) O. Nakabeppu : "Microscale Thermal Measurement by Scanning Thermal Microscopy", *Netsu Sokutei*, Vol.28, No.1, pp.18-28 (2001) (in Japanese)
中別府修 : 「走査型熱顕微鏡による微小スケール熱計測」, 熱測定, **28**, 1, pp.18-28 (2001)
- (2) H. M. Pollock and A. Hammiche : "Micro-Thermal analysis: techniques and applications", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.34, p.R23-R53 (2001)
- (3) A. Majumdar, K. Luo, Z. Shi, and J. Varesi : "Scanning Thermal Microscopy at Nanometer Scales: A New Frontier in Experimental Heat Transfer", *Experimental Heat Transfer*, Vol.9, pp.83-103 (1996)
- (4) A. Majumdar : "Thermal Microscopy and Heat Generation in Electronic Devices", *Microelectronics Reliab.*, Vol.38, No.4, pp.559-565 (1998)
- (5) G. B. M. Fiege, V. Feige, J. C. H. Phang, M. Maywald, S. Gorlich, and L. J. Balk : "Failure Analysis of Integrated Devices by Scanning Thermal Microscopy (SThM)", *Microelectronics Reliab.*, Vol.38, No. , pp.957-961 (1998)

- (6) S. Kondo, K. Ogasawara, and K. Hinode : "Thermographic Analysis of Electromigration Phenomena in Aluminum Metallization", *J. Appl. Phys.*, Vol.79, No.2, pp.736-741 (1996)
- (7) J. Kolzer, E. Oestershulze, and G. Deboy : "Thermal Imaging and Measurement Techniques for Electronic Materials and Devices", *Microelectronic Engineering*, Vol.31, pp.251-270 (1996)
- (8) R. Ostermeir, K. Brunner, G. Abstreiter, and W. Weber : "Temperature Distribution in Si-MOSFET's Studied by Micro Raman Spectroscopy", *IEEE Trans., Electro Devices*, Vol.39, pp.858-863 (1992)
- (9) R. J. Pylkki : "Scanning Near-Field Optical Microscopy and Scanning Thermal Microscopy", *Jpn. J. Appl. phys.*, Vol.33, No.1 6B, pp.3784-3790 (1994)
- (10) K. Luo, Z. Shi, J. Varesi, and A. Majumdar : "Sensor Nanofabrication, Performance, and Conduction Mechanisms in Scanning Thermal Microscopy", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol.15, No.2 pp.349-360 (1997)
- (11) G. Mills, H. Zhou, A. Midha, L. Donaldson, and M. R. Weaver : "Scanning Thermal Microscopy using Batch Fabricated Thermocouple Probes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.72, No.22, pp.2900-2902 (1998)
- (12) O. Nakabeppu, K. Hijikata, M. Chandrachud, J. Lai, and A. Majumdar : "Microscale Temperature Measurement using an Atomic Force Microscope", *Trans. JSME B*, Vol.62, pp.284-290 (1996) (in Japanese)
中別府修・土方邦夫・M. Chandrachud・J. Lai・A. Majumdar : 「原子間力顕微鏡を用いた微小スケール温度場の計測」, 機論 B, **62**, pp.284-290 (1996)
- (13) O. Nakabeppu, M. Igeta, M. Kajii, and K. Hijikata : "Microscale Thermal Measurement using the Atomic Force Microscope (2nd Report, Temperature and Thermophysical Properties Measurement)", *Trans. JSME B*, Vol.64, pp.549-555 (1998) (in Japanese)
中別府修・井下田真信・梶井 誠・土方邦夫 : 「原子間力顕微鏡を用いた微小スケール熱計測 (第 2 報, 温度・熱物性値分布計測)」, 機論 B, **64**, pp.549-555 (1998)
- (14) 中別府修・井下田真信・井上剛良 : 微小表面温度分布計測法およびそのための装置, 特願平 11-177143 (1999)
- (15) O. Nakabeppu, M. Igeta, and T. Inoue : "Microscale Real Temperature Measurement by the AFM using Thermal Feedback Method", *Thermal Science & Engineering*, Vol.7, No.6, pp.87-94 (1999)
- (16) O. Nakabeppu : "Quantitative Temperature Imaging by Scanning Thermal Microscopy", *J. Visualization Society of Japan*, Vol.23, No.90, pp.149-156 (2003-7) (in Japanese)
中別府修 : 「走査型熱顕微鏡による定量温度画像計測」, 可視化情報, **23**, No.90, pp.149-156 (2003-7)
- (17) R. H. Fox and A. J. Solman : "A new technique for monitoring the deep body temperature in man from the intact skin surface", *J. Physiol.*, Vol.212, pp.8-10 (1971)
- (18) 人間-熱環境系編集委員会編 : 人間-熱環境系, 日刊工業新聞社, pp.166-172 (1989)

中 別 府 修

(正員) 1965 年 4 月 19 日生。1990 年 3 月, 東京工業大学大学院修士課程修了。同大助手, 東京大学助手を経て, 2000 年より東京工業大学大学院助教授。現在, SThM, MEMS 熱センサの開発, マイクロ熱・流体工学に従事。博士(工学)。日本機械学会, 日本伝熱学会会員。

神 田 孝 浩

(非会員) 1981 年 6 月 11 日生。2004 年 3 月, 東京工業大学卒業。同年 4 月よりホンダに所属。