

日本のものづくりの中核圏域である中部圏においては、発展戦略の基軸となる研究開発力の強化に加え、新技術の応用などによる次世代ビジネスの育成が課題となっています。この認識のもと、当財団は「新産業創出システム研究会」（座長：小竹暢隆 名古屋工業大学教授）を立ち上げました。

初回の会合（2015年7月24日開催）では、座長からの趣旨説明が行われ、委員の方々から活発な意見が交わされました。以下では、同日に行われた山口由岐夫氏のご講演を紹介いたします。

## 科学技術創発システム

講演者 プロダクト・イノベーション協会代表理事 東京大学名誉教授  
山口 由岐夫 氏



### \*プロフィール

- 1973年 京都大学工学部化学工学科卒業
- 1975年 東京大学大学院工学系研究科化学工学専攻修士
- 1975年 三菱化成株式会社（現三菱化学株式会社）入社
- 1983年 マサチューセッツ工科大学大学院修了
- 1990年 慶応大学理工学部電気工学科 工学博士
- 1996年 三菱化学総合研究所非平衡領域室長
- 1998年 同 材料工学研究所所長（計算科学研究所所長兼務）
- 2000年 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻 教授
- 2015年 同 定年退職
- 2015年 東大名誉教授 プロダクト・イノベーション協会 代表理事

### はじめに

私は三菱化学株式会社という会社で、研究部門にずっと勤めていました。辞めるときは、その中の材料系研究所のマネージャーで、部下は100人ほど、グループは10くらいでした。プロジェクトは縦割りですが、上意下達ではない横に束ねる組織になるようマネジメントしていました。

その後、大学に戻った私は、社会に出て行く学生に何をインプットすべきかを考えました。それは、知識やハウツーではなく、ホワイやメカニズムなど、自分で考える精神力です。自分が経験したからこそ言うわけですが、イノベーション重視だといっても、企業では、実験や試作をして、評価をするルーチンワークが多い。これは知性とは関係ありません。現状も同様で、考えることが極めて不得意になっています。「考える前にやれ。実行しろ。Thinkはおいておけ。」と。これでは、日本は滅んでしまいます。

企業の間管理職も元気がないし、トップは企業の実態が分かりません。ボードメンバーも自分たちで企画しビジョンを持って方向性を示す意識が希薄です。日本のものづくりが強いのは、感性があるからですが、そのアドバンテージがいつまで持つかと言えば、心もとない次第です。

ですから、若い人の知的教育が重要です。そこでやるべきことは、読み筋を教えることです。知識だけを教えるのは、間違っています。

気がかりなのは、日本では学生の知的好奇心を満たすような教育をしていないことです。学生の質は高いですが、それを引き出せていない。学生がこういうことをやると楽しい、脳が喜んでいるというような教育をしていかないといけません。大学院では自分で考える学生を増やさなくてはなりません。

学生や新入社員は、我々を映す鏡です。大人がきちんと指導すると、彼らの目が輝いて、面白いと思ったら、いくらでもやります。全然捨てたも

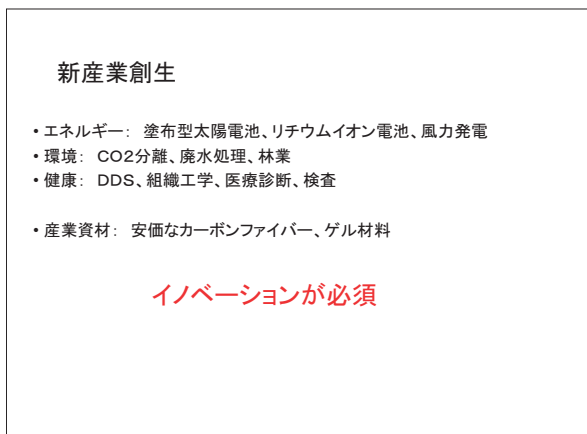
のではありません。むしろ大人がいけません。

このような状況を変えるために、プロダクト・イノベーション協会を設立しました。東京大学の中に置かせてもらっています。クライアントは企業です。

## イノベーションについて

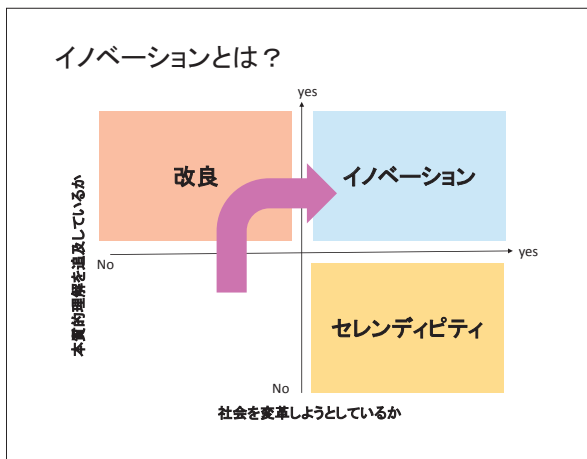
「新産業創生」について考えてみたものが図表1です。例えば、排水処理なら、林業、漁業、農業なども合わせて地域でシステムとして作り上げていく必要があります。排水処理の技術も、進化してきています。組み合わせることで、バイオマスなど多様な技術が大きなポテンシャルを發揮します。

図表 1



※DDS： ドラッグデリバリーシステム；薬物を必要な時間に必要な部位で作用させるためのシステム

図表 2



イノベーションの本質を私なりに示したのが、図表2です。「本質的理解を追究しているか」、「社会を革新しようとしているか」の2つの軸があります。

会社でよくある成功事例の多くは、改良（インプラブメント）です。そこにとどまらず図のピンクの矢印のようにイノベーションを目指すべきです。

大学を出て、ものを考える人ならば、特に何も求めずに日々を結果オーライで過ごしていても改良はできます。しかし、イノベーションはできません。イノベーションには、本質的理解の追及が必要です。

改良は連続的変化ですが、イノベーションは不連続です。例えば失敗が大発見に繋がるなどのようなセレンディピティ（偶然発見する能力）と同じように、イノベーションが不連続であることを認識しなければいけません。

イノベーションでは、俯瞰<sup>ふかん</sup>することが重要です。ところが、若いうちは知識を習得しなければならぬので、個別分野を重視せざるを得ません。専門性も大事です。

ですから、私は学生さんに「人生設計しろ。5年ごとに。35歳のときの自分はどうありたいか。」と言っています。どの辺りで全体的に俯瞰できる能力を身につけ、そのために今は何をやるのかを考える必要があります。

イノベーションは、分野の境界（バウンダリー）にあります。不連続に飛躍するためには、分野の境界を越えなければいけません。

大事なのは、1人プレイではないということです。1人で天才的に何かをやれる会社はありません。何らかの組織のベクトル合わせをしなければなりません。独りよがりでは、駄目だということです。

## ビジョンとその実現

イノベーションの種は、身近にあります。新しい物理法則の発見は、めったにありません。

イノベーションにはビジョンが大事ですが、難しいことではありません。「こんなものがあれば良い」というコンセプトを、大事にすることです。

例えば洗剤です。すすぎを1回にしたいというニーズがそれです。従来の洗剤はセルロースと絡み合って染み込むのに対し、すすぎ1回で済む新しい洗剤は、コロイドに関する長い研究や過去の失敗事例をもとに、1回すすぎというコンセプトで作られたものです。

カーボンファイバーのような素材が、飛行機、自動車、住宅などすべての基本的な素材を変え、大きな産業が生まれていくのは間違いありません。軽くて、運ぶのも施工も簡単になります。そういうものが、まだできていません。

このように、今求められているのに、出来ていないものが、いくつか挙げられるわけです。こういったものが、なぜできないのかを考えるべきでしょう。

イノベーションのきっかけ、ビジョンは身の回りにありますが、それを実現するには、現実とのギャップを埋めていく、足腰の強い技術力が必要です。

そこに知恵を割かず、サンプルを作っては評価し、分析（アナリシス）しているだけでは、イノベーションが起こるわけがありません。

もちろん、分析は極めて重要です。日本は分析力は強いですが、分析でイノベーションができるわけではないのです。統合（シンセシス）しなければいけません。しかし、そのシンセシスを大学では教えません。大学では、アナリシスばかりです。

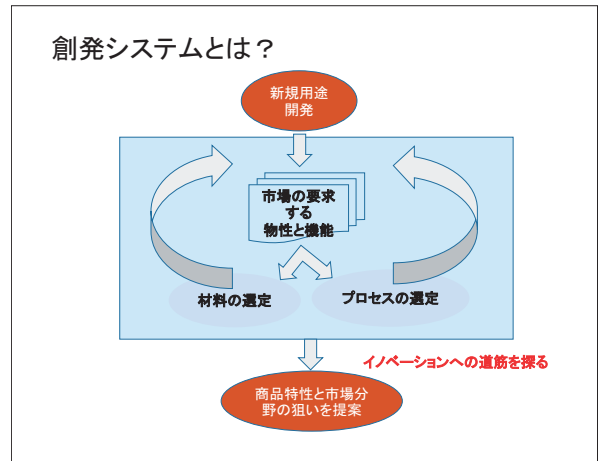
## 創発システム

私が、創発システムを考えたのは、ビジネスを興すためには新規用途を見つける必要があるからです。それを効率的に進める方法が必要です。

市場が要求する物性や機能・性能を、どうやって作るのか。大きくプロセスと材料に分かれます。各々のイノベーションを組み合わせると、

プロダクトになります。創発システムは、その道筋を探るためのツールです。

図表 3

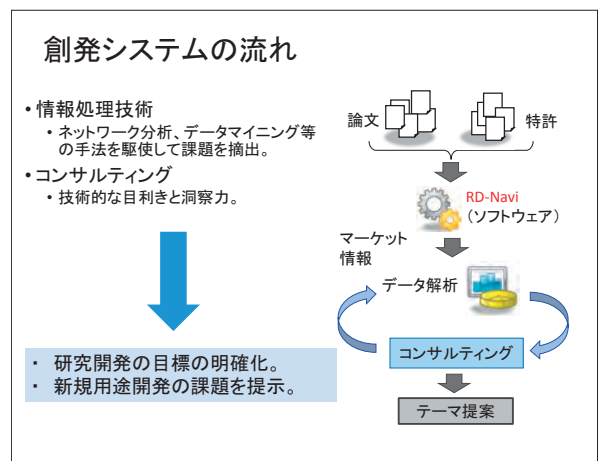


本来は、「頭で考えること」をベースに研究開発を進めていくべきなのに、大抵の会社は、調査や論文収集、パテント調査で忙しく、そうなっていません。若い研究者に「実験しろ、評価しろ、パテント化しろ、安全対策もやれ。あれもこれもやれ。」となり、よく考えて判断や指示をしていません。これではダメです。

人材育成は目的を強く意識したものであるべきで、1つの方向性が必要です。そして、トレーニングすべきなのは発想です。頭の中で、化学反応が起きなければいけません。

会社のビジョンを示すことを考える人がいないので、たまたまいくつかの研究のうち1つが当た

図表 4



るという、セレンディピティに期待しているのではいけません。もう少し論理的に研究を進める必要があります。そして、研究開発のどこに危険性や弱点があるかを予測するわけです。

論文や特許は、人類の遺産です。それにマーケット情報も加え、データ解析したうえで俯瞰することをトレーニングすべきです。

とはいえ、何万の論文や特許から開発のベクトルを見いだそうとしてもなかなかできませんから、図表4に示した創発システムが有用なのです。

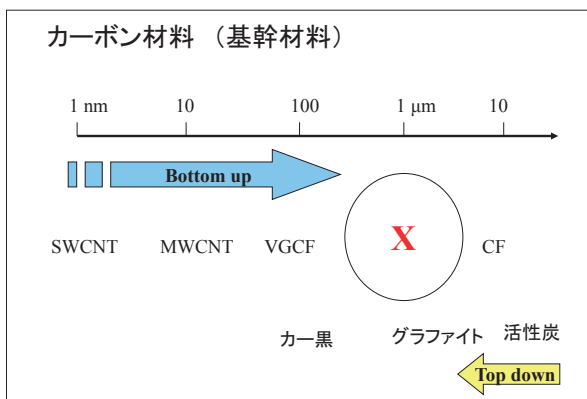
### 方法論・考え方

至る所に存在する新産業の芽を顕在化するために、創発システムは役に立ちます。マテリアル、プロセス、構造、機能、アプリケーション（応用）などのどこかに新規性を見いだすために使います。

企業からのリクエストを受けながら、実践的にやっています。

そこで大切なことは、俯瞰と各論のバランスです。局所的なブレークスルーのポイントやリスクを想定し、常に全体の本質を考えます。これこそ知的トレーニングです。これを若い人と一緒にやりたいと思っています。

図表5



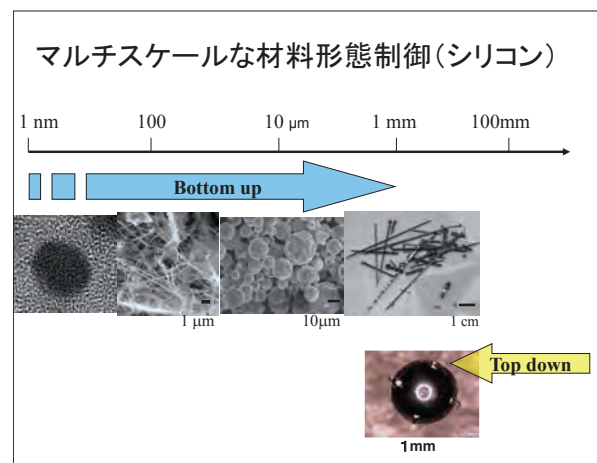
※ μm（マイクロメートル）= 1/1000mm  
nm（ナノメートル）= 1/1000 μm

カーボン材料を、例に考えてみます。図表5の横軸はサイズで、SWCNTはSingle-Walled Carbon Nanotubes（単層カーボンナノチューブ）、MWCNT

はMulti-Walled Carbon Nanotubes（多層カーボンナノチューブ）、VGCFはVapor Grown carbon fiber（気相成長炭素繊維：触媒存在下でベンゼンなどの炭化水素と水素の混合気体を1,000℃前後で加熱し作られる繊維）、CFは炭素繊維です。こう並べてみると、1 μmサイズのものがありません。なぜないのか不思議です。

同じく基幹材料であるシリコンも同様です。図表6の例は全て我々の研究室で作ったものです。一番左は、量子ドット（数nm～数十nmの大きさを持つ化合物半導体や酸化物半導体の微粒子）です。これは光りますし、たいへん面白い材料です。ただ面白いだけでなく、将来の8Kテレビに使われる可能性もあります。と同時に、医療診断などの全く異なった分野にも応用できます。

図表6



シリコン量子ドットにも、多くの作り方があります。しかし最終的には、コストの安い大量生産方法にしないといけません。そのために、いろいろと手法を変えます。電氣的に、化学的に試してみたり、繊維状、粉末状にしてみたり、いろいろと試します。このように、大きさならボトムアップやトップダウン、方法ならさまざまな方法、形態や材料も変えて考えてみるのが大事です。

数値流体力学（CFD）は、ビジネスとして既に30年以上前に確立していました。量子化学もそうです。昔は、化学会社は触媒設計を全て、量子化学でやっていけるという幻想を持つ時代があり、

当時のスパコンをどんどん導入しました。しかし、量子化学の先生を喜ばせただけです。学部の4年生でも電子軌道計算から物性を比較的容易に予測できるようになりました。量子化学は良きツールになりました。しかし、企業に行くときれらが役に立たないことも多く経験します。

量子化学は、確かに格好良いです。非常に優秀な学生が、行きたがります。原理主義的で、これだけやれば全部分かるとおぼせるところがあるからでしょう。ところが、世の中の現実は違います。1つの法則で、微細なものから宇宙までつながっていたりしません。各々のレベルにローカルルールがあり、物質によって違いがありますから、それも考慮しなければいけません。

CFDや量子化学の知識はあっても、製造現場で起きていることを正しく把握することが大切です。このギャップが大きすぎではいけません。

## コロイド

重要なのはプロセスとマテリアルがオーバーラップし、複雑な状況になることであり、ここが性能を決定します。流体運動が影響するので、混ぜ方が重要です。ところが、大学では混ぜ方なんて研究は昔のことだと考えています。しかし、今必要なのがこのような泥臭いことです。

製造物をナノ化すると、構造が再構築されるわけですが、その研究では物理と化学をジョイント

させないといけません。

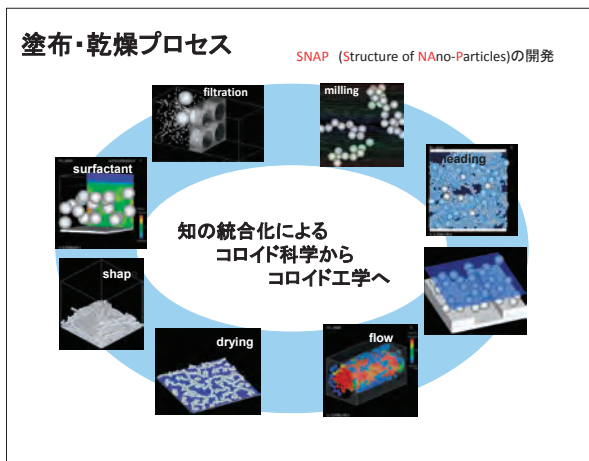
コロイド（極微細な粒子が、液体・気体・固体中に分散している状態。牛乳など）は、ものづくりの至る所に関わり、製品の性能を決定します。

そこで我々は、SNAP (Structure of NAno-Particles) というシミュレータを開発しました。このシミュレータは、フィルトレーション（ろ過）のような事例でも、フィルターや通過する粒子の材質のような条件をたくさん用意し、きちんと解いています。簡単な図式で説明するトイモデルではありません。

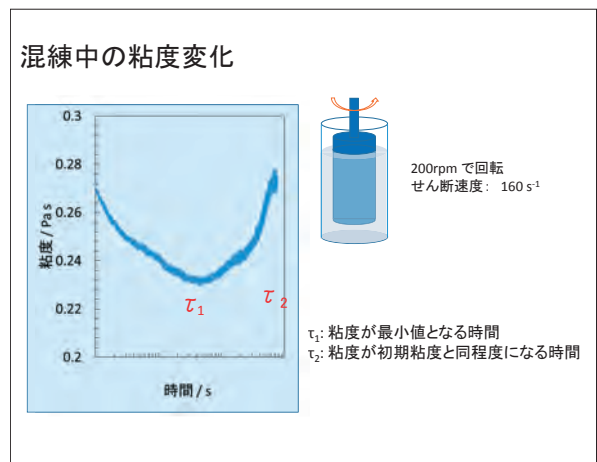
コロイドは、乾燥すると変化が生じます。例えば、ポリマーなどの粒子によっては乾燥すると表面に析出し、均一に考えることができません。大学で教えるコロイドと違い、実際はこのように複雑です。産業では、この部分が大事です。乾燥させたり、流したり、鋳型にはめたりする時に粘度が一定ではないのです。その結果、大きな変化が生じます。

その1つの例が、図表8です。最初、練っていくと、粘度が下がり、かき回す力が小さくなってきますが、あるところから急に粘度が上がってきます。もちろん、専門の方はこの現象を知っていますが、理由を知りません。粒子の材質や条件が変わると現象は変わります。そんなことは知らなくて良い、というのではいけません。

図表 7



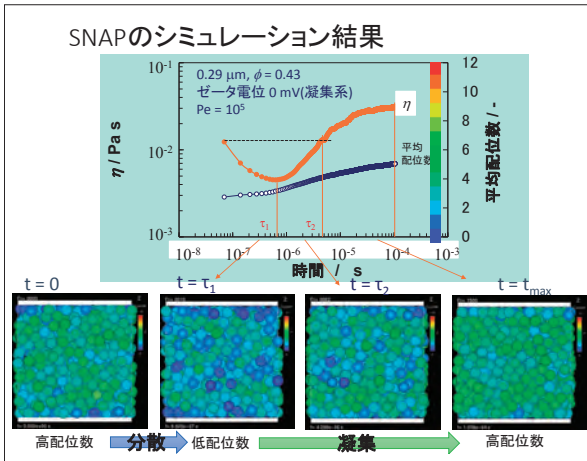
図表 8



上記の内容を踏まえ、我々のSNAPで計算する

と、図表9のようになります。数値シミュレーションでは、実験で分からなかったメカニズムが理解できます。

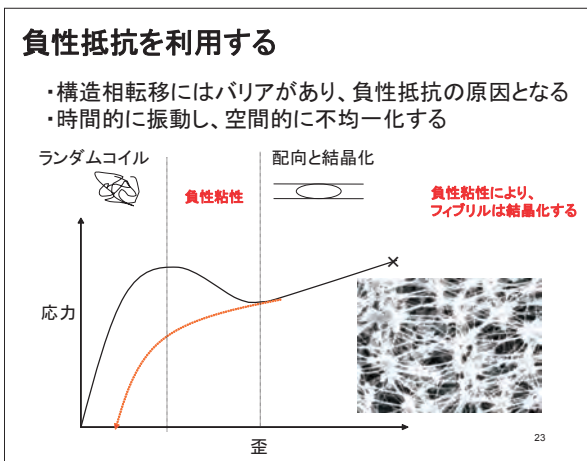
図表9



燃料電池には、ペースト（粘性の大きな材料）を塗らないといけません。ペーストは、塗布速度により粘度が変化します。しかも、乾燥プロセスでクラック（ひび割れ）が入るなど、欠陥対応が大変です。リチウムイオン電池でも、混ぜることは重要です。化粧品も、単に粉を混ぜているだけではありません。これらの関係の会社が、SNAP研究会に入っています。技術に終わりはないのです。飽くなき追求が必要です。技術と知を大事にすることが、イノベーションのための必要条件です。

さて、これからはナノコンポジット材料（複合材料）がますます重要になります。しかし、従来

図表10



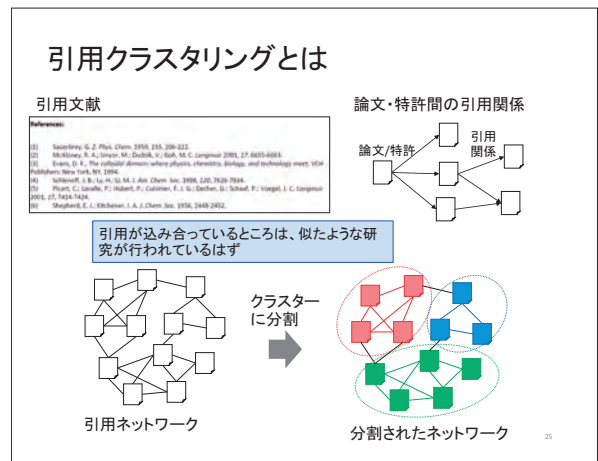
の常識を超えた振る舞いをします。例えば、図表10のような複雑な力学特性を示します。

最初（図表10の左側）は、物質の微細構造がランダムな状態です。しかし、最後（同右側）は結晶化します。この過程では、応力（物体が外力を受けたとき、それに応じて内部に現れる抵抗力）が小さくなる領域があります。ここでは、構造に転移が生じ、抵抗が小さくなり負性抵抗を示します。繊維のフィブリル（繊維を構成している微小な組織単位）は結晶状態ですが、アモルファス（結晶状態を持たない状態）と結晶が混在化した構造になります。

産業界は、この相転移（液体→固体のような状態変化）をうまく使って、イノベーションに結びつけます。例えば、ナノクレイは非常に面白い材料です。透明なフィルムで、至る所に穴が空いていて、水蒸気は通すが、水は通さないという性格のため、物質の分離膜にも利用可能です。

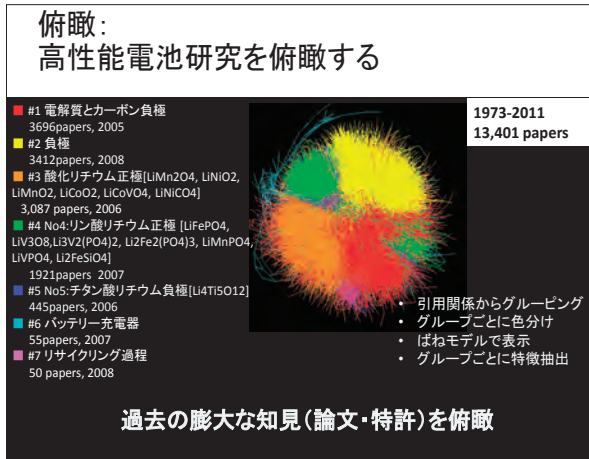
## 引用クラスタリング

図表11



さて、話題を変えて、考えるためのツールを紹介します。膨大な論文や特許を自動的に図表11のように、クラスタリング（データ分類、データをいくつかの集団に分けること）します。例えば論文がたくさんあったとします。それらについて引用関係を基にコンピュータでクラスタリングします。

図表12

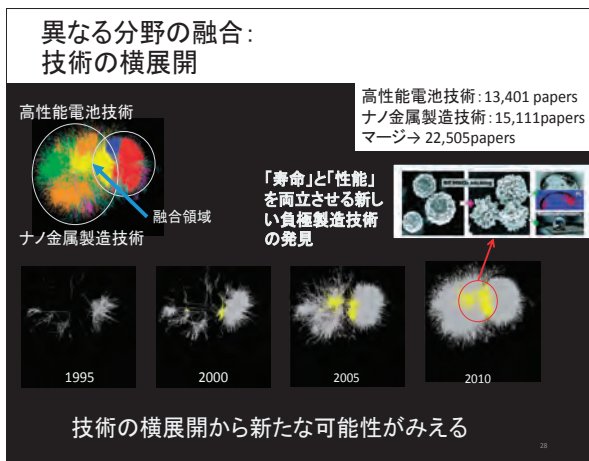


具体例を示します。1973年から2011年までの高性能電池、リチウムイオン電池、全部をWeb of Science（学術文献・引用索引データベースの1つ）で検索したら、約1万3,000件の論文が見つかりました。それを前述の方法でクラスタリングし、色分けしたのが図表12です。この図を見て、さらに詳しく考えていきます。

俯瞰するとは、全体を見ながら、部分を見て、自分が欲しいものの座標を知ることです。このクラスタリングを用いると、論文や特許の座標がわかります。膨大な論文や特許を読んで、それを分類することは、実際には誰もできません。それが、これを使うと一気にできます。

クラスタリングを時系列で見ると、図表13になります。高性能電池製造技術とナノ金属製造技術の2つの異なる分野の領域が、2010年になると合

図表13



体しているのがわかります。つまり、異なる分野が合体していくのです。これで、時代の流れが分かるわけです。

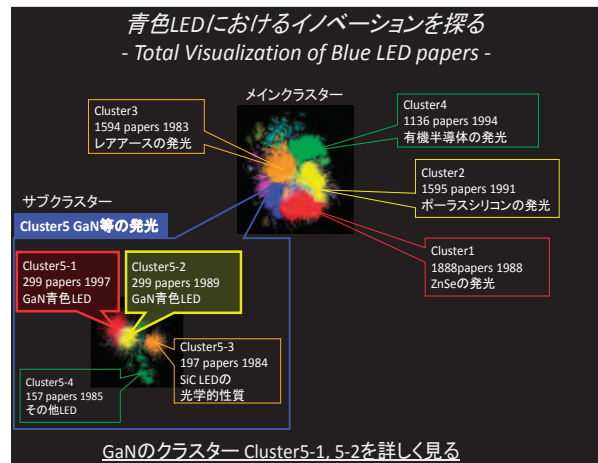
図表13では、リチウムイオン電池に用いられる材料が、かつての $\mu\text{m}$ レベルから $0.1\mu\text{m}$ レベルまで小さくなったため、生産技術の難易度が上がったことが反映しています。このことを考慮しないと失敗します。きちんと考えて論理構成するために必要なことや失敗例が、論文や特許の中に見えているわけです。

## 青色LED

青色LEDについて同様に見てみます。赤崎さんがガリウムナイトライドという素材に注目した時には、性能はまだ十分ではありませんでした。

ところが、中村修二さんという個性の強い方が、頑張っってプロセスのイノベーションを起こし、性能が飛躍的に向上したわけです。

図表14

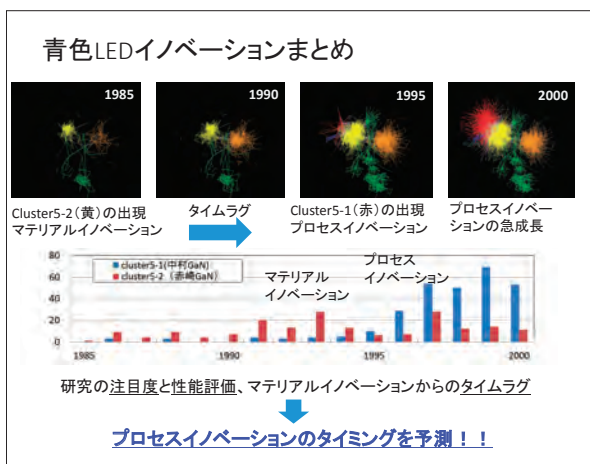


この間、多くの一流企業が取り組んでいるのですが、うまくいっていません。中村さんは実験に失敗したら、翌日どうするかを考え、夜装置を改良しました。このため試行回数が極めて多いのです。

気体をツーフロー（縦方向と横方向の2つの流れ）で流せば良いというのが、彼がたどり着いた結論です。従来、多くの人がやっていた流し方と

は違うことを考えたわけです。

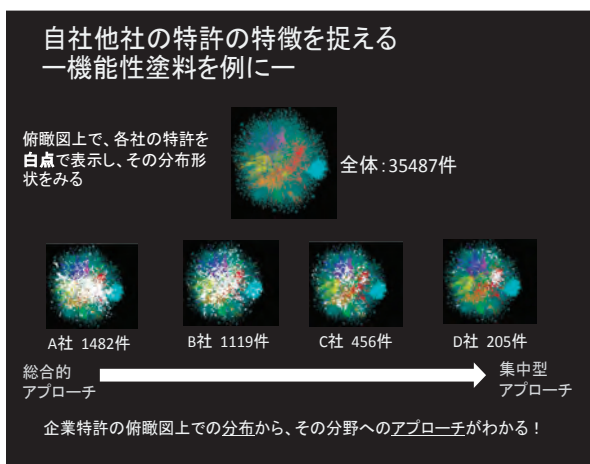
図表15



## 他社動向

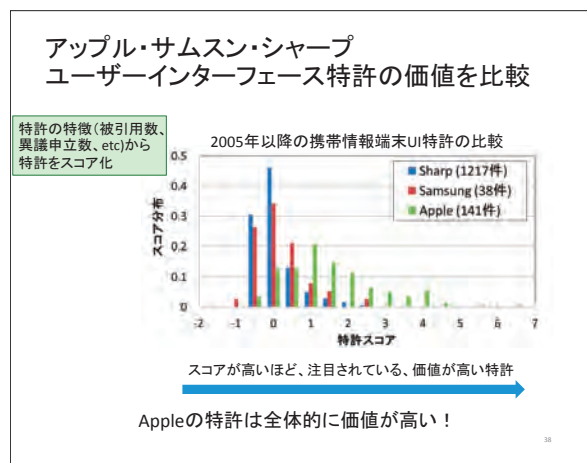
「自分の会社はこれが強み！」と、インサイドばかり見るのではなく、自分の会社の基幹技術を棚卸しする必要があります。他社動向を知り、極めて大事です。

図表16



図表16は特許の被引用数や、異議申し立てされた回数をベースに作成されたものです。それらの数値は特許の価値を示していますから。これを見ると、A社の特許件数が非常に多く、いろんなところに満遍なく全方位型であることや、各社がどの辺に重点化しているかがわかります。

図表17

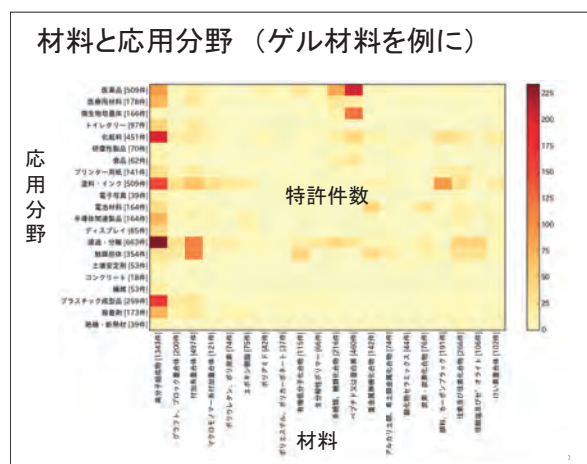


シャープ、サムスン、アップルを分析したのが、図表17です。シャープは特許件数が非常に多く、サムスンもシャープと似たようなグラフです。アップルは特許件数が少ないが、価値が高いものを持っています。ポイントは横軸の特許スコアです。大きい得点ほど価値が高いということです。

日本の特許総数は、2005年、2010年あたりから2割ほど減りました。良いことです。クズ特許をいっぱい抱えても良いことはありません。もう件数が、自慢になる時代ではないのです。

## 特許データを使った新規用途の探索

図表18

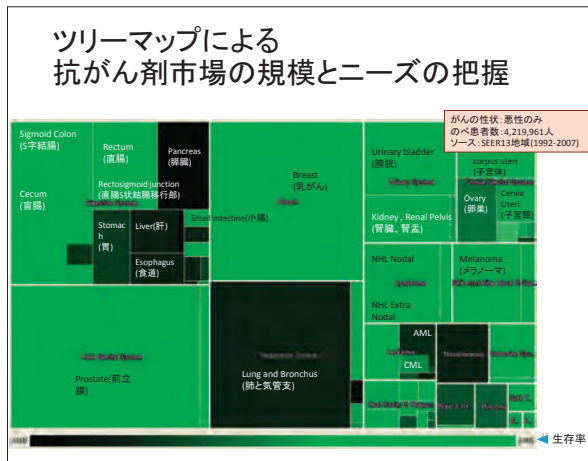


イノベーションにとって、特許分析はマストです。特許データを用いて、ゲル材料を例に材料と応用分野の組み合わせを調べたものが図表18です。



件数の多寡で色分けすると、どこが多いかが分かります。この図を見ながら、分布について考えてみるわけです。イノベーションは、現状をわかりやすく知ることから始まります。新規用途こそが、新しい商品開発のドライビングフォースです。

図表19



アメリカには、医療用の薬に関するマーケットの膨大なデータベースがあり、その中にはがん患者のデータもあります。図表19では、生存率を色で表しています。明るい緑だと生存率が高く、黒い色ほど悪くほとんど助からないことを示します。市場規模は広さで示しています。広くて色が濃いほどマーケットニーズが高くなっています。一目で、マーケットニーズを分類できます。

## データの活用

以上、まとめますと、論文、特許、新聞情報、雑誌、フリーの情報、有料の情報など情報が溢れていますが、大事なことは、情報を整理して、他の人とデータを共有して議論をすることです。「俺はこう思うから言うことを聞け。」では、駄目です。情報を共有化して、イノベーションの方向をしっかりと見極めて取り組むことで、新商品開発が成功します。

ものづくりにおいて一番大事なのは、実は化学反応と物質輸送です。これを反応拡散ともいいます。このせめぎ合い、つまり律速（反応の中で最

も遅いため、反応全体の速度を決定するもの）を知ることが極めて大切です。金属表面と何かが反応して、表面が活性化すると酸化物を作ります。これは、分子式できちんと書けなくて良いです。時間の経過による材料の変化が把握できれば、材料の設計ができます。こういうことの理解がないと、実験室でせっかく良いものできて、イノベーションどころではなくなり、トラブル対応で疲れます。

## 今後の動向

これからは、新しい素材や性能の商品設計は、マテリアルとプロセスの両方で制御することです。マテリアルで勝負しようという人は基本的に化学屋です。マクロから見ているのは基本的に物理屋ですが、その両方が必要です。

中村修二氏も、工学部の電気系の出身で化学屋的な発想ではありませんでした。彼の場合、ガスフローの方法をツーフローにすると青色LEDの性能が向上しました。そういう経験を踏まえて、研究してきました。このような化学分野を物理的手法で取り組んでいくやり方は、これからもますます重要になります。

研究所で、ある程度の性能のものが作れても、製造ラインに流した途端にしくじることがしばしばあります。不均一系の機能材料開発は、プロセスの理解が必須です。