

## 分子・原子およびナノスケール組織構造化による新奇熱マネジメントの創成

### ① 計画の概要

自動車など移動体も含め全ての電子機器が  
つながり、各自の意思が脳からの信号のみにより  
全ての物事を動かす社会生活を目指すには、  
大量のデータを高速かつ信頼性を保ちつつ転送・  
処理する必要がある。この場合、通称 2nm  
ノード（最小配線幅 7nm、トランジスタゲート  
長 12nm）を超える極小電子デバイスあるいは3  
次元デバイスにおいて、ゲート近傍あるいは電子  
が減速される位置から直接放熱するための  
放熱パスを組み込んだトランジスタ設計が必要  
となる。一方、全ての電気・電子機器から発生  
する熱は、時間的にも空間的にもずれた時刻と  
位置において必要とされる場合が多い。例えば  
レゴのように分子を自在に組上げられる共有  
結合性有機骨格（COF）に蓄熱化学種を組み込む  
ことにより高速な蓄熱・放熱デバイスが可能と  
なる。

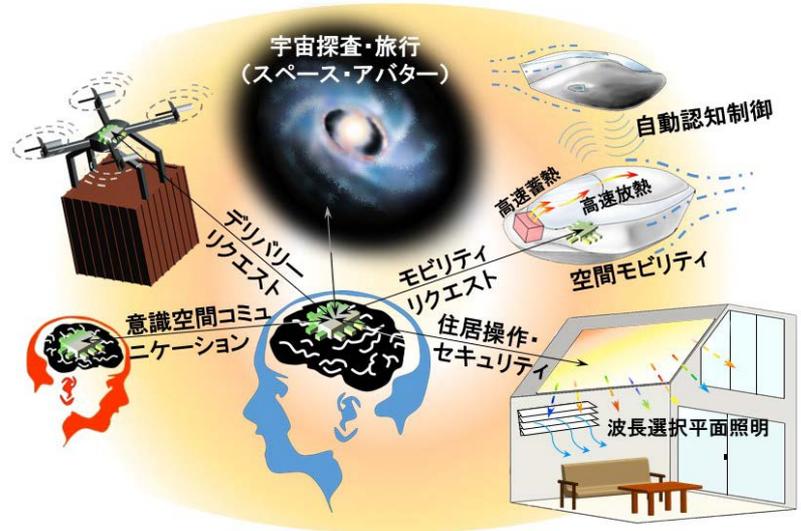


図1 熱輸送パス組込半導体デバイスによる意識空間通信・操作

さらに、使用電力の 50~70%が熱損失となる多くの照明機器に代わり、可視光のみを選択的に放射する光共鳴器照明が望まれる。本学術研究は、熱（エネルギー）輸送制御を主役として各種デバイスを設計するための新奇な熱マネジメントの創成を目指すことを目的としている。このような高信頼性、高密度化、高性能化が実現できれば、究極的には各自の意思が脳からの信号と遅滞なく情報伝達ができるため、意識と一体化した操作が可能となる。すなわち、熱輸送を主役とした学術研究は、生活スタイルそのものが劇的に変えられる可能性を秘めている（図1）。本学術研究は、公益社団法人日本伝熱学会が主体となり、そこに設置されている特定推進研究企画委員会が実施体制を構築する。本学会に所属する会員の研究機関は全国の大学や国研、企業など多岐にわたっているが、中心となるのは、15 大学（旧 7 帝大、東工大、九工大、など）、4 国研（岡崎分子研、理研、物材研、産総研）、10 企業（トヨタ、デンソー、日立、など）である。

### ② 学術的な意義

自動運転制御パワーデバイス、ポスト 6G 通信デバイスなどの電子デバイスの高密度化や 3 次元化に伴い、トランジスタなどの半導体からの発熱がその信頼性も含めた性能を左右するに至っている。本学術研究では、その 3 次元化を見据え、窒化ガリウムあるいは酸化ガリウム内部の移動電子から熱（フォノン）へのエネルギー変換過程を明らかにすることで、その熱（フォノン）を熱発生直後に直接トランジスタ外部に導く熱（フォノン）パスをトランジスタに組み込むことを目指す（図2）。IoT 普及などにより氾濫する電子デバイスの小型化により、性能を向上しながらハンズオン（スマホ）からウェアラブル（チップ）、あるいは意識との情報交換へとスムーズに移行できる。一方、分子を自在に組上げられる共有結合性有機骨格（COF）と例えば蓄熱性化学種を有機的に結合させることにより、熱輸送パスを骨格構造に担わせ、組み込まれた蓄熱化学種により、熱抵抗なく蓄熱・放熱が瞬時に行うことができる。また、化学種を選ぶことにより温度による湿度調整膜や、熱パスを有する有機半導体の基盤技術にも展開できる可能性を秘めている（図2）。さらに、画期的とされた LED 照明においても投入電力の約半分が熱損失となっているが、熱輸送の視点から、周期的表面ナノ構造による熱ふく射の波長選択を行うことにより可視光のみを放射する照明を目指すことができる（図2）。このように従来厄介者扱いされた発熱あるいは熱（エネルギー）を、輸送制御を主役として考えることにより、従来では想像できなかった

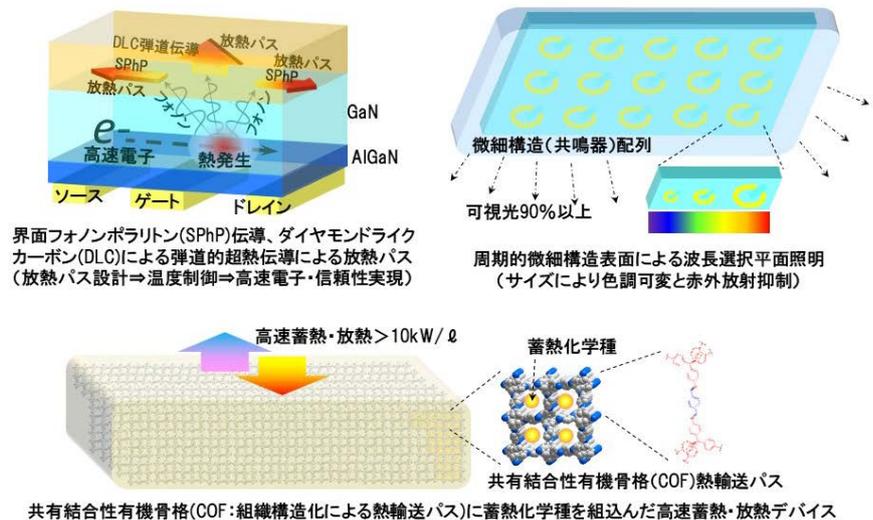


図2 分子・原子およびナノスケール組織構造化による熱輸送制御デバイス例

た新奇な熱マネジメントを含めた各種デバイスが創出できる可能性を秘めており、学術的にも社会的にも極めて意義深い。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

国内外において、5G や 6G といった大量高速通信、さらに自動運転制御や電気自動車の普及の勢いは止められない。それを支えるためには、半導体パワーデバイス、60GHz に達する高速スイッチングデバイス、さらに集積トランジスターの3次元化が欠かせない。その時に信頼性を確保しつつ電子的性能を向上させるには、熱制御が極めて重要であることが世界的にも認識されつつある。さらに、発熱した熱の有効利用あるいは自動車の電動化に伴う熱不足、半導体照明からの放熱（熱制御）など、どのように解決するかについては、従来の巨視的な熱輸送の域を脱していないため、国内外において発想の限界に達している。本学術研究は、その視点を根本から変え、熱輸送を主役と考えたデバイスのデザインを推進しようとするものであり、従来あるいは国内外でも全く新しい取り組みと位置付けられる。

### ④ 実施機関と実施体制

本学術研究は、公益社団法人 日本伝熱学会が主体となり、そこに設置されている特定推進研究企画委員会が実施体制を構築する。これについては当該学会の会長・副会長を含む理事会において正式な合意が取れている。本学会に所属する会員の研究機関は全国の大学や国研、企業など多岐にわたっているが、中心となるのは、旧7帝大、東工大、九工大、慶大、府大、新潟大、長岡技科大、芝工大、神大、岡崎分子研、理研、物材研、産総研、トヨタ、デンソー、日産、ホンダ、日立、東芝、AGC、三菱電機、ファンクショナルフルイド、日本製鉄、などである。プロトタイプ熱制御トランジスター、機能性COF、波長選択ふく射放射体などの製作拠点は東工大に設置する。熱制御トランジスターに関しては、東大と岡崎分子研により電子からフォノンへのエネルギー変換機構をフォノンエンジニアリングの視点からシミュレーションを行い、名大の原子組織構造化技術、九大のMEMS 技術と東工大電子系の半導体デバイス技術を駆使し、組込み可能な熱パスの構造や元素について数値シミュレーションと併せて探索する。当該学会の会員は、応用物理学会とも連携しフォノンエンジニアリング研究会を展開しており、多くの会員がフォノン輸送を熟知している。一方、半導体の成長や製作については電子系の協力を要する。機能性COFについては、東工大の研究室において一部進められているが、さらに当該学会の中に研究会を設置し機械学習を含め COF 構造材料の選定と機能性化学種を組込んだ COF 結晶の自己組織化を追求する。さらに、波長選択ふく射放射体については、すでに東工大、阪大、京大の研究室においてピラーアレイ構造表面、光共鳴器、ナノチューブなどが研究されつつ当該学会内の研究会を通して体制が整っている。

### ⑤ 所要経費

本学術研究は、熱輸送を主役としたデバイス設計を目指し、日本伝熱学会が核となり、中心となる大学、国研、企業において独自の研究が推進される。そのなかで社会的にインパクトが高いデバイスについては特定推進研究課題としてプロトタイプデバイスまでの構築を試みる。総合すると、5年間の研究期間において総額40億円、その内訳は、設備備品費：17億円（分子線エピタキシャル装置6台、スパッタリング装置3台、電子線リソグラフィ装置1台、反応性イオンエッチング装置3台、排気システム付クリーンルーム1部屋）、計算機利用料：3億円、人件費：14.4億円、中心となる大学・国研・企業研究所などの研究費・ネットワーク構築費（含旅費）・若手人材育成プログラム構築費・国内外シンポジウム開催費など8.6億円である。

### ⑥ 年次計画

本学術研究は、公益社団法人 日本伝熱学会を核として、そこに設置されている特定推進研究企画委員会が実質上の運営委員会として進められる。初年度は、現在検討している体制を固めつつ、中心となって研究を推進する16大学、4国研、16企業と、その進め方や研究内容について詳細を議論する準備にあたる。次年度から、本格的に設備備品の導入と、各研究機関において、ポストクの雇用を開始すると同時に社会人も含め博士課程への進学を促す。この年度から準備および試運転も含め、本格的に研究をスタートさせる。3年後には、ここまでの評価を行い、不具合が生じた場合には、課題抽出とトラブルシューティングならびに研究の軌道修正も視野に入れ、計画を見直す。その後、基礎研究からプロトタイプデバイスといった実証への部分的な移行を進める。最終年度には、引き続き基礎研究およびプロトタイプデバイスの製作から社会実装への道筋を模索するとともに本学術研究の総括を行う。

### ⑦ 社会的価値

自動車など移動体も含め電子機器のすべてがつながり始めている。これを支えているのが高速に大量のデータを転送・処理できる5Gあるいは6Gといった通信デバイスやトランジスターである。しかしながら、発熱に伴う温度上昇を抑えなければデバイスそのものが成り立たなくなる（図2）。放熱パスを中心に設計することによってのみ、信頼性を保ちつつ高速化や高集積化が可能となり、究極的には各自の意思が脳からの信号のみにより全ての物事を動かすことも夢ではなくなる。また、遅滞なく情報伝達ができるため、意識と一体化した操作が可能となる。すなわち、熱輸送を主役とした学術研究は、生活スタイルそのものが劇的に変えられる（図1）ほどの経済的・産業的価値があり、その生活スタイルは国民にも受け入れられ易いものと考えられる。

### ⑧ 本計画に関する連絡先

高田 保之（公益社団法人 日本伝熱学会）