



In Laboratory Now

# 研究室訪問

1

## 金属は宝の山～鉄づくりから電子材料まで～ ——永田研究室～金属工学科——



永田 和宏 教授

近年、廃棄物の不法投棄が問題となっている。郊外の川辺で、自動車があちこち放置されているということを聞いたことがないだろうか。この現象は、我々の意識の低さに加え、日本のリサイクル制度が立ち後れているために起こっているものである。また技術的にみても、廃棄物から鉄を再生するより、鉄鉱石から製鉄した方が、高品質な鉄が得られるのだ。そこでリサイクルを技術面から支えるべく、様々な技術が開発されている。

今回は、金属の原子レベルの現象の解析から、鉄のリサイクルなどの技術的応用まで広い分野を研究なさっている永田和宏教授を訪ね、金属の意外な性質を見直してみることにした。



## これからの製鉄技術とリサイクル

製鉄技術は日本の環境問題や経済に大きく貢献できる可能性を持っている。

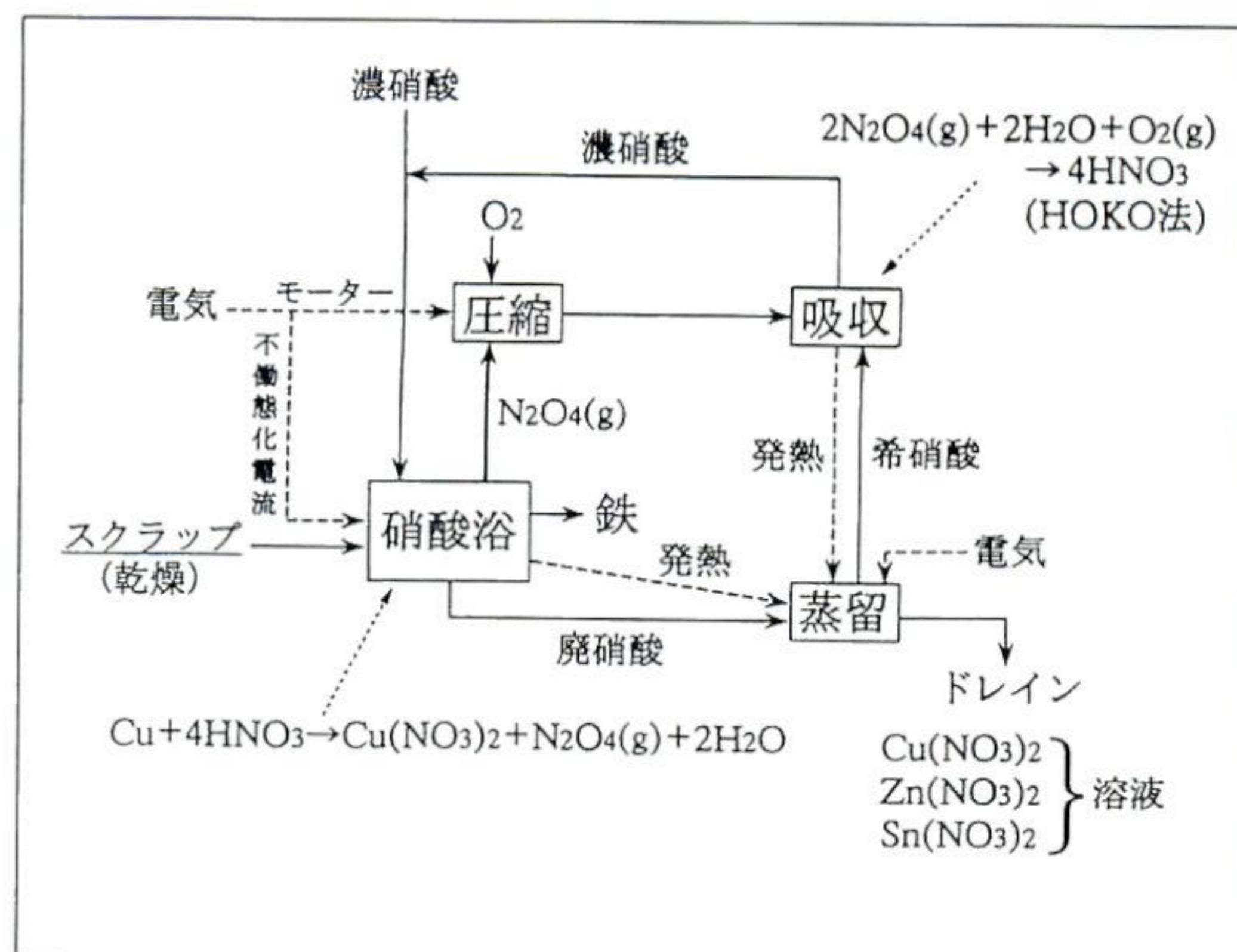
まず、環境面から考えてみよう。鉄鉱石は酸化物であり、製鉄時には炭素から生成した一酸化炭素との反応により酸素を二酸化炭素として放出させるため、多くのエネルギーが必要となる。一方、鉄くずから鉄をつくる場合には、溶解するだけなので、エネルギーは少なくてすみ温暖化の原因物質といわれている、二酸化炭素の発生も少ない。

だが、このリサイクルにも問題がないわけではない。車や電化製品などのスクラップは、鉄のほかに合成樹脂などの有機化合物や、他の金属などの不純物が含まれている。とりわけ銅などの金属が含まれていると合金を作ってしまい、圧延したときに高温でひびが入ってしまったりするのである。結局、リサイクルされた鉄は、今のところ建築資材などのごく限られたものにしか利用できないのだ。そこで先生が考えだされたのが、図に示されたような硝酸を用いた銅の除去法である。これが実用化されれば、地球の温暖化や産業廃棄物

問題の解決に大きく貢献できるであろう。

次に、経済面から考えてみよう。鉄は大変普及しているが、一番の理由はその安さである。近年、韓国や中国などが人件費の安さを武器に安い鉄を生産している。したがって日本では、その安さに技術で対抗するしかないのである。

現在、様々な技術が研究、開発され現在実用化



硝酸を用いた銅の除去法

されつつある。その一つが溶融還元法と呼ばれる技術である。現在の製鉄技術では原料の予熱のために、溶鉱炉は高く、巨大なものになってしまう。鉄鉱石が溶鉱炉の中で押しつぶされて、粉末状にならぬないように事前に焼き固めて堅い塊にしなければならない。溶融還元技術は、石炭をそのまま



## 製鉄の歴史から見る鉄の優れた性質

製鉄は簡単なため、紀元前数世紀から行われていた。しかし加工がまだ困難だったため、青銅などが武器に使われる一方で、鉄は農具などの簡単な道具にしか利用できなかった。

昔ながらの「たたら」という技術で製鉄法で製鉄した鉄は、鉄の酸化物やノロと呼ばれるケイ酸の固まりを含んでいる。加工時に、この状態から加熱したとしても様々な不純物が混入したままになってしまい、割れやすい。その後技術が進み、不純物を取りのぞくことができるようになり、加工の比較的難しい武器などに用いられるようになった。ここで鉄の加工法とその利点を日本刀を例に説明しよう。まず製鉄された鉄を熱して、鍛錬といってパイをこねるような作業をする。これにより不純物をしぶり出す。そして刀の形に加工していくわけだが、刀というのは刃の部分と棟の部分で、堅さの違う2枚の鉄を張り合わせて作る。というのも、刃の部分は固く衝撃に対しにもろいので、棟の部分には比較的軟らかい鉄を用いて衝撃を吸収させるのだ。では、鉄の堅さはなにで決まっているのか。それは鉄のなかの炭素量である。炭素量が多いと、焼きをいたとき堅くなるのである。

このように、鉄は加工の面で他の金属にはない

空気と共に炉中に吹き込んで溶けた鉄を直接作る方法で、比較的小さく施設はコンパクトになる。

この技術が実用化されると、鉄のリサイクル技術と併せて、製鉄業は大きく変わるのでないだろうか。

利点がある。身近な金属で、炭素量を変えて焼きをいれるだけで堅さが自在に変えられるのは鉄だけである。

ここで皆さん鉄は加工しやすいかもしれないが、すぐにさびて、ぼろぼろになってしまうと思うかもしれない。しかしながら、それはここ100年くらいの間に確立された製鉄技術により製鉄された鉄にしか当てはまらないのである。現に、奈良や京都の古寺などを解体修理するときに見ることのできる1000年以上前の釘を見てみると、確かに表面は黒く変色しているが決してぼろぼろではなくしっかりとしている。また、インドのゴアにある鉄柱も高温多湿な気候のなかで、やはり1000年以上たっているにもかかわらず、腐食していないのである。

これらの理由はよくわかっていないが、昔の製鉄は、低い温度で行なわれているため、不純物の溶解度がひくく、不純物がすくないためではないかといわれている。しかし、低い温度で製鉄するのは生産性が悪いため、現在は高い温度で製鉄しているのである。したがって、現在の刀鍛冶は、そういった低い温度で製鉄された昔の鉄を探すのに苦労しているそうだ。



## 金属世界におけるカオス現象

最近話題になっているカオスとは簡単に言うと非平衡、非線形のことだが、実現象でも様々なところで見ることができる。金属の世界でも例外ではなく、この現象は様々なところで見ることができる。カオスは物理学的には議論が活発であるが工学的分野では、今のところ理論的なことはさほどとりあげられていないという。この現象をいくつか紹介しよう。

### ◎合金の凝固現象

2つの金属を溶融して混合し、凝固させようとする。このとき、雪の結晶のように、様々な形の組織が現れる。このような合金の凝固過程は、凝固速度と熱の伝導速度に依存しているカオスの現象であり、ゆっくり冷却すると一方の金属が棒状にのびてきて、冷却速度を上げていくと点々とされて、最後にはバラバラに散らばってしまう。

## ◎クリープ現象

金属を高温で引っ張ると、クリープ現象という原子の配列が少しずつずれて伸びる現象がおこり多数の原子欠陥（穴）の流れが生ずる。はじめは無秩序な流れであるが、強く引っ張って延ばし続けると、それが六角形状になる。この現象もカオス特有の現象である。

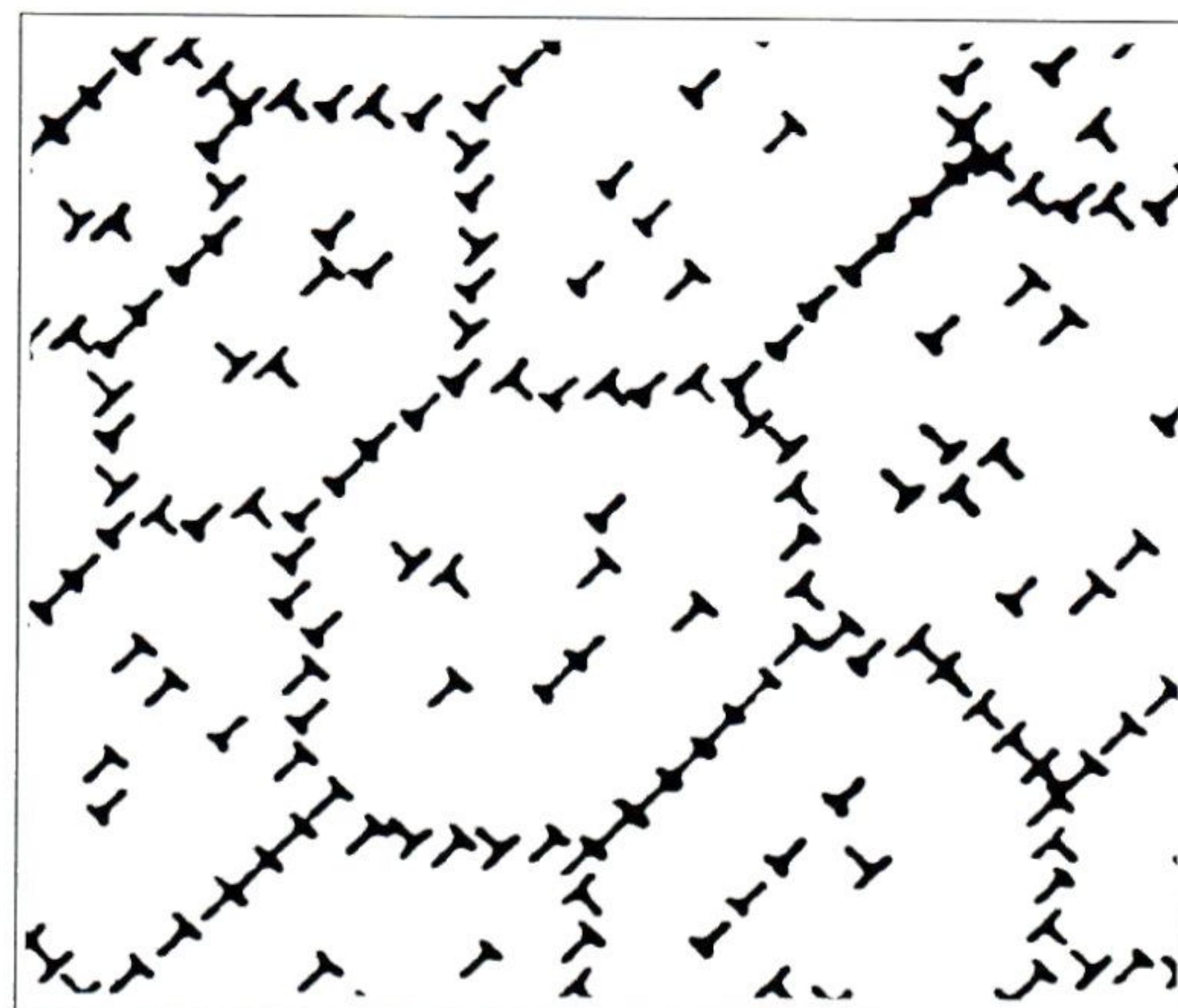
## ◎溶鉄中の炭素と酸素の動き

溶鉄中の炭素と酸素の濃度は、まわりの一酸化炭素ガスの圧力で決まる。そこで一酸化炭素の圧力を変えると、溶鉄中の炭素や酸素が出入りする。この時の濃度変化は炭素と酸素の相互作用のため複雑な動きを示し非線形な形になる。

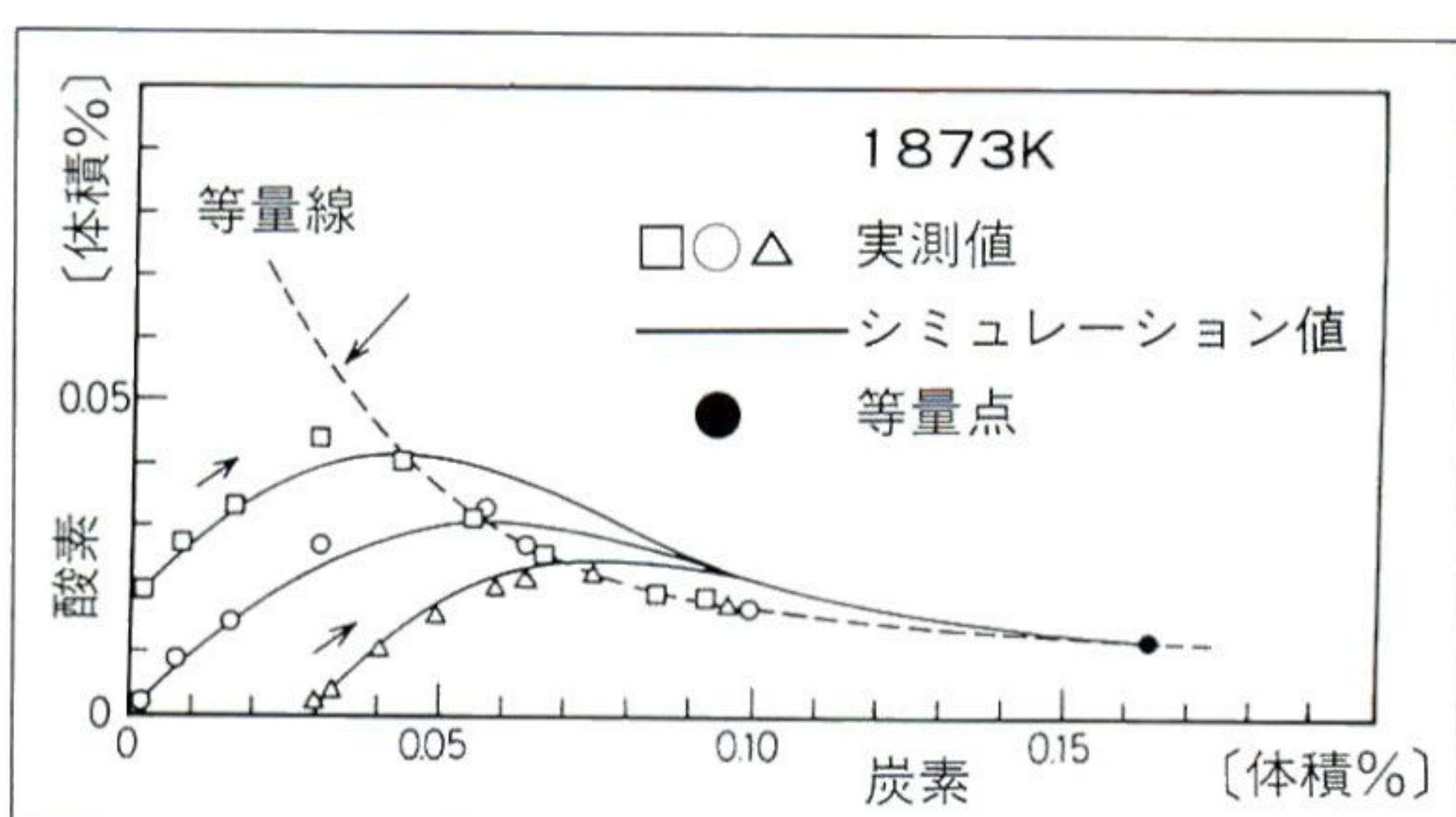
## ◎高温プラズマと金属の溶融

プラズマは、詳しい説明はここでは割愛するが、わずかな空間で非常に高い温度が得られるものである。プラズマを金属片の上部に当て、下部は水冷しておく。こうするとわずかな間で急激な温度差が生じ、1万°C近く熱せられたところが急冷できる。この状態は非平衡状態の最たるものである。具体例を挙げて説明すると、水素で発生させたプラズマをチタンに当てるときチタンが溶解したところに水素が入り込むが、このとき熱力学的には考えられ得ないほどの量の水素が入り込んでしまうのである。その後の冷却過程では、強制蒸発という現象が起こり、チタンの蒸気が発生し水素もでていく。この現象は窒素などのほかの気体を用いたとしても同様に起こるのである。

これらの現象を永田研では、非線形解析などを

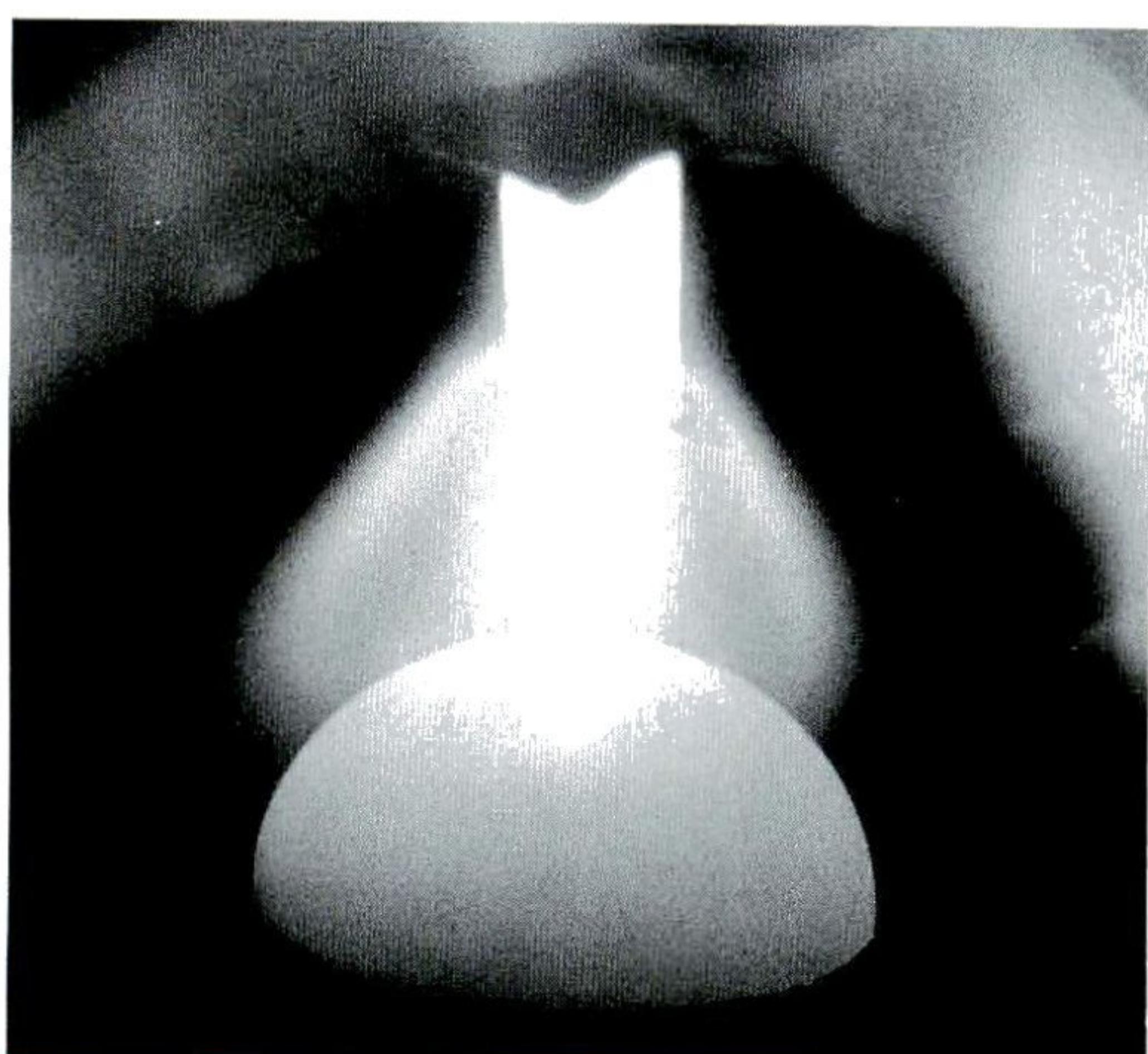


クリープ現象により起きた原子配列

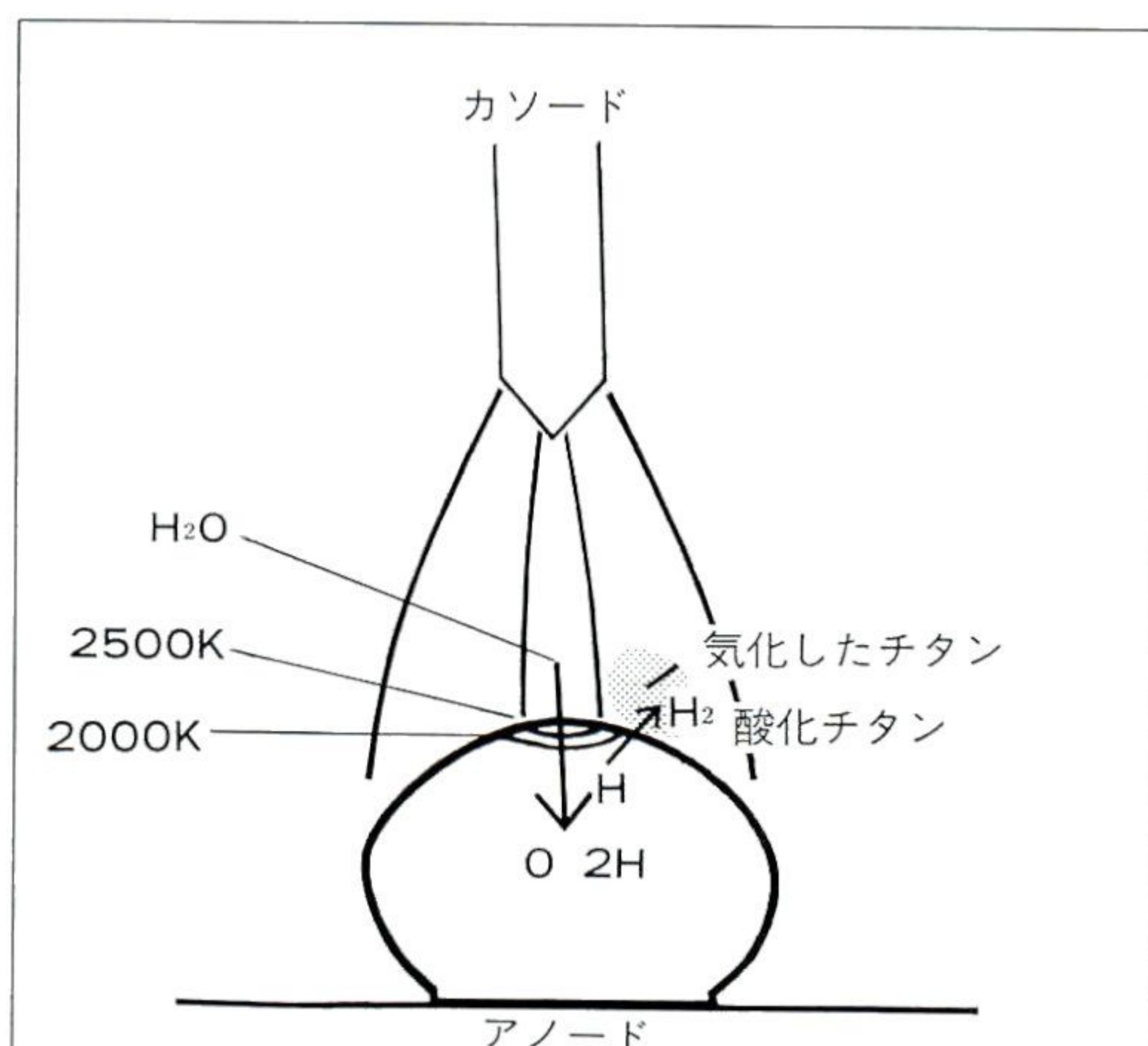


炭素と酸素の濃度変化

用いてこれらの現象を研究している。例えばプラズマの研究であるが、金属片の様々な点の温度やどのような蒸気が発生しているかを分光器による光のスペクトル解析で測定して、そのデータを解析するといった具合である。



プラズマを用いたチタンの強制蒸発





# 分子、原子レベルの現象を探る

半導体なども金属材料の分野では、おもしろい研究テーマとなりうる。

集積回路では、Si の基盤の上に  $\text{SiO}_2$  の非常に薄い膜をつくってそこに強い電界をかける。ここである程度厚みを持った結晶と非常に薄い膜とでは同じ性質を持つのであろうか、また同じ物質でもその作り方によってその性質は同じなのだろうかという疑問が持ち上がってきたのである。例えば物質にある程度厚みがあると原子間の力の干渉でぐっと固まっているが、薄いとその力が薄れて膨張しているのではないか、というようなことがある。先生の研究なされた  $\text{SiO}_2$  の膜で説明しよう。

先に結果を言ってしまうと、 $\text{SiO}_2$  では、薄い厚いに関わりなく、性質は同じである。しかし作り方によって物性は異なる。 $\text{Si}$  を空气中で加熱すると熱酸化膜ができる。この膜はアモルファス膜という、非結晶質な膜であり、石英ガラスなど  $\text{SiO}_2$  をただ溶かし固めたものと同様に緻密な構造である。一方、 $\text{Si}$  を混ぜた有機溶剤を板に塗り、加熱すると、やはり  $\text{SiO}_2$  の膜ができるが、これは SOG 膜といって非結晶な膜だが、がさがさで緻密な膜ではない。

このような異なった条件下で作った物質の性質の研究に関連して、最近では HIP という装置を用いて高温高圧下で金属の化合物を作り新しい性質を持ったものを探し出す様々な現象の研究をしているそうだ。以下にその研究例として、チタン

の窒化反応を挙げる。

窒素中にチタンの板を置き、高温高圧にすると窒化チタンの膜がチタンの板に生成する。膜を通して窒素とチタンが接触し反応が進むためには、原子の大きさの穴（原子欠陥）があいていなくてはいけない。この現象はいろいろな金属や金属の化合物についても起こるのだが、圧力を高くしていくと、その穴が窒化物の堅さに応じて小さくなり反応が遅くなると予想できる。確かに比較的柔らかい膜ならば、反応が遅くなる。ところが、堅い膜では反応時間はそれほど変わらないはずなのに予想以上に遅くなつたのである。この現象の原因は残念ながら解明されていないが、何か新しい現象が起きていることは確かである。

新素材についても、今までにない特性を持ったものが次々と生まれている。だが、一般的に材料工学分野では新しい物質が次々と生まれているにも関わらず、なぜそういう性質を持っているかといった理論的な研究はどうしても後回しになつてしまうそうだ。しかし、永田先生は技術的応用の影で、こうした理論にも目をむけるべきだと考えていらっしゃり、実践しておられる。

この他ガラス中に多数の超微粒子を生成させた物質の磁性材料としての研究や、モリブデンなど高融点の金属を酸化させないで高温の空气中でも使えるようにする研究などを行っておられる。

---

学問は楽しいことが第一条件、好きこそものの上手なれ。流行にとらわれず自分の興味のあるものを見つけ、こつこつとやるものだ。現象だけのみにとらわれず、どうしてそういうことが起こるのか、を丹念に調べることだ。ということを先生は強調されていらっしゃいました。

先生はそのお言葉通り、研究室を離れても、自ら昔の製鉄法である「たたら」をやってみたり刀鍛冶のところで刀を作りにいったりと活発に活動なされています。

取材中も、気さくな人柄で、われわれ取材メンバーを笑わせたり、時にはうならせたりと、時を

忘れるほど楽しい取材をさせていただきました。

最後に、とても熱心に取材に協力して下さった永田先生に心から感謝し、今後のご活躍を期待いたします。

(鈴木義行)

