



軽金属, 「私の一枚」シリーズより 神秘的な構造に魅せられて*

田中 宏樹**

Falling under the Spell of Mysterious Structures*

Hiroki Tanaka**

金属には大きく二つの形態がある。並進対称性を有する結晶とアモルファス(非晶質)である。結晶構造を有する金属は、電子線回折像で1回、2回、3回、4回および6回のいずれかの回転対称性を示す。アモルファスはランダムな構造である。ところが、この常識を覆す発見が1984年に発表された¹⁾。イスラエルのShechtman博士が液体状態から急冷したAl-Mn合金で、5回対称性を有する化合物を発見した。博士はこの回折パターンを1982年に見出し、その時の実験ノートがWEB上に公開されている²⁾。Fig. 1はその実験ノートである。「10 Fold!!!」と記載されており、当時の博士の驚きをよく表している。観測データから導き出された博士の結論は、この3次元構造物は正二十面体(icosahedron)であるという常識外の考えであった。最初にまとめられた論文は審査にも回らず拒絶されたようであったが、共同研究者達と議論を重ね、先述の論文発表につながった。Shechtman博士の結果を妥当とする考えが、二人の物理学者(LevineとSteinhardt)によって示された³⁾。鍵となったのがペンローズのタイ

リングと呼ばれる図形で、物理学者ロジャー・ペンローズによって考案された、「5回軸対称性をもちつつも非周期的であり、しかし平面をあますことなく埋め尽くすことができる」という特殊なパターンである。彼らはペンローズのタイル絵を3次元に拡張して、固体材料でも類似の配置が可能と考え、準結晶(quasicrystal)と命名した。準結晶は並進対称性を持たないが、原子配列に高い秩序性を有している。この功績が認められ、2011年にShechtman博士はノーベル化学賞を受賞された。

Shechtman博士の発見後、Al-Ni-CoやMg-Cu-Alなどの合金を急冷凝固した状態で準結晶構造が数多く報告されている⁴⁾。これらの報告書には特徴的な電子線回折パターンが示されている。5回対称パターンは中心スポットの回りに10個のスポットが現れ、さらにその外側に形成する五角形の輝点が印象的である。この不思議で、魅力的な回折パターンが掲載されていると、いつも目が留まってしまう状況であった。

1989年、Al-5%Mg-0.65%Mn合金硬質板の軟化特性を調査する機会があった。Fig. 2に試験片の製造条件を示す。中間熱処理温度を473~673 Kまで変化させて硬質板を作成し、523Kにおける軟化特性を調査した

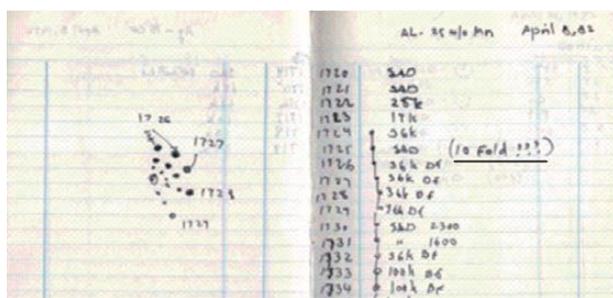


Fig. 1 Experiment record on the discovery of quasicrystal by Dr. Shechtman²⁾.

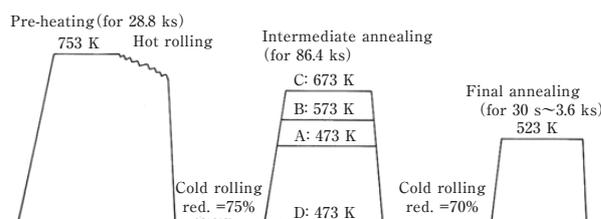


Fig. 2 Production process of the specimens.

* 本稿は、「軽金属」(64(2014), 618)の「私の一枚」シリーズに掲載されたものを改訂。

Revision of "My one shot" series of Journal of The Japan Institute of Light Metals, 64(2014), 618.

** (株)UACJ 技術開発研究所 第一研究部, 博士(工学)

No. 1 Research Department, Research & Development Division, UACJ Corporation, Dr. Eng.

ところ, 473 Kで中間熱処理したサンプルが最も軟化しにくいことが分かった (Fig. 3)。これは473 Kの中間熱処理時に微細析出が生じ, それらが転位の移動を抑制することで, 軟化しにくい下部組織が形成したためと推定した。最終の冷間圧延板を673 Kのソルトバスでフラッシュアニールして転位を消滅させた状態でTEM観察すると, 予想通り0.1 μm 以下の微細析出物が多数存在していた (Fig. 4)。一般的な Al_6Mn 相と思ひ, その回折パターンを撮るためにTEM試料ステージを操作していたところ, Fig. 5に示すパターンが現れた。何か変だなあとジッと眺めていると, 中心スポットの周りに10個の回折スポットと, その外側に五角形の輝点が現れていることに気付いた。念のため, 10個のスポットのそれぞれで暗視野像を撮ると, 間違いなく1個の析出物から現れた回折パターンであった (Fig. 6)。573 K以上の中間熱処理材には, このような回折パターンを示す析出物は確認できなかった⁵⁾。この観察を行った時期が1989年で, Shechtman博士の発見から約5年後のことであった。低濃度のMn添加合金が工業的な製造条件の中で準結晶構造の粒子を形成させることを初めて見出した。この経験以来, ますますその神秘的な構造に不思議さを感じるようになった。

趣味で宇宙論の本をよく読む。数年前, 書店で多次元時空論を提唱している本⁶⁾をパラパラ見ていると, 前述したペンローズのタイル絵が挿絵として示されていた (Fig. 7)。このタイル絵は準結晶構造を二次元表記した図としても有名である。早速, 本を購入して読んでみると, 著者曰く「この奇妙な物質 (準結晶) の並

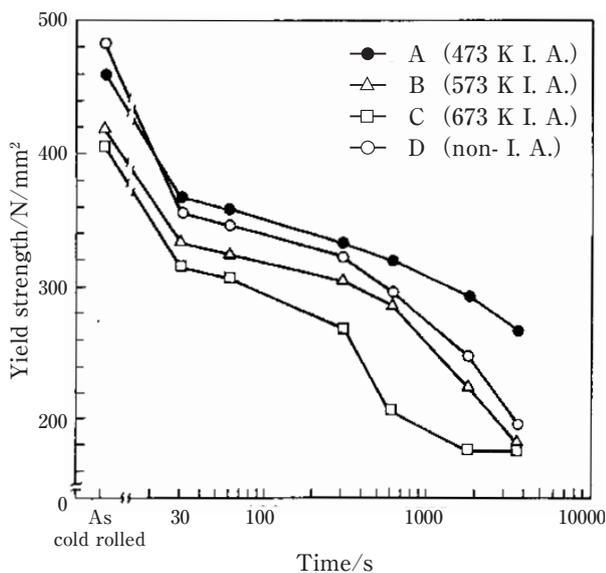


Fig. 3 Changes of yield strength by the isothermal annealing at 523 K.

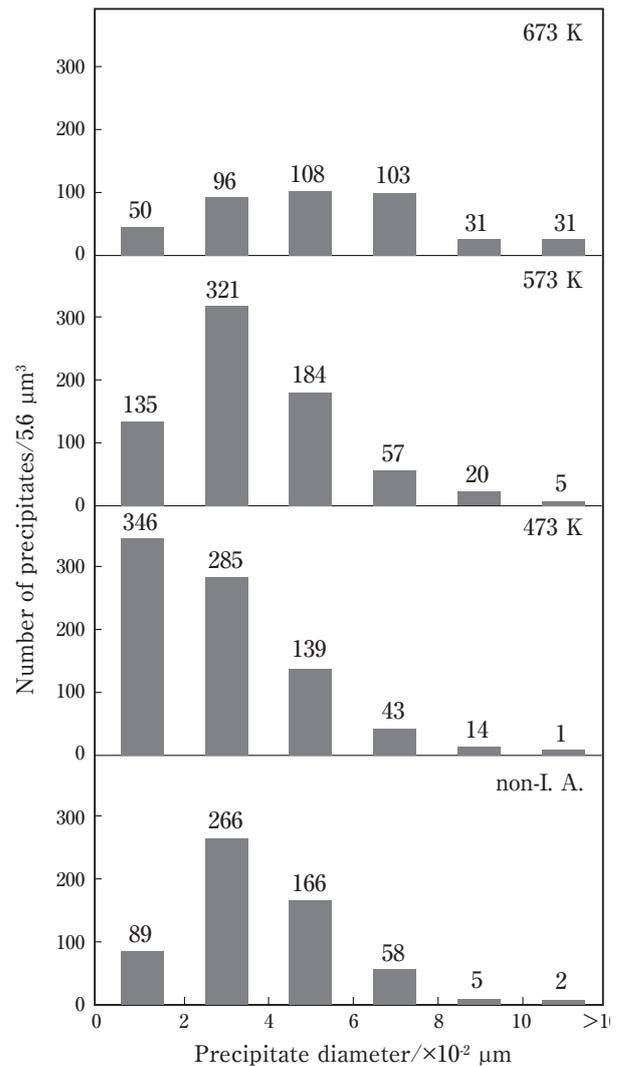


Fig. 4 Size distributions of precipitates after the short annealing at 673 K.



Fig. 5 SAD pattern observed in the specimen prepared with the intermediate annealing at 473 K.

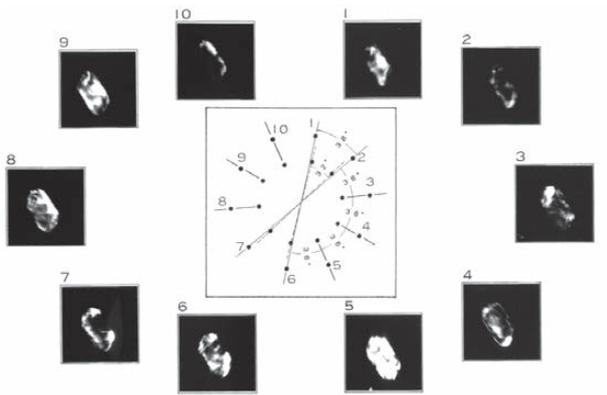


Fig. 6 The schematic of SAD pattern and dark field images derived from each spot.



田中 宏樹 (Hiroki Tanaka)
(株)UACJ 技術開発研究所 第一研究部
博士(工学)

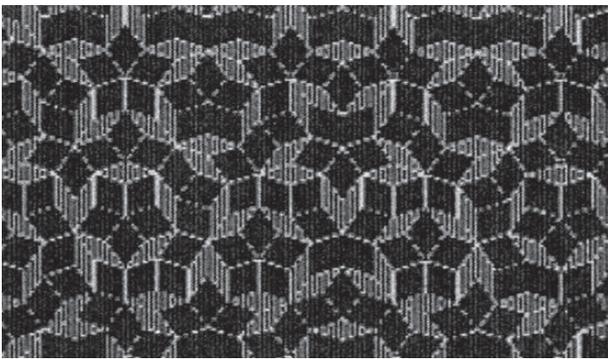


Fig. 7 A Penrose tiling⁶⁾.

びを説明する最もエレガントな方法は、これを高次元の結晶構造の(三次元への)射影と見ること。つまり準結晶構造体は高次元(五次元か?)で理屈のあった形を持ち、それが三次元に現れた姿を見ていると理解しなさいということ。金属素材の奥の深さに魅力はつきない…。

参考文献

- 1) D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias and J. W. Cahn: *Phy. Rev. Lett.*, **53** (1984), 1951-1954.
- 2) <http://www.chem-station.com/blog/2011/10/2011-2.html>
- 3) D. Levine and P. J. Steinhardt: *Phy. Rev. Lett.*, **53** (1984), 2477.
- 4) 竹内 伸, 木村 薫: *固体物理*, **23** (1988), 433.
- 5) 田中宏樹, 土田 信: *住友軽金属技報*, **33** (1992), 217.
- 6) Lisa Randall: *ワープする宇宙*, 日本放送出版協会 (2007).