

平成30年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発」

研究開発成果等報告書

平成31年5月

担当局 近畿経済産業局
補助事業者 株式会社ロータス・サーマル・ソリューション

目 次

第1章 研究開発の概要

1－1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1－2	研究体制	4
1－3	成果概要	5
1－4	当該研究開発の連絡窓口	5

第2章 本論一（1） 6

最終章 全体総括 17

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

円柱状の気孔が一方向に配列したロータス型ポーラス金属（ロータス金属）は、特異な気孔形態に起因して、巨大表面積および高い流体透過性を有する。このロータス金属をパワー半導体素子の冷却部品（ヒートシンク）として応用すると、従来の溝型ヒートシンクと比較して4～5倍優れた冷却能を示す。

本研究開発は、このロータス金属を利用した著しく高い冷却性能を有する冷却器の素材連続鋳造工程にIoTを導入し、工程管理、最適化をフィードバックすることで、製造を革新的に効率化、低コスト化する。具体的には、実験および材料組織シミュレーションに基づく製造パラメータデータベースを構築、連続鋳造時にin-situでモニタリングし、さらに検査工程からのフィードバックとも整合させることで自動最適化を可能な仕組みに構築する。

【平成28年度目標】

最適化の基礎となる作製・構造パラメータデータベースの構築および最適化システムの構築に向けたシステムの作成をスタートさせる。具体的には、ロータス銅作製時の鋳造条件と生成する気孔の多孔質構造を関係付ける。さらに、統計学的手法により、鋳造条件と多孔質構造の関係を定式化することを試みる。一方、最適化システムについては、データベースシステム、検査装置システム、設計システムおよび作製装置システム等の独立した個々のシステムを連動させるためのインターフェースおよびシステム間の仲介システムの構築を開始する。

【平成28年度実績結果】

IoTに基づく製造自動化を実現するために

- （1）ロータス銅作製条件の自動最適化を実現させるためにシーケンス制御機器を作製し、鋳造機に増設した。これにより目標とする温度、ガス濃度、凝固速度等を任意で制御可能となった。
- （2）実験と材料組織シミュレーションに基づく製造パラメータデータベースを構築に向けて、実験的に作製条件を変化させロータス金属を作製し、その製造条件と性能測定したヒートシンクの性能を気孔形態で紐付けた。さらに、シミュレーションにおいては、基本モデルを構築し、気孔成長モデルの導入検討を進めた。

【公開版】

- (3) 多孔質構造解析自動化の計画を追加して進めた。研究推進において、多孔質構造の解析に最も人的、時間的リソースを要していることが明らかになり、効率的に開発を進捗させるため、多孔質構造解析の自動化開発を行い、試作機を完成させた。

【平成29年度目標】

平成28年度開発の基礎開発システムを用いて事業目標とする最適化量産製造プロセスの連動性の実証・検証を行う。具体的には、平成28年度に構築した最適化の基礎となる最適化設計システム、 casting・構造パラメータデータベースを連動させ製造、性能評価に関する実証実験を行う。また、作製シミュレーション、構造パラメータデータベースとを比較、フィードバックする事で鋳塊そのものの均質性を向上させる。そのため、開発した自動解析装置に均質性等の材質の評価を可能とするアプリケーションを開発・追加する。

【平成29年度実績結果】

- (1) 平成28年度に導入したシーケンス制御機器を付与した鋳造機にて鋳造実験を行い、凝固条件の設定により任意の気孔形態制御を実現すると共に溶融温度のフィードバック制御により、均質性を向上させた。
- (2) 上記の気孔形態制御実験において、系統的に凝固条件を変化させ、データベースの作成を進めた。具体的には、引出速度を任意に変化させ、気孔径との関係を明らかにした。さらに、それらの結果は、マルチフェーズフィールド法を用いた凝固シミュレーションにより、一般化を進めると共に計算機予測により実験を補完するようなデータベースの作成を進めた。(マルチフェーズフィールド法では、一方向性気孔の凝固現象すなわち凝固界面での液相からの溶質の排出、気孔発生、成長、固相凝固の一般化に世界で初めて成功した。)
- (3) 研究期間内に作成したヒートシンク自動設計ツールを用いて予測したヒートシンク性能と気孔形態検査システムの連動性を確立した。

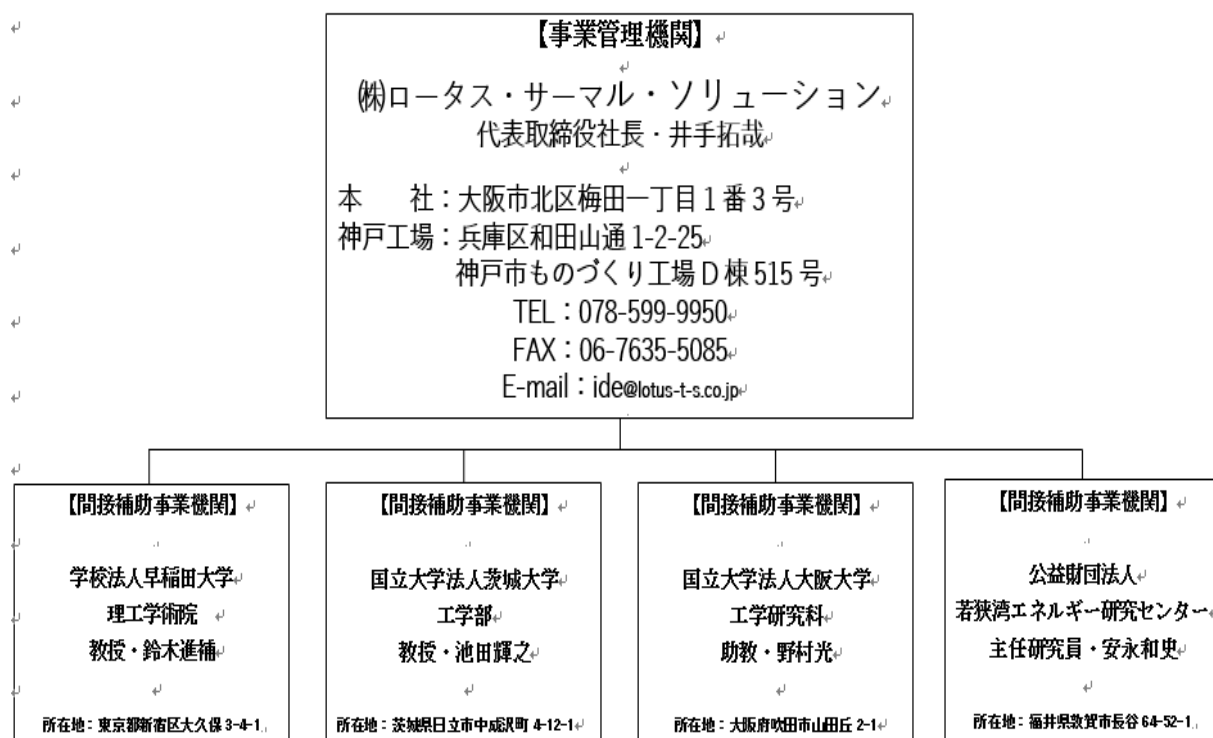
【平成30年度目標】

これまでに開発した最適化製造プロセスの実証実験を行う。具体的には、開発した製造プロセスでの実証実験を行い、フィードバックにより最適化量産製造プロセスを構築する。さらにその際、定量的評価を行い当初数値目標に対する評価を行う。

【平成30年度実績結果】

ワークステーションを想定して、提案システムの実証実験を行った。市場における高性能品をターゲットとした性能設計を行い、余剰性能で薄型化およびファンの低出力化を実現できる可能性を提案した。提案設計は、付加価値を最大化させたことでワークステーションのみならず、性能要求が高く、隙間高さに制限があり、使用時間の長いブレードサーバー、ホームサーバーBIM システムへの革新的冷却部材として転用可能であり、著しい用途拡大が期待できる。また、それらの設計に基づきヒートシンクを作製し、当初目標の低コスト化、製造効率化を実証した。

1-2 研究体制



実施項目 1-1：詳細構造制御因子の解明のための一般化とパラメータの把握、提案 －研究者－ (株)ロータス・サーマル・ソリューション：井手拓哉、松本聡子 茨城大学工学部：池田輝之、篠島妥、木村真視子
実施項目 1-2：提案パラメータによる制御の実現と実効性確認 －研究者－ (株)ロータス・サーマル・ソリューション：井手拓哉、沼田富行、松本聡子 早稲田大学理工学術：鈴木進補
実施項目 2-1：最適化システムのためのデータベース構築 －研究者－ (株)ロータス・サーマル・ソリューション：沼田富行、村上政明 茨城大学工学部：池田輝之、篠島妥、木村真視子 若狭湾エネルギー研究センター：中嶋英雄、安永和史
実施項目 3-1：自動製造最適化システムの構築 －研究者－ (株)ロータス・サーマル・ソリューション：井手拓哉、角一道明 大阪大学基礎工学研究科：野村光

1-3 成果概要

ロータスヒートシンクの設計・製造・検査の工程を自動化し、それらをIoTで結びつけることで生産効率を抜本的に改善するだけでなく、リードタイムを著しく短縮し、ユーザーの付加価値を最大化するものづくりシステムの基礎を構築した。具体的な取り組み内容および成果を下記に示す。

ロータス金属の冷却性能を定式化し、その性能シミュレーションを網羅的に実施した。その網羅的な性能予測について実験と比較を行い、性能データベースを作成すると共にその結果よりユーザーの仕様およびニーズを満足する設計結果を探索することでユーザーの付加価値を最大化する設計を実現した。さらにそれらの設計データを鋳造条件および検査条件と紐づけることで製造効率を最大化させる仕組みおよび指針を定量化した。

連続鋳造装置で作製条件の自動最適化を実現させるためにシーケンス制御機器を作製し、増設した。これにより、目標とする温度、ガス濃度、凝固速度等をin-situでフィードフォワード・フィードバック制御が可能となり、生産性を向上した。

検査工程では画像解析システムを開発し、多孔質構造を解析するだけでなく、検査フィン単体の性能予測も可能としたことで、将来的な検査後部品の性能クラスタリングや固体性能識別を可能とした。また、これらの解析結果がデータベースに蓄積されることで単体性能とユニット性能の比較や仕様決定の指針を定量化することができる仕組みを構築した。

上記の開発のデモンストレーションとして、ワークステーションを想定して、提案システムの実証を行った。性能を市場における高性能品をターゲットに設計を行い、余剰性能で薄型化およびファンの低出力化を実現できることを実証した。提案設計は、付加価値を最大化させたことでワークステーションのみならず、性能要求が高く、隙間高さに制限があり、使用時間の長いブレードサーバー、ホームサーバーBIMシステムへの革新的冷却部材として転用可能であり、著しい用途拡大が期待できる。また、それら設計に基づきヒートシンクを作製し、当初目標の低コスト化、製造効率化を実証した。

以上の成果は、経済産業省・中小企業庁から中小企業におけるIoT実施の好事例に選定され、中小企業の特定期間ものづくり基盤技術の高度化に係わる指針の改定において、IoT・AI等を活用した中小企業の研究開発事例として公開されている。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

担当者：代表取締役社長・井手拓哉

電話：078-599-9950

FAX：06-7635-5085

E-mail：info@lotus-t-s.co.jp

第2章 本論一（1）

円柱状の気孔が一方方向に配列したロータス型ポーラス金属(ロータス金属：図1に示す)は、特異な気孔形態に起因して、巨大表面積および高い流体透過性を有する。このロータス金属をパワー半導体素子の冷却部品(ヒートシンク)として応用すると、従来の溝型ヒートシンクと比較して4~5倍優れた冷却能を示す。図2にロータスヒートシンクの製造工程を示す。ロータスヒートシンクは、ユーザーとの仕様策定、ロータス金属製造・加工・検査の工程で作製される。しかしながら、開発品であり、カスタマイズ性が高いため、作製のためには、設計により多孔質構造仕様を決定し、鋳造を行うことで、設計の実現性を検証する必要があった。そのため、製造の後戻りが生じ、製品試作作製までに多くのリードタイムが必要であった。製造の後戻りを解消し、製造自動化を最終的な目的として、ロータスヒートシンクの設計・製造・検査の工程を自動化し、それらをIoTで結びつけることで生産効率を抜本的に改善し、リードタイムを短縮するものづくりシステムの基礎の構築に以下の実施項目で取り組んだ。実施項目に沿って開発内容および得られた成果について以下に示す。

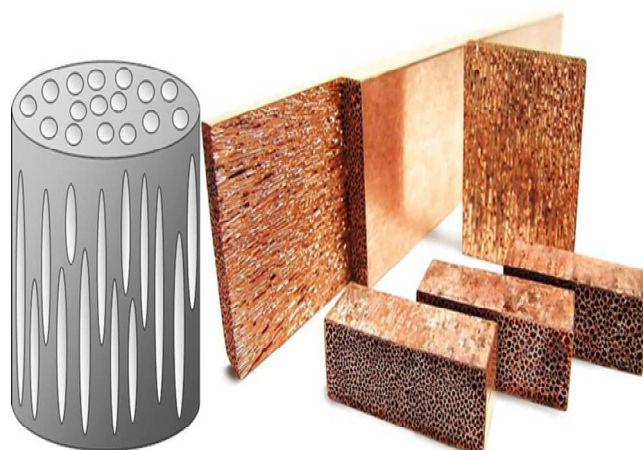


図1. ロータス金属の概略図と外観写真

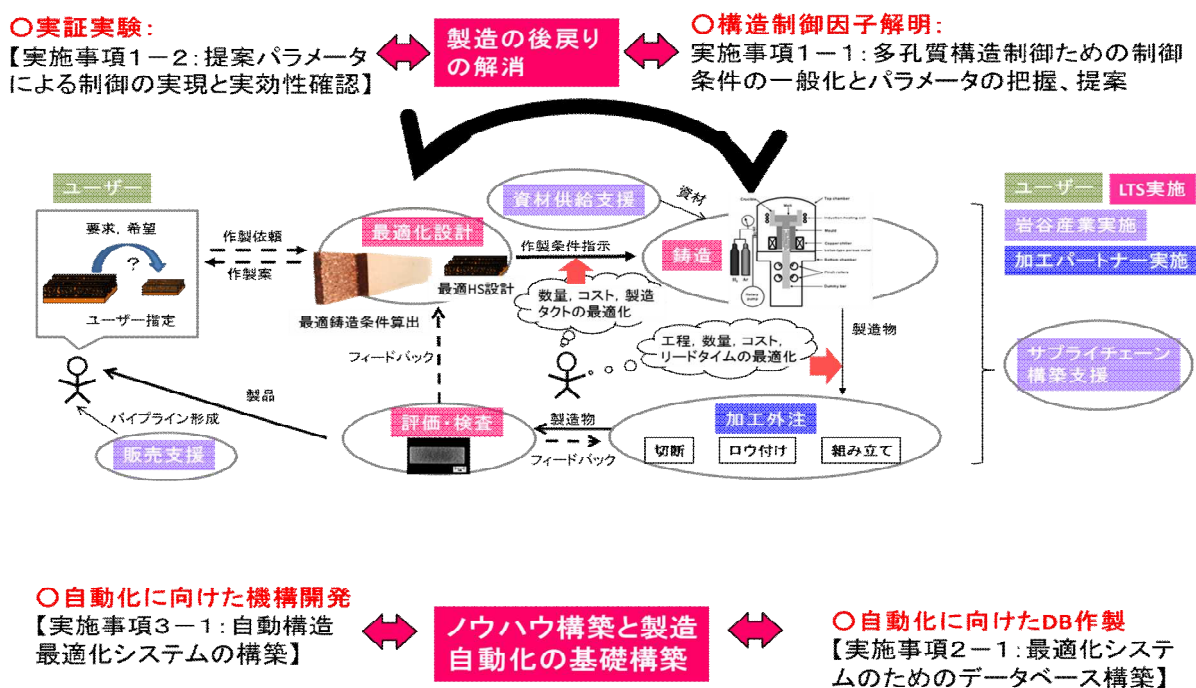


図2. ロータスヒートシンクの製造工程とモノづくり最適化のための取組事項

・実施事項 1-1：詳細構造制御因子の解明のための一般化とパラメータの把握、提案

Phase-Field 法を用いてロータス金属の気孔の成長を解明（LTS／茨城大学）

【研究内容】

ロータス金属の多孔質構造形成過程は、金属原子と気孔原子の拡散が支配的な競合成長によるものであることが、実験と拡散に基づく計算および計算的検証による研究から明らかにされている。図3に概略図を示す。そのような一般的な金属凝固の相成長からのみロータス金属の成長を論ずる場合、現在の制御パラメータは的確で十分である。一方、本研究開発では、金属と金属の競合成長ではなく、金属とガス相の競合成長である点に着想し、相間で拡散性と速度論的な相安定性が前者と大きく異なることに着目する。そのため、拡散型の相成長をエネルギー的な相安定性から取り扱うフェーズフィールド法でロータス金属の成長を取り扱い、一般化を行う。

その結果として現状把握できていない構造制御因子を明らかにし、経験的、実験的なすり合わせに基づくパラメータ調整によりタクトロス、製造の後戻りによる製造コスト増高を抑止する。

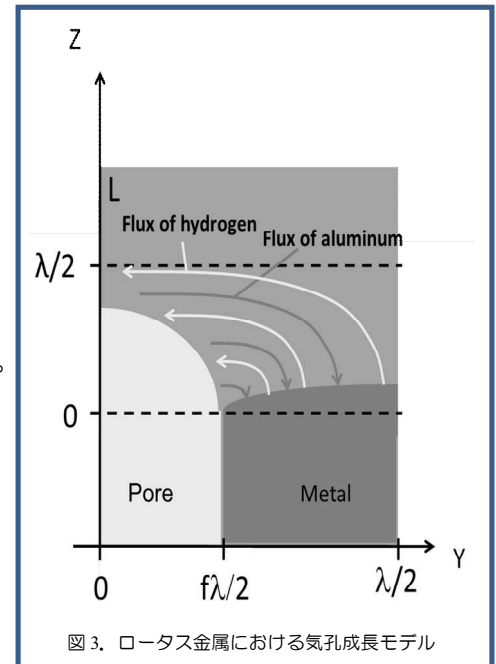


図 3. ロータス金属における気孔成長モデル

新規性、独創性および革新性

本研究開発の成果物となる LCS は、革新的なヒートシンクとして早期の実用化が期待されている。今後、パワー半導体の効率的な冷却においては必須の先端技術でありその市場訴求力の高さは、新規性だけでなく実現性を客観的に示すものである(事業性については詳細を後述する)。

【研究結果】

ロータス金属の多孔質構造パラメータの把握と提案のためにロータス金属の気孔成長機構の一般化に取り組んだ。

ロータス金属の多孔質構造形成過程は、金属原子と気孔原子の拡散が支配的な競合成長によるものであることが、実験と拡散に基づく計算および計算的検証から報告されている。そのような一般的な金属凝固の相成長からのみロータス金属の成長を論ずる場合、現在の制御パラメータは的確で十分である。一方、本研究開発では、金属と金属の競合成長ではなく、金属とガス相の競合成長である点に着想し、相間で拡散性と速度論的な相安定性が前者と大きく異なることに着目した。そのことから、多相系を扱うことができるマルチフェーズフィールド法を用いて、一方向凝固時の気孔の成長過程を予測し、多孔質構造と casting 条件の関係性を一般化することでパラメータの把握と提案に取り組んだ。

フェーズフィールド法とはフェーズフィールドと呼ばれる位置および時間に依存する場の秩序変数 ϕ を用いて材料組織の形成過程を再現する計算予測手法である。固相と液相の2相が共存する2元系の場合は、系の領域において、液相は0、固相は1を設定して界面領域は0～1まで変化することで組織形成過程を表現する。本研究は固相、液相、気相の3相が

【公開版】

存在するため、多相系を扱うことができるマルチフェーズフィールド法を修正したMeidani-Jactモデルを用いた。マルチフェーズフィールド法を用いた計算機予測実験により、引出速度、ガス圧力、溶湯温度等の casting 条件が気孔形態に及ぼす影響を調べた。その際、フェーズフィールドに閾値を定め、その閾値により気相を同定し(図中の橙色)、気孔形態に及ぼす影響を検討した。計算条件については、casting 条件を参考としたため、非公開とする。

図4にマルチフェーズフィールド法を用いた計算機予測実験の結果の一例を示す。上段は一定の凝固界面の移動速度で気孔を成長させる際にその速度を変化させた場合の結果である。界面の移動速度を増加させると気孔は微細化する。すなわち、引出速度を変化させ、界面の移動速度を変化させることで気孔径を制御可能である。同様に界面前方の液相温度、圧力条件が気孔の成長に影響を及ぼす。それらについて、実験との比較実験を行い多孔質構造-casting 条件データベースを作成した。多孔質構造-casting 条件データベースについては、実施項目2-1で述べる。

一方、下段は界面の移動速度を一定と不連続に変化させた場合の結果である。左図が一定の界面の移動速度で気孔を成長させた場合および中右図が気孔の成長中に界面の移動を停止させ、その停止時間短い場合(中図)と長い場合(右図)と変化させた場合の結果である。一定の界面の移動速度で気孔を成長させた場合、気孔の成長は一定の移動距離で停止し、気孔が閉塞する。しかしながら、中図にみられるように気孔が閉塞する以前のタイミングで界面の移動を停止させることで気孔に水素が供給され気孔が閉塞することなく成長を続ける。これは、成長過程で気孔を成長させるに十分な水素が供給されなくなり、気孔が閉塞する。気孔が閉塞する以前のタイミングで界面の移動を停止させると不足する水素が供給され、気孔は成長を続けることを意味する。しかしながら、停止時間を長くすると水素の供給が過剰になるため気孔同士が癒着する。すなわち、適切な界面の移動速度で気孔を成長させつつ、成長に伴い不足する水素を界面の移動を適切に停止させることで供給することができれば気孔の成長は抑制されることなく、結果として長い気孔を有するロータス金属が作製できる可能性がある。装置仕様上、界面の移動速度、移動時間と停止時間の最適化の実証はできていないが計算実験による気孔成長の一般化の結果、見いだされた極めて有用な提案である。

上記の内容で実施計画の研究開発項目をすべて達成し、詳細構造制御因子の解明のための多孔質構造の一般化とパラメータの把握、提案を行った。

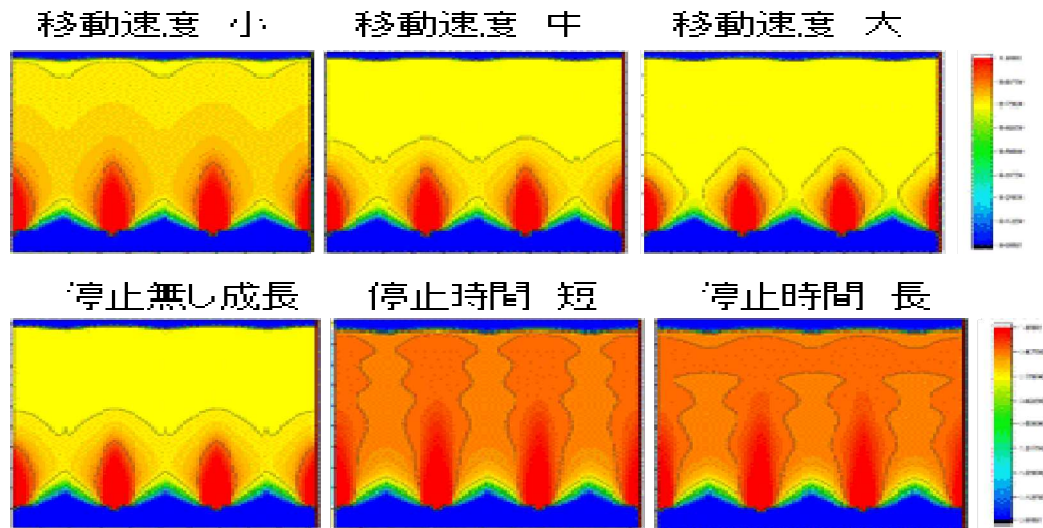


図4. マルチフェーズフィールド法を用いた計算機予測実験の結果の一例

・実施事項 1-2：提案パラメータによる制御の実現と実効性確認

実施事項 1-1 を受けて提案されたパラメータを実現（LTS／早稲田大学）

【研究内容】

実施事項 1-1 の解析から導き出された新たなパラメータをコントロール可能なパラメータとするため、その提案パラメータを独立に変化させ、そのパラメータの変化がロータス金属の構造に与える影響を把握する。さらに効率的な制御パラメータとして連続鋳造装置に制御機構として組み込み、得られた実験データは実施事項 1 の詳細構造制御因子の解明にもフィードバックする。

【研究結果】

作製条件自動最適化を実現させるためにシーケンス制御機器を作製し、弊社神戸工場の連続鋳造装置に設置した(概略図を図5に示す)。さらに溶湯温度、引出速度、雰囲気圧力、液面レベルをモニタリング、定量化するためにそれぞれのセンサーを設置し、鋳造実験を行った。鋳造時の鋳造条件について、計算機実験に基づき目標数値および制御幅を決定し、パラメータ制御の実効性検証のため、上記シーケンス制御を用いてパラメータ制御により作製した鋳塊と目標条件数値を設定、手動にて制御を行った鋳塊を作製した。作製した鋳塊は1 mm毎に切断し、画像解析により多孔質構造を評価した。図6に手動制御(従来手法)およびシーケンス制御により溶湯温度を制御して作製したロータス銅の位置による多孔質構造のばらつきを示す。異なる鋳塊の多孔質構造のばらつきを示す変動係数(標準偏差/平均)は、手動制御の場合、最大で、1.1であるのに対し、シーケンス制御により用途温度を制御して作製したロータス銅の気孔径の変動係数は0.7程度である。シーケンス制御によりロータス銅鋳塊内および面内の多孔質構造の均一性および再現性が著しく向上した。図7に手動制御(従来手法)およびシーケンス制御により溶湯温度を制御して作製したロータス銅の多孔質構造のばらつきと断面内平均気孔径の関係を示す。手動制御で作製した鋳塊は断面内平均気孔径の増加に伴い単調にばらつきの指標であるCVが増加する。一方、シーケンス

【公開版】

制御により作製した鋳塊の断面内平均気孔径およびCVは変化が小さい。すなわち、溶湯温度制御が十分でない場合、鋳塊後半にてばらつきが増す。断面内の平均気孔径が大きい場合にばらつきが大きいことから、鋳造の時間計画に伴い、溶湯温度が変化し、大きな気孔が生成しばらつきを生じさせる。シーケンス制御により、溶湯温度を制御するとその気孔の生成が抑制され多孔質構造は均一化する。同様に引出速度、ガス圧力も最適化制御を行った。シーケンス制御により計算実験によるパラメータ制御を実現し、実効性を確認した。

また、上記、パラメータについて実験での実証を行うと共に多孔質構造-鋳造条件データベースを作成した。その一部の結果として図8に連続鋳造時の溶湯温度および引出速度を変化させて作製した鋳塊の気孔率、気孔径と気孔数密度の関係を示す。マーカーの色は引出速度を示し、同一速度で溶湯温度を変化させた。溶湯温度および引出速度を変化させて作製したロータス銅の気孔率および気孔径は気孔の数密度と線型的な関係を有し、気孔率および気孔径が返照すると数密度は単調に減少する。その傾向は、溶湯温度および引出速度の双方が同時に変化しているにも関わらず線型的な変化傾向を有する。すなわち、ロータス銅の多孔質構造は統計学的に一義的な基本構造を有しており、作製条件によりその構造を保ちつつ気孔径および気孔率を最適に調整させていると考えられる。そのことから、非経験的な作製条件においてもその構造は予測可能であり、計算実験及び実証実験で作成した多孔質構造-鋳造条件データベースは、着実に多孔質構造と鋳造条件を紐づける。

上記の内容で実施計画の研究開発項目をすべて達成し、提案パラメータによる制御の実現と実効性確認を行った。

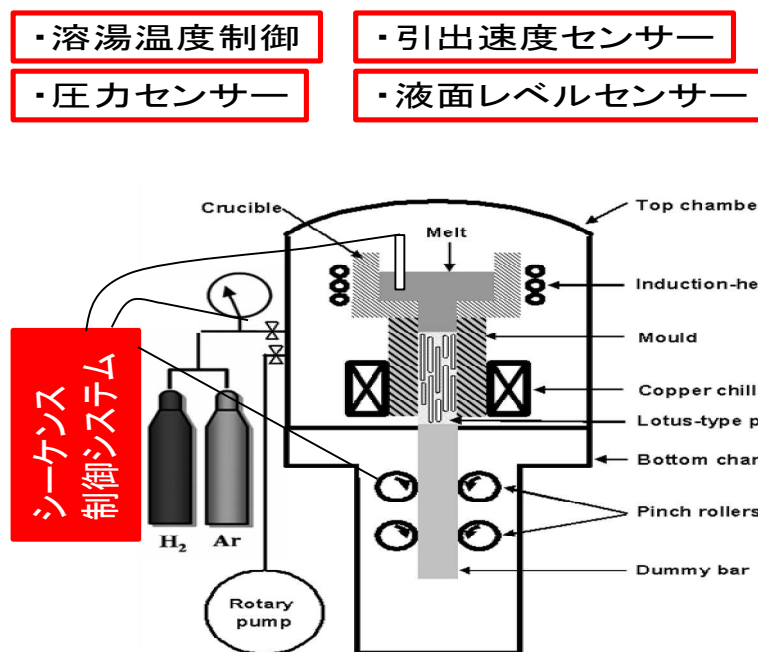


図 5. ロータス金属連続鋳造装置

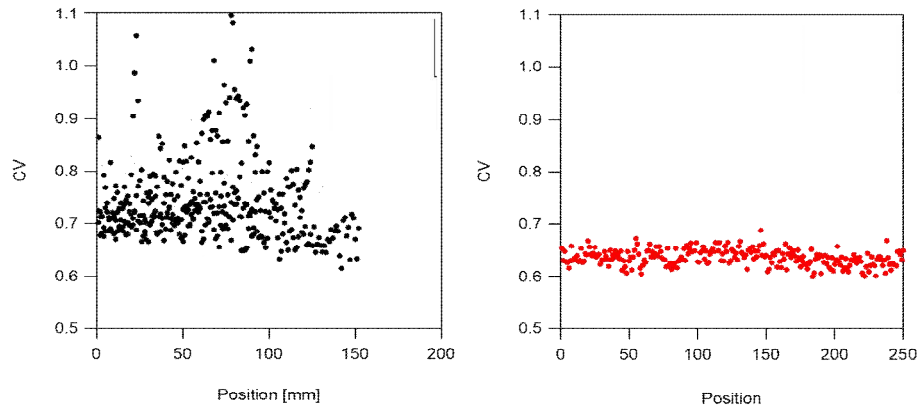


図 6. 手動制御(従来手法)およびシーケンス制御により溶湯温度を制御して作製したロータス銅の多孔質構造

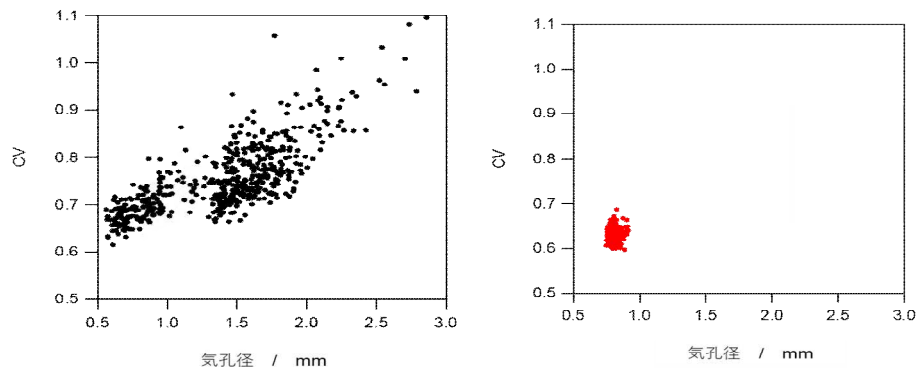


図 7. 手動制御(従来手法)およびシーケンス制御により溶湯温度を制御して作製したロータス銅の多孔質構造のばらつきと気孔径の関係

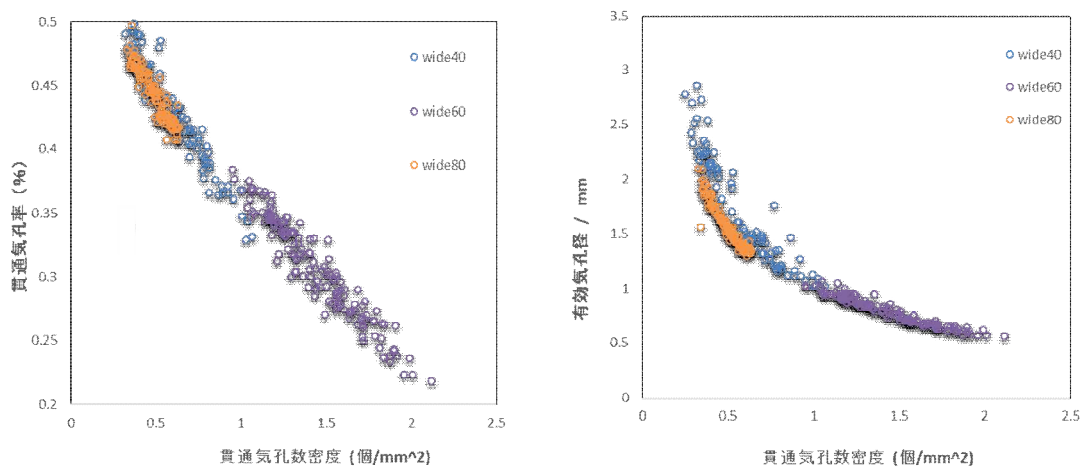


図 8. 手動制御(従来手法)およびシーケンス制御により溶湯温度を制御して作製したロータス銅の多孔質構造のばらつきと気孔径の関係

・実施事項 2-1：最適化システムのためのデータベース構築

自動最適化制御を実現する構造とプロセス条件を紐付けたデータベースの作成（LTS／若狭湾エネルギー研究センター／茨城大学）

【研究内容】

in-situ のリバーシエンジニアリングのような理想解、最適解への最適化自動制御を実現するためには、その裏付けとなる制御パラメータとその応答としての構造の紐づけが重要である。そこで、実施事項 1 により既存パラメータおよび新規提案パラメータの影響を理解する。計算において網羅的にパラメータの影響を理解し、さらに各パラメータについて、特にエフェクトかつコントローラブルな制御領域を理解する。そのような注目領域において、詳細に検証実験を行うことで、計算と実験の両面から正確なデータベースを構築する。さらに、得られた実験データは実施事項 1 の詳細構造制御因子の解明にもフィードバックする。

【研究結果】

鋳造については、実施事項1-2の多孔質構造-鋳造条件データベースにより自動最適化の元となるデータベースを作成した。また、同様に設計についてもデータベースを作成した。ロータスヒートシンクの冷却性能は、多孔質構造、ヒートシンクフィン構造、冷媒条件等のパラメータにより定式化が行われ、比較的容易、正確に予測可能であることが報告されている。本研究では、従来の予測式を発展させ、異なるヒートシンク構造パターンで多孔質構造のばらつきの効果を考慮した設計式を実験より導出し、計算実験により冷却性能の予測を行った(設計式は非公開とする)。図9にファンパワーに対する冷却性能予測結果の一例を示す。上記のパラメータ等13のパラメータを広範囲に変化させ、10億通り以上の設計パターンについて網羅的に計算を実施した。さらにそれらの設計例よりユーザーの仕様(ニーズ)を条件範囲として性能マップ(図10に示す)を作成し、潜在ニーズを定量化することで、その範囲を追加付与・限定することで付加価値を最大化させた設計結果をデータベースより自動で選択させる仕組みを構築した。すなわち、網羅的性能予測からの探索型の付加価値最大化設計システムを構築した。設計システムの具体的な内容は次項実施事項3-1にて報告する。

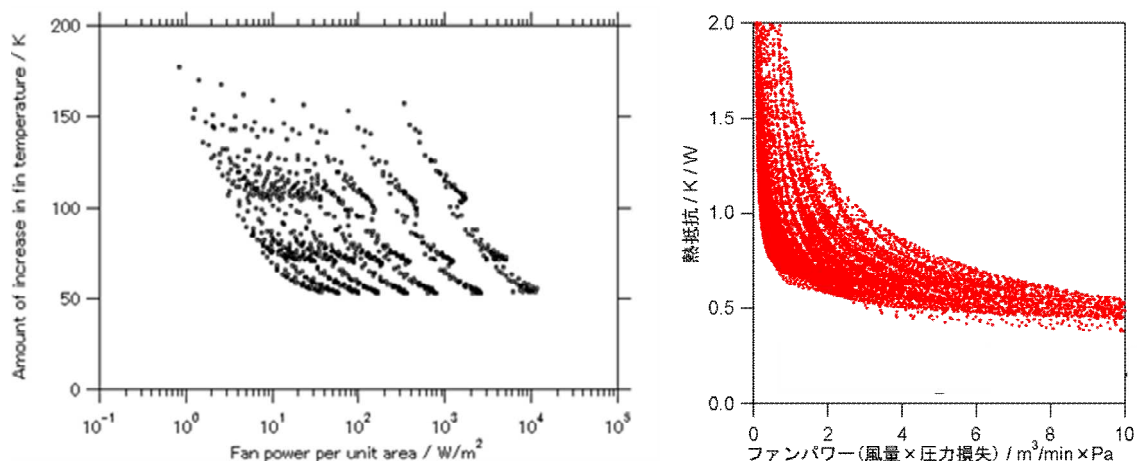


図9. ファンパワーに対する冷却性能予測結果の一例(ポイント毎設計例を示す)

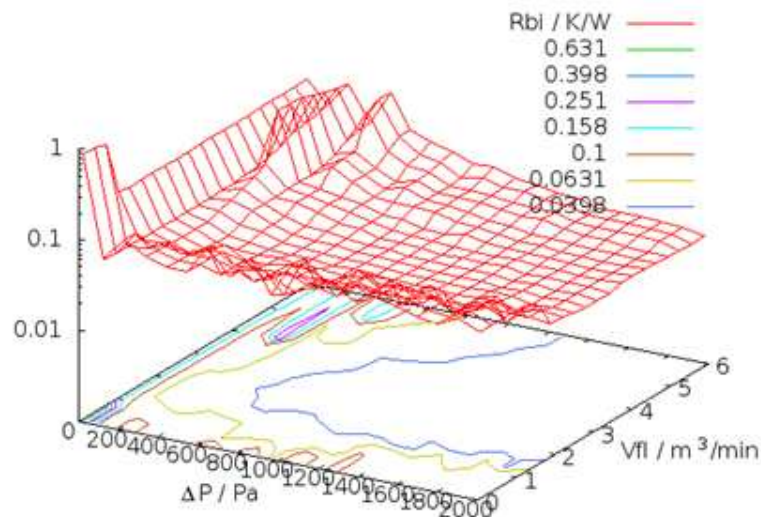


図10. 網羅的計算予測結果を仕様により限定することで作成した性能マップ

・実施事項 3-1：自動構造最適化システムの構築

自動最適化制御を実現する製造工程を連動させたシステムの構築（LTS／大阪大学）

【研究内容】

リアルタイム構造解析の結果と目標構造との差異を上記の学理と経験から裏付けされたデータベースに落とし込み、パラメータの差異として評価、逆算、最適化を行う。このようなシステムを用いることで、構造を最適化できる鋳造工程を構築する。開発したシステムについては、国内外のユーザーの実証トライアルも取り入れることで早期の実用化を目指す。

【研究結果】

ロータスヒートシンク的设计・製造・検査の工程を自動化し、それらをIoTで結びつけることでユーザーの付加価値を最大化し、ものづくりを最適化するためには、

- ・鋳造条件の最適化、自動制御(実施事項1-2で報告した成果)
- ・設計の自動最適化(実施事項2-1で報告した成果)
- ・構造検査での検証とフィードバックによる要素技術の深化とデータベースの更新

上記3つの全く異なるシステムを連動させる必要がある。そこで、我々は、それらの機能を物理的に接続するだけでなく、多孔質構造により共通言語化することにより生産の最適化・効率化を図ることを着想した。加えて、そのシステムにユーザーを介入させることで付加価値を最大化させる仕組みに取り組んだ。

具体的には、構造検査の自動化に成功し、それぞれのシステム連動に取り組んだ。

図11に本研究で開発した画像解析システムの概略およびユーザーインターフェイスを示す。ロータス金属の気孔形態撮影に最適なレンズおよびカメラを選定し、撮影した画像をPCに

【公開版】

保存、画像解析を行った。ソフトウェアを大阪大学と開発し、一枚当たりの解析時間を1秒以下として、すべての気孔の径、面積、中心位置座標を解析可能とした。解析用フィンの幾何構造を1秒以内に定量化可能で、量産への対応も可能な解析システムである。さらに、ロット統計情報および個別解析結果をそれぞれPCへ自動保存し、常にデータベースを深化させる解析システムを開発した。

上記の開発成果である鋳造および設計の自動最適化システムおよび構造解析検査システムの3つのシステムを多孔質構造で共通言語化した。具体的には、設計システムで設計した結果、すなわち、冷却性能発現に必要な多孔質構造は、多孔質構造-鋳造条件データベースを介して、鋳造条件と紐づけた。それにより、ヒートシンク設計毎に鋳造条件から算出される生産リードタイム、タクト、コスト、重量が同時算出可能となり、著しく高い冷却性能を有するロータスヒートシンクの余剰性能を重量、コスト、サイズ等に振り分けることが可能となった。さらに、設計に必要なパラメータ条件表を作成し、仕様を制定すると共に付加価値優先順位をユーザーが指定することで余剰性能をニーズに適切に分配可能な設計システムを開発した。さらに、検査工程でも一枚当たりの冷却特性の算出を行う仕組みを付与し、性能の確認によるデータベースの深化を可能とするだけでなく、将来的にはフィン単体性能毎のクラスタリングや個別識別による歩留まりの最大化や量産性能の安定化につながる技術確立することができた。

上述の開発システムの有効性実証デモンストレーションとして、ワークステーションを想定して、提案システムの実証実験を行った。下記の条件にて最適化設計を行った。

- 冷却性能は市場における高性能品と同等性能(熱抵抗：0.22 K/W)
- ヒートシンクフットプリントサイズはPCに搭載可能な80角
- 熱源サイズはCPUサイズで上記フットプリントの中心に配置
- 高さ50mm以下

上記条件でヒートシンクの最適設計を行い、余剰性能をファンパワー低減に分配、最適化することで省エネ化を実現するファン選定を可能とした。設計したヒートシンクおよび比較の上市済み他社製品のベンチマーク結果を図12に示す。提案設計ヒートシンクは、著しく低いユニット高さで要求性能を満たす。この高さは、付加価値を最大化させる。すなわち、ワークステーションのみならず、性能要求が高く、隙間高さに制限(50 mm以下)があり、使用時間の長いブレードサーバー、ホームサーバーBIMシステムへの革新的冷却部材として転用可能であり、著しい用途拡大および市場占有が期待できる。また、それら設計に基づきヒートシンクを作製し、当初目標の低コスト化、製造効率化を実証した。実際に搭載実験を行ったワークステーションデモ機を図13に示す。CPUの負荷を最大化させ、発熱させることが可能なデモ機を作製し、熱不可をかけ、CPUクーラーで排熱させた。

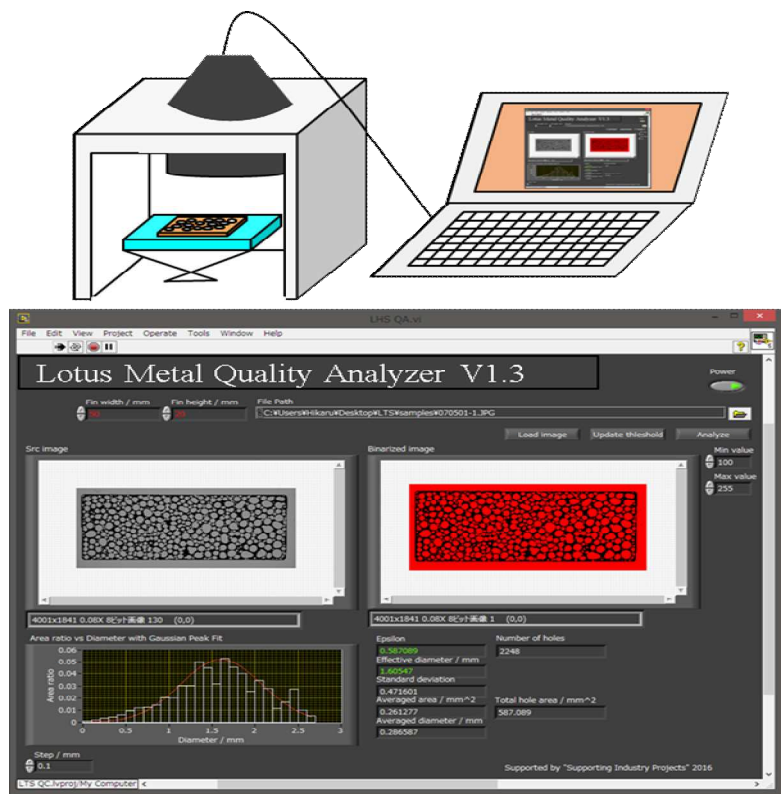


図11. 開発した自動多孔質構造解析システムの構成とユーザーインターフェース

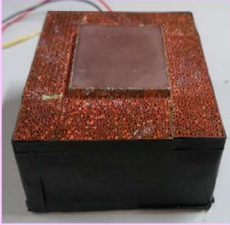
	ロータスCPUクーラー (イノベーション)	インテルTS15A (ソリューション)	虎徹
クーラー外観		上市済み他社製品 	
TS15基準冷却性能	100(熱抵抗:0.2 K/W)	100	89
サイズ[mm](サイズ比)	80×80×45(50%)	92×92×94(100%)	130×83×160(217%)
ファン動力	12V×0.3A	12V×0.6A	12V×0.17A

図12. 開発システムの実証デモンストレーション結果としてのヒートシンクベンチマーク



図13. 最適設計デモンストレーション用模擬ワークステーション。左図（右：ロータスヒートシンク搭載。左：汎用ヒートシンク搭載）。右図（断面概観）

以上の成果は、経済産業省・中小企業庁から中小企業におけるIoT実施の好事例に選定され、中小企業の特定制ものづくり基盤技術の高度化に係わる指針の改定において、IoT・AI等を活用した中小企業の研究開発事例として公開(図14)されている(公開HPのURL：<https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/download/shishin/2018/jGaiyo.pdf>)。また、デモンストレーション実験で試作したCPUクーラーは、日経エレクトロニクス2018年9月号(<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/mag/ne/18/00029/00004/Breakthrough>)破壊と創造をもたらす超高速マシン 第4部：熱に勝つ技術にて、高い放熱性能を持つと評価を受け、用途、生産性についても紹介され、大きな注目を浴びており、開発成果の早期実用化が期待される。

株式会社ロータス・サーマル・ソリューション

＜所在地：大阪府大阪市、従業員数：16名、基盤技術：材料製造プロセス技術＞

①IoT・AI技術活用による自社の技術高度化

予知保全・遠隔保守

運用・生産最適化

技術継承・開発支援

ヒートシンクの設計・鋳造・検査工程にIoTを導入し、ユーザーニーズに応じて性能・製造量・コストを自動的に最適化するシステムを構築（平成28年度採択サポイン事業：革新的冷却部材の最適化量産製造プロセスの開発）

内容	● ロータス型ポーラス金属（レンコンのように一方向に伸びた気孔を有する金属）を利用した高い冷却性能を有するヒートシンクの製造において、設計・鋳造・検査工程を自動化。 ● 実験と材料組織シミュレーションに基づく製造パラメータデータベースを構築し、ユーザーの用途に応じたニーズをパラメータとして入れると、最適な鋳造条件、ヒートシンクの設計が自動的に算出される。算出された設計に基づき、自動化された鋳造、加工外注、評価・検査工程に進められ、その結果が設計にフィードバックされる仕組みの構築を目指す。
背景	● 大学発ベンチャーで金属鋳造法等の要業技術を有することから引き合いは多かったものの、社内リソースが不足する中で、オーダーメイド（多品種少量）ではなく、マスカスタマイゼーション（簡単・安価・超高性能というユーザーニーズを満たしつつ、多品種多量）を実現できる仕組みの必要性を実感し、開発に着手。
成果/期待される効果	● マスカスタマイゼーションのフラッグシップとして、ロータスCPUクーラーを製品化（既存の製品と比較すると、冷却性能同等、ファン動力1/2倍、サイズ1/2）。 ● 2021年に全自動の第一号量産工場スタートを目指しており、その土台となる仕組みは構築済み。量産工場の前に、小規模量産段階を構想しており、サポイン事業で構築したIoTものづくりの仕組みに加え、AIを活用し、顧客のニーズを満たした上で、余剰分をどこに振るかの最適化まで目論む。

ロータス型ポーラス金属

製造型ベンチャーとしてのIoTものづくり（サポイン事業）

最適化設計システム：ニーズ(小さく、低コスト程度でOK)を実現する逆計量的最適設計
 鋳造装置：自動化を実現し、IoT化のための他システムからのフィードバック機構も導入
 検査システム：自動評価・解析機能だけでなく性能ランク分けシステムも付与し、価値創出

図14. 中小企業庁HP:IoT・AI等を活用した中小企業の研究開発事例
 (出展：<https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/download/shishin/2018/jGaiyo.pdf>)

最終章 全体総括

本研究開発では、ロータス金属を利用した著しく高い冷却性能を有する冷却器の素材連続鋳造工程にIoTを導入し、工程管理、最適化をフィードバックすることで、製造を革新的に効率化、低コスト化した。具体的には、材料組織シミュレーションに基づく製造パラメータデータベースを構築、連続鋳造時にin-situでモニタリングし、さらに検査工程からのフィードバックとも整合させることでヒートシンクの設計・製造を自動で最適化可能な仕組みを構築した。

上記成果は、パワー半導体の冷却市場において破壊的技術革新をもたらす。本製造システムにより、ロータスヒートシンクは安価で大量に生産が可能となる。研究成果を活用した付加価値最大化ヒートシンクを2020年に上市し、その後、大量生産を実証して低コスト化を図る。最終的には安価・高性能なヒートシンクとして市場を大きく占有する。本成果の事業化戦略を図15に示す。当該開発成果は、性能的技術障壁の打破と高性能化コスト削減をベネフィットとし、パワー半導体の発熱密度の上昇という社会課題を解決する。パワーデバイスの小型化・高性能化を通してSociety5.0の実現に寄与する成果である。

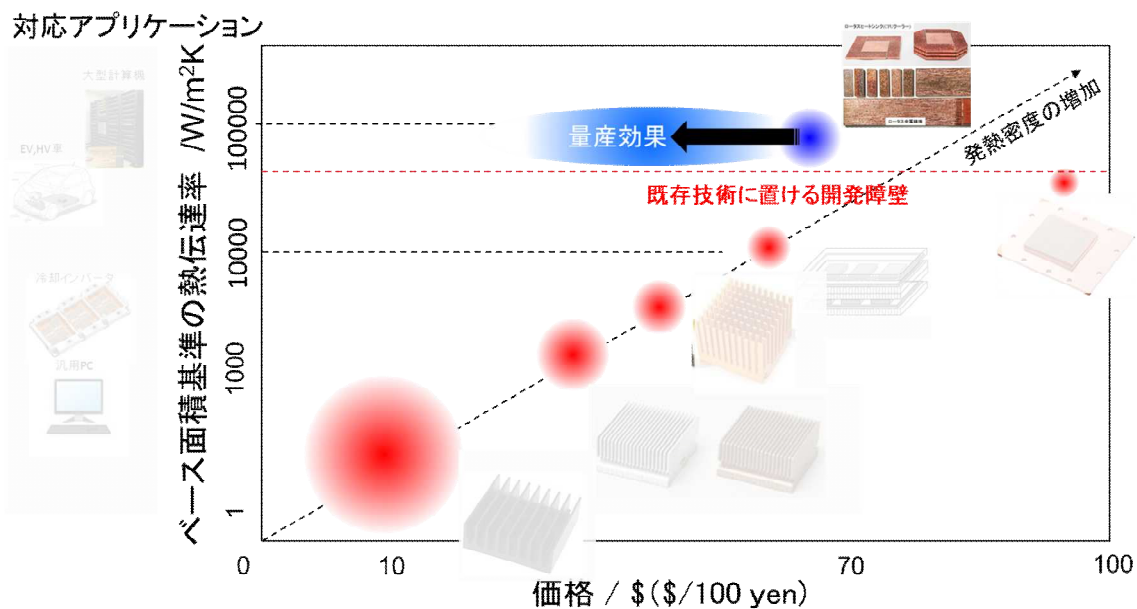


図 15. 本事業成果の事業化戦略