生命に学ぶ，自律分散という思想

思考を変える，社会を変える，パラダイムを変える

森 欣司　東京工業大学大学院 情報理工学研究科 兼 イノベーションマネージメント研究科 教授
竹内 薫　科学ジャーナリスト

世の中には画期的な発明・発見でありながら，だれが最初に考えたのか，わからない物や仕組みがある。あまりに普及しすぎて，あたりまえの存在になってしまうからだ。おそらく「自律分散」もそのような普遍的な社会の仕組みの一つだろう。今回は自律分散の生みの親である森欣司さんをお招きして，このコンセプトが生まれた背景や，今後の日本に必要とされる戦略について伺う。

竹内 薫（たけうち かおる）
1960年東京都生まれ。東京大学教養学部卒業（科学史・科学哲学専攻），同大学理学部物理学科卒業。マギル大学大学院博士課程修了（高エネルギー物理学理論専攻）。理学博士（Ph.D）。
主な著書・訳書は，『知の創造』，『科学の終焉』（ジョン・ホーガン），『世界が変わる現代物理学』，『物質をめぐる冒険』，『99・9%は仮説』，『仮説力』など多数。
近著は，『天才の時間』。

「自律分散」コンセプト着想の原点

竹内　「自律分散」という言葉は，よく耳にするのですが，そもそも森先生が最初に提唱されたのですね。

森　コンセプトを提案したのは1977年のことでした。当時，私は日立の研究者で，後に大学で教鞭をとることになりましたが，現在に至るまで32年間，自律分散システムのコンセプトから技術，実用化に至るまで一貫した研究開発に携わってきました。

1970年代は，コンピュータシステムのビジネスへの活用が進展し，その規模も次第に拡大しつつあったころです。当時のコンピュータシステムと言うと，マスタとなる大型コンピュータがすべての中心となって他のコンピュータに指示を出す集中システムか，複数のコンピュータを階層的に結合させて上位コンピュータから順次下位のコンピュータへ指示を出す階層型システムが一般的でした。上位に位置して指示を出すコンピュータが必ず存在するというシステム構造ですね。これは，比較的小規模で変化が少なく，計画どおりに構築・運用できる対象であれば有効です。しかし，次第に，社会・経済の成長と変化が早くなり，システムの規模や機能を頻繁に変動させなければならなくなってきました。さらに，システムの規模拡大とともに社会・経済への影響も大きくなり，どのような状況においてもシステム全体の稼動を止めることができなくなってきました。システムの拡張・変更・追加や保守を，システムを止めずに行えること，そして部分的に障害が生じてもシステム全体を止めないことです。この要求を，オンライン拡張性，オンライン保守性，フォールトトレラント性の三つから成る「オンラインプロパティ」と呼びます。この要求を満たすことは，それ以前のコンピュータ技術では実現できなかった。そこで，根本的に考え方を変えなければならないと，「集

中」や「階層」の対極にある「自律分散」というコンセプトを考え出したわけです。

竹内　企業の基幹システムともなると，今では24時間365日動き続けるというのが当然のことになっていますが，30年以上前には斬新な考え方だったのですね。その着想の原点はどこにあったのですか。

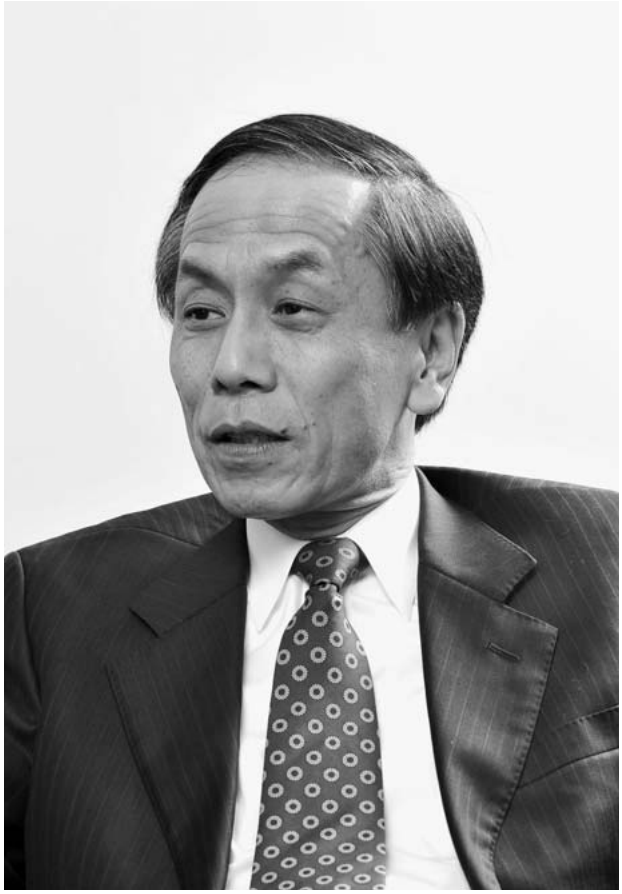
森　ちょうどそのころ，二つの大きなパラダイムシフトがありました。

一つは技術の分野でマイコンと光ファイバが世の中に登場したことです。私は，マイコンはいずれ「バケツ一杯いくら」になり，たくさん集めるとメインフレームに匹敵するようなコンピュータができるかもしれない。光ファイバも，将来は何を送ればよいかに困るぐらい通信容量が大きくなるであろうと，期待をもって受け止めました。そして，これらの技術を活用することで集中システムの欠点を解消でき，従来とは根本的に異なる新しいシステムのコンセプトが創造できるかもしれないと考えたのです。

もう一つ重要なのが，科学のパラダイムシフトでした。生物学において，分子生物学という新しい分野がそのころ台頭してきました。そして，それまでの常識を覆す研究成果が次々と発表されました。まず，クローン技術ですね。カエルの脚の細胞から，カエルの個体を作り出してしまった。これは，生体をマクロに見ると多種多様なコンポーネントから成る複雑な構造体に思えますが，実はミクロな細胞レベルで見ればすべての細胞は構造的に「均質」だということを示したわけです。当時としては社会的にもかなりの衝撃でした。

次に免疫システムです。生体には常にいろいろな細菌が侵入してきます。それらへの対処は，遺伝子情報に基づいて細胞レベルでなされていると解明されました。脳が司令塔として，細菌を検知し何らかの指示を出しているというわけではなく，個々の細胞が「局所」的な情報を使って対処しているというのです。

それから，進化に対する新たな考え方が示されました。利己的遺伝子という言葉が話題になったことはご記憶かと思いますが，個々の生体はあくまでも遺伝子の乗り物であって，遺伝子が生き永らえるよう活動し，結果として進化が起きているという説が唱えられました。進化は個体にとってより良い，より強い方向をめざしているとは必ずしも言えず，細胞レベル，遺伝子レベルでの「平等」な活動の結果として，副次的に発生していると。



森 欣司（もり きんじ）
1974年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。日立製作所システム開発研究所入社。1997年東京工業大学大学院情報理工学研究科教授。2005年東京工業大学のイノベーションマネージメント研究科（技術経営専門職大学院）設立に参画し，教授を兼務。
工学博士。IEEE Fellow。
中国西南交通大学顧問教授，中国同済大学顧問教授，パキスタン国立科学技術大学名誉教授など海外においても研究教育活動を推進。
自律分散システムのコンセプト提唱から，技術，実用化の研究開発を32年に渡り一貫して推進，1993年IEEE主催の自律分散システム国際会議ISADS（International Symposium on Autonomous Decentralized Systems）を設立し，現在も世界各国で開催。科学技術庁長官賞，市村産業賞本賞など受賞多数。

生命活動をコンピュータシステム上に再現

竹内　生命の営みとは，最初から全体のことを考えて行われているのではなく，局所的な活動の結果であるということが，さまざまな面から示されたわけですね。

森　私はそう理解しました。ここで言っているのは，あくまでも当時の私の理解による説明なので，現在の生物学の観点からすると不正確な部分もあるかもしれません。ただ，私から見たこのパラダイムシフトが，自律分散というアイデアを生み出す重要なきっかけになったのです。つまり，このような生物の特徴をアナロジー

(類比)としシステムへの三つの新たな知見,「構造的に均質」,「情報的に局所」,「機能的に平等」を導き取り入れたのが自律分散システムです。

竹内　自律分散システムは，生物とコンピュータシステムを結びつけたものということですか。生物学という，ITとは完全な異分野から知見を導かれたことに驚かされます。まさにパラダイムシフトだと思いますが，そのコンセプトについて詳しく教えていただけますか。

森　一つは,「異常が正常」ということです。集中システムでは，全体が完成して構造・情報・機能のすべてが完全に整った状態を正常とし，正常でなければ稼動しないことが基本です。しかし，生体は，すべての細胞が完璧な状態というわけではありません。「壊れながら直し」,「つくりながら壊す」という新陳代謝，成長が常に行われています。つまり，これまで「異常」としていた状態が生体においては常に存在し，むしろ「正常」と見なすことができます。自律分散は,これに基づく発想です。

もう一つは,「サブシステムを統合したものがシステム」ということです。構造的にも，機能的にも上位・下位の関係がある集中システムでは,「システムを分割したものがサブシステム」と位置づけていて，システムの目的・構造・機能などについての全体像を明確にしなければシステムを構築できません。生体では，前もって決められた全体像に向かって成長しているわけではありません。状況により，細胞が分裂して生体が形成されていくその時々,つまり,子供，大人でも生体というシステムです。これを基に着想し,サブシステムから出発して，それらの統合の結果がシステムであると考えるわけです。

竹内　自律分散システムは,「異常が正常」という逆転の発想から生まれたもので，アプローチは，いわゆるトップダウンからボトムアップへ変革したものですね。

森　あるいはこういう言い方もできるでしょう。物事の観点には絶対論と相対論がありますね。トップダウンで全体が明確にできると考えるのは絶対論的なシステム観，それに対して，明確にできるのは個だけであり，個から他を見るというのは相対論的なシステム観です。「個」としての平等なサブシステムが分散して存在し，それぞれが生体で言うところの細胞のように自律的に働き，全体としてシステムを構成している。それが自律分散システムなのです。

顧客とともに育てた技術

竹内　具体的な応用事例には，どのようなものがありますか。

森　例えば，鉄鋼メーカーの生産管理システムです。1980年代に入ると，アジア諸国の台頭によって国際競争が激化しました。鉄鋼メーカーは，品質向上とコストダウンを推し進めるために，毎日のように数千ステップも生産管理ソフトウェアを変更するというような努力をされていたのです。このような変更があると，集中システムでは稼動を止めなくてはならなかった。しかし，鉄鋼プラントでは，システムを止めると甚大な損害を被る。そこで，オンラインプロパティを持つ自律分散システムに期待を寄せてくださったわけです。

また,世界最大の情報制御システムであるJR東日本(東日本旅客鉄道株式会社)の首都圏の輸送管理システムATOS(Autonomous Decentralized Transport Operation Control System)はよく知られていますね。鉄道というのは社会インフラですから，そのシステムには絶対の信頼性が要求されます。安全性，定時運行，障害発生時の迅速な復旧に加え，線区をまたいだ列車の運行で乗り換えを減らすなど，乗客の利便性・快適性を向上する新たなサービスの拡充も求められるようになってきた。これらを同時に実現するためには，列車運行にか

かわる制御システムとダイヤや乗客案内などの情報システムとの連携，さらには，異なる線区どうしのシステムの連携を実現しなければなりません。システムが停止すると乗客への迷惑，社会・経済的な損失が甚大になり，たとえ機器の障害が発生したとしても列車運行を止めることは許されず，フォールトトレラント性が強く要求されます。また，システムの規模も大きく，列車運行を止めずにシステムを段階的に構築していかざるを得ない。つまり，オンライン拡張性・保守性も求められます。そこで，自律分散システムを採用してくださいました。実際，ATOSは，1993年から構築を開始して，現在も導入線区の拡大が続いています。全体の構築には，実に10年以上もかかっている。しかもこの間，システムの構築した部分から順次稼動させ，それらを止めることなく次第に拡大させていった。これだけ巨大なシステムは，自律分散システムでなければ難しいでしょう

竹内　応用分野として，ほかには何がありますか。

森　ファクトリーオートメーションや，公共施設・ビルなどの設備管理，衛星・ロボットなどの制御，また，情報サービスの分野にも及んでいます。最近の身近な例で言うと，Suica（スイカ）※がありますね。ラッシュアワーの時でも，通勤，通学客の流れを妨げないために，改札口でSuicaをかざしてから，料金計算やゲートの開閉制御を完了するまでの許される時間は200ミリ秒です。しかも，Suicaシステム全体の処理件数（トランザクション）は1日に2,000万件もあるのです。銀行のシステムに比べトランザクションははるかに多いけれども，ずっと短い時間で処理しなければならない。

竹内　それほどのトランザクションがあって，しかも短時間で処理しなければならないとなると，ホストコンピュータですべてを処理する集中システムではさばききれないですね。

森　しかも，トランザクションは2001年のサービス開始時より毎日のように増大している。この間，システムを止めることなく拡張している。このSuicaは，無線のICカードを利用しており，通信環境は必ずしも良くなくノイズが乗る可能性もある。まさに，先ほど言った「異常が正常」という考え方に沿って，システム設計，開発をしなければならない。

竹内　そういう新しい技術は，取り入れるほうにとってもチャレンジですね。

森　お客様は，技術を買うのでなく，みずからの事業への効果を買う。効果が明確で，技術に確信が持てればよいわけです。そのため，技術に対し入念に事前評価をする。評価が十分であっても，ご指摘のように，新しい技術を利用するのはチャレンジブルです。たとえチャレンジであっても，日本−世界をリードしている企業は，技術を育てようという気概を強くお持ちなのだと思います。新しい挑戦だけれど，やってみようと。私が大学に移った後も，お客様がご助言，ご支援してくださっています。

※　Suicaは，東日本旅客鉄道株式会社の登録商標である。

オープン化で世界にはばたく技術

竹内　これまで伺ったお話からすると，私たちが認識している以上に，自律分散システムは社会に浸透しているのですね。

森　大学でも自律分散に関連した講義はたくさんありますし，国際会議もある。私の著書は中国でも出版され，中国語でも自律分散と言います。

こうなった背景には，技術のオープン化という戦略があります。自律分散のコンセプトを考え出し，それに基づいて新しい技術の研究開発をしていた当時，私

は1週間に1件の特許を書いていました。世界中で約350件の特許を取得しています。たくさんの特許で技術を囲い込もうとしていたのですね。一方で，1980年代後半，技術をオープン化することでマーケットを拡大する標準化という考え方が出てきた。そこで，「自律分散を世界で標準化しよう」と決意して，国際標準化コンソーシアムや自律分散システムの国際会議を立ち上げたのです。今や，最初にだれが提案したのかもわからなくなっていますが，それでいい。もしあのまま特許で囲い込んでいたら，こうは普及していなかったでしょう。技術というのは，オープン化することで結果として大きく発展することがあります。そうやって，広く社会の役に立っていくことは研究者としてのいちばんの喜びですね。それがあるから，挫折しつつも研究を続けられるのだと思います。

竹内　企業研究者として，突出された成果を上げられたわけですね。

森　でも，自律分散のコンセプトを考え出した後でも失敗ばかりでしたよ（笑い）。提案した当時はコンピュータリソースも高く，分散型のシステムを実現できるような環境ではなかった。また，そもそも今までのコンセプトを覆すものでしたから，反対意見もたくさんいただきました。ただそれは，そのまま受け取れば反対意見かもしれませんが，私にとっては励ましや指導であり，時には次の方向性を示してくれる研究の駆動力でしたね。言葉は厳しくても，技術の成長を促すようなことを言ってくれる人がいるというのは，日立の懐の深いところなのだと思います。

今でも覚えているのは，国際会議を立ち上げようとしていた時に言われたことです。「日本はこれから，世界で尊敬（リスペクト）されることをめざすべきだ。自律分散システムは，世界共通の財産となる可能性があるのだから，特許をオープンにしたり国際会議をつくったりすることには大きな意義がある」と。その言葉には，とても勇気づけられましたね。

竹内　それはやはり企業風土なのでしょうね。大局的な視点で物事を見られる人材がいるという環境は，研究者にとっては何より大切だと思います。その後，大学教授となられてからはいかがですか。

森　そこでわかったのは，日本の学生は，技術に関してはすごく優秀なのですが，技術をビジネスにつなげる視点や知識が不足しているということです。日本の製造業が，技術はあっても国際的なビジネスで苦戦することがあるのはこうした問題があるのかもしれない。必要なのは，新しい技術を創造し，新しい製品を生み出し，新しい市場を創出し，社会を変えるイノベータだと気づいたのです。イノベータ育成を目的とするのが技術経営教育です。そこで，大学や省庁などに働きかけて，国立大学では初めてMOT（Management of Technology），すなわち技術経営の大学院を創設しました。

MOTで教えていてまた気づいたのは，「教学一体」ということです。さまざまな課題に対して学生が出してくる提案は，新しい発想や視点に満ちていて，むしろわれわれのほうが勉強になる。知識や経験があるから良い提案ができると思ったらとんでもない。教えるのも学ぶのも同じ，教師も自分の実績にあぐらをかいていてはいけない，常に世の中から新しいことを吸収していなければならないと強く思いました。イノベーションに終わりはなく，そのための勉強にも終わりはないのです。そう考えると，イノベータ育成には，生涯学習がふさわしいのですね。そこで，最近，NPO（Non-profit Organization）を立ち上げました。イノベーション創出をめざす技術経営に関して，社会に出てからでも，幾つであっても学ぶことができる。

竹内　日本全体のイノベーション創出を活性化していこ

うということですね。やはり考えていらっしゃることが壮大です。そのパワーの源泉はどこにあるのでしょうか。

森　私は，イノベーションがいかに大切で，また難しいかを身をもって経験してきました。インベーションを創出するには，コンセプトレベルからの革新も必要です。しかし，従来の思考や組織の下ではコンセプトを形にしていくことが難しい。そこで不可欠なのは，ストラテジー，つまり戦略です。ただやみくもに研究開発をしていれば良いということではないのです。日本には，優秀な人材とすばらしい技術がたくさんあるのに，それを伸ばさなければもったいない。日本がリスペクトされるためにも，コンセプトを創造すること，そして，ストラテジーをもって技術の研究開発をし，発信し続けることの大切さを伝えていきたいというのがモチベーションとなっていますね。

時代は「自律分散」へ

竹内　森先生は，生物学の知見をヒントに情報システムの新しいコンセプトを着想されたわけですが，近年では，生物に学ぶ，生命体に学ぶという発想が，社会のさまざまな分野でも見られるようになっています。目下，地球社会の課題となっている環境・エネルギー問題を克服するうえでも，生命体に学ぶことで，何か解決の糸口が見えてくるのではないかと思うのですが。

森　そうですね。生体というのは，できるだけ無駄なエネルギーを使わないような仕組みになっているはずですから，それはヒントになると思います。個々の細胞が独立しているのでなく，自律して連携を取り生体システム全体としてエネルギー効率を最適化していると考えてみるのはどうでしょうか。

日本は，個々の製品やコンポーネントの省エネルギー技術では世界をリードしています。しかし，地球環境問題の解決には，個別の環境・省エネルギー技術を発展させるだけでは難しいと思います。そのためには，コンセプトから考えて，システムとして最適化することを考えないといけない。低炭素社会のためには，20世紀とは異なるパラダイムへのシフトが必要です。その鍵となるのは，たとえば自律分散のコンセプトと，制御技術と情報の融合によるアプローチではないかと考えます。日本には，また日立のように，モノづくりという制御技術の強固な地盤があり，かつ高度な情報技術もあります。この制御と情報の両方において強みを持つ国や企業は，これからの時代だからこそ，真価を発揮できるはずです。

最後に，技術者や研究者は，多様な視点や異分野を知るということを大事にしてほしいですね。「競争の時代から協創の時代」へと研究開発活動のパラダイムもシフトしていく時にきているでしょう。専門分野の違いや，立場の違いを乗り越えて協創することが不可欠です。それぞれ平等な立場にある「部分」が，互いに連携しながら自律的に働き，「全体」として機能していく。この自律分散というコンセプトが，これからの個人・組織・社会のあり方にも生かせるのでないか。私は今，そのように考え，明日に大きく期待しています。

自律分散の発想が分子生物学のアイデアから生まれたとは知らなかった。いつも通勤に使っているSuicaの大元が「利己的な遺伝子」にあることを知っている人はほとんどいないだろう。そう言えば，ある生物を思い出した。南方熊楠が研究していた粘菌である。粘菌は「部分」が連携しながら自律的に動いて「全体」が生存に最適に機能する。複雑な迷路を解くことだってできる。森さんとの対談を終えて，私の目には，社会インフラとしての自律分散系が，生き物のように見えてきた。自律分散は，もしかしたら，自然界の基本原理なのかもしれない。