駆け出し研究者として

神 原 淳*

1. はじめに

新たな本カテゴリーで「研究・仕事・将来展望」に関して執筆の依頼を頂き、私に何か紹介できるものがあるものなのか考え込んでおりました。気を取り直し、大辞典を開きますと、「新進」は「新しくある方面へ進出すること」であり「気鋭」は「意気込みの鋭いこと」とあります。どのような進路を選択し、いかなる意気込みを持っていたかを簡単に紹介させて頂くと思えば何かしら伝えられることがあるものと思ひ、引き受けさせて頂くことに致しました。諸先輩の方々の興味に足るものか疑わしいところではありますが、ある駆け出し研究者が研究・仕事についてその時々何を感じ思っていたのか、簡単に紹介させて頂こうと思います。非常に私的な日記調文章であることを御容赦頂きこれまでの短い研究生活を振り返らせて頂きます。

2. 学部時代

私の研究活動は大阪大にて学部4回生の研究室配属とともに始まりました。研究のイロハを持ち合わせない学生も、小林紘二郎先生による懇切丁寧な指導のもとに、メカニカルアロイングによる分散強化合金創製をテーマに新材料創製の可能性をプロセスの観点から検討する事ができました。メカニカルアロイングによるアモルファス形成能およびその後の熱処理によるTiAl合金およびTiB₂添加TiAl合金の結晶粒の熱処理時間・温度依存性を調査して、粒成長の観点から分散強化による高温下での粗大化抑制能、耐熱特性を定量いたしました。卒論締め切り間際には騒ぎながら一週間に100個前後の試料のX線回折を行っていたことを思い出します。この初めての研究生生活を通じて、材料研究の基礎を教授させて頂くと同時に、研究には馬力と体力も要る、しかし何より楽しみながら研究生生活を送るという、いずれもその後の私の研究生生活の礎となる非常に貴重な事柄を体験・勉強させて頂きました。

3. 大学院時代

研究に興味を抱いたことから、また自己満足であれ将来いかなる分野の仕事に携わっても材料屋として認められるだけのモノを身につけたいと考え、大学院進学を決意しました。しかし、新しい環境で新しいものを見てみたいとも思ひ、テーマも場所も変え東京にて大学院生活を始めることにいたしました。東京大では凝固工学研究室に所属し梅田高照先生の指導のもと金属の凝固を勉強し、また幸運にも超電導工学研究所(超電研)の塩原融先生のグループにて研究を進める機会も与えて頂き、主に酸化物超電導体の凝固に関する研究を進めることとなりました。凝固基礎を如何に研究に取り込み考察を加えてゆくか実践面も指導して頂くとともに、非常に活発でグローバルな研究展開を目の当たりにさせて頂き、毎日が刺激的であったことを今でも鮮明に記憶しております。また、超電研では様々な企業から来られた方が研究を進められており、仕事としての研究というものも勉強させて頂きました。

修士課程ではまず酸化物超電導体の平衡状態図の作成を行い、結晶成長のための基礎並びに凝固熱力学を勉強いたしました。地道なテーマではあるものの、今振り返ると材料を取り扱う上での基礎情報を初めに把握したことはその後の展開に非常に役立ったと実感しております。この平衡状態図をもとに博士課程では超電導体の凝固・結晶成長の研究へと発展させて頂きました。博士課程に進むにあたり、“就職先は無いぞ”と言われておりましたが、多分に研究生生活が楽しかったこと、何とかなるだろうと楽観的であったこともあり特大なエネルギーを必要とせず決心をいたしました。研究では固溶体を形成する包晶材料で、高温安定相が包晶相成長のための溶質供給源と同時に介在物として結晶成長界面において取り込まれる過冷凝固の組織制御を試みました。特に、単結晶として成長させる包晶相の固溶量とその結晶中に取り込まれる高温安定相粒子のサイズと導入量が超電導特性に大きく影響を与えることから、これらを同時に制御するための基礎研

* 東京大学助手；大学院工学系研究科マテリアル工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
A Fledgeling Researcher; Makoto Kambara (Dept. of Materials Engineering, the University of Tokyo, Tokyo)
Keywords: *superconductivity, solidification, crystal growth, plasma, thin film*
2004年6月3日受理

究に取り組みました。結晶成長界面に到達する粒子の増加に従い溶質供給源の増加として成長速度が上昇する一方で、導入されず成長界面にて堆積する粒子は拡散を妨げる介在物として成長を抑制する方向に影響を与えること、また固溶体形成に伴い界面液体組成もタイラインに従って変化し条件により成長の駆動力を減少させるように働くことなど、等温過冷凝固における非定常成長を解明する事ができました。

実験を進める上でも様々な事を学ばせて頂きました。1000℃以上に保持した電気炉内に直接手を入れ素早くしかし確実に種結晶を静置させることで様々な単結晶作製実験が可能となったことを始め、種々のアイデアを実現するための手法、度胸を習得させて頂きました。一見非常に危険と思われる実験でも、手法、装置を調べ上げることで安全を確保すると共に、これにより更に実験に幅を持たせることもできました。各企業にて培われた実験の進め方を様々な研究者の方に指導して頂いたことは、私にとって大学だけでは修得し得ない貴重な経験となっております。

4. ポスドク時代

学位取得後は、長年の海外生活の夢を実現するために、直ちにケンブリッジ大に職を得、場所は変えながらも博士課程のテーマを展開するポスドク生活に入りました。A. M. Campbell 教授、D. A. Cardwell 教授のグループにて当初はバルク超電導体結晶を作製するプロジェクトに参画し、博士課程にて明らかにした高温安定相粒子の捕捉排出現象と単結晶母相中の置換量を同時に制御する結晶大型化の研究に取り組みました。主に結晶成長界面速度により変化する粒子捕捉・排出現象が連続冷却時の結晶成長に与える溶質供給源並びに介在物としての影響を考慮して大型化の可能性を検討しました。図1には種々の冷却履歴におけるY-Ba-Cu-O

図1 種々の冷却履歴並びに初期組成中の高温安定相添加量(30, 40 at%)における凝固に伴うY123超電導体の結晶成長速度変化。初期組成中の高温安定相の添加量が少なく冷却速度が大きいほど試料端(固相=1)になるまで成長速度低下は顕著になっていくことが判る。

(Y123)結晶の凝固に伴う成長速度変化を計算した結果、並びに図2には別に調査した核生成臨界温度曲線と図1より計算される成長距離の関係を示しますが、高温安定相粒子の異なる2つの役割を反映した非定常成長を再現するとともに均質核生成を抑制し大型単結晶を作製しうるプロセス条件を提案することができました。この知見を元に、当該材料を用いた医療用新規MRIデバイス応用を狙う、ケンブリッジ大を含む3大学、3企業、1病院の横断的な国家プロジェクトに参加し、マグネット材料開発担当として携わり、酸化物超電導体利用の可能性を検討する機会を得ました。本プロジェクトを通じて、様々な分野の研究者と目標を一つに研究を進める手法を体験できたことは非常に貴重な経験となり、またこのプロジェクトで検討した二相ネットワーク凝固技術は、低損失マイクロ波伝搬のための超電導 wave guide としてキャベンディッシュ研究所のYassin博士のグループが進める基礎物性研究を始めとした種々の分野へ提案、展開をするに至りました。

平行して固溶体を形成する希土類系RE-Ba-Cu-O超電導体の研究開発に関するEUプロジェクトにも参画する機会を得て、特に他元素添加により超電導特性が飛躍的に向上すると報告されている材料であることから、多元系における過冷凝固時の組織制御に関わる基礎研究に取り組みました。これに先立ち、学生時代に修得した研究手法に乗っ取り、まず当該材料の熔融凝固時に必要となる系における状態図を作成致しました。カチオンのみでも4元素が関連する固溶体形成過程は複雑になりますが、状態図に基づきY添加時のY-Nd-Ba-Cu-O結晶の凝固に伴う組成変化を定性的に説明する事ができました。当時、各報告にて一貫性の無かったプロ

図2 初期組成中高温安定相30 at%含む5センチ径前駆体における冷却履歴および核生成臨界温度曲線と計算されるY123超電導体の結晶成長距離の関係。実験的に求めた均質核生成の臨界温度曲線(図中凡例なし実線)と冷却履歴が交差する時点で大型の単結晶成長を抑制する多核生成が始まると考えられる。従って、この交差点までに成長する距離が長くなる冷却条件が単結晶大型化の指針となる。

セスと特性の関係が明確に説明されるとともに、多元系に起因して高超電導特性を発現する相の定常的生成プロセス範囲が非常に狭く大型化バルク単結晶作製は非常に困難である事、またこれを解決する手法として雰囲気制御が有効であることを提案、実証しました。なお、本プロジェクトでは二ヶ月に一度程度 EU 各国の研究者と議論を交わす機会があり、この会合を通じて様々な国の研究者と知り合いになれたことはもちろん、国により異なる研究体制から、多方面の応用展開を念頭に置きながら研究を進められたことは非常に貴重な体験でした。これらの経験を元に提案したプロジェクトが、日本の科研費に相当すると思われる EPSRC(The Engineering and Physical Sciences Research Council)に認められ、自らの給料・ポジションを自ら確保した喜びと生活を続けられる安心を感じたことを覚えております。

酸化物系超電導体の研究と平行して、新たに発見された MgB_2 超電導体の研究にも携わりました。当時ケンブリッジに滞在しておられた産業技術総合研究所の井上 公博士、つくば大の南 英俊先生より助言を得て、いち早く当該物質の緻密バルク体作製に成功し、粒界の影響が小さい超電導特性を報告することができました。この系では超高融点ホウ素と低融点マグネシウムより構成され、 MgB_2 相は数種に及ぶ Mg-B 系の高温安定相と気相マグネシウムとの反応により生成されることから、これまでの固相反応、包晶反応を対象とした研究に新たな手法を加える展開の契機となりました。また、当時は超電導ブームが世界的に再来した観があり、一ヶ月ほど学生時分と同じ夜を徹した体力勝負の生活をしたことが報われたところです。上述 EU プロジェクトで知り合った各国の研究者とのネットワークを利用して、各研究グループが得意とする観点より MgB_2 の材料研究をともに押し進めることができたのは非常に幸運でした。

また大学職員の仕事として、学部 1, 2 年生を対象とした非破壊試験および各種ポリマーの機械的特性に関する学生実験、並びに 2 年生を対象に授業のフォローアップ的スーパービジョンも担当しておりました。特に後者は、週一回のペースで、学生 1 人 1 時間、一日 6 人と、Ashby & Jones の名著“Engineering Materials I & II”をベースとした授業のあらゆる質問に答える、設問の解説を行う非常にタフなものでしたが、紙とペンを取り一生懸命に説明することで、最後に“Fun”と言ってもらえたことは今でも私の励みになっております。またターム中は 24 時間利用可能な図書館で朝まで勉強している学生の人たちを目の当たりにして、私も鼓舞され勉強に打ち込んだことを記憶しております。

ポスドク生活も 3 年を過ぎた頃、徐々にもう少し手を広げて見たい、何か新しい挑戦を探したいという感覚が沸き上がって参りました。当時、超電導研究は応用・実用化へと大きく移行する時期にあり、特に線材としての応用に向けた高速多層膜堆積技術が主流となってきた事情も影響して、新材料開発と共にバルク作製技術とは異なる手法に非常に興味を抱くようになりました。 MgB_2 での研究を展開するに当たりパルスレーザー堆積法による薄膜化研究にも携わりました

が、ターゲット用高緻密体作製以外、これまでの私の研究歴では実際に薄膜化を高度に制御するだけの知識はなく、新たな手法を身につける必要性を痛感いたしました。時をほぼ同じくして、東京大よりプラズマ・薄膜化研究を進めておられる吉田豊信先生の研究室での助手ポストのお話を頂き、幸運にも席をおかせて頂くことになり、3 年半の私のポスドク生活は終了することとなりました。

5. 大 学 職 員

渡英直後は装置の購入・組み立てから始める一からのスタートでしたが、東大着任後は、新分野で一から勉強する日々が始まりました。プラズマ、薄膜技術研究分野での新参者として種々の面でプレッシャーを感じつつ複雑な装置操作も含めて勉強を続ける毎日ではありましたが、逆に全てが新しく難しくはあれ新鮮で楽しいものでもあります。とはいえ現実には、有毒、爆発性ガス更には超高温、高真空等とこれまで私が経験してきた実験とは大きく異なる実験材料、機器を扱うために、一年以上経つ現在でも操作の際には緊張をしている次第です。

研究は主に熱プラズマ CVD によるシリコン薄膜の太陽電池用薄膜応用をテーマに、従来の低圧プラズマ CVD プロセスと同等の清浄環境を維持しつつ比較的高圧力下にて薄膜での超高速堆積の可能性を検討すると共に、プロセス圧力変化に伴う堆積機構の変化を解明し、アモルファスから結晶までの薄膜堆積を実現するテーマに取り組んでおります。特に、熱プラズマと低圧プラズマの中間的圧力領域におけるメゾプラズマでは、その中間的なプラズマガス温度だけでなく、低圧プラズマで主な反応種とされるイオン、ラジカルから、熱プラズマにより完全分解される原子に至る、あらゆる前駆体が考えられます。さらに、主に反応がプロセス律速過程とされる低圧 CVD に対して、圧力の増加に伴いプラズマが「流れ」を持つことから熱泳動も含めた拡散・輸送現象も重要となり堆積の律速過程も変化しうる、即ち、薄膜であってもその組織形成過程は圧力と共に変化するプラズマ/基板間境界層での前駆体形成・輸送過程によって大きく影響されるものと考えられます。シリコン薄膜の堆積速度とプロセス圧力の関係は、図 3 に示すように、堆積手法に相違はあれ、傾向として圧力の増加と共に結晶系薄膜が作製され、且つその堆積速度が上昇することが分かります。又、極最近になり、超高速堆積速度を維持しつつも、その薄膜組織がブロック状からファセット柱状晶そしてエピタキシャル成長へと変化する組織形態が確認されました。本研究領域に、凝固・結晶成長の考え方を取り込むことができれば、新たな薄膜作製技術の提案として私も活路を見いだせるのではないだろうかと考えております。当該研究分野では、国内外を問わずプロセス圧力を高圧側に移行させる流れとなっていることもあり、海外での研究経験が少しでも武器になるのであれば、積極的に海外の研究者と交流し研究を進めてゆければと考えております。

新分野への挑戦には修業の時は必要であり、その後の展開