

第3回 HAKKO 熱の実験コンテスト

ヒート de アート

～サーモグラフィーアートの作製～

茨城大学大学院 理工学研究科 量子線科学専攻 池田研究室

メンバー

橋本康孝 佐々木誠 西峯広智 青木優太 日山洋平 山本悠眞



提出日 2019年12月23日

第1章

緒言

1-1 はじめに

本実験コンテストに応募するにあたり、我々は「熱」と「何か」を組み合わせ、これまでないものを生み出そうと考えた。いくつかの候補の中から、我々の目に留まったのは「エンターテインメント」であった。一口にエンターテインメントといっても様々なジャンルがあるが、その中でも我々は色彩鮮やかな芸術に着目した。例えば、夏の夜空を彩る花火がその一例である。現代の鮮やかな花火は金属化合物などと黒色火薬を組み合わせたものである(表1)。これらは、炎色反応(アルカリ金属元素やアルカリ土類金属元素を含む試料を高温に熱すると元素によって炎が異なる色を示す現象)を利用したものであり、励起された原子中の電子が、低いエネルギー状態に移る際のエネルギー差に相当する光(可視領域の波長)を色として観察している。すなわち、**元素特有の性質を活かして芸術として表現している**のである。我々はこの例に倣い、熱物性を利用した色彩鮮やかな芸術的表現はないかと考え、熱を可視化することができる赤外線サーモグラフィーに着目した。

表1 色と黒色火薬に混ぜ合わせる金属化合物の関係¹⁾

色	金属化合物
赤	炭酸ストロンチウム (SrCO_3)
黄	シュウ酸ソーダ ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$)
緑	硝酸バリウム ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$)
青	酸化銅 (CuO)
金	チタン合金 (Ti)
銀	アルミニウム (Al)

1-2 サーモグラフィーアート

赤外線は温度を持つすべての物体から自然に放射されている。物体の温度が高温になると放射される赤外線の放射量も大きくなり、その放射量は物体の温度の4乗に比例して大きくなる。赤外線サーモグラフィーはあらゆる物体から放射される赤外線エネルギーをレンズによって赤外線検出素子に結像し、電気変換された値にデジタル演算処理を施すことで温度を表現している。すなわち**熱を色として表現できるツールである**。一方で、金属材料は個々に異なる値の熱伝導率(熱の伝わりやすさ)と比熱(1kgの物質の温度を1°C上昇させるのに必要な熱量)を持つ。そのため、異なる金属をある一定の温度まで加熱する場合、金属

ごとにその温度に到達するまでの時間が異なる。この過程をサーモグラフィーにて観察したとき、熱平衡に達する前であれば、金属ごとに異なる色を示す。我々の研究グループは、これらの技術や特性を応用し、**芸術(サーモグラフィーアート)として表現できる**のではないかという考えに至った。人や動物から発せられる体温をモチーフとしたサーモグラフィーアートはいくつか存在するが²⁾、金属材料の熱物性を利用した作品は筆者が調べる限り存在しない。ここに我々のオリジナリティがあり、本実験を遂行するに至った。

図1に作品のイメージを示す。図中のA~Fは一枚の基盤金属上に配置された異なる金属を表しており、各金属片の輪郭に沿って断熱材を配置する。基盤金属の背面を均一に加熱すると、各金属片の熱伝導率と比熱の違いから表面の温度に差が生じる。作品を直接見た限りでは無機質な金属板にしか見えないが、サーモグラフィーを通して見た場合、一枚の絵画のような鮮やかな色彩を示す。金属板の無機質さとサーモグラフィーの色合いの緩急がこれまでに類のない芸術作品を生み出す可能性を秘めている。また、温度が連続的に変化するため、デザインの工夫次第では動画のように表現することもできると考えている。これらの実現のためには金属の熱物性および熱の挙動を知り、それらを制御する必要がある。したがって、本実験にてサーモグラフィーアートに必要な情報を調査した。

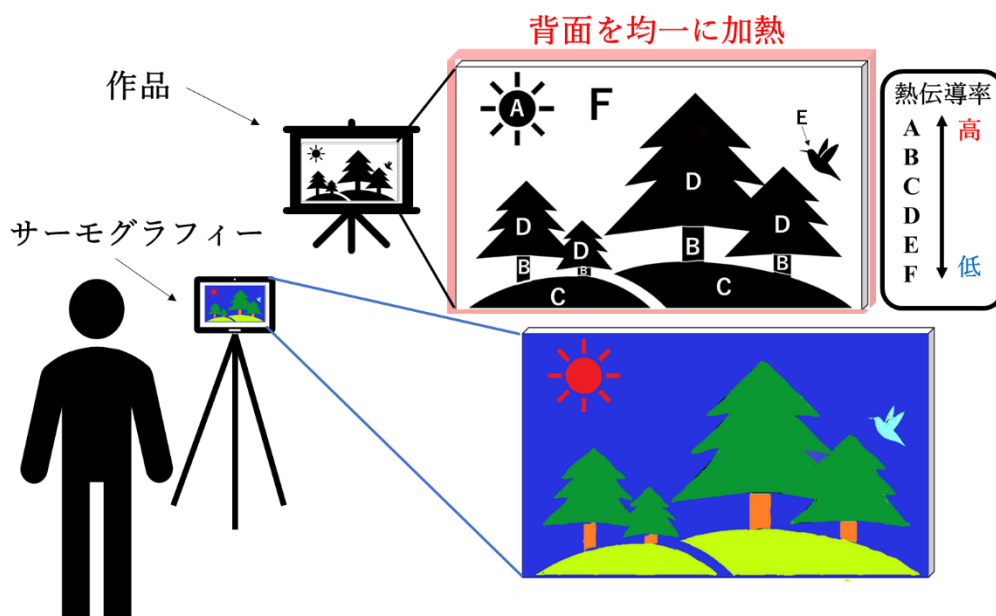


図1 サーモグラフィーアートのイメージ

第2章

実験

2-1 実験手順

サーモグラフィーアート作製における課題として、I)材料選定と形状の最適化、II)加熱方法および接着方法の検討、III)金属間の断熱の3つが挙げられる。以下で全体的な実験手順を簡潔に示す。

I) 材料選定と形状の最適化

始めに、熱伝導と比熱に注目し、今回の実験に用いる金属材料を決定した。材料を選定した後、レーザフラッシュ法にて熱拡散率の測定を行い、測定結果をもとに熱伝導率を算出した。算出値を使用して粒子法によるシミュレーションを行い、得られた結果から使用する金属試料や板厚を決定した。

II) 加熱方法および接着方法の検討

本作品では、一枚の基盤金属上に金属片を接合し配置する。このとき、金属の熱伝導率や比熱の違いによって色を出すために必要な、均一に熱が伝わるような加熱方法や接着方法を検討した。加熱方法としてヒーターによる加熱や、容器にお湯を溜め、基板金属に接触させる方法で実験を行った。また、接着には高熱伝導テープを使用した。

III) 金属間の断熱

本作品では、色彩を明瞭にするために各金属片の輪郭に沿って断熱材を配置する。この断熱材について、作品の外観を損なわずに、隣接する金属への熱伝達を遮断するための適切な材質や厚さを検討した。

これらの実験を経て、実際に作品を作製し、サーモグラフィーで確認・評価する。得られた結果をフィードバックし修正を繰り返すことで、作品の精度を向上していく。

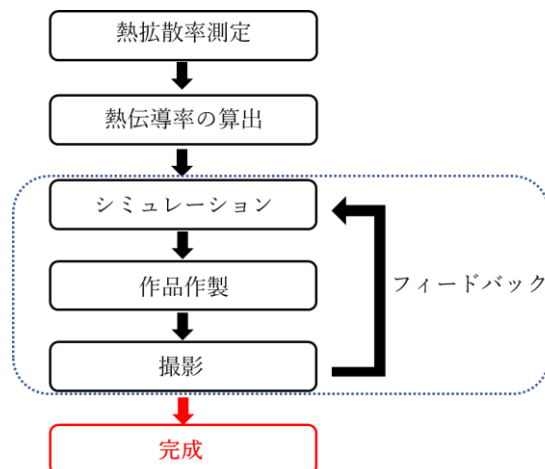


図 2-1 実験フロー

2-2 熱拡散率の測定

本実験では、高効率化のためにシミュレーションを使用した。シミュレーションで使用する物性値を決定するために、レーザフラッシュ法を用いて熱拡散率を測定し、その値を元に熱伝導率を求めた。

熱拡散率はレーザフラッシュ法を用いて測定を行った。レーザフラッシュ法は、試料表面をレーザでパルス加熱し、試料裏面の時間に対する温度変化を計測する事で、熱拡散率を測定する。(図 2-2)

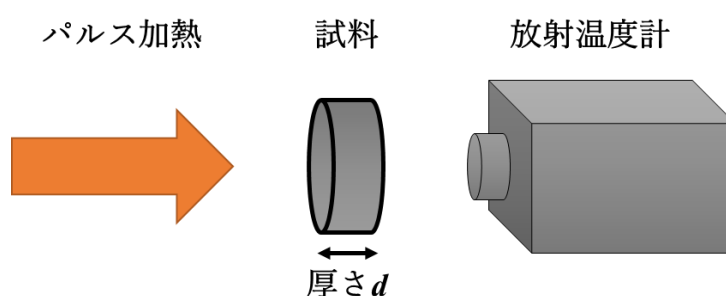


図 2-2 レーザフラッシュ法の概念図

また本測定では、ハーフタイム法を用いて測定を行った。この方法では、試料裏面の温度が最高温度の二分の一に達するまでにかかった時間 $t_{1/2}$ (図 2-3) と試料厚さ d から、熱拡散率 α を次式により求める。³⁾

$$\alpha = 0.1388 \times \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (2-1)$$

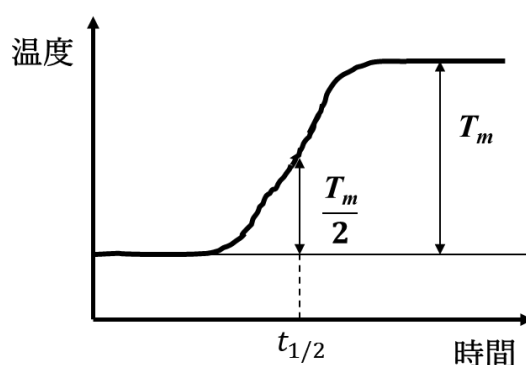


図 2-3 温度履歴曲線

測定した試料は Al, Cu, SUS304, Ni, Sn, Zn の 6 種類で、試料の厚さは SUS304 を除き 2 [mm] を用いた。SUS304 は 1 [mm] を用いた。また、測定は全て常温 (27 [°C]) で行った。

2-3 粒子法シミュレーション

試料を一方向から加熱した際にもう一方の表面の温度がそれぞれの材料の熱物性の違いによってどの程度の違いが生じ、色のコントラストとして表現できるのかを粒子法シミュレーションによって検討した。

粒子法とは、有数個の粒子からなる連続体の挙動を粒子の運動によって計算する方法である。各粒子は速度や圧力といった変数を保持しながら移動する。従来、連続体の計算法として広く用いられてきた差分法や有限要素法では計算対象の空間を格子によって分割する。一方、粒子法では計算点に粒子を用いており以下のような特徴を持つ。

- 形状データに等間隔に配置した粒子として、解析モデルを作成することができる
- 粒子同士の位置関係は固定されないため、大変形に対応できる
- 自由表面は粒子の位置によって簡単に取り出すことができる

そのため、自由表面の追跡が課題となる流体解析や大変形を伴う超弾性体解析、破断の起きる構造体の解析などに適している。

このシミュレーション装置では、粒子法的一种である MPS(Moving Particle Simulation)法を主に使用している。MPS法は、東京大学大学院工学系研究科の越塚誠一教授が開発した粒子法で、粒子間相互作用モデルを使って流体の計算を行う⁴⁾。特に非圧縮性流体の解析において定性的に精度の良い結果を示し、激しい水面の変化や飛沫の発生、水塊の分裂や合体も安定に解くことができる。非圧縮性流体とは流体力学で流体の運動を扱う際、圧力や温度による密度の変化が無視できるほど小さな流体のことを表し、水は非圧縮性流体として扱うことができる。

粒(流体)の動かし方は粒子の移動量距離は速度×時間で表されるので速度の情報が必要である。流体の速度 v 、外力 F 、液体の密度 ρ 、動粘性係数 ν から加速度 $\frac{Dv}{Dt}$ を次式のナビエ・ストークスの方程式により求める。

$$\frac{Dv}{Dt} = F - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v \quad (2-2)$$

右辺の第1項 F は外力を表し、重力や浮力などが該当する。第2項は圧力による加速度を、第3項は粘性項による加速度を表している。また、 ∇^2 はラプラス演算子を用いて、 $\nabla^2 = \Delta$ と置ける。

シミュレーション 1

PROMETECH社のParticleworks ver 6.0を用いて6種類の試料(Al, Cu, SUS304, Ni, Sn, Zn)に対し粒子法シミュレーションを行った。80°Cに熱された厚さ1mmのCu板から厚さ2mmの試料に熱が移動し、熱源とは反対側の表面の温度が上昇する過程を想定した。シミュレーションの形状データは3D CADソフトにて作成した(図2-4)。

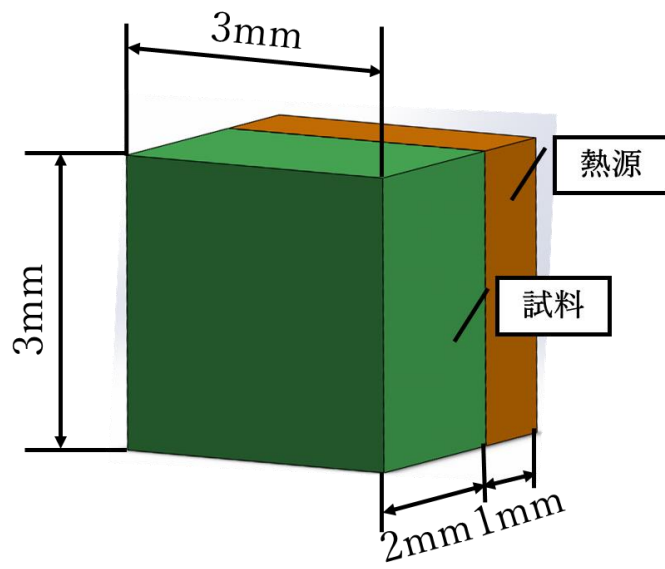


図 2-4 形状データ

2-4 サーモグラフィーアートの作製

2-4-1 サーモカメラについて

全ての物体は赤外線を放出している。赤外線とは、肉眼で見ることのできる可視光線と同じ光の一種だが波長が長い (0.7~400 μm) ため肉眼では見えない。サーモカメラは、その赤外線をレンズによって赤外線検出素子に集光する。この赤外線検出器は吸収した赤外線により暖められ、温度に応じた電気信号を生じるため赤外線を温度に変換し観察することができる。放出されるエネルギーを $I[\text{W}/\text{cm}^2]$ 、ステファン・ボルツマン定数を $\sigma (5.7 \times 10^{-12} [\text{W}/\text{cm}^2\text{K}^4])$ 、物体の温度を $T[\text{K}]$ とすると、ステファン - ボルツマンの式より、赤外線エネルギーと温度には次式のような関係がある。

$$I = \sigma T^4 \quad (2-3)$$

(2-3)式より、温度上昇に伴い赤外線エネルギーも上昇することが分かり、温度の違いを観察できることが分かる。

しかし、サーモカメラ等の放射温度計は、放射率というパラメータを考慮する必要がある。物体に光 (エネルギー: 1) が入射するとそのエネルギーは吸収、反射、透過に分かれる。つまり、“吸収率 + 反射率 + 透過率 = 1”が成り立つ。また、キルヒホッフの法則より、“吸収率 = 放射率”が成り立つ。この二つの関係より、反射率と透過率により、放射率が決定すると分かる。つまり、放射率とは試料の表面 (反射率) と試料の材質 (透過率) に依存する定数であり、反射率と透過率が 0 である黒体は放射率が 1 になり、最大値を示す⁵⁾。

2-4-2 作品作製と撮影

放射率

金属は一般的に反射率が大きいので放射率が小さくなってしまふ。また、この作品は異なる金属（異なる比熱）により温度の違いを観察したいため、放射率は同じ値にする必要がある。今回は、一様な厚さでの黒体化が可能であるカーボンテープにより黒体化を行った。よって、サーモカメラでの放射率は 0.95 に設定した。

作品の概要

イメージ図を図に示す。ロゴの赤の分は Sn、緑の部分は SUS で作製しカーボンテープで黒体化した。これらの金属板は 200mm×200mm×2mm の Cu 板に貼り付けた。また、図では一部しか断熱材が付いていないがロゴ以外の部分には断熱材を隙間なく貼り付けた。そして、Cu 板の下には約 30mm の高さの Al ボックスを取り付けた。

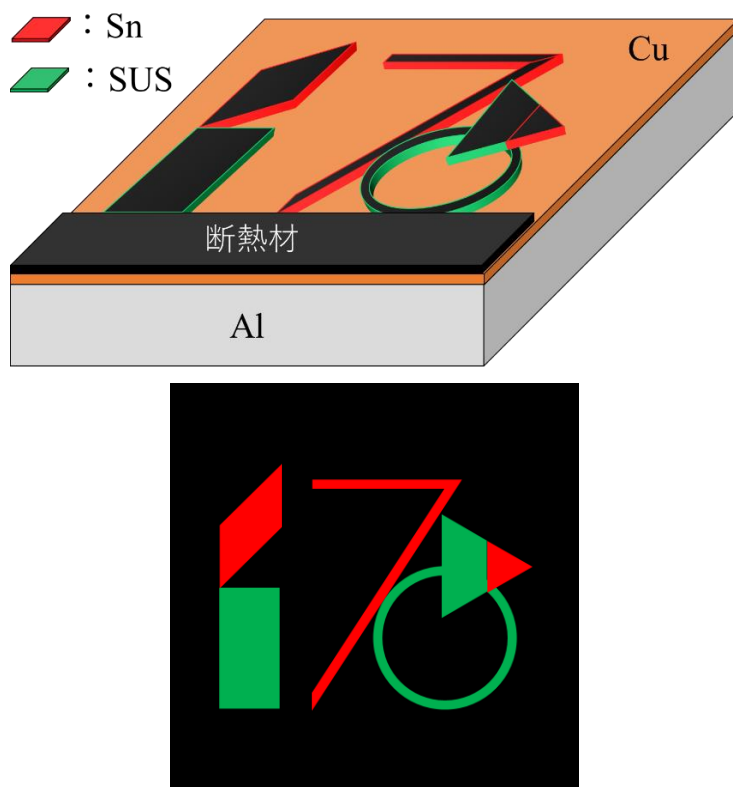


図 作品のイメージ図

加熱方法

加熱時に、ムラがあり局所的に高温部があれば、そこに近い部分から高温に近づいていくのは当然である。加熱方法の条件として最も重要なことは、全体を同一温度で加熱することである。我々は、一様に加熱するためにヒーターによる加熱や、容器にお湯を溜め、基板金属に接触させる方法で実験を行った。

第3章 結果・考察

3.1 熱拡散率の測定結果及び熱伝導率の算出

本測定に用いた試料の形状は円板であり，その寸法を下の表 3-1 に示す。

表 3-1 各種試料寸法

試料	重さ [g]	直径 [mm]	厚さ [mm]
Al	0.1996	9.93	0.95
Cu	0.6520	9.73	0.98
SUS304	0.5888	9.73	0.99
Ni	0.6998	9.94	1.00
Sn	0.5818	9.90	1.03
Zn	0.5328	9.91	0.96

これらの試料の熱拡散率および試料密度の測定結果，比熱容量の文献値から算出された熱伝導率をまとめたものが下の表 3-2 である。なお熱伝導率 λ は，比熱容量 C と密度 ρ と熱拡散率 α から以下の式を用いて算出した。

$$\lambda = C\rho\alpha \quad (3-1)$$

さらに，測定した密度と算出した熱伝導率をそれぞれ文献値と比較した。（表 3-3，3-4）

表 3-2 熱伝導率とその導出に用いた物性値

試料	熱拡散率 [m ² /sec]	比熱容量 ⁶⁾ [J/kg·K]	密度 [kg/m ³]	熱伝導率 [W/m·K]
Al	8.93×10^{-5}	900	2713	218
Cu	11.2×10^{-5}	385	8948	386
SUS304	3.33×10^{-5}	502	7999	13.4
Ni	1.83×10^{-5}	440	9018	72.6
Sn	3.36×10^{-5}	226	7338	55.8
Zn	3.96×10^{-5}	383	7195	109

表 3-3 密度の文献値との比較

試料	密度 ⁶⁾ [kg/m ³]	測定値 [kg/m ³]	文献値との比較 [%]
Al	2700	2713	100
Cu	8960	8948	100
SUS304	7820	7999	102
Ni	8900	9018	101
Sn	7290	7338	101
Zn	7130	7195	101

表 3-4 熱伝導率の文献値との比較

試料	熱伝導率 ⁶⁾ [W/m·K]	測定値 [W/m·K]	文献値との比較 [%]
Al	204	218	107
Cu	385	386	99.7
SUS304	16	13.4	84
Ni	90	72.6	81
Sn	64	55.8	87
Zn	113	109	96.5

測定した密度は文献値とほぼ一致した。その一方で熱伝導率を文献値と比較すると、試料によってばらつきがあり、0.3~19%程の誤差が含まれていた。文献値との差が特に大きかった SUS304, Ni および Sn は、熱伝導率が 6 種類の中で小さく(表 3-2 参照)、試料厚さとうまくマッチしなかったことが原因だと考えられる。また、SUS304 は JIS 規格において、Cr(18.00~20.00%)、Ni(8.00~10.50%)と記されているように、その化学組成が範囲で指定されており、組成が唯一つに決まっていない⁷⁾。そのため、文献値の SUS304 の組成と我々の SUS304 の組成に違いがあり、熱伝導率の文献値との大きな差につながったと考えられる。次に、Ni は純度により熱伝導率が異なり、99.9 [%]の Ni の熱伝導率が 90 [W/m·K]であるのに対し、99.2 [%]の Ni では 59[W/m·K]である⁸⁾。このように Ni の熱伝導率は純度に対して敏感であり、これが誤差に影響していることも考えられる。

全ての試料に対して考えられる誤差の原因は、試料を装置へ設置した際に、試料がレーザに対して完全に垂直でなかったことや、レーザで加熱した際に、発生した熱が試料裏面に到達せずに装置へと熱が逃げたことでレーザによる加熱が想定よりもされなかったこと、試料が薄く熱の拡散が早すぎたために、温度履歴曲線に使用する測定データが少なくなったことなどが挙げられる。

次章では、本計測により得られた熱伝導率と密度、加えて比熱容量の文献値をもとにシミュレーションを行う。ここで、熱伝導率や比熱容量は温度依存性があるため、正確なシミュ

レーションを行うためにはそれらの測定値が必要である。しかし、常温での値と我々が本実験で想定している 100°Cでの値との間にほとんど差異は見られなかった。(表 3-5, 表 3-6) シミュレーションはあくまで温度分布変化の予想および作品のための素材と形状の最適化を行うため利用するので、この数%程の誤差はシミュレーション結果に大きく影響しないと考え、常温の値をシミュレーションで使用した。

表 3-5 熱伝導率の比較

試料	熱伝導率 ^{6,8,9)} [W/m·K]		文献値との比較 [%]
	20 [°C]	100 [°C]	
Al	204	206	101
Cu	386	386	100
SUS304	16	16.3	102
Ni	90	83	92
Sn	64	63	98
Zn	113	112	99.1

表 3-6 比熱容量の比較

試料	比熱容量 ^{6,8-10)} [J/kg·K]		文献値との比較 [%]
	20 [°C]	100 [°C], 127 [°C]*	
Al	900	942	105
Cu	385	398	103
SUS304	502	511	102
Ni	440	491*	112
Sn	226	244*	108
Zn	383	404*	105

3-2 シミュレーション結果 1

図 3-1 に、各物質を加熱してから 0.03s 経過後の試料の厚さ方向の温度分布を、図 3-2 に 0.25s 経過後の試料の厚さ方向の温度分布をそれぞれ示す。また、表 3-7 に各物質の比熱と熱伝導、表面温度をまとめた。シミュレーションでは熱源や試料から大気中への熱の移動を考慮していないため、ほんのわずかな時間で温度変化が生じているが、熱物性の違いによる熱伝導については実際の挙動に近い結果が得られていると考えられるため、ここでは試料の表面温度の違いにのみ着目する。

0.03s 経過後の結果から、Sn と Ni を除いては、熱伝導が高い順に表面温度が高くなることが明らかになった。また、0.25s 経過後の結果から、SUS 以外の試料がほぼ一定の値を示すことが明らかになった。この結果から我々は、低温部(青色側)には SUS を使用し、高温部(赤色側)には他の 5 種類の金属から最適なものを選択・使用し、2 色での作品の作製を目指した。

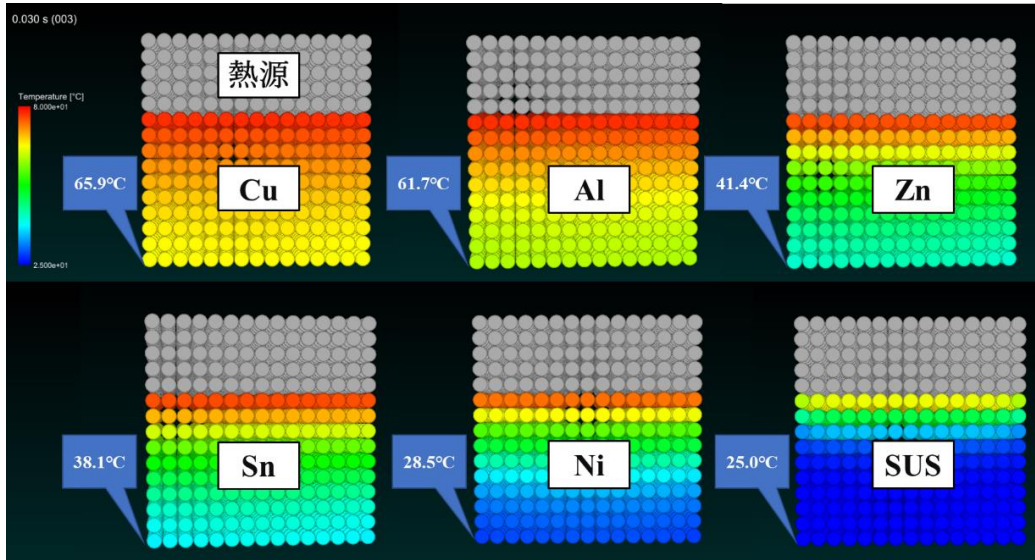


図 3-1 0.03s 経過後のシミュレーション結果(固体熱源)

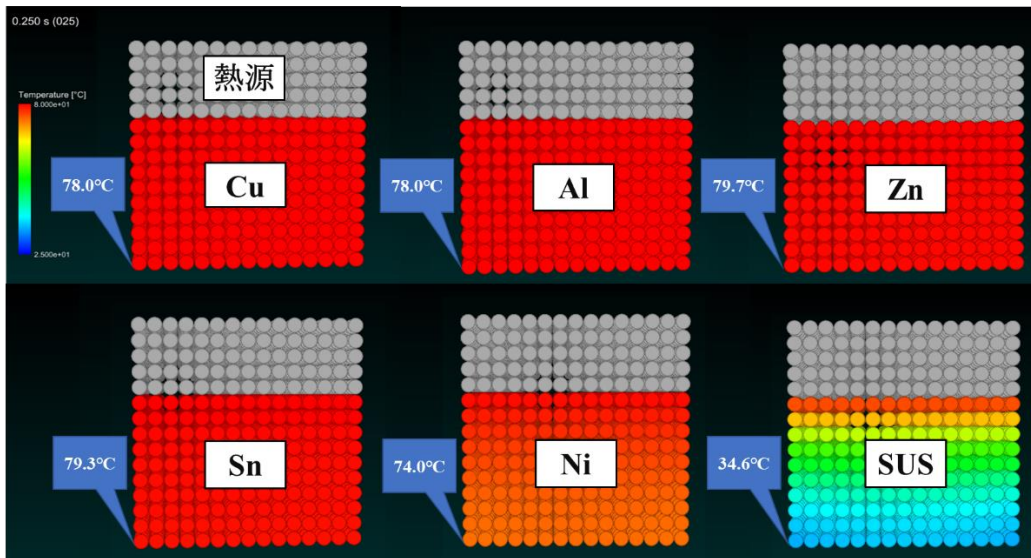


図 3-2 0.25s 経過後のシミュレーション結果(固体熱源)

表 3-7 各物質の熱物性値と表面温度の関係

試料	比熱 [J/(kg · K)]	熱伝導 [W/(m · K)]	0.030s における 表面温度[°C]	0.250s における表 面温度[°C]
Cu	385	386	65.9	78.0
Al	900	218	61.7	78.0
Zn	383	109	41.4	79.7
Ni	440	72.6	28.5	79.3
Sn	226	55.8	38.1	74.0
SUS304	502	13.4	25.0	34.6

3-3 デザインの決定

使用する金属板の材質を2種類に決定したことから、作品のデザインはサーモカメラの表現色（主に赤、橙、黄、緑、青）のうちから2色が使用されているものを検討した。中でも茨城大学のロゴマークと創立70周年記念事業ロゴマークを組み合わせたデザイン

（図3-3）は上記の条件を満たしつつ本学のイメージカラーが表現されていることから本作品のデザインに決定した。茨城大学のロゴマークは学問の灯（ひ）を、創立70周年記念事業ロゴマークは未来へ向けたイメージを表現していることから、両者を組み合わせた本作品は我々の母校である茨城大学の知が未来の学生達へと次々に受け継がれていくことを願ったものとした。また、本作品では色の調節を金属の材質のみで行い、周囲の断熱材を含め、厚さが均一になるような作品を目指した。

実際の作品では、緑部分にSUSを使用することが決定した。赤部分に関して、SUS以外の5種類の中から最適なものを選択するために、追加でシミュレーションを行った。

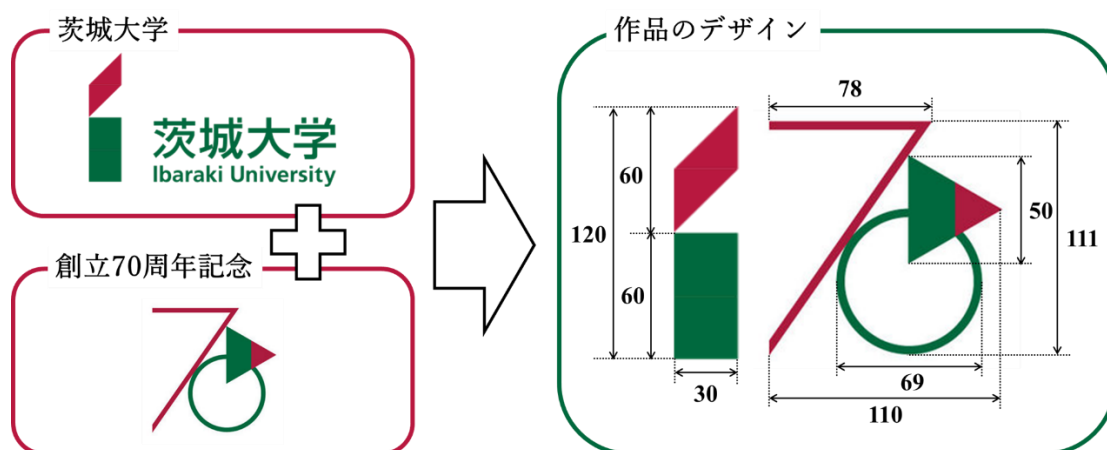


図 3-3 作品のデザイン

3-4 シミュレーション結果 2

シミュレーション結果1では、80°Cに熱された厚さ1mmのCu板を熱源として想定した。ここでは、高温部(赤色側)に使用する金属を選定するために、また、様々な加熱方法を想定して、熱源流体を直接金属試料に衝突させるシミュレーションを行った。2s経過後の試料の厚さ方向の温度分布を図3-4に示す。

この結果から、最も温度の高いSnを高温部候補の1つに決定した。また、6試料の中で熱伝導率が最も高いCuも候補の1つに決定した。次に、SnとCuのどちらが最適かを、実際に茨城大学のロゴの「i」の部分を実験しシミュレーションを行うことで検討した。

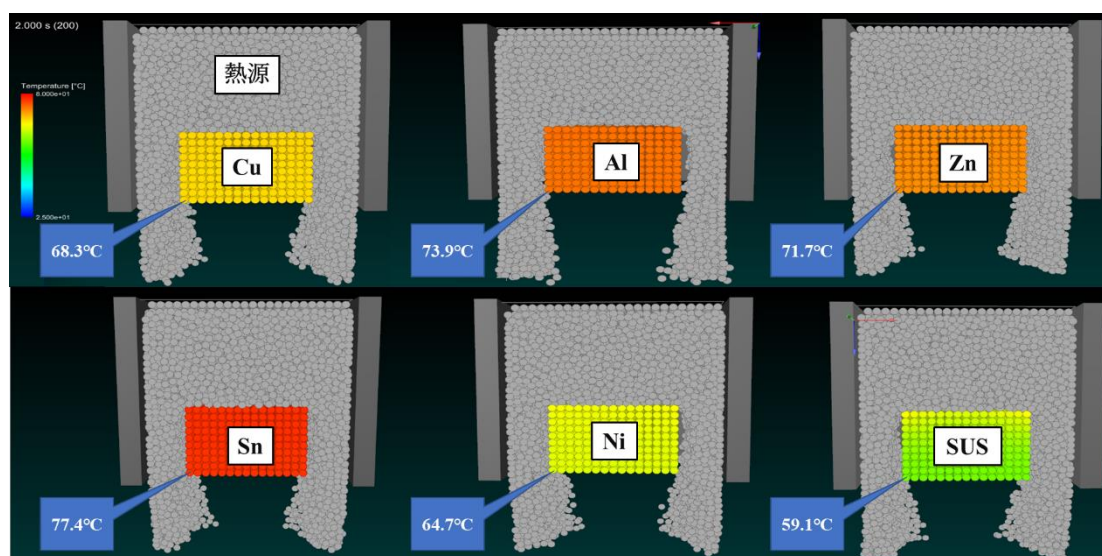


図3-4 2s経過後のシミュレーション結果(流体熱源)

3-5 シミュレーション結果3

実際に作品を作製する状況を想定したシミュレーションを行った。
 80°Cに熱された厚さ1mmのCu板から厚さ2mmの試料に熱が移動し、熱源とは反対側の表面の温度が上昇する過程を想定した。シミュレーションの形状データは3D CADソフトにて作成した(図3-5)。

図3-6に作品の「i」部分の温度分布のシミュレーション結果を示す。CuとSUSを用いて目的の色を表現することができたので、実際の作品の作製に取り組んだ。

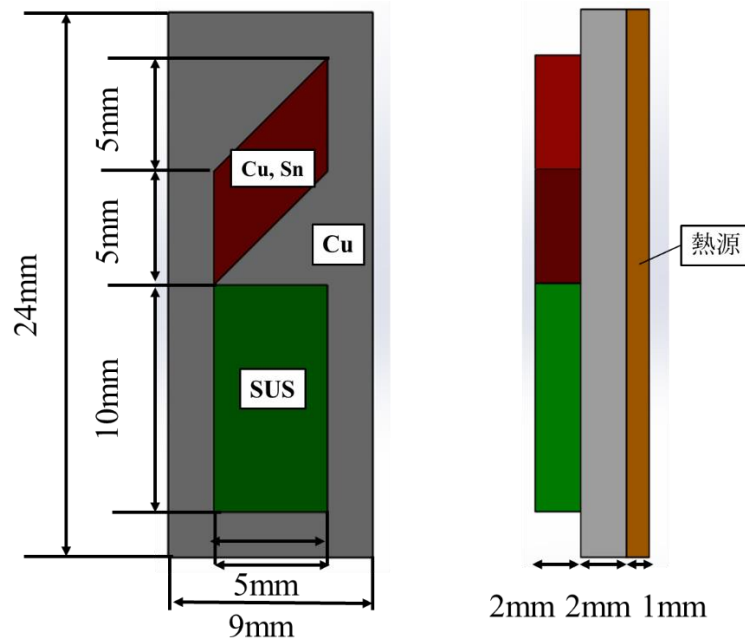


図3-5 「i」マークの形状データ

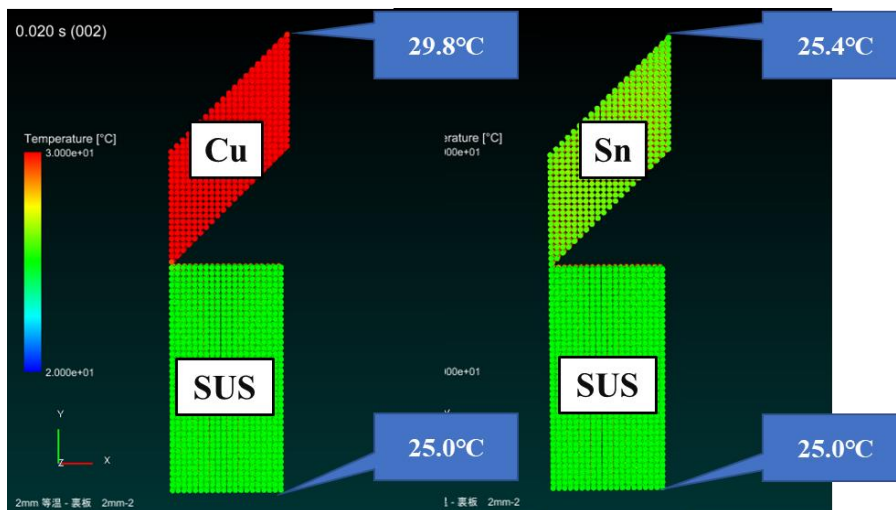


図3-6 0.02s 経過後の「i」マークシミュレーション結果

3-6 サーマグラフィーアートの作製結果 1

目的の大きさで、「i」部分を作製し、サーモカメラにて撮影した。結果を図 3-7 に示す。この結果から、図 3-6 のシミュレーション結果とは異なり、高温部に Sn を使用したほうが目的に近い色合いが得られた。図 3-7 から、Cu と SUS の接触部に明らかな温度上昇が観察された。Cu の高い熱伝導率もしくは Cu - SUS 間の熱伝達が関係していると考えられる。これについて、詳細な調査が必要である。また、この結果から、高温部には Sn を使用することに決定した。

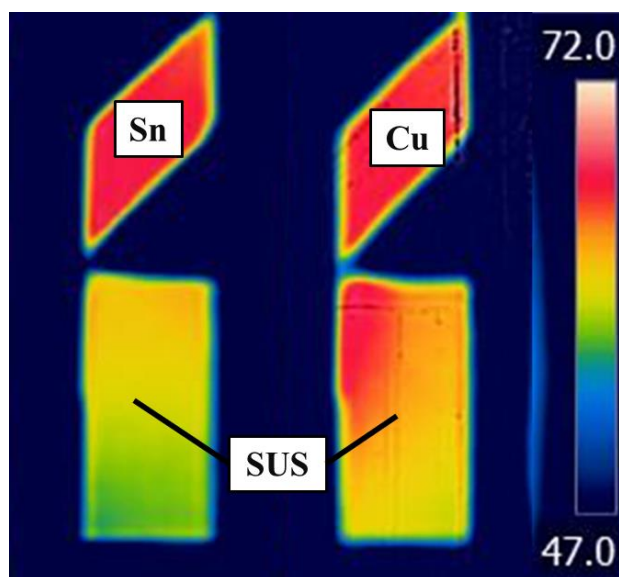


図 3-7 「i」部分作製結果

3-7 サーマグラフィーアートの作製結果 2

加熱方法の決定

ヒーターによる加熱では、ヒーターの中心部と辺縁部で温度が異なり、図 3-8 のような熱のムラができてしまった。「i」部分のみであれば均熱部に収まるので問題無かったが、「70」部分を含めると熱のムラの影響を受けてしまう。そこで私たちは図 3-9 のような加熱方法を考えた。Al のボックスに水を入れ、それを加熱することにより、Cu 板は全体的に且つ、同一の温度で温められる。

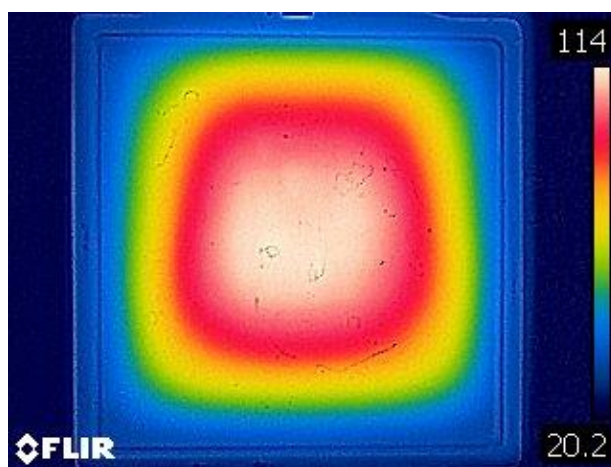


図 3-8 ヒーターによる加熱結果

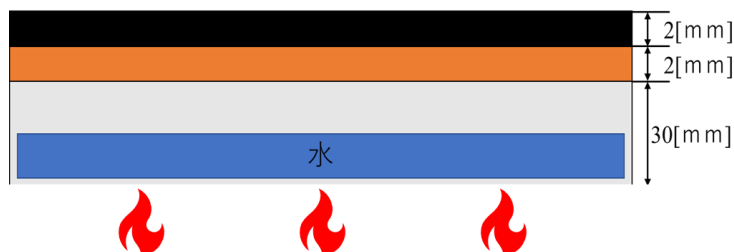


図 3-9 加熱方法

接着方法の決定

Cu 板に密着していない場合や接着剤の厚さにムラがあれば、その影響で温度が変化してしまう可能性がある。そのため、接着方法は一様な厚さで貼り付けることができ、熱を伝えることのできる熱伝導率の良い両面テープを使用した。

完成作品

完成した作品の可視画像と赤外線画像を図 3-10 に示す。この結果から Sn と SUS は約 5℃の温度差がついており、概ね成功したと言える。ただ、現状いくつか問題点も挙げられる。ひとつは、断熱部が完全に断熱できていないことである。今回のように、凹凸の無い作品に仕上げるためには、金属の厚さと同じ厚さの断熱材のみで作製しなければならない。完全に断熱するためには、金属や断熱材の種類を再検討し、調節していく必要がある。

もうひとつは、目的の温度になっていない部分が出てしまっていることである。この原因として同一元素でも形状に応じて温度上昇の速度が異なっていることが考えられる。そのため、各形状に応じて熱の伝わり方を把握し、制御できるのが今後の課題である。

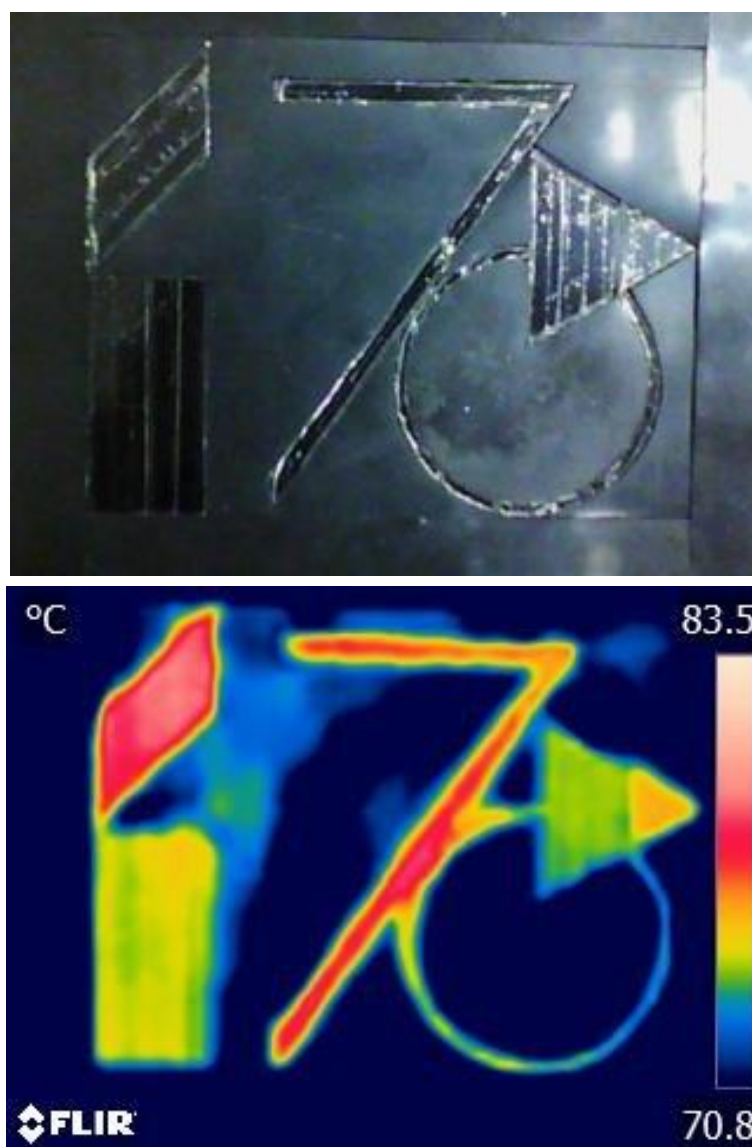


図 3-10 可視画像(上)と赤外線画像(下)

第4章

結言

本実験では、6種類の金属材料(Al, Cu, SUS304, Ni, Sn, Zn)の熱物性について調査を行い、その中でも大きく温度差をとることのできる Sn と SUS304 を使用して、茨城大学創立70周年記念のロゴをモチーフにサーモグラフィーアートの作製を実施した。

本実験により、金属材料の熱物性を使用して温度差の制御が可能であることを明らかにした。また、それを利用したサーモグラフィーアートの作製に概ね成功した。作品について、温度差をつけることはできたものの、デザイン通りの明瞭な色の違いまで表現するには至らなかった。狙い通りの色にならなかった理由として、試料形状の違いが考えられる。同じ色の箇所は同じ金属を配置すべきと考えていたが、今回の結果から、同じ色の箇所でも金属片の形状に応じて試料の厚さや金属の種類を逐一吟味しなければいけないことが判明した。色彩をコントロールするためには、平衡に向かう材料中の温度分布の精密な制御が必要になる。今後、さらに検討を重ねることで精度の向上が見込まれる。

サーモグラフィーアートは使用する材質、昇温速度、気温など様々な要因が複雑に重なり合い成り立っている。生み出される作品に同じものは1つとして存在せず、そこにこの芸術の奥深さや可能性がある。我々は考えている。実際に、今回作製した作品は、元のデザインにはない印象を我々に与えてくれる。今回得られた様々な知見を参考に、今後は複数の金属試料を使用した作品に挑戦したい。また、加熱および冷却による温度の連続的变化を利用して、静止画ではなく動画としての作品の作製にも挑戦していきたい。

参考文献

- 1 冨木一馬『花火のふしぎ』ソフトバンククリエイティブ株式会社, 2011年, p108
- 2 平澤賢治『KENJI HIRASAWA PORTRAITS』リブロアルテ, 2013年
- 3 阿子島めぐみ「レーザフラッシュ法による熱拡散率測定」, 『高温学会誌』第34巻第5号, 188~195頁
- 4 越塚誠一, 柴田和也, 室谷浩平 著 『粒子法入門: 流体シミュレーションの基礎から並列計算と可視化まで』, 東京: 丸善出版, 2014年.
- 5 KEYENCE「放射温度計とは」
(<https://www.keyence.co.jp/ss/products/recorder/lab/thermometry/radiation.jsp>
閲覧日: 2019年9月12日)
- 6 株式会社八光電機「各種物質の性質: 金属(固体)の性質」,
(<https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm> 閲覧日: 2019年7月30日).
- 7 ステンレス協会「オーステナイト」
(<http://www.jssa.gr.jp/contents/products/standards/jis/austenite/> 閲覧日: 2019年7月30日).
- 8 日本熱物性学会『新編 熱物性ハンドブック』, 東京: 株式会社養賢堂, 2008年.
- 9 自然科学研究機構 国立天文台『理科年表 平成27年』, 東京: 丸善出版株式会社, 2014年.
- 10 小澤美奈子『アトキンス 物理化学要論 (第5版)』, 東京: 株式会社東京化学同人, 2012年.

謝辞

本実験を進めるにあたり、株式会社八光電機からは貴重な実験の機会を頂いたとともに、資金提供をして頂きました。厚く御礼を申し上げ、感謝いたします。また、池田輝之教授、永野隆敏講師、西剛史准教授には多大な助言を賜りましたことを厚く感謝申し上げます。また茨城大学工学部同窓会多賀工業会から資金援助を頂きました。ここに感謝の意を表します。