

課題番号：3MF-2202

**研究課題名：ワイヤーハーネス廃線の塩ビ被覆材及び銅線の高度
湿式剥離及びリサイクルの社会実装に向けたパイロットスケール
プロセス設計**

研究代表者：熊谷将吾（東北大学）

体系的番号：JPMEERF20223M02

重点課題：

主：【重点課題⑪】

ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・技術開発

副：【重点課題⑫】

社会構造の変化に対応した持続可能な廃棄物の適性処理の確保に関する研究・技術開発

研究実施期間：2022年度～2024年度

【研究体制】

サブテーマ1

熊谷将吾（東北大学）

石原真吾（東北大学）

大野肇（東北大学）

サブテーマ2

小日向正好（三菱マテリアル）

村岡弘樹（三菱マテリアル）

伊藤祐未（三菱マテリアル）(2022年11月退任)

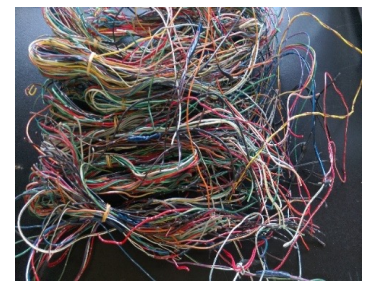
仲家新太郎（三菱マテリアル）(2022年12月参画)

平田洵子（三菱マテリアル）(2022年12月参画)

1.研究背景、研究開発目的及び研究目標 1/2

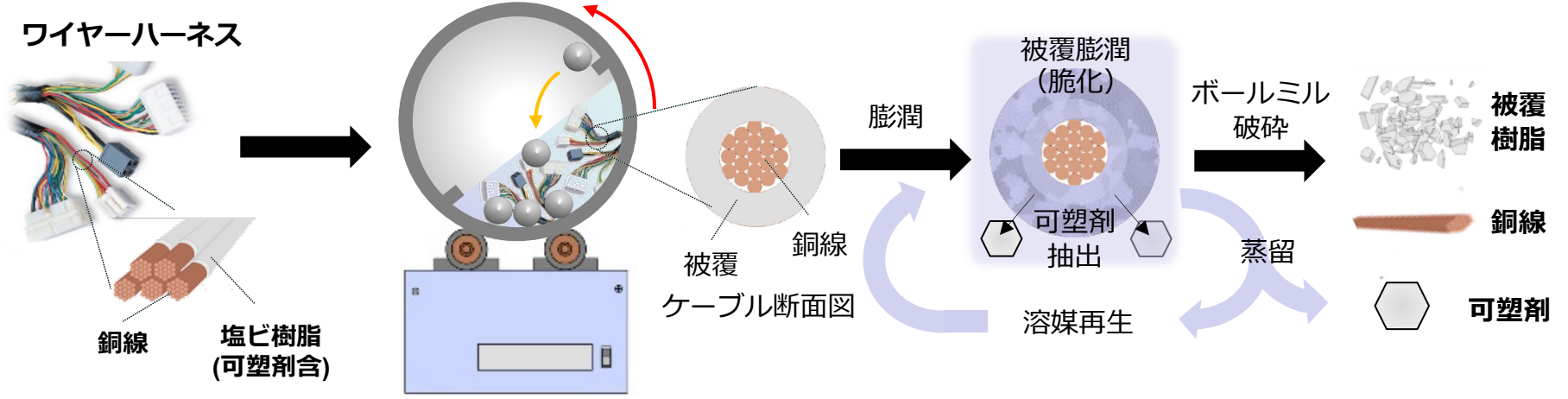
【研究背景】

- 自動車ワイヤーハーネス (WH) は国内廃棄量は銅重量で年間約2万トン^[1]
- 細線は塩化ビニル樹脂 (塩ビ) により銅線が被覆された直径1 mm前後の「細線」で構成
- 非常に細かく破碎する既存のナゲット処理では、銅および被覆材が双方に混入、銅品位低下および塩ビ被覆材リサイクルを妨げている
- 大部分が海外輸出、国内の資源流出が深刻



WH細線

【これまでの研究開発：3RF1901(若手革新枠)】



数十cm以上の長さのWH細線から、被覆材・銅線を100%回収する湿式剥離法を開発ベンチスケールプロセスまでスケールアップすることに成功

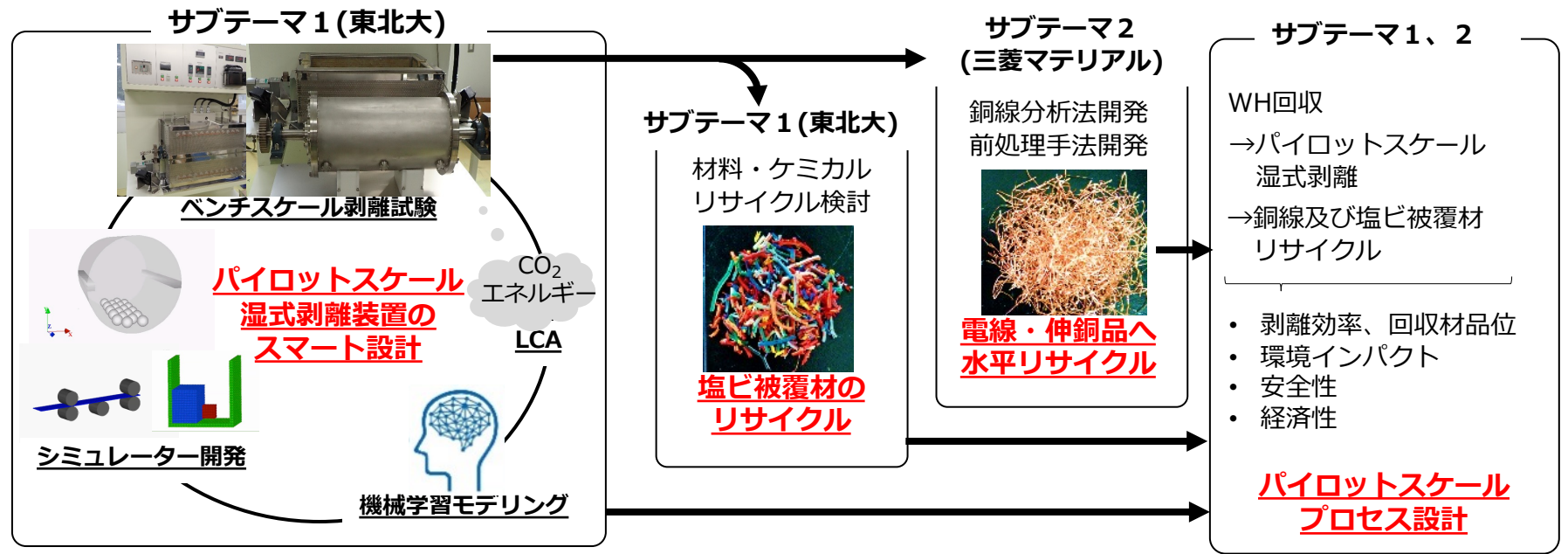
[1]株式会社矢野経済研究所 平成26年度製造基盤技術実態調査(使用済み自動車由来の金属資源循環実態調査事業)報告書、経産省 使用済み自動車解体工程から発生する副産物の3Rシステム調査報告書

1.研究背景、研究開発目的及び研究目標 2/2

【研究開発目的】

- パイロットスケール湿式剥離装置を設計
- 銅線及び塩ビ被覆材のリサイクル技術基盤構築及びリサイクル見通しを策定

【研究開発の全体像】



【研究全体目標】

使用済みWHの回収～湿式剥離処理～回収銅線及び回収塩ビ被覆材のリサイクル、に至るパイロットスケールプロセス全体を、環境インパクト、安全性、及び経済性の観点から多角的に評価し、最適なWH回収量、パイロットスケールリアクター設計、最適剥離条件、回収銅線及び回収塩ビ被覆材に適するリサイクル手法、を提示

2.研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ1） 1/2

サブテーマ1：

パイロットスケール湿式剥離装置設計及び塩ビ被覆材リサイクルの見通し策定

【サブテーマ1の研究目標】

▶ パイロットスケール湿式剥離装置設計

- ・ 既存ベンチスケールリアクター*¹と同等以上の剥離性能*²を有し、かつ現在の処理量の約50倍（WH処理量：25トン/年）に相当するパイロットスケールリアクターを設計(*¹内径26 cm、長さ60 cm、WH処理量：約500 kg/年；*²1時間以内に、長さ数十cm以上のWH廃線を完全剥離)

▶ 塩ビ被覆材リサイクルの見通し策定

- ・ 本技術により回収した塩ビ被覆材の、材料リサイクル・ケミカルリサイクル原料としての材料価値を明らかにする。

【令和4年度研究計画】

- ・ (R4①) ベンチスケール湿式剥離試験：シミュレーター開発、LCA、及び安全性・経済性評価用実測データの取得、銅線及び塩ビ被覆材の回収
- ・ (R4②) シミュレーター開発：ボール及びロッド挙動を再現、衝突エネルギーと剥離率の関係性把握
- ・ (R4③) 塩ビ材料リサイクル：材料リサイクル原料に求められる塩ビ性状の調査、各種剥離条件で回収した塩ビ被覆材の性状評価
- ・ (R4④) 塩ビケミカルリサイクル：各種剥離条件で回収した塩ビ被覆材の乾式・湿式脱塩素試験、脱塩素率を向上する反応条件の探索
- ・ (R4⑤) LCA：既存WHナゲット処理プロセスのLCA

2.研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ1） 2/2

【令和5年度研究計画】

- (R5①) ベンチスケール剥離試験：銅線のリサイクル及び塩ビ被覆材の材料またはケミカルリサイクルに適する剥離条件の探索
- (R5②) シミュレーター開発：衝突エネルギーと剥離率の関係性把握、ケーブル挙動を表現するモデル開発
- (R5③) 塩ビ材料リサイクル：剥離条件と回収塩ビ性状の関係性整理
- (R5④) 塩ビケミカルリサイクル：脱塩素処理した塩ビ被覆材の熱分解による化学原料化試験、脱塩素率と化学原料組成の関係性整理
- (R5⑤) LCA：ベンチスケール剥離試験結果に基づく湿式剥離プロセスのインベントリデータの作成、銅線リサイクル及び塩ビリサイクルのインベントリデータ収集、これらのLCA

【令和6年度研究計画】

- (R6①) パイロットスケール湿式剥離装置設計：ベンチスケール湿式剥離試験の実測値、スケールアップシミュレーション結果、及びLCAに基づき、剥離効率、剥離精度、環境負荷低減効果が最大公約数的に最大化されるパイロットスケール湿式剥離装置を設計
- (R6②) LCA：使用済みWHの回収～湿式剥離処理～回収銅線及び回収塩ビ被覆材のリサイクル、に至るパイロットスケールプロセス全体のLCAを実施

【自己評価】 計画以上の大きな進展がある

2.研究目標の進捗状況

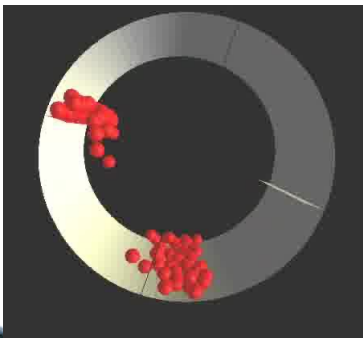
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ1)

【具体的な理由・根拠】

スライド10に示す通り当初計画よりも前倒しで研究開発が進行し、塩ビ被覆樹脂および銅線をほとんど破断せずに剥離する条件を見出し、高品位な塩ビ被覆材と銅線の回収に成功している。さらに衝突エネルギーもシミュレーター開発によって推算可能となった。良好な剥離試験結果が得られたことから、前倒しして実験値をベースとしたLCAを行い、本技術により塩ビ被覆材のリサイクルが可能となれば既存ナゲット処理よりも温室効果ガスの排出量を削減できることがわかった。回収した塩ビ被覆材の混錬試験・物性評価、脱塩素試験も行い、リサイクル性評価も実施した。

【目標達成の見通し】

当初計画通りに進んだ場合の中間評価までの目標達成率は40%だが、現在の目標達成率は60%と自己評価する。残りの1年8ヶ月で、ケーブル拳動および衝突エネルギー・剥離率の関係を評価可能なシミュレーター開発を実施し、目標スケールである25トン/年の装置設計を行う。設計装置の性能を反映したLCAを実施し、既存WH廃線処理プロセスよりも環境負荷が低減されることを確認する。また塩ビリサイクル見通し策定に関しては、関連企業へのヒアリングや試料提供を通じて社会実装を強く意識した見通し策定にもチャレンジしていく方針である。



ボール拳動の実験vsシミュレーター比較



剥離試験後の材料写真

2.研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ2） 1/2

サブテーマ2：

回収銅線評価法及び前処理法の開発による銅線リサイクルの見通し策定

【サブテーマ2の研究目標】

- 本技術により回収した銅線の品位を評価する分析手法を確立する
- 電気銅相当品への水平リサイクル率を最大化するための前処理法を確立する
- 回収後WHからの銅線リサイクルに対する経済合理性評価

【令和4年度研究計画】

- (R4⑥) 回収後銅線の酸分解処理およびICP-OES分析条件の検討
 - (R4⑦) 回収銅線の付着有機物を評価するガス分析法の検討
- ※分析結果の妥当性はサブテーマ1で実施するBS剥離試験結果と比較検証。

2.研究目標の進捗状況

(1) 進捗状況に対する自己評価（サブテーマ2） 2/2

【令和5年度研究計画】

- (R5⑥) 既存銅リサイクルプロセスに及ぼす回収後銅線品位の影響検討
 - (R5⑦) 溶融歩留まりを最大化する回収銅線の塊状化条件の検討
 - (R5⑧) 回収銅線に混入する異種金属前処理法の検討
- ※回収後銅線の品位を最大化するためのWH廃線剥離条件およびその前処理方法はサブテーマ1にもフィードバックし、剥離条件の改善を合わせて検討。

【令和6年度研究計画】

- (R6③) EV車に搭載されるWHのリサイクル性評価（全員）
 - (R6④) 回収後WHからの銅線リサイクルに対する、経済合理性評価（全員）
- ※銅線のリサイクル性評価および銅線リサイクルの経済合理性評価の結果は、サブテーマ1にフィードバックし、WH廃線剥離の最適条件を決定する際の重要因子とする。

【自己評価】 計画以上の大きな進展がある

2.研究目標の進捗状況

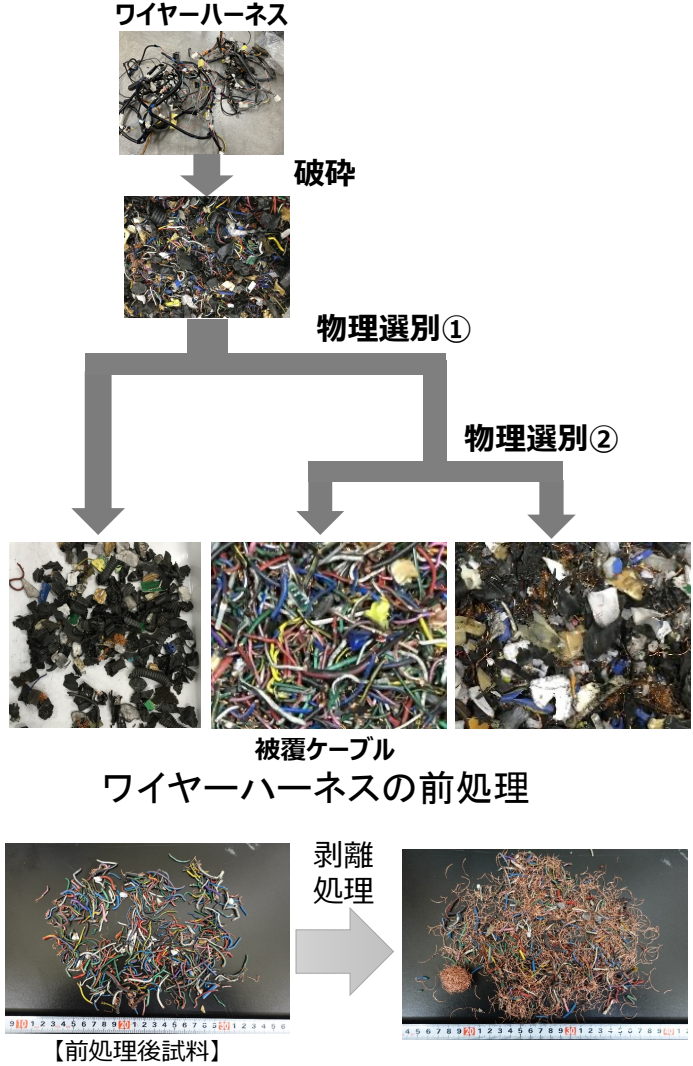
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ2)

【具体的な理由・根拠】

銅線の分析手法を計画通り確立し、サブテーマ1で得られた回収銅線の品質を評価した。回収銅線の分析結果は、銅純度99.9%以上（微量の不純物元素を含む）であり、既存プロセスにおいては、伸銅品（黄銅系製品）原料として利用可能な品質であることを確認した。また、社会実装を視野に入れ、ワイヤーハーネスから被覆ケーブルを取り出す効率的かつ現実的な前処理方法を検討し、提示した破碎・選別フローで被覆ケーブルのみを回収することに成功した。本検討に付随して回収銅線に混入する異種金属前処理法についても前倒して検討開始したとともに、当初計画以上に社会実装を意識したワイヤーハーネスリサイクルプロセスを提案できる道筋を得た。

【目標達成の見通し】

これまで回収銅線の分析手法確立については目標を達成した。前処理手法については、抽出された課題である、剥離不良を引き起こすケーブル形状の改善や回収銅線に混入する端子片等の除去方法を継続検討し、プロセスの最適化を目指す。また、現時点で、既存プロセスにおける銅リサイクルルートは黄銅製品原料としての利用を提示しており、具体性を持って経済合理性評価に臨む予定である。



前処理試料の剥離試験

2. 研究目標の進捗状況

(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ1,2共通)

【当初研究計画および実施実績線表】

●——→ : 当初計画、●----→ : 実施実績

※表中の項目はスライド4,5,7,8の各研究計画項目に対応

	令和4年度		令和5年度		令和6年度
	KO会合(6月)	AD会合(1月)	中間評価(7月)	AD会合(11月)	
サブテーマ1	R4①	●——→	R5①	●——→	
	R4②	●----→	R5②	●——→	
	R4③	●——→	R5③	●——→	
	R4④	●——→	R5④	●——→	
	R4⑤	●——→	R5⑤	●——→	R6②
サブテーマ2	R4⑥	●——→	R5⑥	●——→	
	R4⑦	●----→	R5⑦	●——→	
		●----→	R5⑧	●——→	
サブテーマ1・2合同					R6①
					R6③
					R6④

両サブテーマともに当初研究計画よりも前倒してR5年度検討に着手

3.研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

【行政等が活用することが見込まれる成果】

- 銅線混入を防ぎながら剥離する条件を見出し、塩ビの材料リサイクルやケミカルリサイクルの可能性が見えてきた。
 - 銅品位も現時点の分析精度で99.9%以上を確認できており、黄銅相当品としてのリサイクル可能性が見えてきた。
 - 既存WHナゲット処理プロセスよりも温室効果ガスの排出量削減が期待できる結果をLCAにより見出した。
- 重点課題⑪、行政要請テーマ（3－6）に資する研究成果。
- プラスチック資源循環戦略のマイルストーン「2035年までに使用済みプラスチックを100%リユース・リサイクル等により有効利用」することをマイルストーンに掲げている。これまで実現していなかった塩ビ被覆材の国内リサイクルが実現することは、本マイルストーン達成の一助となる。

- 塩ビ被覆材中にのフタル酸エステル類（改正RoHS指令対象物質）の抽出分離が可能
- 重点課題⑫に資する研究成果。

- 環境産業への活用見通し：自動車、非鉄金属、化学、リサイクル産業等における新しい環境・資源戦略技術、SDGs目標9及び12の達成に貢献する技術。使用済みWHから年間2万トンの黄銅相当品を回収できるとすれば、172億円（銅建値86万円/トン：令和5年7月7日仲間相場）の経済的価値が見込まれる。更に、これまで産業廃棄物として処理費用が発生していた塩ビ被覆材に、材料価値が付与されることで+aの経済的効果も見込まれる。

4.研究成果の発表状況

【誌上発表（査読あり）：1件】

1. Jiaqi Lu*, Mengqi Han, Shogo Kumagai*, Guanghui Li, Toshiaki Yoshioka, “Neural network based prediction of the efficacy of ball milling to separate cable waste materials”, *Communications Engineering*, 2, 27 (2023).

【その他誌上発表（査読なし）：2件】

1. 熊谷将吾*, 吉岡敏明, “化学的手法を用いた難リサイクル性プラスチックの資源化”, 日本包装学会誌, 31, 289-302 (2022).
2. 熊谷将吾*, 吉岡敏明, “金属・プラスチック複合製品のリサイクル-ワイヤーハーネス分離技術を例として-”, 成形加工, 34, 246-249 (2022).

【口頭発表（学会等）：2件】

1. 熊谷将吾, “プラスチックリサイクルの現状とケミカルリサイクルへの期待”, 高分子学会東北支部第49回東北地区若手研究会夏季ゼミナール (2022) **招待講演**
2. Shogo Kumagai, “Recovery of high-purity Cu and PVC from waste wire harness via swelling followed by ball-milling”, 72nd SPSJ Annual Meeting (2023) **招待講演**

【国民との科学・技術対話：2件】

1. 熊谷将吾、塩ビ・環境協会（VEC）の「塩ビと環境のメールマガジンNo.752」にて、インタビュー記事「ワイヤーハーネス電線の被覆材と導電体を分離する湿式剥離法」発信、配信件数約4000件、2023年7月6日発信
2. エコプロ2022 ERCAブースにて出展、「銅線と被覆樹脂をキレイに剥離！銅と樹脂双方のリサイクルに向けて！」、東京ビックサイト、来場者数61,541人、2022年12月7日～9日

【本研究費の成果による受賞：2件】

1. 熊谷将吾、令和4年度文部科学大臣表彰若手科学者賞、文部科学省、2022年4月
2. 熊谷将吾、令和4年度廃棄物資源循環学会奨励賞、一般社団法人廃棄物資源循環学会、2023年5月

5.研究の効率性

【研究体制の工夫】 下記の研究連携図に示すように、研究代表者・分担者・協力者が密に連携する仕組みを設定。産学でコンソーシアム体制を構築し、研究成果の社会実装化を常に念頭に置いている。また、塩ビ工業・環境協会を通じて研究成果を関連企業や団体に発信している。

【課題管理の工夫】 令和4年度は、KO・AD会合を2回、サブテーマ1,2合同の実務者会合を3回実施した他、研究代表者がバインダーとなり各研究者間の連携強化・進捗管理を徹底している。

【研究資金運用の工夫】 東北大学工学部の外部資金係、所属部局会計係、代表者、代表者研究室の秘書の連携により資金を適正管理・運用している。また予算繰越制度を利用し、研究進捗に応じた柔軟な資金運用を行なっている。

【研究開発連携図】