

断熱材・グラファイト複合体を用いた モバイル電子機器のシステムパフォーマンス向上

概要

超熱拡散能力を有するグラファイト箔と超低熱伝導率の断熱シートを組み合わせて、熱負荷をかけたGoogle Pixel 3XLに試験的に組み込んだところ、グラファイト、断熱材または空気のみといった単一組成による熱対策手段と比較して、定常状態における表面接触温度が最大3.2°C低下し、ジャンクション温度の最大上昇は1°C未満であることが確認できた。軸対象の熱伝導モデルのシミュレーションをCOMSOLで行い、厚さが同等(約350um)の異なる5つの熱対策構造における表面温度の低下傾向を確認した。そのうちの4つの構造については、熱負荷したGoogle Pixel 3XLに実験的に実機に組み込むこみ、評価検証を行った。最も表面温度を低減する結果となった構造は、ユーザーの安全に適切な表面温度を維持しながら、定常状態におけるシステムパフォーマンスが向上した。定常状態での3D Mark -Sling Short Extremeによるベンチスコアが3041から3823に上昇し、これはシステムパフォーマンスが12.4%向上したことを意味する。定常状態におけるヒートフローおよび厚さの評価によって断熱材の膜厚方向の熱伝導率を求め、また熱拡散の評価によってグラファイトの面方向への熱伝導率を求めることで、デバイスの向上と材料の特性の関連性を示した。グラファイトの面方向への熱伝導率は、定常状態における熱拡散評価において実験的に妥当性を確認した。この評価で計測された100um厚の高性能グラファイト箔の能力は、100um厚さの合成グラファイト箔及び天然グラファイト箔より30%高かった。

キーワード

グラファイト、超熱拡散能力、断熱材、超低熱伝導率、複合体、ヒートスプレッド、熱伝導率、厚さ、表面接触温度、ホットスポット、ジャンクション温度、周囲温度、定常状態、Google Pixel 3XL (Pixel)、SoC (システムオンチップ)、3DMark – Sling Shot Extreme、ベンチマークスコア、システムパフォーマンス、ユーザーの安全

主な記号

k 熱伝導率 (W/m·K)

t 厚さ (mm、μm)

T_s 表面接触温度 (K、°C)

T_j デバイスジャンクション温度 (K、°C)

ΔT 温度変化 (K、°C)

q'' 熱流束 (W/m²)

R'' 熱抵抗 (K·m²/W)

t·ΔT 固有熱拡散能力 (μm·K)

序論

ヒートスプレッド(グラファイト)および断熱材(空気、ポリマー)は、モバイル電子機器産業における熱の問題に対処するために、広く一般的に利用されてきた。より処理能力が高く、より薄型のデバイスという方向性が標準的な要求事項となるにつれて、表面接触温度によるユーザーの安全という課題への対処は、モバイル電子機器にとって急務となってきた。

UL (Underwriters Laboratories) の“62368-1: 2017 Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements.” (2017) は、特定の温度と時間についての皮膚の直接接触に基づいて¹、モバイル電子機器産業全体で受け入れられている。以前は受動的熱対策ソリューションによってT_sを規格値未満に抑えることができていたが、空気や合成グラファイトといった一般的な材料の多くは技術的な限界に直面している²。システムパフォーマンスを維持する熱対策ソリューションが不十分な場合、広く実施されている対策としてプロセッサのパワースロットリングがあるが、これによりシステムの消費電力が最大50%低下することもある。³

比較的温度が低く(100°C未満)、能動的冷却を行わない薄型のモバイル電子機器においては、デバイス内の伝熱の主要モードは熱伝導である⁴。それに比べると内部の対流および放射は無視できるレベルであると考えられており、本稿ではこれ以上検討しない。

式(1)で示すフーリエの1次元熱伝導の法則によれば、理論上の温度変化(ΔT)は伝熱媒体の温度抵抗(R'')に正比例する。

$$(1) \quad q'' = \frac{\Delta T}{R''} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

所定の系における熱流束(q'')を一定とした場合、ΔTは、厚さ(t)と伝導率(k)の比として求められるR''によって決まる。

$$(2) \quad R'' = \frac{t}{k} \left(\frac{K \cdot m^2}{W} \right)$$

式(1)と(2)を組み合わせて整理すると、T_sはジャンクション温度(T_j)、t、kおよびq''の関数と見なすことができ、これは式(3)および下図の1次元抵抗回路網(図1)で表される。q''およびtが一定となる制約された系では、kを低くすることでT_sを下げられる。

$$(3) \quad T_s = T_j - \frac{q'' \cdot t}{k} \quad (K, ^\circ C)$$

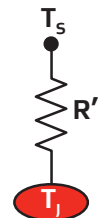


図1：1次元熱抵抗回路網。熱はT_jからR''を通じてT_sへ流れる

系を3次元の伝熱(図2)に拡張すると、平面方向の熱拡散はT_sにとって不可分の要因となり得る。面方向と膜厚方向いずれの熱伝導率も、所定の厚さと面積の材料における熱の拡散に大きく影響する。超低熱伝導率(膜厚方向)の断熱材を超熱拡散能力のグラファイトと組み合わせることで、薄型モバイル電子機器の熱管理に使用される既存の材料と比べて熱拡散性能が非常に高い熱対策複合体ソリューションが得られる。

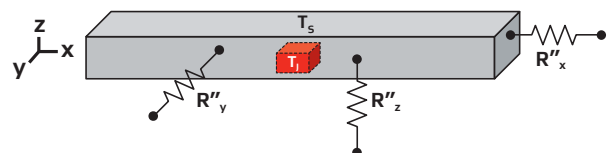


図2：3次元熱抵抗回路網。熱はT_j(デバイスの中心)から、対象面T_sを含む複数の方向へ流れる。

材料の選定

Gore® Thermal Insulation (W. L. Gore & Associates, Inc. 製) は、空気よりも低い超低熱伝導率を示す薄いシート状 (100µm~250µm) の断熱材料 (以下「本断熱材」) である。NeoNxGen™ Thermal Management Solutions (NeoGraf Solutions, LLC 製) は、超固有熱拡散能力を示す厚いグラファイト箔 (70µm~270µm) である (以下「高性能厚膜グラファイト」)。

熱源と対象面との間に配置した場合、断熱材とグラファイトそれぞれの層で別個に T_s を低下させることもできる。利用可能な面積と表面ホットスポットの面積との比が約1:1の場合、断熱材のみを使用するのが最適である。断熱材は比較的等方性が高いのに対し、グラファイトは非常に異方性の高い挙動を示し、材料の面内での熱伝導に好適である。この特性は、利用可能な面積と表面ホットスポットの面積との比が2:1に近いかそれ以上である場合に、 T_s の低下に対して顕著な効果がある。このようなシステム構成においては、断熱材をグラファイトと組み合わせることでグラファイトの有効熱拡散能力を向上できる。利用可能な面積と表面ホットスポットの面積との比を表す模式図を図3に示す。

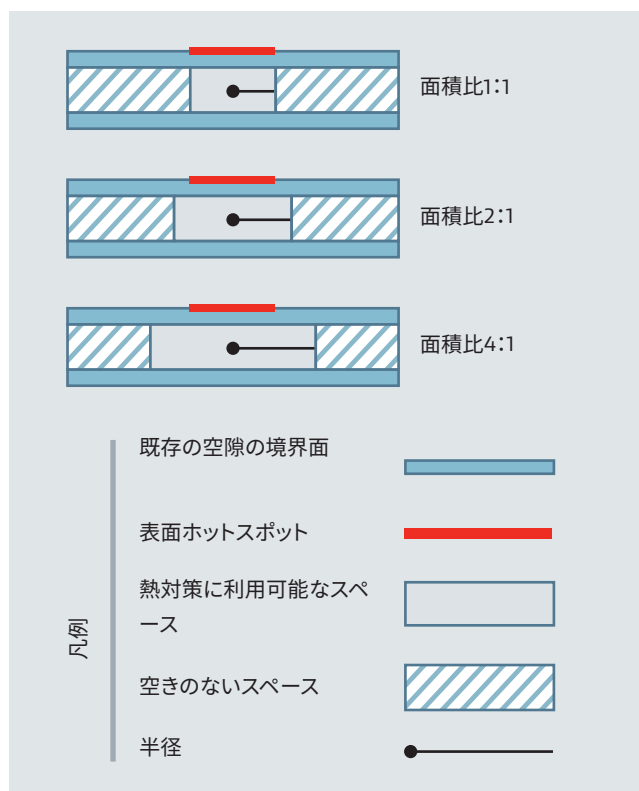


図3：利用可能な面積と表面ホットスポットの面積との比を示す模式断面図。面積は半径の2乗に比例する。

断熱材の熱伝導率の特性評価

本断熱材は、クヌーセン効果として知られる伝導現象により、熱伝導率が0.020 W/m·K未満と顕著に低いことが特徴である。媒体の孔径が空気の平均自由行程 (約70 nm) より小さい場合、自由空間における空気を通じた伝熱の経路と比べると、この媒体を通じた伝熱の経路には途切れが生じる。これはクヌーセン効果により説明できる⁵。この原理はエアロゲルの利用を通じて応用されることが多いが、それは空孔率が高く孔径が小さいというエアロゲルの形態的特徴によるものである。本断熱材の独自性は、極めて低い (かつ安定した) 熱伝導率を有し、且つ厚さの精度が高い均質なエアロゲル構造によって、高い断熱性を確実に得られるという点にある。これと比べて、室温付近の自由空気の熱伝導率は0.026 W/m·Kであり、温度に応じて非線形的に上昇する (50°Cでは0.028 W/m·K)⁶。そのため、モバイル電子機器内が高温 (50°C超) となった場合に断熱性能のばらつきや不足が生じる可能性がある。

本断熱材の膜厚方向の熱伝導率は、ヒートフロー法で測定された熱抵抗と、精密に測定された厚さによって求められる。いずれの評価も、圧力の設定値を6 psiとして行う。ASTM C518-17に修正を加えたヒートフローメーター (TAインストルメント製、モデル名FOX 50) を用いて、定常状態の熱伝達における熱抵抗を測定する⁷。薄い試料と厚い (積層) 試料両方の熱抵抗を評価し、次に修正ASTM F36-15法⁸で各試料の厚さを評価する (インストロン製、モデル名5565)。式 (4) に示すとおり膜厚方向の熱伝導率を計算する。この手法は、ヒートフロー法における接触抵抗の影響を無効化するために用いられる⁹。

$$(4) \quad k = \frac{t_2 - t_1}{R''_2 - R''_1} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

グラファイトの熱伝導率の特性評価

グラファイトは、平面方向の熱伝導率が元来高く、膜厚方向の熱伝導率が比較的低いため、熱拡散に用いられる。合成グラファイトの厚さは25 μm (約1500 W/m \cdot K) 未満~100 μm (約600 W/m \cdot K) の範囲で、面方向の熱伝導率は厚さに反比例する傾向がある。高熱伝導率のグラファイトの薄いシートを積層すれば、これ以上の厚さでも熱拡散能力を向上できる可能性があるが、この場合は熱性能が安定しなかったり、製造面で問題が生じたりすることが多い。高性能厚膜グラファイト箔は、1層の厚さが天然グラファイトと同等で、熱伝導率が薄い合成グラファイト並みであるというメリットを有することが確認されている。膜厚方向の熱伝導率は、グラファイトの各グレードで同等で約3.5 W/m \cdot Kである。

高性能厚膜グラファイト箔の熱拡散率の評価に適した測定装置を2台選定した。1台目のオングストローム測定装置は、グラファイト繊維の測定用にWagoner他が開発したもので、名称は発明者にちなんだものである¹⁰。この装置では、細長い試験片の温度を一方の端で正弦波状に変化させ、真空環境において試験片を伝搬した熱の波形を計測する。試験片の一方の端は熱源に固定され、もう一方の端はバネで軽く張力がかかった状態に維持される。試験片には長さ方向に2つの熱電対が接触しており、伝搬した温度波形の振幅と時間遅延を計測する。振幅、時間遅延、および熱電対の間隔を用いて、試験片の熱拡散率を算出する。2台目の装置はベテル製のサーモウェーブアナライザTA33で、これは正方形の試験片の表側に変調レーザービームによる熱パルス照射し、試験片の裏側の中央で赤外線検出器を用いて熱パルスの振幅と位相の変化を検出する。レーザーの周波数およびレーザービームと赤外線検出器との水平距離は変えられる。レーザービームの周波数、信号振幅の変化、および位相の変化を用いて、熱拡散率を算出できる。これにより、式(5)に示すとおり、熱拡散率(α)、密度(ρ)、および比熱容量(c_p)から面方向の熱伝導率を算出できる。

$$(5) \quad k = \alpha \cdot \rho \cdot c_p \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

オングストローム測定装置で信頼性の高い熱拡散率の測定が可能でグラファイト試験片の厚さの範囲は、少なくとも32 μm ~940 μm と非常に広いことが証明されている¹¹。一方、ベテルTA33では結果は同様であったが、厚さ32 μm ~168 μm の範囲ではオングストローム測定装置よりばらつきが少なかった。試験片が小さく、非接触測定法であり、評価サイクルが短いことを踏まえると、厚さ168 μm までのグラファイト試験片向けの熱拡散率評価装置としてはベテルTA33の方が好ましい。本稿では、ベテルTA33の評価結果を用いて100 μm の高性能厚膜グラファイト試料の熱伝導率を算出した。

実験評価とシミュレーション

一連の実験は、モバイル電子機器内で断熱材・グラファイト複合体を使用した場合の定常状態における表面温度及びパフォーマンスへの影響を確認することに加えて、グラファイトの拡散能力を測定する為に実施した。テスト結果は、空気または単一部材による結果と比較した。

定常状態における熱拡散評価

定常状態における熱拡散評価では、3インチ×1インチの帯状グラファイト片を、一定の電力(4.16 W)を印加する電気抵抗ヒーターで一方の端から加熱する。グラファイトの両端は、TIM(熱伝導材料)を介して熱電対と密着するよう位置に固定した。試験片の長さ方向での温度低下量を定常状態で計測した。評価装置の概略を図4に示す。

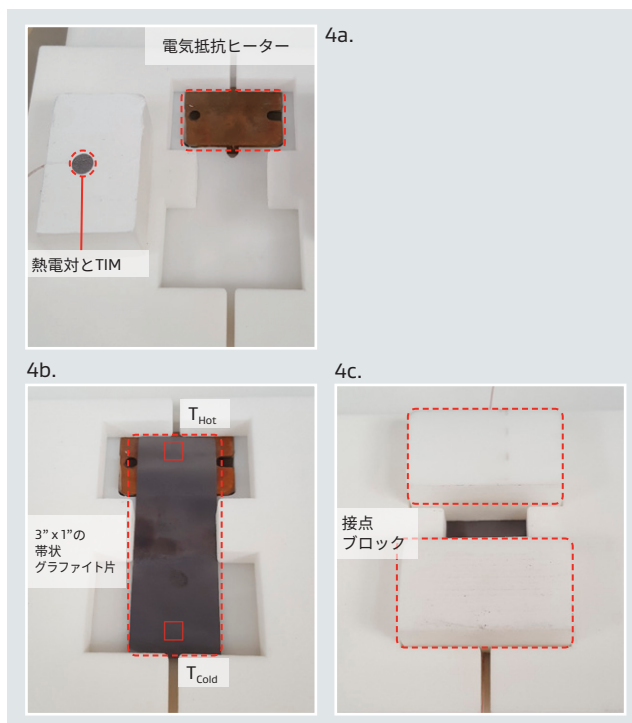


図4 (a、b、c) : 4a (上) は試料設置前の評価装置で、電気抵抗ヒーターと、熱電対を埋め込んだTIMの付いた接点ブロック1つが配置されている。4b (左下) は評価装置に設置した帯状グラファイト片で、高温側と低温側の熱電対の位置が示されている。4c (右下) では両方の接点ブロックが設置され、熱電対入りTIMと帯状グラファイト片とが密着している。

評価結果は式(6)を用いて解析し、グラファイト試料の固有熱拡散能力を比較した。温度低下量に各試験片の厚さ(インストロン製モデル名5565で圧縮評価により計測)を掛けることで、厚さのばらつきを解決する。

$$(6) \quad t \cdot \Delta T = t \cdot (T_{Hot} - T_{Cold}) \quad (\mu m \cdot K)$$

温度低下量が小さければ、グラファイト全体で表面温度の均一性が高く、熱の拡散が大きいということである。材料が熱を拡散しない場合、 T_{Cold} の熱電対が周囲温度とほぼ同一となり、 $t \cdot \Delta T$ の値が高くなる。

シミュレーション(熱伝導モデル)

COMSOLにて軸対称の熱伝導モデルを作成し、典型的なスマートフォンの構成に各種の熱対策ソリューションを使用した場合に定常状態の T_s および T_j が受ける影響のシミュレーションを行った。このモデルの構成要素は、一定電力の熱源、個別の材料の層、およびデバイスカバーである。熱源および個別の層すべての外表面に対して、熱伝達率と放射率が適用できる。面方向と膜厚方向の熱伝導率はすべての層について定め、温度によらず一定とする。系の形状は、熱源、材料の層、およびデバイスカバーについて、半径と厚さにより定める。モデルの主要なアウトプットは、カバー表面における半径方向の分布で表される T_s と、熱源の最大 T_j である。一般的なモデルの構成とアウトプットの概略を図5に示す。

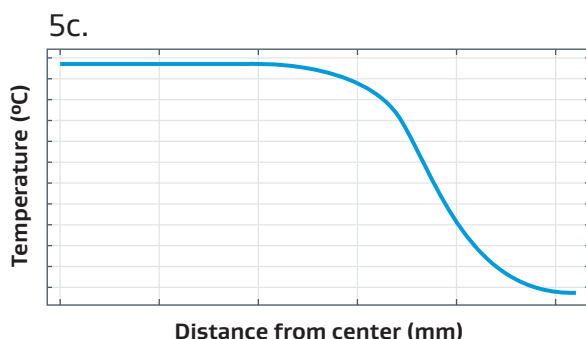
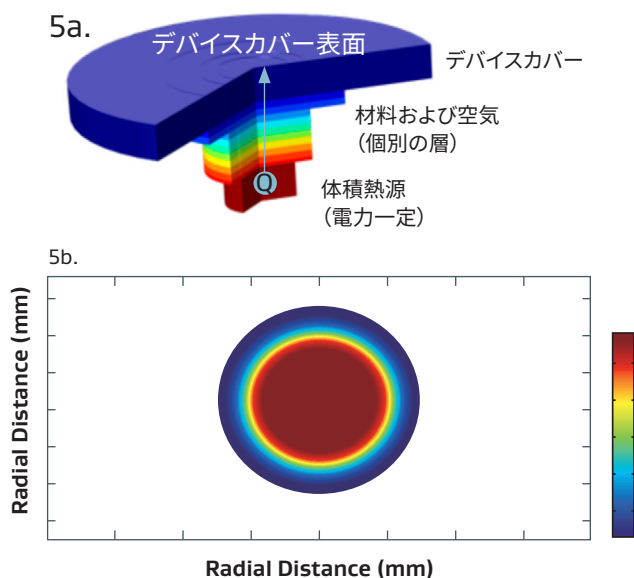


図5 (a, b, c) : 5a (上) はCOMSOLにおける軸対象の熱伝導モデルの構成を示す模式図で、体積熱源、材料および空気の層、デバイスカバーといった主要な要素には名称が表示されている。5b (中) および5c (下) はシミュレーションのアウトプットで、それぞれヒートマップおよびデバイスカバー表面における半径方向の温度分布として示されている。

このシミュレーションでは、SoC(システムオンチップ)の上に位置するGoogle Pixel 3XLの背面カバーの典型的形状に注目している。断面図を図6に示す。熱伝導率の測定値を、断熱材(膜厚方向)および高性能厚膜グラファイトについて適用した。文献およびデータシートを利用して、空気およびガラスの熱伝導率の値を概算した。使用した熱伝導率の値を表1に示す。評価したすべての構成で、熱対策用スペースは合計500 μm に固定した。総厚のうち材料で埋められない残りの部分は、空気とする。実際の評価材料に合わせて、材料を使用したソリューションはすべて350 μm 厚としてモデリングを行った。シミュレーション構成の詳細を表2に示す。

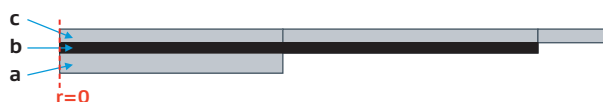


図6: 「 $r=0$ 」軸を中心に回転する前の軸対称熱伝導モデルの平面模式図。ブロック「a」は、半径が11.3 mmで厚さが1 mmの熱源を表す。ブロック「b」は、半径が24.1 mmで総厚が0.5 mmの利用可能な熱対策用スペースを表す。ブロック「c」は、半径が27.6 mmで厚さが0.65 mmのガラスカバーを表す。

表1: シミュレーションで用いた面方向と膜厚方向の熱伝導率の値

材料	面方向の伝導率 (W/m·K)	膜厚方向の伝導率 (W/m·K)
空気	0.028	0.028
ガラス	15	15
高性能厚膜グラファイト	1000	3.5
断熱材	0.018	0.018

表2：熱源からデバイスカバーまでの間で利用可能な熱対策用スペース（ブロック「b」）におけるシミュレーション構成

構成	材料の厚さ (mm)	構成図
S1 (対照)	空気、0.500	
S2	断熱材、0.350 空気、0.150	
S3	グラファイト、0.350 空気、0.150	
S4	断熱材、0.175 グラファイト、0.175 空気、0.150	
S5	グラファイト、0.175 断熱材、0.175 空気、0.150	
S6	グラファイト、0.117 断熱材、0.116 グラファイト、0.117 空気、0.150	

凡例				
カバー	熱源	空気	断熱材	グラファイト

Google Pixel 3XLの3DMarkによる負荷評価

市販のGoogle Pixel 3XL（以下「Pixel」）を購入して、サーマルスロットリングを起こさず一定電力による負荷をかけられるよう改造した。評価用にULの3DMark - Sling Shot Extremeを選択した。これは、ハイエンドのスマートフォンの物理演算（CPU）とグラフィックス（GPU）のスコアリングに広く採用されているベンチマークである¹²。定常状態における評価結果を得るために、3DMarkのプロフェッショナルバージョンを購入してPixelにインストールし、90秒間のSling Shot Extremeベンチマーク評価を無限ループできるようにした。すべての評価は、静止空気環境にて周囲温度・湿度を厳密に制御して実施した。計測に利用できるパラメータとしては、熱電対による表面点温度、赤外線カメラによる画像（フルーク製、モデル名Ti55）、内蔵サーミスターによる内部コンポーネント温度（CPU、GPU等）、CPUとGPUのクロック周波数、Sling Shot Extremeのベンチマークスコアによるシステムパフォーマンスなどがある。最初の負荷評価は、

初期状態で赤外線撮像により行った（図7）。ホットスポットの位置を特定し、そこにTIMを介して熱電対を設置した（図8）。

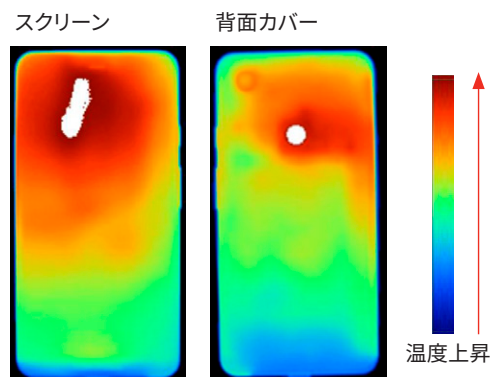


図7：Google Pixel 3XLのスクリーン（左）と背面カバー（右）の赤外線画像。数値表示のない温度スケールは、温度の傾向を色の变化で示している。表面のホットスポットは白い領域で表されている。

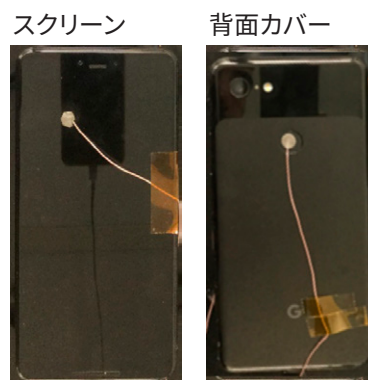


図8：Google Pixel 3XLのスクリーン（左）と背面カバー（右）にTIMを介して熱電対を取り付けた状態。熱電対は、表面のホットスポットの位置の温度を測定できるよう正確に設置した。

加熱と接着剤を剥がすことにより、Pixelの背面カバーを外した。熱対策ソリューションに利用可能なスペースを確認するため、背面カバーの内側に形状追随性のポリマーを挿入した。位置はSoC周辺の7か所（図9）である。その後、背面カバーを再装着することにより、それぞれの位置で既存の空隙にポリマーを押し込んだ。背面カバーを再度取り外し、圧縮されたポリマーにスナップゲージを用いて、すべての位置での厚さを測定した。この手順をあと2回繰り返して、位置ごとにすべての厚さ測定値の平均をとった。厚さの平均値の詳細を表3に示す。



図9：Google Pixel 3XLの背面カバーを外した状態。図に示す7か所で、形状追従性ポリマーにより既存の空隙の厚さを測定した。

表3：閉じた状態のPixelデバイスにおけるSoC付近の空隙の測定値

位置	空隙厚さの平均 (mm)
1	0.900
2	0.625
3	0.520
4	0.520
5	0.440
6	0.450
7	0.640

位置5と6における機械的圧縮を避けるため、すべての熱対策ソリューションで呼び厚さを350 μm とした。評価に使用した実際の材料は、110 μm の断熱材シート、110 μm のグラファイト箔、5 μm のアクリル系両面テープ等である。材料と構成例を図10に図示する。

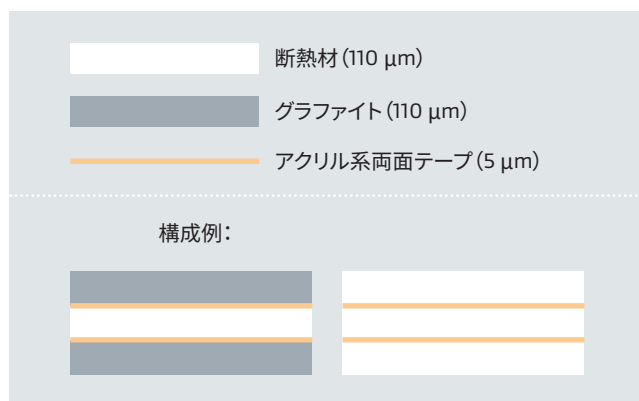


図10：評価に使用した実際の材料と、接着剤と積層した材料の構成例の図。

図11に示す試料の形状は、内部コンポーネントの機能に対する支障が一切出ないか最小限に抑えられる領域をできるだけ広く取れるようなものとした。単純化のため、厚さが均一かつ各層の形状と面積が同一となる構成のみを検討した。形態や適合性、機能面の目標を達成できるよう、層の厚さと大きさをさらに最適化することが可能である。スマートフォンの厚さ方向の模式断面図を図12に示す。シミュレーションの結果を解析して、Pixelの評価に使用する材料構成に反映した。

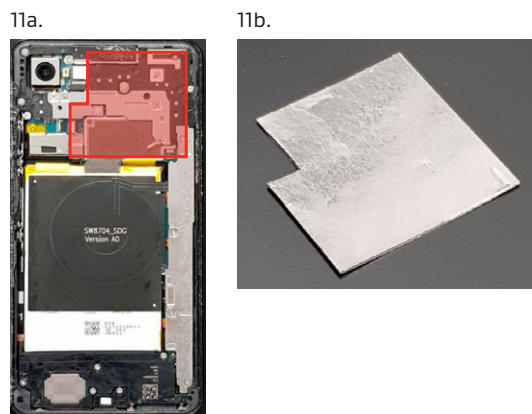


図11 (a, b)：11a (左)は背面カバーの内側での試料の配置を示す。11b (右)は所定の形状に合わせて切り出した複合体試料を示す。試料の面積は1825 mm^2 であった。

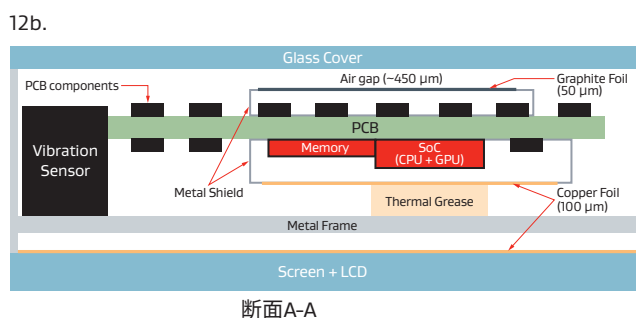
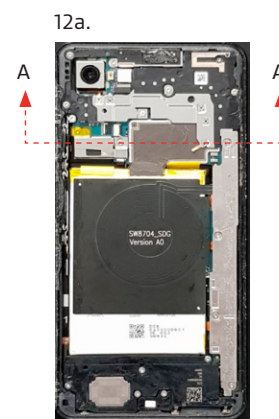


図12 (a, b)：12a (上)は、Pixelにおける断面A-Aの位置を示す。12b (下)は、デバイスの厚さ方向の断面A-Aの模式図を示す。

結果

定常状態における熱拡散評価

合成、天然、高性能の各グレードのグラファイトを評価した。いずれも厚さのノミナル値は100 μmとした。式(6)を用いて $t \cdot \Delta T$ の値を得た。各グラファイトの個別の試料6つずつを、無作為化比較試験にて評価した。結果を図13に示す。

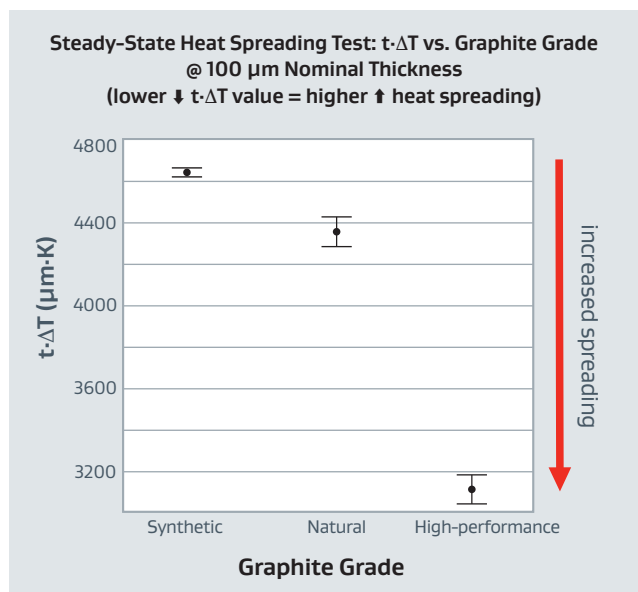


図13：定常状態における熱拡散評価の $t \cdot \Delta T$ のグラフ（平均および標準偏差）。グラファイトのグレードごとにN-6で評価。

高性能厚膜グラファイトが最も低い $t \cdot \Delta T$ の値を示し、平均は約3100 μm·Kであった。この値は天然グラファイトの $t \cdot \Delta T$ 平均値（約4350 μm·K）より29%低く、合成グラファイトの $t \cdot \Delta T$ 平均値（約4650 μm·K）より33%低い。

シミュレーション(熱伝導モデル)

電力と熱伝達率の反復計算を行い、Pixelデバイスの評価に適切なカバーと熱源の温度を得た。表面放射率は、このシミュレーションでは無視した。評価構成すべてについて選択したパラメーターを表4に示す。

表4：すべての評価構成に対するシミュレーションへのインプット

	デバイスカバーの 電力 (W)	デバイスカバーの 熱伝達率 (W/m ² · K)	熱源の 熱伝達率 (W/m ² · K)	材料の層の 熱伝達率 (W/m ² · K)
設定値	1.5	20	25	1

構成S1～S6のシミュレーションを行い、図14に示すアウトプットを得た。詳細な結果は表5に示す。いずれの構成も、比較対象である構成S1（空気のみ）と比較する。グラファイトおよび断熱材・グラファイト複合体の構成（S3、S4、S5、S6）について、カバー表面温度のグラフを拡大したものを図15に示す。

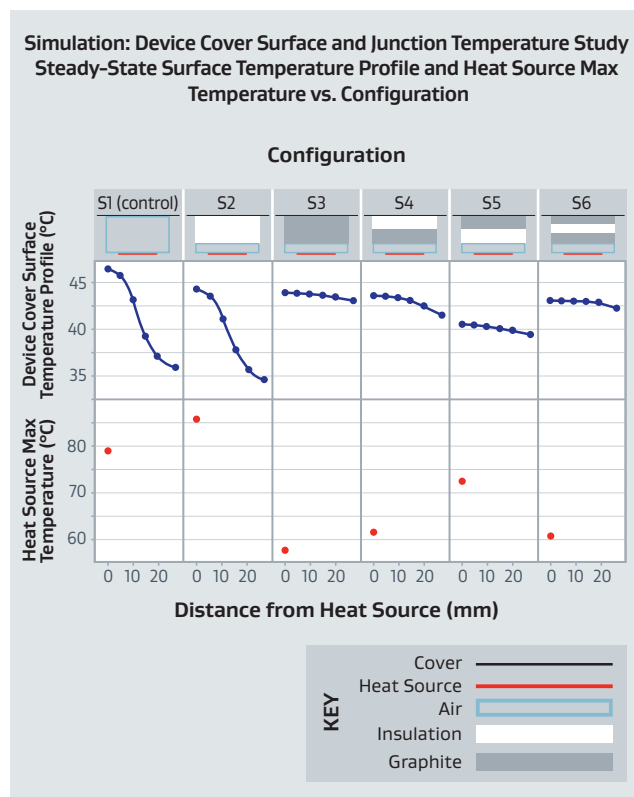


図14：構成ごとのシミュレーションの結果。上のグラフは、デバイスカバー表面におけるデバイスの中心（ $r = 0$ mm）からデバイスの縁（ $r = 27.6$ mm）までの半径方向の温度分布を示す。下のグラフは、デバイス熱源の最高温度の単一値を示す。

表5：カバー表面と熱源における最高温度のシミュレーションの結果

構成	カバー表面の最高温度 (°C)	熱源の最高温度 (°C)
S1 (対照)	46.55	78.82
S2	44.28	85.43
S3	43.79	57.58
S4	43.54	61.73
S5	40.52	72.48
S6	42.96	60.42

Simulation: Device Cover Surface and Junction Temperature Study
for Configurations including Graphite
Steady-State Surface Temperature Profile vs. Configuration

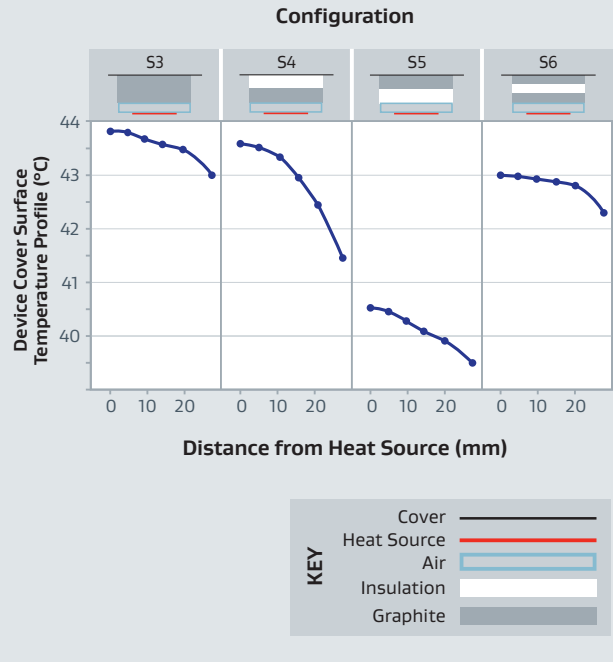


図15：グラファイトのみの構成と断熱材・グラファイト複合体の構成（S3、S4、S5、S6）について、図14上のグラフを拡大したもの。

対照（構成S1）と比べて最高表面温度の低下は、構成S5が最も大きい。評価を行ったすべての構成で、デバイスカバー表面と熱源の温度はデバイスの中央（ $r = 0$ ）で最も高くなる。熱がデバイスの中央から半径方向に移動すると、温度が低下する。断熱材を系に導入すると（構成S2）、表面における温度分布は対照と同様の見た目になるが、温度自体は表面の対応する各位置で下がる。この効果は、断熱材の超低伝導率と熱の方向を変えて熱源に向ける傾向によって生じ、その結果 T_j が上昇する。グラファイトおよび断熱材・グラファイト複合体を系に導入すると（構成S3、S4、S5、S6）、最高表面温度は低下し、半径方向の温度分布は対照と比べて高くなる。この結果は、グラファイトが平面方向に選択的に熱を拡散して、デバイス表面の熱分布がより均等になることが原因で生じる¹³。これら4つの構成では、シミュレーションで得られる T_j は、対照と比べると変わらないか低下している。

Google Pixel 3XLの3DMarkによる負荷評価

背面カバーの接触温度の検討

Pixelデバイスの評価用にシミュレーションの構成S1、S2、S3、S5、S6、前掲の図6に記載した実際の材料で作成した。デバイスの評価構成は名称をD1、D2、D3、D5、D6とし、D1は比較対照する。CPUとGPUの周波数は、それぞれ2619.6 MHzと675 MHzに設定した。周波数を記録し、それぞれの評価の最後に確認した。評価のすべてを通したパフォーマンスの均一性を示すため、ベンチマークスコアを記録した。静止空気環境の室温は、すべての評価で21.6～21.8°Cに維持した。すべての構成で、無作為化比較試験にて定常状態に至るまで（90分以上）の評価を3回行った。評価の各回の後に、Pixelをアイドル時動作温度まで冷却してカバーを外し、次の回の準備を行った。定常状態における背面カバーのホットスポットの接触温度とGPUの最高温度を図16に示す。背面カバーの赤外線画像を図17に示す。評価したすべての構成の構成図、厚さ、測定したアウトプット（平均および標準偏差）について、詳細を表6に示す。

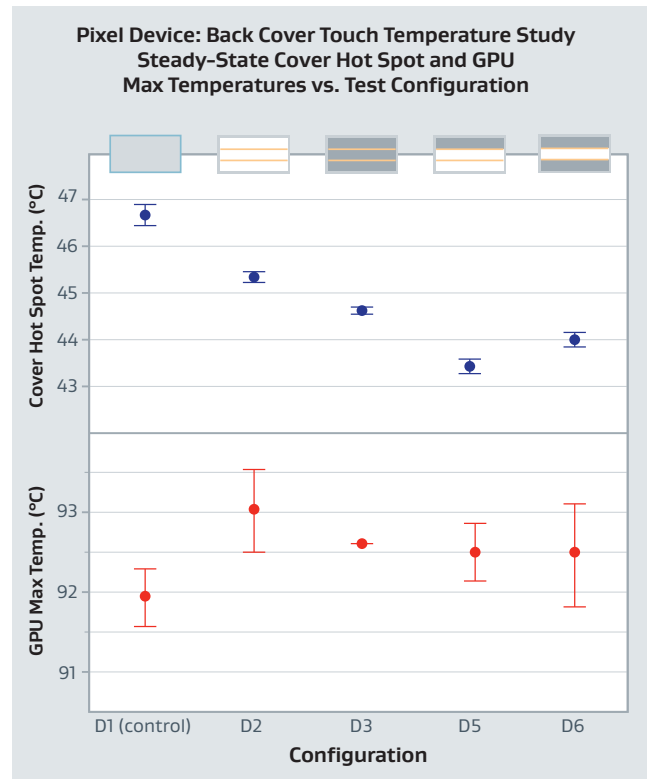


図16：Pixelデバイスにて評価したすべての構成における、背面カバーのホットスポットの温度（上）とGPUの最高温度（下）の定常状態グラフ（平均および標準偏差）。構成ごとに $n=3$ 。

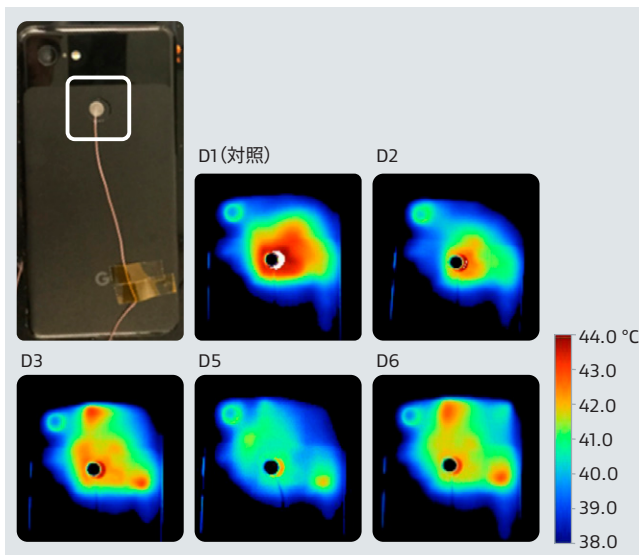


図17：Pixelデバイスにて評価したすべての構成について、カバーのホットスポット周辺の赤外線画像を拡大したもの。

表6：Pixelデバイスの結果：背面カバーの接触温度の検討

構成	カバーのホットスポット温度 (°C)		スクリーンのホットスポット温度 (°C)		CPU最高温度 (°C)		GPU最高温度 (°C)		Sling Shot Extremeのベンチマークスコア	
	標準平均	標準偏差	標準平均	標準偏差	標準平均	標準偏差	標準平均	標準偏差	標準平均	標準偏差
D1 (対照)	46.7	0.21	49.7	0.25	84.8	0.17	91.9	0.35	4374.3	1.15
D2 (344 μm)	45.4	0.12	50.5	0.10	86.1	0.51	93.0	0.51	4377.7	1.15
D3 (339 μm)	44.6	0.06	50.1	0.10	85.4	0.65	92.6	0.00	4375.7	1.53
D5 (347 μm)	43.5	0.15	49.9	0.26	85.6	0.17	92.5	0.35	4372.3	2.08
D6 (347 μm)	44.0	0.15	49.9	0.26	85.6	0.51	92.5	0.67	4375.0	1.00

背面カバーの接触温度は、評価構成間でそれぞれ異なり、各評価構成内では高い精度で一致し、いずれも対照（構成D1）より明確に低かった。シミュレーションと同じく、構成D5で背面カバーの接触温度の低下が最も大きく、対照より3.2°C低かった。構成D6、D3、D2では、背面カバーの接触温度がそれぞれ2.7°C、2.1°C、1.3°C低下した。対照と比べたスクリーン温度の上昇は、評価したすべての構成で1°C未満で、複合体構成では0.5°C未満であった。対照と比べたCPU温度およびGPU温度の上昇は、評価したすべての構成で

1.5°C未満で、複合体構成では1°C未満であった。Pixelの背面カバーの接触温度についての評価結果から、シミュレーションで用いた各構成に対するデバイス表面温度の上昇/下降の傾向は妥当であったといえる。一方、シミュレーションにおけるジャンクション温度の上昇/下降の傾向は再現されず、実際のデバイスの評価におけるCPU温度とGPU温度は比較的ばらつきが少なかった。この違いは、Pixelデバイス現物のSoC付近の熱対策設計が複雑であることに起因すると思われる。

システムパフォーマンスと安全接触温度の検討

断熱材・グラファイト複合体によってシステムパフォーマンスの上昇が可能となった場合の、許容上昇幅を確認する評価を考案した。この評価には構成D5を使用した。Pixelを開封直後のスロットリング条件に戻し、すべての熱対策ソリューションを取り外して空気のみとした。パワースロットリング中の定常状態において、背面カバーの接触温度を測定し、評価3回分を記録した。構成D5を取り付け、スロットリングを行った対照評価での定常状態におけるカバー温度に合わせて周波数を設定した。評価に適切な周波数は、CPUが1996.8 MHz、GPUが596 MHzであることを確認した。周波数、カバーのホットスポット温度、ベンチマークスコア、1秒当たりフレーム数を計測して、2つの評価シナリオの間で比較した。全6回の評価について、評価時間に対するベンチマークスコア、CPU周波数、およびGPU周波数の平滑化したグラフを図18に示す。定常状態におけるカバー温度、ベンチマークスコア、1秒当たりフレーム数の平均を図19に示す。表7に詳細をまとめる。

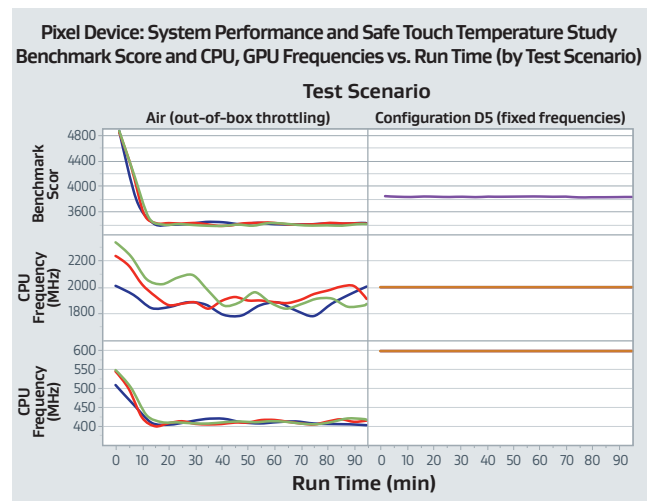


図18：Pixelデバイスで空気のみ・初期状態でのスロットリングの場合（左）と構成D5・固定周波数の場合（右）のベンチマークスコア（上）、CPU周波数（中）、GPU周波数（下）の遷移状態のグラフ（スムージング化処理）。n=3で確認。

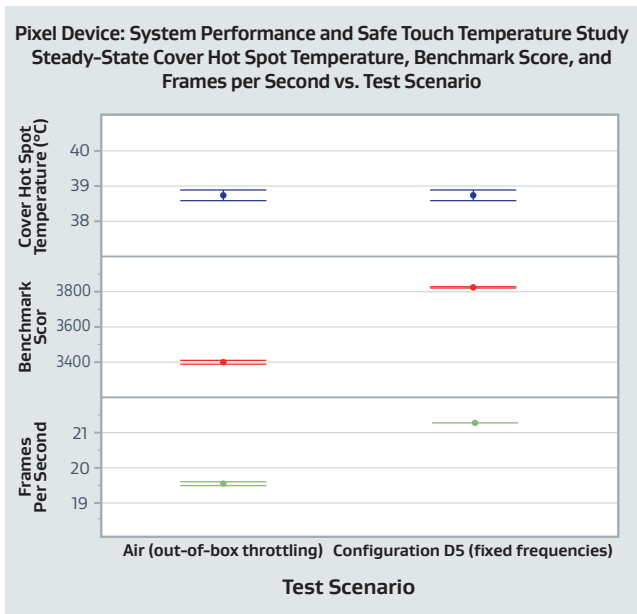


図19：Pixelデバイスで空気のみ・初期状態でのスロットリングの場合と構成D5・固定周波数の場合の背面カバーのホットスポット温度（上）、Sling Shot Extremeのベンチマークスコア（中）、1秒当たりフレーム数（下）の定常状態のグラフ（平均および標準偏差）。構成ごとにn=3。

表7：Pixelデバイスの結果：システムパフォーマンスと安全接触温度の検討

評価シナリオ	カバー温度 (°C)		Sling Shot Extremeのベンチマークスコア		1秒当たりフレーム数	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
空気（初期状態スロットリング）	38.7	0.15	3401.0	8.19	19.5	0.06
構成D5（固定周波数）	38.7	0.15	3822.7	3.06	21.3	0.00

初期状態でのスロットリング中に得られた定常状態におけるカバーの接触温度の平均は、21.7°Cの制御された評価環境において38.7°Cである。この温度は、UL 62368-1における長時間接触でのモバイル電子機器の接触温度に関連している。このシナリオでは、定常状態におけるベンチマークスコアと1秒当たりフレーム数の平均は、それぞれ3401と19.5である。構成D5を背面カバーの内側に配置した場合、ベンチマークスコアは3823に上昇し、1秒当たりフレーム数は21.3に上昇して、システムパフォーマンスが約12%上昇するが、初期状態でのスロットリング向けに定められた安全表面温度の制限は守られている。

まとめ/結論

超熱拡散能力を有するグラファイト箔と超低熱伝導率の断熱シートを組み合わせて、改造したGoogle Pixel 3XLに試験的に組み込んだところ、表面接触温度が低下し、システムパフォーマンスが上昇した一方で、デバイスのジャンクション温度に対する影響は最小限にとどまった。それぞれ異なる5つの熱対策構成によるデバイス表面温度についての実験結果を用いて、軸対称の熱伝導モデルを用いた比較シミュレーション評価の妥当性を確認した。その結果、同じ面積と厚さで構成を埋め込む場合、断熱材・グラファイト複合体による表面温度の低下は、空気のみによるもの、断熱材のみによるもの、グラファイトのみによるものを上回った。断熱材・グラファイト複合体構成1つについて、開封直後の状態との比較評価をさらに行った結果、ULのベンチマーク評価におけるシステムパフォーマンスが約12%向上する一方で、初期状態でのカバー表面温度制限値は守られていることを確認した。

Pixelデバイスの評価とシミュレーションにおいて断熱材・グラファイト複合体が示した結果は、これら2つの材料が発揮する非常に優れた熱特性により説明できる。TA-FOX 50にてヒートフロー法を用い、またInstron-5565にて厚さを測定、さらに厚さと熱抵抗の関係式から、本断熱材について膜厚方向の熱伝導率を計測、算出した。ベテルTA33にて熱拡散率法を用いて、高性能厚膜グラファイトについて面方向の熱伝導率を計測、算出した。100μmの高性能厚膜グラファイトの熱拡散能力を100μmの合成グラファイトおよび天然グラファイトと比較し、定常状態における熱拡散評価で実験的に妥当性を検証した。

高性能断熱材・グラファイト複合体は、モバイル電子機器の高出力で薄型の構造において多大な実用性を示す可能性がある。ただし、システムの消費電力や利用可能なスペース、その他の制約を踏まえると、各モバイル電子機器のシステムに生じる課題はそれぞれ異なる可能性があることに注意が必要である。そのため、最適な設計構成（面積、厚さ、向き）は、個別のデバイスごとのシミュレーションと評価によって決定すべきである。本稿で紹介した研究事例は、モバイル電子機器における熱管理の向上の可能性に対する取り組み方を示すものである。最先端の材料2つを組み合わせることで、個々の部品を合わせたよりも優れた性能の熱対策ソリューションが得られる。

参考文献

1. UL, UL. “62368-1: 2017 Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements.” (2017).
2. Wagner, Guy, and William Maltz. “Thermal management challenges in the passive cooling of handheld devices.” 19th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE, 2013.
3. Wagner, Guy R. “A study of the maximum theoretical power dissipation of tablets under natural convection conditions.” 20th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems. IEEE, 2014.
4. Luo, Zhaoxia, et al. “System thermal analysis for mobile phone.” Applied Thermal Engineering 28.14-15 (2008): 1889-1895.
5. Bi, C., G. H. Tang, and W. Q. Tao. “Prediction of the gaseous thermal conductivity in aerogels with non-uniform pore-size distribution.” Journal of Non-Crystalline Solids 358.23 (2012): 3124-3128.
6. Kannuluik, W. G., and E. H. Carman. “The temperature dependence of the thermal conductivity of air.” Australian Journal of Chemistry 4.3 (1951): 305-314.
7. ASTM C518 – 17 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus
8. ASTM F36 – 15 Standard Test Method for Compressibility and Recovery of Gasket Materials
9. LaserComp, Inc.. “Tests of thin samples stacked (using FOX50 instrument)” Application Note AN-TSS © 2008 (October 23).
10. Wagoner, G., Skokova, K.A. and Levan, C.D., “Angstrom’s Method for Thermal Property Measurements of Carbon Fibers and Composites”, The American Carbon Society, CARBON Conference, 1999.
11. Beyerle, R., Smalc, M., Kantharaj, R., Taylor, J., Norley, J., “Thermal Diffusivity Characterization of Thick Graphite Foils”, 35th Semi-Therm Symposium, 2019.
12. 3DMARK® Technical Guide, Underwriters Laboratories, Fremont, CA, 2020.
13. Xiong, Yin, et al. “Thermal tests and analysis of thin graphite heat spreader for hot spot reduction in handheld devices.” 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. IEEE, 2008.

著者・共同執筆者

Mitchell Warren
John Allen
Lindsey Keen

Julian Norley
Jonathan Taylor

NeoGraf Solutions, LLC

W. L. Gore & Associates

お問い合わせ

下記ウェブサイトよりお問い合わせください。

gore.co.jp/contact

日本ゴア合同会社

〒108-0075 東京都港区港南 1-8-15 W ビル 14F
TEL: 03-6746-2570 FAX: 03-6746-2571

gore.com/thermal (英語)

本製品は工業製品に限定してご使用ください。

食品、医薬品、化粧品および医療機器の製造、加工ならびに包装工程にはご使用いただけません。

記載された技術情報および推奨事項は全て、ゴアにおける過去の経験または試験結果に基づくものです。可能な限り正確な情報を記載していますが、法的責任を伴うものではありません。製品の動作性能は、運転データが全てそろわない限り判断できないため、お客様の実際のご使用状況において適合性と機能性をご確認ください。上記情報は変更されることがあり、仕様書として使用することはできません。

ゴア製品の売買には、ゴアの販売条件が適用されます。

GORE、ゴアおよび記載のデザイン(ロゴ)は、W. L. Gore & Associatesの商標です。その他の商標に関する権利は、各権利者に帰属します。

© 2020 W. L. Gore & Associates G.K.

