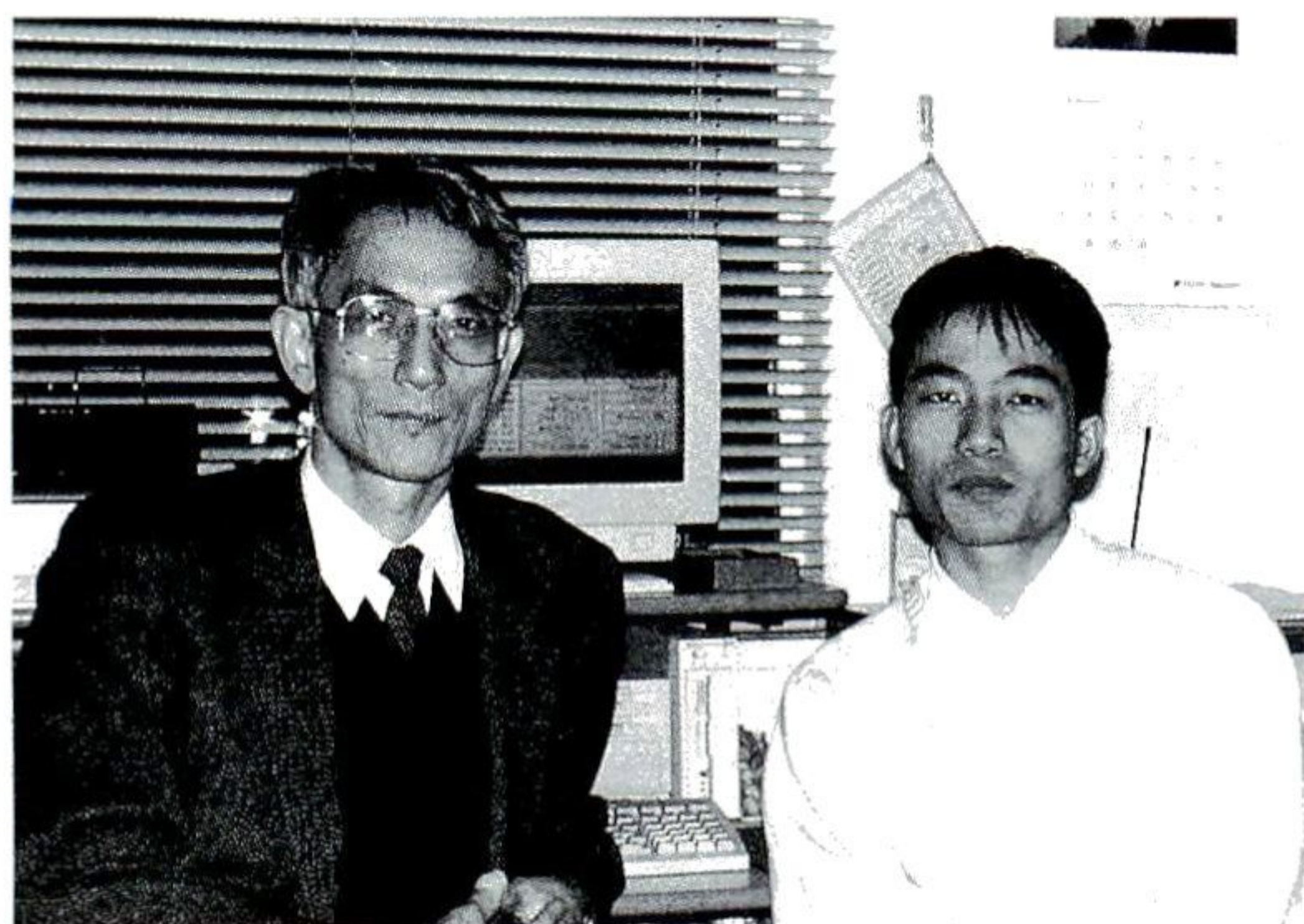




耐苛酷環境セラミックスの開発

——井関研究室～無機材料工学科——



(左) 井関 孝善 教授

(右) 宮崎 広行 助手

セラミックスは、昔からガラスや陶器などのように生活に深く関わる材料として使われてきた。しかし近年では様々な技術の発展により、新しいタイプのセラミックスが産み出されてきている。

そのような中、井関研究室においてはエンジンや原子炉などの苛酷な環境にも耐えることのできる「強い」セラミックスについて、研究を進めている。金属に比べて、壊れやすく加工しにくいといったイメージのあるセラミックスだが、どのようにすれば強いセラミックスができるだろう。その研究についてのお話をうかがった。



セラミックス強化計画——複合材料

セラミックスをエンジンなどの機械部品に利用するためには、壊れにくいものを開発することがまず必要である。壊れにくいと一口に言っても、その壊れにくさを測る尺度は様々である。ここでは靱性という性質についてみる。

靱性とは、亀裂のある材料がどの程度の力にまで耐えられるかという壊れにくさを表す。靱性の高い材料は亀裂があるとき、より大きな力に耐えられる。激しい衝撃を受ける環境で使われる材料には少なからず傷ができることが予想される。そのような場合を考えると材料の靱性が高いことが望まれるのだ。しかし、一般にセラミックスの靱性は低い。小さな傷があるだけですぐに壊れてしまうのである。

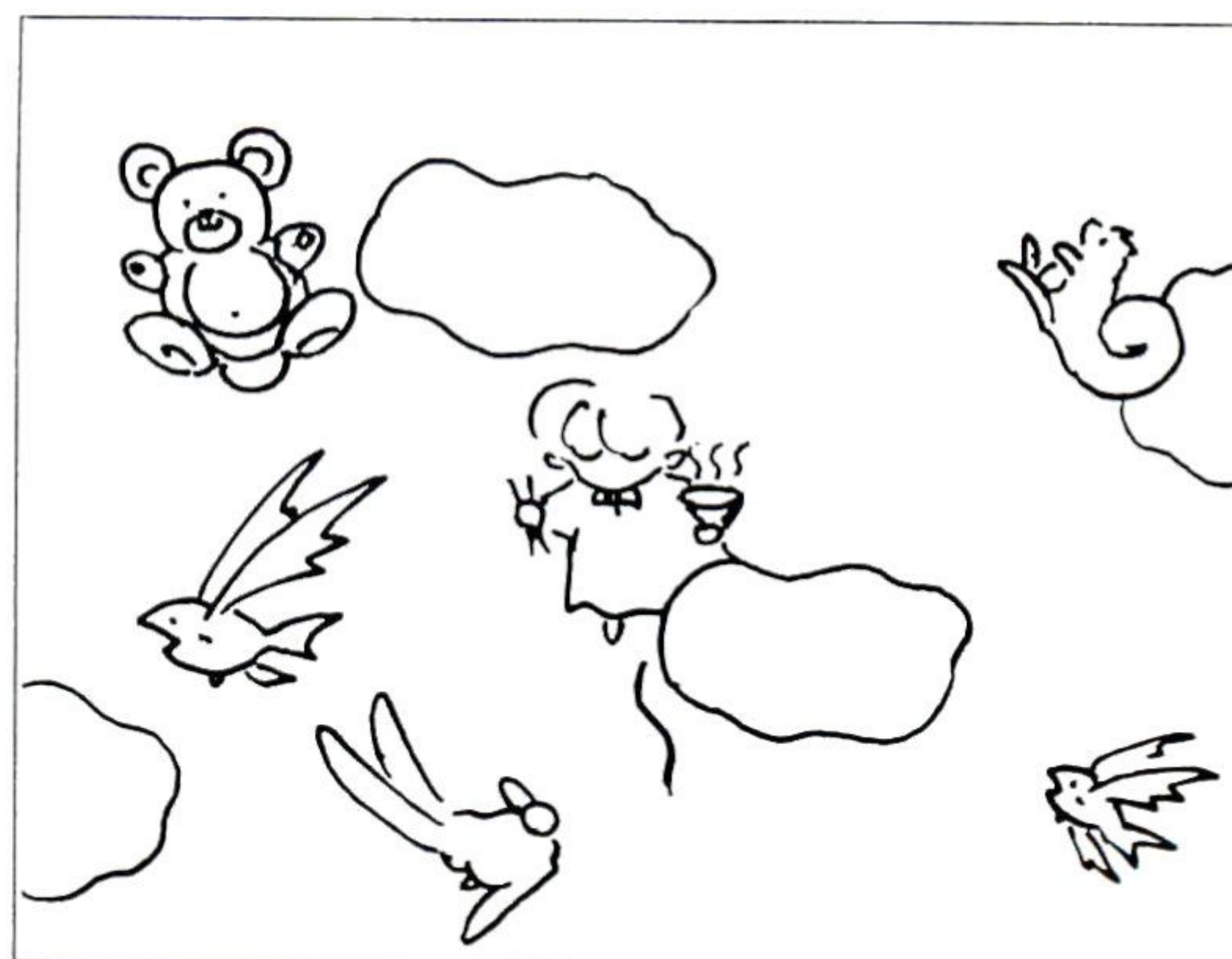
こういったセラミックスの欠点を改善する材料の一つとして登場するのが井関研究室でも研究されている複合材料である。複合材料はいくつかのセラミックスを様々な方法で混ぜて作られる。

井関研では、炭化ケイ素(SiC)をベースに炭化チタン(TiC)を混合した複合材料の研究をすすめている。まずは、この2つのセラミックスの特徴

をあげる。

炭化ケイ素は、酸などに強く磨耗しにくいのが、非常にもろいという欠点をもつ。また、室温においては熱伝導度は高いのだが、温度が上がるにつれ下がってしまう。そのため耐熱衝撃性(温度変化に対する壊れにくさ)も高温では低下する。

炭化チタンは、室温においては炭化ケイ素に比べて熱伝導度が劣るものの、1000度を越えるような高温でもその性質は変わらず、むしろ高くなる。



従って耐熱衝撃性も向上すると考えられる。またチタンと炭素の比率をある程度変えることができる。このことは、現在の研究の中でも大きな意味を持っている。

井関研で用いる複合材料は、この2種類のセラミックスを混合した粉末をホットプレス焼結（高温で加圧し、焼き固める）して作られる。実際にはそれだけでは固まりにくいので、固まりやすくするための助剤がほんの少し加えられる。炭化ケイ素と炭化チタンの混合の割合を変えたり助剤を変えたりすることで、性質の違った複合材料を作ることができる。

具体例として、セラミックスの混合の割合を変えずに助剤だけを変えた2つのものをあげてみる（表）。助剤として窒化アルミ（AlN）とチタン（Ti）をそれぞれ用いているが、靱性はどうか変化しているだろう。

	SiC	TiC	助剤(微量)
SA	100%	0%	AlN
STA複合材	70%	30%	AlN
STT複合材	70%	30%	Ti

表 複合材料の組成比

亀裂にも負けない——靱性強化

表のような割合で作られた複合材料は、どちらも炭化ケイ素の中に炭化チタンの粒子が散らばった構造をもつ。このことによってセラミックスは靱性を増すのだが、それはどのような仕組みによるものなのだろうか。

まずは、助剤に窒化アルミを用いたSTA複合材をみる（図1）。SA（炭化ケイ素のみ）の場合、亀裂はまっすぐに伸びていく。これに対してSTA複合材では、亀裂が炭化チタン粒子を避け、隙間を縫うように伸びていく。これは、それぞれのセラミックスの熱膨張率の違いによるものである。

炭化チタンは、炭化ケイ素に比べて熱膨張率が大きく、ホットプレス後冷えたときに、より縮もうとする。すると周りの炭化ケイ素が引っ張られ、そこだけ圧力が高くなる。圧力の高い部分は炭化チタンを取り囲む壁のようになって、亀裂の進行

を妨げる。そのため亀裂は炭化チタン粒子に近づけず、進路を変えて進んでいく。これによって、亀裂はまっすぐ進むときより長い距離を進まなければならない。結果的に亀裂が進行しにくくなって、複合材料の靱性が増すのである。

次に助剤にチタンを用いたSTT複合材をみてみよう（図2）。この複合材料もSTA複合材と同じような構造になっている。しかしこちらは全く違った仕組みで靱性を増しているのである。

STT複合材では、亀裂は炭化チタンによって進行方向を変えられることなく、まっすぐに伸びる。しかしその亀裂はすぐに止まり、別のところから新しい亀裂が伸びていく。この現象のメカニズムは亀裂の周りを調べることでわかる。炭化ケイ素は完全に分断されているが、炭化チタンは亀裂をまたいでつながっている。つまり、炭化チタンが亀裂に橋をかけるような形で、亀裂が広がる

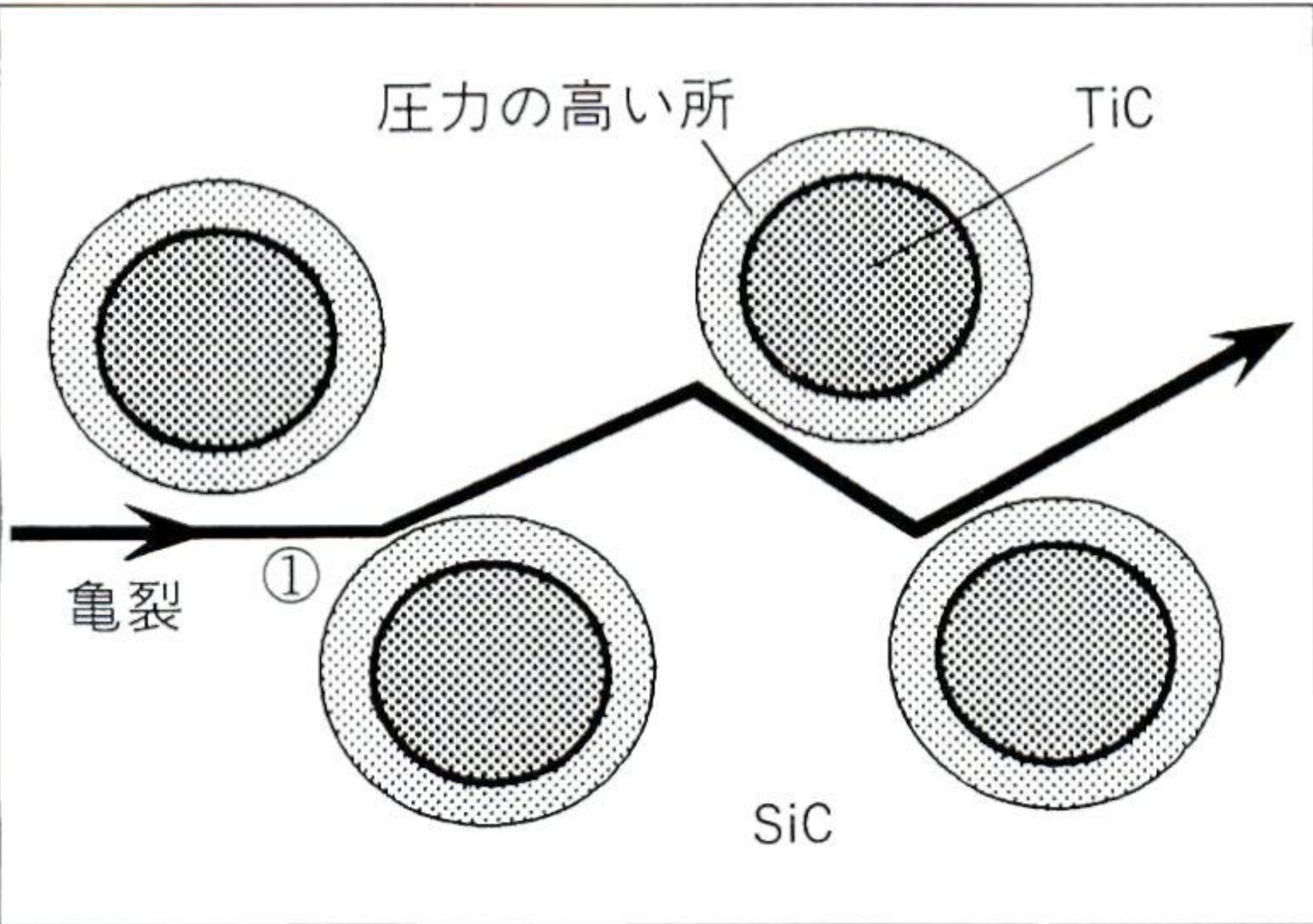


図1 STA複合材

①亀裂はTiC粒子を避けるように進む

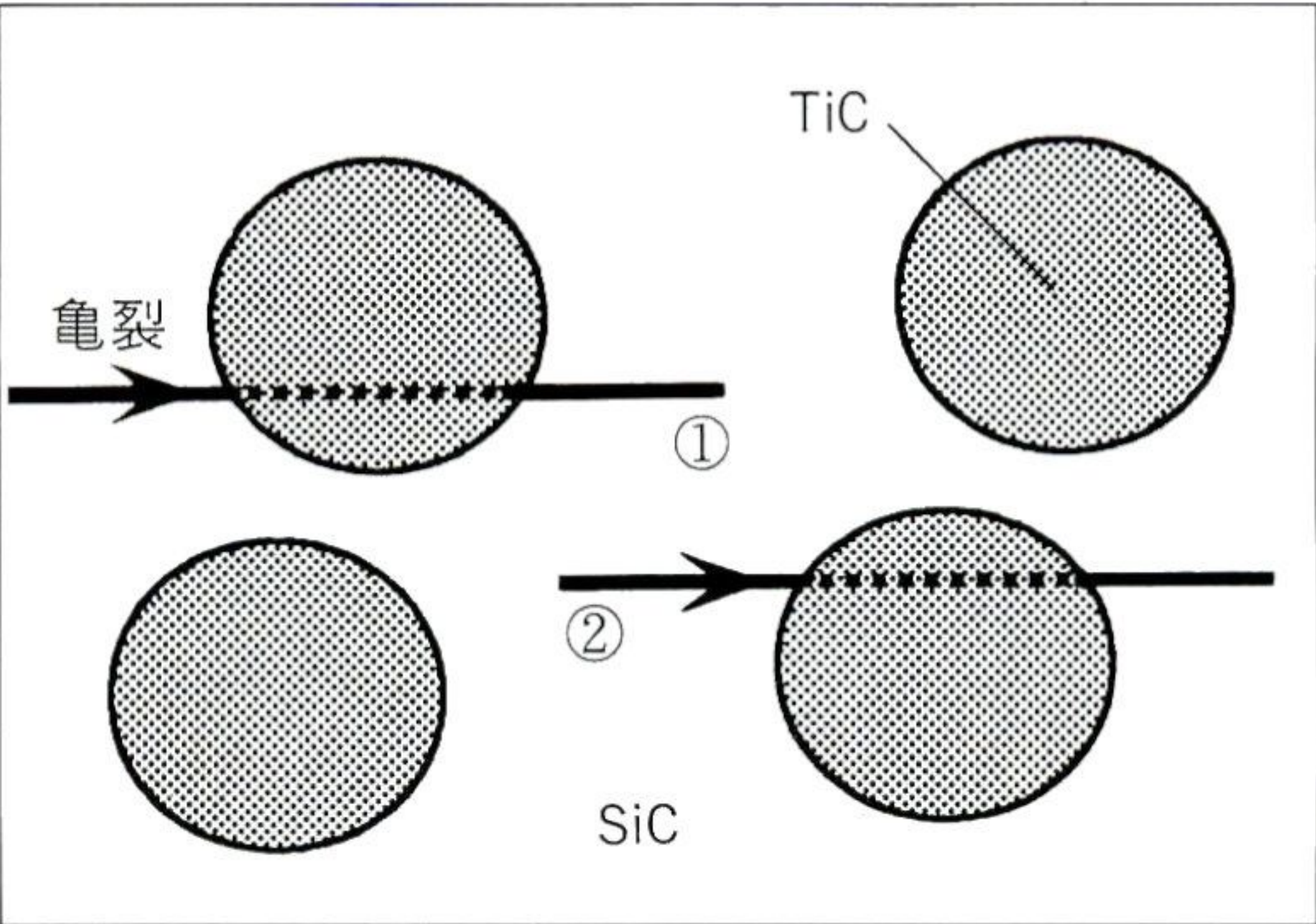


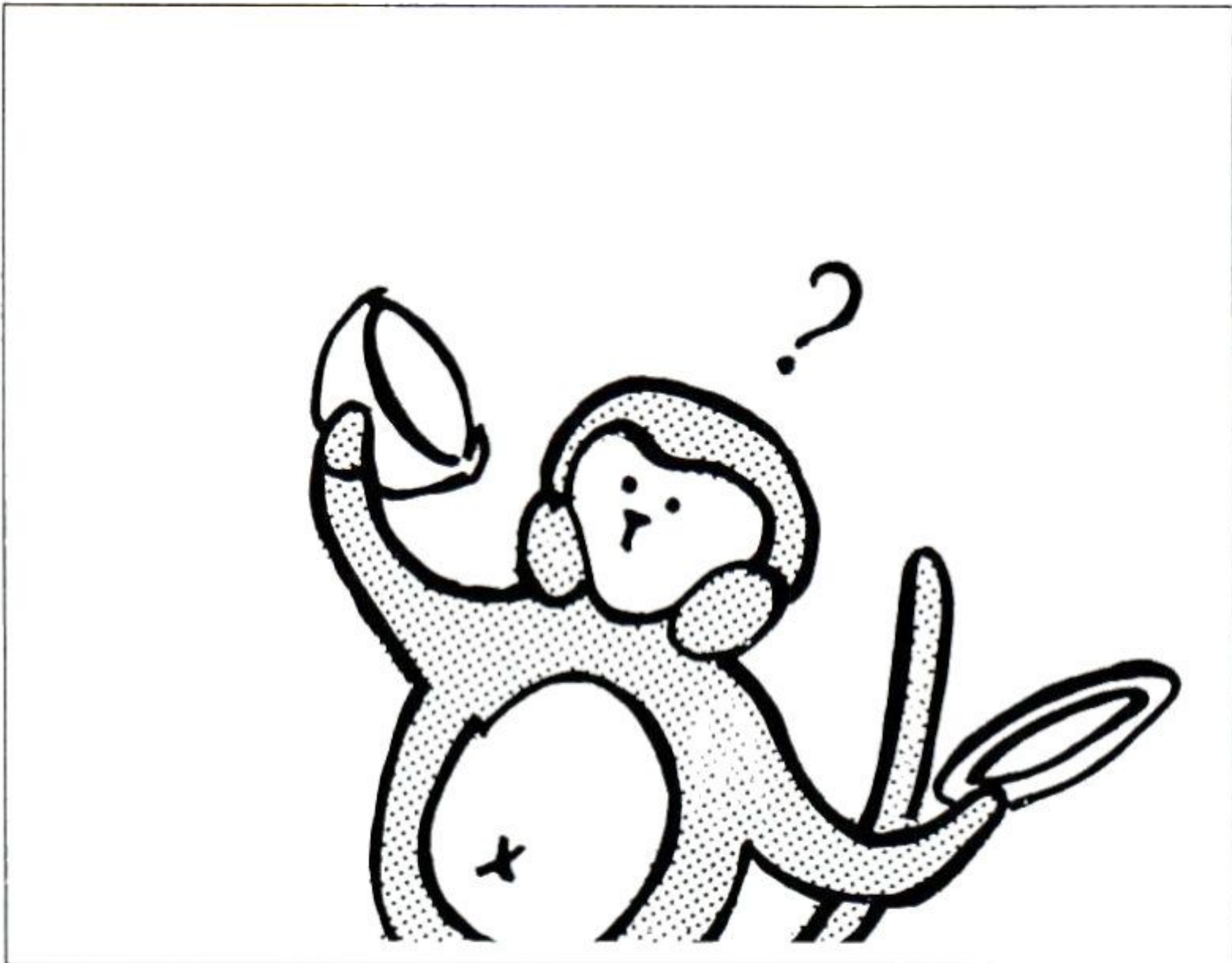
図2 STT複合材

①亀裂が一度止まり

②別の所から進む

のを押えているのだ。この仕組みはその状態から、クラック・ブリッジング(架橋)とよばれる。この架橋構造が亀裂の進行を妨げることで靱性が増すのである。

この現象は助剤としてチタンを用いたことによると考えられる。前に述べたように、炭化チタンはその構成元素の割合をある程度変えることができる。その性質によって、助剤のチタンが炭化チタンの中に拡散したと井関研では予測した。これはまだ確定したことではないが、これからの研究によってはっきりするだろう。



温度変化と靱性変化

このように、どちらの複合材料も炭化ケイ素のみのものと比べて靱性を増している。しかし、助剤の異なるこの2種類の複合材料を同じように考えてよいのだろうか。次に、環境によっては仕組みの違いが大きな差となってあらわれる例をみてみよう。

エンジンなどのように、機械の部品によっては高温状態で使われるものがある。そのため、複合材料についても高温でのふるまいを調べることが重要となる。そのことについての井関研での実験

結果をのせる(図3)。

図3は、いろいろな温度におけるセラミックスごとの靱性をあらわしている。SAの場合、高温になると急激に靱性が下がっているのがわかる。

STA複合材の場合も温度の上昇にともなって靱性がかなり低下してしまう。これは、この複合材料の靱性が2つのセラミックスの熱膨張率の差によって増していることと関係がある。温度が上がるにつれ、複合材料を構成するセラミックスのうちTiCが特に膨張し、圧力差が小さくなってしまふのだ。

それに比べると、STT複合材は温度上昇にともなう靱性の低下が小さい。これは、クラック・ブリッジングによる働きが温度によってそれほど左右されないことを示している。

室温ではともに高い靱性を示した複合材料が、温度を変えてみたことで大きな違いを見せた。さらに温度以外の条件を変えることで、また違った結果となるかもしれない。こういった疑問を解決するため、井関研では様々な観点から複合材料の性質を研究している。目的とする環境にあわせたセラミックスが開発されることを期待したい。

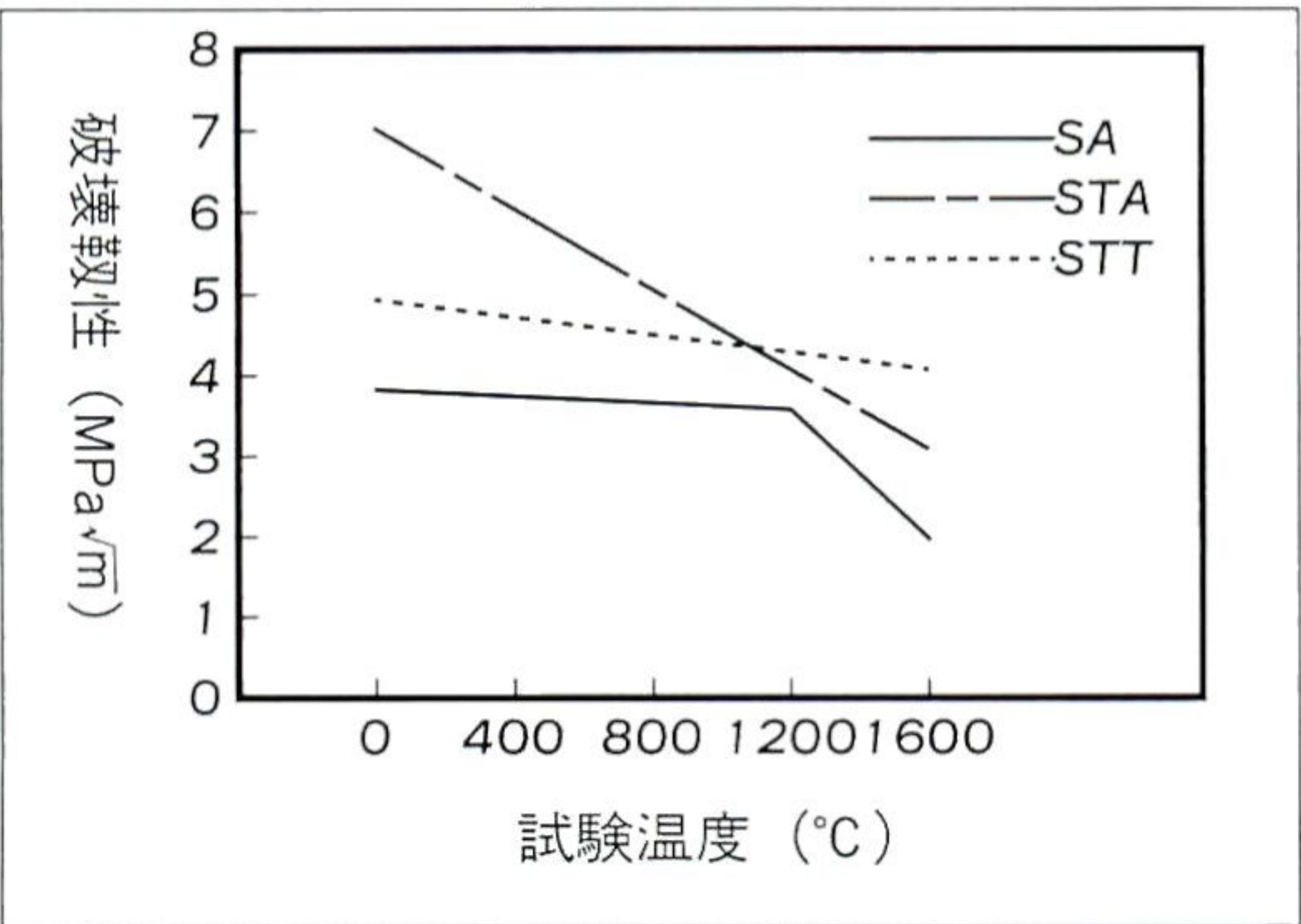


図3 温度変化と靱性変化



井関研究室と耐苛酷環境セラミックス

井関研では、ここで紹介した複合材料のほかにも、金属とセラミックスの接合技術の研究や原子炉研と共同での放射線照射実験などがおこなわれている。それらの研究は、すべて「耐苛酷環境セラミックス」という中心テーマにつながっている。

これまで機械部品の材料としては、金属が主流として使われてきた。しかし多くの金属は、強い酸や放射線を多量に浴びる環境においては腐蝕が生じてしまうため使えない。そのような場合にセラミックスを利用できるようになれば、この問題

も解決するだろう。

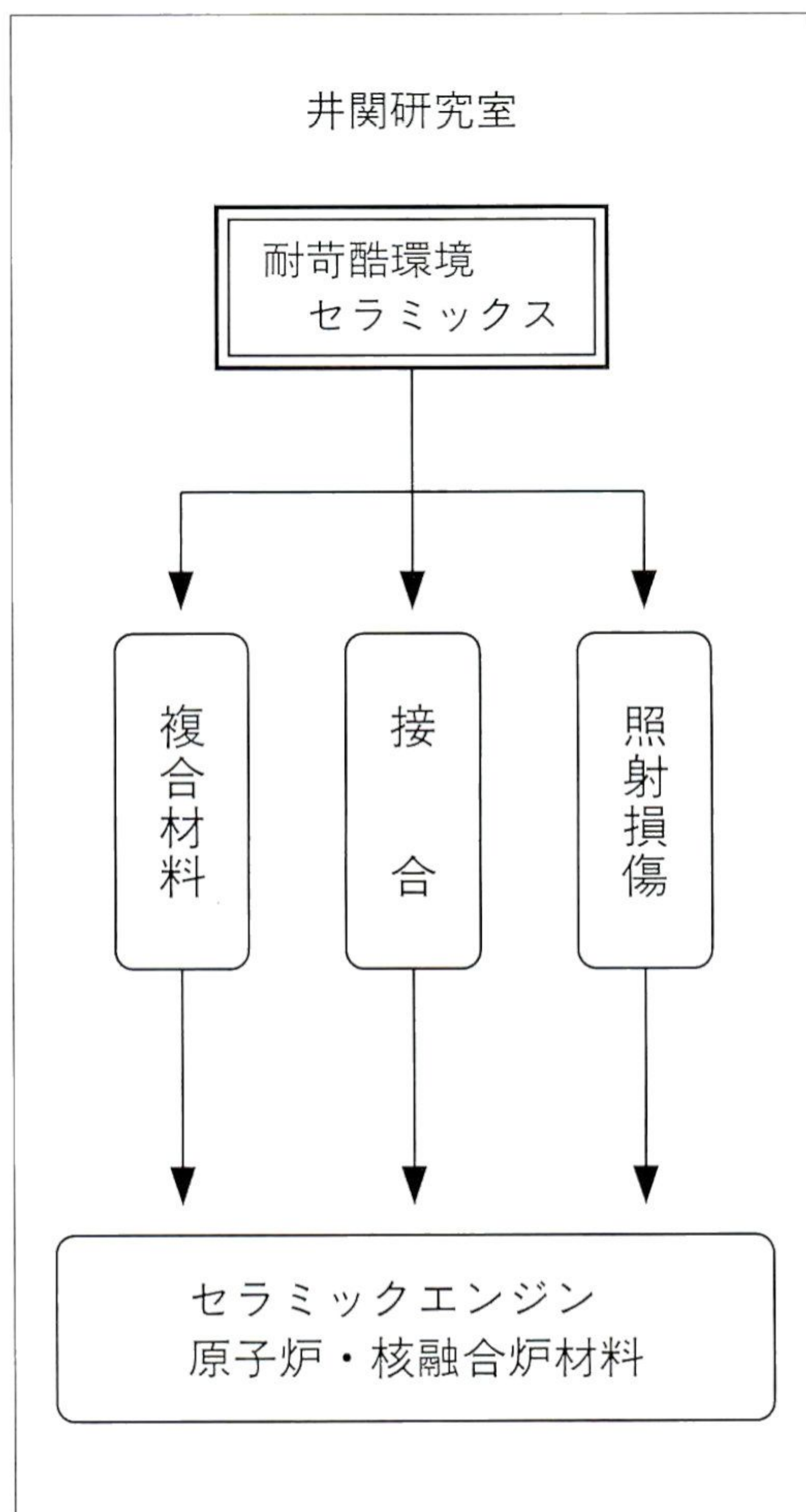
井関先生は、セラミックスの中でも特に炭化ケイ素に惚れ込んでおられ、その性質や用途などをとことん突き詰めていきたいそうである。しかし今の段階ではわからないことも多い分野であり、理論とはまったく違うデータが取れることもあるという。先生はこの一見ミスとも思える結果こそが大事であるといわれた。

井関研究室では研究を進める上でのあり方というものははっきりさせている。結果を大事にする姿勢もその一つである。その他に大事なこととして、実験においては操作の意味を理解し、何を測定しているのかを認識しなくてはならないということがある。測定器の多くはスイッチを押すだけでデータが得られるが、どうやって求められたデータなのかかわからないことがある。そればかりでなく接続箇所や目盛りに間違いがあることもあるだろう。正しい結果を得るためには、実験をする者が正しい操作をしなくてはいけない。当たり前のことではあるが、意識しなくては実現されないことだろう。

いま自分がしていることを知り、どこまでも追求していく姿勢は研究においてもっとも必要とされることである。このことはあらゆることに通じることのように思われる。常に心掛けるべきではないだろうか。

紙面の都合上割愛させていただきましたが、セラミックスと金属の接合に関する研究の話もとても興味深いものでした。簡単にいうと、金属を溶かしてセラミックスの表面に接合する際、金属にチタンを少量混ぜることでくっつきやすくすることができるとい話です。現在いろいろな接合法が考えられていますが、この方法は操作が簡単でしかもほとんどのセラミックスで有効だということでした。新しい材料が次々に産み出されても、それらがばらばらのままではあまり意味がありません。セラミックエンジンなどは、この研究が活かされて初めて完成するものなのです。

今はまだ、違った材料を組み合わせ活用することに関しては難しい問題が多くあります。有機材料、無機材料、金属がそれぞれの長所をいかし



て互いの短所を補いあうことができるようになれば、それは一つの革命と言えるのではないのでしょうか。その時には私達の周りにあるたくさんのものが変わっていくことが期待されます。

最後にお忙しい中、詳しく、わかりやすく教えてくださいました井関先生、研究室の皆さんに心から感謝いたします。ありがとうございました。

(引地 貴亮)