

# Guest Forum

特集寄稿

2006 堀場雅夫賞 審査委員講演

## 運の他に何が要るか？ XGTとその後の研究



中沢 弘基  
Hiromoto Nakazawa

独立行政法人  
物質・材料研究機構  
フェロー  
理学博士

XGT (X-ray Guide Tube, X線導管) は、最初の発表から既に25年を経過して小さな歴史となった。長いXGTを第二世代放射光施設(PF)に敷設する案は不採用になったが、いろいろな運に恵まれてHORIBAのX線分析顕微鏡XGTシリーズとして一定の成功を見た。ノーベル賞や甲子園の優勝にも運は不可欠であるが、成功には他に何が要るか？当時の周辺事情や着想と開発の経緯、及びXGT後に生命起源論の研究に転戦した経緯を述べて、諸兄姉の考察の材料に供したい。

### はじめに

XGTシリーズ(X線分析顕微鏡のHORIBAの製品名)が既に1000台販売されているというのを、司会者から今初めて聞いた。非常に運のいい装置で、発明者の私も運が良かったと思う。しかし研究の当初は、XGT(X線導管)は役に立たないと言われ、むしろ悲哀を感じさせられていた。今では世の中に多数利用されて発明者冥利を感じることができるので、HORIBAの皆さんに感謝したい。これから主としてX線導管(XGT)の辿った経緯を紹介するが、運の他に何が要るかは皆さんそれぞれに考えていただきたい。

### XGT発想の元

X線分析顕微鏡の特許は、1982年の顕微X線解析装置(特許第1699838号)、1984年のX線発散角度制限器(XGT)(特許第1806535号)、1985年の走査型X線顕微鏡(特許第1828290号)の3つである。XGTの効果に関する研究成果は1981年に口頭発表しているが、それらの特許出願以前に、この考えに至るいろいろな発想の元があった。それは1970年代のX線が非常に盛んな時代の雰囲気

である。その頃、結晶物理学としての動力的X線回折理論の研究が盛んであった。X線トポグラフィを研究する人たちも多数いて、半導体とかセラミックスとかの物質を調べるという研究が全国各大学で行われていた。結晶の構造解析も盛んで中心が蛋白質など有機結晶に移り、無機の普通の結晶は済んでしまっていた。結晶構造解析は、解析用のプログラムを共有化したり、交換する活動が日本結晶学会を中心に行われていた。このような活況の中で国際結晶学会が京都で行われたのが1972年であった。その頃、“もっと強いX線が欲しい。もっと光を”という要請が高まってきた。それが放射光に結びついていく。

### 放射光に至る背景

“もっと光を”の最初のきっかけは1971年の日本物理学会である。超強力X線をどうやって作り、どのように使っていくべきかというシンポジウムが開かれた。議論の中心は2つあった。1つは回転対陰極X線発生装置の大型化で、これはこれでその後、大きく発展した。一方、放射光がいいと主張する人たちがいて、ここで放射光に関する計算予測が出された。2 GeV, 500 mA, ベンディングマグネットの1Tくらいで曲げた放射光でも、回転対陰極の50 kV,

1Aより2桁も強いX線が出ることを、菊田・高良先生らが計算して発表された。この辺から放射光の建設に向かうムードに傾斜していく。

他方科学技術政策では、既に素粒子研究所建設構想が日本学術会議の勧告として、1962年に出されていた。巨大加速器部門と宇宙線観測部門を合わせたもので、その予算は300億円であった。当時の科研費総額が40億円であることを考えると、この数字がどのくらい大きかったかがわかる。この構想は規模が徐々に縮小されていって、結局加速器部門のみが高エネルギー研究所として設立されたのが1971年であった。このような背景のもとに、強いX線が欲しいと言う要求がフォトンファクトリ(PF)計画として1973年にまとまった。これを学術会議が採り上げてくれて、すぐ勧告が出たのが1974年。ただしPFを独立施設ではなく、完成間近い高エネルギー研究所の附属施設にするとの方針転換がなされた。そして1970年代終わりには、2.5 GeVの放射光施設の建設が開始された。1970年代は実験室のX線から放射光に転換していく時代であった。

## 当時の私の研究

私は当時、長周期超構造(変調構造)を研究していた。単位胞の並びに波が掛かって大きな格子構造となっているものだが、その中で非整数型の超構造を発見した。サテライトの反射位置と主反射の位置の関係が非整数倍で、“単位胞の無限の繰り返し”と言う結晶の概念に反するものである。この超構造から生じる反射は弱いので、私は

回転対陰極のX線を使っていた。これが“もっと光を”のグループへ入った理由である。この非整数倍の超構造は、HRTEM像(高分解能電顕像、当時は格子像と呼んでいた)によって明らかにでき、後に多次元空間構造ということとで回答が得られた。一方で、無機材質研究所のオフィシャルな仕事としては、 $Fe_3S_4$ と言う新素材の開発を行っていた。硫化物を真空蒸着(今のイオンビームエピタクシーに近い)で合成し、いくつか新しい化合物を発見した。

## 放射光前夜

そういうことをやっていたところで、放射光の前夜になり、エネルギー分散型X線回折あるいは角度非分散型X線回折と言われる半導体検出器(SSD)を使ったX線の回折、連続X線回折の研究を手掛けた(図1)。これは私だけでなく、東大の物性研や九大でも行われ、東大物性研の細谷先生、深町先生の方が一歩早かった。私は規則・不規則転移の研究に、この方法を使っていた。放射光は連続X線だから、こういう研究が放射光利用の日本の前夜の準備段階であった。物性研の中に高圧をやっていた井上さんがおられ、高圧装置の中にX線を通して、それをSSDで見るという手法を最初に1972年に発表された。このように1972年の当初には連続X線回折の準備がなされていた。

## 放射光からXGTへ

いよいよPFの立ち上げとなり、日本のX線関係者はほと

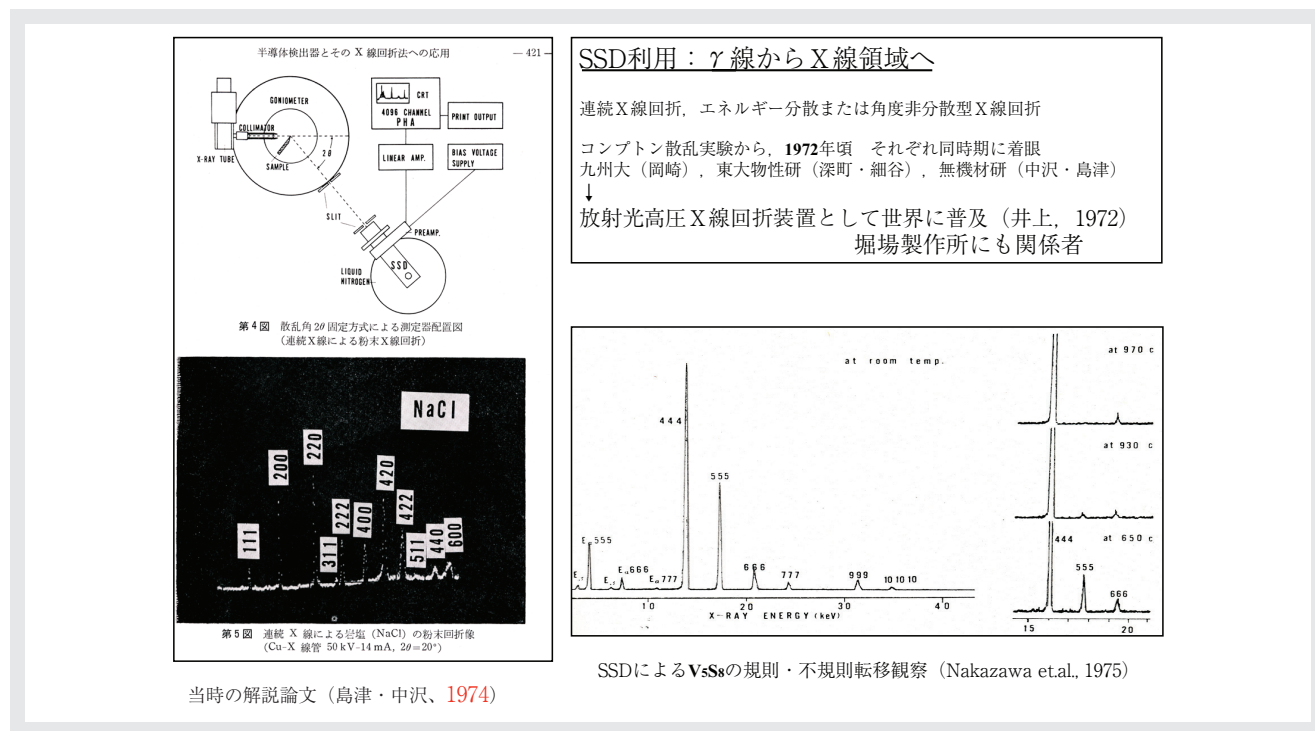


図1 放射光前夜、半導体検出器(SSD)のX線回折法への応用

んどボランティアで協力した。私もPFの建設現場に行ってトランシット(測角儀)を見て機械の位置を決めるなどの作業をやっていた。私が担当していたのは放射光用の4軸回折計で、それを作って立ち上げるグループに入っていた。

皆で新しいものを作って行こうという雰囲気があり、その中でX線導管のアイデアが出た。当初の放射光はそれほど強く不安定で、30分も出れば落ちてしまうものであった。放射光施設ではベンディングマグネットから実験ステーションまでは最低で10 m, 長いものは20 mもあり、指向性の強い放射光でも広がってしまう。それを収束光学系で小さいところへ集める努力がされた。そのひとつが湾曲した単結晶分光器で回折させて集光させようという方法, もうひとつが人工の積層膜で回折させて集光する方法, 更にもうひとつが全反射を使った全反射ミラーである。回折現象を利用するものはX線の波長が限定されることと, 効率に難があった。全反射ミラーが一番使われていたが, ひとつには大型になるということ, もうひとつはミラーだから光を全部集められないで, 反射する面しか集められない, 全部集光しようとする多段にする必要があった。しかし先行する欧米でかなり発達していたので, 日本はそれを真似ることになった。

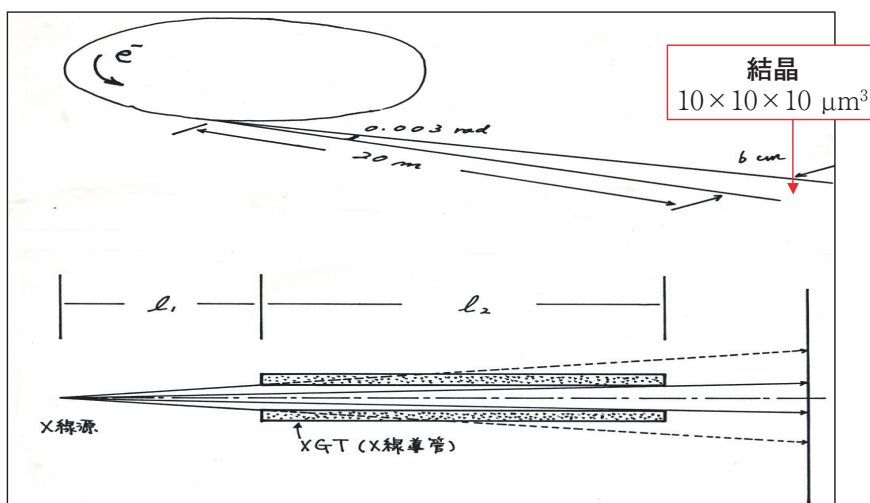
そこで私が考えたのが, 熔融ガラスを使ったX線導管(XGT)であった。ガラスをX線が全反射する程度に磨く

というのは非常に大変である。それに対して熔融ガラスの表面は, 気液界面であるため相当にフラットである。表面にはうねりがあるが, うねりというのはなだらかだから, ロスにはなるけれども, 当然, 磨くよりは有利である。第一には, 日本のオリジナルの光学系になるのではないかと考えた。

このアイデアを提案したのが1980年である。ちょうどシンクロトロンができて, 皆でうまい使い方を議論している頃だった。X線導管を入れようと提案したが, 残念ながら同意を得られなかった。着想した原理は, 次の通りである。シンクロトロンのベンディングマグネットから飛んでくる放射光は, 当時の放射光の開き角として水平面内で $10^{-3}$  rad (3 mrad)位あった。縦方向はもう1桁小さい。縦方向にはほとんど広がらないで $10^{-4}$  rad, そうすると20 mも飛ばすと, 試料の位置で水平面内では6 cmにも広がる(図2)。ここへ $30 \mu\text{m}$ とか $40 \mu\text{m}$ の結晶を持ってきても, ほとんどX線を利用していないことになる。これを円筒状XGTの全反射で結晶位置まで持ってくれば, 強度は距離の比の2乗で高くなるので非常に大きくなる。ちょうど, 放射光の発散角とガラスの全反射臨界角, そして結晶の逆格子点を逆算すると, すべて3 mradくらいになる。逆格子の広がりがあるものを持ってくるので, それ以上の平行性はいらぬのだから, X線導管を作ろうと提案した。

### X線導管 (XGT) 光学系の着想 (1980)

ガラスの全反射臨界角～放射光の発散角～逆格子～3 mrad!



XGTの利得 =  $(l_1 + l_2)^2 / l_1^2$  → PFに20 m XGT構想

図2 X線導管(XGT)光学系の着想(1980)

実績のない方法で未だやったことがなく、頭の中だけの話なので、有効性を実験で示そうとして急遽行ったのが図3である。長さは200 mm, 径は0.5 mmと0.2 mmのガラス管を傾斜させていくと、全反射するなら図3(a)のような模様が見られるのではないかと考えた。実験すると、見事に予想した模様(図3(b))が得られ、普通のガラス管で簡単に全反射することが示された。

X線強度の利得がどのくらいあるかを実験したのが図4である。長いガラス管の先端位置にガラス管の孔径と同じ径の鉛のピンホールを置いてガラス管を除去した場合のX線強度と、ガラス管を使った時のX線強度を測定して比を取った。図4(b)は銅ターゲットのX線管に対してSSDで測定した結果で、銅のKaで35倍くらいの強度比が得られた。

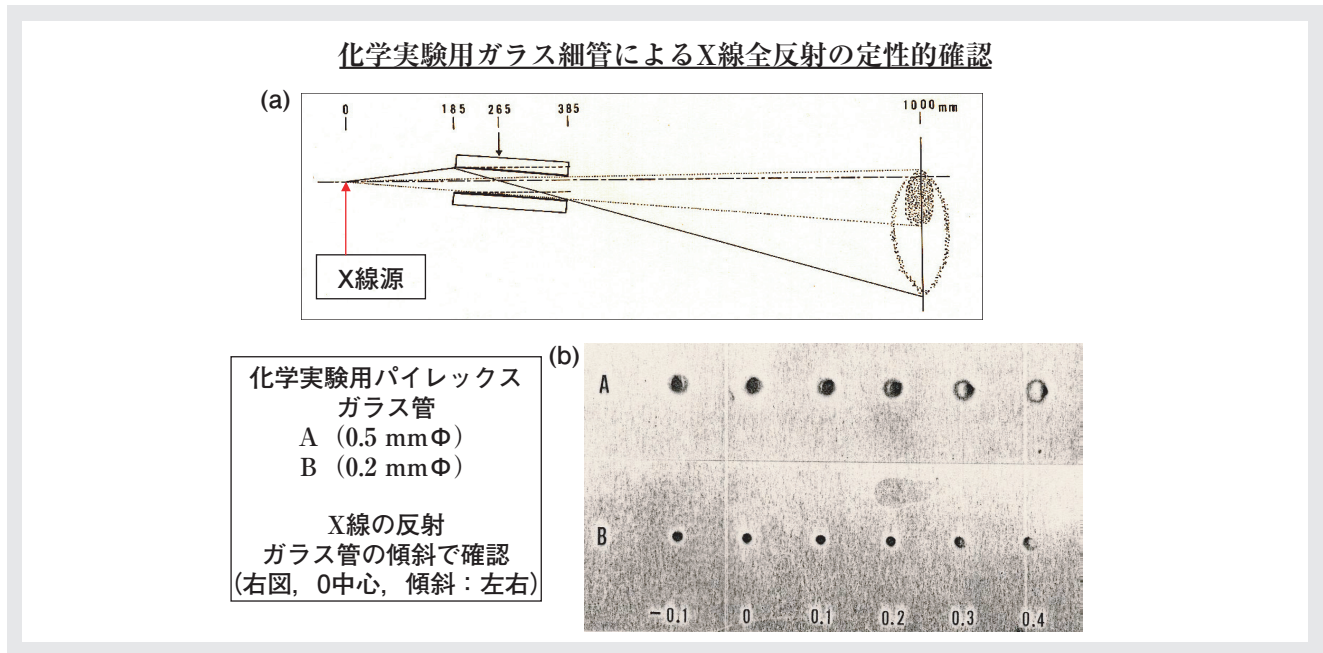


図3 化学実験用ガラス細管によるX線全反射の定性的確認  
(a)実験の模式図 (b)直接及び全反射X線像  
図(b)中の数値は、ガラス管の入射端を固定して他端を押した移動量(mm)で傾きを示している。

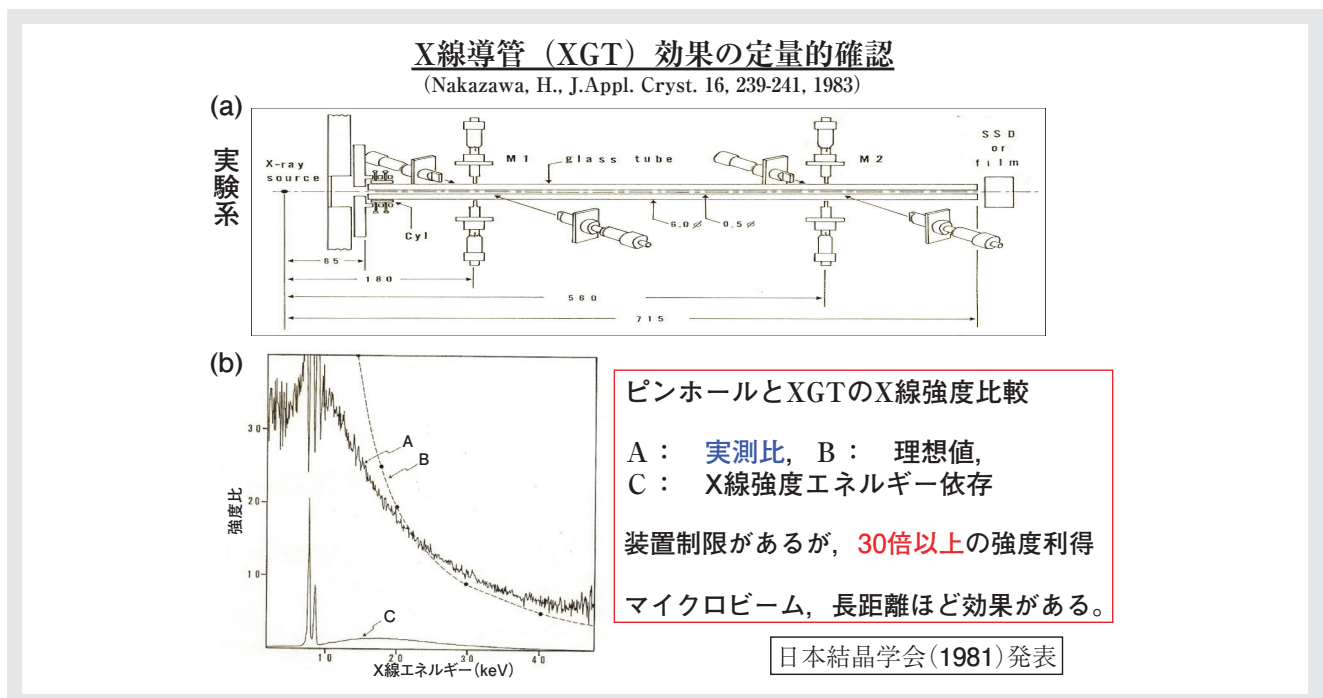


図4 X線導管(XGT)効果の定量的確認  
(a)実験系 (b)ピンホールとXGTのX線強度比較

# Guest Forum 特集寄稿 運の他に何が要るか? XGTとその後の研究

このような利点があったが、長いガラスを超高真空中に入れることになるため、当時PFを建設していた人たちには大いに嫌われた。結局、20 mのX線導管構想は受け入れてもらえなかった。

## 20 m XGTから0.2 m XGTへ

X線導管の効果をアピールした1981年の日本結晶学会のポスター発表(図5)は人気があり、捨てるのがもったいなかったもので、これを実験室の薄暗い廊下に張っておいた。

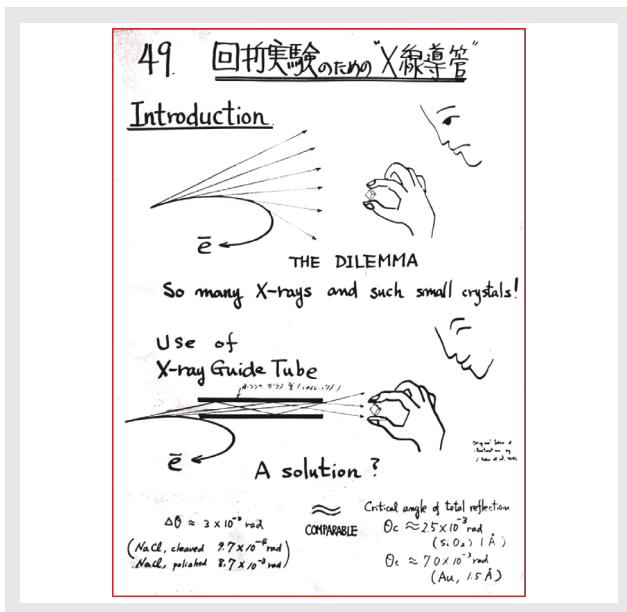


図5 日本結晶学会ポスター発表(1981年)の前半部(模造紙1枚, 写真から複製)

1985年に、HORIBAで半導体プロジェクトの企画を担当し、その関係でたまたま私の同僚を尋ねてきた秋山重之さんがこれを見て、同僚の細川好則さんに伝えた。その後、細川さんと仕事をするようになり、今につながっている。おそらくHORIBAの人間関係がよく、同僚が何に悩んでいるかをよく知っていて、ぜひ伝えてやろうということになったのだろうと思う。

ある意味で放射光に採用してもらえなかったのも運が良かったのかも知れない。私としては、X線導管は良いアイデアだと思っていたので、放射光に採用されず残念な思いであったが、考え直してみると、何も20 mも引つ張る必要はない。長さを200 mmにして、径を200  $\mu\text{m}$ にすれば、もっといろいろなことができるのではと考えた。同時に形を変えて、長い円筒状から長い回転楕円体になれば点光源からのX線を別の点に集光できるし、回転放物面型にすれば平行X線を集光できる。もちろん無次元の点光源はないし、完全な平行X線も手元にはないので、現実はどうしていくかは難しい問題がいくつもある。しかし技術的には、光源を小さくしていくことはできるし、平行性も高めていくことは可能だと思われた。もっとも、当時はそこまで厳密には考えないで集光することを考えていた。どうしたかという、回転楕円体は私たちには作れないので逆円錐形を楕円体の半分だと見なして、どれくらい細いところにX線が集まってくるかという実験を行った(図6)。図6のビーム断面写真に示すように、逆円錐型

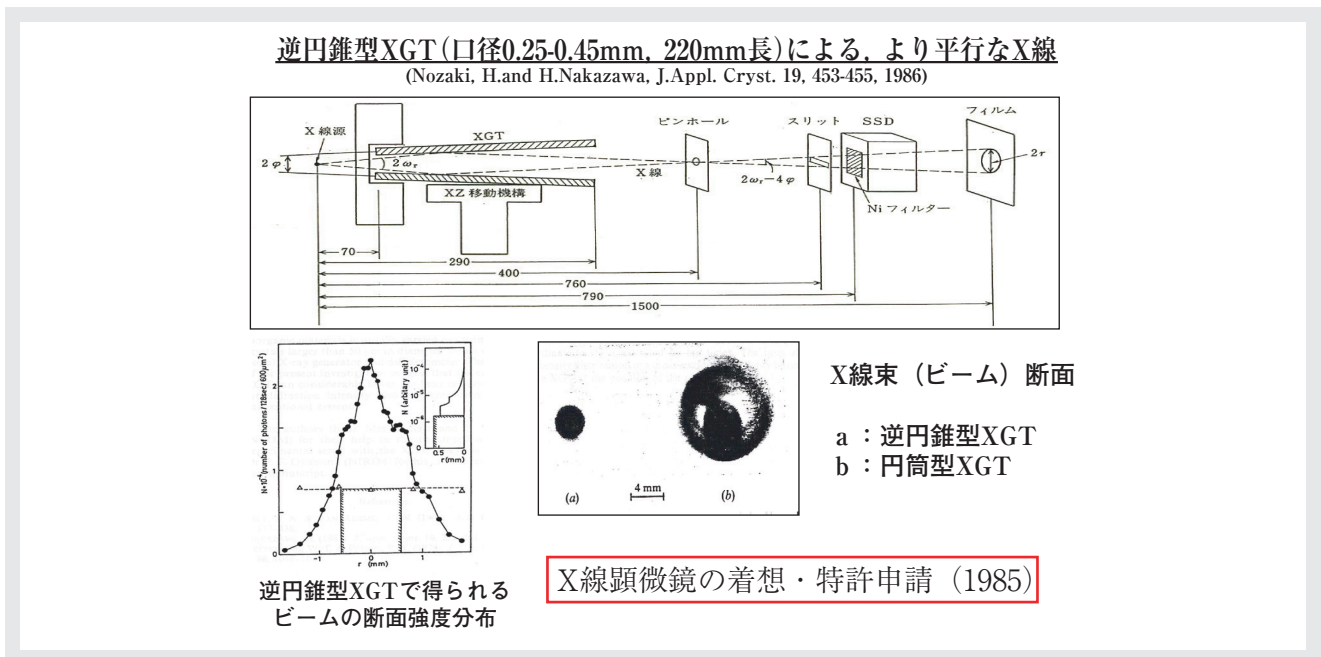


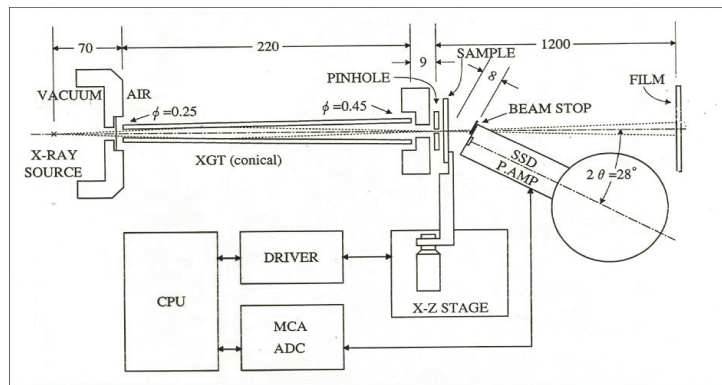
図6 逆円錐型XGTによる実験

XGTは、円筒型XGTよりも更に集光することが証明できた。これがうまくいけば、微小部の測定が可能になるということのを頭に置いていたので、この結果を得て、X線顕微鏡の着想がほぼ完成した。

1985年にX線顕微鏡として特許を申請し、同時に国内のX線専門メーカー数社に提案したが、評価してくれなかった。秋山さんを経由して細川さんと接触することになった

HORIBAだけは理解してくれて、それ以降共同研究を進めることとなった。走査型X線分析顕微鏡のモデル機の製作(図7)を1987年から始め、鉄を含む閃亜鉛鉱の蛍光X線像と回折画像(図8)を、第1回の国際X線顕微鏡の栃木ミーティング(1988年)で発表した。これがX線導管を使った最初の走査型X線分析顕微鏡の像となった。データ収集のソフトを担当したのが、現在、科学システム製品開発部の駒谷慎太郎部長である。

**走査型X線分析顕微鏡モデル機**

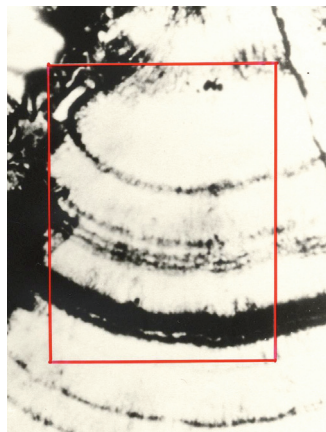


- + 逆円錐型XGT
- + 実験室に在り合せの機器 (SSD X線検出器と小型計算機)
- + 薄板試料 (透過型) をパルスモータで平行移動

図7 走査型X線分析顕微鏡のモデル機製作

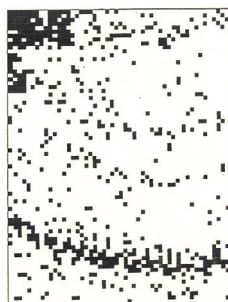
**閃亜鉛鉱(ZnS)薄片の走査型X線分析顕微鏡テスト画像**

ビーム(ピンホール)径:10 μm



光学顕微鏡像 (透過)

測定領域:赤線区画  
0.5×0.74 mm



蛍光X線像

Fe-ka  
Znを置換した  
Fe分布画像



回折画像

ZnS d(111)  
Cu-kaの回折条件  
に合った部分の画像  
(多結晶体トモグラフ)

第一報 (国際X線顕微鏡栃木会議,1988)

(Nakazawa et al., X-ray Microscopy in Biology and Medicine (ed. Shinohara), Springer Verlag, 1990)

図8 閃亜鉛鉱(ZnS)薄片の走査型X線分析顕微鏡テスト画像

## Guest Forum 特集寄稿 運の他に何が要るか? XGTとその後の研究

X線分析顕微鏡(HORIBA製品名XGT-2000)は、非破壊、非汚染、非真空で使えるため、電子製品や生体の測定が可能であり、透過性によって内部が観察できるなどいろいろ利点がある。SEMとかTEMに比べて明らかに有効性を持っているにもかかわらず、HORIBAの市販機が、市場で受け入れられるまでには相当な障壁があった。それは先行する類似品のない“新規の顕微鏡”という点にあったと思われる。技術者だけでなくセールス部門やサポート部門のいろいろな力があって、ユーザに存在を知らせることによってこの壁を超えるわけで、多くの時間と労力がある。会社の組織でないとできないことである。その後、新技術開発事業団の委託開発を受けて、HORIBAで新たに付け加えられた機能は、卓上型にしたことと、蛍光X線と透過X線の同時測定で、透過X線も測定できるようにした点が大きかった。その他にも、XGTを縦にして使ったとか、ビームサイズの違うXGTを2つ切り替えて使えるようにした点も、壁を超えるに役に立ったと思う。1993年にXGT-2000ができて、更に、新しい世代の改良が加わってXGT-5000になった。

### X線分析顕微鏡の利用

その後X線分析顕微鏡はHORIBA XGTシリーズとして科学の先端や産業の現場に大きく普及したが、私の方は

どこまで分解能を上げられるかを追求した。結局は、私たちの今持っている実験室の技能で、ぎりぎり1 μmが実現できた。その後無機材質研究所を退官して東北大に移ったところ、同僚の吉田教授が岩石薄片をXGT-2000で測定して研究に役立てていた(図9)。そんな場面に遭遇するのは発明者冥利である。

開かれた大学の教授の役目のひとつとして、付属博物館の説明員の当番をやった時使ったのが図10である。左側は中国のジュラ紀の魚の化石をXGT-5000で測定した例で、緑がカルシウム、赤は硫黄、青は鉄である。硫黄は硫酸バリウムの硫黄で、バリウムを濃縮する特殊な細菌が軟骨を食って、それが硫酸バリウムを残していった。内部の鉄は別の細菌の産物。骨はカルシウムだから、骨と肉と鱗などの部分が別れて見えている。骨の他は魚の各部を食べた細菌の違いである。図の右側は三葉虫である。XGT-5000で見ると、赤いところはカルシウム、緑は鉄を表している。鉄は $\text{FeS}_2$ のFeで、細菌が内部を食って $\text{FeS}_2$ に置換した結果である。化石を触っている内に薄い炭酸カルシウムの殻が剥げたことを示し、緑のところは中身だということがわかる。これらは正に化石解剖学をやっていることになる。

### 花崗斑岩薄片全体写真とX線分析顕微鏡画像

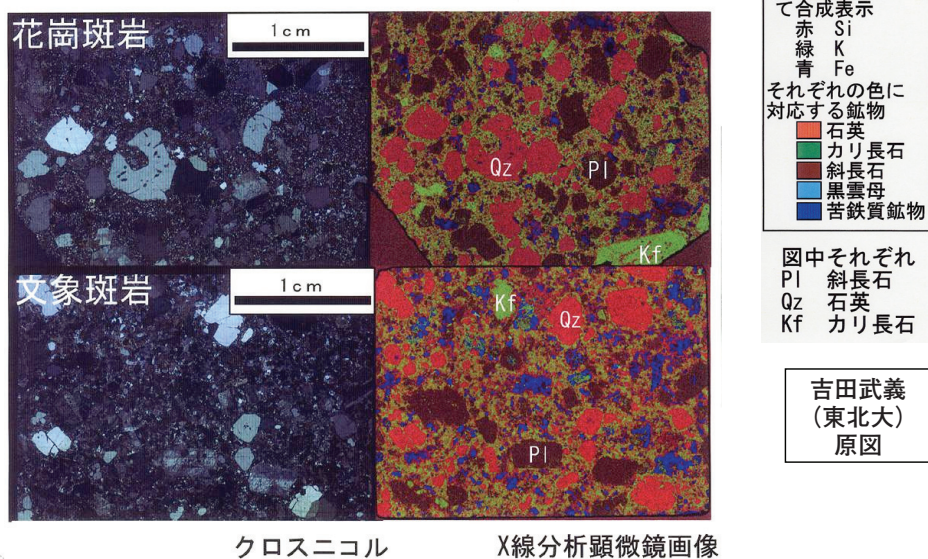
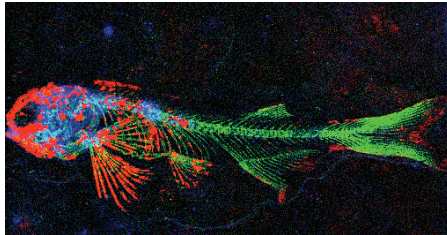
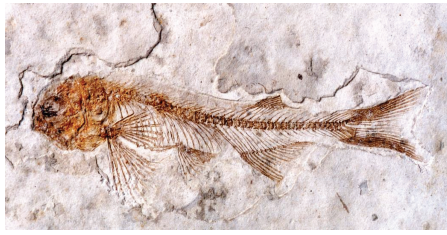


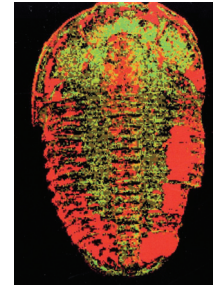
図9 花崗斑岩薄片全体写真とX線分析顕微鏡画像

**X線分析顕微鏡なら見えないものも見える**  
 化石解剖学の提案 (化石化過程における**バクテリア**の違い?)



R:S(BaSO<sub>4</sub>) G:Ca B:Fe  
 軟骨,骨,内部,異なったバクテリア  
**Lycoptera (中国,ジュラ紀の魚)**

博物館(地球物質科学系)の案内  
 市民開放当番で着想



R:Ca G:Fe(FeS<sub>2</sub>)  
 殻:炭酸カルシウム,中味:黄鉄鉱

**三葉虫(米国)**

(計測:田中悟(HORIBA)2003.10.14)

図10 化石のX線分析顕微鏡像

## 運の他に何が要るか? XGTの場合

運の他に何が要るか, これまでの話を聞いていろいろ考えられたことと思う。日頃から, 人と違ったことを考えるとか, “常識”を疑うとか, あるいは, 思いつきを大事にするとか, それぞれご自分が置かれている立場で考えられた解釈は多分いずれも正しいと思う。2003年の科学技術白書によると, 日本の研究者総数は約73万人, 会社: 大学: 研究機関の比率は40: 15: 4で, 会社の研究者が圧倒的に多い。日本を支えている研究者である皆さんは, ぜひ運の他に何が要るかを考えて, それに取り組んでいただきたいと思う。

## XGT後の転職

XGTの研究が終わった頃には, 放射光は皆が使える段階になった。1985年以降にオープンユースになり, 個人的には適当な年齢になっていたので研究対象の転換を考えた。皆さんも同じで, ベテランになると常識が身につく正當な判断ができるようになるから, 管理者としては優れている。しかし残念ながら大発見はできない。大発見は非常識な判断とか間違いを契機として出てくるのがよくあるからである。従って, 常識家のベテランに大発見は不向きである。

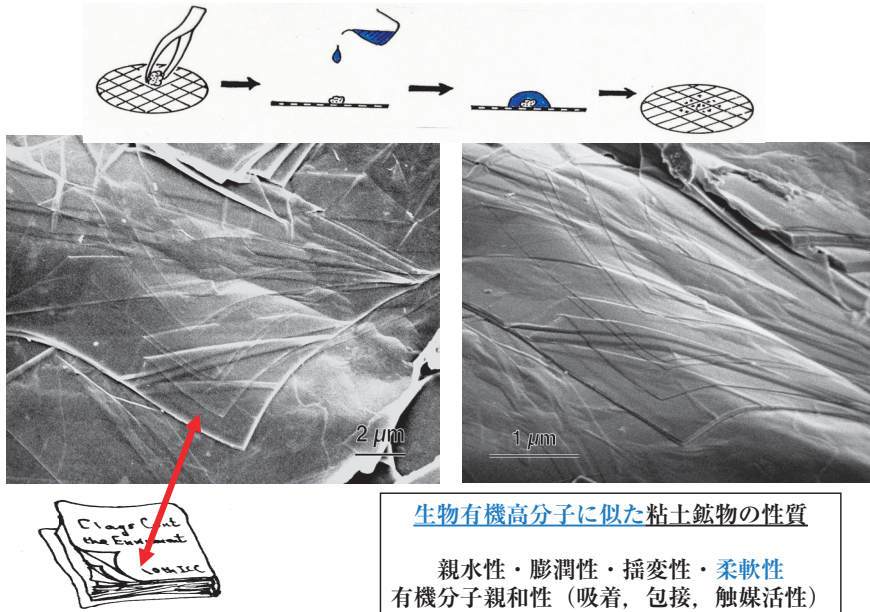
若手の駆け出しの頃は, こうなるかもしれないとおかしなことを思いつくわけであるが, 大概間違っている。あるいは誤解もある。先生が言うことを十分に理解せずにわかったと思ってしまう。しかし, それをやったおかげで得たものが結構たくさんあった。知らぬが仏だと思ふ。だとすると, ベテランがこういうのを狙うとすると, 違う分野に転職するのがひとつの方法だと思われる。今まで知らない分野にいくと, いろいろなことが新鮮でおもしろい。誤解もするし幻想も抱く。そこで, 私は少し未知の分野へ転職することにした。

自分が若い頃何が一番おもしろかったかなと考えた時に, J.D.Bernal著“生命の起源-その物理学的基礎-(岩波新書)”が思い浮かんだ。著名なX線結晶学者で若い頃のアコガれの人物であった。この本は, 非常に合理的に物理学的に生命系が考えられていて, 粘土鉱物が生命の起源に大きく関わっていると提案されていた。生命の起源については, バナールの他にも, オパーリン, ミラー, シュレディンガーなどたくさんの大家がいるが, 歴史の経過があるので, 現在では, この人達が知らなかったことがたくさんわかっている。それなら挑戦してみようということで, 生命の起源の研究に転職することとした。

まず研究所の研究テーマ提案制度に依拠して, 生命の起源に関与したと言われている粘土鉱物のスメクタイトの研究グループを立ち上げた。1985年, 環境や新素材が注



### 水で1 nmに剥離、有機高分子に類似する柔軟性の証明



#### 生物有機高分子に似た粘土鉱物の性質

親水性・膨潤性・揺変性・柔軟性  
有機分子親和性 (吸着, 包接, 触媒活性)

図11 水によるスメクタイトの剥離SEM像

目される時代の先駆けであった。当時の成果の一例は、スメクタイトの単結晶をダイヤモンド合成条件の超高压・高温で作成したことであるが、その単結晶が無機結晶にもかかわらず有機高分子と良く似ていることを示すSEM像が図11である。

その後研究を進めて、生命は地下で発生した、とする新説を提案するに至ったが、その経緯の詳細は本題からそれるので割愛する。興味のある方は拙著[2]を参照されたい。

## 生命の起源の“常識”

さて本題にもどって、皆さんに3つほど質問したい。

- 問1：“太古の海は生命の母(生命は海で発生した)”か？  
問2：“生命の素、有機分子は太古の空気分子からできた”か？  
問3：“有機分子や生物はなぜ進化するのか(個々の生物がなぜそのように進化するのかという問いではない。そもそも進化がなぜ起こるのかを問う)?”

常識として一般に信じられているこれらのことに、根拠があるのかと聞いた時に自信を持って答えられる人は少ないであろう。アприオリな常識は意外に疑われない。な

ぜそうなのかと誰も考えない、これを常識のドグマという。疑ってかかるとおかしいのだが、疑わないから常識となる。この辺が研究する場合の着眼点となる。

原始のスープ(太古の海)が煮詰まれば、簡単な有機分子(アミノ酸・核酸塩基)が(脱水)重合して、巨大分子(たんぱく質・核酸)になると考えられているが、熱力学的に矛盾する。大量の水がある海は加水分解の条件である。熱水噴気孔も同じで温度が高いため、より容易に分解する。従って、太古の海で巨大分子である生命が発生するのは難しい。詳しい説明は省略するが、地球の歴史を考えると、地下の堆積物中で重合したと考える方が素直であると最近発表して、評判が良い<sup>[1,2]</sup>。

有名なミラーの実験では、当時想定された還元型の原始大気( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ )で火花放電を起こして、見事にアミノ酸ができた。しかし新しい地球観では、マグマオーシャン(1200℃)または全地球溶融があった。そこではメタン( $CH_4$ )もアンモニア( $NH_3$ )も分解して存在しえない。 $H_2$ は大気圏外へ離脱し、原始大気は酸化型大気( $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ )になってしまうので、アミノ酸はできない。従って、古代大気から有機分子ができたという常識も考えなおさなくてはならない。

生きているというのは、見かけ上、熱力学第2法則(自然現象はエントロピーの極大(無秩序)に向かって進む)に反

すると、シュレディンガーが指摘した。同時に解も示し、小さなエントロピーの食物を摂取し、大きなエントロピーの排泄物を出すという、エントロピーの代謝で説明した。しかし、この論理でも生物が何故進化するか、は説明できない。生物は進化するものとア・プリオリに考えられて、なぜとは一般には疑われない。しかし、バクテリアのように小型で単純なものから動植物のような大型で組織立ったものへの進化は、熱力学第2法則に反するように見える。熱の移動が頭の中に入っていないから説明できないのである。現在、地球全体としては何億年というスケールで熱を放出して温度が下がっている。熱を放出するため、地球全体のエントロピーは下がり、秩序化が進むと考えることができる。生物進化は地球秩序化の一部、軽元素(H, C, N, O)の秩序化であると考えれば、進化せざるを得ない理由が理解できる。常識というのは、必ず疑わなければならない例として、以上の3つを上げた。

## おわりに

“運の他に何が要るか”を考えると、多分共通解はなく、人それぞれの個性・事情などにより、異なった理解、異なった力点があるだろう。しかしひとつだけ必要だと言えるのは、ある種の志だろうか。何かをやりたい、やるべきだ、といろいろな言い方はあるが、それだけは必要だろう。繰り返すが、運だけが成功の共通点である。高い志と運である。ぜひ自分にとって運の他に何が要るかを考えて、今後の研究や仕事に役立てていただきたい。最後に、研究者冥利につきる思いをさせていただいたのは、堀場製作所の皆さんのおかげですので、心より感謝申し上げます。

<堀場雅夫賞審査委員講演会(2006年11月7日)より抜粋>

## 参考文献

- [1] Nakazawa et al., Impact synthesis of NH<sub>3</sub>, Earth and Planetary Science Letters, 235, 356-360 (2005).
- [2] 中沢弘基, 生命の起源・地球が書いたシナリオ, 東京, 新日本出版社 (2006).