

研 究 報 告 書

「多孔体内三相界面における熱流動解析に基づく熱輸送革新」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成25年10月～平成29年3月

研 究 者: 長野 方星

1. 研究のねらい

我が国の民生産業分野のエネルギー消費は増加の一途を辿っており、システムの省エネルギー化とエネルギー資源の有効利用が強く望まれている。中でも高効率なエネルギー輸送技術および冷却技術は民生、産業、運輸の全分野にまたがる重要な研究開発課題であり、本技術の革新的向上なくして本質的なエネルギー有効利用の実現にブレークスルーをもたらすことはできない。近年のサーバシステムやハイブリッド自動車、住宅太陽集熱/地熱システムなどの先端技術は、除熱、蓄熱、保温の要求が時間的・空間的に離れた『分散型熱エネルギーシステム』であり、エネルギー輸送システムの長距離化、大量輸送化が不可欠になっている。また、スマートフォンやウェアラブル機器などの携帯端末は、省エネ・省スペース、かつ発熱密度の増大に対応可能な冷却デバイスの創出が期待される。

そこで本研究は、電力を用いることなく長距離の熱輸送が原理的に可能な毛細管力駆動型二相流体ループ (Capillary Pumped Loop, CPL) を熱輸送の基盤技術にすることを提案する。CPL はこれまで人工衛星の冷却デバイスとして研究開発が進められてきた。ウィックとよばれるマイクロン～サブマイクロンオーダーの多孔体内で発生する毛管力を利用して、熱を潜熱の形で輸送できるため、省エネ、高効率の点で次世代の革新的デバイスとなりえる。しかし、ウィック内での固気液三相熱流動現象は、多孔体内動的接触角、気液相界面後退現象、ならびにメニスカスの不安定挙動など、未解明な部分が多く、十分に設計可能な理論が不足しており使用が限定的であった。飛躍的な性能向上と民生産業分野での実用化のためには、マイクロ多孔体内における熱流動現象の基礎学理の深化と物理モデル化が必須である。そこで本研究は、多孔体内の固気液三相熱流動現象を解明するため、多孔体内気液界面の相変化素過程、多孔体内の構造と濡れの関係を実験的に明らかにすることを第一目標とし、次なるステップとして、得られたデータに基づく物理モデル化および数値シミュレーションによる最適多孔体相界面構造の提案、実応用を目指した薄型 CPL、長距離 CPL の設計製作、および性能実証を行う。以上のマイクロスケールでの物理現象の把握から、マクロスケールでのシステム設計に至るまでのマルチスケールな総合的解析・設計により、相界面現象の基礎学理に基づく革新的熱エネルギー輸送デバイスを創出し、エネルギー利用の飛躍的な高効率化を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は基礎フェーズと応用フェーズに分けて研究を実施した。基礎フェーズでは CPL の性能を支配する多孔体内気液界面の相変化素過程を理解し、物理モデル化することに主眼を置いた。多孔体内気液相変化挙動を赤外・可視域でマイクロスケールで観測できる装置を新たに構築し、多孔体物性 (細孔半径、空隙率、浸透率、熱伝導率) と蒸気チャネル構造の異なる多

孔体における熱流動挙動を観察し、各種物性および形状が熱伝達性能および気液界面後退に与える影響を明らかにした。本現象を薄液膜蒸発理論を用いてポアネットワークモデルに反映し、多孔体内相変化時の局所的な温度、圧力、質量流束分布を明らかにし、高熱伝達・高熱流束化への指針を得た。

次に、応用フェーズではモデル化に基づく最適相界面構造を提案し、その界面構造の実現とCPLでの性能を実証することに主眼を置いた。長距離かつ抗重力性に優れた多孔体の特性要求を明らかにし、その要求を満足しうるサブミクロン・高空隙率・高親水性多孔体を新たに製作することに成功した。また、優れた相界面構造をシステムに適用し、従来にはない長距離 CPL および薄型 CPL を実証することに成功した。

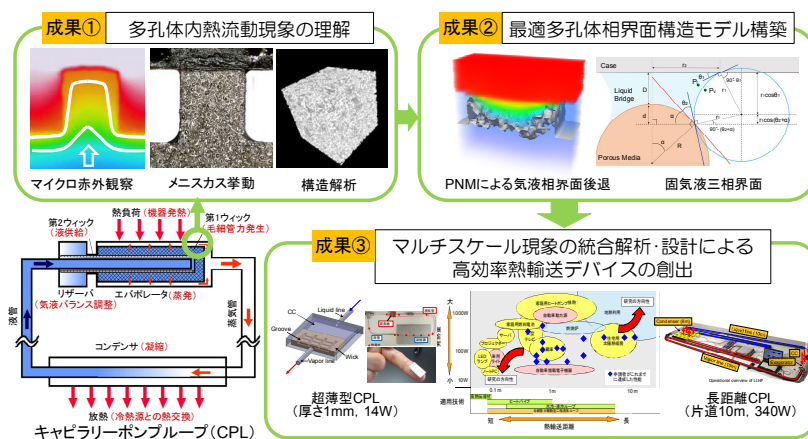


図 1 本研究の概要

(2) 詳細

研究テーマ A「多孔体内熱流動現象の理解」

マイクロスケール多孔体内での気液相変化素過程を明らかにするため、高分解能のサーモグラフィおよびマイクロスコプで観察可能な装置を新たに製作し、多孔体物性(細孔半径 $1\sim 20\ \mu\text{m}$, 空隙率 $34\sim 71\%$, 浸透率 $1.4\times 10^{-14}\sim 1\times 10^{-11}\text{m}^2$, 熱伝導率 $0.25\sim 16.3\text{W/mK}$), 蒸気チャネル構造(深さ, 幅, 溝本数等)の異なる多孔体の異なる試験体を用いて, 熱流束の増加に伴う気液界面の後退現象と蒸発熱伝達率の変化を調べた(図 2)。その結果, 蒸気溝本数, チャネル断面積, 熱流束と気液界面の後退の関係が明らかとなった。この結果に基づいて, 多孔体における高熱負荷時の気液界面の後退メカニズムを明らかにし, 高い熱伝達特性と低い熱リーク性を両立させる多孔体特性と蒸気チャネル構造を明らかにすることができた。具体的な成果を以下に述べる。

- 多孔体内の相変化熱流動挙動には3つのモードが存在することが明らかとなった(図 3)。低熱負荷時(モード a)は多孔体-蒸気チャネル間の液架橋表面で蒸発し, 液架橋での薄液膜蒸発により熱伝達が促進される。中熱負荷時(モード b)は薄液膜蒸発に加え, 容器-多孔体接触部における核沸騰により蒸発表面積が増大され, 熱伝達が促進される。このモードが最も高い熱伝達性能を示す。高熱負荷時(モード c)は気液界面が多孔体内まで後退し, 多孔体内メニスカスで蒸発する。また, 多孔体熱伝導により熱抵抗が増大する。
- 蒸発チャネルの本数をパラメータとする実験により, 蒸発は多孔体-蒸気チャネル-蒸発器容器が接触する三相界線領域で活発に行われることが明らかとなり, 溝本数を増やすこ

とで最大熱流束と熱伝達係数を増大できることが示された。(論文 1, 2)

- 蒸発熱伝達率は低熱負荷時、中熱負荷時は多孔体の熱伝導率にほとんど依存せず、一方高熱負荷時は、多孔体の熱伝導率により熱伝達率が大きく異なることが明らかとなった。また、気液界面後退の原因は多孔体内で生じる毛管力に対して多孔体内を通過する気液の圧力損失が増大することによるものであり、沸騰開始における核生成が直接的な原因ではないことが明らかとなった。したがって、気液界面を後退させないためには細孔径が大きく浸透率の大きい多孔体が望ましいが、システム全体の圧力損失を保持するための毛管力が必要であり、両者はトレードオフの関係にあることが示された。また気液界面を保持するためには多孔体の濡れ性に加え加熱容器の濡れ性も大きく寄与することが明らかとなった。
- 熱輸送効率は多孔体を介して熱伝導により下部(液だめ側)に伝わる熱リーク量により決定されるが、低熱伝導多孔体の場合は、熱流束増大に伴い伝導リークよりも液供給による対流効果が支配的となり、熱リークが抑えられることが明らかとなった。一方高熱伝導多孔体の場合は、常に伝導熱リークが支配的となった。これは低熱伝導ウィックの肉厚を薄くできることを示唆する重要な知見であり、今後のシステム最適設計におけるウィック形状の決定に有用な知見である。

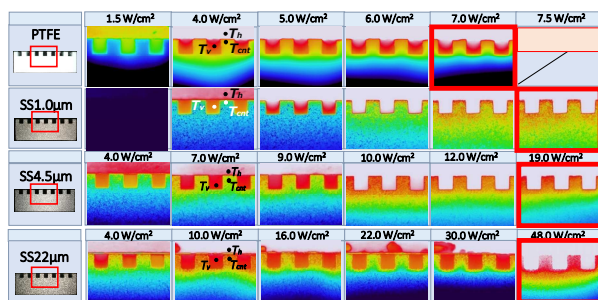


図 2 多孔体内相変化過程赤外観察

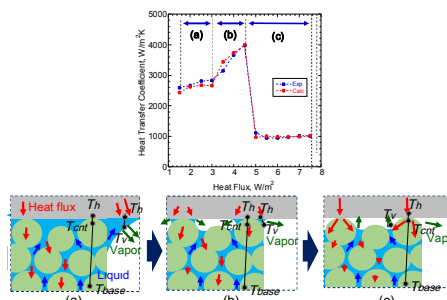


図 3 3つの相変化モード

研究テーマ B「最適多孔体相界面構造モデル構築」

赤外・可視観察の結果に基づいて三つの動作モードにおける物理モデル構築を行った。薄液膜蒸発理論を多孔体に適用し、それぞれの動作モードに対するモデル構築を行った。その結果、低熱負荷時、高熱負荷時(モード a, c)では実験と良好な一致を示すモデルが構築された(図 3 グラフ赤点)。また中熱負荷時(モード b)に関してはかい離が見られるケースも存在し、今後の改善が必要である。本モデルより、多孔体、加熱面表面の濡れ性を向上させることで大幅な性能向上が期待できることが明らかとなった。また、ポアネットワークモデルを導入し、多孔体 3 次元細孔分布形状をモデル上で再構築し、熱負荷増大に伴う気液界面の後退現象を数値シミュレーションで調べ、多孔体内温度分布、圧力分布、質量流束分布を明らかにした(図 4)。蒸発は三相界線領域で促進されることが定量的に示された。また、多孔体内で形成される温度分布と圧力分布形状の差異が、過熱

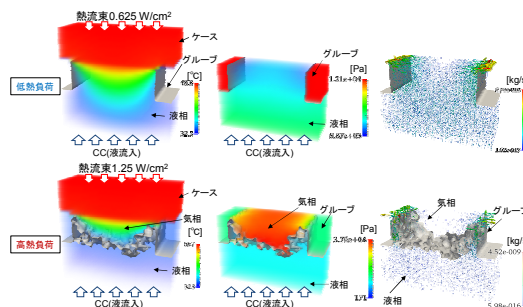


図 4 温度・圧力・質量流束分布

面と多孔体内間に生じたマイクロスケールの隙間からの蒸気抜けに伴う伝熱促進によるものであることが示された。以上の成果により高性能蒸発器の設計指針が得られた。次に、本設計指針を基に、三相界線長さの増大とそれに伴う蒸気グループ圧力損失の増大の観点から最適となる多孔体相界面構造を明らかにした。また性能実証用の CPL を製作し、計算と同形状でのウィックを製作し、性能試験を行った。その結果、蒸発器熱伝達および最大熱輸送量の観点から最適となる形状が予測と同じ傾向を示すことが確認された(論文 3)。

研究テーマ C「マルチスケール現象の統合解析・設計による高効率熱輸送デバイスの創出」

これまでの成果により多孔体および加熱面の濡れ性向上が性能向上に大きく寄与することが明らかとなった。本知見に基づき多孔体および加熱面の濡れ性改質および評価を行った。加熱面の濡れ性向上に関しては、親水性自己集積化単分子膜(SAM 膜)形成、酸化膜処理、熱処理および酸処理等を与えた加熱面を製作し、純水およびエタノールに対する接触角を計測した。その結果、SAM 膜および酸処理によりエタノール、水ともに濡れ性の向上が確認された。多孔体の濡れ性評価は環境制御形 SEM(ESEM)試料室内で多孔体上に凝縮液滴を成形し、前進および後退接触角を測定した(図 5)。その結果、多孔体は同種のパルク材よりも優れた濡れ性を有することが明らかとなった。

長距離かつ抗重力性に優れた CPL を実現するための多孔体の特性要求を明らかにした。その要求を満足しうるサブミクロンオーダー、空隙率 60%以上のモノリス型ポリマーおよびガラス多孔体を新たに製作し、細孔分布径、浸透率評価に基づき、本研究のゴールとなる要求を満足できる基本性能を有することが確認された。また、詳細なモデルに基づく長距離 CPL(片道 10m)の設計製作を行い、蒸発器構造とシステムの見直しを行った。その結果、同じ蒸発器サイズでありながら、これまでは最大熱輸送量 160W、最小熱抵抗が 0.21K/W であったのに対し、新たに構築した蒸発器を適用することで、最大熱輸送量 340W、最小熱抵抗が 0.12K/W と大幅に性能向上することが示された(論文 4)。さらに、抗重力性評価により 1m のトップヒートにおいても安定した動作を実証した(図 6)。

超薄型 CPL に関しては、詳細なモデル検討により多孔体の薄肉化、低熱伝導多孔体の接触熱コンダクタンス向上、高熱流束化が本質的技術課題であることが明らかとなった。熱流束の増大とウィック内圧力損失の低減を両立させるため、櫛歯型蒸発器構造を新たに考案し(図 7)、ウィック内圧力損失を従来の 20%以下に低減させることに成功した(特許出願 1)。また、CPL システムを構築し、厚さ 1mm、最大熱輸送量 14W、熱輸送距離 200mm という世界最薄の CPL を実現することに成功した。

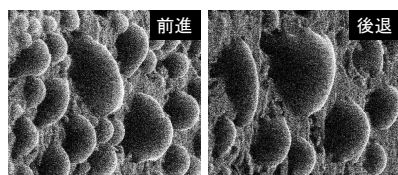


図 5 ESEMによる多孔体濡れ性評価

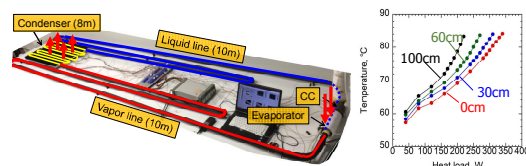


図 6 長距離 CPL

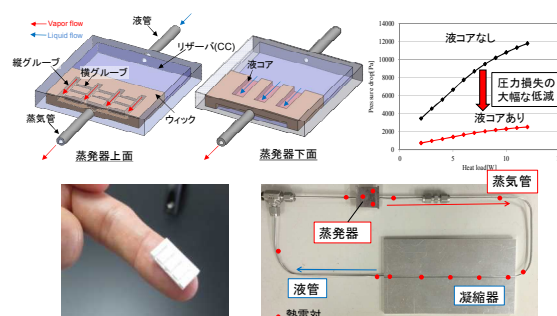


図 7 超薄型 CPL

3. 今後の展開

蒸発器の多孔体における相変化を物理モデル化したものをポアネットワークに組み込み、CPL システム設計に反映させることで、多孔体特性、ウィック厚さ等を最適化できる設計ツールを構築し、種々の熱要求に最適なシステムが提供できる手法を確立する。また、高熱流束と長距離を両立できる最適相界面構造に基づく CPL を実現させ、CPL の民生産業分野で実用化を加速させる。また、長距離 CPL に関しては、さらに高低差を設けた実験により優れた抗重力性を実証する。現在企業と共同で進めている研究にも本成果を適用させ、従来にはない無電力な大量熱輸送デバイスを早期に実現していく。

4. 評価

(1) 自己評価(研究者)

本研究では多孔体内の気液相変化素過程の観察、基本現象の解明に成功し、さらに物理モデル化することで毛管駆動熱輸送(Capillary Pumped Loop: CPL)システムの熱輸送限界を向上させるための開発指針を明らかにすることができた。このことは様々な熱輸送要求に対して異なる最適解が存在する本システムの設計法としての有用性を示しており、今後もさまざまな熱輸送要求を満足する CPL システムの提案・実現につながることを期待できる。また、単にその可能性を基礎研究により示すだけではなく、実際に CPL システムを構築し、その有用性を実証するなど、基礎科学から応用技術への道筋を示すことができた。

基礎フェーズでは、多孔体内での相変化素過程において 3 つの熱輸送モードが存在すること、多孔体-蒸気チャンネル間に生成される液架橋が主たる熱伝達を担うこと、多孔体内気液界面後退の要因は沸騰核生成ではなく多孔体内気液圧力損失の増大であることなど、これまで予想されていた現象とは異なる描像が得られた。また、薄液膜蒸発と核沸騰が同時に起きる相変化モードにおいて、従来の 3 倍以上の高い熱伝達特性が示されること、多孔体-蒸気チャンネルと気液が接触する三相界線領域の増大が熱伝達特性向上に寄与することを明らかにした。これらの成果により、熱輸送システムの高性能化指針に新たな知見を与えることができたと自負している。また、当該分野の国際会議で論文賞を受賞するなど客観的な評価も得られた。これは申請時の内容が総花的な提案であったことを早い段階(研究開始時のサイトビジット)で指摘いただき、基礎フェーズでの研究テーマを多孔体内の相変化素過程の解明に絞り込んだことが功を奏したと考えている。

応用フェーズでは世界的にも前例のない片道 10m、全長 28m の長距離 CPL や、薄さ 1mm、熱輸送距離 200mm の薄型 CPL を実現することに成功した。この成果は関連分野の国際会議での招待講演等で高い評価を受けた。

また、さがけ助成期間中に数多くの企業から技術相談を受け、数社との共同研究に発展できた。これは、多孔体内の熱流動挙動の解明という基礎科学的成果と CPL システムでの実証という応用技術的成果の両方を学会や論文で発信してきたことが産業界の目に止まったものと考えている。一方で、新たに構築した物理モデルからは加熱面および多孔体濡れ性向上、多孔体接触面形状の改良や、多孔体への新たな化学的機能付加など、さらに性能向上させるための指針や、新しい熱輸送機構発現の可能性が得られたものの、実験的な実証は今後に委ねることとなった。

最後に、本研究内容はエネルギー高効率利用という出口(熱輸送システムの飛躍的性能向

上)を強く意識しながらも、その中に存在する相界面での本質的な学術的研究課題(多孔体内三相界面での熱流動挙動の解明と高度化)に取り組むというという本領域のスタンスを体現できたと考えている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

本研究は、多孔体内の気液相変化素過程の観察、基本現象を解明し、物理モデル化することで毛管駆動熱輸送(CPL)システムを高度化するための開発指針を明らかにすることであり、薄型、長距離型、及び高揚程型のヒートパイプへの適用を目指すものである。本研究において、空孔特性(細孔半径、空隙率、浸透率、熱伝導率等)と蒸気チャネル構造の異なる多孔体での熱流動挙動の観察等から CPL のメカニズムを明確にした上で、ポアネットワークモデルを活用した計算モデルを構築し、多孔体内相変化時の局所的な温度、圧力、質量流束分布を明らかにしている。その結果から、CPLシステムの有用性を実証し、多孔体と蒸気チャネル間に生成される液架橋が主な熱伝達率向上の要因であるといった基礎科学から、ミリオーダーの薄型 CPL あるいは長距離輸送型 CPL といった応用技術への道筋を示したものであり、高く評価する。今後、これらの成果をさらに展開することで、種々の熱要求を実現する CPL システムの提案・実現につながっていくことを期待する。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Hosei Nagano, Masakazu Kuroi, and Masahito Nishikawara, "Thermo-Fluid Characteristics Microporous Structure with Different Flow Channels for Loop-Heat-Pipe," Heat Transfer Engineering, Volume 37, Issue 11 (2016) 947-955 .
2. Kimihide Odagiri, Masahito Nishikawara, and Hosei Nagano, "Microscale Infrared Observation of Liquid-Vapor Phase Change Process on the Surface of Porous Media for Loop Heat Pipe," Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, Vol. 6, No. 2 (2016) pp. 33-41.
3. Masahito Nishikawara, and Hosei Nagano, "Optimization of wick shape in a loop heat pipe for high heat transfer," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 104 (2017) 1083-1089.
4. Kazuya Nakamura, Kimihide Odagiri, and Hosei Nagano, "Study on a Loop Heat Pipe for a Long-Distance Heat Transport Under Anti-Gravity Condition," Applied Thermal Engineering, Volume 107, (2016), Pages 167-174.
5. Masahito Nishikawara, and Hosei Nagano, "Numerical simulation of capillary evaporator with microgap in a loop heat pipe," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 102 (2016) pp. 39-46.

(2)特許出願

研究期間累積件数:2 件

1.

発 明 者: 長野方星 福嶋一貴

発明の名称: 熱交換器、蒸発体、および電子機器

出 願 人: 名古屋大学

出 願 日: 2015/5/1

出 願 番 号: 特願 2015-094385

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【招待講演】

1. “Comprehensive Approach for Expanding Potential of Loop Heat Pipe,” 10th Fujikura Thermal Forum, (Tokyo, 2016 年 11 月 10 日).
2. “多孔体内熱流動解析に基づくループヒートパイプの高性能化,” 第 35 回日本ヒートパイプ講演会, (早稲田大学, 東京, 2016 年 7 月 30 日).
3. “Challenges in Expanding the Range of Application of Loop Heat Pipe to both Smaller Scale and Larger Scale,” Joint 18th International Heat Pipe Conference and 12th International Heat Pipe Symposium. (Jeju, Korea 2016 年 6 月 16 日)
4. “ループヒートパイプ熱輸送技術による高効率冷却・熱有効利用の可能性,” 日本冷凍空調学会 (東京, 2016 年 6 月 3 日)
5. “Thermo-Fluid Characterization in a Microscale Porous Structure with Different Flow Channels for Two-Phase Heat Transfer Devices Using Capillary Action,” Keynote Speech at The Twelfth International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. (USA illinoi, 2014 年 8 月 6 日).

【受賞】

1. Donald M. Ernst Award, Joint 18th IHPC and 12th IHPS, 2016, 6/15.

【解説記事】

1. 長野方星, “マイホームを活用した太陽熱エネルギーのパッシブ輸送への挑戦(検討編),” 熱物性学会誌, Vol. 32, No. 3, (2014) pp. 132-134.

【新聞掲載】

1. “電力を使わず熱移動 人工衛星にヒント 名古屋大, 10メートル成功,” 朝日新聞 2014 年 1 月 9 日.

【アウトリーチ】

1. TEDx Anjo 登壇「宇宙に学ぶ ～熱テクノロジーの可能性～」2015 年 8 月 7 日.

6. その他関連の情報

(1)新たに構築した研究ネットワーク:

相手先分類	相手先名称	形態	概要
さきがけ	A 氏	機器融通, 情報共有	X 線 CT 装置の借用, 濡れ性改善, 可視観察に関する技術相談

さががけ	B 氏	試料提供	一次元配向型多孔体の実現性について議論, 試料試作
さががけ	C 氏	櫛歯型蒸発器構造提案	櫛歯型流路に関する情報提供, 助言
アドバイザー	D 氏	試料提供	サブミクロン多孔体の試料提供
CREST	E 氏	試料提供	サブミクロン多孔体の試料提供
CREST	F 氏	機器融通	ESEM 装置の借用
CREST	G 氏	ディスカッション	多孔体の限界熱流束に関する議論。
他大学	H 氏	多孔体表面改質	化学修飾による濡れ性向上に関する研究協力。
他大学	I 氏	加熱板表面改質	加熱板の濡れ性向上に関する技術アドバイスおよび試料提供
他大学	J 氏	加熱板表面改質	非公開
企業	K 社	共同研究	非公開
企業	L 社	共同研究	非公開
企業	M 社	共同研究	非公開
企業	N 社	共同研究	非公開
企業	O 社	共同研究	非公開
企業	P 社	共同研究	非公開
企業	Q 社	試料提供	非公開
企業	R 社	試料提供	非公開

(2)研究会・領域会議での助言・指導による研究課題の進め方、方向修正等について
提案時の申請の中から選択と集中により本質的な研究課題に絞った。

(3)さががけ期間を通じて研究手法、実用化への考え方、取組み方で学んだこと

研究に対する考え方として、常に研究のボトルネックに注目し、その中の学術的研究課題に取り組むこと、また、単なる基礎研究に終わるのではなく出口を強く意識した本質的学術研究に取り組むことの重要性を学んだ。