

## 工学博士井上明久氏の「過冷却金属液体の安定化とバルク金属ガラスの開拓」に対する授賞審査要旨

金属液体は融点以下では極めて不安定であり、融点より僅かに温度が下がると直ちに凝固し、結晶となる。有史以来、実用金属材料はこの現象を利用して作製されており、例外なく結晶状態にある。

井上明久氏はこの長年の常識を根底から覆す新現象を発見した。それは、約 $10\text{ K/s}$ 以下の緩やかな速度で融点以下に徐冷しても過冷却金属液体が常温まで結晶化せずに保持され、ガラス状金属バルクが安定生成する現象である。井上氏はこの新現象の発現因子や機構を実験と計算科学の立場から解明し、その基礎と応用の両面で飛躍的に発展させた。すなわち、ガラス状金属バルクの安定生成現象は、(1)組成が三元以上の多成分系であること、(2)各成分の原子径が約一二%以上異なること、(3)元素間の混合熱が負の値であること、の三経験則を満たした合金系で発生することを明らかにした。また、その合金系固体の構造は、従来の非晶質物質に比べ、新しい短範囲原子配列の高密度無秩序充填状態にあることを実験的に示

し、安定している原因が二〇面体クラスターを基本とした新しい原子構造にあることを明らかにした。さらに、三経験則に基づいた計算科学法により金属ガラスの形成組成範囲を精度良く予知できることも明らかにし、これらによって新材料の開発原理を提示した。これに基づいて、Mg、希土類金属、Zr、Ti、Hf、Fe、Pd、Co、Ni、Cu各合金系の数百種類のガラス状金属バルクを次々に発見し、その最大直径が $80\text{ mm}$ を越える長い棒状材料を製作し、大型材料の製造を可能とした。この場合最も重要な冷却速度は極めて遅く、その最低速度記録 ( $0.02\text{ K/s}$ ) が達成されている。これに対し、従来の非晶質金属では超急冷速度 ( $10^6\text{ K/s}$ ) が必要であり、そのためその制御が極めて難しく、材料厚さも数十 $\mu\text{m}$ に限定されていた。

従ってこの新しい過冷却金属安定化法の特徴は、過冷却液体の状態でも結晶化させずに数時間も保持できる性能を有するためその制御が極めて容易であり、従来の非晶質金属の概念及び作製法を一変させることになった。

バルク金属ガラスは上述の冷却時のみならず、加熱時においても優れた性能を有している。従来の非晶質金属は加熱時、短時間に直接結晶化するためその過程を制御することが出来なかつた。これに対し、バルク金属ガラスではその加熱結晶化前に新しい現象として「ガラス遷移」と「過冷却液体」が出現する。このため「ニュート

「粘性流動」状態を発現し、理想的な超塑性現象が出現した。これによって、(1) 通常金属が数十%であるのに対し、一五〇%にも達する巨大伸び加工、(2) マイクロマシニング部材等への超微細精密加工、(3) 粘性流動接合、(4) ナノスケールの表面平滑性を持つ鏡面転写加工、(5) 粉末からの各種成形プロセスの開発を可能とした。さらには過冷却液体の安定性を利用した溶湯を直接ネット形状に成形するプロセスの開拓など、「過冷金属加工法」の実用化を展開した。この新加工法により、棒、板、線、管等様々な形状の金属ガラスが作製され、新しい有用な特性が得られている。その結果、Zr、Ti、Ni、Cu系では強度、破壊靱性、弾性伸び、疲労強度、耐食性等が優れたものとなり、特にNi系とCu系では3000 MPaの高強度、Fe系とCo系では優れた軟磁性、Zn、Cu系では高保磁力の硬磁性、Pd系では高効率の水素透過性と塩素発生電極特性、Mg系では水素放出に伴う大放電容量の電池などが実現出来ることが見出された。さらにこの外にも新しい分野が開拓されてきた。例えば低濃度溶質の場合には世界最高の比強度と延性を持つ新しい長周期六方晶のMg基合金、中濃度溶質の場合にはAl基高比強度ナノ結晶やナノ準結晶合金、Fe基ナノ結晶分散の軟磁性や磁石合金、高濃度溶質の場合にはTi基超弾性ナノ結晶合金が創出された。

バルク金属ガラスを始めとする非平衡材料群は、急速に産業化が

進み、電磁気材料、機械部材、ロボット部材、二輪車や車椅子部材、電極材、光学部材、精密研磨材、フレーム材、金型、工具、ゴルフクラブ、釣り具、野球バット等、各種部材としてすでに幅広く使用されると同時に、種々の先端高速輸送機関、携帯電子機器、生体・医療材料、電池、衝撃吸収材料等への実用化研究も進展している。これらの成果によって科学・工学的に価値ある広範な構造や組織を持つ新物質・新材料を創製する「過冷金属学」分野を開拓した。

井上氏は、これまで一三〇〇編以上の非平衡材料に関する論文を発表しており、このうち過冷却液体の安定化現象に関する研究では約六〇〇編の論文、二五冊の書籍を出版している。ISI調査の一九八一年以降の論文被引用数は一四〇〇〇回を越えており、一九八一年から一九九九年に亘り、全学術分野を通じて大きな影響を与えたとされる論文を数多く発表した日本人研究者の中で第二位とされ、評価されている。また、金属ガラスは、科学技術振興事業団の創造科学「井上過冷金属」、文部科学省特別推進研究、経済産業省NEDOの「スーパーマタル」、「ナノメタル」などに採択され、その代表者を務めている。さらに「Acta Metallurgica」論文賞、非平衡・ナノ材料国際会議Gold Medal Award、Citation Laureate Award (引用最高栄誉賞)、CONA Award、市村賞、日本金属学会からは一〇回の論文賞・六回の技術開発賞・功績賞・学術功労賞・増本量賞

等、計四二件を受賞している。

以上のように、井上氏は、過冷却金属液体の生成機構と物性の解明から、その異常安定化現象の発見とバルク金属ガラスを含む新非平衡物質群の創製に成功し、実用化の一貫研究を通して、「過冷却金属」分野を開拓し、材料科学に新領域を起し、産業化に指導的貢献を果たした。

### 主要な著書及び論文目録

#### 〔一〕書籍

1. 徐冷凝固法による金属ガラスの作製と性質  
井上明久：材料化学工学の応用、化学工学会編、化学工業社、東京(1994)、93-104(第三章四節)
  2. Amorphous, Quasicrystalline and Nanocrystalline Alloys in Al- and Mg-Based Systems (Chapter 161).  
A. Inoue, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, ed. By K. A. Gschneidner and L. Eyring, Elsevier Science, Amsterdam, Vol. 24 (1997), 83-219.
  3. Phase Diagrams and Physical Properties of Nonequilibrium Alloys-Nonequilibrium Phase Diagrams of Ternary Amorphous Alloys-  
Y. Kawazoe, T. Masumoto, K. Suzuki, A. Inoue, A. P. Tsai, J. Z. Yu, T. Aihara Jr. and T. Nakamonyo; Springer-Berlag, Berlin (1997), 1-295.
  4. ミンコロ構造  
井上明久：材料システム学、日本学術振興会編、共立出版、東京(1997)、33-45(第一編金属第三章)
  5. Amorphous, Nanoquasicrystalline and Nanocrystalline Alloys in Al-Based Systems.  
A. Inoue; Progress in Materials Science, ed. By M. F. Ashby, B. Cantor, J. W. Chrystian, T. B. Massalski, Pergamon, New York, 43(1998), 365-520.
  6. Bulk Amorphous Alloys, -Preparation and Fundamental Characteristics-  
A. Inoue; Trans Tech Publications, Zurich (1998), 1-116.
  7. Bulk Amorphous Alloys -Practical Characteristics and Applications-  
A. Inoue; Trans Tech Publications, Zurich (1999), 1-148.
  8. Bulk Amorphous Alloys (Chapter 14).  
A. Inoue; Pergamon Materials Series, Non-Equilibrium Processing of Materials, ed. By C. Suryanarayana, Pergamon, New York (1999), 375-414.
  9. バルク金属ガラスの開発と実用化の現状ならびに将来展望  
井上明久：先端材料制御工学、化学工学会編、横書店、東京(1999)、178-196(第一章)
  10. マグネシウム合金の急冷凝固  
井上明久：マグネシウム技術便覧、カロス出版(2000)、281-290(第九章)
  11. Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloys.  
A. Inoue; Acta Materialia (The Millennium Special Issue, A Selection of Major Topics in Materials Science and Engineering: Current status and future directions), ed. By S. Suresh, Pergamon, 48(2000), 279-306.
  12. Bulk Amorphous Alloys.  
A. Inoue; Amorphous and Nanocrystalline Materials, ed. By A. Inoue and K. Hashimoto, Springer, Berlin (2001), 1-51.
  13. フリタニカ国際大百科事典、TBSフリタニカ出版(一九九五)、および金属便覧、金属学会編、丸善(二〇〇〇)などに、項目として執筆
- その他、バルク金属ガラスに関する他の書籍二冊、他分野の書籍二四冊

## [四] 参考文献

- High Strength Bulk Amorphous Alloys with Low Critical Cooling Rates.  
A. Inoue: Mater. Trans., JIM, 36(1995), 866-875.
  - Stabilization of Supercooled Liquid and Opening-up of Bulk Glassy Alloys.  
A. Inoue: Proc. Japan Acad., Ser. B, 73(1997), 19-24.
  - Bulk Amorphous Alloys with Soft and Hard Magnetic Properties.  
A. Inoue: Mater. Sci. Eng., A226-228(1997), 357-363.
  - 過冷金属—バルク金属が拓く世界の未来—  
井上明久: 応用物理, 67(1998), 1176-1180.
  - Stabilization and High Strain-Rate Superplasticity of Metallic Supercooled Liquid.  
A. Inoue: Mater. Sci. Eng., A267(1999), 171-183.
  - Synthesis and Properties of Ti-Based Bulk Amorphous Alloys with a Large Supercooled Liquid Region.  
A. Inoue: Mater. Sci. Forum, 312-314(1999), 307-314.
  - Mechanical Properties of Zr-based Bulk Glassy Alloys Containing Nanoscale Compound Particles.  
A. Inoue: Intermetallics, 8(2000), 455-468.
  - 過冷金属が拓く新金属材料の世界  
井上明久: 応用基礎研究報「源流」(2001), No. 3, 25-33.
  - Bulk Amorphous and Nanocrystalline Alloys with High Functional Properties.  
A. Inoue: Mater. Sci. Eng., A304-306(2001), 1-10.
- その他「バルク金属ガラスに関する解説(英文二十六巻「和文二十六巻)」他分野の解説(英文二十八巻「和文二十七巻)」
- [四] 論文
- Glass Transition Behavior of Al-Y-Ni and Al-Ce-Ni Amorphous Alloys.  
A. Inoue, K. Ohtera, A. P. Tsai, H. M. Kimura and T. Masumoto: Jpn. J. Appl. Phys., 27(1988), L1579-L1582.
  - Mg-Ni-La Amorphous Alloys with a Wide Supercooled Liquid Region.  
A. Inoue, M. Kohinata, A. P. Tsai and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, 30(1989), 378-381.
  - Zr-Al-Ni Amorphous Alloys with High Glass Transition Temperature and Significant Supercooled Liquid Region.  
A. Inoue, T. Zhang and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, 31(1990), 177-183.
  - New Amorphous Alloys with Significant Supercooled Liquid Region and Large Reduced Glass Transition Temperature.  
A. Inoue, T. Zhang and T. Masumoto: Mater. Sci. Eng., A133(1991), 1125-1128.
  - Glass-Forming Ability of Alloys.  
A. Inoue, T. Zhang and T. Masumoto: J. Non-Cryst. Solids, 156-158(1993), 473-480.
  - Stability and Transformation to Crystalline Phases of Amorphous Zr-Al-Cu Alloys with Significant Supercooled Liquid Region.  
A. Inoue, D. Kawase, A. P. Tsai, T. Zhang and T. Masumoto: Mater. Sci. Eng., A178(1994), 225-263.
  - Thermal and Magnetic Properties of Bulk Fe-Based Glassy Alloys Prepared by Copper Mold Casting.  
A. Inoue, Y. Shinohara and J. S. Cook: Mater. Trans., JIM, 36(1995), 1427-1433.
  - Fabrication of Bulk Glassy  $Zr_{55}Al_{10}Ni_5Cu_{30}$  Alloy of 30 mm in Diameter by a Suction Casting Method.  
A. Inoue and T. Zhang: Mater. Trans., JIM, 37(1996), 185-187.
  - Bulk Nd-Fe-Al Amorphous Alloys with Hard Magnetic Properties.

10. A. Inoue, T. Zhang, W. Zhang and A. Takeuchi; *Mater. Trans., JIM*, 37(1996), 99-108.
11. Soft Magnetic Properties of Bulk Fe-Based Amorphous Alloys Prepared by Copper Mold Casting.  
A. Inoue, A. Takeuchi, T. Zhang, A. Murakami and A. Makino; *IEEE Trans. Magn.*, 32(1996), 4866-4871.
12. Extremely Low Critical Cooling Rates of New Pd-Cu-P Based Amorphous Alloys.  
A. Inoue and N. Nishiyama; *Mater. Sci. Eng.*, A226-228(1997), 401-405.
13. High Strain Rate Superplasticity of Supercooled Liquid for Bulk Amorphous Alloys.  
A. Inoue, Y. Kawamura and Y. Saotome; *Mater. Sci. Forum*, 223-234(1997), 147-154.
14. Preparation and Thermal Stability of Bulk Amorphous Pd<sub>40</sub>Cu<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub>P<sub>20</sub> Alloy Cylinder of 72 mm in Diameter.  
A. Inoue, N. Nishiyama and H. M. Kimura; *Mater. Trans., JIM*, 38(1997), 179-183.
15. Soft Magnetic Properties of Fe-Based Amorphous Thick Sheets with Large Glass-Forming Ability.  
A. Inoue, A. Makino and T. Mizushima; *J. Appl. Phys.*, 81(1997), 4029-4031.
16. Hard Magnetic Bulk Amorphous Alloys.  
A. Inoue, T. Zhang and A. Takeuchi; *IEEE Trans. Magn.*, 33(1997), 3814-3816.
17. Wide Supercooled Liquid Region and Soft Magnetic Properties of Fe<sub>50</sub>Co<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>Zr<sub>10</sub>Nb (or T<sub>x</sub>)<sub>10</sub>B<sub>20</sub> Amorphous Alloys.  
A. Inoue, H. Koshida, T. Zhang and A. Makino; *J. Appl. Phys.*, 83(1998), 1967-1974.
18. Ferromagnetic Bulk Amorphous Alloys.  
A. Inoue, A. Takeuchi and T. Zhang; *Metall. Mater. Trans. A*, 29(1998), 1779-1793.
19. Ferromagnetic Co-Fe-Zr-B Amorphous Alloys with Glass Transition and Good High-Frequency Permeability.  
A. Inoue, H. Koshida, T. Itoi and A. Makino; *Appl. Phys. Lett.*, 73(1998), 744-746.
20. Supercooling Investigation and Critical Cooling Rate for Glass Formation in Pd-Cu-Ni-P Alloy.  
N. Nishiyama and A. Inoue; *Acta Mater.*, 47(1999), 1487-1495.
21. Stabilization of Supercooled Liquid and Bulk Glassy Alloys in Ferrous and Non-Ferrous Systems.  
A. Inoue and T. Zhang; *J. Non-Cryst. Solids*, 250-252(1999), 552-559.
22. High-Strength Bulk Nanocrystalline Alloys.  
A. Inoue and C. Fang; *Nanostruct. Mater.*, 12(1999), 741-749.
23. Ductile Quasicrystalline Alloys.  
A. Inoue, T. Zhang, M. W. Chen and T. Sakurai; *Appl. Phys. Lett.*, 76(2000), 967-969.
24. Bulk Amorphous FC20 (Fe-C-Si) Alloys with Small Amounts of B and Their Crystallized Structure and Mechanical Properties.  
A. Inoue and X. M. Wang; *Acta Mater.*, 48(2000), 1383-1395.
25. Precipitations of Icosahedral Quasicrystalline and Crystalline Approximant Phases in Zr-Al-Ni-Cu Metallic Glasses.  
C. Li and A. Inoue; *Phys. Rev. B*, 63(2001), 172201-172204.
26. Quantitative Evaluation of Critical Cooling Rate for Metallic Glasses.  
A. Takeuchi and A. Inoue; *Mater. Sci. Eng.*, A304-306(2001), 446-451.
27. Novel Hexagonal Structure and Ultra-High Strength of Magnesium Solid Solution in Mg-Zn-Y System.

A. Inoue, Y. Kawamura, M. Matsushita and K. Hayashi, *J. Mater. Res.*, 16(2001), 1894-1900.

27. High-Strength Cu-Based Bulk Glassy Alloys in Cu-Zr-Ti and Cu-Hf-Ti Ternary Systems.

A. Inoue, W. Zhang, T. Zhang and K. Kurosaka, *Acta Mater.*, 49(2001), 2645-2652.

その他、安定化現象とバルク金属ガラスおよび非平衡相に関する論文(英文五五〇編、和文一一編)、他分野の論文(英文四五〇編、和文七一編)、国際会議論文(金属ガラス関係五二編、他分野一一編)。

農学博士日向康吉氏及び農学博士磯貝 彰  
氏の「アブラナ科植物の自家不和合性にか  
わるる自他識別機構の研究」(共同研究)に  
対する授賞審査要旨

自家不和合性は、多くの被子植物に見られる現象で、一つの花の中に正常な雌ずいと雄ずいとが存在するにもかかわらず、自己の花粉では受精できず、受精とそれに引き続く種子形成には、他個体由来する花粉を必要とする性質であって、種内の遺伝的な多様性の維持・拡大に寄与している。この現象は二〇〇年以上も前から知られていたが、植物がどのようにして自他の花粉を識別するのか、その機構は、ごく最近まで、明らかにされていなかった。

このような状況の中で、日向・磯貝両氏は、一九七〇年代後半以降、現在に至る迄、緊密に協力しつつ、アブラナ科植物を対象に、自家不和合性にかかわる自他識別機構を解明すべく、遺伝学的、ならびに分子生物学的立場から共同研究に取り組んできた。その結果、これらの植物の自他識別反応を司る雌ずい側因子と雄ずい側因子(花粉側因子)の実体解明に成功するとともに、この特異な生物現