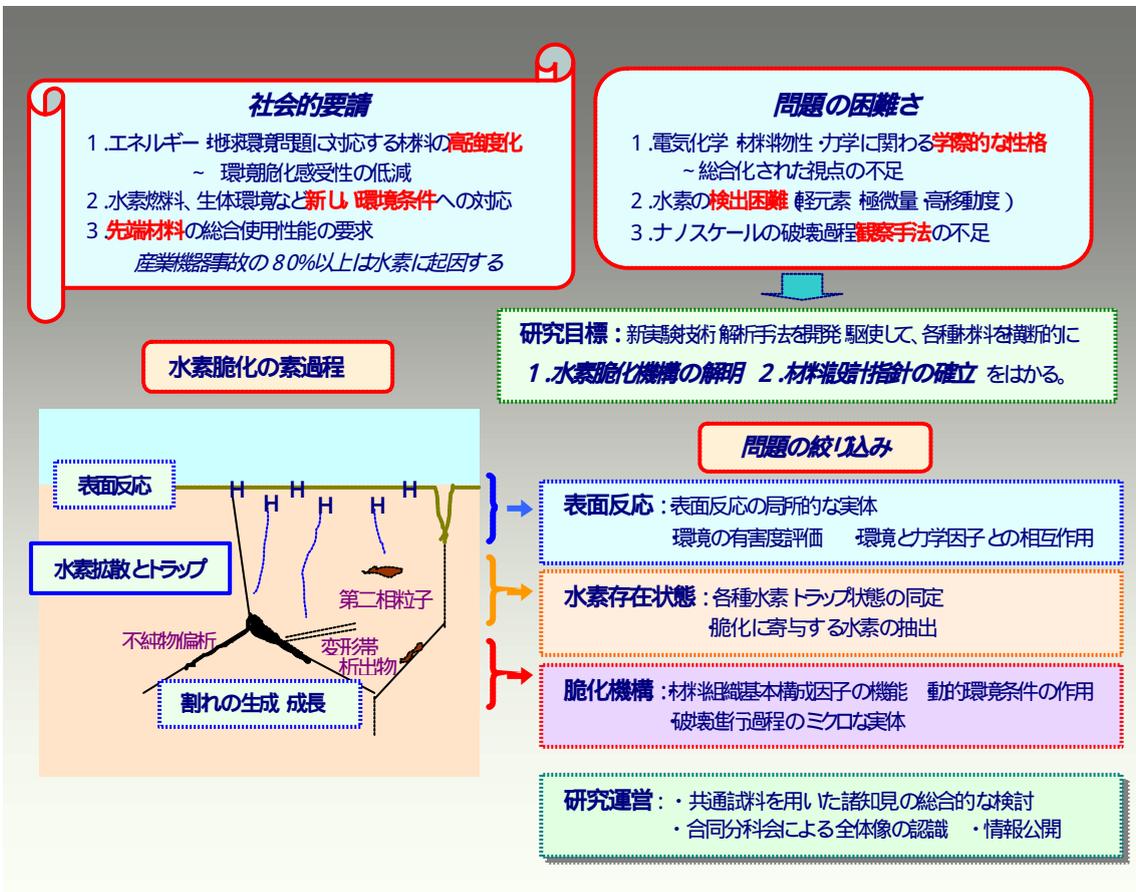


「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」

(第 期 平成 13 年 ~ 平成 14 年)

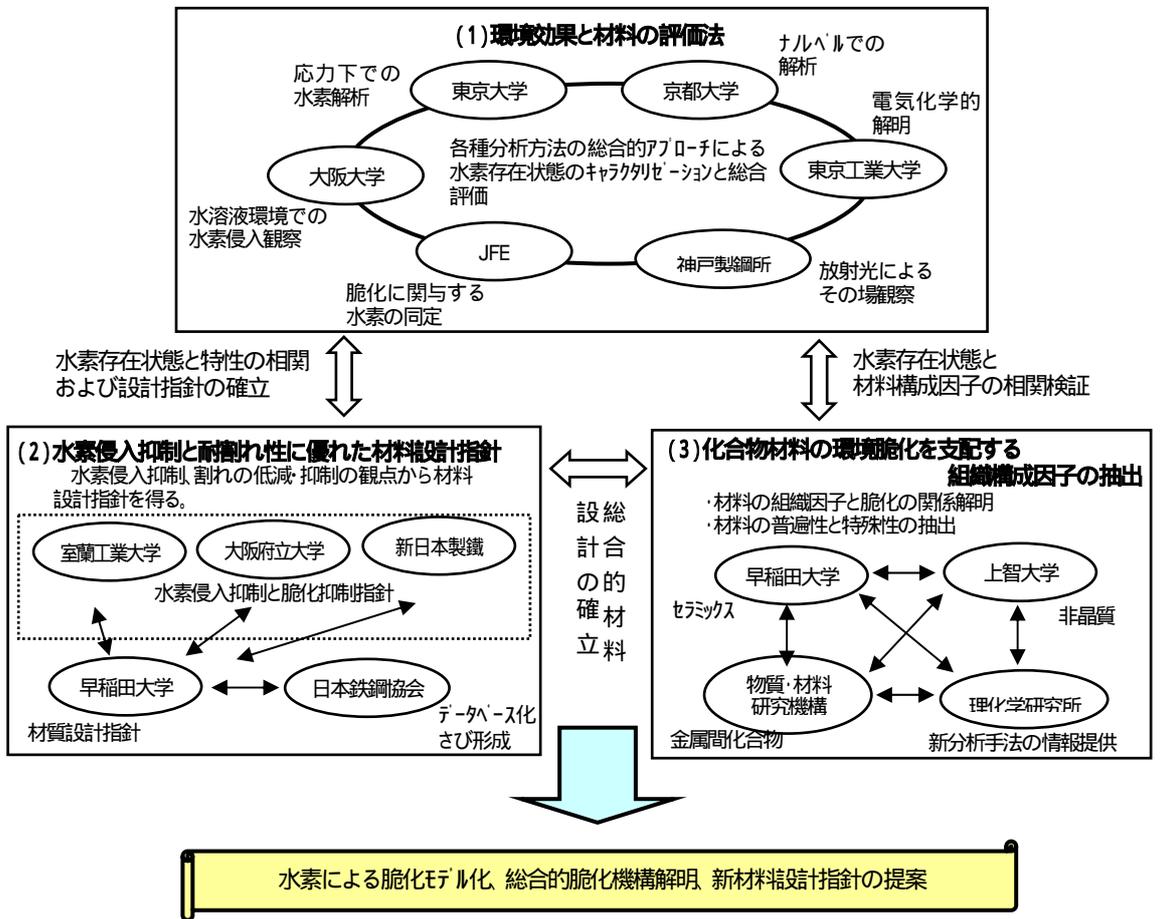
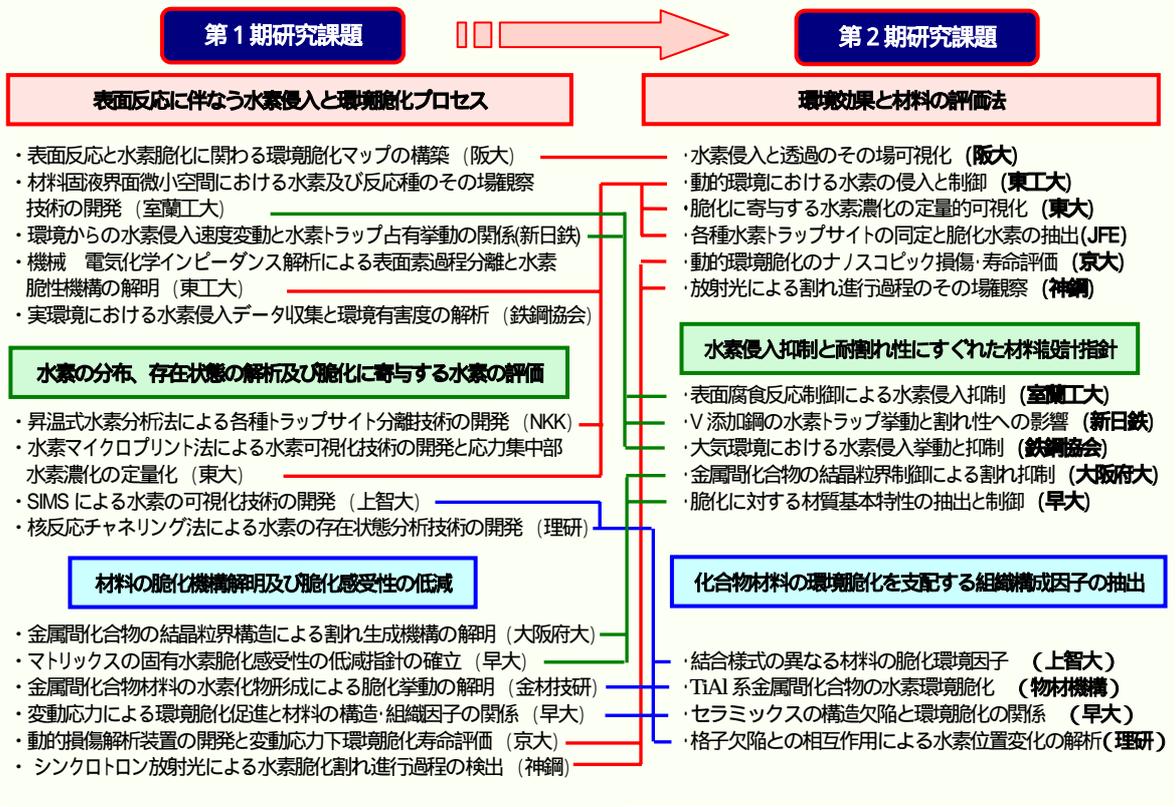
研究代表者：南雲 道彦(早稲田大学) 他 1 4 機関

研究の概要・目標	諸外国の現状等	研究進展・成果がもたらす利点
<p>1. 研究目標</p> <p>(1)背景：材料の高強度化・高機能化 水素脆化(外的破壊因子)感受性の増加 材料の安全性・信頼性の確保が必要</p> <p>(2)目標 第 期：水素分析手法の確立、水素量と破壊の関連 第 期：水素脆化モデルの構築及びメカニズムの体系化、材料設計指針の提言</p> <p>2. 研究内容 先端高度分析手法を材料中の水素観察に適用し、(1)水素の外部からの侵入過程、(2)材料中での存在状況、(3)水素による材料破壊メカニズム解明、を行い体系的、普遍的な材料の水素脆化に関する基礎的研究を実施。</p> <p>3. 研究の新規性</p> <ul style="list-style-type: none"> 脆化の主要因である水素の微小検出・分析 技術の確立 水素侵入から破壊に至る過程を総合的に体系化して研究を展開 	<p>1. 諸外国の現状</p> <ul style="list-style-type: none"> 表面科学、分析技術等の基礎的要素技術については欧米が優位な部分あり。 各材料の脆化現象や実環境を想定した材料強度評価法の研究はでも行われているが、水素による脆化メカニズム解明に基づく材料設計・評価設計の研究は行われていない。 <p>2. 日本の水準</p> <ul style="list-style-type: none"> 水素脆化機構の研究からその対策に関する材料設計、製造に係わる研究は鉄鋼材料を主体に日本が圧倒的に優位である。 	<p>1. 世界水準との関係</p> <ul style="list-style-type: none"> 新理論・新技術による環境脆化研究での国際的リーダーシップの維持 高強度化・高機能化材料の製造技術の優位性確保 <p>2. 波及効果</p> <ul style="list-style-type: none"> 環境脆化を低減させる新材料の開発・実用化および既存材料での材料設計指針の提案 材料の付加価値向上 今後開発される各種材料に対し、信頼性、安全性を加味した材料評価の提案 社会資本等の安全性・信頼性確保 水素の侵入、材料中の存在状態、破壊機構解明を総合化することにより、表面科学、材料科学、力学の各分野の融合が出来、環境脆化以外にも新たな機能性材料の創製への展開が期待。



「構造材料の環境脆化における水素の機能に関する研究」

第 1 期から第 2 期への研究体制



所要経費（第 期）

（単位：千円）

研究項目	担当機関等	研究担当者	H10 年度	H11 年度	H12 年度	所用 経費
1.表面反応に伴う水素侵入と環境脆化プロセスに関する研究						
(1) 表面反応と水素脆化に関わる環境脆化マップの構築	大阪大学大学院工学研究科	柴田 俊夫	18,934	23,563	9,744	52,241
(2) 材料固液界面微小空間における水素及び反応種その場観察技術の開発	室蘭工業大学工学部	三澤 俊平	18,060	9,860	6,569	34,489
(3) 環境からの水素侵入速度変動と水素トラップ占有挙動の関係	新日本製鐵(株)鉄鋼研究所	朝日 均	3,528	9,332	5,315	18,175
(4) 機械-電気化学イビータンス解析による表面反応素過程分離と水素脆性機構の解明	東京工業大学工学部	水流 徹	8,060	10,214	12,390	30,664
(5) 実環境における水素侵入データ収集と環境有害度の解析	(社)日本鉄鋼協会	櫛田 隆弘	11,794	15,375	16,293	43,462
2.材料中の水素の分布、存在状態の解析及び脆化に寄与する水素の評価に関する研究						
(1) 昇温式水素分析法による各種トラップサイト分離技術の開発	JFE スチール(株)スチール研究所	白神 哲夫	3,708	10,882	5,122	19,712
(2) 水素マイクロプロット法による水素可視化技術の開発と応力集中部水素濃化の定量化	東京大学大学院工学系研究科	菅野 幹宏	19,035	24,404	10,469	53,908
(3) SIMSによる水素の可視化技術の開発	上智大学理工学部	高井 健一	3,718	10,940	6,839	21,497
(4) 核反応チャリグ法による水素の存在状態分析技術の開発	理化学研究所ユウ科学研究室	八木 栄一	10,626	8,198	6,381	25,205
3.材料の脆化機構解明及び脆化感受性の低減に関する研究						
(1) 金属間化合物の結晶粒界構造による割れ生成機構の解明	大阪府立大学工学部	高杉 隆幸	8,301	10,728	9,366	28,395
(2) マトリックスの固有水素脆化感受性の低減指針の確立	早稲田大学理工学部	南雲 道彦	19,806	24,613	12,975	57,394
(3) 金属間化合物材料の水素化物形成による脆化挙動の解明	物質・材料研究機構	中村 森彦	13,883	13,164	6,199	33,246
(4) 変動応力による環境脆化促進と材料の構造・組織因子の関係	早稲田大学理工学部	堀部 進	17,532	19,157	7,396	44,085
(5) 動的損傷解析装置の開発と変動応力下環境脆化寿命評価	京都大学大学院工学研究科	駒井 謙治郎	19,374	20,586	11,374	51,334
(4) シンクロ放射光による水素脆化割れ進行過程の検出	(株)神戸製鋼所材料研究所	中山 武典	12,779	18,689	25,879	57,347
4.研究推進						
	文部科学省 研究振興局		413	538	807	1,758
合計			189,551	230,243	153,118	572,912

所要経費（第 期）

（単位：千円）

研究項目	担当機関等	研究担当者	H13 年度	H14 年度	所用 経費
1.環境効果と材料の評価法					
(1) 水素の侵入と透過のその場可視化観察	大阪大学大学院工学研究科	春名 匠	21,775	6,219	27,994
(2) 動的環境における水素の侵入と制御	東京工業大学工学部	水流 徹	8,475	7,457	15,932
(3) 脆化に関する水素の濃化の定量的評価	東京大学大学院工学系研究科	菅野 幹宏	12,044	8,985	21,029
(4) 各種トラップサイトの同定と脆化に関する水素の分離	JFE スチール(株)スチール研究所	高橋 和秀	5,905	6,262	12,167
(5) 動的環境脆化のナノスケール損傷・寿命評価	京都大学大学院工学研究科	駒井 謙治郎	21,626	16,495	38,121
(6) 放射光による環境脆化割れ進行過程のその場観察	(株)神戸製鋼所材料研究所	中山 武典	20,579	16,467	37,046
2.水素侵入抑制と耐割れ性にすぐれた材料設計指針					
(1) 腐食表面反応制御による水素侵入抑制	室蘭工業大学工学部	三澤 俊平	9,730	9,306	19,036
(2) 実環境における水素侵入の抑制	(社)日本鉄鋼協会	櫛田 隆弘	20,453	13,954	34,407
(3) 侵入水素による脆化の低減	新日本製鐵(株)鉄鋼研究所	朝日 均	8,259	7,825	16,084
(4) 金属間化合物の結晶粒界制御による割れ抑制	大阪府立大学工学部	高杉 隆幸	9,466	7,876	17,342
(5) 水素脆化を支配する材質基本因子の抽出と材料設計指針	早稲田大学理工学部	南雲 道彦	22,960	10,072	33,032
3.化合物材料の環境脆化を支配する組織構成因子の抽出					
(1) TiAl 基金属間化合物の水素環境脆化とマイクロ組織因子の関係の解明	物質・材料研究機構	中村 森彦	7,797	3,214	11,011
(2) セラミックスの構造欠陥と環境脆化の関係の解明	早稲田大学理工学部	堀部 進	10,556	6,761	17,318
(3) 結合様式の異なる材料の脆化に関する環境因子の抽出	上智大学理工学部	高井 健一	19,210	9,563	28,773
(4) 格子欠陥との相互作用による水素位置変化の解析	理化学研究所ミナト科学研究室	八木 栄一	5,002	4,021	9,023
4.研究推進					
	文部科学省 研究振興局		539	539	1,078
合計			204,376	135,016	339,392

研究成果の概要

総括

第 期研究における要素技術の開発を受けて今期研究を展開した。「**新研究手法**」では材料中の水素存在状態の解析については水素マイクロプリント法による可視化技術の大幅な向上が得られ、また水素昇温分析から材料中欠陥と水素との結合状態を解析する方法が確立され、各種トラップサイトの有害度が検討された。割れ生成進展では原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた環境下でのその場ナノスコピック観察に成功して実体を明確に捉え、また放射光によるマクロ割れその場観察では大幅な分解能の改善が得られた。さらに、新しい ^{11}B イオンビーム核反応チャネリング法により結晶内の水素の存在位置決定が進められ、不純物や水素濃度で変化することを見出した。これらの知見を駆使しつつ、「**全プロセスを統合した材料設計**」への展開では、まず水素侵入に対する環境条件の影響がとくに局所的な電気化学的条件及び表面錆層の変化として整理された。そして実大気環境における鉄鋼への水素侵入の経時変化を明確に捉えるとともに、基礎的な電気化学的解析からそれが錆生成に関連すること、そして水素侵入を抑制する合金元素を見出した。また、力学的変動に伴って水素透過量が変動する電気化学的因子と力学因子との相互作用、逆に環境変動が脆化を促進する新しい現象が見出された。「**割れの生成と伝播**」では鉄鋼について種々の組織因子の機能解明を進めた。そして従来の考えを一新する鉄鋼の水素脆化機構「**塑性歪み誘起原子空孔モデル**」を、破面下の非晶質層を初めて観察して直接的に実証した。これに基づく一般的な材料設計指針として、従来の水素自体ではなく、転位配列の安定性に注目した新しい基本特性評価法を提案した。また、水素脆性と疲労との相乗作用が欠陥生成をとおして起きることを明らかにした。粒界割れを示す金属間化合物については組織因子の機能を基本的に解明するとともに、組織制御と合金設計により金属間化合物の優れた特性を失うことなく環境脆化を抑制する合金成分と組織からなる金属間化合物を具体的に明示した。「**各種材料の横断的な比較**」では、TiAl の高温水素環境脆化が、室温脆化と同じく塑性変形により導入された局所的な水素の集積によって生ずることを明らかにした。また、光ファイバーを含めた多様なセラミックスに対して系統的な調査を行い、環境中の水分はいずれの場合でも強い脆化作用をもつものに対して水素環境では非晶質材料 (石英ガラス) で破壊強度の低下を導くものの、結晶質材料では結合様式を問わず脆化作用がほとんどないことを明らかにした。

サブテーマ毎、個別課題毎の概要

【環境効果と材料の評価法】

本サブテーマでは、まず水素の侵入プロセスの熱力学的条件を明らかにする**環境脆化マップ**をTi合金について構築した。TiAl では電位-pH 図上において、Ti イオン安定領域で固溶水素と水素化物の形成が顕著で、環境脆化感受性が增大する。また、局部水素検出用**走査型レーザー顕微鏡**の分解能、水素検出能の感度・安定性を向上させ、再現性の良い水素分布の可視化が可能となった。鋼材への**水素の侵入過程**については、錆層の乾燥過程で pH が低下し、水素侵入が大きいたことが確認された。さらに、 SO_x 、 NO_x などによる水素侵入量の増加、また乾燥の進行における水素侵入量の低下を明らかにした。すなわち、錆層の pH 低下を抑制することによって、水素侵入量を抑制できる可能性が示唆された。さらに、**弾性変形範囲内の繰返し応力**によって水素透過量が変化することが確認された。材料内の水素局所分布の実験的評価法として、試料から放出される水素を可視化する**水素マイクロプリント法 (HMT)**の改良を行なった。硬膜処理、ニッケルめっきの導入により、HMT の感度を大幅に増加させ、相対湿度 80% 以上とすることで再現性良く高感度に水素を可視化出来た。さらにめっき厚さの制御で高い位置分解能の確保も確認した。侵入水素のうち脆化に寄与する水素を特定するために**昇温放出分析 (TDA)**を進め、各種鋼材の組織因子によるピーク分離解析を行なった。V 添加マルテンサイト鋼では V 炭化物にトラップされた水素は脆化に関与し難いが、試験時間の経過と共に脆化に関与する可能性が示唆された。また各種析出物の水素トラップ挙動を調査し、TDA と組織観察の併用によって水素トラップサイトの分離を検討した。「**割れ過程のその場ナノスコピック観察**」では走査型原子間力顕微鏡 (AFM) と環境槽を有する環境対応型動的試験装置を作製し、動的負荷条件下の環境脆化き裂進展過程の観察に成功した。環境脆化き裂は乾燥空気中き裂より鋭いと、高強度 Al 合金では

一定持続荷重下ではき裂の進展と停留を繰返すのに対して、動的応力負荷下ではき裂は安定的に進展すること、組織などの影響によるき裂の進展・停留を生じ、き裂先端開口変位が変動することが示された。一方放射光による割れ進行過程の**マクロその場観察**では、高分解能カメラ、画像検出装置からなる「割れ進行検出システム」を導入・整備して、時間分解能の向上、X線イメージング画像の三次元(3D)化が可能となり、空間分解能の向上も計られた。その結果、鋼材中のMnSおよびこれを起点とした延性破壊の発生、アルミニウム合金材では人工中空欠陥からのクラック発生およびその進行過程を、屈折コントラスト法を用いて時分割的なその場観察で捉えた。またAl-10%Mg合金においては環境疲労クラックの3Dグラフィックイメージング観察にも成功した。

【水素侵入抑制と耐割れ性に優れた材料設計指針】

本サブテーマでは水素侵入抑制と耐割れ性を改善する二つの観点から総合的に研究を進めた。対象材料としては高強度鋼を中心としながら、最近注目されている金属間化合物、Ti合金も取り上げ、材料としての一般性を追求した。まず**鉄鋼への水素侵入**については、**実大気環境暴露**における水素侵入の経時変化を調べ、錆生成との関係を見出すとともに、長時間曝露で侵入水素量がむしろ減少し、水素量が遅れ破壊の決定因子ではないことを明らかにした。また応力付加による水素量の増加を実環境でも確認され、水素侵入を抑制する材料設計としては合金元素添加効果からC量の増加及びCu添加の効果が有効であることを見出した。さらに様々な鋼種を用いて、**各種腐食環境下**での水素割れ感受性を表面近傍pH、耐孔食性、水素拡散係数、水素侵入量等と関連づけて調べた。その結果、例えば表面酸化膜厚さがみかけの水素拡散係数をとおして割れ性に影響することや、合金元素の効果としては侵入抑制に対してB,N添加による表面反応抑制、Cu時効析出相による水素トラップなどを見出した。耐割れ性については中心課題である**鉄鋼の水素脆化機構**について、塑性変形で生成する原子空孔と水素との相互作用に注目した抜本的な観点から新しいモデルを提案し、破面直下の非晶質化を始めて観察してそれを実証した。**耐割れ性指針**としては転位配列の安定性に基づく基本指針のもとに、析出物、細粒化、粒界相の効果を明らかにするとともに、**V添加マルテンサイト鋼**中の水素挙動が詳細に調べられた。また、疲労や環境変動が水素脆化に及ぼす影響を見出し、材料評価にあたって考慮すべき因子を提案した。さらに、**粒界割れを起こす金属間化合物**については析出物、固溶相の効果を基本的に解明するとともに、合金設計、組織制御、微量不純物などの観点から耐割れ性に優れた新しい金属間化合物を提案した。

【化合物材料の環境脆化を支配する組織因子の抽出】

本サブテーマの目的は、金属間化合物とセラミックスの環境脆化を支配する組織及び環境因子を体系的に把握すること、並びに共通的な基本的情報として水素の結晶格子内位置に及ぼす格子欠陥の効果解明である。**金属間化合物**では、実用化が期待されているTiAl**基化合物**について、高温加工や熱処理により材料組織を制御して水素脆化挙動を調べた。その結果、室温～973Kでの水素ガス中で使用するためのマイクロ組織として、室温での脆化が小さく、高温水素中での破断伸びの大きな組織、たとえば(+ ラス)組織、微細(+ +)組織を提案した。**セラミックス**に関しては、化学結合様式の違い、結晶質/非晶質などの観点から石英ガラスファイバ、アルミナ、炭化ケイ素等、幅広いセラミックスを対象材料として大気、水環境、水素環境が力学特性に及ぼす影響を検討した。その結果、水はいずれの材料においても強い脆化作用をもつものに対して水素環境では**非晶質材料(石英ガラス)**で破壊強度の低下を導くもの、結晶質材料では結合様式を問わず脆化作用がほとんどないことを明らかにした。これらの知見をもとにセラミックスにおける水や水素の存在・トラップ状態や脆化機構が解明された。またセラミックス中の構造欠陥と環境脆化の関係も主としてジルコニアを用いて調査し、多量の酸素欠陥は水素による環境脆化を促進させるものではないことが明示された。さらに導電性セラミックスでは水溶液中陰極チャージ条件下での脆化や不純物元素の存在に依存した水素ガス中脆化が認められた。水素の格子間位置を決定する¹¹B**イオンビーム核反応チャネリング法**を用い、Nb-Mo系合金、Nb-Ta系合金を主対象として不純物濃度、水素濃度、また原子空孔などによって水素位置が異なることを検出し、不純物を含めた格子欠陥と固溶水素との相互作用を明らかにした。

波及効果、発展方向、改善点等

本課題では多くの新しい研究手法が開発され、通説を覆す新しい知見と考えが得られた。これらは基礎的にも、また実的にもさまざまな分野に発展することが期待される。

【新実験・研究手法】

本課題では水素に関連する情報を求めるさまざまな手法が開発された。**材料表面の電気化学状態**及び割れ生成については顕微レーザーラマン分光法、走査型化学顕微鏡、広域走査型高解像度 CCD カメラシステム、走査型レーザー電解顕微鏡などが展開された。この成果として反応サイトにおける環境条件や表面性が抽出され、**表面化学に関連する研究・技術分野**に有力な手法となることが期待される。**材料中の水素の存在状態検出**は本研究の主要特色のひとつである。水素分布の可視化技術が進められ、とくに拡散性水素も高精度の検出が可能になった。また水素昇温分析は単に水素量だけでなく、水素と欠陥との結合状態を定量的に求める手法として発展した。これらの手法は鉄鋼のみならず、**種々の材料に適用可能**で、複数の方法を組み合わせることにより**水素の機能の実体**が捉えられよう。核反応チャネリング法で**格子内水素位置**を検出する方法は、対象材料が限定されるが水素に関しては唯一といつてよい手法であり、基礎的知見としての意義が大きい。半導体中の水素の状態解析にも適用が期待される。また特筆されることは、水素を**欠陥検出のプロブ**として用いる手法の開発である。実際に疲労損傷や塑性変形に伴う欠陥検出に成功したように広い適用性を持ち、さまざまな問題に有力な解明手法となろう。割れの発生・成長過程を**マクロ及びナノスケールでの場観察**する技術の開発も本課題の大きな成果である。破壊過程を従来の仮定から現実的認識へ進めるもので、種々の材料、条件において環境脆化のみならず、いろいろな**破壊現象の実証的理解**が深まることが期待されるとともに、マイクロマシンなど微小要素の環境脆化の研究に有力な手法となろう。これらの技術はマクロ的には求められない**環境効果の評価法**として産業技術に広く適用出来よう。

【水素脆性機構と材料設計指針】

鉄鋼の水素脆性には水素自体ではなく、塑性変形誘起空孔が本質的な役割を果たすといふ新しい機構モデルが実証された。**組織因子の機能**が理解され、脆化感受性に対応する基本特性として例えば応力緩和特性が提案された。他の材料の水素脆性でもいくつか類似する現象が見出されたがデータが少なく、特徴づけのための系統的な研究が必要である。この新機構モデルは、従来見逃されていた原子空孔の関与として疲労破壊などいろいろな破壊現象を統一的に理解する意義を持ち、**破壊現象理解の飛躍的な発展**が期待される。**水素侵入と力学的因子との相互作用**も重要な発見である。機構解明が今後の課題であるが、環境ならびに力学的変動の効果は**材料評価法**として取り入れるべき重要な項目である。また、疲労損傷による水素脆化感受性増大が比較的低温の焼なましで回復することの発見は材料の**遅れ破壊特性や疲労寿命改善法**として工業的な発展が期待される。鉄鋼、金属間化合物について見出された組織因子の機能は**材料設計**に直結するものである。鉄鋼への水素侵入に対する錆層の役割、大気中不純物の関与の発見は**水素侵入抑制**に重要な知見である。その測定手法を含めて鋼材の合金設計や耐環境脆化特性を向上させるための一つの重要な指針である。いずれにせよ**環境及び材料評価法の具体化**はもっとも直近に展開すべき課題である。

【各種材料の横断的な比較】

本課題では鉄鋼、Ti 合金、L1₂ 型金属間化合物、各種セラミックスが取り上げられたが、それぞれの材料研究の歴史的経緯から環境脆化解明の段階が異なる。しかし、水素の存在状態や kinetics に対する種々の格子欠陥や溶質原子の影響、さらに種々の格子欠陥や溶質原子間の相互作用や競合が水素を介して環境脆化特性を変化させることが**共通的に明示**され、水素脆化を抑制する上で重要な視点が得られた。**生体材料**としての TiNi 形状記憶合金の水素脆化で、組織の動的変化が脆化を増大させる現象が見出され、水素脆性の本質として重要な知見であり一層の研究を要する。セラミックスでは環境脆化の有無自体からのスタートであったが、結合様式と環境因子との関係が整理された。環境因子が脆化に作用する機構解明は今後の課題であるが、**セラミックスの使用範囲の拡大**が期待される。とくに**石英系光ファイバー**の破断事故防止および信頼性向上に向けては大きな知見であり、さらに、現在緊急の課題である**燃料電池システム用の構成部品**に対しても金属以外にイオン/共有結合性材料の適用可能性の指針となろう。

研究成果公表等の状況

(1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	第 期 43件	第 期 62件	第 期 129件	第 期 234件
	第 期 37件	第 期 39件	第 期 106件	第 期 182件
国際	第 期 37件	第 期 13件	第 期 39件	第 期 89件
	第 期 38件	第 期 2件	第 期 44件	第 期 84件
合計	第 期 80件	第 期 75件	第 期 168件	第 期 323件
	第 期 75件	第 期 41件	第 期 150件	第 期 266件

(2) 特許等出願件数

第 期 2件 (うち国内 2件、国外 0件)

第 期 0件 (うち国内 0件、国外 0件)

合計 2件 (うち国内 2件、国外 0件)

(3) 受賞等

第 期 0件 (うち国内 0件、国外 0件)

第 期 2件 (うち国内 2件、国外 0件)

1. K. Minoshima, T. Suezaki and K. Komai : "Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, ESIS Award, the Best "Fracture" Paper", 2001, 受賞論文: K. Minoshima, T. Suezaki and K. Komai: "Genetic Algorithms for High-Precision Reconstructions of Three Dimensional Topographies Using Stereo Fractographs", Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, **23**(5), 435 – 444, (2000).
2. 駒井謙治郎 : 平成 14 年度日本機械学会材料力学部門功績賞, 2002.10.13

(4) 主な原著論文による発表の内訳 (* 発表者氏名 ; 発表題目, 文献名, 巻(号), 頁, (掲載年)の順)

国内誌 (国内英文誌を含む)

- (1) T. Haruna, T. Iwata, T. Sundararajan, and T. Shibata: "Environment-Assisted Cracking of Gamma Titanium Aluminide in Aqueous Sulfate Solutions", *Mater. Sci. Eng. A*, **329-331**, 745-749, (2002).
- (2) Yanliang HUANG, Akira NAKAJIMA, Atsushi NISHIKATA and Tooru TSURU ; "Effect of Mechanical Deformation on Permeation of Hydrogen in Iron", *ISIJ Int.*, **43**, 548-554, (2003).
- (3) .K. Ichitani, M. Kanno and S. Kuramoto: "Recent development in hydrogen microprint technique and its application to hydrogen embrittlement", *ISIJ Int.*, **43**, 496-504, (2003).
- (4) T. Yokota and T. Shiraga : "Evaluation of Hydrogen Content Trapped by Vanadium Precipitates", *ISIJ Int.*, **43**, 534-538, (2003).
- (5) T. Misawa, N. Kobayashi, S. Komazaki and M. Sugiyama : "Size Effects of Copper Precipitation Particles on Electrochemical Nanoscopic Galvanic Behavior in Cu-Added Ultra Low Carbon Steel", *Mater. Trans.*, **43**, 1348-1351, (2002).
- (6) S. Komazaki, A. Koyama and T. Misawa : "Effect of Morphology of Copper Precipitation Particles on Hydrogen Embrittlement Behavior in Cu-Added Ultra Low Carbon Steel", *Mater. Trans.*, **43**, 2213-2218, (2002).
- (7) Y. Kaneno, M. Wada, H. Inoue and T. Takasugi: "Effects of Grain Size and Temperature on Environmental Embrittlement of Ni₃(Si,Ti) Alloy", *Mater. Trans.*, **42**, 418-421, (2001).
- (8) T. Nakayama, F. Yuse, Y. Tsubokawa and J. Masui: "Direct Observations of Cracks and Voids in Structural Materials by X-ray Imaging Using Ultra-bright Synchrotron Radiation", *ISIJ Int.*, **43**, 589-596, (2003).
- (9) T. Kushida : "Hydrogen Entry into Steel by Atmospheric Corrosion", *ISIJ Int.*, **43**, 470-474, (2003).
- (10) H.Asahi, D.Hirakami and S.Yamazaki : "Hydrogen trapping behavior in vanadium-added steel", *ISIJ Int.*, **43**, 527-533, (2003).
- (11) D.B. Lee, Y.D. Jang, and M. Nakamura: "High Temperature Oxidation of Ti-47%Al-1%Mn Alloy", *Mater. Trans.*, **43**, 2531-2535, (2002).

国外誌

- (1) K. Ichitani, S. Kuramoto and M. Kanno: "Quantitative Evaluation of Detection Efficiency of Hydrogen Microprint Technique Applied to Steel", *Corrosion Science*, **45**, 1227-1241, (2003).
- (2) K. Tanaka, K. Minoshima, W. Grela, and K. Komai: Characterization of the Aramid/Epoxy Interfacial Properties

- by means of Pull-out Test and Influence of Water Absorption, *Composites Sci. Tech.*, **62**, 2169 – 2177, (2002).
- (3) Y. Kaneno, T. Nakamura, H. Inoue and T. Takasugi: 『Effect of Precipitated Co Solid Solution on Moisture-Induced Embrittlement of Co_3Ti Ordered Alloys』, *Acta Mater.*, **51**, 2113-2123, (2003).
- (4) T. Tsuyumu, Y. Kaneno, H. Inoue and T. Takasugi: 『Microstructural Effect on Moisture-Induced Embrittlement of Isothermally Forged TiAl-Based Intermetallic Alloys』, *Metallur Mater. Trans. A*, **34**, 645-655, (2003).
- (5) T. Nishiue, Y. Kaneno, H. Inoue and T. Takasugi: 『The Effect of Lattice Defects on Hydrogen Thermal Desorption of Cathodically Charged Co_3Ti 』, *Intermetallics*, **11**, 817-823, (2003).
- (6) M. Nagumo and H. Matsuda: 『Function of hydrogen in intergranular fracture of martensitic steels』, *Phil. Mag. A*, **82**, 3415-3425, (2002).
- (7) M. Nagumo, T. Ishikawa, T. Endoh and Y. Inoue: 『Amorphization associated with crack growth in hydrogen-charged ferritic steel』, *Scripta Mater.* **49**, 837-842, (2003).
- (8) K.Takai, Y.Chiba, K.Noguchi, and A.Noze: 『Visualization of Hydrogen Desorption Process from Ferrite, Pearlite and Graphite by Secondary Ion Mass Spectrometry』, *Metall. Mater. Trans. A*, **33A**, 2659-2665, (2002).
- (9) S. Horibe: 『Fatigue of Ceramics』, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier Science Ltd., 2963-2967, (2001).
- (10) E. Yagi, S. Koike, T. Matsumoto, T. Urai, N. Tajima and K. Ogiwara: 『Site occupancy change of hydrogen in Nb-Mo alloys with Mo concentration』, *Phys. Rev. B*, **66**, 024206-1 - 024206-7, (2002).

⑤ 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor	サブテーマ1	サブテーマ2	サブテーマ3	合計
1. Physical Review B	3.070	0	0	1	1
2. Acta Materialia	2.658	0	1	0	1
3. Philosophical Magazine A	1.532	0	1	0	1
4. Intermetallic	1.239	0	1	1	2
5. Metall. Mater. Trans. A	1.273	0	2	1	3
6. Scripta Materialia	1.168	0	1	0	1
7. Materials Science and Engineering A	0.978	1	5	5	11
8. Materials Transactions	1.056	0	2	1	3
9. ISIJ International	0.980	6	5	4	15
10. J. Alloys and Compounds	0.953	0	2	0	2
11. J. Mater. Sci. Lett.	0.489	0	0	1	1
12. International J. Fatigue	0.957	0	0	1	1
13. Fatigue & Fractures of Engineering Materials and Structures	0.639	1	0	0	1
14. Metals and Materials International	0.256	0	1	0	1
15. J. Composite Science and Technology	1.021	1	0	0	1
16. Materials Science Forum	0.461	1	0	0	1
17. Corrosion Science	1.021	1	0	0	1
18. Biomaterials	2.489	0	1	0	1
19. J. Biomedical Materials Research	2.105	0	1	0	1
20. 日本金属学会誌.		2	0	0	2
21. 鉄と鋼	0.418	0	2	0	2
22. 日本機械学会論文集 A		1	0	0	1
23. まてりあ		1	0	0	1

サブテーマ1：環境効果と材料の評価法

サブテーマ2：水素侵入抑制と耐割れ性に優れた材料設計指針

サブテーマ3：化合物材料の環境脆化を支配する組織因子の抽出