

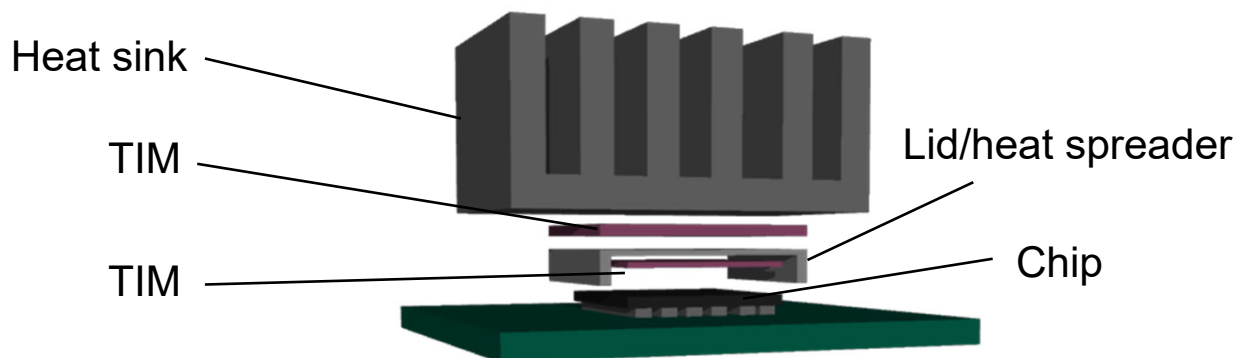
液体金属を用いた 伸縮性放熱フィルム

横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門
准教授 太田 裕貴

2025年6月10日

発明の背景

熱伝導材料(TIM)とは



熱伝導材料(Thermal Interface Material)とは、電子機器の内部で発生した不要な熱を効率よく放熱するために部材間に挿入される熱伝導性材料のことを指す用語です。一般的にはIC(集積回路)などの発熱体とヒートスプレッダーやヒートシンクといった放熱部品の間には挿入する形で使用されます。

ICやヒートシンクなどの放熱器の表面は見た目に平らに見えても、ミクロに見ると表面のわずかな粗さが存在します。そのため両者を直接密着させても、ICと放熱器の間には少なからず空隙が残ります。空気はとても断熱性が高い(熱伝導率が低い、熱抵抗が高い)ため、ICの熱は空隙を避ける形で伝わるため、結果効率よく熱を外部に放熱することができません。それを解決するのが”TIM”です。

熱伝導シートに代表されるTIMをICと放熱器の間に挿入することで、お互いの表面の細かな凹凸の間にTIMが入り込みます。熱伝導性のいいTIMが双方間をすきまなく密着することで、密着面全体を使った熱の伝播経路ができるようになり、効率よくICの熱を外部に逃がすことができるようになります。物体間の熱の移動を助ける働きを持つ材料です。

(<https://www.matsuo-sangyo.co.jp/innovation/thermal-interface-material/>)

従来技術とその問題点

「放熱シート」

本発明の技術背景(グラファイトを材料とする放熱シートに関して)
＜特開2002-50725 (2002/2/15公開)＞
日本パリレン株式会社

【特許の概要】

本発明は例えば電子機器の発熱部品の放熱に使用される放熱部品に関するものである。

課題： 強度や耐折り曲げ性に優れ、炭素微粉末やアウトガスの発生がない熱伝導性が高い放熱シートを実現すること。

解決手段： グラファイト材料よりなるシートと、このシートの表面にポリパラキシリレン膜を蒸着したことを特徴とする放熱シート。

熱伝導率の測定結果を示す

【本技術の課題】

グラファイトなどの金属は、硬く、変形しにくいことより、放熱シートとしての適用範囲が限られてしまうという課題がある。

	実施例 1	実施例 2	実施例 3	実施例 4	比較例 1
蒸着膜厚さ (μm)	2	10	20	40	0
引張強度 (kgf)	2.3	6.5	9.1	10以上	2.2
折曲試験	○	○	○	○	×
熱伝導率 (w/m・k)	4.04	4.62	5.28	4.01	4.69

従来技術とその問題点

本発明の技術背景（液体金属と軟質エラストマーを組合せた熱伝導率）

「High thermal conductivity in soft elastomers with elongated liquid metal inclusions」

Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), February 28, 2017, vol. 114, no. 9, 2143–2148

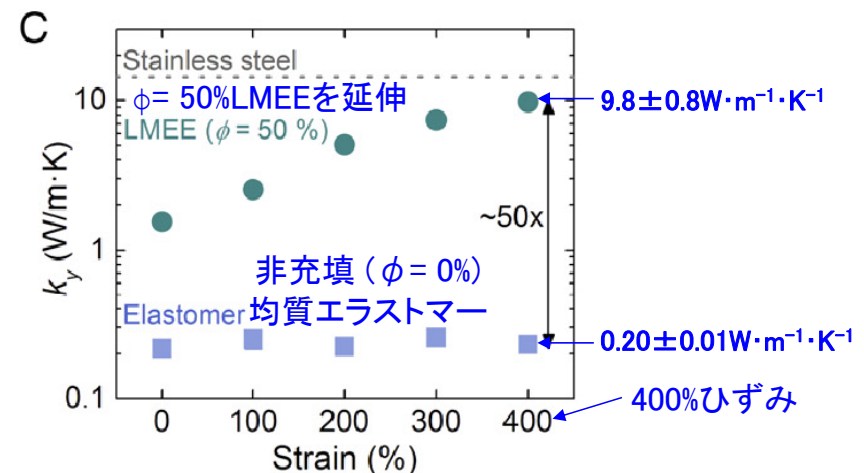
Michael D. Bartlett, et al.

【文献の要点】

- ・液体金属 (LM) マイクロドロプレットを軟質エラストマーに組み込むことにより、無応力状態ではベースポリマー ($0.20 \pm 0.01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) に対して約25倍の熱伝導率 ($4.7 \pm 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) を達成し、歪ませると約50倍の熱伝導率 ($9.8 \pm 0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) を達成。
- ・このような熱的・機械的特性の卓越した組み合わせは、LM包接体の変形能を利用してその場で熱伝導経路を形成するユニークな熱-機械結合によって可能になった。
- ・これらの材料は、伸縮可能な電子機器や生物に着想を得たロボット工学における受動的な熱交換の可能性を提供するものであり、エラストマーを取り付けた極端なハイパワーLEDランプや泳ぐソフトロボットの迅速な熱放散を通して実証する。

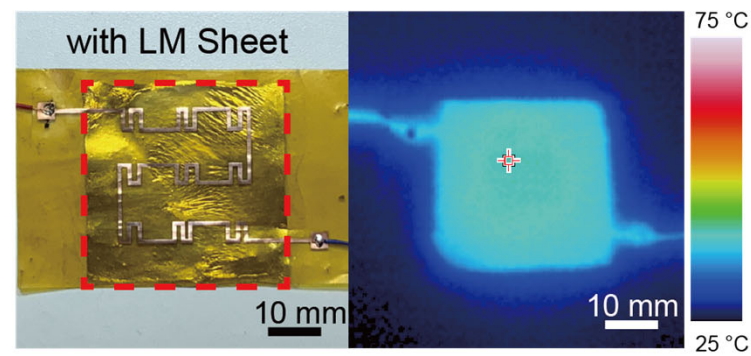
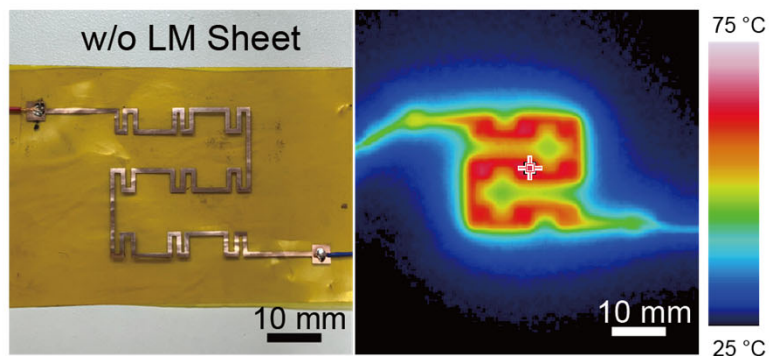
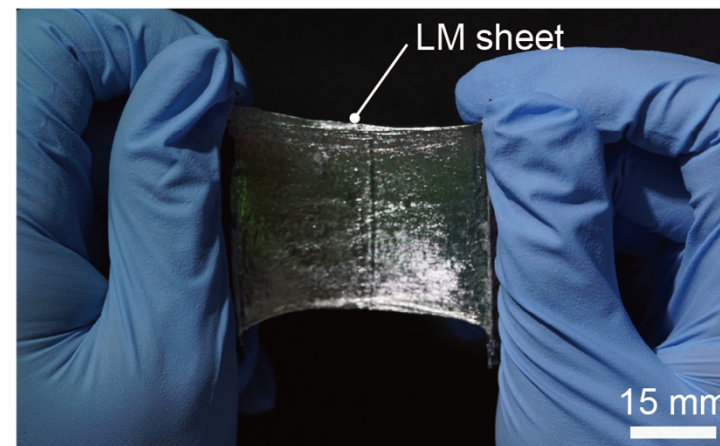
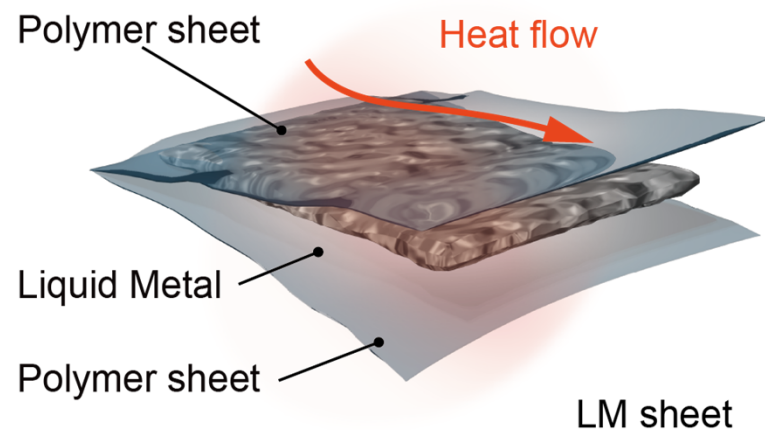
【本技術の課題】

本文献の液体金属とポリマーとを混ぜ合わせて成る放熱シートにおいては、液体金属がポリマーに覆われることで腐食性等の問題は解消し得るが、熱伝導率が液体金属自体の熱伝導率の3分の1以下になってしまうという課題がある。



新技術の特徴

LM Sheet (液体金属シートの外観) LM Sheetの実物の画像



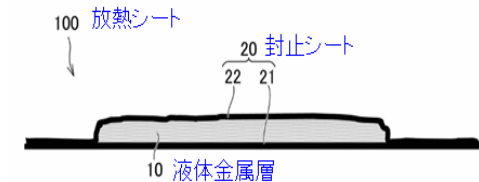
新技術の特徴

■本発明の放熱シート構造

ガリウム系液体金属の上下面をスチレンーブタジエンスチレンブロック共重合体(SBS)ナノシート(封止シート)で覆う

■効果

- ✓他の金属に対する腐食性・漏洩による短絡・人体への影響などを抑制
- ✓可撓性のある発熱対象に対して、優れた形状追従性
- ✓高い放熱性



□従来技術の課題(前述)を克服

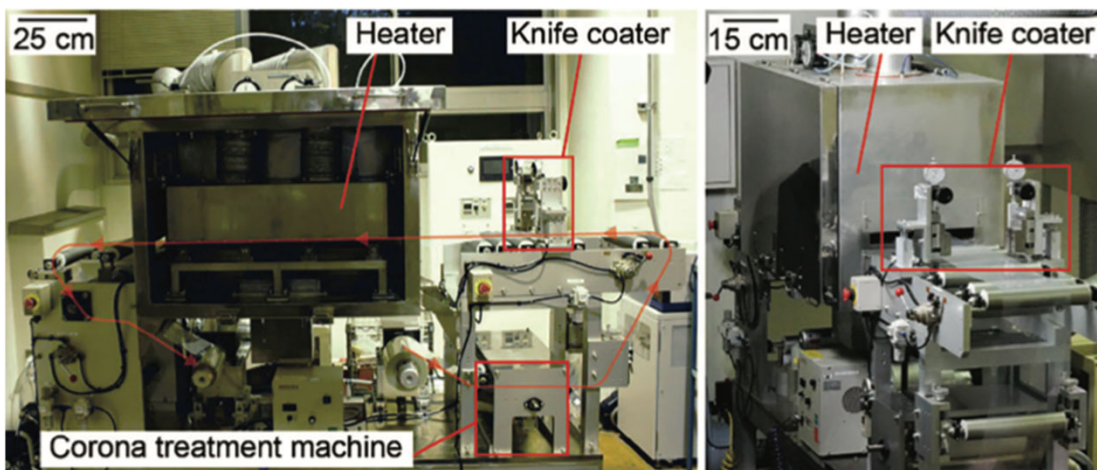
- ・グラファイトなどの金属:硬く、変形しにくい
⇒放熱シートとしての適用範囲に限らる
- ・液体金属とポリマーからなる放熱シート
ポリマーが支配的⇒熱伝導性が低い(放熱能力不足)。

新技術の特徴(コア技術)



液体金属を均一に塗布する技術
-マテリアル設計と加工方法の最適化-

- ✓ 太田研では液体金属のマテリアル設計を行える。
- ✓ マテリアルと加工の最適化により濡れ性が非常に低い液体金属をポリマー膜に均一に塗布可能
- ✓ 大量生産法の一つであるR2Rプロセスでの加工方法の最適化を実現

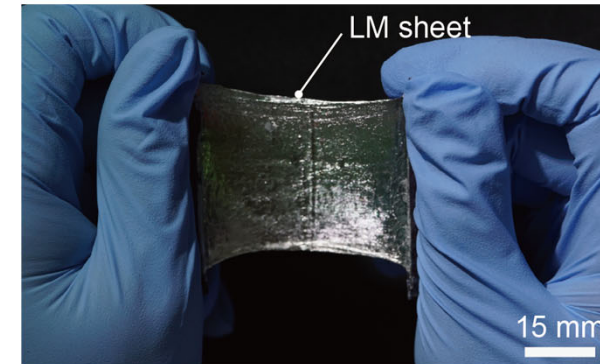
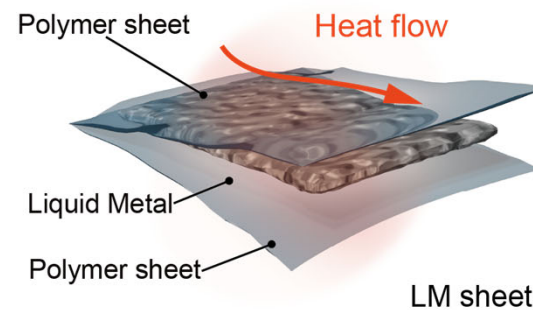


新技術の特徴

高い柔軟性と高い伝熱性を両立する次世代伝熱材料を実現可能

1. 過去最高レベルでの柔軟性を実現

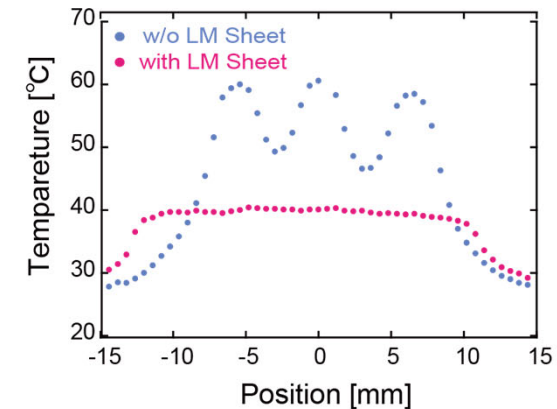
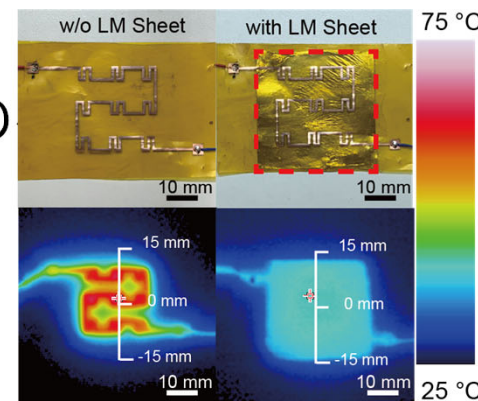
- ✓ 従来のゴム材料を利用可能
= ゴムと同等の柔軟性



2. 液体金属そのものの伝熱性能を実現

3. シート型にすることでユーザビリティを高め

- ・腐食性の抑制
- ・絶縁性の向上



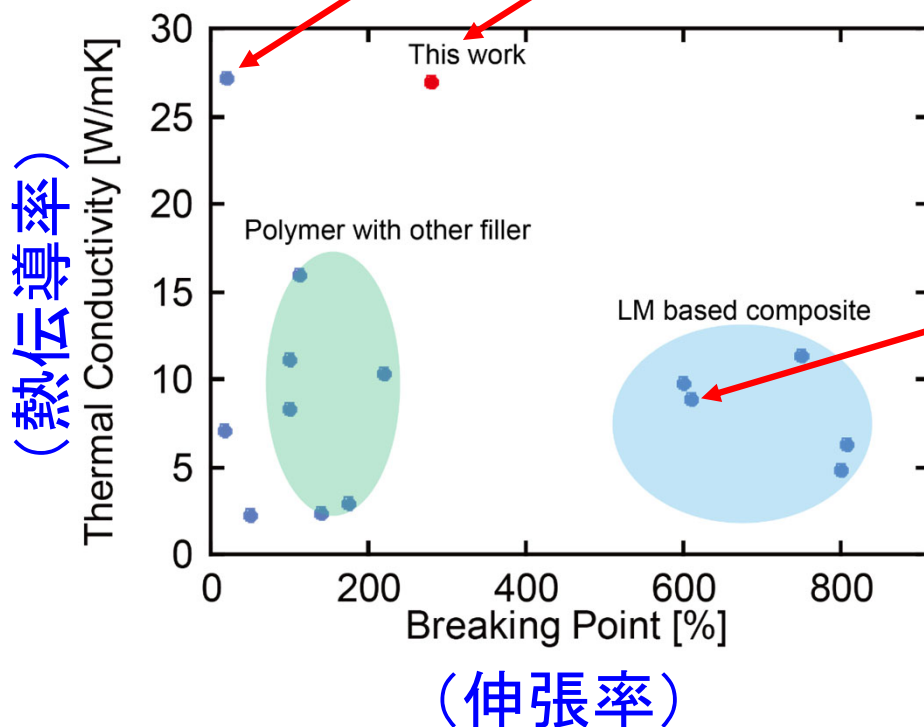
本発明の優位性 比較表

	本発明	有力な競合技術①	有力な競合技術②	有力な競合技術③
構成	<ul style="list-style-type: none"> ・ スチレンーブタジエンスチレンブロック共重合体などの材料を膜厚が100-500nmのポリマーナノシートを封止シートとして使用 ・ 液体金属への反応性が低い銅粉末を10wt%以下含有する ・ ガリウム系液体金属を封止シートで覆う構造 	<p>発熱体とヒートシンクなどの冷却部品の隙間に入れ、空気溜まりを除去するシートタイプの放熱材です。高い熱伝導率とα GELの並外れた柔らかさを持ち、密着性・追従性に優れているため、高い放熱効果を発揮し、基板や素子への負荷も低減します。熱伝導率は8.0 W/mK~20.0 W/mKであり、使用温度範囲も-60~150℃と高いのも特徴である</p>	<p>液体金属(EGaIn)とポリマー(エコフレックス)を混合して作成された複合材料である。熱伝導性経路として機能する液体金属(LM)を埋め込んだエラストマー複合材料である。</p>	<p>液体金属(CuP-GaInSn)でコーティングされたポリマー粒子で構成されており、液体金属は流れ始めてポリマー粒子間の隙間を埋め、加熱中の機械的負荷下で互いに融合してポリマーマトリックス内に連続した液体金属ネットワークで構成された放熱材料</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ 他の金属に対する腐食性、漏洩による短絡、人体への影響などを抑制する。 ・ 形状追従性を有している。 ・ 高い熱伝導率を有する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 20W/mKまでの高い熱伝導率を有し、放熱に優れた効果を発揮します。 ・ 優れた柔軟性と密着性により、接触面に空気溜まりを作りません。 ・ 電気絶縁性、難燃性に優れている。 ・ 圧縮応力が低く、基板や素子への負荷を低減する。 ・ 補強材入り、片面非粘着、粘着材付きなど、カスタマイズが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 液体金属とEcoflex(ポリマー)を混合する手法 ・ 機械的に伸縮させることで熱伝導率を向上させる ・ 絶縁性を有する ・ 高い伸縮性 ~600% ・ 熱伝導率は4.7 W/mK(非伸長時間)、9.8 W/mK(400 %伸長時間) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ポリマーを液体金属でコーティングする手法 ・ 加熱中に機械的負荷を加えることで液体金属のネットワークを形成する ・ 高い熱伝導率(27.18 W/mK(非圧縮時))を有する ・ 機械的な伸縮性は低い ~40%
適用分野	放熱シート	放熱シート	放熱シート	放熱シート
熱伝導性	27 W/mK	20 W/mK	4.7 W/mK	27.18 W/mK
伸縮性	0~250%	0~130% (2 W/mK品)	0~600%	0~40%
耐久性	△(研究レベル)	○(製品レベル)	△(研究レベル)	△(研究レベル)
コスト	△(液体金属が高い)	○(金属酸化物等を使用)	△(液体金属が高い)	△(液体金属が高い)

従来技術との比較

有力な競合技術③ (下記表の文献NO.5)

本発明



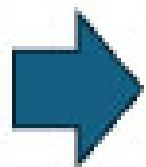
有力な競合技術②
(下記表の文献NO.3)

No		Thermal conductivity [W/mK]	Breaking point [%]
1	This work	27.0	280
2	S.H.Jeong, et al.	2.2	50
3	M.D.Bartlett, et al.	9.8	600
4	A.B.M.T. Haque, et al.	11.4	750
5	S.Chen, et al.	27.2	20
6	Jia, L.-C, et al.	7.1	18
7	X. Lu, et al.	8.9	610
8	D. Yu, et al.	4.8	800
9	Jingchao Li, et al.	16.0	113
10	Liuying Zhao, et al.	8.3	100
11	Hyunwoo Baek, et al.	2.4	140
12	Haeleen Hong, et al.	11.1	100
13	Hong, H.-J., et al.	10.3	220
14	Yan, H., Et al.	2.9	175
15	Gao, Q. et al.	6.3	808

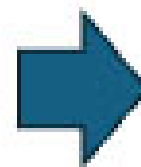
想定される用途



固体伝熱シート



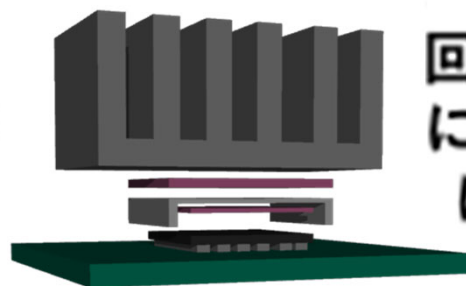
フレキシブル伝熱シート



ストレッチャブル
伝熱シート



需要①



回路基板高集積化
に伴い増大する熱
に対する新たな
放熱方法

ストレッチャブル
デバイス



需要②

ストレッチャブル
デバイスにおける
放熱機構への応用

想定される用途①

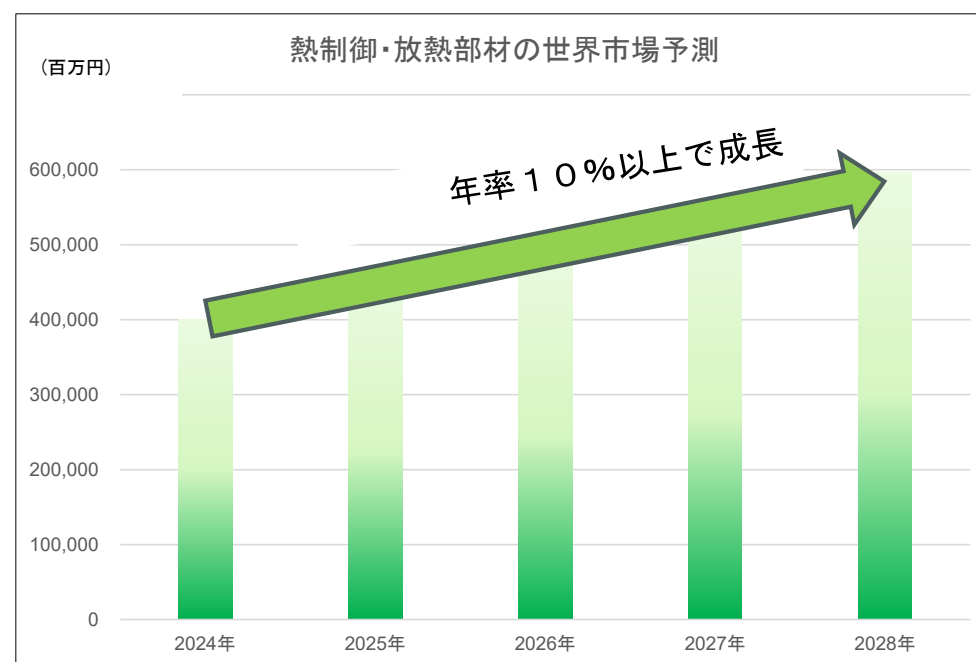
半導体・IoT業界は近年成長著しい一方、放熱対応が進んでおらず低消費電力設計とともに熱管理方法が喫緊の課題となっている

■ 背景

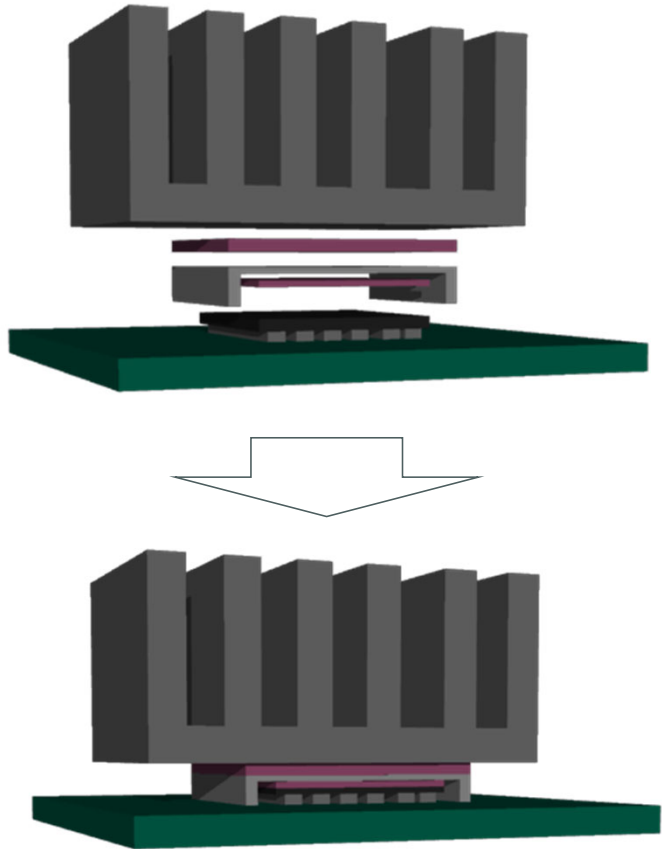
- ✓ IoTが生活に浸透し、さらに高機能で便利なデバイスが求められている。
- ✓ 集積化すればするほど熱問題が重要
- 🗨 伝熱シート業界は2028年度には約6,000億円の世界市場。2024年約4,000億円から年率10%以上で市場拡大が予想されている。

■ 現状課題

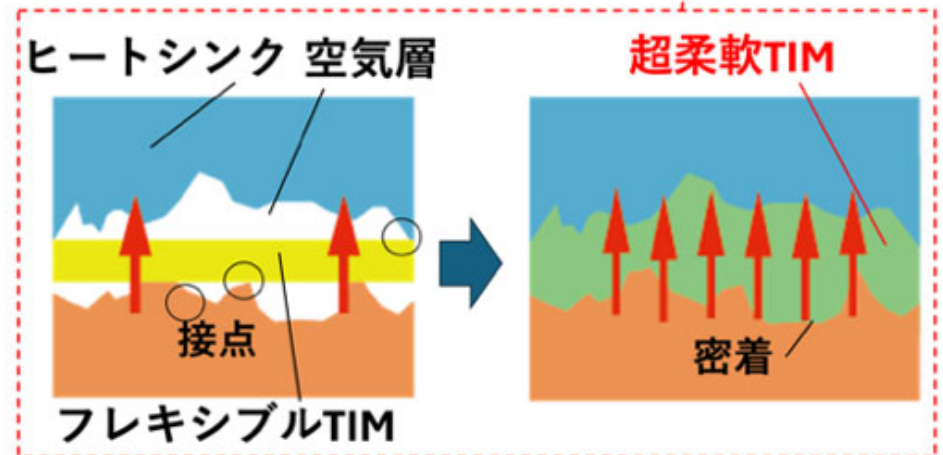
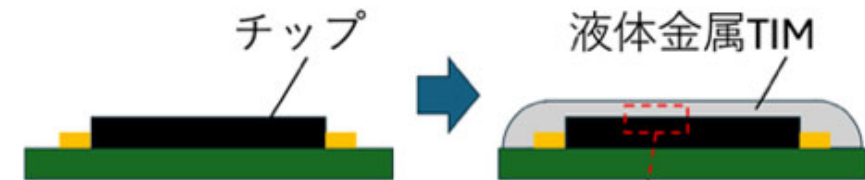
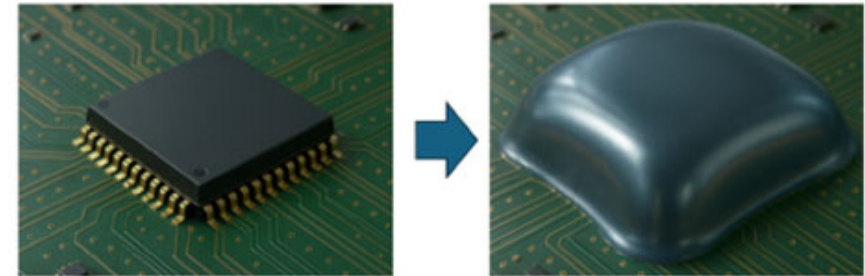
- ✓ より効率的な伝熱シート（より伝熱性能が高い素材による高密着なシート）
- 🗨 柔軟性と高伝熱性の両立



想定される用途①



近年、急速に進む半導体技術
への応用の可能性



想定される用途②

次世代スマートデバイスのもたらす未来



今後、さらに自由度が高く人の生活の気づかないような柔らかい電子デバイスが世の中に浸透する。消費エネルギーとのバランスを考慮しつつ、今より更により豊かな人の生活を実現したい。

想定される用途②

次世代スマートデバイスの適用

将来的な課題

○ 電子部品の熱問題

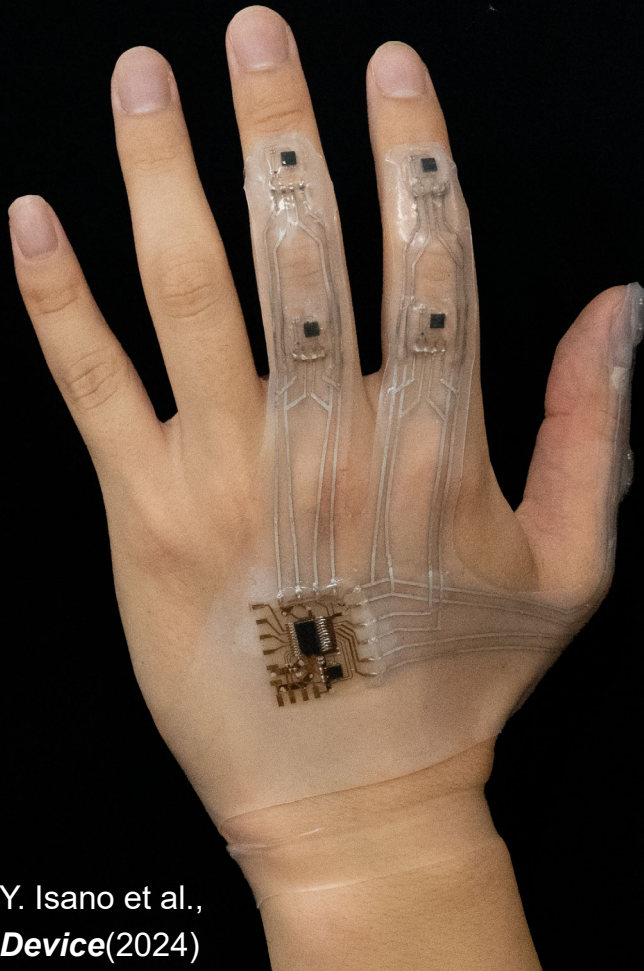
- ・寿命の短縮
- ・熱応力、熱疲労による破損

○ 伸縮基板の熱問題

- ・熱伝導率が0.5 W/mK以下

⇒ 本シートの適用

ストレッチャブルスマートデバイス



Y. Isano et al.,
Device(2024)

実用化に向けた技術的課題と今後の対応計画

- ・本技術の実用化のため企業が求めるレベルの機械及び伝熱性能の向上に取り組む
- ・液体金属そのものがレアメタルであるため、高付加価値なアプリケーションを探索する

技術課題

- ・機械耐久特性: 50 %～100 %
※実用性を考慮し1万回伸び縮みさせても破損しない。
- ・放熱特性: 30 W/mK以上を実現する。
※シートの通常時及び伸縮時両方で放熱特性を実現する。
- ・回路基板への密着性: 全面積に対して面積比50%以上の密着性を確保する。さらに企業で実際に使用されている回路基板を用いることで密着性と放熱性を実証する。

新たな試験や試作の実施計画等

1. 現在使用しているポリマー膜であるSBSは最適な膜かどうか不明であることから、シリコーンゴム膜など最適なゴム薄膜を検討する。(～2026年度中)
2. 現在の伝熱性能はほぼ液体金属に近くなっており、さらに銅などといった伝熱性能が高い金属を混入させたりすることで、膜の伝熱性能を向上させる。(～2026年度中)

社会実装への道筋/技術移転活動の現状と計画

- ・企業との共同研究を2025年度に1件、2026年度に2件の獲得を目指す。
- ・共同研究実施企業から2029年の日本市場導入後世界展開を目指す。

想定するビジネスモデル

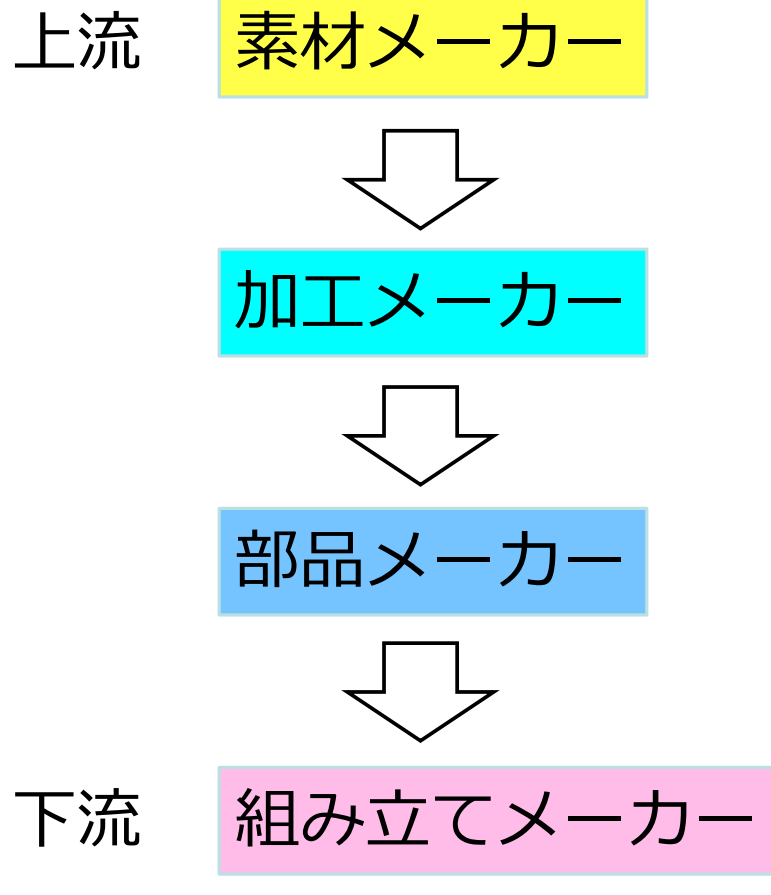
- ウェアラブル市場規模は2023年で1,202億ドル、Health & Fitness 25%、Logistics&Warehouse 5%弱計30%弱 約360億ドルが対象。
- ベンチャーの可能性を検討中。
- 医療機器への展開(病院だけでなく在宅・遠隔医療への展開を含む)、建設現場や消防隊員等過酷な環境の労働者の健康管理、高齢者の健康管理・異常発見、夏場の熱中症予防等

実用化に向けた活動

- NEDO2024年度「官民による若手研究者発掘支援事業/マッチングサポートフェーズ」で実用化に向けた課題を解決するとともに、共同研究先を探索していく。
- 2025年度JST新技術説明会にて発表し、2025年度には共同研究先を確保していく。CEATEC等の展示会での展示を予定している。

企業への期待

以下のような業界への応用を考えられます



1. 半導体業界
2. 電子素子業界
3. バッテリー業界
4. 電子機器業界
5. ロボット業界

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は伸縮可能で柔軟な伝熱フィルムであるため、従来にはない設計が可能であり御社に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導も可能。

産学連携の経歴

- 2019年-2021年 AM社と共同研究実施
- 2021年-2022年 AM社と共同研究実施
- 2018年-2019年 総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）
- 2020年-2023年 AMED医療分野研究成果展開事業（機器開発プログラム）
- 2022年-2024年 JST戦略的創造研究/AIP加速

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 放熱シート、放熱シートの製造方法
- 出願番号 : 特願2024-033024
- 出願人 : 横浜国立大学、東京科学大学（旧東京工業大学）
- 発明者 : 太田裕貴、久世大輔、藤枝俊宣

お問い合わせ先

横浜国立大学
研究推進機構 産学官連携推進部門
産学官連携支援室

T E L : 0 4 5 - 3 3 9 - 4 4 5 0

e-mail : sangaku-cd@ynu.ac.jp