

独立行政法人**科学技術振興機構**
創造科学技術推進事業
追跡評価用資料
(追跡調査報告書)

井上過冷金属プロジェクト(1997～2002)
総括責任者 井上 明久

目 次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. 研究の発展と展開図..... | 2 |
| 3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況..... | 3 |
| 3.1. プロジェクト期間の成果..... | 3 |
| 3.1.1. プロジェクトのねらいと設定されたテーマ | 3 |
| 3.1.2. 金属ガラスの構造解明..... | 4 |
| 3.1.3. 金属ガラスの大きな過冷却度発現の機構解明 | 4 |
| 3.1.4. 金属ガラスの基礎物性解明..... | 4 |
| 3.1.5. 新規合金組成の探索..... | 5 |
| 3.1.6. 金属ガラス作製のための支配因子明確化と新規工業材料としての有用な物性探索.. | 5 |
| 3.2. プロジェクト終了後の継続と発展の状況..... | 5 |
| 3.2.1. プロジェクト終了後の研究のねらいとテーマ..... | 5 |
| 3.2.2. JST・SORST「自己構造・組織創生型過冷金属の応用展開」 | 6 |
| 3.2.3. 文部科学省・特定領域研究「金属ガラスの材料科学」 | 7 |
| 4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果..... | 8 |
| 4.1. 科学技術の進歩に貢献する成果 | 8 |
| 4.1.1. 新領域・潮流の創出..... | 8 |
| 4.1.2. 世界のトップレベルの研究 | 9 |
| 4.2. 社会的、経済的な効果・効用及び波及効果 | 9 |
| 4.2.1. 大学や研究機関などで行なわれているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み..... | 9 |
| 4.2.2. 企業等による社会的、経済的な効果・効用に繋がる取り組み..... | 10 |
| 4.2.3. 企業等において始まっている応用・実用化への取り組み..... | 15 |
| 4.2.4. 「金属ガラス」イノベーションフォーラム | 16 |
| 4.3. 統計資料で見た科学技術へのインパクト | 17 |
| 4.3.1. 代表的論文と被引用件数の年次推移..... | 17 |
| 4.4. 人材育成の面から見た参加研究者の活動状況..... | 25 |
| 4.5. 主な受賞 | 26 |

1. はじめに

有史以来人類が使用してきたいわゆる“バルク”金属は、全て結晶相で構成されていた。これは、金属融体は融点以下に冷却された過冷却状態では不安定となり、ただちに安定な結晶状態に移移するという特性によるものであった。

一方、1960年にAu-Si合金を 10^6 K/s以上の超急冷速度で冷却することにより、過冷却液体から結晶固体への変態が抑制され、非晶構造を保持したアモルファス金属が得られることが見出された。その後、超急冷技術の発展とともに、アモルファス状態で固化する合金系も増え、アモルファス金属の構造や物性に関する基礎的な知見も蓄積されていった。その結果、アモルファス金属の高強度、高耐食性、軟磁性などの優れた特性とともに金属材料をアモルファス化することへの関心が高まっていった。

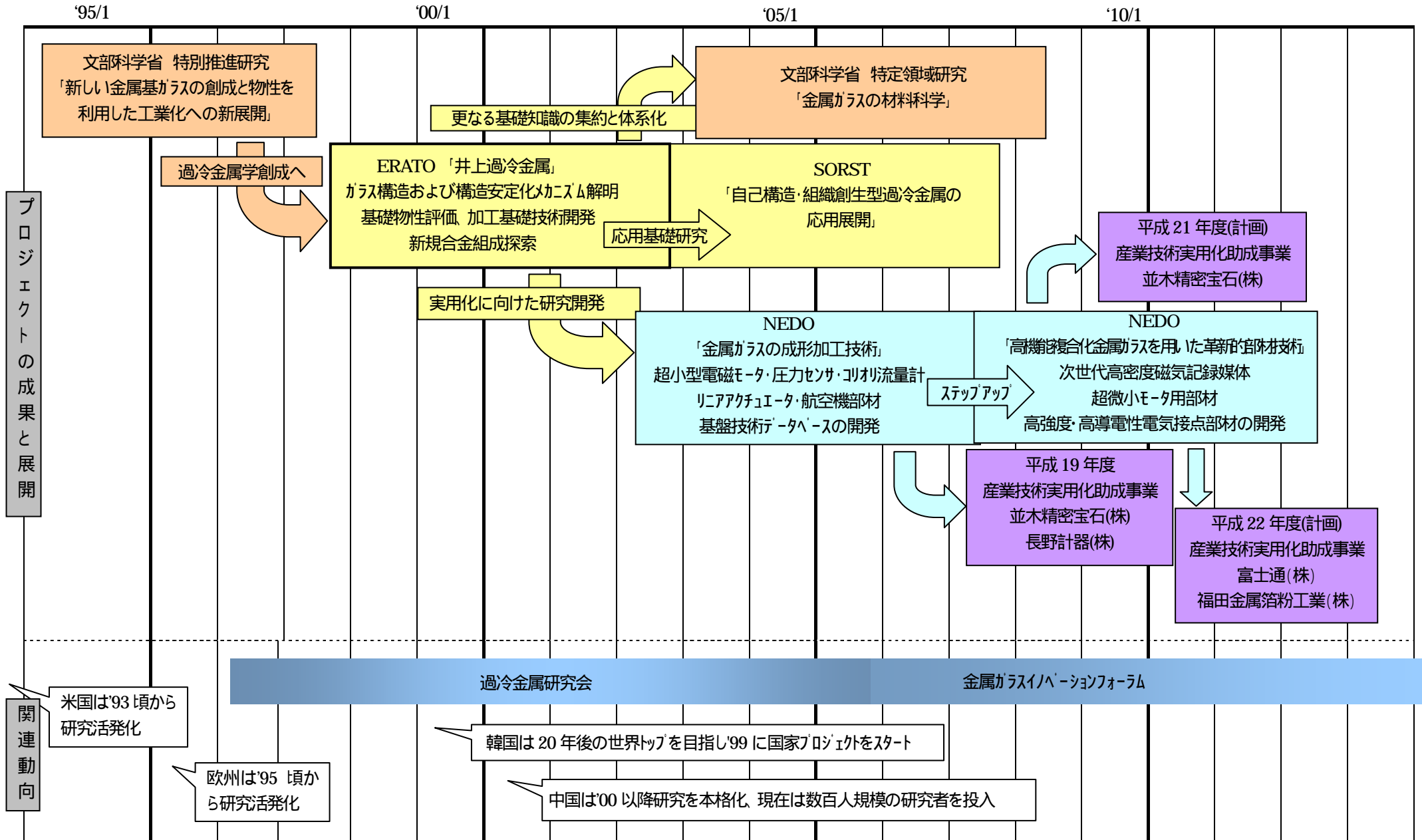
しかしながら、その後見出されたアモルファス合金は、約 10^5 K/s以上の超急冷速度を必要とし、そのため得られる材料の厚さは通常 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 以下の箔や粉末に限られており、この材料形状の制約が一部の用途を除いてアモルファス合金の工業材料としての発展を妨げていた。

以上から、ゆっくり冷却した場合でも過冷却状態が安定して存在し、結晶変態を起こすことなく非晶状態のままに固化する合金系の探索が活発に行なわれた。1988年以降、井上らはMg系、Ln系、Zr系合金等において、ある特定の成分をもった3元系以上の多成分合金が徐冷しても結晶化せずガラス状態で固化することを見出した。このことは、特定の合金系では、過冷却状態が安定して存在しバルク形状の金属ガラスが創生できることを示しており、「過冷金属」という全く新しい材料(バルク金属ガラスあるいは金属ガラスとも記す)が誕生したことを意味していた。

過冷金属は従来にはなかった全く新しい材料として、過冷構造の解析、物性の解明、相変態の研究等の学術用材料だけではなく、新規の工業材料として活用できる可能性を秘めており、基礎科学から材料工学にまたがる「過冷金属学」というべき新しい学問分野の創生が期待され、そのような背景から本プロジェクトが命名され遂行された。

2. 研究の発展と展開図

井上過冷金属プロジェクト 展開図



3. プロジェクトの研究成果と継続・発展の状況

3.1. プロジェクト期間の成果

3.1.1. プロジェクトのねらいと設定されたテーマ

本プロジェクトの総括責任者であった井上らは、1988年以降、Mg系、Ln系、Zr系等の3元系以上の多成分合金の中で徐冷しても結晶化せずガラス状態で固化するものがあることを世界に先駆けて見出した。このことは「過冷金属」という全く新しい材料(金属ガラス)の誕生を告げるものであったが、当時は井上等の金属ガラスについての論文は学術的にも、国際的にもほとんど注目されていなかった。

その後、米国で金属ガラスに関する論文が1993年ごろからようやく出始め、1993年に開かれた国際シンポジウム「RQ 仙台」(8th Rapidly Quenched and Metastable Materials)では、従来から知られていた超急冷法により得られるアモルファス金属に加えて、金属ガラスがテーマとして本格的に取り上げられるようになった。金属ガラスは従来にはなかった全く新しい材料として、過冷構造の解析等の研究用材料だけでなく、新規の工業材料として活用できるとの期待があったためである。

以上の背景から、金属ガラスのガラス形成能、臨界冷却速度、連続冷却変態曲線、結晶化挙動、金型鑄造法、一方向凝固法等について基礎研究を行なうため、文部科学省の特別推進研究「新しい金属基ガラスの創製と物性を利用した工業材料への新展開」(1994~1997、研究代表者:井上明久)が推進された。

一方、井上は、大きな過冷却状態を安定して示す金属ガラスに共通する3経験則、すなわち

- ・3成分以上の元素を含む多成分系であること
- ・主要3成分の原子寸法差が12%以上であること
- ・主要3成分は負の混合熱を有していること

を1995~1998年にかけて提唱していたが、あくまでも経験則であり、その理論的裏付けは得られていなかった。

以上の経緯から、本プロジェクトは、過冷金属の安定性の限界とその結晶化の原因を探求し、新たな物質科学の創出と新規機能を持った金属材料の創製をねらいとして実施された。具体的な研究テーマとしては、

金属ガラスの構造解明

金属ガラスの大きな過冷却度発現の機構解明

金属ガラスの基礎物性解明

新規合金組成の探索

金属ガラス作製のための支配因子の明確化と新規工業材料としての有用な物性探索

を掲げて研究が推進された。各テーマについてその成果の概要を以下に記す。

3.1.2. 金属ガラスの構造解明

X線解析により、金属ガラスの基本構造として次の2種類の存在を明らかにした。

Fe系金属ガラスにおける三角プリズムが連なったランダムネットワーク構造
Zr系金属ガラスにおける正20面体準結晶類似の20面体クラスタ構造

また、透過型電子顕微鏡観察およびナノビーム電子線解析により、Zr系金属ガラスにおける初期析出相の構造を解析し、正20面体準結晶構造を確認した。その後、これらの構造モデルは、金属ガラスの構造モデルとして世界標準になった。

3.1.3. 金属ガラスの大きな過冷却度発現の機構解明

上述の金属ガラスにおけるランダムネットワーク構造あるいは正20面体準結晶類似の20面体クラスタ構造は、構成する原子が稠密に充填された準安定的な構造をしており、より安定な結晶構造への原子の再配列が困難なためガラス状態のまま安定化することを明らかにした。

3.1.2.で述べた三角プリズムのランダムネットワーク構造や20面体クラスタ構造のように、原子が稠密に充填された準安定な構造を形成することにより過冷却液体が安定化するという機構は、多元合金であること、原子サイズに大きな差があること、原子間の結合が強いことという3経験則とよく対応していることを明らかにした。

3.1.4. 金属ガラスの基礎物性解明

金属ガラスが過冷却状態でも安定であることを利用し、高純度Pを用いたPd₄₀Cu₃₀Ni₁₀P₂₀についてT_mからT_gまでの全温度域で過冷却液体の比熱を実測し、過冷却液体から結晶へのエンタルピー、エントロピー、自由エネルギー変化の温度依存性を明らかにした。この結果、Pd-Cu-Ni-P金属ガラスが金属物質中で最大のガラス形成能を示す主原因は自由エネルギー変化が小さいことにあることを実証した。また、ノーズ温度近傍における結晶相の析出形態、固/液界面の成長速度をレーザ顕微鏡により金属材料としては世界で初めて実測した。

力学的特性に関しては、金属ガラスのヤング率と引張強度の比が、従来の金属材料とは画然と異なり小さいことを明らかにした。また、ナノ準結晶を70~80%析出させ周囲がガラス相として残存する複相材はガラス単相材に比べて高強度(20%向上)、高延性(1桁以上向上)であることを見出した。

磁気特性に関しては、Fe₇₀Co₁₀B₂₀合金に3~4at%のNdを添加した系において、ナノ結晶を析出させることにより、残留磁化1.35T、保磁力227kA/m、最大エネルギー積110kJ/m³の優れた永久磁石特性を示すことを明らかにした。

その他、金属ガラスはガラス転移温度 (T_g) 以上で粘性流動挙動を示すことや、結晶化による密度の増大は 0.3 ~ 0.4 % であり従来の超急冷アモルファス金属の 1/4 ~ 1/8 程度と極めて小さいことを明らかにした。

3.1.5. 新規合金組成の探索

金属ガラスの安定性に不純物が大きく影響することを明らかにし、この知見および金属ガラス生成の 3 経験則をもとに、新規な Fe 基、Co 基、Ni 基、Cu 基、Ca 基、Mg 基等の金属ガラスを発見した。

3.1.6. 金属ガラス作製のための支配因子明確化と新規工業材料としての有用な物性探索

金属ガラスを安定して作製するための支配因子として、構成金属の純度、フラックス処理条件、ガス雰囲気などの要因に加えて、過冷却度の影響などを明らかにした。また、ナノ結晶あるいはナノ準結晶がガラス相に分散して存在する複相系金属ガラスの作製条件(熱処理・加工条件等)を明確にした。

工業的に有用と期待される物性として、Fe 基金属ガラスの磁気特性や耐食性、Mg 基合金の低ヤング率、金属ガラスの粘性流動挙動および低体積収縮率を生かした超微細転写加工性などを見出した。

3.2. プロジェクト終了後の継続と発展の状況

3.2.1. プロジェクト終了後の研究のねらいとテーマ

本プロジェクトでは 3.1.1. で述べたように、金属ガラスの構造、構造安定化機構および基礎物性の解明、金属ガラス作製条件の明確化ならびに工業的に有用と期待される物性の探索を行なったが、それらの成果を踏まえて、新規合金系および新規成形加工プロセスの開発、有用な工業材料(永久磁石材料・光ディスク材料・軟磁性広幅板材等)への応用の可能性をさぐることをねらいに下記の研究プロジェクトに展開されている。

(独) 科学技術振興機構(以下 JST)の戦略的創造研究推進事業における発展研究(以下 SORST, Solution-Oriented Research for Science and Technology)「自己構造・組織創成型過冷金属の応用展開」(2002 年 10 月 ~ 2007 年 9 月、研究代表者: 井上明久)

また、金属ガラスの究極の相安定化機構および金属ガラスの変形・破壊メカニクスを解明し、金属ガラスに関する総合的基礎知識を集約・体系化することにより「金属

ガラスの材料科学」という新しい学問領域を確立することをねらいに下記の研究プロジェクトに発展している。

文部科学省・特定領域研究「金属ガラスの材料科学」(2003～2008年度、領域代表者：井上明久)

これらの研究についてその概要を以下に記す。

3.2.2. JST・SORST「自己構造・組織創生型過冷金属の応用展開」

(1) 新バルク金属ガラスの創成

Cu-Zr系において、高延性を示すナノ結晶分散バルク金属ガラスが生成することを世界に先駆けて発見し、延性の程度は圧縮試験では破壊しなくなってしまうほど高く、その超高延性の新機構を提唱した。

Fe-Pt系合金は、これまで超急冷法を用いてもアモルファス相は得られなかったが、3経験則を適用することにより、アモルファス相の生成に成功した。また、この合金系は加熱によるナノ結晶化で極めて大きな保磁力を示すハード磁石特性を示すことを見出し、生体用磁石材料としての応用の可能性を見出した。

(2) 磁性材料開発

高圧水アトマイズ法の適用により、新しいFe基およびCo基の金属ガラス粉末を大量に作製できることを明らかにした。また、そのガラス合金粉末を放電プラズマ焼結加工することにより、真密度をもったバルク金属ガラスコア材への成型が可能であることを明らかにした。さらに、これらのコア材は優れた軟磁性を有することが判明した。

この成果に基づいて、Fe基軟磁性コア材料の生体深部磁気刺激装置への事業展開を行うことを目的として、東北大発ベンチャー企業を2005年4月1日に発足させた。

(3) 強靭性材料開発

Ti-FeやTi-Fe-Co基などに、 α -Ti+Ti₂FeやTi₂(Fe,Co)化合物などのナノ結晶、デンドライト相を分散させることにより、高強度と高延性が同時に発現することを見出した。この研究により、新しいタイプの高強度・高剛性Ti基合金の開発につながると期待されている。

(4) ナノ加工法の開発

Zr系やCo系のバルク金属ガラスにおいて、
・過冷却液体域において、最小50nmのナノインプリント加工、転写加工が行えるこ

と

- ・金属ガラスが 100-500 nm の微細加工が可能な~~な~~鑄型として使用できること
- ・収束イオンビームを用いて最小 12 nm 幅の鑄型を作成できること

を明らかにした。その後さらなる高効率微細加工法の開発を行なった。これらの知見は、今後超精密転写加工の有用なノウハウとなると期待されている。

(5) 金属ガラスの応用展開

Mg 系および Pd-Ni 系のガラス相などの非平衡相がアルカリ水溶液中の溶存水素濃度の高感度検出センサとして極めて優れていることを見出した。

(6) 金型精密鑄造法の開発

合金液体の金型精密鑄造法により、Zr 基や Ni 基ガラス合金の大面積平板材や最終形状の圧力センサ素子を高効率・高信頼性で作製する新しいプロセスを開発した。また平板材を過冷却液体域での粘性流動加工法により、結晶化させることなく、様々な2次形状材に加工できることを明らかにした。

3.2.3. 文部科学省・特定領域研究「金属ガラスの材料科学」

本領域研究においては、金属ガラスの究極の相安定化機構の解明と金属ガラスの変形・破壊メカニクスの解明という2つの課題を研究連携のための重点研究課題に設定し、様々な分野の研究者を迎え入れるとともに、新金属材料としての将来展開のため、基礎知識を総合的に集約・体系化し「金属ガラスの材料科学」という新しい学問領域の確立を目指して研究が推進されている。

研究体制として A01 から A05 の 5 班を編成し、それぞれの班の研究テーマ、研究目標は次のとおり設定されている。

A01 班

- ・研究テーマ: 金属ガラス最適化プロセス
- ・研究目標: 新規材料としての金属ガラス組成・プロセス最適化のための知的基盤を確立する。

A02 班

- ・研究テーマ: 金属ガラスの構造・物性
- ・研究目標: 金属ガラスの原子配列と電子構造を解析し金属ガラスの相安定化機構を解明する。

A03 班

- ・研究テーマ: 金属ガラスのマルチスケールモデリングと物性予測
- ・研究目標: 金属ガラスの構成要素(電子/原子/短距離クラスター構造)相互作用場の階層性モデリング(マルチスケールモデリング)を行い、構造変形・相安定

性・ナノ組織形成を予測する。

A04 班

・研究テーマ: 金属ガラスの変形・破壊のメカニクス

・研究目標: 金属ガラスの変形と破壊の統一的メカニクスを確立する。

A05 班

・研究テーマ: 金属ガラスの結晶化・ナノ組織形成

・研究目標: 金属ガラスの相分離・結晶化・準結晶化によるナノ組織形成を探求し、相変態の立場から金属ガラス安定化機構を解明する。

具体的な研究活動として、2003～2007年度において、研究会が計40回開催され、計406件の研究発表が行なわれた。このうち、A03班の研究に関連し2006年7月に国際会議（THERMEC 2006、International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials）のセッション（Metallic Glasses/Bulk Metallic Amorphous Materials）がカナダで行なわれた。この国際会議では、A03班の計画研究代表者の渋谷陽二（大阪大学大学院工学研究科教授）が議長の1人となり、領域代表者の井上明久（東北大学総長）が基調講演を行い、基調講演3件を含めて計47件の発表が行なわれた。

また、第5回バルク金属ガラス国際会議（International Conference on Bulk Metallic Glasses, BMG-V）が、領域代表者である井上明久（東北大総長）が主催し、2000年シンガポール、2002年台湾、2003年中国、2005年米国に続き、2006年に日本で開催された。本会議には、日本を含む米国、中国、韓国、台湾、英国、フランス、ブラジルなど12カ国から191名が参加し、日本人7名を含む31名の研究者による招待講演と26名の一般講演の57件の口頭発表に加え、123件のポスター発表が行われた。

4. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

4.1. 科学技術の進歩に貢献する成果

4.1.1. 新領域・潮流の創出

井上らによる徐冷しても非晶状態のまま固化しガラス状態になる合金組成の発見で、従来知られていたアモルファス金属に比べてはるかに厚いバルク状金属ガラスが容易に作製できるようになったことは、材料科学的にも画期的でありエポックメイキングな発見として世界に誇れるものであった。

上記発見は、本プロジェクトに先立って得られていたが、本プロジェクトにより、それらの金属ガラスの構造および過冷却状態の安定化メカニズムが解明され、その後の「過冷金属学」という新しい材料科学の源流となった。

本プロジェクトで明らかになった Fe 系金属ガラスにおける三角プリズムが連なったランダムネットワーク構造および Zr 系金属ガラスにおける正 20 面体準結晶類似の 20 面体クラスタ構造は、その後の研究における金属ガラスの構造の世界基準となった。井上らにより提唱されていた金属ガラス発現のための 3 経験則は、本プロジェクトにより、その理論的根拠が明確になり、その後の新規金属ガラス探索およびその研究の方向を決めるガイドラインとして定着した。

また、本プロジェクトにより、金属ガラスは、強度が高い、耐食性に優れる、優れた磁気特性が期待できる、ヤング率が低い(通常金属の 1/3 程度)、転写性が良いなどの特徴が明らかにされ、これらの物性を生かした工学的応用への道を拓き、本プロジェクトで得られた基礎科学的知見は実用化のための研究開発の基盤となった。

4.1.2. 世界のトップレベルの研究

金属ガラスの分野で日本は、1988 年以降、材料創製および基礎的研究で世界をリードしており、新しく創製された金属ガラスは数百種を超える。海外で、特定の組成の材料が単発的に見出されることはあるが、全体として見れば日本は基礎研究、実用化研究いずれも世界トップレベルである(4.3.参照)

米国の金属ガラスの研究は、日本の研究に触発され、1993 年以降論文発表が目立つようになり、米国の国策的研究課題として、NASA(アメリカ国立航空宇宙局、National Aeronautics and Space Administration)、DARPA(アメリカ国防高等研究計画局、Defense Advanced Research Projects Agency)、U.S.ARMY(アメリカ陸軍、United States Army)等で長期的な視野での研究が行なわれている。特許出願に関しては、専属の弁理士により日本の特許を徹底的に解析し、その抜けているところを巧みに出願してくるという特徴がある。

欧州は、独・英・仏が 1995 年以降研究開発を開始している。独・英は機械的性質や熱物性中心、仏は構造解析を中心にした研究を行なっている。

韓国は、日米欧の研究成果に触発され、1999 年以降研究開発を開始した。20 年間で世界トップを目指すという方針の下に、現在、金属ガラスに関する 8 年プロジェクト(基礎研究)をスタートさせており、その成果を踏まえて 12 年プロジェクト(実用化研究)に展開する計画である。金属ガラス製携帯電話ケースのベンチャー企業が設立されている。

中国は、2000 年以降に研究を開始した。研究者数は 2007 年現在、数百人規模に急増しており、複数の大学で国家プロジェクトが発足している。

4.2. 社会的、経済的な効果・効用及び波及効果

4.2.1. 大学や研究機関などで行なわれているプロジェクト成果の応用に向けた取り組み

3.1.で述べた本プロジェクトの成果を踏まえて、新規合金系および新規成形加工

プロセスの開発、有用な工業材料(永久磁石材料・光ディスク材料・軟磁性広幅板材等)への応用の可能性をさぐることをねらい、下記の研究プロジェクトに展開された。その内容の詳細は3.2.2.に記したとおりである。

・JST の戦略的創造研究推進事業における発展研究(SORST、Solution-Oriented Research for Science and Technology)「自己構造・組織創成型過冷金属の応用展開」(2002年10月～2007年9月、研究代表者:井上明久)

4.2.2. 企業等による社会的、経済的な効果・効用に繋がる取り組み

金属ガラスは全く新しい材料として今後様々な応用が広がると期待されている。その応用分野について、本プロジェクトや後続の研究において明らかになった金属ガラスの特徴と、期待される応用分野を整理すると表1のようになる。

表 1 金属ガラスの特徴とその応用分野

| 金属ガラスの特徴 | | 応用分野 |
|----------|--------------------|--|
| 力学的性質 | 高強度 耐摩耗性 高靱性 | 医療用超微小モータ(内視鏡、カテーテル)、ロボット用小型モータ、航空機燃料タンク部品、高強度電気接点部材 |
| | 低弾性率 | 圧力センサ、コリオリ流量計、スプリング、人工骨 |
| 物理的性質 | 磁気特性 | 軟磁性材料、永久磁石、リニアアクチュエータ、位置センサ、電磁バルブ、電波受信センサ、生体深部磁気刺激装置 |
| | 転写加工性 | 超高密度磁気記録材料 |
| 化学的性質 | 耐食性 | 燃料電池セパレータ、水素濃度検出用センサ |

以上のような実用化への期待から、並木精密宝石(株)は、弘前大学の指導を得て、2006年度のJSTの産学共同シーズイノベーション化事業(顕在化ステージ)として、「Fe-Ga(Galfenol)系合金を用いた磁歪リング式トルクセンサシステムの開発」に着手し、2007年度に、同事業の育成ステージとして、「ステア・パイ・ワイヤ用 FeGa (Galfenol)力センサの開発)」を実施した。

また、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下 NEDO、New Energy and Industrial Technology Development Organization)は、ナノテクノロジー・材料技術分野の革新的部材産業創出プログラムとして以下の2つの研究開発プログラムを支援・実施している。

「金属ガラスの成形加工技術」(2002～2006年度、プロジェクトリーダー:井上明久、東北大学金属材料研究所 所長)

および、それに引続いて

「高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発」(2007～2011年度、プロジェクトリーダー：井上明久、東北大学総長)

これらの研究開発のうち は、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(以下 RIMCOF、R&D Institute of Metals and Composites for Future Industries)、(独)産業技術総合研究所(以下 AIST、National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)および参加企業への委託事業として実施され、 は RIMCOF および参加企業への委託および助成事業として実施される。NEDO が実施したこれらの研究開発の概要を以下に記す。

(1) NEDO「金属ガラスの成形加工技術」

本研究開発は、ガラス化し易く優れた特性が発揮できる金属ガラス材料の合金探索と、得られた金属ガラス材料を部品にするための成形加工法確立の両面から研究し、実用化を念頭に置いた基盤技術の体系化を図るため実施された。

具体的には、内視鏡やカテーテルなどの医療機器他に用いられる直径が 1.5 mm の世界最小のマイクロギヤードモータ、次世代の直噴式低燃費エンジン等に搭載可能な直径が 2.5 mm の世界最小の高性能圧力センサ、超高感度な流量計部品、航空機部品や自動車用スプリングなどの輸送機器構造部材の試作とその性能評価他が行なわれた。以下に、個別の開発テーマおよびその研究成果の概要を記す。

超精密部材

ギヤードモータに用いられる複雑な 3 次元形状のマイクロギアを、金属ガラスを用いて射出成形法で作製することにより、外径 1.5 mm の世界最小のマイクロギヤードモータの開発に成功した。金属ガラスの優れた高強度、耐摩耗性により、従来の鋼製ギヤに比べて 300 倍以上の高耐久性を実現し、中間評価の結果を踏まえてあらためて目標値を高く設定しなおした開発項目も含めて、全ての開発目標を達成した(RIMCOF、YKK(株)、並木精密宝石(株))。開発されたマイクロギヤードモータを図 1 に示した。



図 1 世界最小のマイクロギヤードモータ

(<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p02014/p02014.html> より引用)

この「金属ガラス成形加工技術」プロジェクトにおける超精密部材の開発は、後述する圧力センサの開発とともに、第4回産学連携功労者表彰(2006年度)において、内閣総理大臣賞を受賞した。受賞テーマおよび受賞者は次のとおりであった。

・受賞テーマ:革新的金属材料「金属ガラス」を用いた産業用小型・高性能デバイスの開発

・受賞者:井上明久(東北大学教授 金属材料研究所長)
若菜和夫(並木精密宝石(株)法務グループ マネージャー)
長坂宏(長野計器(株)AMセンサ技術部 次長)

本成果に基づき、並木精密宝石(株)は、NEDOの産業技術実用化開発助成事業の認定を受け、2007年4月～2009年3月の予定で「金属ガラスを用いたマイクロギヤードモータの実用化開発」を推進している(4.2.3.(1)参照)

また、本プロジェクトで製作した試作品の市場評価で明らかになった市場ニーズにこたえるため、さらにステップアップした目標である外径1.0mm以下の超微小モータの開発を目指して、NEDOの「高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発」(4.2.2.(2)参照)に引き継がれている。

輸送機器構造部材・航空機部材(スラットトラックカバー)

金属ガラスを、比強度に優れた大型の航空機部品へ適用する可能性を明らかにするため、スラットトラックカバーを模擬部品に設定し、原料の大型板材の製造、粘性流動による成形技術、成形した部材の接合技術の開発が行われた。

その結果、双ロール鋳造装置開発による大型板材の作製(RIMCOF、(株)神戸製鋼所)、粘性流動成形方法の開発(RIMCOF、富士重工業(株))、レーザー溶接による接合技術開発(RIMCOF、(株)日立製作所)が行なわれ、Ti合金に比べて、強度を1.5倍に上昇させること、成形コストを1/3に低減させることが可能であることを実証し開発目標を達成した。

輸送機器構造部材・スプリング部材の開発

自動車エンジンバルブスプリングを想定し、金属ガラスの直径2mmの線材を自動コイルリング装置により、高強度・低弾性率のスプリングを試作した。これによりスプリングの高さを低くすることが可能で、その波及効果としてエンジンのコンパクト化、軽量化が期待できることを実証した(RIMCOF、日本素材(株))。

計測機器機能部材・圧力センサ

金属ガラスの成形性、高疲労強度、低弾性率等の優れた特性を生かし自動車等で使用可能な小型圧力センサの開発を実施し、設定した開発目標(カッコ内に記載)を全て達成した。(RIMCOF、(株)青山製作所、長野計器(株))。

・合金探索:冷却速度 300 /sでガラス化可能 (300 /s)

- | | |
|-------------------------|------------------|
| 引張強度 2700 MPa(Ni 基) | (2000 MPa 以上) |
| ヤング率 100 GPa(Zr 基) | (100 GPa 以下) |
| ・成形技術:工定数 19 6 工程 | (工程数従来の 1/3 以下) |
| 表面粗さ 0.16 μmRy 以下 | (0.5 μmRy 以下) |
| ・低温製膜技術:エキシマレーザーアニール法開発 | (金属ガラスの特性維持すること) |
| ・製品設計:重量 1/10 以下 | (重量 1/2 以下) |
| ・性能評価:感度 3.8 倍 | (感度 3 倍) |

この開発で、外径 2.5 mm のダイヤフラム型世界最小圧力センサを試作し、量産品と同等の 1,000 万回の動圧耐久性を確認するとともに、準量産体制を確立した。開発された圧力センサを図 2 に示した。



図 2 世界最小のダイヤフラム型圧力センサ

(<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p02014/p02014.html> より引用)

この「金属ガラス成形加工技術」プロジェクトにおける圧力センサの開発は、前述の超精密部材の開発とともに、第 4 回産学連携功労者表彰(2006 年度)において、内閣総理大臣賞を受賞した。受賞テーマおよび受賞者は次のとおりであった。

- ・受賞テーマ:革新的金属材料「金属ガラス」を用いた産業用小型・高性能デバイスの開発
- ・受賞者:井上明久(東北大学教授 金属材料研究所長)
長坂宏(長野計器(株)AM センサ技術部 次長)
若菜和夫(並木精密宝石(株)法務グループ マネージャー)

本成果に基づき、長野計器(株)は、NEDO の産業技術実用化開発助成事業の認定を受け、2007 年 4 月～2009 年 3 月の予定で「金属ガラス合金製高精度圧力センサの実用化開発」を推進している。(4.2.3.(2)参照)

計測機器機能部材・コリオリ流量計

金属ガラスの低弾性率、耐腐食性等を活用することにより、高感度のコリオリ流量計が実現できると考えられその開発が実施された。その結果、パイプ外径:2.00 ± 0.03 mm、パイプ肉厚:0.075 ± 0.03 mm の高精度極薄肉金属ガラスパイプの作製に成功し、このパイプを用いた流量計により従来のステンレス製パイプに比べて 53 倍の

感度が得られることを実証した(RIMCOF、(株)真壁技研、東京計装(株))。

計測機器機能部材・リニアアクチュエータ

金属ガラスの磁気特性を活用し、リニアアクチュエータの試作が行われた。その結果、位置決め精度 5 nm 以下という目標を達成した。また、それ以外の用途として、位置センサ、電磁バルブ、電波受信センサとしての用途開拓が実施された(RIMCOF、NEC トーキン(株))。

金属ガラスの新創製プロセス

電磁振動により結晶化を抑制し安定して金属ガラスを製造するプロセスを開発し、連続製造装置により 2 mm、250 mmL の金属ガラス棒の作製に成功し、開発目標を達成した(AIST)

知識・基盤技術の整備

RIMCOF は、合金組成とガラス形成能の相関、ナノ構造・ナノ組織と材料物性あるいは製品特性の関連付けなど得られた知識を体系化し、新たな金属材料創製の効率化および設計者・研究者の情報共有化のためデータベースを整備し公開した。国費を使って得られた成果がむやみに流出するのを避けるため、データベースにアクセスできるのは、ID を登録したユーザに限られる。現在 120 名程度登録されており、日本の企業、大学の研究者を中心に活用されている。

(2) NEDO「高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発」

(1)で述べた「金属ガラスの成形加工技術」においては、金属ガラスの单相合金により実用化のための研究開発が進められ、その結果、世界トップレベルの製品の実現に目途がつけられてきた。しかし、産業界からは、従来の金属ガラスの諸特性に加え、塑性加工性や硬磁気特性あるいは高電気伝導性等を兼ね備えることができれば、さらに革新的な製品開発が可能になるとの強い要望が出されている。

一方、最近の先導研究の結果、金属ガラス母相中に第二相として微結晶や微粒子または微小空隙等を分散させた複合化金属ガラスが、大きな塑性加工性、硬磁気特性あるいは高い電気伝導性等を示すことが明らかとなってきた。このような複合化金属ガラスの創製と特性制御により、従来の金属ガラス单相合金ではなしえなかった新規用途が拓けると期待され、本研究開発が実施されることになった(2007～2011 年度)。

本研究開発は、産学の科学的、技術的ポテンシャルを結集して、共通基盤技術(水平)の上に複数の実用化技術(垂直)の展開を図るというこれまでにない新しいスタイルで推進されることになった。共通基盤技術の開発は委託事業として、実用化技術の開発は助成事業として実施されることになっている。具体的な研究開発テーマとして、

硬磁性・ナノ構造部材技術とその成果を利用した次世代高密度磁気記録媒体の開発

高強度・超々精密部材技術とその成果を利用した超微小モータ用部材の開発

高強度・高導電性部材技術とその成果を利用した高強度・高導電性電気接点部材の開発

が計画されている。その概要を以下に記す。

硬磁性・ナノ構造部材技術とその成果を利用した次世代高密度磁気記録媒体の開発

金属ガラス母相の一部結晶化やスパッタリングによる複合化で硬磁気特性を付与し、かつ優れた粘性流動加工性を有する複合化金属ガラスの創製を行う。また、金属ガラスの粘性流動加工性を利用してこれを被転写材として用い、別途開発する超微細パターンの金型により、直接ナノインプリントすることで高密度かつ高精度のナノパターンを形成するための基盤技術開発を行う。これらの成果を基に、記録密度が1平方インチ当り2テラビットの超高密度磁気記録媒体を開発する。実用化開発助成事業は、富士通(株)が担当し、2010年度に立ち上げる計画である。

高強度・超々精密部材技術とその成果を利用した超微小モータ用部材の開発

金属ガラス母相中に微細な結晶粒子を析出分散させることで塑性変形能を付与した複合化金属ガラスの創製を行う。また、この複合化金属ガラスの塑性変形能を利用し、超精密プレスによる超々精密ギヤ等の成形技術を開発する。これらの成果を基に、現状の世界最小ギヤードモータに比し、ギヤの大きさが1/2で、モータ全体の体積を1/3以下にした、直径0.9mmの超微小モータを開発する。実用化開発助成事業は、並木精密宝石(株)が担当し、2009年度に立ち上げる計画である。

高強度・高導電性部材技術とその成果を利用した高強度・高導電性電気接点部材の開発

粉末圧延法等により金属ガラス母相中に極微小な高導電性の粒子やフィラーを分散させる、あるいはクラディング等の方法により金属ガラスと高導電性材料を複合化させ、銅-ベリリウム合金を凌駕する強度と電気伝導性を併せ持つ複合化金属ガラスの創製を行う。また、高強度・高導電性複合化金属ガラスを用い、精密圧延による精密薄板作製技術を開発する。これらの成果を基に、コネクタのピッチが0.1mmもしくは高さが0.5mmの微細カードコネクタを開発する。実用化助成事業は、福田金属箔粉工業(株)が担当し、2010年度に立ち上げる計画である。

4.2.3. 企業等において始まっている応用・実用化への取り組み

4.2.2. (1)で述べた超精密ギヤードモータおよび圧力センサは、産業技術実用化開発助成事業として実用化に向けた開発が行われている。その概要を以下に記す。

(1) 金属ガラスを用いたマイクロギヤードモータの実用化開発

並木精密宝石(株)が実施し、「金属ガラス成形加工技術」プロジェクトにおいて開発した金属ガラスを用いたマイクロギヤードモータの実用化に向け、金属ガラス製ギヤ部品一式の内製化と市場要求に見合った製造コストを確立するために、金属ガラス製マイクロギヤの革新的加工プロセスおよび量産技術の開発を行い、このマイクロギヤを組み込んだ直径 1.5 mm のギヤードモータを試作・評価するとともに、医療機器メーカーを中心とした新規市場創出をねらい開発が行われている。期間は、2007～2009 年度の 3 年間である。

(2) 金属ガラス合金製高精度圧力センサの実用化開発

長野計器(株)が実施し、金属ガラス合金を用いた、高感度・高精度な圧力センサの実用化および製品化を目指して開発が行われている。「金属ガラス成形加工技術」プロジェクトにおいて、要素技術の開発ならびに金属ガラスが圧力センサとして有効であることを確認したことをベースに、圧力センサ用金属ガラス部材の量産レベルでの成形技術および部材品質の確立を行うとともに、金属ガラス合金の特長を活かした新規圧力センサの開発がねらいである。期間は、2007～2009 年度の 3 年間である。

4.2.4. 「金属ガラス」イノベーションフォーラム

「金属ガラス」イノベーションフォーラムは、その前身である「過冷金属研究会」を発展的に解消する形で 2006 年 4 月に発足した。「過冷金属研究会」は、参加企業の大半が製造・装置企業であり、金属ガラスを加工して最終製品を販売する企業はほとんど含まれていなかった。日本が世界に発信する新材料である金属ガラスの広範な工業化を目指すためには、金属ガラスの原材料製造企業、部品加工企業、最終製品加工企業を幅広く組み入れた形式の研究会に衣替えすべきであるとの問題意識に応えるかたちで本フォーラムが立ち上げられた。

本フォーラムの目的は、以下のとおりである。

金属ガラスに関する情報交換とマーケットサーベイ

前項に関する情報交換、加工技術、サンプル授受(粉末・板材・丸棒など)

世界への情報発信と世界戦略構築

特許戦略およびライセンス支援

参加メンバーは、金属ガラスの研究者を中心に、金属ガラスの 1 次加工者、2 次加工者およびユーザを含み、相互の情報交換、サンプル授受を通じて、新規ビジネス展開、ニーズに裏打ちされた基礎研究が推進されている。2007 年 11 月現在の登録会員は、約 70 社の企業を含む約 170 名で構成されている。

4.3. 統計資料で見た科学技術へのインパクト

4.3.1. 代表的論文と被引用件数の年次推移

本プロジェクトの成果に直接関係する研究論文は 213 報、本プロジェクト終了後、その発展、展開された研究に関する研究論文は 535 報で、合計 748 報におよぶ。

これらの論文の中から、被引用件数の多い代表的論文について、その年次推移を調べた。被引用件数は、2008 年までの被引用件数の累計に着目しその多いものを選んだ。出版年の古いものは被引用件数の累計は当然増えるので、代表的論文を選ぶ基準の累計件数は、出版年により傾斜をつけた。すなわち、2006 年出版のものは、被引用件数の累計が 10 件以上とし、出版年が古くなるに従い 10 件 / 年ずつ件数を増やした。2005 年は 20 件以上、以下順次件数を増やし、1999 年出版のものは被引用件数累計が 80 件以上の論文を主要論文とした。

その結果、プロジェクト期間の 213 報からは、主要論文として、下記の論文リストの 1-7 報を選んだ。これらの論文の被引用件数の年次推移を表 2 に示した。また、論文の数が増えるとその年の被引用件数の合計は当然増えるので、当該年までに発行された論文の数で被引用件数の合計を除いた件数を平均引用件数とし、その年次推移を図 3 に示した。

統計データに使用した論文の書誌事項

2008 年 1 月 19 日更新分 DB

| No. | 書誌事項 | 出版年 | 被引用件数 |
|-----|--|------|-------|
| 1 | <u>Inoue A, Zhang T, Saida J, Matsushita M, Chen MW, Sakurai T</u> Formation of icosahedral quasicrystalline phase in Zr-Al-Ni-Cu-M (M = Ag, Pd, Au or Pt) system Mater Trans JIM, 40, 1181-1184, 1999 | 1999 | 136 |
| 2 | <u>Fan C, Takeuchi A, Inoue A</u> Preparation and mechanical properties of Zr-based bulk nanocrystalline alloys containing compound and amorphous phases Mater Trans JIM, 40, 42-51, 1999 | 1999 | 85 |
| 3 | <u>Inoue A, Zhang W, Zhang T, Kurosaka K</u> High-strength Cu-based bulk glassy alloys in Cu-Zr-Ti and Cu-Hf-Ti ternary systems Acta Mater, 49, 2645-2652, 2001 | 2001 | 319 |
| 4 | <u>Inoue A, Zhang W, Zhang T, Kurosaka K</u> Thermal and mechanical properties of Cu-based Cu-Zr-Ti bulk glassy alloys Mater Trans, 42, 1149-1151, 2001 | 2001 | 82 |

| | | | |
|----|---|------|-----|
| 5 | <u>Inoue A</u> Bulk amorphous and nanocrystalline alloys with high functional properties Mater Sci Eng A, 304/306, 1-10, 2001 | 2001 | 112 |
| 6 | <u>Inoue A, Takeuchi A</u> Recent progress in glassy alloys Mater Trans, 43, 1892-1906, 2002 | 2002 | 89 |
| 7 | <u>Inoue A, Zhang W</u> Formation, thermal stability and mechanical properties of Cu-Zr-Al bulk glassy alloys Mater Trans, 43, 2921-2925, 2002 | 2002 | 72 |
| 8 | <u>Mukai T, Nieh TG, Kawamura Y, Inoue A, Higashi K</u> Effect of Strain Rate on Compressive Behavior of a Pd40Ni40P20 Bulk Metallic Glass Intermetallics, 10, 1071-1077, 2002 | 2002 | 56 |
| 9 | <u>Mukai T, Nieh TG, Kawamura Y, Inoue A, Higashi K.</u> Dynamic Response of a Pd40Ni40P20 Bulk Metallic Glass in Tension Scripta Materialia, 46, 43-47, 2002 | 2002 | 66 |
| 10 | <u>Inoue A, Zhang W</u> Formation, Thermal Stability and Mechanical Properties of Cu-Zr-Al Bulk Glassy Alloys Materials Transactions, 43, 2921-2925, 2002 | 2002 | 72 |
| 11 | <u>Inoue A, Zhang W, Zhang T</u> Thermal Stability and Mechanical Strength of Bulk Glassy Ni-Nb-Ti-Zr Alloys Materials Transactions, 43, 1952-1956, 2002 | 2002 | 54 |
| 12 | <u>Inoue A, Takeuchi A</u> Recent Progress in Bulk Glassy Alloys Materials Transactions, 43, 1892-1906, 2002 | 2002 | 89 |
| 13 | <u>Zhang T, Inoue A</u> New Bulk Glassy Ni-Based Alloys with High Strength of 3000MPa Materials Transactions, 43, 708-711, 2002 | 2002 | 87 |
| 14 | <u>Inoue A, Shen BL, Yavari AR, Greer AL</u> Mechanical Properties of Fe-Based Bulk Glassy Alloys in Fe-B-Si-Nb and Fe-Ga-P-C-B-Si Systems Journal of Materials Research, 18, 1487-1492, 2003 | 2003 | 45 |
| 15 | <u>Inoue A, Shen B, Koshiba H, Kato H, Yavari AR</u> Cobalt-Based Bulk Glassy Alloy with Ultrahigh Strength and Soft Magnetic Properties | 2003 | 75 |

| | | | |
|----|--|------|----|
| | Nature materials, 2, 661-663, 2003 | | |
| 16 | <u>Inoue A, Shen BL, Chang CT</u> Super-high strength of over 4000 MPa for Fe-based bulk glassy alloys in [(Fe1 - xCox)0.75B0.2Si0.05]96Nb4 system Acta Materialia, 52, 4093-4099, 2004 | 2004 | 60 |
| 17 | <u>Inoue A, Takeuchi A</u> Recent Progress in Bulk Glassy, Nanoquasicrystalline and Nanocrystalline Alloys Materials Science and Engineering, 375, 16-30, 2004 | 2004 | 46 |
| 18 | <u>Inoue A, Shen BL, Koshiba H, Kato H, Yavari AR</u> Ultra-High Strength above 5000 MPa and Soft Magnetic Properties of Co-Fe-Ta-B Bulk Glassy Alloys Acta Materialia, 52, 1631-1637, 2004 | 2004 | 41 |
| 19 | <u>Inoue A, Zhang W</u> Formation, Thermal Stability and Mechanical Properties of Cu-Zr and Cu-Hf Binary Glassy Alloy Rods Materials Transactions, 45, 584-587, 2004 | 2004 | 50 |
| 20 | <u>Sharma P, Gupta A, Owens FJ, Inoue A, Rao KV</u> Room Temperature Spintronic Material - Mn-doped Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 282, 115-121, 2004 | 2004 | 35 |
| 21 | <u>Shen BL, Inoue A, Chang CT</u> Superhigh Strength and Good Soft-Magnetic Properties of (Fe, Co)-B-Si-Nb Bulk Glassy Alloys with High Glass-Forming Ability Applied Physics Letters, 85, 4911-4913, 2004 | 2004 | 30 |
| 22 | <u>Takeuchi A, Inoue A</u> Classification of Bulk Metallic Glasses by Atomic Size Difference, Heat of Mixing and Period of Constituent Elements and its Application to Characterization of the Main Alloying Element Materials Transactions, 46, 2817-2829, 2005 | 2005 | 23 |
| 23 | <u>Wada T, Inoue A, Greer AL</u> Enhancement of Room-Temperature Plasticity in a Bulk Metallic Glass by Finely Dispersed Porosity Applied Physics Letters, 86, Art.No.251907, 2005 | 2005 | 25 |
| 24 | <u>Sluiter MHF, Kawazoe Y, Sharma P, Inoue A, Raju AR, Rout C, Waghmare UV</u> First Principles Based Design and Experimental Evidence for a ZnO-based Ferromagnet at Room Temperature Physical Review Letters, 94, Art.No.187204, 2005 | 2005 | 74 |
| 25 | <u>Inoue A, Zhang W, Tsurui T, Yavari AR, Greer AL</u> | 2005 | 51 |

| | | | |
|----|--|------|----|
| | Unusual Room-temperature Compressive Plasticity in Nanocrystal-toughened Bulk Copper-zirconium Glass Philosophical Magazine Letters, 85, 221-229, 2005 | | |
| 26 | <u>Yavari AR, etc</u> Excess Free Volume in Metallic Glasses Measured by X-ray Diffraction Acta Materialia, 53, 1611-1619, 2005 | 2005 | 30 |
| 27 | <u>Chen M, Inoue A, Zhang W, Sakurai T</u> Extraordinary Plasticity of Ductile Bulk Metallic Glasses Physical Review Letters, 96, Art.No.245502, 2006 | 2006 | 18 |
| 28 | <u>Hajlaoui K, etc</u> Shear Delocalization and Crack Blunting of a Metallic Glass Containing Nanoparticles: in Situ Deformation in TEM Analysis Scripta Materialia, 54, 1829-1834, 2006 | 2006 | 25 |
| 29 | <u>Zhang W, Inoue A</u> High Glass-Forming Ability and Good Mechanical Properties of New Bulk Glassy Alloys in Cu-Zr-Ag Ternary System Journal of Materials Research, 21, 234-241, 2006 | 2006 | 13 |

表 2 プロジェクトの成果に直接関係する主要論文の被引用件数年次推移

| 論文 No. | 出版年 | 被引用件数累計 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|--------|------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1999 | 136 | 0 | 12 | 43 | 17 | 12 | 13 | 10 | 15 | 14 |
| 2 | 1999 | 85 | 3 | 9 | 12 | 8 | 12 | 10 | 8 | 14 | 9 |
| 3 | 2001 | 315 | | | 1 | 22 | 46 | 46 | 54 | 57 | 89 |
| 4 | 2001 | 82 | | | 3 | 13 | 11 | 12 | 11 | 10 | 22 |
| 5 | 2001 | 112 | | | 2 | 11 | 22 | 22 | 15 | 19 | 21 |
| 6 | 2002 | 89 | | | | 0 | 9 | 8 | 21 | 23 | 28 |
| 7 | 2002 | 72 | | | | 0 | 4 | 9 | 17 | 15 | 27 |
| 合計 | | | 3 | 21 | 61 | 71 | 116 | 120 | 136 | 153 | 210 |
| 平均引用件数 | | | 1.5 | 10.5 | 12.2 | 10.1 | 16.6 | 17.1 | 19.4 | 21.9 | 30.0 |

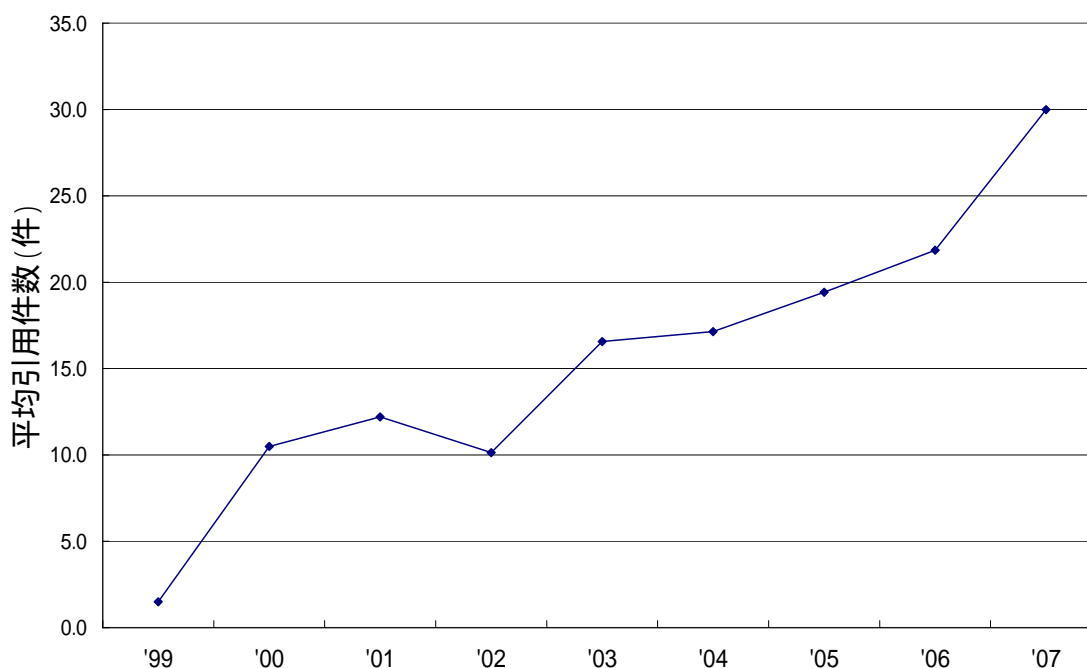


図 3 平均引用件数の年次推移 (プロジェクトの成果に関する主要論文)

この結果、平均被引用件数は、ほぼ年とともに増加しており、2007年に最高値となっている。これは、プロジェクトの成果として発行された論文が、プロジェクト終了後の研究においても引用すべき研究成果として認識されていると判断され、本プロジェクトがその後の研究の源流となっていることを示している。

また、本プロジェクト終了後、その発展・展開された研究に関する研究論文 535 報についても上記と同様の解析を行なった。上記論文リスト 8-29 について、その結果を

表 3 に示した。これらの論文についての平均引用件数の年次推移を図 4 に示した。

この結果、プロジェクトの発展・展開と考えられる研究に関する論文についても、その平均引用件数は発行後ほぼ年とともに増加しており、プロジェクト終了後も、質の高い研究が引続き実施されていることを示している。

表 3 プロジェクトの発展・展開に関する主要論文の被引用件数年次推移
(Web of Science 2008/1/19 検索)

| 論文 No. | 出版年 | 被引用件数累計 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|--------|------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 8 | 2002 | 56 | 0 | 4 | 7 | 8 | 15 | 22 |
| 9 | 2002 | 66 | 1 | 10 | 9 | 13 | 13 | 19 |
| 10 | 2002 | 60 | 0 | 4 | 9 | 17 | 15 | 27 |
| 11 | 2002 | 54 | 0 | 13 | 7 | 9 | 7 | 18 |
| 12 | 2002 | 73 | 0 | 9 | 8 | 21 | 23 | 28 |
| 13 | 2002 | 76 | 2 | 11 | 14 | 11 | 24 | 24 |
| 14 | 2003 | 41 | | 1 | 6 | 10 | 11 | 15 |
| 15 | 2003 | 68 | | 0 | 6 | 19 | 26 | 23 |
| 16 | 2004 | 45 | | | 0 | 13 | 20 | 24 |
| 17 | 2004 | 39 | | | 1 | 9 | 21 | 15 |
| 18 | 2004 | 36 | | | 1 | 6 | 17 | 16 |
| 19 | 2004 | 40 | | | 2 | 11 | 15 | 22 |
| 20 | 2004 | 31 | | | 0 | 8 | 12 | 15 |
| 21 | 2004 | 30 | | | 0 | 1 | 15 | 13 |
| 22 | 2005 | 24 | | | | 0 | 6 | 17 |
| 23 | 2005 | 25 | | | | 1 | 7 | 16 |
| 24 | 2005 | 56 | | | | 3 | 32 | 38 |
| 25 | 2005 | 51 | | | | 0 | 13 | 37 |
| 26 | 2005 | 20 | | | | 1 | 12 | 17 |
| 27 | 2006 | 18 | | | | | 0 | 15 |
| 28 | 2006 | 13 | | | | | 5 | 19 |
| 29 | 2006 | 13 | | | | | 5 | 8 |
| 合計 | | | 3 | 52 | 70 | 161 | 314 | 448 |
| 平均引用件数 | | | 0.5 | 6.5 | 5.0 | 8.5 | 14.3 | 20.4 |

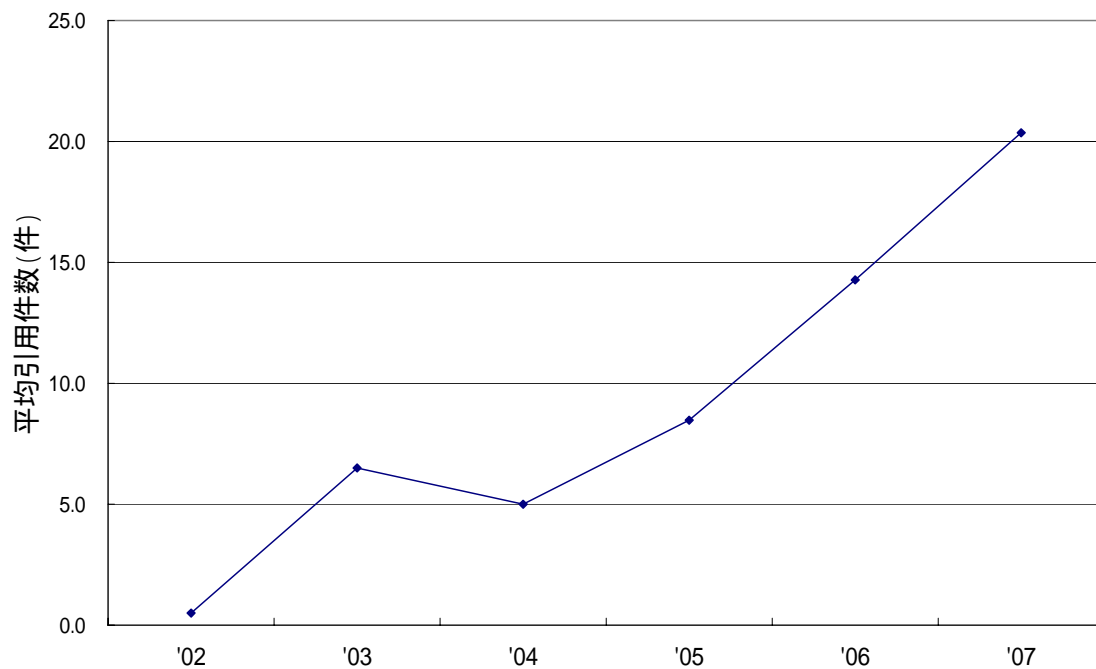


図 4 平均引用件数年次推移(プロジェクトの発展・展開に関する主要論文)

井上は、2000年に、本プロジェクトの始まる以前に知られていた、多数の金属ガラスに関する総説を発表した(Inoue, A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys. *Acta Materialia*. 2000, 48(1), p.279-306.) この論文は、金属ガラスに関して得られていた実験的な知見を総括したもので、本プロジェクト開始の背景となる研究データを俯瞰し、その後の金属ガラス研究の方向を決めるいわば「海図」の役割を果たすものであり、トムソンコーポレーション(株)の New Hot Papers (2001年11月)に選ばれた。

この論文が発表された2000年から2007年に至る本論文の被引用件数の年次推移を図5に示した。

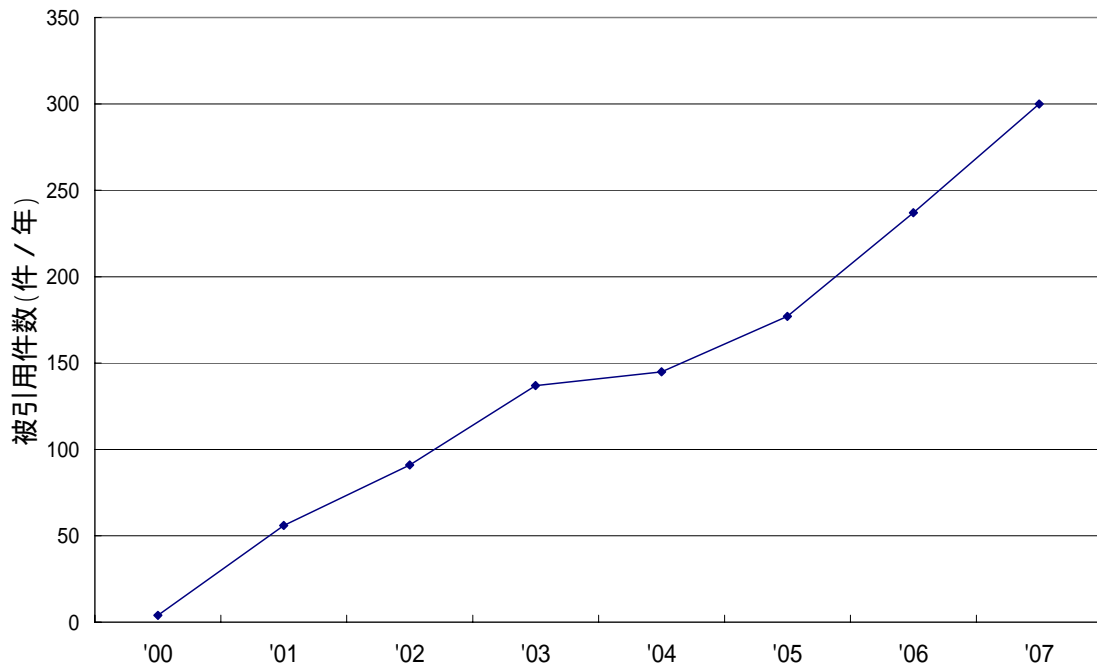


図 5 被引用件数の年次推移(井上の総説)

図 5 から、2001 年に New Hot Papers に選ばれた後も、被引用件数は年とともに増加を続けており、このデータから、この論文は、その後の金属ガラスの研究の原点として確固たる地位を占めていること、金属ガラスに関する研究が本プロジェクト以降本格化していることがわかる。

4.3.2. 当該分野における研究の拡大(キーワード検索の結果)

井上らの見出した金属ガラスは、大きな過冷却度でも結晶化せず安定して存在することにより、いわゆるバルク形状の材料が得られるというのが大きな特徴であった。そこで、"bulk metallic glass(es)" or "bulk amorphous alloy(s)" or "bulk amorphous metals(s)" or (金属ガラス and バルク) or (非晶質合金 and バルク) というキーワードを含む論文の年次推移を Jdream(2007/12/21 検索)で検索し、その結果を図 6 に示した。

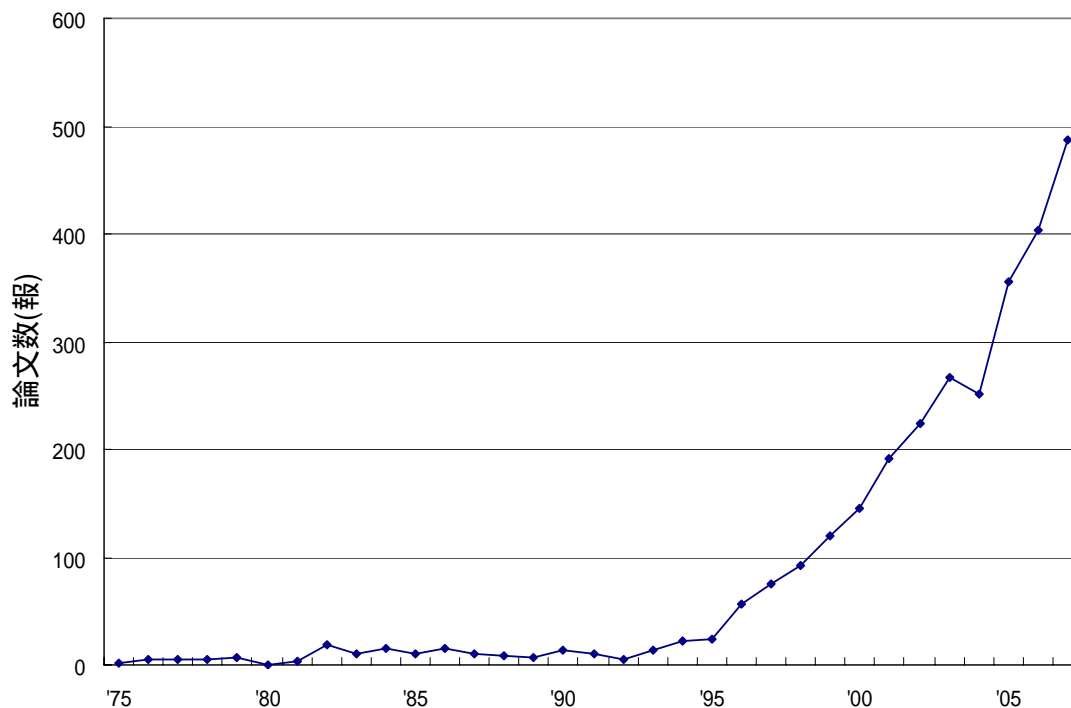


図 6 バルク金属ガラスに関する論文数の年次推移

図 6 から、本プロジェクトが始まった 1997 年ごろから、バルク金属ガラスに関する論文数が急増し、その後もほぼ単調に増加していることが判る。2007 年の論文数は、井上らがバルク金属ガラスを発見した 1980 年代の後半の数件 / 年に比べて約 2 桁増加しており、際立った対照を見せている。本プロジェクトにより、バルク金属ガラスという学問の潮流が創出されたことを示している。

4.4. 人材育成の面から見た参加研究者の活動状況

本プロジェクトに参加した研究グループリーダー、研究員のその後の動静を 5.5. プロジェクト参加研究者の動静表に示した。

本プロジェクトは、過冷金属構造グループ、過冷金属変態グループ、過冷金属制御グループの 3 グループに分かれて実施され、このうち、過冷金属構造グループは、研究者は 1 名をのぞき、企業から派遣されており、プロジェクト終了後はそれぞれの企業に戻っている。

過冷金属変態グループに在籍した研究員は全て博士号を持つ研究者であった。現在の職位は動静表のとおりである。なおグループリーダーであった才田淳治は、現在、東北大学 学際科学国際高等研究センター准教授を勤めている。

過冷金属制御グループに在籍した 3 名の研究員がプロジェクトの研究成果を基に学位取得した。グループリーダーであった西山信行は、現在、RIMCOF 東北大学

研究室 研究開発グループ長を勤めている。

表4 プロジェクト参加研究者、技術者の現在の所属機関

| グループ | 氏名 | 最終の職位 | 現職 |
|---|--------------------|----------|--|
| | 井上明久 | 総括責任者 | 東北大学総長 |
| 過冷金属 構造グ ループ | 今福宗行 | グループリーダー | 新日本製鐵(株) |
| | 進藤卓嗣 | グループリーダー | (財)工業所有権協力センター調査業務センター |
| | 佐藤成男 | 研究員 | 株式会社日産アーク |
| | 矢尾板憲一 | 研究員 | Rigaku Americas Corporation |
| | 黒川浩史 | 研究員 | 株式会社リガク |
| | 笠井正之 | 研究員 | JFEスチール株式会社 |
| | 中山正雄 | 研究員 | (株)リガク |
| | 北田信 | 研究員 | 富士フィルム(株) |
| | 過冷金属 変態グ ループ | 才田淳治 | グループリーダー |
| 松下光英 | | 研究員 | 日本電子(株) |
| 李春飛 | | 研究員 | Materials Research Center Whitaker Lab Lehigh University |
| Mohamed Sherif Mohamed Mostafa EI-Eskandarany | | 研究員 | Faculty of Engineering, A1 Azasr University |
| 過冷金属 制御グ ループ | 陳顔堂 | 研究員 | |
| | 西山信行 | グループリーダー | (財)次世代金属・複合材料研究開発協会 特別研究員 |
| | 網谷健児 | 研究員 | 金属材料研究所 附属研究施設大阪センター 助教 |
| | 石原知 | 研究員 | 物材機構, 非酸化物焼結体グループ, 特別研究員 |
| | 張偉 | 研究員 | 文部科学省 金属ガラス・無機材料接合開発共同研究プロジェクト 准教授 |
| | 王立民 | 研究員 | |
| | 金星圭 | 研究員 | 釜慶大学校工科大学生産加工工学科教授 |
| | 小柴寿人 | 協力研究員 | アルプス電気株式会社 |
| | 馬朝利 | 研究員 | 北京大学, 工程研究院 教授 |
| | 範滄 | 研究員 | Univ. Tennessee, Dept. Mater. Sci. & Eng., Post Doc. |
| | 沈宝龍 | 研究員 | 東北大学金属材料研究所井上研究室 助教 |

4.5. 主な受賞

本プロジェクト主要メンバーの研究成果に対する主な受賞は次のとおりである。

| 受賞年 | 受賞者 | 名称 | 授与機関 |
|------|------|---|--|
| 1998 | 井上明久 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 1998 | 井上明久 | Materials Research Society(MRS)-1998 Fall Meeting Best Poster Award(Boston) | Materials Research Society |
| 2000 | 井上明久 | 日本金属学会学術功労賞 | 日本金属学会 |
| 2000 | 井上明久 | 科学技術庁長官注目発明認定 | 科学技術庁 |
| 2000 | 井上明久 | 日本金属学会論文賞 | 日本金属学会 |
| 2000 | 井上明久 | 米科学情報会社「トムソンサイエンティフィック」引用最高栄誉賞 | トムソンサイエンティフィック株式会社 |
| 2001 | 井上明久 | The CONA Award(Hosokawa Powder Technology Foundation) | Hosokawa Powder Technology |
| 2001 | 井上明久 | 日本金属学会増分量賞 | 日本金属学会 |
| 2001 | 井上明久 | インドMRS名誉会員 | インドMRS |
| 2001 | 井上明久 | 中国大連理工大学名誉教授 | 中国大連理工大学 |
| 2001 | 井上明久 | 日本機械学会機械材料・材料加工部門、優秀講演論文 | 日本機械学会 |
| 2001 | 井上明久 | 日本金属学会論文賞 | 日本金属学会 |
| 2001 | 井上明久 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2002 | 井上明久 | 日本学士院賞 | 日本学士院 |
| 2002 | 井上明久 | International Metallographic Contest Award, ASM, USA | ASM |
| 2002 | 井上明久 | 日本金属学会論文賞 | 日本金属学会 |
| 2002 | 井上明久 | Materials Research Society(MRS)-2002 Fall Meeting Best Poster Award(Boston) | Materials Research Society |
| 2003 | 井上明久 | 日本金属学会 谷川・ハリス賞 | 日本金属学会 |
| 2003 | 井上明久 | Kelly Lecture | Cambridge University |
| 2003 | 井上明久 | THERMEC2003Distinguished Award | TMS,USA |
| 2003 | 井上明久 | 服部報公会 報公賞 | 財団法人服部報公会 |
| 2003 | 網谷健児 | 日本金属学会金属組織写真賞 | 日本金属学会 |
| 2004 | 井上明久 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2004 | 西山信行 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2005 | 井上明久 | 日本金属学会論文賞 | 日本金属学会 |
| 2005 | 井上明久 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2005 | 井上明久 | スウェーデン王立工科大学 名誉博士号 | スウェーデン王立工科大学 |
| 2005 | 西山信行 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2006 | 井上明久 | Distinguished Contribution Award | International Copper Association(New York) |
| 2006 | 井上明久 | 中国天津大学名誉教授 | 中国天津大学 |
| 2006 | 井上明久 | 日本金属学会技術開発賞 | 日本金属学会 |
| 2006 | 井上明久 | 内閣総理大臣賞(産官学連携功労者表彰) | 経済産業省 |
| 2006 | 井上明久 | 東北大学総長賞 | 東北大学 |
| 2006 | 井上明久 | インド金属学会 名誉会員 | インド金属学会 |