

の成分となる元素がある条件のもとでは、液体状態のランダム構造がそのまま固る現象が起きることが1990年頃わかった(図1)。

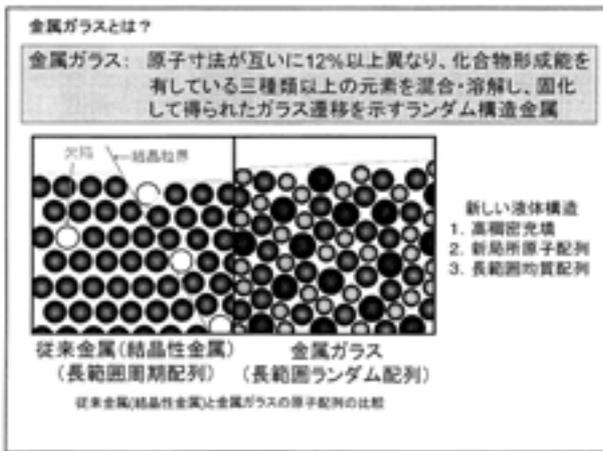


図1

その成分条件①「原子寸法が互いに12%以上異なり」とは、大、中、小の3種類の原子のそれぞれのサイズが互いに12%以上異なること。②「化合物形成能を有している」とは、それぞれの原子が互いに引き合う性質、反発し合うのではなくアトラクティブな相互作用が働く。③3種類以上の元素を混合、溶解し液体状態にした後、温度を下げて過冷却液体を経て固化すると得られる物質です。しかもそれがガラスと言えるためには、過冷却液体からガラス遷移を示してガラス(固体)になること、あるいは逆に加熱していく場合には、ガラス(固体)から過冷却液体に遷移するというガラス遷移現象が、明確に物性値としてとらえられるランダム構造の金属であること。

この成分条件の元素同士を我々が意図的に選ぶと、神様の贈りものというか、自然界に今までになかった新しい液体構造を、おのずとつくり出してきていたとしかいいようがない。

その構造特徴は、①高稠密無秩序充填であること。これはすき間ができるだけ少ないようにパッキングされているという意味です。大きな原子同士とか、大原子と中原子よりは、大・中・小混在しランダムである方が間隔的にもすき間が少なくなることは当然で、しかも液体状態においてこれが生じた。②新局所原子配列構造であること。新しい物質の局所構造をみると、独特な原子配列を有している。③長範囲に非常に均質で互いに引き合うような原子配列状態にあること。

○「金属ガラス」の誕生—なぜ金属学の常識はくつがえされたか

これらの条件を満たす原子構造をもつバルク形状でランダム構造の金属が、なぜ今まで1990年以前までの数千年間つくられなかったのか。(図2)左縦軸は温度、横軸は物質の保持時間、右縦軸は粘性で、右下がりの放物線は液体から過冷却液体を経て固体(ガラス合金)に至る過冷却液体の連続冷却曲線です。液体、例えば鉄が温度の融点 T_m で溶けて流れている状態は粘性値でいうと 10^{-2} 、0.01パスカルセカンド(Pa・s)。すべて固まった物質で停止した状態とみなせる粘性値は 10^{12} パスカルセカンドで、その粘性を示す温度がガラス遷移温度 T_g です。つまりグラフの T_m 以上の液体状態のものを融点以下に下げ、結晶化させずに過冷却液体状態を経て粘性値が 10^{12} パスカルセカンドに、つまり我々の生きている時間スケールにおいて物質が静止したとみなし得る状態の粘性値であるガラス遷移温度まで冷却することができれば、理論上液体構造がそのまま固

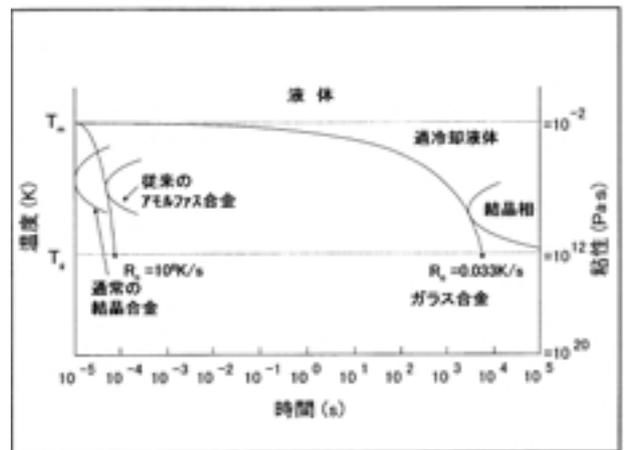


図2

まった構造の固体、ガラス金属ができる。しかし我々人類の科学技術がこれだけ発展してきても、通常のバルク形状のものを 10^{-5} 秒以下の超短時間で冷却する技術を持ち合わせていなかったため必ず結晶になる。

ところが1960年米国カリフォルニア工科大学のポール・デュエー先生らのグループが、金とシリコンの合金を1秒間に 10^6 Kつまり1秒間に約100万度(約1000度に溶かしたものを1ミリ秒0.001秒の速度)で固めると、液体構造が結晶化せずに室温まで保持される現象、いわゆるアモルファス合金を初めてつくり出した。しかしこの条件では極めて小さなものしか得られない。線だと髪の毛くらいの

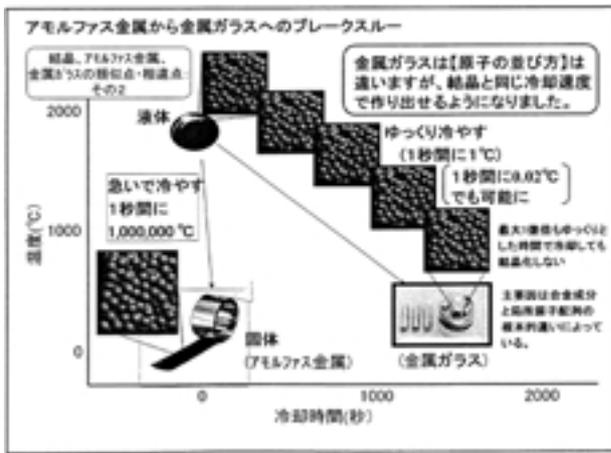


図3

直径約100ミクロンメートルのもの、箔体の場合には約20ミクロンメートル、0.02ミリメートルの非常に薄いものしか得られない(図3)。

アモルファス合金は、その後1971年以降東北大学金属材料研究所でも活発に研究されたが、1990年頃まではこの状態を打破できなかった。1990年以後過冷却液体の安定化の研究が進み、過冷却液体状態が約 10^{-5} 秒しか保持できなかったものが、現在では1秒間に0.033度(K/s)の徐冷速度で約4000秒の時間をかけて、つまり約1時間を費やして冷却してきても、驚くことに液体が結晶化せずそのまま固るため、大きなバルク形状の金属ガラスができる。これは過冷却液体がアモルファス合金のそれと比較して約1億倍安定していることを示しており、結晶との比較では10億倍以上の安定性を有している。このような異常な安定化現象が金属成分のみで構成した合金において生じることを我々は発見した。

1990年前後、アーク溶解鋳造法で溶かした合金がある日突如結晶化しなくなる。銅製の水冷鋳型上でただ溶かして、何の強制冷却もしないのに結晶化しなくなった。これは従来の数千年の金属学の常識と全く反する。その要因は、アモルファス合金の局所構造を調べると平衡相と類似しており、平衡相に移行しようとしているのを1秒間に約100万度強制的に冷却させる強制手段でせき止めた。一方、金属ガラスの局所構造は準安定性が非常に高く、1秒間に100万度で強制冷却されようが0.1度の徐冷却であろうが、原子構造がほとんど変化せずそのまま室温まで下げられる。金属ガラスは対応する平衡相と全く異なる準安定性の高い新しい局所原子配列構造をもつため、必ずしも急冷を要しない。

まとめると、成分上の3条件に合う元素同士を混

ぜ合わせると、準安定性の非常に高い性質をもつ合金ができる現象を発見しその原因を突き止めた。結果としてランダム構造の液体相の構造がそのまま固まった、従来にない構造をもつ新しいバルク形状金属を創造したことになる。

○「金属ガラス」と1990年—研究史とエピソードの示唆するもの

金属の歴史を振り返ると、産業革命以前の数千年間、青銅器、鉄器時代には、人類が使用した金属元素はわずか11種類である。ところが産業革命後急速に製錬、冶金、採鉱技術等の発達により、周期律表の元素が増え現在78種類の金属元素が使用可能となり金属文明は大きく発展した。

しかし数ミリメートル以上の三次元バルク形状で利用できる金属は、1990年までは結晶構造のみであった。ところが我々は1990年にバルク形状でありながらガラス構造の金属を世に送り出した。これは金属ガラスによる新しい金属文明の夜明けと言える。現在この分野は多数の研究者人口をもち、中国が一番多く数百名以上となっている。それだけ本分野の多数の研究者をつくり出したことになるが、世界的にみると金属材料科学の人は今でも非常に勢いでバルク金属ガラス分野に参入している(図4)。



図4

2005年までに見出された金属ガラスの合金系をまとめると、非鉄族系と鉄族系に分類され、非鉄族系の方が早く開発されマグネシウム基の合金が最初であった。現在、鉄族系では鉄、コバルト、ニッケル基、非鉄族系ではマグネシウム、ランタノイド、ジルコニウム、チタン、銅基のものを中心に、2005年までに44種類の合金群が発見されうち37種類は東北大学で開発された。現在個々の合金系の総数は500種類以上になる。

今考えると1988年から1993年までの5～6年が、この分野の研究黎明期であったと言える。当時バルク金属ガラスに関する論文は、外国では1編もなく我々のもののみであった。古き良き時代で我々がデータを出しても他からのレスポンスがないことは、我々が本当に価値ある研究をしているのか非常に戸惑いのある時期でもあった。ところが1993年に世界トップレベルにあるカリフォルニア工科大学のグループが、バリリウム入りの金属ガラスを発見以降、この分野でも他分野の経過と同様に日本以外の国で研究されていることが判明すると、米国、ヨーロッパは勿論、インド、アジアへと世界的に研究が発展した。

注目すべきは1995年以降のわずか10年間に、大部分の金属ガラス、特に鉄族系のものが開発された。ところで、米国のグループは自ら論文発表しなかったものの我々の研究成果を全てトレースしており、我々の発表論文を持ってワシントンに飛び、本研究分野の重要性を訴えている。その結果1991年からは日本円にして約10億円の巨額の米政府予算を獲得し、研究開発を開始していたことも後で判明した。この時我々研究者の感覚としては、今後この分野は世界的な大競争時代を迎えると予想したがその判断はまさに正しかった。理論的には数100種類の合金系が考えられ、試行錯誤を繰り返す方法での合金開発はとても困難であるので、何か探査指針・一般法則があるのではないかという思いを抱いた。

しかし実際には、当時軽くて強い金属材料として、結晶質のマグネシウム合金の研究をしていた。ところが研究中に過冷却液体がどんどん安定化することを見出した。またランタノイドを含むアルミニウム合金の研究をしていてガラス遷移を示すことを見出した。しかし1980年当時センチメートル級のバルク金属ガラスが得られるなどと言うと、恐らく我々も気が変になったのではないかと思われる程、全く誰も想像できなかった。金属成分のみで構成された合金で安定化が起きることが、上述したマグネシウム、アルミニウム合金の研究中にたまたま発見された。ジルコニア、アルミニウム、ニッケル、銅からなる合金の時も同じであった。基礎研究として特に金属ガラスの構造緩和、過冷却液体の安定性に注目していた。この安定性を追求する過程において、アーク溶解法のみで作製した合金が、ハンマーでいくらたたいても割れなくなる、すなわち粘い金属ガラスが生成することを初めて見出した。

以上のことは1990年前後の事ですが、1995年以後急速に発展したのは、いわゆる過冷却液体が安定化するためには何らかの理由、探査指針・一般法則があるはずとして実験と理論の両面から研究を進め、1994年に我々が提唱したルール、すなわち過冷却液体の安定化およびバルク金属ガラス形性能をもつための合金成分ルールです。1995年以降は、この条件を満たす合金成分を探査した結果、金属ガラス成分系が急速に増えていた。

○「金属ガラス」の性質—非常にユニークな多くのすぐれた特性

最も基礎的な特性として、**引張強度**（引張ったときの応力に耐えられる強さ）とたわみやすさ（ヤング率）があります（図5）。

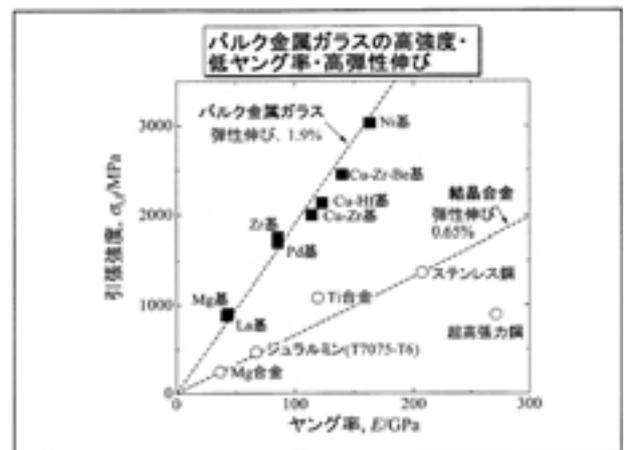


図5

結晶金属のマグネシウム合金、ジュラルミン、チタン合金、ステンレス鋼などと金属ガラスは明らかに違っている。例えば今100ギガパスカルのヤング率で比較すると、結晶金属の引張強度は約700メガパスカルであるが、金属ガラスでは約2,100メガパスカルであり、3倍引張強度が高い。つまり引張って破壊しようとする3倍の応力が必要です。一方、同じ引張強度で比較すると、金属ガラスのヤング率は約3分の1で非常にたわみやすい。

図5の両特性の間に直線関係がみられ、フックの法則が成立している。この直線の傾きは**弾性限界**を表している。この値はバルク金属ガラスでは1.9%、結晶金属では0.65%であり、3倍金属ガラスの方が大きい。つまり弾性限界内で曲がってまた元へ戻るとき、結晶金属はほんの少しの曲げで永久変形するが、金属ガラスを永久変形させるためには3倍大きな力が必要で、数百%も違う。金属ガラスの中でもニッケル基や銅基の合金を選ぶことにより、現在飛

行機の離着陸時の車輪の車軸に使用されている結晶質としては最高強度材料のマルエージング鋼よりも、さらに高強度の2,000メガパスカル以上のものが得られる。

破壊強度は圧縮強度でみると、鉄基やコバルト基合金では4,000メガパスカル以上です。工具鋼の方がやわらかくこれに耐えられるものが存在しないため、引張強度を測ろうとしても困難である。結果的にはコバルト、鉄、タンタル、ボロンよりなる合金では5,000メガパスカル以上の、結晶質材料では全く得られない高強度を示す。しかも、2,000メガパスカル以上の高強度が氏600度まで保持するため工具等にも使える。鋼では室温でも2,000メガパスカル以上の高強度を得ることは難しい。

金属ガラスの変形・破壊に至る**変形挙動**の特徴は、室温近くでは、圧縮応力方向に対して約45度傾いた最大剪断応力面に沿って滑り面が発生し最終破断に至る様式で起きる。結晶質材料の強度が低いのは、転位が発生するためそれを介して理想応力の50分の1くらいの非常に小さな応力でも変形する。金属ガラスでは原子がランダムに配列しており剪断で原子の結合を切らなければならないため、非常に高強度を示す。強度が高くなると普通は脆くなるが、原子がランダムで適当にすき間があり、応力をかけられるとランダム構造のすき間を介して原子が少しずつ動いてその**弾性**変形に耐えられる。また、応力を元へ戻すと動いたすき間の原子が元の位置に戻るにより、非常に高強度がありながら大きなたわみ性も持つことができるという異常な特性を示す。

金属材料において非常に重要な特性として、**破壊靱性値**というパラメーターがある。クラックが発生したときにどれだけの荷重に耐えられるか。通常ガラスは少しでも割れが生じると簡単に割れが進展するため構造材料としては脆くて使えない。金属ガラスにあらかじめ切り欠きを入れさらに疲労予備クラックも入れて、引張りか曲げ変形でどこまでの荷重に耐えられるか。ジルコニウム基金属ガラスでは通常の結晶チタン合金に比べてほぼ同じ、銅基金属ガラスではそれよりも高い値を示す。しかもこれらの金属ガラスは2,000メガパスカル以上の高強度でありながら、**靱性**（クラックを含んでいても破壊されにくい）も持つ。ちなみにゴルフクラブに使用されている結晶チタン合金の1,000メガパスカル強度材と比べ、**靱性値**が同程度で2倍の高強度をもつことが注目される。

疲労強度ですが、今年の連休中に遊園地の遊具が壊れた問題と関連する特性です。通常1,000万回繰り返し変形後に耐えられる最少の負荷応力をもって疲労強度とした場合、銅基、チタン基の金属ガラス合金では500から750メガパスカルです。鋼の最高級品SCM（クロモリブデン鋼）や工具鋼のSKDなどに比べほぼ同じかそれを上回る。1,000万回繰り返し応力が働いても鋼の最高級品並みかそれ以上の強度です。

疲労による破壊は、良好な粘さをもつ銅基の金属ガラスでもどうしても一番応力が高い個所から疲労クラックが発生する。しかも、この場合複合的なものがあり、そこから疲労クラックが続いて伝播していく。早い段階でクラックを見つけると遊園地でのような出来事は起きない。ストライエーション（脈状模様）を示しながらクラックは伝播し、最終破断する。できる限り疲労クラック伝播速度が遅い合金系を開発するため、疲労破壊を起こした破面を観察して、疲労強度と破壊機構関係を研究中です。

通常ステンレス鋼など全ての金属材料で腐食が起きやすいのは、結晶粒界などの部分で原子配列が乱れ、成分偏析があり、内部エネルギーが少し高いためですが、金属ガラスは腐食を生じない。しかも全体的に一樣なランダム構造で結晶粒界等を含まないため、クロム、モリブデンなど耐食性にとり好都合な元素を含ませると、非常に早く不働態皮膜が発生しやすい。例えばpH2の硫酸中で80度、不純物食塩を500ppm含む過酷な条件、つまり燃料電池を想定した環境でも、現存の最高級ステンレスSU S 316 Lに比べても腐食電流密度が低く、腐食電位もはるかに高い非常にすぐれた**耐食性**をもつ。ありふれたニッケル基や銅基のバルクガラス合金でも同様にSU S 316 Lに比べてはるかにすぐれた耐食性を示す。

鉄系の金属ガラスは、現存する金属の**磁性**材料中もっとも電気抵抗が高く保磁力の小さな材料と特徴づけられる。高い電気抵抗は、ランダム構造のため伝導電子が散乱されることが要因となっている。特に保磁力の小さいのは原子がランダムではあるが均一に配列しているためです。

過冷却液体領域が存在しているのが金属ガラスの大きな特徴です。一度得られたバルク金属ガラスを加熱すると、必ずガラス遷移を示して過冷却液体に戻ってそれから結晶化する（図6）。そして過冷却液体に戻された液体構造では、過去の履歴が全部消

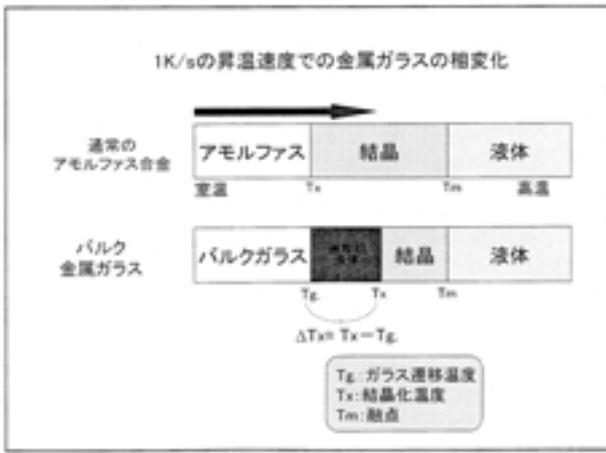


図6

える。いくら強変形した材料であろうと溶かしてしまうと過去の履歴はなくなるのと同じで、内部平衡状態にある。緩和時間が極めて短く原子が自由に動ける状態にあるけれども結晶化しない、つまり液体構造が非常に安定していてこの温度領域が広ければ広いほど過冷却液体が安定化しているといえる。通常金属ガラスの場合、この領域の温度範囲は50から130度ですが、アモルファス合金のように超急冷の必要なものには過冷却液体領域は無くいきなり結晶化する。このような違いは、金属ガラスの局所原子配列構造は対応する結晶相と大きく異なっているが、アモルファス合金では結晶相と似ており、しかも不均一核生成や密度ゆらぎを含むなどのためと考えられている。

過冷却液体領域では、水とか油と同じようなニュートン粘性を発現し、しかも真応力と真ひずみ速度の関係において直線関係を示す特徴をもつ。要点はひずみ速度感受性指数が最も大きな1.0を示すことです。これは応力が負荷されて伸びていったときにくびれだしてひずみ速度が大きくなると、それに対応して流動応力も上がりそこでの変形が止められる。つまり自的にどんどん均一に伸びる特性があり、理想的な超塑性現象が実現できる。結果として、この場合23,000%の伸びを示す。結晶質材料でギネスブックに載っている一番最高値が7,800%ですので、金属ガラスは最高の超塑性合金です。この一部をさらに伸ばして、数百万%の伸びが得られることを確認している。

酸化物ガラスでは、温度を上げて過冷却液体に戻して、ニュートン粘性を利用して光ファイバーを作る。金属ガラスでもそれを利用して、「金属ガラスファイバー」という線材を作れる。バネ材についても少し温度を上げて過冷却液体に戻すと、従来とは

バネ特性も大きく異なるバネ材に加工できる。また、過冷却液体域でプレス加工すると、木目、革、砂地調などいろいろの表面模様のほか高平滑性による金属光沢もつくり出せる。

ナノテクノロジー用の材料としても非常に注目されている。例えばくぼみのついた100ナノメートルのシリコンの型材に金属ガラスを300度くらいに加熱してプレスすると、100ナノメートルのスケールで正確に転写されるが、結晶金属では全くできない。ナノスケールのマイクロカンチレバーについても一度のプレス加工で可能ですが、切削加工では高度なテクニックが必要で切削加工の刃先も入っていかないすき間でも、1回のプレス加工で可能となる。これを何回かずらしてプレスすると、大面積のものも比較的短時間にしかもいろいろな型のものを一気につくり出すことができる。

最近ではナノスケールでの加工技術として、イオンビーム、電子ビーム、エッチング、LIGAプロセスなどがあり、従来は高分子系の材料とかガラスが用いられるが、結晶粒界を含まない非常に均質な構造のためである(図7)。

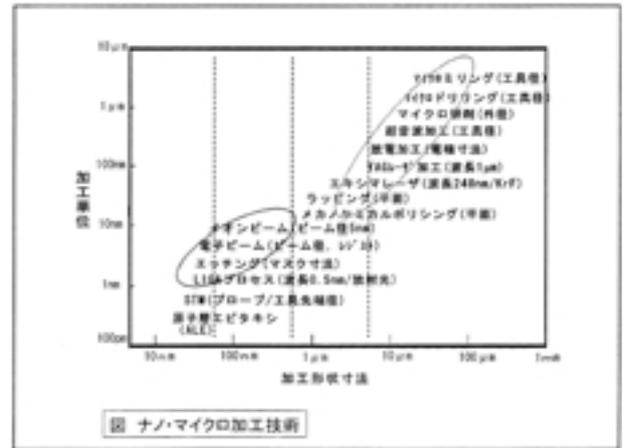


図7

従来の結晶質材料では粒界があり、もうそこで段差がありナノスケールの加工材としては適さない。一方金属ガラスは結晶粒界等を全く含まないためナノスケールでの被加工材に非常に適しており、金属材料としてこれに太刀打ちできる材料は全くない。

集束イオンビームは、ガリウムイオンで加工するナノスケールの最近発達した加工技術ですが、東北大学に設置されている非常に高価な装置で結晶質の白金を表面加工しても、ミクロンメートルサイズで表面が凸凹になる。ところが金属ガラスを用いると、ナノメートルスケールにおいても非常に正確な模様ができる。ナノスケールの文字、ナノメートルスケ

ール幅で識別できるパターンニングも書ける。表面のプレス加工についても機能や色を変え少しずつずらしながらプレスすれば、大面積のものの表面加工が一気にでき上がる。機能性表面の創製の量産性に非常に適している。

CD-ROMは表面の凸凹で記録するが、次々世代のものについては1回のプレス加工で可能なサイズが問題である。金属ガラスを用いるとトラック幅50ナノ・データビット幅22ナノが作り出されておりテラビット級のものも可能とされている。この表面にスパッター技術を用いて少し種々の磁性を付加することにより、次々世代の磁気記録材料としての可能性も秘めている。

通常の結晶では融点で液体が結晶になるときに、超短時間で突然不連続に凝固収縮が起きる。これは絶対避けられない。ところが、金属ガラスを冷却すると液体が徐々に固まってガラス遷移で固化するので不連続な収縮がない(図8)。

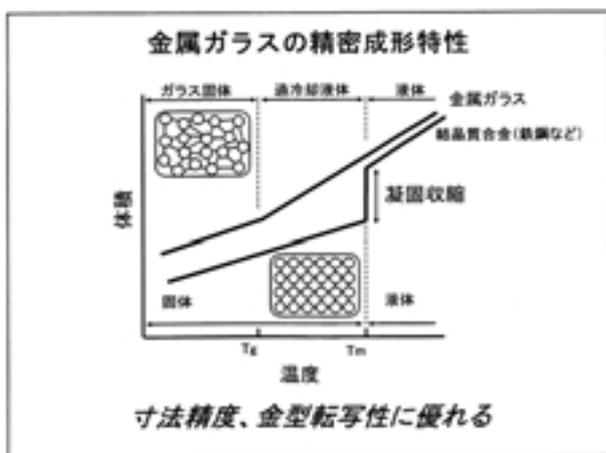


図8

温度による熱収縮だけですから少し液体に圧力をかけると、金属ガラスの表面は鋳型表面模様をナノメートルスケールで転写できる。金属加工においては、いかに金型の表面を精密に転写加工できるかが最大の課題です。結晶質材料だと自己収縮が起きて鋳型から離れる。鉄瓶をつくる精度では型と同じ鋳物ができたということになるが、ことナノメートルスケールでのものづくりでは、もはや結晶質材料では不可能である。一方金属ガラスは非常にすぐれた**金型転写性**をもち、金型に忠実な例えば直径0.1ミリの歯車等が溶湯から一気にでき上がる。ニアネットシェイプではなしに、いわゆる正真正銘の真のネットシェイプ加工ができる。

金属ガラスは、**ポーラス(多孔性)化**することにより、生体医療材料、フィルター、熱交換機、音波

吸収・振動吸収材料など多くの応用に展開可能である。金属ガラスを液体状態に溶かして水素圧をかけて、例えば10気圧の水素中で溶かして鋳込む寸前に9.5気圧にすると、0.5気圧の差により溶け出た水素が泡として析出して2~5%のポロシティーとして過冷却液体中に閉じ込められる。ポロシティーが70%~80%近いものまで制御可能です。ところがポーラスがあっても決して脆いものではなく、ポーラ周辺では応力集中があり変形も容易で、40%くらいのポロシティーになると壊れずに変形し太鼓状に変化する。

我々が今開発に努めているものとして、金属ガラスの生体医療材料がある。骨に代替する材料として、ヤング率20ギガパスカルの軽量ポーラス材料が金属ガラスによって可能になる。現在自動車にも使われている金属系、セラミックス系および高分子系のポーラス材料に比べ、金属ガラスのものは最も**降伏強度**が高く、破壊までに吸収するエネルギーが大きな新材料です。

金属ガラスは合金成分の3条件を満たした場合バルク材が得られるが、一方意図的にその条件を外したらどうなるのか知りたくなる。例えばナノ結晶が混在した銅基金属ガラスは、ナノ結晶粒子分散で非常に**延性**が出て、破壊までに大きなひずみが出現する。これは酸化物ガラスを強化するときナノ結晶分散を行うことと同じ。また銅基合金において、相分離型で正の相互作用をもち、反発し合う元素を入れると、銅基ガラス相中に高タンタル濃度の粒子が析出してガラス/粒子界面で応力集中が起き、界面近傍で変形しやすくなり、伸びが増大する特徴がある。

○「金属ガラス」の社会貢献—ドラステックな改善効果をもつ応用製品

約10年前に一番最初に金属ガラスを応用したのがゴルフクラブのフェイス材料です。非常にたわみやすい性質を利用したもので、ボールが当たりたわんで元へ戻るのですが、打った瞬間にボールをうまくとらえた感覚です。上手な人であれば制御時間を長くもつことになり、単純に反発するのではなく柔らかくなるという感じです。通常的设计では飛ばすので、フェース面積を小さく、たわみ量を少なくしてできるだけ飛ばないように調整した商品ですが、勿論普通のものよりよい性能です。5年間ほど売り出されたのですが、今度はフェース面のみな

らず全体を金属ガラスでつくったタイプがまた店頭
に並ぶと思います。

光学機器部材は**鏡面平滑性**を利用して加工し表面
光沢を出した。**精密加工性**等を利用したものでは、
光ファイバー用のフェルール、ケーシング材料があ
る。これは着色も可能で表面パターンの成形加工も
できる。金属ガラスでは大きな弾性限界伸びを利用
して弾性限界内で取りはずし、繰り返し使用が可能
です。

微細加工用の研磨剤および圧縮残留応力を発生さ
せるショットピーニングなど各分野で使われ始めて
おり、鉄基のものは今外国にも出荷されている。水
アトマイズ法で大量に球状粉末を作り、交流・直流
交換器などの磁性材料やJ Rのスイカ (suica) 対
応機の磁性部品としても実際に使われている。金属
ガラスの特徴である高いガラス形成能を利用すると
粉末でもあらゆるサイズの粉末をつくることができ
各種の磁性コア材等もつくれるが、性能ははるかに
すぐれているもののコストが高く、いかにコストを
下げた大量生産に進めるかが課題となっている。

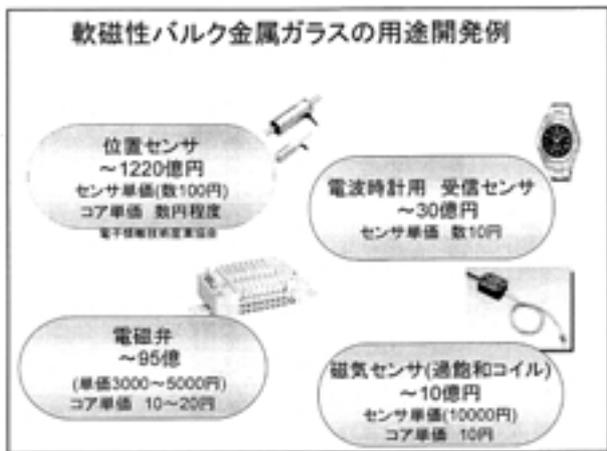


図9

NEDOプロジェクトで地元の企業と一緒に開発
した例では、金属ガラスを用いた位置センサー、受
信センサー、電磁弁、磁気センサー等への応用があ
る (図9)。金属ガラスを用いると非常に感度が良
好で小型化できる利点があり、応力を与えるとひず
み、磁界が発生して電圧が変化するという特性を利用
している。

大きな市場として期待しているものに圧力センサ
ーがある。今何億台という自動車が使われてセンサ
ーは何十億個も使われている。主としてステンレス
鋼 S U S 630 製ですが、ジルコニウム基、ニッケル
基の金属ガラスでは、強度が約1.5倍から2倍ぐら
い高く、ヤング率は2分の1から3分の2です。強



図10

度が2倍あってたわみやすさも2倍大きいなどとい
う材料はいまだかつてなかった。現在結晶金属の中
でもたわみ量が大きい特性をもつ材料が選ばれてい
るが、それらに比べて非常に高耐圧、高感度で今ま
での如何なる結晶金属でもはるかに及ばない。実際
に感度が従来のものに比べて3.8倍、さらにネット
シェイプ加工により従来できなかった小型化・軽量
化が達成できる。小型化できるとは、同じ面積、同
じ重量で多くのセンサーが積み込めるので、同じ感
度でよいなら小さくて軽くできる。自動車に積み込
まれたときに省エネとなり、センサーを多く積み込
めば信頼性が高く環境に優しいものが可能となる。
特に今需要の伸びが大きい高耐圧用、ジーゼル対応
の高圧力センサーとして非常に有望です。自動車に
限らず、従来のステンレス鋼 S U S 630 ではできな
い小型化、結晶質合金では不可能であった領域での
高耐圧化が十分に図れるため、車載用、民生用、産
業用で広範な用途が十分に期待できる (図10)。

他に実用化されたものの一つにコリオリ流量計が
あるが、肉薄の金属ガラスのパイプが簡単に溶湯か
ら作製できる (図11)。パイプの中を液体とかガス

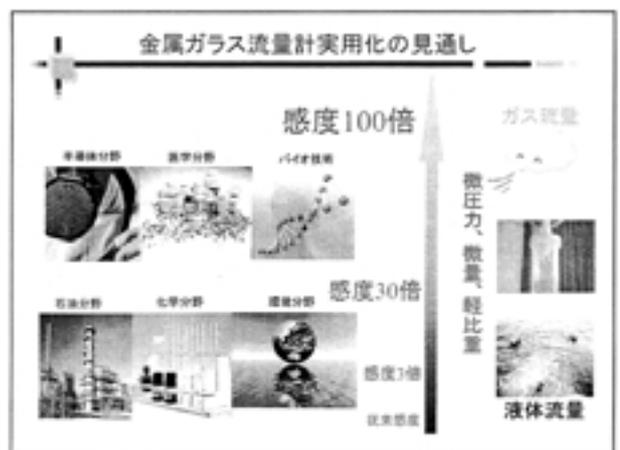


図11

が流れている場合、金属ガラス製のパイプがたわむと、**衝突力（コリオリ力）**が発生する原理の応用です。従来の流量計は感度を増すためパイプを長くしており、また強度が低いためにパイプの肉厚を大きくしているために、非常に大型で重くなっています。金属ガラス製は従来のステンレス鋼製に比べ非常に高強度でたわみやすいことを利用して、実際に非常に小型で軽量で高感度化を達成した流量計です。金属ガラス製では感度が従来比52.9倍のものが作製されている。30倍で石油化学、環境分野にも使えるが、50倍以上となると、半導体や医学において液体だけではなく気体の質量も測定できる。例えば、我々がガソリンを入れる時に夏と冬で同じ40リッターというが、熱膨張は考慮されていないと思う。人体の中に液体が入る場合、絶対質量を測定できることはきわめて重要である。

最近の小型モーターのサイズですが、1980年に直径12ミリメートルでカメラなどに使われていたものが、2000年には7ミリに小型化され、現在は2.4ミリであり、これは先端機械加工での最小制限に原因している（図12）。

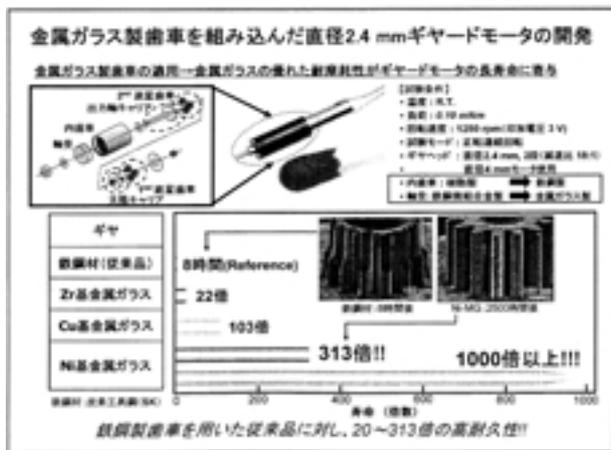


図12

しかし従来の機械加工法で作製した鉄鋼材料製のギヤードを用いて作ると、8時間後に磨耗して使用できなくなる。ところが金属ガラスを用いると313倍、2,500時間回転後も元の形を保持している。しかもこれは鉄鋼材料でつくった軸受けが先に磨耗したため、軸受けもニッケル基の金属ガラスを用いると1,000倍以上の長時間回転し続け**耐摩耗性**にすぐれている。鋼に比べてもはるかに強い。

ネットシェイプ加工ができて切削加工ではできない材料、つまり全部金属ガラスで作ると、従来のいかなるプロセスを超えて世界最小の2段ギヤードの直径1.5ミリのギヤードモーターができる。これまで

のギヤードモーターの世界最小直径は海外企業（スイス）の1.9ミリのプラスチック製であり、鋼よりも強いが少しトルクがかかると壊れる。トルク比254で3段ギヤード型の直径1.5ミリになると、4ミリ直径モーター搭載の携帯電話の振動モードと比べ、約3分の1の直径でトルクは20倍も大きく、この新モーターを胸のところにあてていると心臓によくない。3段と4段型も最近開発されて、1.5ミリの極小のものでつめなども簡単に削ることができる。先端医療機器のカプセル内視鏡、マイクロポンプ、吸引カテーテルや、精密工学機器、産業機器、マイクロファクトリー等への応用も考えられる。現在各種モーターは試供品あるいは半製品として一般に購入することが可能です（図13）。

我々の目的は、金属ガラスを用いた機器が社会で多く使われることだと考えているが、最近ではコーティング分野にも応用されている。金属ガラス粉末とケロシンと酸素を混ぜたもので、金属ガラスを瞬時に過冷却液体まで加熱して音速の約5倍の高速度で堆積させる。ステンレス鋼表面の他、アルミニウム、マグネシウムおよび炭素鋼の表面でも実際に適用されている。今鉛フリーのハンダとなり融点も上がり、非常に過酷な加工条件となっている。これまでの最高級ステンレス製容器でも1ヶ月でボロボロになる。ところが金属ガラスの表面コーティングがなされると、半年以上全く変化せず使用できることが示され、実用されている。

また、金属ガラスはステンレス鋼に比べて**耐食性**が極めてすぐれている。今燃料電池用の高分子用セパレーター等に使われているパラジウム銀合金という高価なものに比べても、水素透過性がすぐれている。今後例えばA4版サイズのシートをつくりプレス加工で溝をつけて燃料電池用として応用され



図13

ば、非常に大きな用途が展開できる。実際そのため A4 版サイズのもが現在作成可能となっている。

ボールベアリングに使える直径数ミリから十数ミリの金属ガラスボールや長さ 1 メートルの棒材も購入可能で、これらはネットシェイプ加工ができ、しかも瞬時に 2 次加工なしに部材ができる。これらは実際に内視鏡や手術用のはさみに応用されるが、手術用のはさみ一つを例にとっても、百何十度の高圧蒸気で消毒しなければならずステンレス鋼でも長持ちしない。それに耐えられる金属ガラスははるかにすぐれた特性を示しており、医療機器への応用は勿論、ナノテクノロジーあるいは高密度磁気記録材料などこれからの環境、情報、生体系材料などへの実用化を通して人類生活に大きく貢献できるものと期待している。

○「夢の新素材」を創造させたもの — “神様の贈りもの” を見つけるために

最後のまとめとして、ある特定の成分、すなわち 3 成分条件を満たすような元素を選ぶと、我々が今まで得たことのない新しい液体構造が自然界におのずと創成されることを利用している。今まで金属材料で融点以下の過冷却液体構造を利用するというような概念は全くなかった。換言すれば、そのような材料がなかったといえる。10⁻⁵秒以下の短時間で瞬時に結晶化するため、材料開発の対象としてとらえられなかったプロセス技術に、安定化した「**過冷却液体**」を世界で初めて仙台で創出できた。日本を中心にこの関連の基礎科学がこの 10 年で急速に進み、各種のバルク金属ガラスが開発・実用化されてきた。過冷却液体の超塑性加工、ネットシェイプ加工、精密転写加工、あるいは溶湯接合加工など先端技術が発展してきたといえる。

従来の金属材料学の分野では、「**過冷却液体の科学技術**」というキーワードの視点の研究、そこに焦点を絞った研究は、十数年前まで 1990 年以前は全くなかった。約 15 年前全く今まで注目されていない視点での、新しいキーワードによる、新しい科学技術の発見がなされ、新しい学術領域の展開が非常に活発化してきている (図 14)。

金属材料という一番古いと言われている材料においても、新しいとらえ方により全くの新材料を研究開発することとなり、今や金属材料分野のみならず物理、化学、結晶学など専門の域を超えて広範囲の多くの研究者が携り、世界的にもますます重要視されている。恐らく今後、今日私が説明した用途展開等においても、従来一般的に改良というのは特に結晶質では数%改良できた、数十%できたと言いますが、「**バルク金属ガラス**」ではそうではない。数百%の劇的な改善効果がなされていくと予想される。またそういう点に注目する新しい技術開発、イノベーションの展開が重要になっていくものと我々は期待している。総長職にはありますが今後も時間の許す限り研究の方もできれば頑張りたいと思っています。

今日の話が何かの参考になり、仙台市、宮城県で関心を持っていただく方が一人でも多く現われ、何かの産業化のヒント、契機になれば非常に幸いです。



図 14

(19.5.17 講演 文責編集部)



— 19.5.17 講演会場のロビーに展示 —