

調査報告

アメリカ合衆国における準結晶研究の最近の進展

Recent progress of research on quasicrystals in USA

枝川 圭一*

Keiichi EDAGAWA

1. はじめに

準結晶は、1984年に発見された新しいタイプの秩序構造物質である。現在までに行われた様々な角度からの研究により、この物質の構造の解明が進み、その特殊な構造を反映した準結晶特有な種々の物性が認識されるようになってきた。最近になってこのような基礎的研究の成果をふまえて準結晶の工業的応用をめざした研究もさかんに行われるようになってきている。

アメリカ合衆国では準結晶発見当時から1980年代終りにかけて主に P.J. Steinhardt, D. Levine, V. Elser, C.L. Henley などの理論物理学者が活躍し、準結晶の概念の確立、準結晶の基本構造の解明等に重要な寄与を果たした。その後1990年代前半には、この国の準結晶研究はやや沈滞していたが、94年、95年あたりから今度は P.A. Thiel, A.J. Goldman, K.F. Kelton などを中心に準結晶の応用研究がさかんに行われるようになってきている。1996年には、これらの人々を中心に世界で初めての準結晶の応用研究にテーマを絞った国際会議が Iowa の Ames Laboratory で開かれた。

今回、三好研究助成により、ニューヨーク州立大学を訪問し、ボストンで開かれた MRS 98 年秋期大会に参加して、アメリカ合衆国における準結晶研究、特に準結晶の応用研究について調査する機会を得たのでここに報告する。

2. ニューヨーク州立大学

ニューヨーク・マンハッタンから電車で約1時間半のロングアイランドの中央付近にあるニューヨーク州立大学の熱溶射研究所 (Center for Thermal Spray Research) の S. Sampath 助教授を訪問した。この研究所は、ニューヨーク州立大学の教官5人の他にサンディア国立研究所、技術規格国立研究所、ブルックヘブン国立研究所、マサチューセッツ工科大学、アイダホ国立工学研究所、NASA ールイス

*東京大学生産技術研究所 第1部

研究所の各研究所から合計11人の研究者を迎え、全部で16の研究室から構成されている。熱溶射は、材料表面改質のためのコーティングを行う基本的な技術であり、工業的に広く利用されている。本研究所はこの熱溶射に関して、物理的、化学的な側面からの基礎研究をはじめ、コンピュータシミュレーションによる溶射過程の解析、実際の工業的応用のためのコーティング材の開発、コーティング材の質の診断法の開発等、様々な角度からの研究が行われている。また、本研究所は企業との人的交流もさかんに行っている。S. Sampath 助教授は最近、Al-Cu-Fe系準結晶を熱溶射によってスチールに吹き付けてコーティング材として使う応用研究を行っており、この研究についての討論を行うことが今回の訪問の主な目的である。

準結晶のコーティング材としての使用は準結晶の工学的応用の中で最も実現性の高いものとしてここ数年フランス、アメリカ合衆国を中心にさかんに研究され始めている。準結晶は原子配列が並進対称性をもたないため、通常の結晶中に存在するような転位が存在し得ない。このため非常に塑性変形しにくく、一般に硬くて脆い。ビッカース硬さ Hv は、800~1000に達し、Al系合金としては異常に高く、Si等共有結合性結晶に匹敵する。また、準結晶はその特殊な構造秩序を反映して通常の金属結晶と異なる特徴的な電子構造をもっており、それと関連して一般に表面エネルギーが低いことがわかっている。すなわち、準結晶表面は一般に低摩擦を示す。このようなすぐれたトライボロジカルな性質をもつ準結晶は表面コーティング材として有望であり、特に Al-Cu-Fe系は素材が安価で900℃程度の高温まで安定であるため工業的応用の実現性が高く、さかんに研究が行われつつある。

彼らは、高圧ガス・アトマイズ法で作製した種々の組成の Al-Cu-Fe 粉を、スチール上に溶射することで準結晶コーティングを作製し、その微細組織の観察、摩擦試験、硬さ試験などを行っている。これは Iowa の Ames Laboratory の D.J. Sordelet らのグループとの共同研究であり、原料粉

末はそちらで作製したものを使っている。溶射の種々のパラメータを制御することで一般的な Al 合金の 1/8 程度の低摩擦な準結晶コーティングが作製できることを示している。

研究室では修士課程の学生の S. De Palo 君が研究所内を案内してくれて装置の説明をしてくれた。説明してもらった装置は、プラズマ溶射装置、溶射の際の飛行中の粒子の温度を測定する装置、そのサイズ分布を測定する装置、ball-on-disc 摩擦・摩耗試験機等で、私自身あまりなじみのないものが多く大変興味深かった。また講演の機会を与えていただき、最近の我々の準結晶に関する研究を中心に約 1 時間話をさせていただいた。その後 30 分程度にわたって討論を行い、その中で Al-Cu-Fe 系準結晶薄膜の作製とその表面物性に関して今後も研究成果の情報交換等を通じていくことを約束した。

3. MRS98 年秋期大会

98 年 11 月 30 日から 12 月 4 日の期間にボストンで開かれた Materials Research Society の 98 年秋期大会に出席した。これは 44 のセッションからなり、材料科学のあらゆる分野をカバーする大規模な国際会議である。会場は、シェラトン、マリオット、ウェスティンの各ホテルで、これらはモールとよばれるショッピング街でつながっており、外に出ることなく往来できるようになっている。私が主に参加したのは準結晶のセッションであり、今回の organizer はフランスの J.M. Dubois, アメリカの P. Thiel, 日本の A.P. Tsai, ドイツの K. Urban である。このセッションの参加者は約 100 人であり、表 1 に示すように発表件数 81 件、そのうち日本が 22 件と最も多く、ドイツ、アメリカが 15 件、フランスが 12 件と続く。日本の発表件数が多いのは、元々準結晶研究者が多いのに加えて organizer の A.P. Tsai 氏の積極的な勧誘があったためと思われる。現在、世界で最も準結晶研究がさかんな国はフランスであるが今回の参加者は以外に少なかった。ドイツは 2, 3 年おきに定期的で開催されている「準結晶国際会議」の次の開催国 (99 年 9 月にシュツットガルトで開催予定) であることもあり、比較的発表件数が多かった。アメリカは本稿の最初に書いたように一時期、準結晶研究者の数が極端に減ったが、最近準結晶の応用研究を中心に研究者の数が増えている。しかしながら、地元開催の割には、発表件数がそれほど多くなかった。

表 2 に分野別の発表件数を示す。最近のこの分野の特徴としては、応用研究が増えていることがあげられる。表の mechanical properties の一部, coatings and surface properties 及び hydrogen storage の大部分は、応用をめざした研究である。またこのような応用研究にアメリカの研究者が集中している。hydrogen storage に関してはここ数年セントルイ

表 1 MRS98 年秋期大会準結晶セッションの国別発表件数

国	発表件数
日本	22
ドイツ	15
アメリカ	15
フランス	12
スイス	5
中国	3
メキシコ	2
インド	2
その他	5
計	81

表 2 MRS98 年秋期大会準結晶セッションの分野別発表件数

分野	発表件数
metallurgy	10
atomic structure	12
mechanical properties	14
electrical properties	11
magnetic properties	2
defects and diffusion	6
coatings and surface properties	17
hydrogen storage	5
others	4
計	81

スのワシントン大学の K.F. Kelton らのグループが精力的に研究している。彼らは、Ti-Zr-Ni 系準結晶が高い水素貯蔵能を示すことを世界で最初に示した。今回は、H/M (hydrogen to metallic atom ratio) が 1.9 と通常の遷移金属ベースの水素貯蔵合金を越える高い水素貯蔵能を示す Ti-Zr-Ni 系準結晶の熱力学的安定性に関する研究、この系の水素圧力-合金組成-温度 (p-c-T) 相図に関する研究、Ti-Mg-Ni 系, Zu-Cu-Ni-Al 系での水素貯蔵能、安定性に関する研究が発表された。coating 関係では Ames Laboratory の D. Sordélet がニューヨーク州立大学の S. Sampath との共同研究を含めて彼らのグループの Al-Cu-Fe 準結晶コーティングの研究、フランスの CNRS の J.M. Dubois らの Al-Cu-Fe 準結晶のトライボロジーに関する研究を中心に review 講演を行った。また同じ Ames Laboratory の P. Thiel らのグループによって、酸化過程、腐食過程を含めて準結晶の表面物性に関して幾つかの発表がなされた。この他にも準結

晶が比較的高い熱電能をもつことを利用した熱電素子の開発に関する研究, 非常に低い熱伝導性をもつことを利用した熱遮断材の開発に関する研究, 特定の波長を吸収する光吸収素子の開発に関する研究等, 興味深い応用研究が発表された.

4. お わ り に

準結晶発見から今年ではや 15 年になる. 80 年代の準結晶研究の中心は, その特異な構造を解明することであった. 90 年代に入ってからは, 相変わらず構造研究が続けられ

る一方, 物性の基礎的研究にその重心が移っていった. さらに最近になって, これまでに明らかになった基礎物性の知識を使って応用研究が始められるようになった. 今回のアメリカでの調査で, 世界の準結晶研究がこのような応用に向けての新たな段階に入っていることを実感し, 今後の自分の研究指針を考える上で大いに刺激を受けた.

今回, このような機会を与えてくださった財団法人生産技術研究奨励会に深く感謝申し上げます.

(1999 年 2 月 12 日受理)