

「ナノテクノロジー・材料を中心とした融合新興分野研究開発」(産学官連携型)

事後評価報告書

1. 課題名

組織制御構造体の開発「超高強度軽量移動体を可能にする複層鋼板」

2. 代表者(機関名)

小関 敏彦(東京大学工学系研究科)

3. 課題の概要

自動車をはじめとする移動体は我が国の主要なCO₂排出源の一つであり、低炭素で持続可能な社会の実現に向けて移動体のCO₂排出削減と省エネルギーが必須である。そのためにはガソリンエンジンからの脱却に加え、駆動力源を問わず構造体の軽量化が最も有効であり、これまでも軽量化のため様々な高強度材料の開発と適用が進められてきた。一方、移動体の構造材料には、自動車を例に取れば年間1000万台の生産を高い生産性と低コストで可能にする優れた成形加工性や溶接性、衝突時の安全性のための高い延性、更にリサイクル性も併せて必要である。次世代の移動体にはこれらを更に高いレベルで両立する高強度材料が必要であるが、延性や成型加工性、溶接性は材料の高強度化とともに著しく低下するため、大幅な軽量化を可能にする飛躍的な高強度材料の実現には至っていない。

本プロジェクトでは、このような背景の下、次世代の軽量移動体を可能にする超高強度と高延性を両立する新たな鉄鋼材料を、異なる組織・特性を有する鋼を複層化しナノからマクロまでマルチスケールで“組織制御構造化”した「複層鋼板」によって実現する。東京大学を中核とし、上智大学、熊本大学、東北大学、物質・材料研究機構、新日本製鐵株式会社の産学官連携によって推進するもので、複層鋼板の基本設計指針の確立、実用化を視野に入れた材質や性能の評価と解析、利用加工技術、製造法、信頼性評価技術の検討を行う。並行して、その基盤となる金属-金属のヘテロ界面の解明、ヘテロ構造金属材料の力学的挙動の解明、複層化による高強度脆性材料の変形機構の解明を進める。これらを通し、これまでのモノリシックな金属材料では達成しえなかった特性を有し、次世代の高性能、安心・安全、環境対応に資する新たな複層型金属材料、ならびに、その材料科学の基盤の構築を目指す。

4. 研究開発目標

1) 複層鋼板の開発(複層鋼板の幾何学設計・冶金・界面設計と評価)

異なる組織・特性の鋼板を複層化して超高強度と高延性を両立するための、複層界面、各層の組織・特性、幾何学構成の各スケールでの必要条件を明らかにし、複層鋼板の基本設計指針を確立する。それに基づき、強度1200MPa以上、伸び20%以上の超高強度と高延性を両立する複層鋼板を実現するとともに、自動車部材へ適用しうる優れた成型加工性、高歪み速度下の変形特性、溶接性、耐水素脆性を有する材料開発を行う。さらに実用化に向けた材料製造プロセスの検討、ならびに、材料の信頼性評価手法の検討を行う。当初計画では、多様な移動体への適用を視野に、チタン・チタン合金についても同様の計画・目標を設定した。

2) 複層鋼板の界面特性および力学挙動に関する研究

複層鋼板の層間の界面特性およびその支配因子を明らかにする。また、強い界面を持つ複層材料の変形挙動のマルチスケールでの解明とモデル化、および、複層化によって実現される脆性高強度層の変形の機構解明を行う。

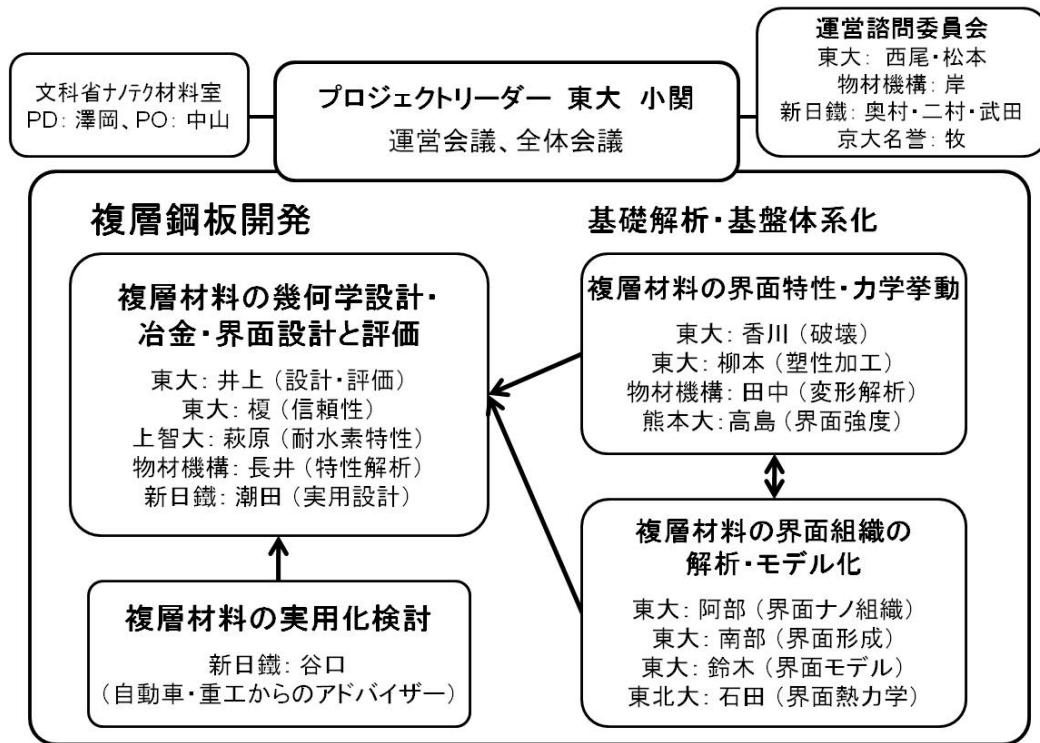
3) 複層鋼板の界面組織の解析およびモデル化に関する研究

金属ヘテロ界面の組織・構造をナノ・マイクロレベルで解析するとともに、活性界面を用いた検討およびその数値モデル化を通し、界面の形成機構を明らかにする。

4) 複層鋼板の実用化検討

実適用の観点から、超高強度-高延性の複層鋼板の要求特性および適用した場合の効果を検討し、適宜、材料開発へフィードバックする。

5. 研究体制（各分担の責任者のみ記載）



6. 課題の達成状況等

(1) 研究開発計画（当初）

項目	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
1. 複層鋼板の開発（複層鋼板の幾何学設計・冶金・界面設計と評価）	<ul style="list-style-type: none"> 複層材（鋼、チタン）の設計指針の検討および試作 試作複層材の組織、特性解析および支配因子検討 水素脆化挙動の解析 	<ul style="list-style-type: none"> 複層材（鋼、チタン）の設計指針の検討および試作 試作複層材の組織、特性解析および支配因子抽出 水素脆化挙動の解析 	<ul style="list-style-type: none"> 複層材の設計指針の確立 材料加工特性、利用加工技術の検討（曲げ、プレス） 耐水素脆化設計指針 	<ul style="list-style-type: none"> 材料加工特性、利用加工技術の検討（曲げ、プレス） 製造プロセス、溶接技術の実用化指針検討 加工・溶接部脆化の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 材料加工特性、利用加工技術の検討（曲げ、プレス） 製造プロセス、溶接技術の実用化指針検討
2. 複層鋼板の界面特性および力学挙動に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> 界面強度解析 変形・破断解析、界面の影響解明 変形シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> 界面強度解析 変形・破断解析、界面の影響解明 プレス成型性解析 力学挙動解析 変形シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> 変形・破断解析、界面の影響解明 プレス成型性解析 力学挙動解析 信頼性評価技術 	<ul style="list-style-type: none"> プレス成型性解析 複層材料の力学挙動解析・体系化 信頼性評価技術 	<ul style="list-style-type: none"> プレス成型性解析 複層材料の力学挙動解析・体系化 信頼性評価技術
3. 複層鋼板の界面組織の解析およびモデル化に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> 複層ヘテロ界面ミクロ・ナノ解析 界面モデル解析ポテンシャルデータ 	<ul style="list-style-type: none"> 複層ヘテロ界面ミクロ・ナノ解析 界面モデル解析ポテンシャルデータ 	<ul style="list-style-type: none"> 界面組織と強度発現機構 界面組織・構造の形成機構解明 	<ul style="list-style-type: none"> 界面ミクロ・ナノ組織制御指針 界面組織・構造の形成機構解明 	<ul style="list-style-type: none"> 界面ミクロ・ナノ組織制御指針 界面組織・構造の形成機構解明
4. 複層鋼板の実用化検討	<ul style="list-style-type: none"> 適用部位・部材の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 適用部位・部材の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 利用加工要求特性・実適用メリット抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 利用加工要求特性・実適用メリット抽出 	<ul style="list-style-type: none"> 材料の横展開検討
所要経費	270	270	270	218	215

所要経費（百万円）

(2) 研究開発実績（網掛けは当初からの変更点）

項目	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
1. 複層鋼板の開発（複層鋼板の幾何学設計・冶金・界面設計と評価）	・複層材（鋼、チタン）の設計指針の検討および試作 ・試作複層材の組織、特性解析および支配因子検討 ・水素脆化挙動解析	・複層材（鋼、チタン）の設計指針の検討および試作 ・試作複層材の組織、特性解析および支配因子抽出 ・水素脆化挙動解析	・複層材の設計指針の確立（鋼に特化） ・材料加工特性の検討（曲げ、プレス、高速変形） ・耐水素脆化設計指針	・材料加工特性の検討（曲げ、プレス、高速変形・軸圧壊） ・製造プロセス、溶接技術の基礎検討 ・炭素鋼ベース複層鋼板検討	材料加工特性の検討（曲げ、プレス、高速変形・軸圧壊） ・製造プロセス、溶接技術の基礎検討 ・炭素鋼ベース複層鋼板検討
2. 複層鋼板の界面特性および力学挙動に関する研究	・界面強度解析 ・変形・破断解析、界面の影響解明 ・変形シミュレーション	・界面強度解析 ・変形・破断解析、界面の影響解明 ・プレス成型性解析 ・力学挙動解析（マルチスケール） ・変形シミュレーション	・変形・破断解析、界面の影響解明 ・プレス成型性解析 ・力学挙動解析（マルチスケール） ・信頼性評価技術	・プレス成型性解析 ・複層材料の力学挙動解析・体系化（マルチスケール） ・信頼性評価技術	・プレス成型性解析 ・複層材料の力学挙動解析・体系化（応力分配解析） ・疲労挙動解析 ・信頼性評価技術
3. 複層鋼板の界面組織の解析およびモデル化に関する研究	・複層ヘテロ界面ミクロ・ナノ解析 ・界面モデル解析ポテンシャルデータ	・複層ヘテロ界面ミクロ・ナノ解析 ・界面モデル解析ポテンシャルデータ	・界面組織と強度発現機構 ・界面組織・構造の形成機構解明	・界面ミクロ・ナノ組織制御指針 ・界面組織・構造の形成機構解明	・界面ミクロ・ナノ組織制御指針 ・界面組織・構造の形成機構解明
4. 複層鋼板の実用化検討	・適用部位・部材の検討 ・知財調査	・適用部位・部材の検討	・利用加工要求特性・実適用メリット抽出	・利用加工要求特性・実適用メリット抽出	・材料の横展開検討
所要経費	268	260	158	140	83

所要経費（百万円）

- ・ 当初の研究開発目標の変更
当初の計画では、チタンおよびチタン合金においても複層材料の開発を目標としていたが、チタンの低圧延加工性による試作の遅延、ならびに、複層化の設計指針が複層鋼板と一貫することが確認されたことから、3年目予算削減を受け、残期間は鉄鋼の複層化に特化することとした。

(3) 目標達成状況

研究開発項目	達成状況
1. 複層鋼板の開発（複層鋼板の幾何学設計・冶金・界面設計と評価）	・高強度と高延性を両立する複層鋼板の設計指針を確立し、初期目標の強度1200MPa以上、伸び20%以上を越える複層鋼板を達成した。 ・優れた加工性、高歪み速度下での高い延性、耐水素脆性など、超高強度と相反する特性との両立を示し、当初目標を達成した。 ・実用化に向けた製造プロセス、溶接、信頼性の検討は予算制約上、基礎検討に留まった。
2. 複層鋼板の界面特性および力学挙動に関する研究	複層界面の強度解明、必要界面強度の導出、複層鋼板の変形挙動のマルチスケール解析、複層鋼板および構成高強度層の変形挙動の実験的解明および数値解析など、当初の計画通り進めた。
3. 複層鋼板の界面組織の解析およびモデル化に関する研究	複層界面のナノレベル解析、活性化接合法を用いた界面形成の素過程および強度発現の解析、原子レベルのbcc/fcc界面形成モデルの構築など、当初の計画通り進めた。
4. 複層鋼板の実用化検討	超高強度－高延性鋼板に関する知財調査、適用した場合の軽量化効果、などを調査および数値計算から当初の計画通り進めた。

(4) 中間評価指摘事項への対応

中間評価指摘事項	対応
複層化効果の機構の解明、材料科学の確立	複層化効果について、理論解析、数値解析、マルチスケールの材料変形挙動のその場観察・解析、中性子線による応力-歪み解析、などにより解明を進めた。硬質マルテンサイトの変形機構に関しては局所変形の直接観察、結晶学的解析による解明、金属ヘテロ界面については表面活性化接合法を用いて界面形成および強度発現過程の解明を進めた。
大型化、実用化・産業化の検討の推進	冷間圧延による複層鋼板の長尺大型試作（60m 長さコイル）、大型プレス試験、自動車衝突模擬の筐体の高速曲げ及び高速軸圧壊試験の実施、プロセス及び溶接の検討、低廉化及び信頼性評価の検討など、実用化に向けた各種検討を進めると同時に、基本・国際・関連を含む8件の特許を申請。製造、実適用に関して産業界各社と議論を継続した。
情報発信の推進	中間審査後、情報発信に努め、全体で、査読付き論文 40 報、査読無し解説 9 報、国内・国際会議発表 146 件。国際会議を含む招待講演 6 回。国内シンポジウム 2 回、学会でのオーガナイズドセッション 2 回、外部へ向けた成果報告会 2 回を開催。新聞発表 2 回（鉄鋼新聞、産業新聞いずれも H22 年度）

(5) 研究開発成果

1. 複層鋼板の開発（複層鋼板の幾何学設計・冶金・界面設計と評価）

超高強度-高延性を両立するために必要な層界面強度、各層の冶金設計及び複層の幾何設計の要件を解明し複層鋼板の設計指針を確立するとともに、高強度マルテンサイト鋼、高延性 Cr-Ni オーステナイト鋼の複層によりプロジェクト目標の強度 (TS) 1200MPa 以上、伸び (EL) 20%以上を達成する複層鋼板を達成した。(代表例：高強度型 1500MPa-23.3%、高延性型 1220MPa-38.6%) また、高延性層を炭素鋼ベースの TRIP 鋼にして同様に目標を達成することを確認し、実用化に向けた低廉化およびリサイクル性の目処を得た。

曲げ、プレス成型、高速曲げ、高速軸圧壊、水素脆化などの試験により、従来、高強度鋼の課題であった加工性や耐水素脆化性が複層化により大きく改善できること、衝突安全性部材として複層鋼板が極めて高い性能を示すことを確認した。

製造プロセスに関しては、熱間、冷間圧延いずれのルートにおいても複層化の実現を確認する一方、界面形成の基礎検討から温間圧延を用いることで層間溶質拡散および必要圧下率を抑制しつつ製造可能である見通しを得た。溶接性についてはスポット溶接、レーザー溶接、摩擦攪拌溶接の基礎検討を行い、信頼性評価ではレーザー超音波法による非接触評価技術の目処を得た。

2. 複層鋼板の界面特性および力学挙動に関する研究

層間界面強度を界面のピール試験ならびに界面を含むマイクロ破壊試験から評価する手法を確立し、複層鋼板の必要界面強度を導出するとともに、界面強度発現を詳細に検討した。

複層鋼板の多軸変形特性、成形限界を評価し、これを基にプレス成型性、高速変形、疲労の数値解析を行い、実験的検討で得られた優れた性能を数値解析からも確認した。また、材料の力学挙動の解明に関しては、微視的には、マイクロ・ナノグリッド法、モアレ法、画像相関法を用いた解析技術を確立し、結晶学的解析と併せて検討を進める一方、フェーズフィールド法、有限要素法による変形のモデル化、中性子回折による変形中の各層の応力分配解析などにより、マクロな解析も進め、マルチスケールで複層鋼板の力学挙動を解明した。

3. 複層鋼板の界面組織の解析およびモデル化に関する研究

高分解能 STEM, EBSD により複層鋼界面の構造・組織を明らかにするとともに、金属ヘテロ界面の形成の素過程を界面活性化接合法によって明らかにした。原子間ポテンシャルの構築により分子動力学法による fcc/bcc 異相界面のモデル化を行い複層界面の安定性を検討した。また、界面の層間拡散を抑制する各層設計を ThermoCalc により検討し、複層鋼板の実設計に活用した。

4. 複層鋼板の実用化検討

複層鋼板の実用化に向けた知財調査を行い複層鋼板の独自性を確認するとともに、自動車に適用した場合の衝突解析、部材成型解析、疲労解析から実適用の有効性を示した。

(6) 独創性・優位性について

材料の複層化は、脆性材料の高靱化などを旨とした複合材料が以前よりあるが、金属-金属の複層化で強い界面を前提として高強度と高延性の両立を目指した検討は従来無い。高延性化のための複層の界面、構成材料、複層の幾何学のマルチスケール設計基準は本プロジェクトによって初めて確立したものである。

また、複層鋼板の特性ターゲット、強度 1200MPa 以上、伸び 20%以上は、現在、世界中で開発競争が激しい第三世代の高張力鋼(HSS)の開発ターゲットを凌ぐ。米国の DOE、大学、国立研究所、欧州の大学および鉄鋼メーカー、中・韓の大学および鉄鋼メーカーが、様々なアプローチからその開発を進めているが、依然その途上であり、本プロジェクトは材料特性および実用化検討の点で明らかにそれらに先行・優越している。これまで本プロジェクト成果は、基礎検討を中心に対外発表してきたが、海外特許出願も完了し、今後は材料特性としての発信を行っていく。

さらに、複層化によって、非常に脆性的な超硬質のマルテンサイトの引張応力下での高延性化が可能になったが、これは鉄鋼材料の長い歴史の中で極めて画期的である。従来、マルテンサイトは硬質・脆性ゆえに焼入れままの適用はできず、実際の適用では焼戻しの軟化熱処理が必須であり、それでもなお強加工を要求される鋼板には適用できなかったが、複層鋼板によって焼入れの超硬質ままで強加工用の鋼板に適用可能となった。これによって、今後の超高強度の鉄鋼材料の可能性が飛躍的に拡大する。同時に、極めて高い転位密度と固溶炭素を含み結晶学的に異方性の強いマルテンサイトが、引張りの応力下でどのように変形するかは、これまで十分解明されておらず、金属材料系の材料科学として大きなインパクトを持つ。本プロジェクトで、初めて、広い変形歪み範囲で詳細な変形挙動の解析が進んだが、その検討と成果については今後も継続して発信していく。

7. 研究成果の発表状況（本課題で得られた成果と一部本課題を利用して得られた成果を分けて記載のこと）

<主として本課題で得られた成果>

(1) 研究発表件数

- ・ 査読付き論文：40件
- ・ 査読無し論文等：9件
- ・ 口頭発表：132件（国内：87件、国際：45件）

(2) 知的財産権等出願件数(出願中含む)

7件（国内：6件、外国：1件（米・欧・中・韓））

(3) 受賞等

2件（国内：2件、国際：0件）

<一部で本課題を利用して得られた成果（本課題の資金、枠組みにおける成果を利用しているが、主として他の資金等により得られた成果）>

(1) 研究発表件数

- ・ 査読付き論文：7件
- ・ 査読無し論文等：0件
- ・ 口頭発表：14件（国内：8件、国際：6件）

(2) 知的財産権等出願件数(出願中含む)

1件（国内：1件、外国：0件）

(3) 受賞等

1件（国内：1件、国際：0件）

8. 今後の展望と課題

1) 実用化技術の確立

本プロジェクトでは、従来の鉄鋼材料で達成できない超高強度-高延性領域を可能にする複層鋼板の基盤を確立した。これによって実用的には、移動体の大幅な軽量化に加え、衝突などの高速変形性能の顕著な向上、1200MPa を越える超高強度レベルでありながら優れたプレス成形性を実現できることを示した。

これらの高い性能の確立に加え、実用化に向けては、低廉化、材料製造プロセスの確立、溶接技術、疲労等の信頼性の確保が更に必要である。このうち低廉化については本プロジェクト内で省合金の炭素鋼をベースとする複層鋼板の性能確認を行い、その見通しを得ている。製造プロセスに関しては、金属-金属界面の強度発現に関する基礎検討に基づき温間圧延による複層界面作り込みの可能性を実験的には確認しており、今後は実際の圧延プロセスへの展開と実スケールでの検証を行う。また、溶接技術については、本プロジェクト内でスポット溶接、レーザー溶接、摩擦攪拌溶接 (FSW) の溶接性と溶接部基本性能を確認したが、溶接技術の確立には母材構成層の最適化など、追加の検討が必要である。製造プロセス、溶接技術については、プロジェクト後半の研究予算削減により基礎検討に留まったが、今後の検討継続により実用化は可能と考える。信頼性、特に疲労特性に関しては、構造体としては溶接技術の確立を待つ必要があるが、部材の疲労特性は複層鋼板の特性をもとに数値シミュレーションを行った結果、実用上の問題なく優れていることが示唆されている。またレーザーAE など非破壊非接触の信頼性評価技術は本プロジェクト内で既に見通しを得ている。

2) 経済的および社会的波及効果

複層鋼板による主要な経済的及び社会的効果は、① 移動体の大幅な CO₂ 削減及び省エネルギーへの寄与、② 劣質資源や再生資源の大量活用、省合金による資源戦略への寄与、③ 多様な構造体の軽量化や安全、環境性能への寄与、が挙げられる。

①については本プロジェクトで評価したように、複層鋼板を自動車の構造部材に適用した場合、衝突性能を確保しながら 30%以上の構造体の軽量化が可能であり、大幅な CO₂削減が期待される。また現状の自動車製造で用いられるホットスタンプなどのエネルギー及び CO₂も削減できる。

②については、複層鋼板は界面及び複層設計により脆性硬質層の高延性化が可能になることから、世界的な鉄鋼資源の争奪の中で劣質化する素材や国内余剰の老廃スクラップから高性能鋼の製造が可能になる。また、合金元素としてレアメタルを使わない高性能鋼製造も可能でなる。省資源とともに、スクラップの大量活用によって高炉 CO₂の大幅な削減にもつながる。

③については、複層鋼板の基本概念を厚鋼板や鋼-非鉄の複層化へ展開することによって、高強度-高靱性の両立、非鉄合金の高強度化と高剛性化が期待され、構造体の軽量化、安全や環境性能の向上を図ることができる。

これらの鉄鋼をベースとした構造材料の高性能化と新たな展開を通して、中国をはじめとする BRICS 諸国、韓国などの追い上げが厳しい中、自動車をはじめ日本の産業競争力を強めつつ、低炭素で持続可能、安心安全な社会の構築に向けて貢献できると考える。

9. 特記事項

本プロジェクトは、参加 6 機関の産学官連携に加え、産業界の様々な協力を得て推進した。製造に関しては、初期に参加の特殊金属工業株式会社をはじめ、複数の圧延メーカー、製鉄機械メーカーと試作や実用化に向けた議論を進める一方、複層鋼板の必要特性や適用可能性に関して自動車メーカーや重工メーカーから様々なアドバイスを得るとともに衝突模擬の高速変形試験などの技術的な支援を得た。また本プロジェクトのシンポジウムや成果報告会、学協会での発表では、産業界からは様々な関心が寄せられた。