

本田財団レポート No.90

## 自然と産業における完璧さと不完全さ

ピエール・エ・マリー・キュリー、パリ第VI大学

ユベール・キュリアン教授

Perfection and Imperfection in Nature and Industry

Prof. Hubert Curien

University of Pierre et Marie Curie, Paris VI

財団法人 **本田財団**

# ユベール・キュリアン

ピエール&マリー・キュリー・パリ第6大学教授

## Hubert Curien

Professor of University Pierre  
et Marie Curie, Paris 6



### ■略歴

- 1924 フランス、ヴォージュ県コルニモンに生まれる。  
1945～50 高等師範学校およびパリ大学で物理学を学ぶ。  
1956 パリ大学 理学部教授となる。  
1968～73 フランス国立科学研究センター(CNRS)所長  
1973～76 科学・技術研究庁長官  
1976～84 フランス国立宇宙研究センター所長  
1979～84 ヨーロッパ科学財団会長  
1981～84 ヨーロッパ宇宙機構評議会議長  
1983 国際宇宙飛行学アカデミー副会長  
1983～85 フランス国立航空・宇宙アカデミー会長  
1984～86, 1988～93  
フランス政府 ファビウス内閣、ロカール内閣  
およびクレソン内閣での科学・技術大臣  
1992～93 国際宇宙年の宇宙機構フォーラム(SAFISY)議長  
1994～96 欧州共同原子核研究機構評議会(CERN)会長  
1994～97 アカデミア・ユーロペア会長

### ■受賞歴

レジオンドヌール2等勲章  
大英帝国勲爵士、他

### ■会員

フランス科学アカデミー会員

### ●主な著書：

「ユベール・キュリアン：国際科学方針のために」

### ■Personal History

- 1924 Born in Cornimont, France  
1945～50 Educated in physics at the Ecole Normale Supérieure and the University of Paris  
1956 Professor of Paris University  
1968～73 General Director of National Research Center, France  
1973～76 General Delegate for Research and Technology  
1976～84 President of the French National Center for Space Studies  
1979～84 Chairman of the European Science Foundation  
1981～84 Chairman of the Council European Space Agency  
1983 Vice President of the International Academy of Astronautics  
1983～85 Chairman of the French National Space Academy  
1984～86 and 1988～93  
Minister of Research and Technology, Government of France  
1992～93 Chairman of SAFISY (Space Agencies Forum for the International Space Year)  
1994～96 Chairman of the Council of CERN  
1994～97 President of Academia Europaea

### ■Awards

Grand-Officier Legion d'honneur, France  
Commander of several foreign orders.  
Knight of British Empire.

### ■Memberships

the French Academy of Sciences

### ●Major publications

“Hubert Curien : for an International Science Policy”

## 自然と産業における完璧さと不完全さ

1998年11月17日

第19回本田賞授賞式記念講演

1998年本田賞受賞者

ピエール・エ・マリー・キュリー、パリ第VI大学

ユベール・キュリアン教授

## 自然と産業における完璧さと不完全さ

1998年11月17日第19回本田賞授賞式記念講演

ピエール・エ・マリー・キュリー、パリ第VI大学

ユベール・キュリアン教授

まず最初に、本田財団に深くお礼を申し上げます。1998年度の本田賞をいただいて大変に光栄に思っております。この受賞に際して、審査員の方々に心から感謝申し上げますとともに、もちろん、寛大で誠意あふれる本田財団にも心から感謝申し上げます。これまでの受賞者の方々を見ますと誠に錚々たる方々ばかりで、このような卓越した方々のお仲間に加えていただくというのも、なにか威圧感のようなものさえ感じてしまいます。

講演の題を「自然と産業における完璧さと不完全さ」とさせていただいたのは、ひとつにはこれは本田財団の主要な理念である「エコ・テクノロジー」との一致性ということもあるのですが、自然物と人工生産物の完璧性と不完全さの概念についての考え方を提言させていただけたらと思った訳です。

「品質に限界はない」という本田宗一郎氏のモットーを我々はみな覚えています(1) (注は省略)。この要件を達成しながら企業としてのホンダは、そしてより一般的に日本の産業は世界でめざましい成功をおさめたのです。製造物の品質は、多くの面で生活の質を意味しています。しかし場合によっては、品質の向上というものは驚くべきことに、たとえばマテリアルプロセッシング(材料加工工程)において意図的に導入され、完全にモニタリングされた特定のタイプの不規則性、あるいは不完全さとさえ言えるものによって生まれてくるのです。

### 結晶構造欠陥

私の科学者としての出発点は物理学者、より正確に言えば結晶学者としてでありました。そのころすでにX線回折が、原子配列の完全な周期性に基づく結晶構造の決定に大きな役割を果たしている時期であり、周期格子の中で起こりうる可能な欠陥を観察することで「実際」の結晶に関する知識の探求をさらに進めていこうとする機運が盛り上がっていました。

こうしたある種類の欠陥は、いずれにしても避け難いもので、原子の自然な熱運動によるものです。これについてはマックス・ボルン(2)が詳しく記述し、少し後にジャン・ラバル(3)がX線拡散によるその実験的研究の方法を示しました。

ラバルに学んでいた私は幸運なことに、初めて鉄結晶中のフォノンの完全な解明を行うことができました(4)。フォノンは、エネルギー量子で、それは結晶中の熱による原子運動を記述することができる波動によって運ばれます。こうしたフォノンの電子との相互作用が、固体の電気抵抗を生じさせるわけです。

結晶構造欠陥の研究に対する新たな動機づけとしては、原子炉の普及ということがありました。あらゆる種類の放射線が固体に生じさせる損傷を予測する必要があったのです。格子の点欠陥(格子間原子の原子空孔;存在すべき原子が欠けていること)は高エネルギー粒子の軌跡上に形成されます。こうした欠陥の存在が物質の機械的、光学的、及び電気的な性質を大小様々に変化させるのです。熱処理によって、当初の非擾乱状態(たとえば(5)のLIFのケースの説明)に回復させられる可能性があります。結晶の放射線による損傷についても、その他のいくつかの起因による点欠陥(すなわち不純物)についても、これまで数多くの研究が行われてきました。

20世紀における最も卓越したイノベーションのひとつである半導体技術は、異質な原子(電子のドナーないしアクセプタ)を、完璧なまたはほぼ完璧な結晶母体(珪素すなわちシリコンが最も多く使われます)に導入する技術を習熟することから出発しています。ただ、物理学とテクノロジーのこの魅力的な分野の詳細については、いまここで立ち入っていく余裕はありません。

同じカテゴリーに入る現象の別の実例として、規則 - 不規則転移があります。ここに合金ABがあるとして、多くの場合、二種類の構造配置が見いだされます。ひとつは規則構造で、AとBの原子は、BがAを囲み、またその逆というように明確な状態で規則的に配置されています。もう一方は不規則構造で、構造中のAとBの間でアランダムな交換が発生します。この規則 - 不規則現象は、冶金学のみならず磁気学や電気学でも多くの用途に生かされてきました。

結晶の不完全さを解説する上での最も実り多い活路は、転位(原子配列のズレ)という現象を発見したことであります(6)。これらの欠陥は単次的に(図1)、近接の結晶規則性を乱されたという事実をX線画像に表示することが可能です(図1,2)。結晶サンプルに荷重がかけられた時に塑性変形が発生するために、転位の移動の可能性があります。運動過程で転位は互いに、あるいは他の欠陥でもって、すなわち点欠陥と相互作用し、これにより運動が固定されることがあります。物質は硬度を増します。この現象は「加工硬化」と呼ばれています。金属によっては、たとえばアルミニウムでは、通常、他の金属元素を少量入れています。こうした「異質な」原子は結晶母体

の限定されたゾーン（ギニア・プレストン・ゾーン）に偏って分離し、転位の運動を妨げ、素材はあたかも純粋であるかのようにその硬度を大幅に高めます。

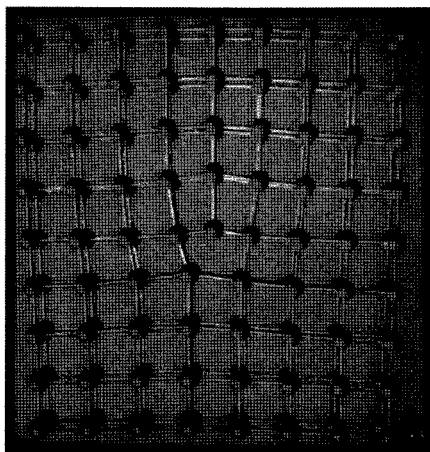


図1 立方晶系結晶中の転位の原子モデル

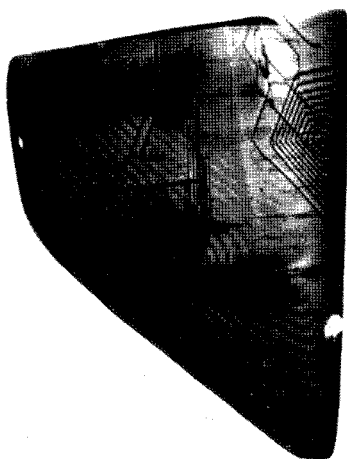


図2 ラング・トボグラフィーで得られたシリコン結晶中の転位画像  
(A. Authier, Universite Paris 6)

転位はまた、結晶成長の正しい説明を可能にしてくれます。成長する結晶の表面を  
通って、転位は、新しい原子の付着に有利なステップを形成します。 転位の存在は、  
成長速度を大幅に増加させることになります。

現在、結晶学を教える際の目標は二つあります。 まず一つは、原子配列の規則性  
のすばらしい長所を示すことであり、それはまさに凝縮物質における原子スケールの  
均質性を表現することにほかなりません。 第二の目標は、少量の、あるいはきわめ

て少量の欠陥が、結晶物質の最も重要な性質を支配することが可能であり、その調整によって素晴らしい用途が開けるということを示すことです。

凝縮物質において完璧さをマスターするということはまた、完璧に制御した方法で不規則性を導入することが可能であるということをも意味しています。

## プロセス・エンジニアリング

ではここで材料を離れて、素材から物体を作り出す時に使われるプロセス、工程に目を向けてみましょう。いまから少し前に、各工程が改善され、原材料から始まって最終製品に至り、そして副産物をも生み出すという、完全に統合化された一貫生産の作業工程が完成された時には、産業の様相を深い所で様変わりさせるような革命が起きました。このプロセスによってもたらされる全ての結果が、工具とその使い手との間の相互作用と同様に、研究され、重要視されています。工程の無害性の探求は、いまや最終製品の品質の探求と同じレベルに位置づけられています。これは特に化学産業において明白ですが、いかなる種類の製造活動にも当てはまることだと言えます。

さて、ある一般的原則が布告され、それは「注意と用心の原則」と呼ばれています。その原則によれば、すべての結果をコントロールできる確信がないかぎり、いかなる行動もとることは出来ないということになります。これは安全な道であるように見えるし、無責任な、あるいは不正直な当事者のふるまいを制限するのには役立ちます。注意と用心の原則を、我々の惑星地球とその住民の未来を保証するために用いるというのは、ごく自然なことです。とはいえ、最小限のユーモア感覚もなくこの原則を順守するということには、ある種の危険性もつきまといまいます。あまりにも厳密なやり方で適用すると、いかなるイノベーションに満ちたプログラムも見合わせるということになってしまうでしょう。我々は、本当にオリジナルな冒険的な企画のすべての結果を予測出来ると、どのようにして確信できるのでしょうか？ これは実際問題として、正直さの問題にほかなりません。大事なポイントは、疑わしい因果関係や成り行きについて、それを決して隠そうとしたり、忘れたりしないということでしょう。

有害かもしれない副産物や汚染物質に関しての重要なポイントは、許容基準、即ちきわめて少量な値である、許容可能な初期値の定義ということです。一般的な傾向として、検出能力と許容範囲の限界を混同してしまうということがあります。化学計測器は素晴らしい進歩を遂げており、現在では固体、液体、ないしは気体中の信じられないほど少量の不純物も検出し滴定さえ出来るようになっています。これは放射性原子においてもそうであります。科学的ないしは実際的な基盤を持ち合わせて

いないと、注意と用心の原則は即、次のような命令につながる可能性があります。即ち、有害である可能性のある物質が検知可能となるやいなや、これを禁止すべきであるという命令です。核物質にたいする許容限界のアセスメントの調整は、時にこのようにして行われ、結果として工業製品に課せられる許容基準の初期値が、時には自然界に存在する岩から自然に放出されている結果の値よりも厳しいということにもなります。

結局、なぜそれがいけない訳なのであろう？ということでしょう。

インダストリアル・エンジニアリングでは、工具と人間との間の相互作用が重大な役割を果たします。完璧な工具であっても、不完全な能力しかない、または信頼性の低い使い手によって操作されるとしたら、何の役に立つのでしょうか？最近の大部分の化学工場あるいは原子力工場の敷地内における大規模な産業事故は、人間側の欠陥がその原因となっています。現代の機械はますます「自己修正」能力を高めており、みずからの失敗を修正し、外部から来る不適切な命令を拒否することが可能となっています。しかしチェルノブイリでは、原子炉は指令を拒否することが出来ず、これによってきわめて危険な装置となってしまいました。人間と機械の関係（マン・マシン・リレーションズ）はそれ自体で、テクノロジーのみならず心理学や社会学にまたがる研究の領域を形成しています。

テクノロジーの世界では、合理性の限界を定める規則として、線形範囲がしばしば受け入れられると認められています。この意味するところは、ある一定の能力をもつ原子炉の建設方法を知っていれば、同じモデルで出力が2倍の原子炉をもう1基建設が可能であるということです。同じことはロケットにも人工衛星にも、あるいはより一般的にいかなる種類の技術製品または装置にも当てはまります。しかしこのことは、重大な災害につながる恐れもあります。一定のスケールにおいて得られた完璧さは、規模やパワーが変化した時には明らかに保持されないのです。原子炉の領域で、フランスのエンジニアたちは実験高速中性子炉・フェニックスの作動にとっても満足していました。しかし、同じタイプながら出力が5倍の原子炉・スーパーフェニックスを建設したところ、彼らは一連の新しい問題に直面し、これらを解決する必要に迫られることになりました。

同じことはロケットについても言えます。私はフランス国立宇宙研究センター（CNES）所長とヨーロッパ宇宙機構（ESA）の議長として、宇宙研究活動に直接関わってきましたが、我々はアリアン・Iからアリアン・Vまでを継続的に「アリアン」ロケット・シリーズとして建造し、成功させてきました（図3）。各ステップで我々は発射台のパワーを増加させましたが、たとえロケットの新しいモデルに思い切ったイノベーションを導入しなくても、一種のルーチン・プロセスと化したステップというのはひとつもありませんでした。より正確な言い方をすれば、我々はモデル・Iと比



較してモデル・II、III、IVでは思い切った新工夫を導入しませんでした。これに対してモデル・Vはかなりイノベーションを組み込んでありました。アリアン・Vの最初の実験では失敗に見舞われましたが、これは本質的に第一段の誘導システムのソフトウェアのせいでした。このソフトウェアはそれまでのモデルでは完璧に作動していたのですが、新しいモデルでは欠陥が生じました。その後、適切な修正が行われて現在にいたっています。

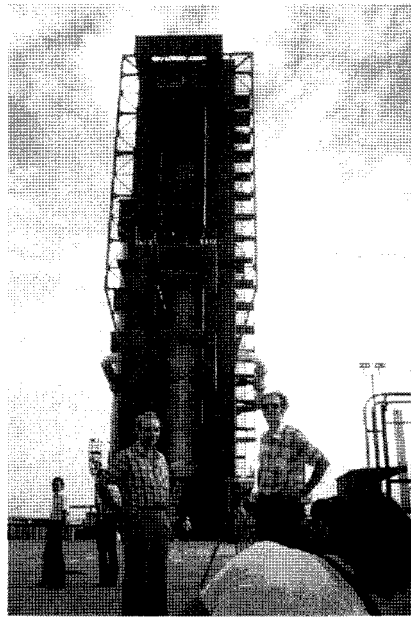


図3 「アリアン」の組立て段階の最初の試験モデル（1979年2月）。  
フランス領ギアナのクールーにて。写真左は、フランス国立宇宙研究センター所長でプログラム責任者のユベール・キュリアン教授。  
右は同センターの Lauchers Dpt 局長のフレデリック・ダレス。

## 自然現象

自然現象を見ていると、完璧さと不完全さという概念はもはや当てはまりません。この論文の最初の部分で取り上げた結晶状態においてそうであったように、規則性と不規則性について語ったほうがおそらくは有用でしょう。自然現象では一般的にパラメータの数が多いのですが、たとえば気象学の場合には、このことは一目瞭然でしょう。有効なモデルを構築するためには、重要なパラメータの正確なインベントリー（項目表）のみならず、ある所定の時間におけるその数値の正確な計測値も必要となります。天気予報における顕著な進歩は、以下の2つの主要因によるところであります。すなわちコンピュータによる計算能力の向上と、観測衛星によってあらゆる種類のデータを収集できる能力が向上したことです。

宇宙技術は、電気通信、天気予報、深宇宙実地調査など多くの分野に新たな領域を開きました。気象学に関して興味深いのは、海洋観測が大気の観測と同程度に重要だということです。海洋と大気間の交換が基本的に重要なプロセスとなっています。現在人工衛星によって、地球上のいかなる場所も完璧に規則的な時間間隔で定期的モニタリングを行うことが可能です。もし気象学者に21世紀の夢は？と尋ねたら、確実に次のような答えが返ってくることでしょう。衛星観測データの量と質が現在の10倍ないしは100倍になることだ、と。一方ではコンピュータのパワーが今後さらに一層、相当程度の進歩を遂げるだろうことも疑いのないところです。

この半世紀の間に、気象学が長足の進歩を遂げたことには、誰もが同意しています。一方、幸いなことには、気候学もまた急速に進歩してきています。今後何百年か先の気候変化の全般的な傾向を予測することは、相当なチャレンジでしょう。しかしもし我々が、人間の活動を制限しあるいは方向付けをして、望ましからざる影響を及ぼすことを避けたいとするならば、こうした予測は重大な意味を持っています。注意と用心の原則はここで重要な役割を演じています。

地震の予知と望むらくは予防ということも、今後まだ大幅な進歩を望める研究分野です。経験に基づく帰納的な説明は、理にかなった満足を与えてくれるでしょうが、もし論理と仮定に基づく演繹的な、信頼できる正確な準備を行えば、もちろんより一層の快適さがもたらされることになるでしょう。

自然現象の数学的モデルは、可能なかぎりの最高の正確さで、現実の状況と照らし、定期的なチェックが可能である場合にのみ、本当に有用となっていくと言えるでしょう。我々の惑星地球のマネジメントのためには、地球の科学的な観測は永続的に必要な事となってきます。お金はかかるかもしれませんが、こうした観測は完全な義務といえましょう。

数学、物理学さらに生物学などの現代科学の中では、複雑性の研究が主要な潮流のひとつとなっています。この流れから見ても、地球というものは取り組むべき魅力的な対象であると言えます。

## 透明性

一般の人々への科学的及び技術的活動に関する情報の伝達は、いまだに完璧さを見いだせずにいる領域のひとつです。それほど遠くない昔に、科学者たちはジャーナリストの正当な評価を得られないとして悲しみを感じていたものです。科学はラジオやテレビの番組で大きく取り上げられるような話題ではありませんでしたし、新聞には

科学的活動を報道する定期的なコラムなどが設けられていませんでした。現在こうした状況はかなり改善されてはいるものの、少なくとも二種類の不完全さが存在しています。そのひとつは、ジャーナリスティックな生き方のスタイルに内在する問題であります。最も基本的な出来事ではなく、それよりも最も感情に訴えるような出来事ばかりを強調するという傾向です。第二の問題は、ある物事の発見とそれを公表するまでの時間が劇的に短いことに由来しています。起こりうる誤りを注意深くチェックしたり、あるいは望ましい立証を行ったりする時間は存在しない。公表前のこうしたあらゆる種類の「リラクゼーション・タイム（緩和時間）」を置かず、まだ確認されていないが、面白く、厳密に信頼できる結果だとして提示されてしまうということがときどき起こります。後にそのいわゆる発見が実際には誤りであったと判明することで、「科学」全体の評判が落ちてしまうことになります。

テクノロジーと工業の分野で高く評価すべき態度といえ、さまざまなプロセスや経営に関する情報についてガラス張りの「透明性」を保つということでしょうが、この透明性の考え方についても論議の余地はありましょう。受動的に、それとも能動的に透明性を保つ、ということがありうるのです。受動的な透明性とは、制約を加えずにすべての情報を公表しはするが、情報の重要性に階層もつけないというやり方です。これに対して能動的な透明性とは、ジャーナリストや一般の人々から最も関心の的である質問を引き出すための、自信に満ちた対話へと導くような説明や議論とともに情報を配布し、こうした質問に対する最も適切な回答を与えることになります。透明性の維持とは、単に何も隠しだてしていないということだけではなく、科学的及び技術的活動がどのようにそしてなぜ運営されているのかの説明に努めるということです。このことは、先見的に汚染物や有害物の嫌疑をかけられる可能性のある産業ではとりわけ重要なことでしょう。全面的な透明性は、工業所有権の保護ということと矛盾する可能性があることは明らかであり、これは特許に関する方針において考慮しなければならない側面でしょう。

## 画像イメージ

完璧さと熟達した不完全さとをコントロールできることによって、最先端の道具の活用をもたらしてくれます。適切な処置を講じ、かつあらゆるスケールの画像イメージを得る必要があるのです。画像イメージは確実に最近の科学的進歩による寄与が最もめざましい分野のひとつでしょう。物質は、その元の大きさのままのみならず分子レベルでも子細に調べることができます。ある同じ物体を見るのにいくつかの方法を組み合わせることは、特に実り多い成果をもたらす方法です。物質の多様な内在的性質（磁氣的、電氣的、光学的）に取り組み、多様な種類の現象（伝達、反射、回折、放射性崩壊）を使うことで、検査対象の物体に関する全面的な知識を得ることが可能

となります。この物体とは、生物でも不活性物質でもありえます。現在、医学的画像は診断において重要な役割を果たしています。

画像イメージの解釈は簡単な仕事ではありません。目標は、「ただのイメージ (just an image)」ではなく「十分根拠のある正しいイメージ (a just image)」を得ることです。大量の生データから有用な情報を引き出すためには、計算機援用システムとモデリングの開発を行う必要があります。この明らかな一例として、地球観測衛星から送られてくる地図の解釈ということがあります。観測は可視、赤外線利用、あるいはレーダーレンジの帯域で行われ、その用途分野には農業、漁業、砂漠化対策、災害予防、気象学などが含まれます。各ユーザーが、個別的に具体化した解釈を必要としているのです。

寸法スケールのもうひとつの一端に目をやってみると、X線回折から導き出した分子や分子配置の原子モデルの組み合わせによる利用の例を挙げることもできるでしょう(図4)。これは、いまや物質の原子構造を扱うすべての研究室でルーチン作業となっています(6)。

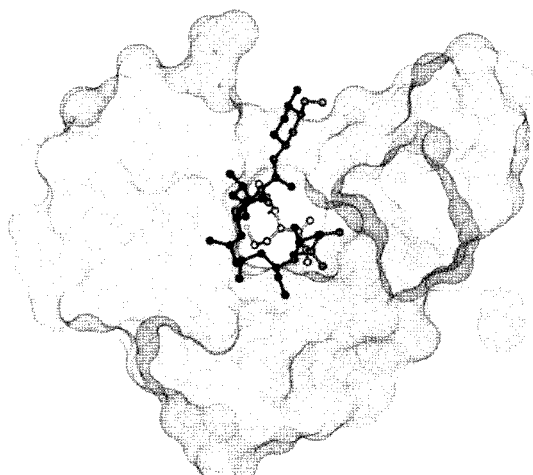


図4 自然蛋白質(図中の点状の部分)とある薬剤(FK506 黒い線状の部分)により形成された分子複合体。構造はX線回折による。この免疫制御薬は、移植拒絶反応防止に使われる。(J.-P. and I. Mornon, Universite Paris 6)

## 結論

この惑星地球の上に住む我々ひとりひとりが、地球上の生命と生活の質を維持することに関心を抱いているか、または少なくとも抱くべきだと言えます。一方、人工製

品の消費者でもある我々ひとりひとは、ますます高い品質を求めてもいます。この明らかな結果として、自然と、目を見張るほどのイノベーションに対する志向性との調和を保つような思慮分別の必要性が高まっています(7)。

幸いなことに、「サジェス (知恵、節度、賢明さ)」と「アーディエス (独創性、大胆さ、果敢さ)」の間には基本的に非両立性はない、すなわちこれらは十分に両立しうるのであります！

\* \*  
\*