

東京理科大学「火災安全科学研究拠点」

■ 研究成果概要報告書

研究課題		小型熱流束センサの開発	実施年度
			平成 29 年度
研究代表者	所属	豊橋技術科学大学	
	氏名	松岡 常吉	
	問合せ先メールアドレス	matsuoka@me.tut.ac.jp	
受入担当責任者	氏名	松山 賢	
<p>1. 研究の背景および目的</p> <p>火災試験において正しい時系列熱流束データを得ることは、重要な意味を持つ。市販されている熱流束センサにはいくつかの種類があるが⁽¹⁾、火災試験では高温環境に暴露されることや様々な方向からの熱流束を感知するため、金属製のハウジング内にサーモパイルと冷却部を有する Schmidt-Boelter 型または Gardon 型を用いられる。ところが、これらのセンサの感度と応答速度は感知面サイズに依存し、さらに両者にはトレードオフの関係があるため小型化が困難で、火災試験で一般的に用いられるセンサでは応答速度を犠牲にしたものが多く（数 100ms 程度）、熱流束値の時間変動が重要となる火災場での計測には適さない。また、これらのセンサは原理上計測時には冷却する必要があるため、そのために生じるセンサ取付誤差も、特に小規模な火災試験においては無視することはできない。精度の高い火災予測モデルを構築するには、正しく火災現象を把握しておく必要があるため、そのために小型で高い応答速度を有する熱流束センサが求められている。</p> <p>上述したセンサの欠点の要因は、サーモパイルによる受熱部の空間温度差を計測して熱流束を求めることにある。そこで本研究では、温度差を計測する従来方式ではなく、計測対象である流入熱流束と釣り合うよう受熱部からの抜熱量を制御する「定温度式熱流束センサ」を提案する。ペルチェ素子を用いて抜熱量をフィードバック制御し受熱部の温度を一定に保持することで、流入熱流束はそれに等しい抜熱の熱流束の大きさとして計測することができる。本センサの利点は、感度や応答速度をペルチェ素子や負帰還回路を用いて電氣的に制御できる点にあり、センサの大幅な小型化・高応答化が期待できる。本研究期間内では提案するセンサの開発に向けた第一段階として、定温度式センサの原理検証を行うことを目的とする。</p>			
<p>2. 利用施設及び利用日</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ コーンカロリメータ装置 （2018 年 3 月 12 日 ～ 3 月 14 日） 			

3. 実験方法・研究成果、および考察（申請時の計画に対する達成度合いも含む）

※継続課題の場合は、前年度との関係性、進展度合いについても記載すること。

実験方法

(1) 定温度型熱流束センサの原理

本研究で提案する熱流束センサの原理の概要を図1に示す。センサは受熱部である熱抵抗体、その背面に取り付けたペルチェ素子で構成される。ペルチェ素子は多数のP型とN型の半導体が直列接続されたもので、N型からP型へ電流を流すと、上の接合面から熱を吸収し下の接合面へ熱が運ばれる。逆に、P型から電流を流すと、熱は下から上へ流れる。

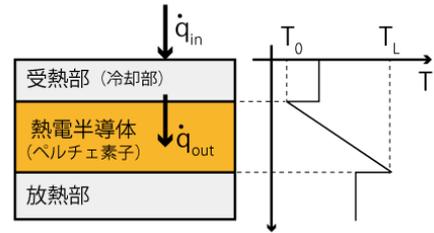


図1 定温度型熱流束センサの概念図

ペルチェ素子の上側（冷却面）に取り付けた受熱部の厚みが十分薄く、かつ流入熱流束分布に対して幅方向も十分小さいと仮定すると、受熱部を囲むコントロールボリュームについて以下の熱バランス式が成り立つ。

$$\dot{q}_{in} = \frac{A_2}{A_1} \dot{q}_{out} + \frac{\rho CV}{A_1} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

\dot{q}_{in} [W/m²]は流入熱流束、 ρ [kg/m³], C [J/kgK], V [m³]はそれぞれ受熱部の密度、比熱および体積であり、 A_1, A_2 [m²]はそれぞれ上面および下面の面積を表す。 \dot{q}_{out} [W/m²]は冷却面からの抜熱の熱流束であり、素子の平均特性を用いて次のIoffeの式で与えられる⁽²⁾。

$$\dot{q}_{out} = SJT_0 - K(T_L - T_0) - \frac{1}{2}RJ^2 \quad (2)$$

ここで、 S [V/K], K [W/K·m²], R [Ω·m²]はそれぞれ素子のゼーベック係数、単位断面積あたりの熱コンダクタンスおよび単位断面積当たりの抵抗であり、 J [A/m²]は素子を構成する半導体に流れる電流密度、 T_0, T_L [K]はそれぞれ素子の冷却側および放熱側の温度である。

定温度式熱流束センサでは受熱部の温度が一定となるよう制御する。このとき、式(2)を式(1)に代入し以下の式を得る。

$$\dot{q}_{in} = \frac{A_2}{A_1} \dot{q}_{out} = \frac{A_2}{A_1} \left\{ SJT_0 - K(T_L - T_0) - \frac{1}{2}RJ^2 \right\} \quad (3)$$

したがって、素子に流れる電流密度およびペルチェ素子の両側の温度を計測すれば式(3)を用いて流入熱流束を求めることができる。

(2) センサ設計

将来的には提案する定温度型センサを実用化することを目指す。まずは提案するセンサによる計測が可能であるかその原理を検証する必要がある。本研究では、入手しやすいペルチェ素子の冷却性能が20kW/m²程度であることを考慮し、検証のターゲットを14kW/m²以下として検証実験を行うこととした。この値は火災試験用としては小さいものの、ペルチェ素子をカスケード的に重ねて用いることや、ゼーベック係数の大きな熱電材料で構成され

た素子を用いることで、計測可能な熱流束は大きくし得る。

検証実験に用いた熱流束センサを図 2 に、センサの代表的な仕様を表 1 に示す。受熱部は厚さ 12mm のアルミニウム板であり、アルミニウム板の下にはペルチェ素子を密着している。さらにその下には素子を冷却するためのフィンとファンが取り付けられている。これらの冷却部品は、素子の放熱側の温度が上がりすぎないようにするためのものである。現在のセンサはサイズが大きいですが、将来的にはこれらの冷却部品をヒートパイプに置き換える、あるいはペルチェ素子をカスケード的に用いることにより小型化が可能である。また受熱部であるアルミニウム板も比較的厚いものを用いている。本研究で実施する実験の範囲では 12mm であっても受熱部内部の温度分布は 1K 以下でほぼ一様であると考えられたため、加工のしやすさを優先しこの厚さを選んだが、後述するように計測精度や応答速度を向上させるには受熱部はなるべく薄い方が望ましいため、今後改良していく予定である。

表 1 センサ仕様

センササイズ	50 x 50 x 15 mm (冷却部を除く)
受熱部	アルミニウム (厚さ約 12 mm)
最大吸熱流束	25.5 kW/m ²
ペルチェ素子	アンペール社製 UT4040-PF
冷却方式	空冷

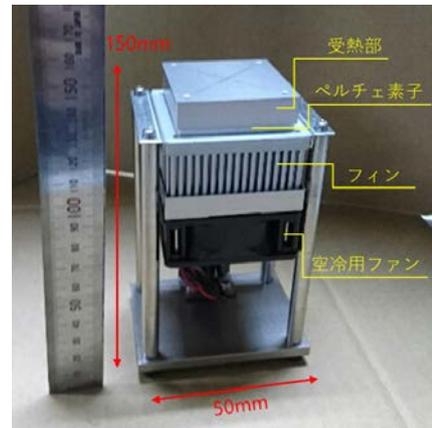


図 2 熱流束センサ

(3) 実験方法

実験装置の概略を図 3 に示す。式(2)によると、 \dot{q}_{out} は素子両端温度にも依存する。したがって、本来はペルチェ素子(より正確にはそれを構成する半導体)の両端の温度を計測する必要がある。ところがセンサの構造上、受熱部とペルチェ素子を接触させねばならないため、素子上部の温度を直接計測することは難しい。しかし、受熱部とペルチェ素子の冷却面の温度差はそれほど大きくないと考えられるため、本実験では受熱部の温度を計測し、これを T_0 として扱うこととした。受熱部の温度計測はアルミニウム板の下から約 3mm の位置に空けた穴に K 型熱電対を挿入して行った。一方、素子下面(放熱側)の温度はシース直径 0.5mm の K 型熱電対をフィン上端部とペルチェ素子の隙間に

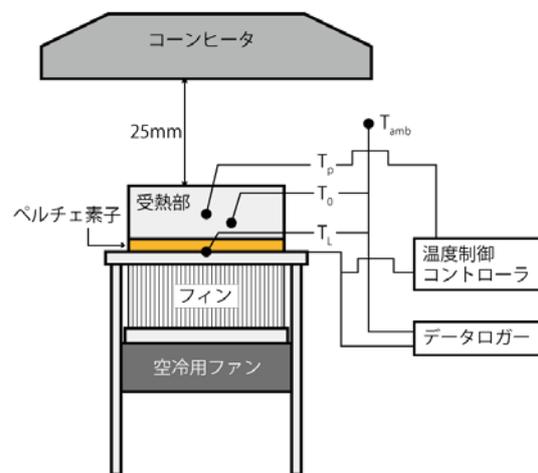


図 3 実験装置の概略

差し込んで計測した。また、受熱部の温度は、ほぼ中央に挿入された白金測温抵抗体で計測した温度 (T_p) を入力値とするフィードバック制御により一定となるよう制御した。

\dot{q}_{out} を算出するには、自動外乱排除制御方式⁽³⁾ さらに素子に流れる電流密度を知る必要がある。オームの法則より、素子に流れる電流密度と素子にかかる電圧には以下の関係がある。

$$J = \frac{E}{A_s R_p} \quad (4)$$

ここで R_p [Ω] は素子の抵抗であり用いたペルチェ素子の場合カタログ値として 1.92Ω が与えられている。したがって、素子に流れる電流密度を知るには、両端にかかる電圧 E [V] を計測すればよい。 A_s [m^2] は素子を構成する半導体チップの断面積であり、チップの総数を N 個、素子面積を A_p [m^2] とし、次式より $A_s = 9.26 \times 10^{-6} m^2$ と見積もった。

$$A_s = \frac{A_p}{N} \quad (5)$$

ただし、カタログより $N = 254$ 個、 $A_p = 2.35 \times 10^{-3} m^2$ である。

コーンヒータの下方 25mm の位置に熱流束センサを設置し、コーンヒータから既知の輻射熱流束を与えた。熱流束センサの受熱面の中央部 (30mm x 30mm) には黒体スプレーを塗布し、側面は断熱材で覆った。各熱流束条件において、受熱部の制御温度を 15~105°C の範囲で変化させて実験を行った。計測されたセンサの出力データ (E , T_0 , T_L) から流入熱流束を求め、コーンヒータの出力値と比較した。熱流束の計算にあたって必要となるペルチェ素子の特性値はカタログで示されている吸熱熱流束と電流の関係からフィッティングして求めた。得られた特性値を表 2 に示す。

表 2 ペルチェ素子 (UT4040-PF) の特性値

ゼーベック係数, S [V/K]	1.90×10^{-4}
単位断面積あたりの熱コンダクタンス, K [W/K·m ²]	1.43×10^2
単位断面積当たりの抵抗, R [Ω ·m ²]	7.69×10^{-8}

研究成果および考察

(1) 周囲環境との熱の授受による影響

センサと周囲の温度が等しく、かつ受熱部が完全に断熱されている理想的な環境では、得られた結果から式 (3) を用いて流入熱流束を求めることができる。しかし、実際にはセンサの設定温度によっては雰囲気との温度差があり、センサと周囲環境との間には熱の授受がある。周囲との熱の授受に伴いセンサ温度は変化しようとするが、定温度式の場合にはセンサ温度を一定に保とうとし、その結果たとえコーンヒータ等からの熱流入がない場合であってもセンサは何らかの出力を与える。したがって、定温度式熱流束センサを用いて正しく計測を行うには、周囲環境との熱の授受による影響を補正する必要がある。そこで、周囲環

境との熱の授受を有効熱損失率 α [W/m²·K] を用いて評価し、式(3)を次のように修正する。

$$\dot{q}_{in} = \frac{A_2}{A_1} \left\{ SJT_0 - K(T_L - T_0) - \frac{1}{2}RJ^2 \right\} - \alpha(T_{amb} - T_0) \quad (6)$$

α を見積もるため、コーンヒータからの輻射熱流束をゼロとし、センサの設定温度を 15~75℃として実験を行った。得られた温度および電圧データの平均値からペルチェ素子による熱流束（式(6)右辺第1項）を算出し、これを温度差に対してプロットした。結果を図4に示す。最小二乗法を用いてフィッティングした近似直線の傾きから、この実験系における有効熱損失率は $\alpha = 1211\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ となった。

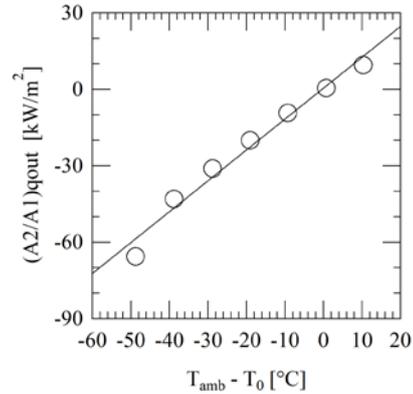


図4 コーンヒータ出力 0kW/m² のときのペルチェ素子による抜熱熱流束

(2) 定常熱流束

計測結果の代表例として、図5にコーンヒータの出力を 4.9kW/m²，センサの設定温度を 25℃としたときの素子両端の電圧、 T_0 、 T_L および雰囲気温度

(T_{amb}) の時系列データを示す。なお、サンプリングレートは 5Hz である。計測開始から約 100 秒までは T_0 は単調減少し、その後は設定温度でほぼ一定となった。一方、素子下面（放熱側）の温度である T_L は約 20 秒程度でピークを取った後、単調減少し一定値へと近づいた。ペルチェ素子両側の温度が一定となるまでに約 100 秒かかっているが、これはセンサの初期状態が設定温度と異なるため場合に、 T_0 が設定温度と等しくなるまで受熱部を加熱または冷却するのにかかる時間であり、いわばセンサの暖機運転時間である。

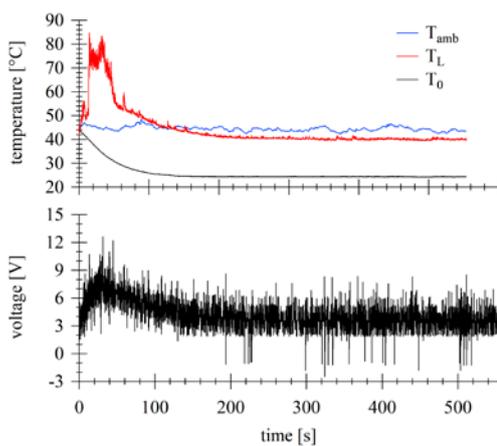


図5 センサから得られる時系列データの例（コーンヒータ出力 4.9kW/m²，センサ設定温度 25℃）

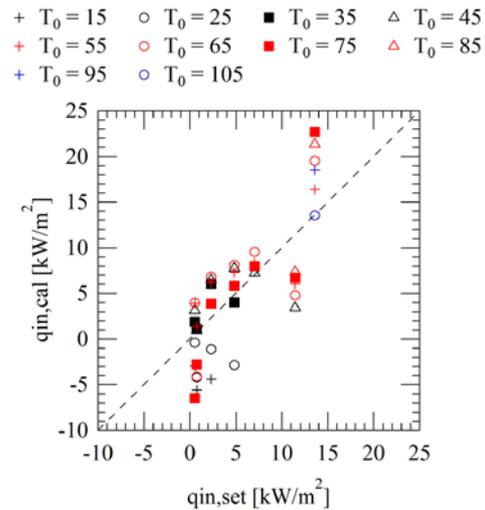


図6 熱流束センサの計測値とコーンヒータの出力値との比較。

コーンヒータ出力およびセンサ設定温度を変えて同様の実験を行い、各実験条件における流入熱流束値を計測した。図6にセンサによる計測値（流入熱流束 $\dot{q}_{in,cal}$ ）を縦軸にとり、コーンヒータの設定値（熱流束値 $\dot{q}_{in,set}$ ）を横軸にとり、両者を比較した結果である。図中に示した点線は計測値と設定値が一致する点である。なお、熱流束の計算には、計測中のセンサからの出力値がほぼ定常となった範囲のデータの平均値を用いた。図6から計測値と設定値の差は定性的には一致しており、本研究で提案する定温度型熱流束センサが原理的に流入熱流束を計測可能であることを示すことができた。しかし、コーンヒータの設定値が同じであってもセンサの設定温度ごとに得られる計測値のばらつきが大きく、計測精度に難があることが分かった。計測精度が悪い要因として少なくとも次の4つが考えられる。

- (i) ペルチェ素子の特性値の温度依存性が考慮されていない。本研究では公開されている素子のカタログデータから素子の特性値を見積もり、熱流束の算出に用いた。しかし、実際にはこれらのパラメータには温度依存性があり、今回のようにセンサ温度を変えた実験では、その影響が無視できないと考えられる。また、カタログ値の精度は不明であり、実際の素子の特性値についても検証する必要がある。
- (ii) 素子に流れる電流密度が正確ではない。本研究では式(4)から素子に流れる電流密度を求めているが、算出に用いた全体の抵抗についてはその温度依存性が考慮されておらず、実際にチップを流れる電流密度とは異なる可能性がある。
- (iii) ペルチェ素子の冷却面の温度は受熱部温度と完全に同じではない。
- (iv) 電圧のばらつきによる計測誤差が大きい。受熱部の温度はペルチェ素子に接続された温度コントローラにより一定温度となるようフィードバック制御しているが、図5下に示すように制御電圧がハンチングしており、計測精度が低下した。
- (v) 流入熱流束の算出において補正に用いた有効熱損失率は実験的に得られたものであり、したがって上記に起因する誤差が全て含まれる。有効熱損失率による補正項(式(6)右辺第2項)の大きさはIoffeの式で見積もられる熱流束値(式(6)右辺第1項)と同程度であり、その誤差が計測値におよぼす影響は大きい。

(ii)はペルチェ素子と電源をつなぐ回路中にシャント抵抗器と呼ばれる電流検出用抵抗器を挿入することで抵抗値の瞬時値を計測すれば、電流密度を正確に計測することができるようになるため改善可能である。(iii)については、素子両側に取り付けられた熱抵抗体であるアルミニウム板およびフィン熱コンダクタンスが分かれば、理論的に決定することができる。またこのとき、素子の特性値(S , ρ , K)についても、カタログ値ではなく、素子を構成する半導体の特性値として与えることができる。したがって、(i)についても同時に解決できる。(iv)については定値制御を行うためのフィードバック回路の最適設計を行い、計測誤差を低減させる。(v)については、受熱部の大きさや断熱方法を改善することで有効熱損失率による補正の影響を低減でき、さらには上記(i)~(iv)の解決に伴って α の値もより正確に見積もることができると期待される。

(3) 非定常熱流束の計測

(2)において定常な流入熱流束に対しては計測可能であることが示された。本項では、流入熱流束が時間的に変動する場合についての検証結果について述べる。

コーンヒータにより印加される輻射熱流束を断熱材により遮ることでセンサのインパルス応答を調べた。センサ設定温度を 50℃とし、コーンヒータから 13.4 kW/m² で輻射熱流束をセンサに印加した。

コーンヒータの出力が定常となったことを確認した後、センサとコーンヒータの間に断熱板を素早く挿入し、コーンヒータからの輻射熱流束をおよそ 15 秒間遮った。その後、断熱材を素早く取り除き、再度輻射熱流束を印加した。この一連の実験により立ち上がり立ち下りの両方の応答特性について調べた。

図 7 に非定常の熱流束に対する応答特性結果を示す。ただし、この実験では熱流束を求めるにあたっては、受熱部の温度が若干変化の様子が確認されたため、式(1)における温度変動項(第1項)を考慮して熱流束を求めた。遮蔽板の挿入または抜去に伴い、センサの出力値が応答していることは確認できたが、応答の遅れ時間と応答速度はそれぞれ数秒から数 10 秒程度とかなり遅いことが明らかとなった。また、立ち下り時には非常に大きくオーバーシュートしていることも分かった。

この要因と改善方法について検討するため、ここで熱流束センサの応答速度を見積もる。簡単のため、ペルチェ素子の諸特性値の温度依存性はないと仮定し、センサ温度、電流密度、熱流束が平均値 (T_0, J, \dot{q}_{in}) のまわりに $T'_0(t), J'(t), \dot{q}'_{in}(t)$ の微小変化を行う場合を考えると、式(3)は次式のように線形化できる。

$$T'_0 + M \frac{dT'_0}{dt} = \left(\frac{\partial T'_0}{\partial \dot{q}'_{in}} \right) \dot{q}'_{in} + \left(\frac{\partial T'_0}{\partial J'} \right) J' \quad (7)$$

ここで M はセンサの時定数であり、

$$M = \frac{\rho CV}{A_2(SJ+K)} \quad (8)$$

で表される。(8)式から本研究で用いたセンサの時定数はおよそ 180 秒となる。ただし、実際には、センサはフィードバック回路で T_0 の変化を検出してその変化が抑制されるため、時定数は 1 桁から 2 桁小さくなると考えられる。式(8)で求めた時定数に比べ、図 7 から推測される応答速度は数 10 秒程度と 1 桁小さいように見えるのはそのためである。

式(8)から、時定数を小さくするには受熱部の熱容量を小さくすることが有効である。現在のセンサは作業性や工作性を優先したため受熱部の厚みが大きいのが、例えばこれを 0.1mm

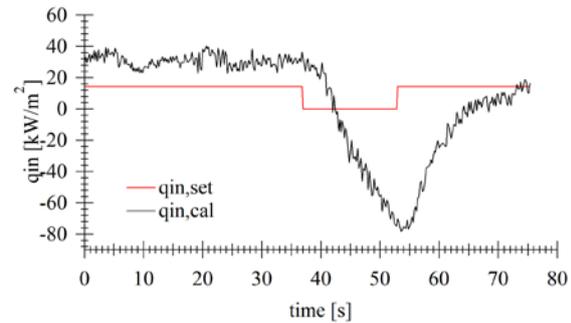


図 7 流入熱流束に対するセンサ出力のインパルス応答.

にすると時定数は 2 桁小さくなる。また、ゼーベック係数や熱コンダクタンスのなるべく大きい熱電半導体で構成される素子を用いることも重要である。電流密度を大きくすることも時定数は小さくできると考えられるが、実際には半導体が損傷するため電流密度はそれほど大きくすることは出来ない。

本研究の成果としてセンサの原理検証に加え、実用化に向けて解決すべき課題を抽出することができた。今後はシステム全体の熱設計の最適化、特に受熱部の厚みを 2 桁小さくすることで応答速度の向上を目指すとともに、フィードバック回路を含むセンサ回路全体の見直しを行い、計測精度の改善を図っていく。また、現状のセンサはその縦と横のサイズが 50mm 程度とかなり大きいですが、センサの大きさは素子を構成する半導体の数が少ないペルチェ素子を用いることで小型化することができる。センサの高さ方向の大きさについても、冷却部をペルチェ素子やヒートパイプなどに置き換えることで小型化できる。

【参考文献】

- (1) T.E. Diller, Advances in Heat Flux Measurement, Advances in Heat Transfer, 23, 279-368 (1993).
- (2) 小川吉彦, 熱電変換システム設計のための解析, pp. 59-67 (1998) 森北出版.

4. 今後の展望（今後の発展性、見込み等についても記述）

受熱部からの抜熱速度をペルチェ素子によりフィードバック制御する定温度型熱流束センサを提案し、試験装置の構築と原理検証試験を実施した。14kW/m²までの範囲で、センサによる計測値をコーンヒータにより与えた既知の熱流束値と比較し、提案したセンサによる熱流束計測が可能であることを示した。また流入熱流束に対するインパルス応答を調べ、センサの動的特性についても評価した。センサの原理検証が完了したことを踏まえ、今後はセンサの小型および計測精度・応答速度の向上を目指しシステムの熱設計およびセンサ回路の最適化を行う。

5. 成果の公表状況（学会への発表、学術誌への投稿等を記述。予定も含む）

提案する熱流束センサの原理検証実験の成果を学術誌（*Fire Technology* 等）に投稿予定。

6. 経費の使用状況

消耗品費・会議費・印刷費等		旅費		人件費	
事 項	金額(円)	事 項	金額(円)	事 項	金額(円)
ペルチェ装置	103,680	研究打合せ	20,030	(該当なし)	0
温度調整器	177,120	実験実施	19,630		
その他消耗品	173,540	宿泊費	6,000		
小計	454,340	小計	45,660	小計	0

東京理科大学 負担分 総計 500,000 円

豊橋技術科学大学 負担分 総計 1,577 円

※スペースが足りない場合はページを増やしても構いません。

※上記5に記載された成果公表については、別刷1部をご提出願います。PDFファイル等の電子データでも構いません。

※本成果報告概要書に記載された内容は、本拠点の成果報告としてWeb等で公開されることをお含み置き下さい。

※本成果報告概要書と併せて、研究報告書を提出頂いても構いません。（フォーマットは問いません。）

※後日開催予定の成果講評会で使用されるプレゼンテーション用の電子ファイルについても提出願います。（学内での報告に使用）