



特集連載 大学紹介 (21)

北海道科学大学

寒地先端材料研究所

北海道科学大学工学部

堀内 寿晃	Toshiaki HORIUCHI
見山 克己	Katsumi MIYAMA
吉田 協繁	Kanou YOSHIDA
齋藤	Shigeru SAITOU

田沼 吉伸	Yoshinobu TANUMA
前田 憲太郎	Kentarou MAEDA
鈴木 和彦	Kazuhiko SUZUKI

1. はじめに

北海道科学大学は、1967年に北海道工業大学として設立され、学部学科再編に伴い2014年4月に現在の大学名に名称変更を行なった。現在は、工学部、保健医療学部、未来デザイン学部の3学部・12学科で構成されており、「科学的市民」の育成」「時代の要請に即したプロフェッショナル教育」「地域社会への貢献」を基本理念として教育研究を行なっている。またこれにあわせて、地域的特性に着目した研究を展開することを目的として、従来の垣根を越えた学部学科横断型の研究を推進するため、2015年度までに4つの研究所を設立した。現在、「寒地環境エネルギーシステム研究所」「寒地ヒューマンサポートシステム研究所」「地域社会創生研究所」「寒地先端材料研究所」の4研究所が活発に活動中である。本稿では、寒地先端材料研究所について、その概要と研究活動について紹介する。

北海道科学大学寒地先端材料研究所は、ものづくりの基盤である先端材料・材料加工領域、半導体・電子デバイス材料領域および建築構造材料領域の研究拠点を形成し、寒冷地に適合する先端材料およびその技術に特化した研究グループの構築および活性化を目的に、2015年4月に設立された。英語名称は Laboratory of Advanced Materials for Cold Region であり、前半の頭文字をとって「LAM」と略称される。本学が位置する北海道の地域特性に立脚し、機械・建築などのものづくり材料系、半導体・電子デバイス材料系、生体材料系の各領域で生じる、材料を取り巻く様々な課題を解決するため、本学が有する知的・人的資源を有効に活用し、地域社会や人への貢献に寄与することを目指している。このために掲げた活動重点項目は以下の通りである。

1. 寒冷地における利用とその特有課題を想定した先端

材料、半導体・電子デバイス材料、建築構造材料およびその技術に関する基礎・応用研究の推進

2. 先端材料の工夫から想定される自然エネルギーと省エネルギーに貢献するエネルギー材料や保健医療系分野の生体材料に関する基礎・応用研究の推進
3. 全学共通利用施設 (SEM-EPMA、XRD、蛍光X線分析装置、携帯型成分分析計など) を効果的に活用し、研究の質の向上のための高度な材料分析支援
4. 産学官との連携を推進し、地場企業のニーズや将来展望を見据えた共同研究を通じて、「ものづくり」と「地域づくり」を一体化した「実学的な知の拠点」の実現
5. 研究を通じた実学的学びを地域産業の活性化に活かそうとする人材の育成

研究所の構成員は、2016年3月現在、機械工学科所属の材料・加工系から4名、建築学科の建築構造物系から2名、電気電子工学科の電子デバイス材料系から1名の計7名である。7名の研究員が共同で、あるいは単独で取り組んでいる最新研究内容について、次節以降で紹介する。

2. 研究内容の紹介

当研究所で現在取り組んでいるテーマは、大別して「ものづくり材料系」と「半導体・電子デバイス材料系」に分類される。ものづくり材料系は材料設計・開発から加工・溶接、非破壊検査に至る幅広い分野に関して、材料・加工系と建築構造物系のメンバーが研究を進めている。半導体・電子デバイス材料系は電子デバイス系と材料・加工系のメンバーが化合物半導体物性やプリント配線板高密度化に取り組んでいる。研究所は5研究室から構成されており、以下にそれぞれの研究内容概要を紹介する。

2.1 マテリアルデザイン研究室

(工学部 機械工学科 教授 堀内寿晃)

マテリアルデザイン研究室では、新材料開発の際の地図とも言える平衡状態図研究を基軸に、2元系合金の基礎研究から原子力発電プラント材料の高経年化対策に至るまで、他大学や企業と積極的に共同研究を行なっている。毎年本学への交換留学生をゼミの一員として数週間招いたり、ドイツのマックスプランク鉄鋼研究所に大学院生が短期滞在して研究したりするなど、国際交流にも積極的である。現在主として推進している研究テーマは以下の5テーマである。

(1) 原子力発電プラント材料の高経年化対策

福島第一原発の事故を受け、原子力発電プラント材料は、顕在化していない劣化事象に対しても機構論的に発現の可能性が考えられるものについてはプロアクティブに対応することの重要性が国際的に強く認識されてきている。照射による2相ステンレス鋼の熱時効脆化加速については知見が少なく、照射による時効加速の有無、照射量、材料成分の影響等も不明なため、本研究では「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」の一環として、熱力学平衡計算に基づき、照射下における時効組織変化予測技術の開発を目指している。

(2) bcc 高濃度固溶体ベース超耐熱材料創成

二酸化炭素排出量の削減に向けて、LNG火力発電のさらなる高効率化が進められており、強度、韌性、耐酸化性に優れた材料が求められている。本研究では「先端的低炭素化技術開発（ALCA）」の一環として、既に実績のある「化合物による強化」、「組織制御による韌性改善」を継承しつつ、bcc 固溶体合金を高合金化することによって新たな物質群としての「耐火金属基 bcc 高濃度固溶体」への展開を図っている。

(3) 高効率火力発電プラント用耐熱鋼の開発

石炭火力発電所の蒸気タービンブレード長翼にはチタン合金が用いられている。チタン合金は優れた比強度と耐食性を有する反面、難削材であることや高価であるなどのデメリットもある。本研究では石炭火力発電のさらなる高効率化のために、材料の組成、熱処理方法、残留オーステナイト量を制御することで、チタン合金の代替材料となる、強度と韌性のバランスに優れたマルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼の開発を目指している。

(4) シンクロ型長周期積層構造相を有するMg合金の平衡状態図の精緻化

近年、我が国で開発されたシンクロ型長周期積層（LPSO）構造相を有するマグネシウム（Mg）合金は、極めて高い強度と優れた延性を兼備することから世界中から注目を集めており、実用化への期待が高まっているが、LPSO相については、その形成メカニズムや平衡状態図に未解明な部分が多く残されている。本研究ではこの新しいMg合金の早期実用化とシンクロ型LPSO構造物質の形成メカニズムの解明に資するため、実験的に本合金の平衡状態図の精緻化を図ると共に、得られた情報から汎用的な熱力学データベースを構築することを目指している。

(5) Co-Nb 2元系合金の実験的基礎研究

Co-Nb 2元系合金に平衡相として存在する金属間化合物の Nb_2Co は、複雑な結晶構造を有し、平衡相であるにもかかわらず生成も分解も非常に遅いという特徴がある。一方で Nb 過飽和の Co 固溶体からは、条件が整えば不連続析出によって Nb_2Co が急速に析出し、隕鉄にみられる Widmanstätten 構造に似た特徴的な組織を呈することがわかっている。本研究ではドイツのマックスプランク鉄鋼研究所と共同で、この現象のメカニズム解明を目指している。

2.2 機能加工研究室（工学部 機械工学科

教授 見山克己、助教 吉田協）

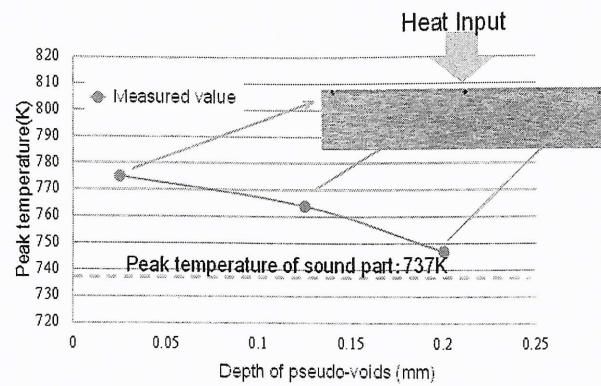
機能加工研究室は、機械要素部品や電子デバイスの高機能化のための加工技術について、ナノスケールからマクロスケールに至る様々な加工や非破壊検査技術について研究を進めている。以下に主要な研究テーマを紹介する。

(1) サーモグラフィを用いた微小欠陥の非破壊検出

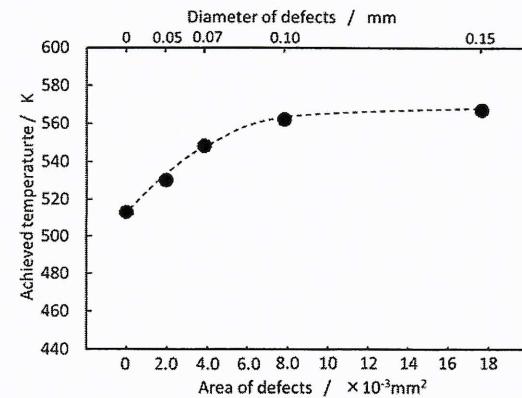
機能性付与表面コーティングや CFRP 等の複合材料には必然的に異種材料界面が存在する。この界面に微小な剥離やボイドを内在する危険性は完全には払拭できないことが多く、品質保証の観点からはこれらを非破壊で検出する手法が求められる。従来使用してきた代表的な非破壊検査手法は浸透探傷試験や超音波探傷試験等であるが、これらは被膜直下の微小欠陥を検出するには適さない。一方近年では X 線 CT 技術やテラヘルツ波測定など、微小欠陥に有効な新技術が実用化されつつあるが、被検体表面近傍の欠陥を対象として、かつ様々な材質に

対応すること（密度、結晶構造、導電性、磁性等）を想定した場合にはそれぞれ課題を有する。このため現状では、表面近傍の微小欠陥検出に対して有効な手法が存在しないのが実情である。これを解決することとあわせて、タービンブレードのような三次元複雑形状の表面近傍を非破壊検査することを想定し、われわれは熱の過渡応答挙動から微小欠陥を検出することを試みた。熱過渡応答を利用するメリットは、被検体材質と欠陥との間に熱伝導率や比熱などの熱的物性の差異が存在しあえすれば原理的には検出可能のことである。物質の密度や結晶構造には依存せず、また熱源や測定方法を適切に選択することにより、微小領域から広範囲の測定まで幅広く対応できることも利点である。

測定には、熱源として波長 $1.07\mu\text{m}$ のファイバーレーザを用いた。このレーザヘッドは多関節ロボットで制御され、複雑な三次元形状に追随することが可能である。また大面積の測定を目的としてキセノンフラッシュランプによるパルス加熱を併用した。温度測定に用いたサーモグラフィ赤外線カメラの仕様は、フレームレイト毎秒 3600 フレーム、空間分解能 $150\mu\text{m}$ である。測定実験には、軟鋼表面にニッケルめっきを施し、めっき直下に人工欠陥を配置した試料を用いた。この際に、欠陥深さと大きさを変化させ、それぞれについて熱応答挙動により欠陥深さおよび大きさを検出可能か検討した。図 1(a) に欠陥深さと測定温度の関係を、(b) に欠陥サイズ（面積・直径）と測定温度の関係を示す。(a) の測定に用いた試料は、3箇所に人工欠陥を設け、ニッケルめっき最表面からの深さをそれぞれ 0.025mm 、 0.125mm 、 0.200mm とした。これに対してレーザスポット加熱を行い、加熱終了直後の最表面温度をサーモグラフィで測定した。いずれも健全部に比べ欠陥部で高い温度を示しており、また深さに依存して $10 \sim 20\text{K}$ ほどの有意差が認められた。一方 (b) の試料はめっき被膜直下に 8 箇所の人工欠陥を設けた。深さは同一とし、欠陥径を $\phi 0.05\text{mm} \sim \phi 0.15\text{mm}$ まで変化させた。測定方法は (a) と同様とした。欠陥サイズに依存して測定される表面温度は上昇することが確認できた。以上の結果から、表面加熱による欠陥部の熱応答挙動測定により、被膜直下の微小欠陥について、その大きさや深さを同定することが可能であることが確かめられた。今後は、測定時間短縮のため、大面積加熱による欠陥位置同定と、スポット加熱を用いた大きさ・深さ同定を組み合わせたシステムの開発が課題である。



(a) 欠陥深さと試験体表面温度の関係



(b) 欠陥サイズと試験体表面温度の関係

図 1 サーモグラフィによる人工欠陥検出事例

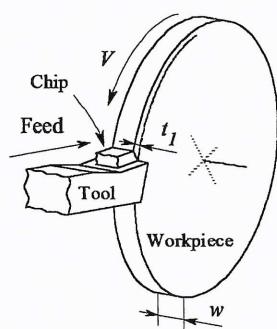
(2) 切削抵抗の簡便な推定計算法の提案

切削抵抗を直接測定することなしに推定しようとする試みが成されているが、実験定数のできるだけ少ない簡便な推定計算法があれば、加工現場において比較的手軽に切削抵抗を確認するためにも有用である。

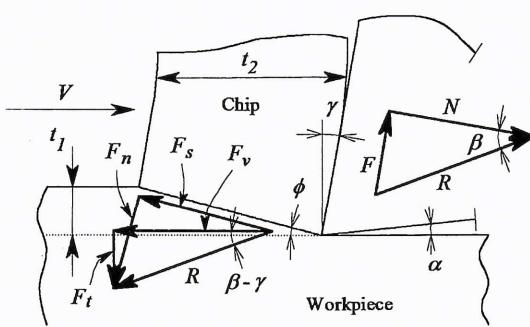
そこで切削性の良好な金属材料を用い、図 2 に示すような基本的な流れ形切りくずの流出する 2 次元切削における切削条件に対する切削抵抗の傾向を改めて考察した。例えば図 3 に示すように切り込みの増加に伴って切削抵抗主分力、背分力は増加傾向を示し、工具すくい角の増加に伴って減少傾向を示す。このように切削条件の変化によって切削抵抗は種々に変化する。

この結果を基に図 4 に示すように切りくず厚さで切削抵抗主分力、背分力を整理した。すると、主分力は切削条件の変化にかかわらず、切りくず厚さに対してほぼ比例関係で整理できるのがわかる。ここから、単位切りくず断面積あたりの主分力の値を切削条件にあまり影響を受けない材料の固有値として扱い、切りくず定数として提案した。

切りくず定数をせん断面モデルにおける切削機構を表



(a) 円盤状被削材の外周切削



(b) 切削因子

図2 二次元切削

F_v	: Principal cutting force
F_t	: Thrust force
F_s	: Shearing force
F_n	: Normal force
F	: Friction force on rake face
N	: Normal force on rake face
R	: Resultant force
t_1	: Depth of cut
t_2	: Chip thickness
γ	: Rake angle
ϕ	: Shear angle
β	: Friction angle
α	: Clearance angle
w	: Cutting width
V	: Cutting speed

す式中に導入すると、2次元切削における主分力と背分力がそれぞれ次のような簡単な関係式によって表現できる。

$$\text{主分力} : F_t = F_v \cdot \tan(\beta - \gamma)$$

$$\text{背分力} : F_v = m \cdot w \cdot t_2$$

$$\text{なお、 } \beta - \gamma = \tan^{-1} \left\{ \frac{m}{\tau_s} \cdot \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi} - \cot \phi \right\} - \phi$$

ここで、 γ は工具すくい角、 τ_s は平均せん断応力、 ϕ はせん断角である。

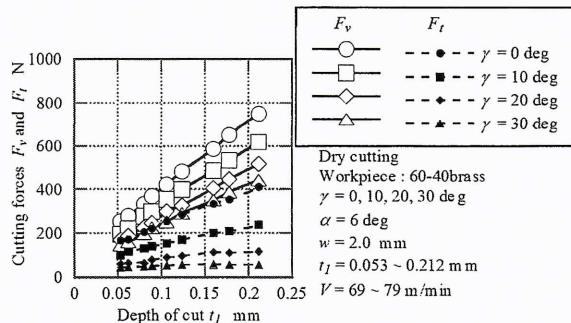


図3 切り込みに対する切削抵抗の関係

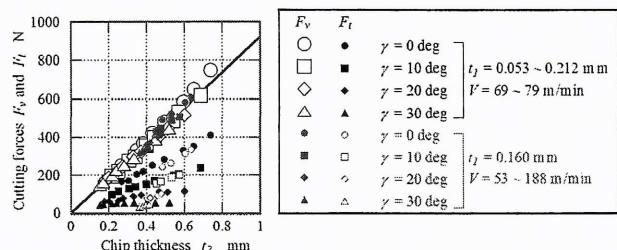


図4 切りくず厚さに対する切削抵抗の関係

2.3 材料システム研究室

(工学部 機械工学科 准教授 斎藤繁)

材料システム研究室は、高島敏行教授と斎藤繁准教授の教員2名体制で運営しているが、2011年に高島教授が本学副学長に就任したため、現在は斎藤准教授を中心となって学部生4名とともに研究活動を精力的に行っており、本研究室の多くの卒業生は多方面で活躍しており、寒地先端材料研究所では卒業生との共同研究や北海道の寒冷地技術に関する研究を積極的に進めていく。以下に、主要な研究テーマを紹介する。

(1) レニウム(Re)基合金状態図の実験的検討に関する研究

合金状態図の作成には膨大な時間を要することが知られているが、本研究室では高融点金属である Re (融点: 3186°C) を含有する合金系の状態図について実験的に検討を行っている。本研究は、文部科学省の特別推進研究(研究代表者: 成田敏夫 北海道大学名誉教授、研究課題: 長寿命・高信頼性遮熱コーティングを実現する拡散バリヤ型ボンドコートの創製、研究期間: 2004~2009年度)において、高島教授が研究分担者、斎藤准教授が研究協力者として参画したのが始まりである。これまでの研究成果として Re-Cr-Ni および Re-Ni-Al 三元系等の合金状態図を作成し、拡散バリヤ型ボンドコートの高温組織安定性について検討を行ってきた。なお、最長熱処理実験は 1150°C で 2500 時間(約 100 日間)である。現在は、図5の写真に示すテトラアーク式引上げ装置を用いて合金試料の溶解および引上げを行い、引上げ後に熱処理実験を施した試験片を使用して合金状態図を作成するとともに、今後は単結晶材料の作製を試みる。

(2) 低温施工下におけるスタッド溶接部の硬さ分布と組織に関する研究

本研究は寒地先端材料研究所の主要な研究テーマの一つであり、卒業研究の一環として本研究室および前田研究室の学部生が共同で研究を行い、定期的に報告会が実施されている。スタッド溶接は、立て込みボルト用の穴あけやタップ立て等の加工工程を経ずに、アーク溶接により相手の母材にスタッドを直接接合することができる。そのため、鋼構造物の加工方法としては時間短縮およびコスト削減につながる。本研究室では、低温施工下でH形鋼にスタッド溶接された試験片の溶接部断面に対してビックアース硬さ測定と顕微鏡組織観察を行っている。

(3) セラミックスと金属の接合に関する研究

アルミナ(Al_2O_3)、窒化ケイ素(Si_3N_4)、炭化ケイ素(SiC)等のセラミックスは様々な優れた特性を持つ反面、複雑な形状に加工することが難しいため、金属との接合技術が不可欠である。本研究室では、メタライジング法や直接ろう付け法による接合方法を用いてセラミックスと金属の接合体を作製した後、接合体の強度や耐食性の評価を行い、さらに接合部断面に対してEPMAによる組織観察および元素分析を実施している。これまでの研究成果が自動車部品等への実用化につながっている。

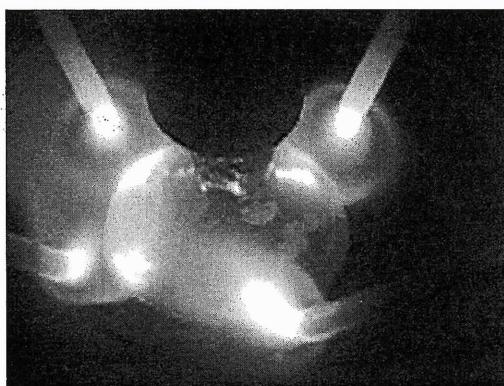


図5 テトラアーク式引上装置を用いた合金試料の溶解および引上げ

2.4 建築鋼構造研究室（工学部建築学科）

教授 田沼吉伸、准教授 前田憲太郎）

(1) 北海道の建築鋼構造の特徴

建築鋼構造の設計・施工における基本的事項に地域による違いはないが、現場で用いられる高力ボルト接合部や溶接接合部で冬期間の設計・施工を行う場合には注意が必要な場合がある。また、鋼構造や木造建築では屋根面が軽いために、屋根面の積雪荷重による影響が鉄筋コ

ンクリート構造に比べて大きくなる。特に、北海道では、畜舎、堆肥舎等の酪農施設や農業関係の倉庫等の施設も鋼構造による設計・施工が多く、豪雪時の被害例も多い。これら冬期間の建築鋼構造の設計・施工に関する諸問題の内、当研究室で実施した高力ボルト摩擦接合部およびスタッド溶接の低温下施工に関する研究事例について以下に紹介する。

(2) 高力ボルト接合部の低温下施工について

国土交通省が毎年公表している月別の建築物の着工床面積統計では、北海道の冬期間の着工は少なくなる傾向にある。これは、冬期間の施工では現場での落下事故防止等の安全面の課題の他に、建築鋼構造では、冬期施工の問題として、高力ボルトを低温下で締め付ける場合に高力ボルトの軸力低下が生じる問題がある。この問題については、実際の接合部を用いた実験例は極めて少なく、図6は当研究室で実施した実験例である。縦軸はすべり耐力の実験値(ePs)を設計耐力(aPs)で除した値で横軸は高力ボルト締め付け時の高力ボルトの表面温度平均値(To)である。試験体は北海道内3社の工場で製作しており、母材表面処理(ブラスト処理)の影響と考えられるばらつきは大きいが、六角高力ボルトの To による初期軸力低下に関する既往研究の評価が、実際の接合部にもほぼ対応することを図中の低下曲線は示している。近年建築分野で一般的に用いられているトルシア形高力ボルトを用いた接合部の実験結果を図7に示す。摩擦面を赤錆面した接合部のばらつきは大きいが、低温下では図6と同様な評価が可能であることを確認した。摩擦面に雪や水分が付着している場合には、氷結によりすべり(摩擦)耐力が低下するため、一般に、冬期に積雪を伴う場合には、接合部母材に付着した雪氷をガス加熱等により除去する必要がある。局部加熱による影響については、熱伝導による高力ボルトの表面温度上昇が期待できるが、図8は外気温0.2°Cの時の接合部の実測例である。

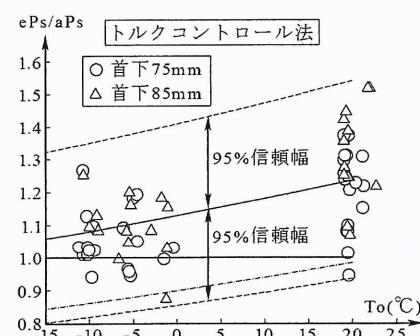


図6 ePs/aPs と To の関係（六角ボルト）

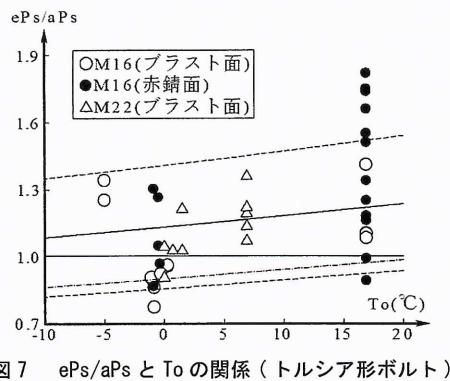


図 7 ePs/aPs と To の関係 (トルシア形ボルト)

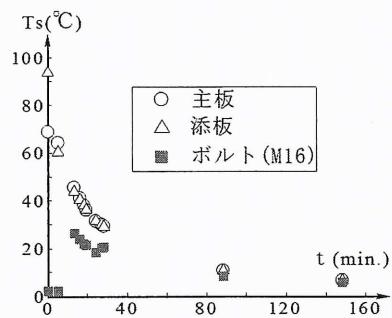


図 8 母材加熱後の各部表面温度 (Ts) と加熱後の経過時間 (t) の関係

(3) スタッド溶接の低温化施工について

北海道などの寒冷地において冬期間施工時には0°C以下となる場合があるが、このような場合にスタッド溶接を行う際は予熱処理を行うことが要求されている。当研究室で行った母材の板厚や形状および施工時の温度を変化させたスタッド溶接部の硬さ分布の結果について紹介する。

試験体の母材に用いた鋼種はSS400、部材はH形鋼はA:H-250×125×6×9、B:H-300×300×10×15、C:H-600×200×11×17の3種、平鋼はD:FB-9である。スタッドの溶接は、部材A、Cはフランジ部の中央（ウェブ上部位置）、部材Bはウェブ上部位置から離れたフランジ部に行った（図9）。施工時の母材温度は、常温（20°C）、5°C、0°C、-5°C、-10°Cを目標とした。スタッド溶接後、溶接部断面のビッカース硬さ試験を行った。

最高硬さと表面温度との関係について図10に示す。凡例は、板厚を示し、塗りつぶしはウェブ上部に溶接した試験体（部材A、C）を示す。ばらつきが大きいが、施工温度の影響はあまり見られない。

最高硬さと母材降伏点 σ_y との関係について図11に、引張強さ σ_u との関係について図12に示す。凡例は、施工温度（ただし5は、5°Cと常温）を示す。ばらつきが

大きいが、降伏点が高い試験体ほど硬さが大きくなる傾向を示している。この要因は、降伏点が高い鋼材は炭素量が多いことが考えられ、炭素当量が大きいほど硬さは大きくなるためと考えられる。引張強さとの明瞭な関係はみられない。

施工温度および板厚を変化させたスタッド溶接部のビッカース硬さを測定し、その最高硬さについて検討を行った結果、本実験の範囲内では施工温度による明瞭な影響はみられず、母材の降伏点が高いほど硬さが大きくなる傾向を示した。

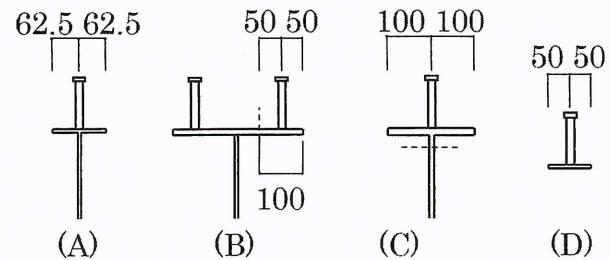


図 9 スタッド溶接位置 (単位:mm)

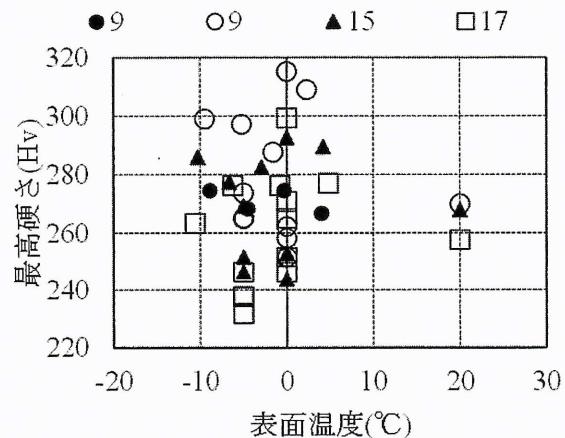


図 10 最高硬さと施工時表面温度の関係

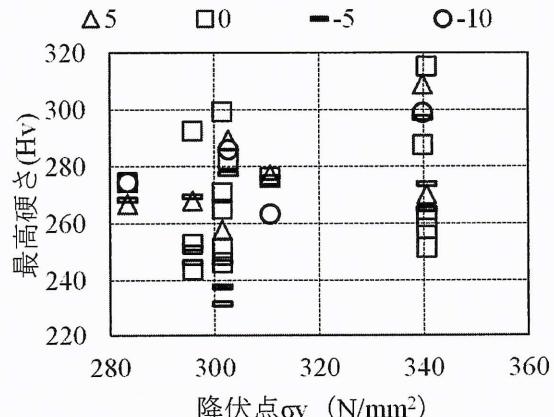


図 11 最高硬さと母材降伏点の関係

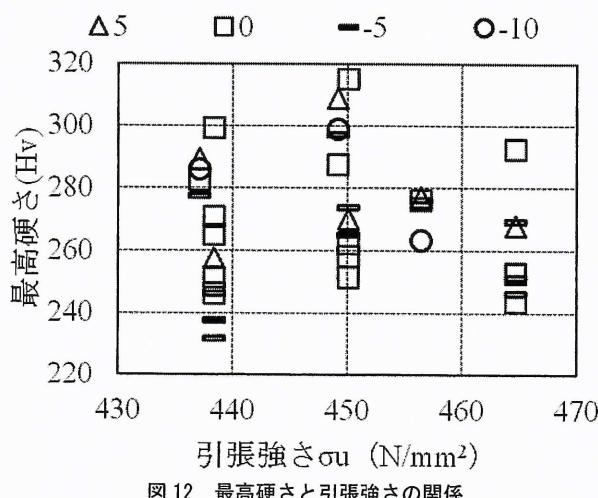


図 12 最高硬さと引張強さの関係

2.5 半導体物性研究室(工学部電子電気工学科 鈴木和彦)

II-VI 族化合物半導体 CdTe は、その物性から室温動作型ガンマ線検出器として優れた特性を示すことが期待され、古く 1960 年代後半から盛んな研究が続いている材料であり、用途によってはすでに実用的な製品として販売される域に達している。青緑色発光デバイスとして期待され、多額の費用が研究開発に投じられた ZnSe とは好対照に、地道な研究の結果、II-VI 化合物単結晶ではほとんど唯一と言って良い実用化された材料である。またこの材料に僅かに亜鉛を加えた Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te も高性能

ガンマ線検出器として実用化されている。

検出器としての特性はキャリア輸送特性におうところが大きく、その評価、改善は高性能化に欠かせない。既に実用化されているとはいっても、物性の解明が実用化に遅れをとっている面も多い。当研究室では CdTe 系材料の光学的性質やキャリア輸送特性など基礎物性の評価を中心として研究を続けている。これまでに、キャリア移動度に支配的な散乱機構とトラップ制限移動に支配的な欠陥の研究、表面再結合速度の評価、モンテカルロシミュレーションによる内部電界分布の評価、ショットキー型検出器のポラリゼーション機構の解明など検出特性の改善に資する研究成果も報告してきた。図 13a は飛行時間法による塩素添加高抵抗 CdTe の電子移動度の温度依存性の測定結果である。図中には音響フォノン散乱 (μ_{ac})、極性光学フォノン散乱 (μ_{po})、イオン化不純物散乱 (μ_{io})、などの電子散乱機構による移動度への寄与の計算結果も示されている。極性光学フォノン散乱が非弾性散乱であるため、計算には線形化した Boltzmann 方程式の数値解法を利用している。計算の結果、散乱機構のみ (μ_0) では実測の温度依存性を説明できず、浅い欠陥準位によるトラップ制限移動度 (μ_d) によって説明されることが示された。正孔についても同様にトラップ制限移動度によって説明されることが図 13 より明らかである。

現在はこれらの知見からキャリア輸送のモデル化、

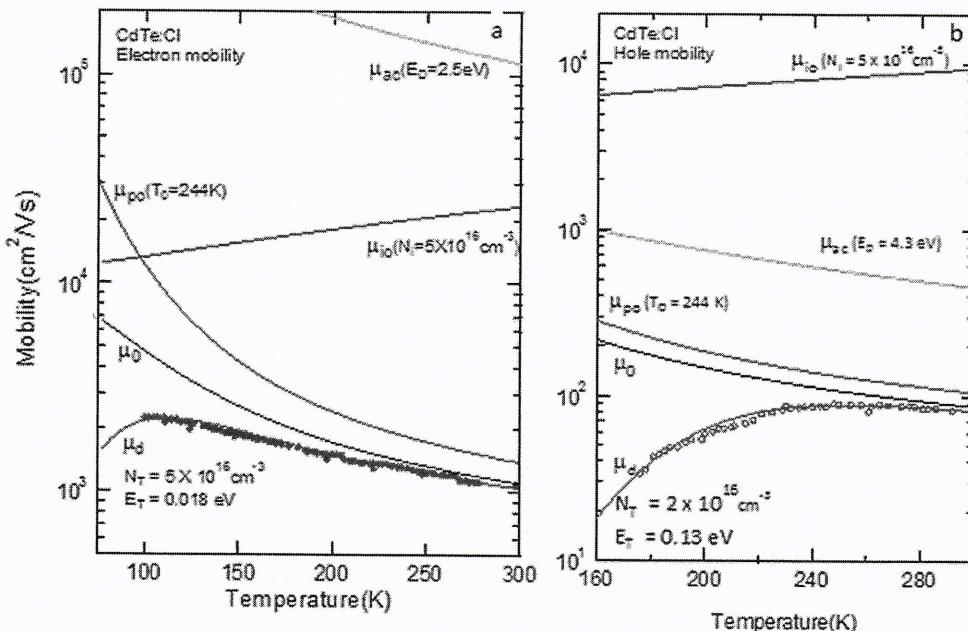


図 13 塩素添加 CdTe 結晶における電子 (a) および正孔 (b) 移動度の温度依存性

Monte Carlo シミュレーションによる過渡電流波形の再現が可能となり、大線量 X 線照射下の検出器内部のキャリア分布、電界分布の動的な解析に関する研究を進めている。

3. おわりに

北海道科学大学寒地先端材料研究所の概要と、個々の研究内容について簡単に紹介した。本研究所は今年度に新設されたばかりであるが、本稿で紹介したとおり既にいくつかのテーマについて研究成果が出つつある。今後は、保健医療系の研究者や自動車工学系の本学短大部と共に、材料や加工の観点から寒冷地特有の課題について取り組むとともに、地域の企業や公設研究機関との連携を深め、本学が目指す「実学的知の拠点」を実現していきたい。

当研究所に興味を持たれた方は、下記連絡先までお気軽にお問い合わせ頂ければ幸いである。

連絡先：

学校法人北海道科学大学 教育研究推進課 研究推進係

TEL 011-688-2241 E-mail kenkyu@hus.ac.jp

(平成 28 年 2 月 10 日)

著者紹介

著者：堀内 寿晃

所属：北海道科学大学 工学部 機械工学科 教授

専門分野：平衡状態図

著者：見山 克己

所属：北海道科学大学 工学部 機械工学科 教授

専門分野：材料加工、非破壊検査

著者：吉田 協

所属：北海道科学大学 工学部 機械工学科 助教

専門分野：材料加工

著者：齋藤 繁

所属：北海道科学大学 工学部 機械工学科 准教授

専門分野：平衡状態図

著者：田沼 吉伸

所属：北海道科学大学 工学部 建築学科 教授

専門分野：建築鋼構造

著者：前田 憲太郎

所属：北海道科学大学 工学部 建築学科 准教授

専門分野：建築鋼構造

著者：鈴木 和彦

所属：北海道科学大学 工学部 電気電子工学科 教授

専門分野：半導体物性