

技術革新と新素材（63・8・20）

小 泉 光 恵（昭17・9理甲）

只今ご紹介頂きました、昭和十七年九月卒業の小泉でございます。三高在学当時は斉藤と申し
ておりました。先程司会の方から船山の話が出ましたが、私の実兄でございます。これ又母親の
里を継ぎました関係で、名前が違っております。三高の時の同級生としてはこの席に中野さん
（旧姓小梶）がいらつしやいますが、この方が、いつもクラスのトップをしめて、私は、いつも
逆トツに近いところに居ました。毎学年度末には原級に止まる事をハラハラしながら三年間を修
了させて頂いた様な次第であります。私みたいな者が、学校の先生になるのは非常に不可解なで
きごとでございますが、知らず知らずのうちにそうなっていました。

本日は、先輩各位の前で、話をさせて頂く機会を得まして、大変光栄に思っております。先程、
お話のありました様に、昨年の秋に、大阪支部で、この話をさせて頂きました。その時、お聞き
頂いた方には、かなりの部分が重複しておりますけれども、出来るだけ、違った面を加えさせて

頂きたいと思います。ここには、理科系のみでなく、文科系の先輩各位もいらっしやると思いますので、あまり専門的にならない様に注意をしてお話申し上げたいと思っております。

最近、新聞あるいは、雑誌等に新素材という言葉が、しばしば登場して参ります。新素材に関連して昔から、物質という言葉があるんです。それから、も一つは、材料という言葉がある。英語では、物質というのは、substanceであり、そして、材料はmaterialという言葉に相当します。強いて区別すれば物質には、元素が一種類で出来た単体と、二種類以上の元素から出来てる化合物とがありまして、いずれも元素から成っているわけであります。この世の中には何千、何万といういろんな種類の物質がありますが、それぞれ、構成する元素の種類とか、あるいは、元素の並び方、あるいは、元素の結合の様式によって、いろんな固有の性質を持っているわけがあります。例えば、ダイヤモンドというのは、非常に、硬いという性質がある。又、ある物は、非常に強い磁石になっているとか、あるいは、電気をよく流すとか、逆に、電気を全然流さないとか、また、透明であるとか、赤いとか、そう云った類いの、いろんな固有の性質がある。こういう物質固有の性質というものは、人類の生活にとって、非常に重要な役割を、果たしてくれるわけでありまして、そう云う特性を利用して、ご承知の様に私どもは今日、半導体とか、あるいは、最近の超電導体だとかに、いろんな形で利用しているわけであります。例えば、超電導磁石を用いたりニアモーターカーを走らすとか、あるいは、宇宙ロケットを、とばすとか、スーパーコ

ンピューターで莫大な量の計算を短時間で処理するとかです。その時、これらの機器の中には、各種の固有の性質を持った物質が非常に重要な働きをしているわけであります。そういう場合に、我々にとって有用な物質を特に我々は、材料という言葉で表現しております。従いまして物質の一部が材料になるわけで、物質がすべて、材料であるわけではありません。ある時代には、ある物質が材料であっても、その原料がなくなってしまうたり、あるいはもっと、すぐれた性能のものが出て来て、材料として使われなくなり、物質に戻ってしまうものもあるわけです。

材料は、昔から、構成元素、元素の結合のし方や性質によって三つに大きく分類されています。すなわち金属材料、無機系の材料および有機系の材料の三つです。金属は電気や熱をよく伝え、展性延性があつて圧延などの加工性があるのが長所ですが、熱には弱い。無機系の材料は、熱には強いがもろい。有機系の材料は比較的低い温度で成形加工ができるが熱には弱い。といった長短があります。それによって、使い道がいろいろ分かれて来るという事は、私どもの日常生活におけるこれら材料の使い道から見ましても、お分り頂ける通りであります。

ところで、今日の標題の新素材でありますが、各時代、時代によって、その意味が、ちよつとづつ違うのではないかと思います。ここで人間の文明の歴史を眺めてみましょう。文明と云うものは、私の申し上げる事が間違つてるかもしれませんが、あらゆる生物の中で唯一の、人類のみが持っているものだと思うんです。その文明と云うものは、何によって、支えられたかと云うと、

それは人間が開発した、今日の言葉で云うと、デバイスとか、それを組合せたシステムでありましてその基礎には、すべて材料と云うものがあるわけです。材料をうまく活用して道具が作られたからです。人類の文明の歴史の中で、いろんな時代、時代に、いろんな材料がこの役割を果たして来ているわけです。ご承知のように石器時代に続く青銅器時代に入って、人類は、金属を使う事を覚えしました。ところが資源的に銅の鉱石は全世界的に、分布が限られておりますし、また非常に重い。金属の時代は、青銅と共に、始まりましたけれども、人類の使う材料としては、必ずしも、普及致しませんでした。ところが、鉄というものは、資源が、あちらこちらにある。それから、融点も、銅に比べると低いので精錬もし易い。また銅みたいに重くはない、そのために鉄を使った道具が農耕器具や武器をはじめとして次第に広がって行つたわけです。特に、鉄が重要な役割を果たしたのは、イギリスで起つた産業革命であります。産業革命というのは、人力に頼つていた当時の紡織を機械化して行つたという所に焦点があるわけですが、機械の動力源として始めてこの頃蒸気機関が発明されて、産業革命のシンボリック的存在になりました。その蒸気機関もボイラーははじめ木で作ってありましたが、鉄に置き換り、しかもその鉄が、製鋼法の進歩により鑄鉄から鋼鉄へと移り変つて、機関の効率も次第に向上し、第一次産業革命の達成に非常に大きな貢献をしたわけです。まあ云い換ええますと、鉄の出現と、その改良なくしては、あゝ云う形での産業革命は進行しなかつたであろうという事さえ云われているわけです。同様の例は、

次に出て参りましたアルミニウムによって、代表される軽金属の役割についてもみられます。アルミニウムは金属といつても歴史が比較的新しうございまして、まだ、今から百年位前に登場した材料であります。アルミニウムという金属は、ボーキーサイトから製錬しますが、ボーキーサイト (Bauxite) と云う鉱石は、ボー (Les Baux) と云う地名の南フランスの地中海の沿岸で最初発見されたものののです。このボーキーサイトから作られたアルミニウムは当時非常に貴重なものでありまして、かのナポレオンがダイナー用のナイフとかフォークとかを、とくにアルミニウムで作らせていたと云う話が残っています。このアルミニウムの出現は、今日の航空機の発達に非常に大きな影響を与えました。そういう意味では、鉄は蒸気機関を通じて汽車・汽船など地表交通の地上交通体系の進歩に、一方、アルミニウムは、地上から人類が上空に上るといふ永年の夢を、実現するのに、大きな力を果たしたといえましょう。しかも、これは単に、航空機の発達というだけに留まらないで、今日の所謂、国際化社会といいますが、要するに、昨日、メキシコに外務大臣が行つておったと思いますと、今度は、パキスタンの航空機の事故で、大統領が亡くなったと聞いて急きよ予定を変更して、パキスタンに飛んでゆく。とそう云う外交の展開が可能になったわけです。テレビが発達した今日の情報化社会でも依然として政治の世界では、やはり人間と人間とが、直接会つて、話をしないと、なかなか事が、うまくまとまらないという、そう云う、所謂、国際化社会というものは、航空機の発達なくしては、あり得なかつたわけで

す。そして、それは結局、アルミニウムという材料の素材の出現に帰すると考えられます。

同様な事は、戦後におけるプラスチックの登場です。これは、我々の日常生活を一変致しました。特に、包装革命と云いますか、この分野に於きましては、プラスチックの出現というのは、人間の生活を根底から変えました。今日の独身貴族や単身赴任、あるいは高齢化社会において老人が一人で生活が出来るという環境は、正に、これの出現による所が多いわけであります。同時に、このプラスチックは、航空機の世界では、軽量化に非常に大きな貢献をしております。今日のジャンボジェットなどは、大半がプラスチックでできており金属の部分はごく一部に限られています。特に航空機の最先端をゆく軍用機に於きましては、如何にしてプラスチックの割合を増して、軽量化をはかって速度を増すかという事が当面の大きな課題になっているわけですから、プラスチックはアルミニウムについて、航空機の格段の進歩を、もたらすに至りました。

さらに近年になりますとセラミックスという焼物の貢献が、一つの特色となっています。古来からの陶磁器によって代表される昔からのセラミックスに代わるこの新しい焼物のことをニューセラミックスまたはファインセラミックスと呼んでおりますが、これは、金属とか、プラスチックに比べて、その歴史がはるかに長いわけです。最初のセラミックスである土器は今から約一万年位前に製造が始まりました。技術の進歩とともに、それは陶器、磁器へと変わりましたがそ

の用途は主として容器でした。ところが近年容器の時代から機能としての役割を果す焼物に、変身して来たわけです。その変身が起り始めたのが、一九三〇年代のはじめでございますが、ごく最近その傾向が、どんどん、強まって来ました。その最も典型的な例としてスペースシャトルのことを申し上げたいと思います。

今から、四年位前に、シャトルは最初の飛行実験に成功致しましたが、その後の事故により、テスト飛行は一時止っておりますが、このスペースシャトルというのは、いはば宇宙の乗物のはしりです。

乗物としての利用に先立って、宇宙空間に打上げたシャトルを無重力状態の実験室として利用する計画があります。無重力になると対流という現象が起りませんので、対流のない状態で、均一度の高い新しい材料を作ろうというねらいです。しかし、シャトルの本命は輸送用の乗物です。将来建設される宇宙ステーションを基地に致しまして、宇宙工場を作り、大々的に無重力状態での材料の製造を行なうことが始まっています。また、それだけでなしに、いずれ地球上は人間で満杯になって参ります。現在の人口の十倍位も、人口が増えますと我々の地球では、養いきれない。住む土地はあるんですけども、農地に限度がありますので、結局、食糧生産に、限界があるわけです。現在の人口の大体の十倍位で、もう満杯になる。そうしますといずれ将来は、宇宙空間に、スペースコロニー（宇宙植民地）を作りまして、そこへ移住することになります。そう

致しますと、前述の宇宙工場や居住地へ人とか、物資を運ばなければならない。あるいは、原料物資を地球から運び、逆に、出来上った製品を地球に持って帰って来る必要が起ります。すなわち地球と宇宙工場、あるいは、地球と宇宙植民地を、往復する様な乗物が要るわけです。スペースシャトルを飛ばす目的は、まずはこのようなことから始まったわけで、その全長は三五米位のものですが、打ち上げたあと、大気圏を通じて上昇し再び帰って来るわけですから、短時間ではありますが、機体の表面温度が上ります。コンピュータによる試算では、機体の先端部が最も温度が上り一五〇〇度くらいになります。機体全体をみましても、大半が大体一〇〇〇度位の温度になります。強度が必要ですから、機体の材料にはアルミニウムが主体で、マグネシウムを少し入れた合金を使用しています。が、むき出しでは、それ自身の融点を越えてしまうので何らかの方法で、これを高い温度から守らなければいけない。高い温度に耐える材料と云いますと、セラミック系の材料ということになり、そこで金属で作った機体の表面に、セラミック系耐熱材料を張りまして、高い温度から守ることとなりました。そのためアメリカの航空宇宙局が航空機産業の会社と協力を致しまして、約二〇年間をかけて開発したのが最初の試験飛行当時、新聞に報道された白いシリカタイルです。このいわゆるシリカタイルと申しますのは、材料の使用条件として、まず一〇〇〇度くらいの高い温度に耐えないといけない。さらに軽くないといけない、それから、第三には、ある程度、機械的な強度もないといけない。この三つの要素を大体満足する以

外に、も一つ附帯する技術と致しまして、金属の表面に、無機系の材料を、張りつけないといけませんから、接着技術が必要になって来るわけです。しかも接着したものは、短時間であっても一〇〇〇度近い温度に耐えないといけないという、在来技術ではすまない問題を抱えているわけです。

そういう問題を、つぎつぎと処理しまして、出来上がったものが、シリカタイルでした。この品物はシリカというケイ素の元素一個と、酸素の元素が二個から成る化合物で、私共の周辺にあるもので申しますと、あの水晶、これと同じ組成の物質を、細い繊維状に致しまして、それを、絡み合わせるわけです。そう致しますと、シリカの比重は二・七ですが、繊維の間に隙間がたくさん出来ますから、全体の見かけの比重は〇・一、水の一〇分の一ということになります。ですから、これで作ったタイルは、水にほり込みますと、沈まないで、プカプカ浮いています。こういう物で、タイル状の格好のものを作って、これを表面に張ると、高温からシャトルのボディを守る事が可能になりました、その結果、最初の試験飛行が成功裡に終わったわけでありました。しかしこれには、まだ他にも、いろいろ問題がありまして、シリカタイルには穴が一杯あいていますから、もしむき出しにして置いておきますと、毛管現象によつて雨水が入ってくる。水が入った状態で、打ち上げますと、急に温度が下りまして水が凍結します。その時の体積膨張で、タイルにクラックが入って、割れてしまう。ですから、タイル表面に、何らかの処理を致しまして、防水

をしなくてはならない。そういう技術も同時に必要になって来る。そういういろんな問題をかかえながら、ともかくも成功したわけです。ということはスチームエンジン、航空機につぐ一連の交通体系における革命的な出来事です。シャトルの開発は正にハイテクの一つだと思ふんですが、この革新技術におきまして、素材開発が重要な役目を果たした素晴らしい事例だといえましよう。

ここで、私自身の専門分野であるセラミックスに話を限らせて頂いて、セラミックスが過去一万年の間に、どういう変革をたどって来たかについてお話したいと思います。他の金属やプラスチックと違って、セラミックスは、ちよつと違った歴史を辿ってきました。人類の手によって最も古くからセラミックスの製造技術が出来たにもかかわらず、その後、ゆっくり、ゆっくり発達して参りました、しかも、ある時期からは、金属においぬかれて、それからプラスチックにも、利用分野のある部分を奪われまして、相撲で云えば、材料の世界で土俵際に、おい込まれ、つき落とされる所まで来ておったんですけれども、最近、前記の様に宇宙開発などで、なくてはならないというような時代に立至ったわけです。その間の事を、申し上げたいと思います。

人類の文明というのは、道具を如何にして使いこなすかにかかわっており、これが人類の他の動物と違う大きな特色であります。道具の発達は、材料を如何に使いこなすかと云うことに大きく依存します。昔人間が使う事が出来た材料は普通の石しかなかった。その石を加工して、石器

を作り、所謂石器時代が、スタートしたわけです。ところが石の加工は大変で、非常に複雑な形状のものは、作れません。ところが、ある時期に、人類は火を発見致しまして、火を利用する事を知りました。そしてある種の土は、火に加熱されると固まって来る。そして、今日の焼物を作る発想が導かれました。しかも、その器には、一つは芸術的な立場から、いろんな紋様をつける。この紋様のつけ方というのは、単に芸術的な問題だけやなくて、如何にして土を緻密にするかという事と関係しています。その方法は当時いろいろとあった様でございまして、今日、それを再現する研究がなされています。土器の出現は人間の生活様式に非常に大きな影響を与えました。ご承知の通り人類は、最初は狩猟の生活でありました。狩猟の時代は、移動型の生活であります。獲物がある所へ、集団で移動して行って、そして、狩猟し、肉を食べる。それがなくなれば、別の所へ移動する。だから定着型より移動型です。いろんな器が出来るようになりますと、食糧を貯蔵するとか、あるいは、クッキングをするといった事が、出来る様になって来まして、移動型から定着型への移行が促進されます。

ところで、土器が一体いつ頃出来たのかという事でございますが、今日放射性元素の半減期を用いてどれだけ年数が経過しているかが決まります。炭素には原子量14という同位体がございます。半減期が二〇〇〇年くらいです。ですから、新石器時代とか、旧石器時代の、出土品の年令を決定するのに都合がよろしい。この方法によりますと、日本の縄文式土器は、約一万年位経

っていると云われておりまして、世界で最も古い方に属する様であります。そういう事で、約一万年位前に、人類は自分自らの手によって、造形の技術を獲得したと云うことになり、それは今日の材料製造技術の、ルーツになります。

ところが、当時は、まだ窯^{かま}がありませんでしたので、今日みたいに温度を高く上げて焼くという事が出来ない。野焼と云いまして、野原の地面を掘りまして薪を組み、成形品を焼成します。このやり方では温度はせいぜい六〇〇度しか上らない。その温度では陶土の原料の土の中から、水が逃げてゆく位で、所謂、化学反応が起るといふ所までは参りません。こういう温度で焼いたものの一例が今日の樂焼用の土器です。植木鉢もそうですが、どっちかと云うと穴だらけのもので、水を入れておきますと、だんだん漏ってくる様な代物です。穴が多いという事は、強度的にも、あまり強くない。そこで如何にして穴をなくし緻密にして、強度を出すか、その為には温度を上げないといけないということになります。幸い窯というものが発明されて、温度が八〇〇度位に上って陶器が出来て、その後磁器が出来ると云う風にして、今日一六〇〇度位にまでなつて来ているわけです。前にものべましたように土器の時代には日本は中国に比べまして、非常にすぐれた技術をもっていた様ですけれども、この窯を作る段階でおくれてしまひまして、中国から逆に技術を導入してやつと窯を作りました。この辺で技術の格差が出来てしまつて、後は残念ながら大陸の文明のまねをするばかりとなりました。ご承知の様にかつて豊臣秀吉が朝鮮に遠征

して、戦争としては負けて帰ったけれども、磁器の技術を、朝鮮から導入するという意味では非常に大きなプラスになったわけです。多くの陶工を連れて帰ったもんですからそういう人達が九州の伊万里とか、唐津の辺で磁器を作り出しまして、それが全国に広がりました。この点は第二次大戦とよく似た所がございまして、戦争そのものには負けてしまったけれども、技術導入という事につきましては豊臣秀吉は非常に大きな功績を果たしたと、云えるのではないかとされています。秀吉の韓国遠征を別名セラミックウォーと呼ぶ人すらいるわけはそういう事情によります。豊臣秀吉以降、各藩では何か産業を振興しないといけないということで、焼物作りが始まり、茶道とも関連して日本の各地で各種の陶磁器が生産されるようになりました。

ところで、セラミックスが飛躍的に近代産業に対応する様な材料になり、素材として、新しい展開を遂げるようになりましたのは実は一九三二年の事であります。これは日本で起ったものではありません、西ドイツのジーメンスと云う会社の人達によつてです。車のエンジン部にスパークスプラグという部品がありまして、四気筒の車には四つあるし、六気筒には六個ついています。そこに白い絶縁碍子があります。これは正に焼物でございします。しかもこの焼物が実はクラシックな焼物からハイテク的な役割をする焼物へと変化する第一歩だったわけです。どうしてかと云いますと、点火栓にはいろんな性能が要求されるからです。これにはかなり高い電圧がかかる。ここでは、いろんなガソリンの中に入っている鉛系の化合物の蒸気による腐蝕に対する耐久性が

ないといけない。それまでは、この焼物は全部天然の原土で作っていたのですが、その性能に限度がありました。それで、ドイツの人達はアルミナという化合物の粉を焼結することを考えました。ところが、アルミナの粉を水で練りましても、可塑性が出ない、粘土細工が出来ませんのでそれに今度は何か可塑剤を加えないといけない、その研究をいろいろやりまして、とうとう最終的に、このアルミナという天然の土から全く離れてしまった人工の化学的な原料の粉で、非常に性能の優れた点火栓を作る事に成功しました。この技術があといろいろな製品を生み出します。

その一つは最近の電子工業において、広く使われておりますIC基板です。京都の地名を会社の名前にしておられる京セラという会社がありますが、成長が非常に高かったという意味で、非常に有名になっております。基板材料では、^{基板}どういう事が要求されるかと云いますとそこに回路がプリントされておりますから、電気が流れた時に、ジュール熱が発生する。その熱が出来るだけたまらない様にする必要があります、その為には、使う材料は熱をどんどん流す様なものでないといけない。ヒートシンクと我々呼んでおりますが、シンクというのは、水の流すの事です。だから熱をどんどん排泄する様な、材料でないといけない。要するに熱電導が高くないといけません。熱電導が高いということであれば金属を使ったらいいわけですが、金属というのは、電気を伝えるからこういう所には使えません。ですから電気に対しては絶縁性で、熱はどんどん流すものという事になり、材料としてはかなり限られてしまいます。ダイヤモンドがそういう性能では格

段に優れているんですけども、値段が高いものですから、アルミナが最もいいということになったわけです。京セラさんはアルミナ基板をつくる技術を開発して、量産しました。日本が世界の大体八割位作ってる内の、又その六割位は京セラさんが作る。それによって京セラという会社は非常に急成長したというわけでございます。こういう風に致しまして、アルミナが、先程は自動車産業と結びつき、さらに電子工業とも非常に強い連がりを持つという風になってセラミックスの活躍する舞台が、広がり、かつ、変って来ました。

アルミナを単結晶に致しますと、透明なものが得られます。天然宝石と致しましてルビーとかサファイアという石があるんですが、その石の組成はアルミナなんです。それには赤い色のものと青みがかったものがありまして、赤いのはクロームという元素が入ってる。青いのは二価の鉄が少量入っています。不純物が入っていないと、無色透明なんです。それはダイヤモンドに次いで非常に硬いものですし、色もきれいなものですから、宝石として珍重されてきたわけでございますが、現在は工場で量産することができます。日本で作ったもので、装飾用として東南アジアあたりに輸出しておりますが、硬いものですから、国内では天秤のナイフエッジや時計の軸受けにも使っております。

さて、アルミナというものは、焼物にすると真白いんですが、単結晶にしますと、無色透明になる。透明であるという事は、窓の様な材料に使えるということで、ふつうは、板ガラスを使っ

ておりますがあれはシリカがベースで、それにソーダが入ってるわけです。ソーダを入れる事によって融点をぐっと下げておいて比較的低い五〇〇〜六〇〇度位で板を作るわけですが、その代りこの板ガラスというやつは火にあうとすぐ軟化してしまふ。まずはですから耐熱性がない。それでもし、一〇〇〇度位の温度で使える窓の材料ということになるとソーダを含まないシリカガラス、俗に石英ガラスと申しますが、そういう水晶を溶かした様なガラスを使うわけです。これは一〇〇〇度位までもちますけど、一〇〇〇度以上になりますと、これもダメになる。そうすると例えば一五〇〇度〜二〇〇〇度という所で窓に使える様な、材料が、何かないかと云う事になりますと、アルミナの単結晶を作つて、これを切りまして、そして板をこしらえるしかない。しかし、これは非常に無駄な事でありまして、もしそういう事やりますと、折角五時間か六時間使つて作りまして、後でカットして磨いているうちに、その八割位はなくなつてしまひ、歩留まりは二割位しかない。折角アルミナの焼物が出来るわけですから、始めから円板なりチューブを作つておいて、それを焼いた時に何とか透明にならないかと。という要請がアメリカで軍関係から出まして、この研究を受けたのが、G・E社でございますが、その人達が、なぜ、どうしたら光が通るか、あるいは、それにはどういう風に焼結したらいいのか、という風な事を一生懸命に研究致しまして、出来上りましたのが、ルカロックスという透明なアルミナの焼物なのです。アルミナセラミックスの歴史の中では非常に画期的な出来事でした。ご承知の様に、現代は光の

時代であるといわれています。例えば通信にしても銅線を使った時代から今や光ファイバーの時代に入ってるわけですね。光産業というのは、これから何兆円産業になるだろうとか云われています。前は電線会社であったところは、これからは電線ではいかん、と云うことで光ファイバーに力を入れています。そういう時に焼物も光が透るという事は、これからは焼物も光材料の一員に加える事が出来る、そういう道が開かれたという事になろうかと思っています。

アルミナの話が次々出ますが、アルミナというのは、一九三二年頃からは焼物の世界で正に王者の地位にあった。いろんな用途が出て参ります。その比較的新しいものと致しまして、我々の人工の歯とか骨ですね。実は私共の骨とか歯は磷酸カルシウムというもので出来ているんですが、それと同じもので仮に作りますと、今の所、残念ながら強度が出ない。それで今はアルミナの焼物で骨もしくは歯に対応するものを作ってるわけでございます。早晚、いずれ磷酸カルシウムの時代が来るかもわかりませんが、当面は、まだアルミナが、そういう人間の骨とか歯の代りを果しています。現在すでに人工骨を使ってる部分は、我々の人体の中で約10ヶ所位あります。こういう代替品は、一種の人工臓器の始まりです。いずれ人工臓器という問題は単に部品代替の時代からもっともっと高級なものに変ってゆくと思えますけれども、そういうものの走りであるという風にお考え頂いたらと思います。

以上アルミナにつき一連の話を申し上げたのでございますが、ここでちょっとこの話に区切り

をつけさして頂きますと、要するに人類は昔から天然の土を使っていろんな陶磁器を作ったり、ガラスやセメントを作ってきました。これは勿論現代の産業を支える重要な役割を果してゐるんですが、これらは云うならば、所謂ハイテクと云う以前のものである。それに対しまして今日の電子工業とか自動車産業との連りを持って、しかも、原料に天然物を使わないで化学原料を用いたものが合成され、しかも比較的単純な組成を持ったものが利用される様になって来ました。というのがセラミックスにおける一つの大きな革命でございます。一九三二年という年にこの大きな革命がおこりました。それ以前のを私共はクラシックスセラミックスとかあるいは伝統的セラミックスと呼んでいます。その後のものはニューとかモダンとか、スペシャルとか、あるいは日本では、も一つファインという表現が使われています。

一九三二年の第一の革命はほとんど完了し、産業界でも、その方向にどんどん進んでいるのですが、オイルショックに際してもう一つ大きな革命がハイテクの進行と密接な関係を持って、セラミックスの世界で起ったわけです。オイルショックというのは、ご承知の様に産油国が今まで非常に安く油を売って日本とかアメリカが、それを安く買って加工し、それからいろんな製品を作って、又それを輸出すると云う形で、先進工業国は非常に安泰な地位にあったわけでございます。それが産油国にあゝ云う事がありまして、当時非常に大きな問題になったのは、ご承知の通りでございますが、それにいち早く対応したのは流石にアメリカであります。アメリカ自身は自

分の所に何らかの形では、油を持っているんですけれども、いち早くそれに対して対処しました。エネルギー関係のお役所が、七〇〇度で作動しているタービン型のエンジンの作動温度を一、三〇〇度まで五〇〇度上げることによって、エンジンの効率をもっと上げのことを考えました。その結果、3/4割、油を節約する事ができます。ところが問題は、今までのエンジン部品は耐熱性金属で出来てゐるわけですが、一、三〇〇度に上りますと、金属の限界を越えて参ります。

勿論、金属は、いろんな機械部品として、これ程優れた材料はないわけです。今日の材料と云えば機械屋さんにとってはすべて金属であつて、金属以外のものは材料として頭の中にお持ちになつてないし、設計技術も全部その金属を元にして、出来上つてゐるわけです。でありますから、なるべくなら金属の耐熱性を上げて高い温度で金属が使える様にしてやつていこうと云うので、いろんな改良を、金属の方でもやつておられるわけでございますが、実用的には一〇〇〇度位が限度であります。そうしますと、やむなく耐熱性のあるセラミックスに頼らざるを得ないという事です。ところがセラミックスと云うのはもうい。ですから、およそ機械部品として、セラミックスはどう考えても不適当なものであると当然思われるわけでございますが、耐熱性という立場で考えますと、何とかしてセラミックスの中に、幾らかでも金属に近いものがないかと、あるいは近いものがあつたら、それを何とか改良して金属に近づけて高温で金属の代用をさせようという事が非常に大きな課題として上つて来たわけです。

アメリカは、既に一九七〇年に入る前位から、国家プロジェクトとして、そういう研究を始めて、爾来ずっとやつてゐるわけですが日本も今から六年位前から、その研究が始まりました。その後日本も大きな進歩をしまして、世界ではアメリカと日本がトップにあつて、そしてその次にちよつとおくれて西独が追つてゐるという状態で研究開発が進んでいます。

それでは、いろんな機械の部品の代りになる様なセラミックスにどんな化合物があるのかと云いますと、長らく王者の地位にあつたアルミナは確かに非常にすぐれた万能選手で、陸上競技で云えば、トラックもやればフィールドにも強い。そういう選手なんぞでございますけれども、機械部品のなもので使おうとすると、まず高温強度が常温でもあまり高くない上に、温度が上がると劣化してしまふ。次に熱衝撃に対して耐えられるかどうかですが、アルミナよりもっと良いものがあるのです。それから金属が持つてゐる靱性、これも必ずしもよくない。アルミナはそういう意味で、いろんな所で非常に優れた性質があるんですが、機械部品用には必ずしもよくない。従つてそれに代わるべきものが必要なわけでありまして、今まで余り重視されなかつたジルコニアが常温では非常に強度で高いことで高く評価されています。また、ケイ素と窒素の化合物、あるいはケイ素と炭素の化合物、こういうものが着目されるようになりました。ここで一つ注意して頂きたいのは、確かに金属の相手が酸素である化合物が一九三二年に起つた第一革命以後主力でありましたが、今度の新しい革命に対するスターはだれであるのかというと、それは相手が酸素

でない窒素とか炭素とかの化合物が主役になって来ます。これが第二次革命の大きな特色であります。目的が機械部品であるという事、それからもう一つは、この化合物の種類が従来の酸化物ではなくて非酸化物であることであります。では、そういうものの研究開発が進みまして、実際どんな実用品が出て来てるのか。デパートにいらつしやいますと、最近セラミックス製のハサミとか包丁とか、そういうものがございます。量はまだ大した事ありませんが、日本は流石にアメリカと違って、民需がどうしても主役になって来る。アメリカはミリタリーがあり、宇宙がありますから、材料開発の目標がそちらが主力になって来るんですけども、日本の場合は、実際にどんな製品を、作るとなれば、どうしても民需品が主体になって来る。だからジルコニアみたいなものは、さびないハサミとか包丁、あるいは医療用メスに使われています。あるいはその他ゴルフのクラブのヘッド、釣具とかです。すなわち、スポーツ用品やレジャー産業の方に新しい素材が、使われている。これはアメリカと違って日本独特の現象だと思えます。

産業用になりますと、例えば、石油化学工業の方で使われるバルブの中に弁座、弁体というのがありまして、今までは金属を使ってきました。金属を使つてますと摩耗性があるため寿命が短いんですね。一ヶ月ともたないという話でございますが、そういうものに例えば、金属の代りにセラミックを使います。そうしますとセラミックは摩耗性があまさんから非常に寿命が長くなるという事です。オーストラリアあたりでやっております、石炭液化のプラントでは随分こういう

セラミックスバルブが有効な働きをしているという話でございます。

最後に構造用セラミックスの本格派ともいえるべきエンジン部品のセラミック化ですが、窒化ケイ素製のブレードをかなりの高い温度で、高速に回転させるわけですから大変なことです。自動車ではコストの問題がありますから、そうどんどん金属がセラミックスに置き替るわけがありません。しかし、ごく一部ではありますけども、日産フェアレディというスポーツカータイプの車のターボチャージャーに世界で最初のセラミック製のブレードが実際に使用されているという例がございます。

アメリカがいち早く、セラミックス化に目をつけたというのは、一つはアメリカの場合は油の問題もあると思うんですけども、むしろそういう事よりも、金属の代りにセラミックスを使う事によって重金属資源の問題から、脱皮出来るといふねらいがあるのではないかと思います。もし今の様に自動車のエンジン部品を金属で作ってゆくとしますと、耐熱性の金属を用いなければいけませんから、クロームだとか、ニオブ、ニッケル、コバルトとか、こういう風な金属が非常にたくさんいるわけですね。これは、白金程ではありませんが、白金に次ぐ位に非常に貴重な重金属でございます。特にコバルトなんかは南アフリカのザイル共和国が世界の主要産地になっておりまして、すべての資源に比較的恵まれている米国といえども、輸入に頼ってるわけで、米国でも日本でも、常時備蓄をしないといけない所謂、戦略物資なんです。もしそれが先程のセ

ラミックスで代替できる様になると、構成元素はケイ素、窒素、炭素ですから、我々の周辺にくらでもある。日本は資源がないと云いますけれども、この種の元素は日本列島において、いくらでも入手出来る元素でありますから、原料獲得の心配から我々はのがれる事が出来ることにあります。エンジン部品のセラミック化の背景にはこのような資源問題も大きな意味を持っているのではないかと風にかえるべきではないかと思ひます。

先程来申し上げている様にセラミックスの世界では一九三〇年代に第一の革命が起り、さらに一九七〇年代のオイルショックを契機に致しまして、第二の革命があつた。所が、第一と第二の材料革命とでは、非常に大きな違いがありまして、第一の方はもうほとんど、成功して、産業ベースにのつてると考えていいんですが、ところが第二の方は、とつかりが幾らか出来ているという段階で、これが本格的になる為には、まだまだ時間がかかると思ふんですね。どつちかと云うと、日本ではいささかマスコミがさわざ過ぎまして、明日にでもセラミック製のエンジンを搭載した車が町中を走るといふ様な印象を与えておりますが、決してそういうものではありません。自動車の場合、少くとも十年や十五年はかかる、コストと必要性からひよつとすると永久にそうはならないんじゃないかという事も考えられますけれども、今後いろんな技術が進歩しますといふと、各種の必要性が出て来て、必ずこの技術が、生きてくる時代が出て来ると思ひます。特にこれから、宇宙開発が日本でも推進されることになりますと、自動車と違つた意味での新しい分

野が展開する可能性があると考えられます。いずれにしても古典的なセラミックスから新しいセラミックスへの進化はすべて時のニーズに対応するものであり、またある場合には、ニーズとして新しい材料が生まれて来た為に、それを活用して技術の革新が起るケースもあり、いろいろでありますけれども、素材と技術革新とが常に関連しながら、セラミックスの世界でも歴史的な展開があつたという事をご理解頂きたいと思ひます。

最後に現に起りつつある、あるいは、これから来世紀にかけて起ろうとしている一つの技術革新と、それが新しい素材の登場を求めているというんですか、あるいは、そういう素材が登場しなければ、その新しい技術革新が起り得ないという問題の一つを申し上げたいと思ひます。この話の冒頭にスペースシャトルの事を申し上げましたけれども、スペースシャトルというのは確かに宇宙開発に於いて一つの歴史的な大きな節目を作つたと思うんですが、シャトル自身は将来普遍性のある乗物にはならないんですね。というのはご承知のように宇宙飛行士は、体力や健康上のチェックを受けるし、また、ものものしい装備をしなくてはならない。シャトルが一般向けの宇宙の乗物になる為には、いろいろ、解決しなければいけない事がある。このような現状で、先進工業国が考へている宇宙の乗物の将来構想が宇宙往還機（スペースプレーン）なのです。すでにアメリカの場合はレーガン前大統領が二年位前の議会の年頭教書で、アメリカがこれの開発を始めることを宣言し、既に議会で予算の承認を得てゐるわけです。また、ヨーロッパはアメリカに

依存せずに技術開発を進めております。日本もですね、今までは宇宙開発に対しては、ほとんど他国に追隨してまいりましたが、そろそろ独力でやらねばいけない、しかも工業力としては、それを実行するだけの力を、潜在的にもっております。

そういう次第で日本でも、宇宙往還機開発の構想が始まりつつあります。これはスペースシャトルと、どこが違うかと云いますと、離陸時に普通の空港の滑走路から水平に上って行って、無重力状態の所まで行き、そこで必要な作業をして帰って来る。だから宇宙往還機というんですが、も一つは高い所まで上ったら、今度は水平に飛びまして、超音速機にもなれる。だからニューヨークと日本の間は二時間位で結ぶという、使い道もあります。ところがこれを作るのにいろいろな問題があるんですが、最大の問題点は、先ず、上昇時に、大気圏を突破するのに三〇分間を要します。その間に、船体の温度が上り、コンピューターのシュミレーションによるとノーズの個所がシャトルでは一、五〇〇度だったものが一、八〇〇度になります。機体全体が大体三〇〇度位高くなるのです。常温に対して、三〇〇度なら大した事ありませんが、一、五〇〇度に対して、更に上積み三〇〇度ですから、これに耐える耐熱システムを作るといいうのは大変な技術になってくるわけです。

多額の研究開発費を投じてまで、何故こういう乗物を開発しなくてはならないのかということですが、シャトルのお話を申し上げたからおわかりになると思いますが、二十一世紀の宇宙活動

の姿として、例えば先程ちょっと申し上げた宇宙ステーションを設ける。これは、今世紀中にアメリカが作るのを日本が一部借りてやる様でございしますが、そのうちに日本独自の日本がオーナーになった宇宙ステーションや宇宙工場へ人間や物資を運ぶのに、乗物が必要になってくるわけです。

機体の表面温度がどの位上ってくるかという事を、歴史的に眺めてみますと、一九三〇年代の練習機というのは、表面がわずかに五〇度でありました。ところが第二次大戦の零戦あたりでございしますと、これが一〇〇度になり、八〇年代の軍用機で大体四三〇度、シャトルになりますと、一〇〇〇度を越しさらに今のスペースプレーンになりますと、これが一、七〇〇度位になる。という風に急速に表面温度が上ってくる。ですから如何にしてその表面の耐熱システムを確立するかということが重要で不可欠であるかということはおわかり頂けると思います。

日本の航空宇宙技術研究所において有志が集って、いろいろ議論しているうちに出て来たのが、傾斜機能材料という新しい材料の概念でした。今までの材料ではすべて均一なものを作ることに努力が注がれ、機能も、その材料片ではどこをとっても均一になっていることが理想でありました。だから、この常識を破って材料片組成に組織、機能などに勾配をつけようという考えです。例えば、セラミックスは耐熱性にすぐれ、熱伝導と云えば金属が得意である。そうしますと例えば、片面はセラミックスで他の片面は金属から出来ていていつの間にやらセラミックが金属に変

つてゆく。逆に金属がいつの間にやら、だんだんセラミックスに変化してゆくというように、連続的に変化したものを作ったかどうかというわけです。そうしますと片面は非常に温度が上つてもセラミックスを使っているので熱に耐える事が出来るけど、金属側では逆に、熱伝導が高いですから水で冷やすことにより低い温度に保てる事が出来、この間にものすごい温度格差をつけでも大丈夫というような材料を作ろうというわけです。

現実にはそういうものが、うまく作れるかどうか、という事でいろんな試作を現在やっております。例えば、大体五ミリメートル位の厚みで片面は炭化ケイ素で他の面に向うにつれてだんだん炭素が連続的に増えて来て最後は純粹の炭素になってしまうようなものが出来てきています。

もう一つの例を申し上げますと、例えば半径一〇五ミリメートルの円筒形ロケットノズルがありましてその厚みは一五ミリで内面がホウ化チタン、外側が金属の銅になっています。この円筒壁に組成傾斜をつけますと、内側は絶対温度一、五〇〇度に耐えられ、外側は三〇〇に保たれる材料ができ、かなりの温度勾配を与えることができます。片面が金属、もう一方の面がセラミックスという材料を必要とする時、今までだったら、金属にセラミックコーティングをするか、又は金属とセラミックスとを接合した二層材、あるいは真中に50対50の中間層を入れた三層材を用います。そうしますと、どうしても継ぎ目の所には熱ひずみが発生して、温度を上げますとこの所で割れてしまいます。それで今の傾斜機能材料というのは無傾斜材をはり合せるのではなく

て、組成を連続的にかえてやるわけです。どういう組成変化をもたせるかは、コンピュータで予め計算するわけです。そうしますと、ひずみの分布に不連続変化がないかをコンピューターで予測致しまして、そして実際にこれに近いものを作るわけです。その作り方は、いろいろございます。と云いましても実際には、完全に連続的な傾斜組成をもつ材料を作ることには困難ですから段階的に組成の異なる層を重ねるという事になります。

こういう考え方をもとに、実際試験的に作ってみますと、現在まだ大きいものは出来ませんが、三〇×三〇ミリメートルくらいのものであれば、傾斜組成をもったものが出来る。こういう考え方を、アメリカの航空宇宙局の人達が聞いて、これは大変おもしろいと興味を持ってくれました。又、西ドイツの航空宇宙研究所の人達も、これには非常に大きな関心を示しているわけでありますが、幸いに致しまして昭和六二年度から科学技術振興調整費による国家プロジェクトとしてとり上げられ、産官学の研究開発組織によって進められています。発足一年前の昭和六一年度に実施された調査研究の時から、そのお世話をせよという事で、このプロジェクトに深くかわりあることになりました。

傾斜機能というアイデアは、何も熱応力緩和のためのみに限らず、いろんな材料、化学工業関係、光関係、あるいは原子炉関係などの各種材料、それからバイオ関係の材料にも適用可能です。例えば、我々の歯などは、明らかに、傾斜材料の一つなんです。歯根の穴のあき方をみると、ま

わりはたくさん穴があいているけれども中心に行くと、だんだん穴が少なくなる。これはなぜかと云いますと、周縁にはたくさん穴があいておって、歯茎から筋肉質のものがずっと中へ入っていつて、がちつと固定しているわけです。しかし、中心まで入る必要はない。ですから、真中の方には穴がほとんどない。自然の神様が作り給うた歯は傾斜機能という概念を正に地であつてるもので、こういう考え方は、いろんな材料にこれから使えると思います。しかし国のプロジェクトは機械的機能にしばっていますので、傾斜機能材料全体について情報交換をやる傾斜機能材料研究会という組織が出来て、活動しているわけです。

以上いろんな事を申し上げましたけれども、要するに石器時代から、今日に至るまで、いろいろ道具と材料の変遷がありました。道具という言葉は今日の言葉で新しく云い換えればシステムとかデザインになると思いますが、道具と材料は最初ほとんどが、容器の時代に始まって、それから次第に、高度の機能をもつものに進展していきました。将来は一つのかげらの材料がそれ自体一つの道具になる。材料自身が単独でいろんな役割を果たす時代が必ず来ると思います。この種の研究というのは、日本は世界の中でどういう地位にあるのか、実は、ある時期までかなり遅れておったんですが、オイルショック以来自動車のエンジンの問題に関連して非常に国が力を入れ出した。一時は日本列島全体が、フィーバーに巻き込まれる程の時代が到来しました。日本があまりにもフィーバー気味なので米国の人達は日本の連中は何か余程いいのをみつけたので外

国に知れない様にして研究開発をやっているのではないか疑って調査団などを日本に送ってきました。その後日本のファイバーも鎮静化致しまして、現在は落着いて成果を上げてゆく時代に入ったと思います。

しかしながら、こういう素材の開発というのは、アメリカとヨーロッパと日本で、それぞれちよつとちよつと、違いがある。かつてのアメリカは基礎研究から開発、実用化へと全体にバランスがとれていて、最優等生でした。ヨーロッパは、ご承知の如く、基礎研究は、非常にいいのが出るんですけど、工業化が必ずしも得意でない。日本は、外国でなされたよい成果を導入し、それを基にしている商品を作って、どんどん海外に売り込むという事をやるもんですから、いろいろ摩擦が起る。これが強くなって参りますと、海外の人は皆さん警戒するようになる。したがって日本ももっと基礎研究にお金をかけて、基礎から応用までバランスのとれた研究や生産をやるべきである。日本でいい発明があれば、かつてのアメリカとかヨーロッパが我々にしてくれた様に、日本からもそういうものをどんどん外国へ輸出するようにしないと、本当の意味での大国とは云えないわけです。

日本の科学技術政策を定めておりますのは、科学技術会議で、我々の先輩の岡本先生は、この会議で重要な役割を果たしてらっしゃるわけですが、そこでいろんな科学技術振興の政策を、立案するわけです。材料についての科学技術に関する研究開発基本計画という答申が昨年の八月に出

まして、私も幾らかお手伝いをしたわけでございますが、この答申の標題をみますと材料の前に物質という言葉がついていまして『物質・材料系の……』という表現になっています。これははじめにも申し上げた様に、物質の中のあるものが材料になるのですが、日本では、物質の研究は余りやらないでいきなり、外国から材料に関する情報を獲得して、商品化や量産をやって来た。これからは、材料の基礎となる物質の研究から入って、それを材料にし、利用へむすびつける様な研究開発を日本自身の手で、行なうべきである。という姿勢をとろうという気持ちの表れであろうと思います。

そこで、問題になりますのは、それでは日本人には、そういう創造性があるのかどうか、と云う事になるわけでございますが、実は冒頭で申し上げましたように日本の焼物の歴史を考えてみますと云うと、日本で最も古い縄文土器はその出現が九千年から一万二千年位前で、中国や中近東から数千年古いだけでなく、その製法やデザインの芸術性がそれらの地域のものに比べてすぐれているといわれております。すなわち、一万年くらい前に、日本列島に住む私共の先住民族は世界で最も優秀な土器を作っておったと云う事になります。このことを最後に申し上げて私の話を終りにさせて頂きたいと思ひます。御静聴有難うございました。

（大阪大学名誉教授
龍谷大学理工学部教授）