

電力技術の中の材料技術

Material Technology in Electric Power Industry

富山 朔太郎*

Sakutaro Tomiyama

1. はじめに

五人のエキスパートの多岐にわたる指摘を要約出来る能力はないので、話題を二つに絞りたい。第一はエネルギー産業の重要部分を占める電力技術の特殊性、特に新技術にどのように対峙しているかである。ただし、これは電力業界の傍らにあって、観察してきた者の感想として受け取って頂ければ幸いである。次は、新しい材料設計、評価技術の提案である。一段と厳しくなる外部環境に対応して、電力は今後真剣に使用する機器の寿命延伸に取り組みざるを得ない。しかも、より丁寧な保守に伴う工数の増加と信頼性の間のトレードオフを数値化して取り扱うことになる。これは必ずシステムと材料を一体化した最適化に辿り着くことになるはずである。さらに、この構成要素の特性のばらつきを初めから念頭に置いたシステム設計手法は、類似した材料設計に全く新しい立脚点を提供するからである。そして遠い狙いとして、保守体制と協調する「体調を外部に表現できる材料」を目指している。

2. 問題とする特性と性能の指標

材料技術の応用分野が様々ある中で、電力技術はやや特殊な地位を占める。一般に新規な技術は当初は特に生産の技法が洗練されておらず高いものにつく。特殊な応用分野を見つけて小規模でも生産を軌道に乗せ、得られた利益を生産技法の改善に還元して次第に一般的な応用を狙うことが定石になる。電力で使われる材料でこの道筋を踏んできたものは多くあるが、実は洗練の過程の大半は他の分野で済ましているのである。

その生産物が誠に均一で、直接に規模のメリットを享受することは電力の特殊性である。逆に言えば、分野の中で先ず性能の良さだけで使える小規模な応用の

場は存在しない。電力は「新技術の最終需要者」として自分を規定する傾向がある。これまでは幸いに競争も無きに等しかったので、出来れば新技術は他の分野で十分に成熟したものを、信頼性の保証付で使いたい、と言ったところである。もっとも、電力以外に適用できない技術に対しては電力業界は気長に付き合う習慣がある。これは常に激烈な競争に晒される家電や自動車とは違う傾向として映る。

電力技術の性格の特殊性の第二としては、期待される特性が材料の生地剥き出しであることであろう。電力機器を表現する言葉として、「銅機械」「鉄機械」があるが、これから何を思い浮かべるかという銅は優れた導電性能と加工のし易さ、鉄は強度と磁気的性質、そして用意された加工技術の品揃え、そして両者に共通する低価格に違いない。どれも銅と鉄との材料としての本質的な特性に根ざしていて、多少の鼻業で変わるようなものではない。

三番目の特殊性は、誰でも指摘するところであるが、要求される高い信頼性である。日本の家電が伸びた理由の一つとして挙げられることは、数は少ないが新しい物好きの先行的な市場セクターが存在する点で、当然そうした方々は製品の初期故障などには寛容であろう。ところが電力市場にはそうした物好きな分派は初めから棲息していない。

電力の基幹技術のうち発電技術の大半は、海外で検証済みのものであったと言われる。正確を期せば、歴史の中で開発費用が償却済みと表現できる。電力産業は今世紀になって急速に立ち上がってきたもので、当初様々な冒険が許され、それぞれの地域の産業や文化の特殊性に合わせた適応が許される地場産業として意識されていた形跡がある。開発の競争の中で、試された末、歴史において行かれあるいは脱落した技術も存在する。後発者はこうした敗者の負担において、適切な選択肢を選ぶ自由を持った。しかし今やそれは広大なネットワークで供給され、料金やサービスを通じて、

*東京電力(株)技術開発本部顧問
〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1

他の産業の盛衰に関わる存在になり果せた。更に、飛躍的な生産性の向上に繋がる革新技術もこのところ出現していない。冒険が許される雰囲気が減っていることは確かである。

新技術に具合が悪いことばかり並べていると見えるかも知れないが、必ずしもそうではない。電力は巨大な一体化されたシステムだから、片隅で、一貫した開発のシナリオに則った、本流ではない技術の棲息を許し易くもある。適切な「ミックス」の意識は電力人にはかなりの比率で共有されている。ただ、「片隅での成熟」の過程は市場とは全く連携することなく、供給側の都合だけで存否が決まるのである。

こうした電力の特殊事情の一部が急速に変わろうとしている。日本の電力自体がIPPとして本格的にアジア地域、特に中国と東南アジアに出ようとしているが、そこで出会うのは全く性格を異にする系統だから、必要とされる技術もこれまでの物とはかなり変わってくるに違いない。又、二三の例外を除いて、欧米の先進国での電力技術開発は元気がない。ガスタービンの高温化や燃料電池で僅かに米国の後塵を拝してはいるが、新しいことに関して誰かが先に検証を済ましてくれるだろうと構えている訳には行かない情勢である。

電力業界も特に発電を主体に競争原理が導入されつつあり、状況は電力内部の新技術開発にとっては厳しい環境のように見えるだろう。しかし競争力強化のためには従来の考えに囚われず低価格の設備を作らねばならず、新しい技術の導入が必要となれば、優れた材料はそのプロセスの核心となろう。これは開発担当者にとっては一種の追い風ではないだろうか。

3. 評価の基準の特殊性

電力プロパーな材料の評価基準は許容フラックス強度である。フラックスの種類としては電流、熱、磁束、イオンなどが挙げられる。最大フラックスはいくらか、抵抗に相当するものはいくらで、それを局限するために材料の量をどこまで減らせるかが問題となる。

変換機器用材料についてフラックスの意味を考えてみる。材料の中でエネルギーは様々な形を取って履歴を重ねるが、そこでエネルギーが経巡った経路が解析の対象になる。変換効率を高める試みは絡み合った経路の整理、合理化と読み替えられる。都合の良い経路にエネルギーを導くための高い伝導性と、具合が悪い経路を遮断する隔離特性の数値と空間分布が問題になる。具体的な例を挙げると、電解質ではイオンを導く

貫入層とそれを隔てるマトリックスに相当する。これは二つの特性が受動型である例だが、能動型で、エネルギー媒体がやってくる度にゲートを開け閉めするものであっても良い。従って材質の性能は、望ましいフラックスのをどこまで通せるか避けたいフラックスをどこまで制限出来るかに掛かる。

幾何学的に整理された固定的な経路は要件ではない。等方的に一見乱雑に経路が分布していても変換は可能である。その例は気体分子の熱運動を媒体とする変換で、そこでは無効な経路も選ばれるから、カルノー効率が上限になるが、タービン表面での運動エネルギーと熱エネルギーの流れは大変異方向性が強い。教訓的なのは、統計力学でマックスウェルの魔物と呼ばれる思考実験である。能率的なゲートに相当する分子大のマックスウェルの魔物が飛来する分子の運動量を計測しつつ散乱の方向を制御できれば、熱力学第二法則、ひいては上限としてのカルノー効率は意味がなくなる。しかし、思考実験の教えるところでは、そのうちに魔物自身が熱くなってしまい、分子の運動量測定能力を喪失する。

巧妙な道と壁から構成された伝導経路あるいは気の利いたゲートは、自らの機能故に破局も用意する。経路の選択性が鋭くなければ、流れを乱す作用の効果により過程は拡散類似になり、等方的な媒質への回帰が起こる。しかし高い選択性、ひいては高い効率を担う材質では破局はリークの形を取る。絶縁破壊がその例となる。

全ての現存の変換機器で、二つの流れの対立が効率向上のキーポイントになっているのではない。例えば発電機では、確かに効率の一部は回転子の巻き線取り付け枠から駆動軸にかけての弾性、剛性エネルギーフラックスのやり取りと発生する磁場の大きさの兼ね合いで決まる面があるが、今は改良は別の面に向けられている。もっとも、発電機の過渡特性の一部は上記の点に掛かっているから、性能のその部分に着目すれば話の大筋は合っている。

他の例として電解質を取ると、機能を高めることと裏腹な危険は分極に相当している。高い選択性を示す媒質では大きな分極電圧が生じる可能性が常に存在する。あるいは電解質の界面に第三層が析出するかも知れない。

一般に受動的な経路の隔離特性を向上しようとするれば、「壁」を厚くするのが一番手堅い方法に違いない。しかしそれによって装置価格の高騰を招くことにな

る。

フラックスに対する要求は、電力技術が集中高効率要素を核として成り立っている事情から来る。とは言っても、そのコンパクトさは内燃機関と比較すると大したものではない。最新の自動車エンジンと原子力発電所の圧力容器を比べれば、体積当たりの出力では二桁上になると思われる（燃料集合体とピストン部分を比較しても2から3倍）。後者の利点はその燃費（石油系で倍から三倍）と耐久性（自動車エンジンは1万時間の運転を想定しているのに発電諸設備は数十万時間）にある。出力当たりの価格は自動車の方が（火力と比べても）十分の一以下だが、均した設備投資額は発電設備側に軍配が上がる。

この比較から、電力の中の材料技術についてあるイメージが浮かぶ。設備投資額の増加は運転経費の軽減とトレードオフの関係にあるから、燃費の軽減、寿命の増加による保守費の軽減が実現するなら材料の高級化はある程度認められる。その点自動車の場合には寿命はエンジン以外の部品のそれで抑えられてしまうから高級化のハードルがより高くなると思われる。自動車業界でセラミックエンジンの開発が続けられているのは、燃費とのトレードオフが成り立つかも知れないからである。この事情は電力でも同じように見えるが、内燃機関の効率向上の将来見込める幅が相当に大きい可能性があるのに対して、電力技術では本命のタービンは入り口温度の向上に的が絞られ、その総体的な幅は狭いと言える。

4. 材料特性とシステム特性の絡み

古くから、絶縁協調とか機械ヒューズとか言った言葉が使われている。連携したシステムでは、同じ擾乱によって破壊される箇所の候補は複数あるのが普通だが、システムを運営する側にとっては、壊されるなら、価格がやすく取り替えが容易である所にして貰いたい。そのために破壊し易さに階級を付け、場合によっては態と、許容値を超したら確実に壊れる部品をサービスが容易なところに配置する。これがヒューズである。これはシステムに出現する擾乱のパターン及び部品の特性と保守の体制とを協調させる発想であるが、その線に沿った試みは何もヒューズには限定されない。ここで取り上げるのは僅かに特性にばらつきがある同類の多数の部品から構成されるアレイ状のシステムとそれに類似した材質への対策である。

材料の特性にはばらつきが避けられない。それは一

個の部品の場所毎に現れることもあれば、多数の部品のアレイの中で生じる場合もあるだろう。性能は良いものに、寿命は永いものに越したことはないのだが、保守を考慮した使い易さを視野に入れると、部品の特性のばらつきに対しては別の設計上の原則を想定できる。

ここでは主に三次元のアレイ状の材質あるいは部品を対象として考察する。直列の配置で模擬される部品構成の機器もあるが、良く知られているようにそうした配置では、信頼性が掛け算になって高い値を維持するのが難しいことに加えて、過渡特性が個々の部品の特性のばらつきに非常に敏感になって使い難い点が出て来るので、多少特性は落としても複線の構成にしている場合が多い。

保守を考慮に入れて設計する立場は保守の形態に依存する。システム毎あるいは機器毎に全体の寿命を見積もり、その少し前にそっくり交換するの一法で、電力に関する限り、保守はこの方式で行われてきた。しかし、個々の機器の寿命一杯に使い切るという立場からは、別の方式が浮かぶ。きめ細かく部品の健康状態を観察し、寿命が来たものから出来るだけ周りに影響を与えない仕方で順次交換するもので、健康診断もそのためのセンサーの配置や情報処理の手間が掛かるから、経費と相談になるのは当然のことになる。

分解が容易ではない機器の部品を個別に交換する方式は経済的に成り立たない。電力プラント機器に組み込まれた部品は概ねこの類のものだから、寿命延伸とは言っても、それは定期に非破壊検査を実施して、次の定期点検まで交換を延ばすことを意味する。又、配電用機器の大半は随時の交換が可能だが、センサーをわざわざ付属させ、計測をする煩わしさが問題となって、保守のきめの細かさは追求されてはいない。しかし、これ以外に新しい型の保守の対象が浮上してきている。その良い例が二次電池や燃料電池である。今のところ前者は数十キロワット、後者は大きいもので数百キロワットを単位として生産されており、少なくともスタック毎に計測線が取り付けられており、さらに健康状態の把握のために個別にセル毎にも配置されている例もある。このようなシステムの保守の戦略はまだ実地での試験の回数を踏まない決められないのだが、今まで経験したものとは違うだろうことは予想に難くない。

もし肌理の細かさを主眼として戦略が立てられるなら、それに応じる性能特性を個別のユニットが持って

いるかが問題とされる。特に特性の幅が戦略の合否を決める重大なポイントになる。電池は典型的な二次元アレイを構成しており、セルはいくつかが直列に並び、作られたサブスタックが更に直、並列に接続されます。隣接するサブスタックは互いにある程度補強し合うことになる。特性が平均より優れたサブスタックがあれば特にそうで、もし過負荷気味の運転状態であれば、更に余計に負担を受け持つ。これが積もって寿命に影響を与えるので、こうした配置では、優れた部品はある程度「太く短く」生きることになる。

太く短いタイプと細く長いタイプが共存はばらつきがある系では避けられない。予め分かっていたら、それなりの配置を考えることが出来る訳だが、問題は、使ってみて、あるいは故障してみても初めて分かる場合である。それでも対策を考える必要がある。そしてそれは問題の型として、特性にばらつきがある材料、つまり三次元のアレイに共通している。

まず、孤立して飛び抜けた特性のユニットがアレイの中にあつたとすると、一番寿命に影響を受けるのはその直ぐ上、下流に位置する凡庸な特性のユニットで、最終的に故障の引き金になる可能性が高い。悪い影響の伝搬にははっきりした方向性が存在する。この疲労の蓄積は隣接する高い特性のユニットのそれに覆われて、容易には測定に掛からない。ユニット毎に過渡特性を観察すれば兆候が読みとれるかも知れないが、処理は煩雑になる。とは言え直接性能に関わる部分で駄目なら過渡特性は大事にしなければならない。

工夫の一つは、電池の場合、急速放電、充電の経路が通常の経路と違ったものに出来ないか、と言うものである。得られる特性はやはりいくつかのユニットを纏めた大雑把なものであっても、システムの健康診断の目的からすれば、そのほうが理に叶っている。緊急用に斜めの配線を付け加える形になる。そこで何らかの異常が見つかれば、個別の配線を使って細かく特性を見ることが可能になる。この類の発想が一体の材料の取り扱いについてもヒントを与え、新しい設計の指針を提示するかも知れない。材料が構成上、有限の大きさの互いに接続されたユニットに見立てられ、隣接したユニットが性能的に補い合う形が出来ているとすると、扱いは電池の群に似たものになる。一体の材料ではまして部分部分にまで測定の末端は行き届かない。しかし、全体としての健康診断は工夫によっては可能で、部分の差し替えは出来なくとも、他の部品との相談の上で負荷を下げて寿命を長引かせることも考えら

れる。

5. 新しい材料設計

劣化は、ものによっては直ちにシステムの効率に影響を与える。熱交換器の伝熱特性の劣化は、伝熱面が汚れる等の効果に起因するが、交換器の末端の温度差に直接反映するし、もし過渡特性を測っていればより明確に状況追従速度の低下として現れる。しかしこれはごく一部の特性であって、大抵の劣化の結果は、不意打ちで出現する。意図的に劣化を明示する素材構成の例は昔から色々工夫されている。タイヤに刻まれたトレッドや磨耗で露出する埋め込み材、あるいは鋼ワイヤに撚り入れられた麻糸などである。いずれも部品の本来の性能を損なうことなく目視検査で兆候が見出せるよう考えられている。

使われている多くの素材の全てについて劣化が直接性能に響くような構成を工夫することは難しい。たとえ出来ても全体の性能を著しく下げたことの代償である可能性が大きい。従って、様々な過渡運転特性を利用するかあるいは完全に定常的な運転モードにおいても、システムに存在する擾乱への応答を拾い出すなどして、情報の種類を増やす努力が求められる。

材料設計の一つの理想は、素材を構成する部分がそれぞれに自らの疲労の程度、余力の程度を過不足無く情報として外に出せる構成であると言えよう。更に、出てきた情報に応じて、無理をせずに材質の能力を使い尽くす運用の方法が求められる。これは生体の構成に一脈通じるところがあるが、生体は計測と制御の多重のループを張り巡らしており、構成は精緻を極めていて、人工システムで丸写しにするのは技術的に当分の間困難である。

先に例に取った二次元のアレイで表現される材質を再び考えたい。個々の部分には特性と寿命のばらつきが存在する。又、ある大きさの過負荷特性も想定しておく必要がある。システムとしての扱い易さに重点を置きすぎて平均としての特性を押し下げる設計は利口とは言えない。特性に厳密な設定は元来無理で、ばらつきがある以上、そして部分が周囲にある程度補える過負荷特性がある以上、アレイ構成では、良い特性を示す部分は、扱い易さを含めて、ある範囲では全体の性能にプラスの寄与をする。しかし、擾乱や欠陥に起因する負荷の偏りがある限度を過ぎれば、相互補完はもはや成立せず、かえって全体の特性を弱めることになるだろう。二次元の配列を考えているのだから、い

わば平面に皺がよってそこから破れやすくなる状態が実現する。

どれだけ皺がよれば破局的な事態に到達するかは、単位部分の性能の幅とばらつきの双方に依存している。システムの運営側としては、個々の部分の劣化の程度は知る必要はなく、この破局の閾値の到達を報せる悲鳴さえ聞こえればよい。全系に余裕があれば当該部品の負荷を適当なところまで下げるとか、あるいは早めの保守をするとかの対策が可能になる。

必要な判定を下すためには、平面の上の負荷の偏りのパターンに着目する必要がある。特に巧妙なセンサーを付けるのでなければ、このパターンが何かマクロな特性としてはっきり現れるよう部品の配置を取ることが望ましい。全く特性が均一な部品からなるマトリクスでは工夫の施しようがないが、性質が違う複数の部品から成るものであれば、こうしたパターンをマクロ特性に転化する設計も可能と考えられる。

6. ヘテロ構造と機能

前段までの話は、僅かに特性にばらつきがあるほぼ均質なシステムあるいは材料の設計上の最適化に関したものであったが、以下では明らかにマクロに不均一、それも乱雑に不均一な系を想定している。

材料の進歩を支えてきた一つの動機は極限環境への挑戦であった。極限の種類は多いが、電力技術に限れば、それは主に高温と雰囲気の問題に集約されると考えられる。そして、たとえ環境は単一であっても、材料に対する注文は一種類であったためではない。

一口に高温材料と言っても、ごくありふれたものでも耐高温特性の他に、耐応力性、耐雰囲気性、これに加えて本来の性能の指標である気密性あるいは電気又は熱伝導性等が要求される。常温で使う材料であると、普通は一つの性質に一つの成分や部品を対応させ、適宜組み合わせで望みの特性を得ることも出来ると思われるが、極限環境下ではそもそも環境を成分に分けることが難しい。材料には否応なしに複合機能が求められる。

複数の機能は時に互いに矛盾することがある。それは共通の因子が関与しているからである。熱絶縁性と電気伝導性を共存させることが困難だが、これはいずれも電子の易動度に関係しているからである。それでも温度が低ければ同じ効果を与える複数の因子の組み合わせで望ましい特性が得られる場合があるが、高温になれば成程特定の一つの因子が卓越してその裸の

特性が表に出てしまうケースが多い。矛盾しないまでも、高温下の特性には全てイオンの移動が絡んで来る。利用する側にとって都合の良い特性は明快なヘテロ境界に依存しているものが多いから、それがぼやけることは望ましくない。特に境界に全く別な相が出現することは輸送特性にとって有害となる。一方、熱膨張係数が異なる相が接していれば、機械的健全性のためには境界がぼやけ、遷移層を形作って欲しいところである。

高温のような厳しい環境下では、拡散の効果その他のストレスに抗してマクロな傾斜機能を永く維持しようとするれば、マイクロ又はサブマイクロなヘテロ性を活用することが必要となる。

7. 複合組織を維持する条件

設計によって希望する特性を与えた材質が劣化していく過程を一般化してみると、少なくとも三つの因子の拮抗が過程を形作っていることが分かる。その第一は、設計された形であり、第二はこれを均等化しようとする流れあるいはストレスで、最後はいくつかの作用の間の遅れの効果である。遅れは、材質がはっきりと区分された要素から成り立っているとき、最も直感的に分かりやすい存在である。それは場所によって、隣り合う要素に働く同一の作用の時間遅れに翻訳される。複合材料の設計の要領を一般化すると、上記の第一の操作によって与えられた形を第二の作用に逆らって何とか長持ちさせることが目標となるが、その際要素の形を調節して、第三の機能を味方に付けることが秘訣と言えるのだろう。

与えられた形はそこから何らかの機能を引き出すことが最終的な目的のだから、全ての擾乱を受け入れた末のエントロピーが高い形では具合が悪いことになる。前段で述べた設計の要領は、形を工夫して、擾乱を受けても当初の形が復元する技法に相当する。揺すぶられた結果やはりエントロピーが低い状態に落ち着くとすると、それは文字通りの復元ではなく、形態のある特徴が共通する別の形に移るわけである。

第三の遅れの効果を引き出すものの典型的な例として、拡散と緩和の時間差を上げることが出来る。例えば、酸素の拡散、陽イオンの拡散、そして結晶粒の変形の三つの間の速度の差である。これによって界面付近に原子種の過剰あるいは不足の層が形成され、結晶粒内に歪みが誘起されるが、それが次の拡散や別の相の析出の原因となる。



写真1 叡山参道の穴太積み

もし設計によって傾斜機能が設定されたなら、外部から該当する原子種が常に供給されているのでない限り、拡散と緩和は傾斜を最終的には消去する方に働くであろうから、遅ればれこれを押しとどめる大事な因子となる。設計の要点は、結晶粒の形を選んで、こうした乱れた拡散が存在しても、傾斜の概形が再生するようにすることに帰する。

構造として類似した例を挙げるとそれは石垣積みではないだろうか。石垣造りに技法は戦国の世に必要なと迫られて進歩したものだが、近江の穴太の石工がこれに応えた。後に巨大な石を隙間無く組んだ城の石垣まで進化するけれども、構造的に面白いのは初期の野面積みである(写真1)。

穴太組みの技法の肝心なところは、大小の石の組み合わせにあると思われる。高い石垣で怖いのは、場所毎に背圧が異なり、一部が膨出して全体の崩れを誘発することだが、対処の方法として、圧力を概形を損なうこと無しに緩和する技術が発達した。今、二種類の大きさの石で石垣が組まれているとする。大きな方の石の格子が概形を決めている。間の小さい石は比較的流れやすく、圧力緩和に有効に作用する。小さい石がひとしきり流れた後でその大きな石が再配置すれば、全体が崩壊する危険がよほど減少する。結局緩和の結果として全体として石垣は少し沈むが、それは簡単な手直しをすれば済むことになる。

もう一つインカの石組みの例を挙げる。後期のもの、殊に良く知られているクスコ市内の石組みは、隙間に剃刀の刃を挟むこともできないと言われている。それほど精密に石が加工できるなら、何故直方体の規格品を作って迅速に組んでいかなかったのだろうか。実際彼らは一方でれんが積みのような規則正しい石組みも使っているのである。継ぎ目の分布はいかにも不規則

で、審美的な価値は高いが手間が大変掛かったに違いない。考えられる理由は、この方が横からの衝撃に対して遙かに強いと言うことである。複雑に切り込みを入れて一体化してしまうと特定の石が全体の圧力を支える羽目になり破断しかねない。幾種類かの単純な形を組み合わせて規則的な格子を組むより、どこまでも不規則な組み合わせの方が広い範囲の擾乱に対して安全とおもわれる。緩い組み石を固定するために適当な箇所に楔型の石を挿入するが、これを規則的な格子の一部とすると、力の方向によってはそれが一斉に抜け落ちて全体が緩む場合も想定できる。石垣の楔石は大きさも差し入れる方向も散らばっている方がよい。

もし大きさがいくつかの階層に分かれたユニットで不規則な構造を組むとすると、傾斜機能を持った構造であれば、上に述べた城の石垣のように各階層の割合に傾斜がつく。そこで、「どこまでも不規則」と言う表現に最もびったりした配置として、視野を拡大しても縮小しても同じように乱雑に見える、フラクタルな構造が考えられる。不揃いな背圧によってあまり特定部分だけが膨出しないように、負荷が周りに平均に散っていく構造は最も大きな石で作るネットワークの形で決まるから、それはそれで設計が必要になる。フラクタルの有り難さは、先に言ったように、楔が少なくとも一斉には抜けることが無いよう保証するところにあると言えよう。

石垣に掛かるストレスは石の形や大きさによって様々な分布を取るとは言え主に重力である。これを曲線を描く外形が打ち消して安定性をもたらす。固体材料で傾斜機能を設定するとそれに伴うストレスが生じるが、これを打ち消せないまでも対抗する必要がある。設計に使えるのは結晶粒子の形と分布であるが、ストレスの種類は前に述べたように複数であり、その内の一つが傾斜に誘起されたマクロな値を取るが、他のものを使えばよい。ただ、酸素イオン濃度は粒界では比較的一様だから結晶の配置に連動させて手品の種に使うには適していない。陽イオン濃度の方には望みがある。