# センシング・ソリューションへの取り組み
# －1,000 万分の１の世界が拓く新領域－

株式会社 日立製作所　長野敬

## はじめに

機械産業における長年の課題であった、ひずみ量の継続的モニタリング技術を開発した。日立製作所（以下、日立と記す）はこの課題に取り組み、世界で初めて 1,000 万分の１のひずみ量を常時計測するセンシング技術の開発に成功した。これまで計測できなかった現象を計測できるようになることは、新たな知覚を得ることに等しい。現代社会は「Argos の目」[1)] を獲得した。計測対象は人体、精密機器、産業機器、プラント、交通機関を含む都市空間へと広がりつつある。センシング・ソリューションが解析や制御技術と連携することによって、新たな産業革新の萌芽が見られる。

## １．　IoT におけるセンシング

### 1.1　定義

本稿ではセンサーを物理的もしくは化学的、バイオ的な変位を検出し「電気信号」に置き換えるものと定義する。例えば温度変化という現象を計測する場合について考えてみる。アルコールが温度によって膨張するという特性を用いたアルコール温度計も広い意味ではセンサーと呼ぶこともできるが、直接的に電気信号に置き換えることができない。そのため本稿ではセンサーの範疇からは除外する。ここではデジタル処理・表示されるものを温度センサーと呼ぶことにする。すべてのものがインターネットにつながるという IoT（Internet of Things）では、電気信号に置き換えるという機能が前提条件となる。

一方、センシングはセンサーを用いて計測し、何らかの判別を行うことである。正確で高感度なセンサーがあれば、その後のセンシングのプロセスが容易になることは言うまでもない。

### 1.2　意義

IoT に類するコンセプトはこれまで幾度となく提唱されてきた。しかし、コンセプトが先行する傾向が強く、本格的な普及には到っていない。その最大の理由は、対象となる Things（これは森羅万象といってもよいような広範囲にわたるものである）の変位を継続的にセンシングする有効手段に欠けるためである。

すでに計測して得られたデータであったとしても、Internet につなぐことを前提としていない。その多くはアナログデータであり、サンプリングレートも異なる。それでは複数のセンサーから得られたデータを同期化することも難しい。また Internet につなぐためのセキュリティが保証されたデータでもない。Things はいまだに非構造化データの世界である。

Things の世界に生きる技術者（その多くは機械系技術者）にとっては、情報の閉じた系を扱う M2M（Machine to Machine）は比較的分かりやすいものであるが、Internet の世界には

なじみがない。一方、Internet の世界に生きる技術者（その多くは情報通信技術者）にとって Things の現場は未知の世界である。両者はそれぞれが断崖のように隔絶されている。この二つの断崖をつなぐブリッジのような仕組みがセンシングではないかと考える。

さまざまな対象物に目的に応じたセンサーを埋め込み、そのデータを Internet で処理する世界の実現が、IoT の概念を実現するために必要となる（図１）。

図１．IoT におけるセンシングの意義

### 1.3　センサーの種類

それではセンサーにはどういったものがあるのだろうか。大きくは測定する現象別に物理センサー、化学センサー、バイオセンサーに分かれる。画像センサーを独立して扱う場合もあるが、画像センサーは物理変化を点ではなく面で捉えるものであり、物理センサーの中に含めることができよう。画像センサーから得られるデータは多様で量的にも有益な情報をもたらす。

センシングの現場では、目的に応じて各種センサーを複合して用いることが多い。これをセンサーフュージョンと呼ぶ。例えば、画像センサーでセンシング対象全体を俯瞰的にセンシングしながら、局所的に目的に応じたセンサーを配置するなどの手法が取られる。

化学センサーはケミカルエレクトロニクス、バイオセンサーはバイオエレクトロニクスの進展により、今後の技術開発が期待される分野である。一方、物理センサーの多くはデジタル化され、それに伴ってコモデティー化が進展しているものが多い。その中でひずみ量の計測は、本格的なデジタル化から取り残された領域であった。機械産業や土木・建築分野において応力計測には強いニーズがあるにもかかわらず、継続使用に適するセンサーは存在しなかった。こ

のことが高性能のひずみセンサーを開発するに到った動機の一部を構成する。センサーは形状こそ小さいが、そこには計測のノウハウが凝縮されている。高性能のセンサーがあれば計測の簡便化が図れるとともに、計測の精度が一定レベルまでは確実に上がることが期待され、それに続く制御の負荷を軽減させることができる（図２）。

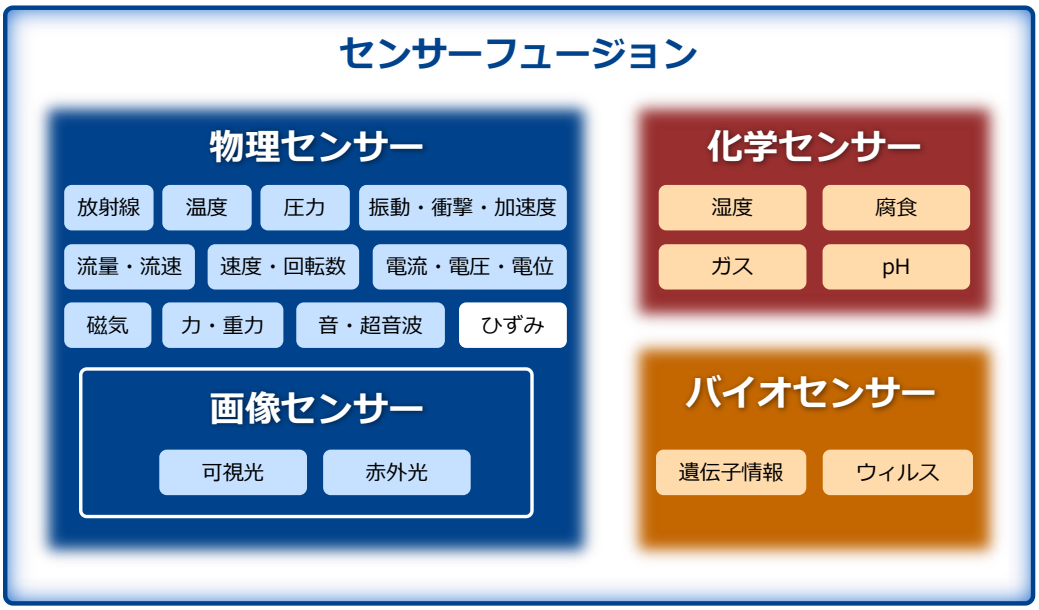



図２．センサーの分類

## ２．センサー開発の動向

### 2.1　３つの開発軸

センサー開発には感度を中心とした性能向上、コスト低減、耐環境特性の向上という３軸が必要とされる。情報通信で用いられる半導体では性能向上とコスト低減の両立が主要課題となるが、センサー開発ではさらに耐環境特性の向上という３軸目が求められることになる（図３）。この３つの開発軸に沿ってセンサー開発の現状を見ていくことにする。

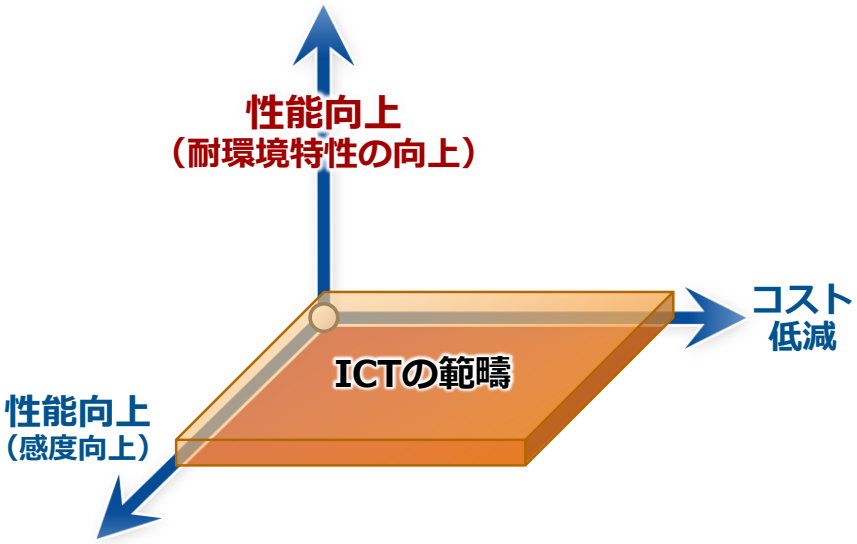



図３．センサー開発の方向軸

### 2.2　センサー開発

第一に、感度向上については、ヒトの能力の範囲内にとどまるものとヒトの能力を超えた領域にまで踏み込んだものがある。ヒトの能力の範囲内のものは、従来ヒトが行っていた業務を代替するに過ぎない。例えば、貯水量の監視などをヒトが四六時中行うことは現実的ではない。こういった行為はセンサーによるセンシングに置き換えるべきものである。それに対して、ヒトの能力を超えたセンシングは、これまでになかったブレイクスルー製品やそれに伴う画期的な事業を生み出す可能性を秘めている。

一般的に性能が３桁異なると、これまで見られなかった性状が発現するといわれている。移動速度で考えてみたい。ヒトが歩く速度を $10^3$ 倍すると音速を超える世界となる。雪の結晶観察ではどうか。$10^3$ 倍、$10^6$ 倍の倍率で見れば、そこには肉眼で見ることのできなかった異次元の世界が広がっている。センサー開発の一つの方向性は、こうしたブレイクスルー的な技術進化の源泉となることである（図４）。

図４．センサー開発における感度向上

第二に、センサー開発では性能向上とともに熾烈なコスト低減競争に直面することになる。デジタル化されたセンサーは、市場寡占といった特殊な要因がない限り、市場原理によって価格下落する。「ムーアの法則」[2)]の代表事例のような DRAM（Dynamic Random Access Memory）では、性能当たりの価格は時間とともに漸減していくものの、半導体製品の世代交代により製品単価はほぼ元の振り出し状態に戻る。

しかし、市場規模が小さく、技術革新を伴った世代交代の動機が生まれにくいセンサー市場では、多くの場合、製品価格は長期的に下降曲線をたどるだけである。そのため、センサーを開発するベンダーにとって周回遅れでの市場参入はほぼ絶望的となる（ただし、ユーザーの側から見れば、製品価格が下がること自体は望ましい現象である）。

第三は耐環境特性の向上である。センサーが一般的な半導体と異なるのは、その適用環境の苛酷さにある。重電用などを除いた一般的な半導体の多くは、主としてエレクトロニクス機器に搭載されるものである。室内環境で用いられる場合は比較的限られた範囲の温度や湿度での使用を前提としている。それに対して、センサーは室内環境にとどまらず工場内や屋外で用いられることが多い（図５）。

図５．苛酷環境下でのセンサー適用

工場などの産業用機器で用いられる場合は高温、高湿に加え、油分、粉塵、振動、気流などの影響下でも正確に動作することが求められる。さらに屋外使用では、泥水、結露、硫黄分、紫外線などへの対応が求められることもある。場合によっては放射線にさらされることもある（もしくは、放射線そのものを計測することが求められる）。ここに挙げた環境はその一例にすぎない。センサー開発では多様な環境に対するより高い耐久性が求められる。そのためセンサー開発に当たっては、使用環境や使用方法に関するノウハウの蓄積が必要となる。この点から言っても、後発での市場参入は難しい分野といえる（図６）。

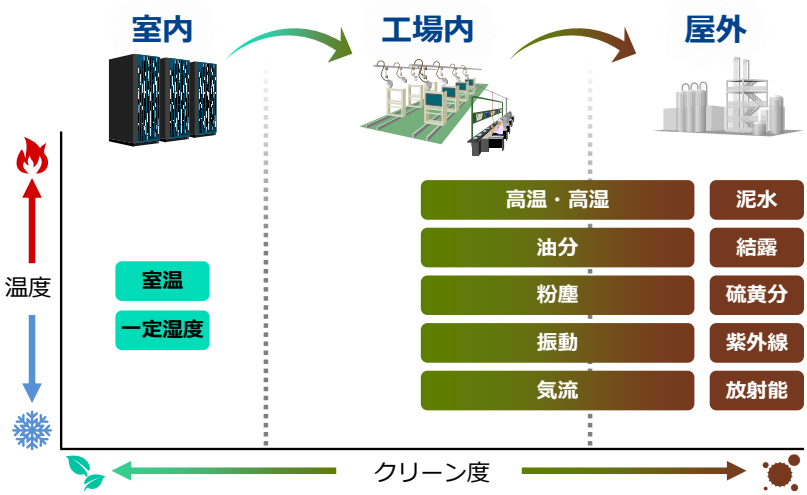



図６．センサー開発における耐環境特性の向上

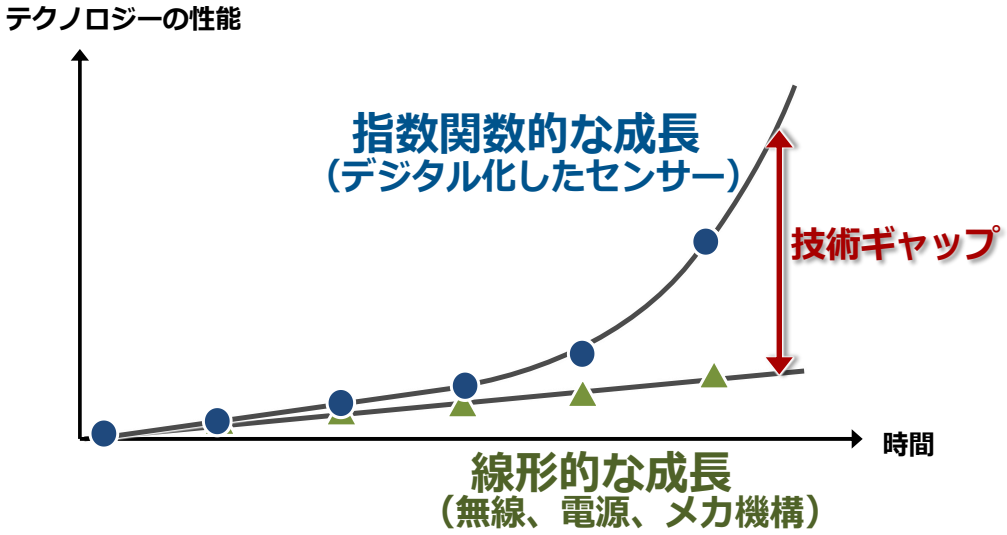
この章ではセンサー開発の課題について見てきたが、次にそういったセンサーを用いたセンシング技術開発の課題について見ていきたい。

## ３．　センシング技術開発の課題

### 3.1　先端開発の重要性増大

2022 年には年間１兆個ものセンサーが生産され、世界中で使われるようになるとの推察がある。このビジョンは１兆個という数値から「トリリオン・センサー」とも呼ばれる。[3] 今後、私達の身の回りの到るところにセンサーが埋め込まれ、さまざまな使い方がなされるのは間違いないだろう。しかし、そこに到るには、乗り越えるべき大きな課題がある。

デジタル化されたセンサーは性能面において、指数関数的な成長を遂げることができる。だが、ここで留意すべきことがある。センサーの性能向上にのみ脚光が当てられているが、センサー周辺の無線や電源、メカ機構といった技術は線形的な成長しか成しえない。IoT におけるセンシングは、センサーおよび上記のような周辺技術との構成によって成立するものである（ただし、M2M のような使用形態ではセンサー単独での性能向上の議論が適用可能である）。現状のままでは、指数関数的な成長を遂げる可能性を持つセンサーと周辺技術との技術ギャップが拡大する（図７）。




資料：Kurzweil[2005], *The Singularity is Near* により筆者作成

図７．センサーおよび周辺技術との技術ギャップ増大

現在のセンサーに「考える機能」はない。大量のデータを吐き出すだけである。通信トラフィック増大するに対して、その通信料金やクラウドの課金に見合うアプリケーションは基幹システムや重要保安部品に限られる。

この技術ギャップを解消するためには、センサーにインテリジェンスを持たせることが求められる。必要最小限の処理はセンサー部分で行い、その結果情報だけをクラウドなどのネットワーク環境に上げる。もしくは自己完結的に処理をする。そうして周辺技術やシステム系への

負荷を軽くすることが必要である。近い将来、近距離無線技術とマイコンの処理性能が発展していけば、インテリジェント・センサー間でのネットワーク構築も視野に入れるべきである（図８）。

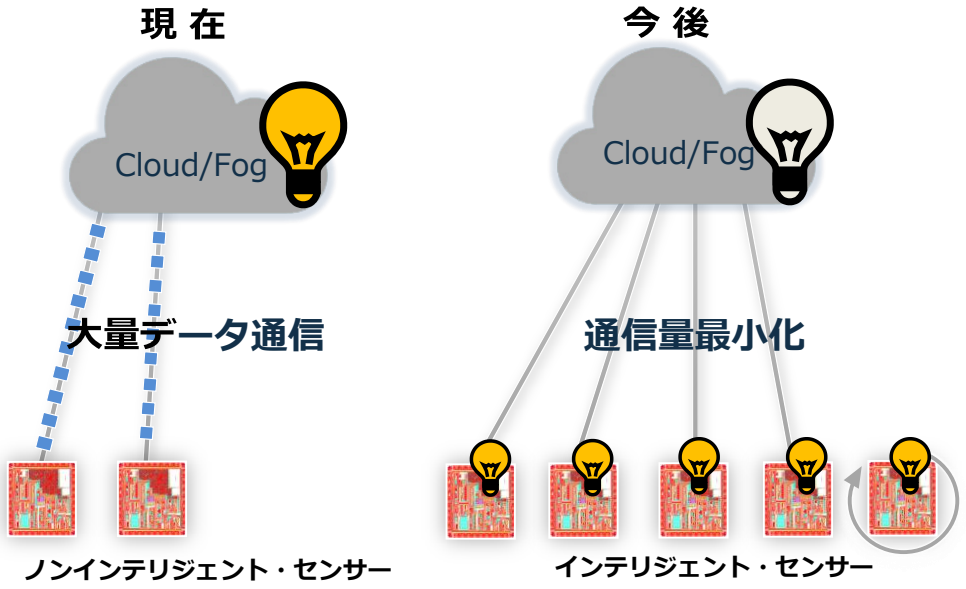
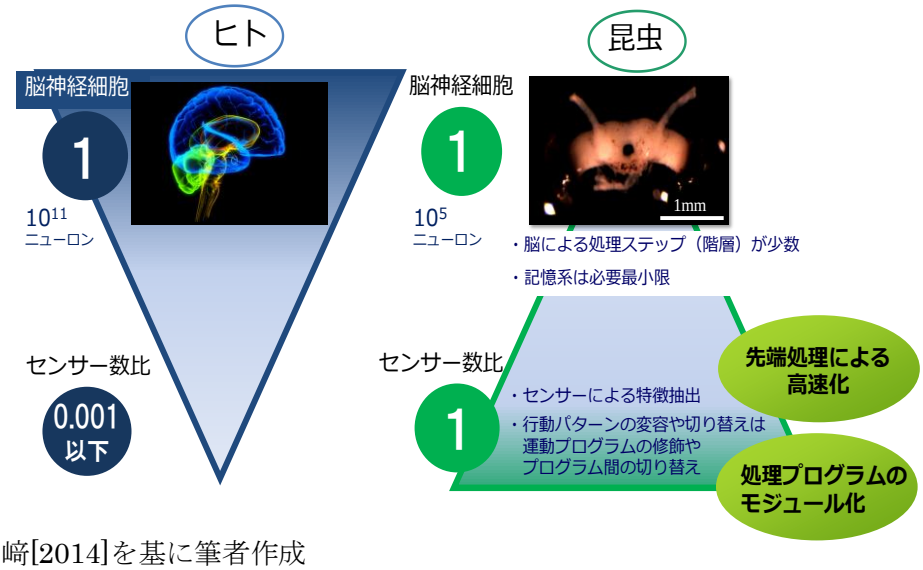



図８．インテリジェント・センサーの必要性

東京大学大学院の神崎研究室が進めている昆虫の感覚器官に着目した研究は、センサー開発を進める者にとっても非常に興味深いものである。同研究室は昆虫の器官を分析し、その働きを人工的なセンサーに置き換えることに取り組んでいる。「ヒトには $10^{11}$ のニューロン脳神経細胞があるが、その数を１とすると触覚に当たる細胞は 0.001 以下である。それに対して昆虫の脳神経細胞数は $10^{5}$ ニューロンであるが、それとほぼ同数の触覚細胞がある」とされる。これまでの処理が大脳で集中処理する「ヒト型」とすれば、新たに必要とされる処理は触覚で処理される「昆虫型」ではないだろうか。

昆虫がヒトより素早い動きができるのはどうしてか。それについては「昆虫の脳では処理ステップ（階層）が少数であり、記憶系は必要最小限になっている」ということである。一方、感覚器官では「センサーによる特徴抽出が行われる」とともに「行動パターンの変容や切り替えは、運動プログラムの修飾やプログラム間の切り替えによって行われる」。これは先端処理による高速化とデータ処理プロセスをモジュール化することの重要性を示唆している（図９）。

大量のノードからの情報を処理するシステム、例えば交通トラフィックの制御のようなものは「ヒト型」処理を必要とするだろう。しかし、ミリ秒単位の時間短縮が求められるクルマの衝突検知のようなシステムでは「昆虫型」の処理が求められる。今後、IoT におけるセンシング、解析、制御は「ヒト型」と「昆虫型」に二極化していくものと思われる。




資料：神﨑[2014]を基に筆者作成

図８.「ヒト型」処理と「昆虫型」処理

### 3.2　ソリューション環境の整備

第１章では Things と Internet 間の断絶を見てきたが、両者の乖離を埋めるためには、電子データ化、インフォメーション、インテリジェンス、ナレッジ、さらにはナレッジの結合という段階を踏むことが必要と思われる（図 10）。センサーから出される電子データだけで構成される情報通信のソリューションは限定的なものであり、ソリューションを組むことができる幅広く高度な知見を有するベンダー（もしくはユーザー）も限られる。

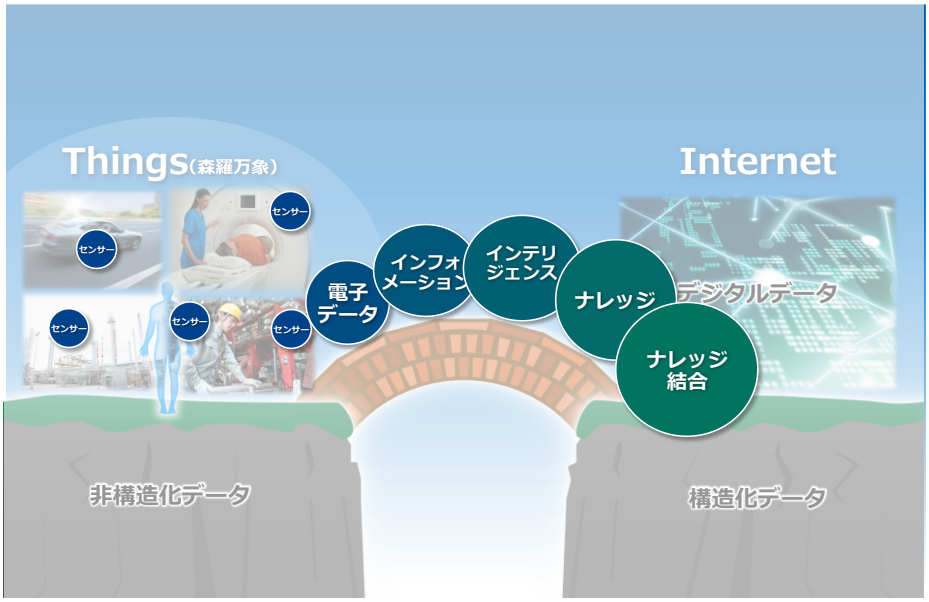



図 10.　ナレッジ結合に向けて

センサーから得られた生のデータを情報通信ソリューションとして活用するには大きな飛躍がある。情報通信の処理で言えば、０と１で構成されたデジタルデータと、金融系ネットワ

ークのような差異がある。そのため、センシングのデータ処理を表２に示すような７階層に分けて議論したい。ここでは機械分野でのセンシングを対象とする。

第１階層では電子データ化を行う。ひずみセンサーによって得られたひずみ量や、加速度センサーによって得られる加速度などの生データである。これだけでは十分な意味を持たない。第２階層はインフォメーション化である。第１階層の電子データに対して、計測対象物の形状や材料に対する知見が加われば応力が分かる。第１階層の電子データにはさまざまなノイズも乗っているため不要なデータを除去しなければならない。電子データのフィルタリングである。センサーから上がってくるデータをすべて利用する必要もない。必要に応じたデータのサンプリングも必要となる。第３階層はインテリジェンス化である。第２階のインフォメーションを機械工学のレインフロー法などを用いて累積損傷や限界値を出すなど、より目的に近い解析が加わる。ここまでは純粋に機械工学の領域である。第１階層から第３階層は、第３章に記したインテリジェント・センサーとして集約することができる。それにより機器の開発やメンテナンスに携わる機械系技術者は第３階層の情報を取得し本来業務に専念できることになる

そして第４階層では機器の故障予兆などを行う。ここでは対象となる機器の構造に対する知識が必要となる。ナレッジ化の段階である。機器のどの箇所が壊れやすいのか。どれだけの累積損傷が加わればその箇所が破損するのか。そういった判断は対象となる機器を設計した技術者かメンテナンスに関わる技術者でなければ分からない。そのナレッジを必要とする。

第５階層はナレッジの蓄積・検索である。さまざまな機器がある。さまざまな技術領域がある。それらに対するナレッジは独立して存在する。それらのナレッジを蓄積し検索できるようにできれば活用の範囲は飛躍的に広がる。例えば、現在はＡ社製工作機械のためのソフトウェアをユーザーX 社からの依頼で作成したとする。このソフトウェアは同じ工作機械を使っている別のユーザーY 社や Z 社でも必要となるかもしれない。また回転機構に関する知見は、風力発電機やタービンといった異なる製品群でも共有できるかもしれない。分野は異なるが Google や電子書籍 Kindle などで見られるように、利用者が付加する知見もナレッジの峻別や共有に役立つであろう。[4] こうして得られたナレッジを組み合わせることで、より高次の叡智が生まれる。連続的な技術進化は情報の組み合わせによって生まれるからである。それが第６階層のナレッジ結合である。異なる分野のナレッジが組み合わされることによって生まれる技術進化に期待したい。

最後の第７階層は情報通信分野などでのビジネス化である。情報通信技術者にとっては、第５階層もしくは第６階層までのナレッジが整ってはじめて、その知見を生かすことができる。それによって新たなサービス事業などが生まれる。

また、こうした情報体系には、これまでなかったヘテロな情報（ここではひずみ量）が加わることが突然変異的な技術進化を生む可能性がある。加速度を中心に構成されていた技術体系に、ひずみ量という新たな計測データが加わることは、その体系全体の再構成と不連続な進化をもたらす（図 11）。

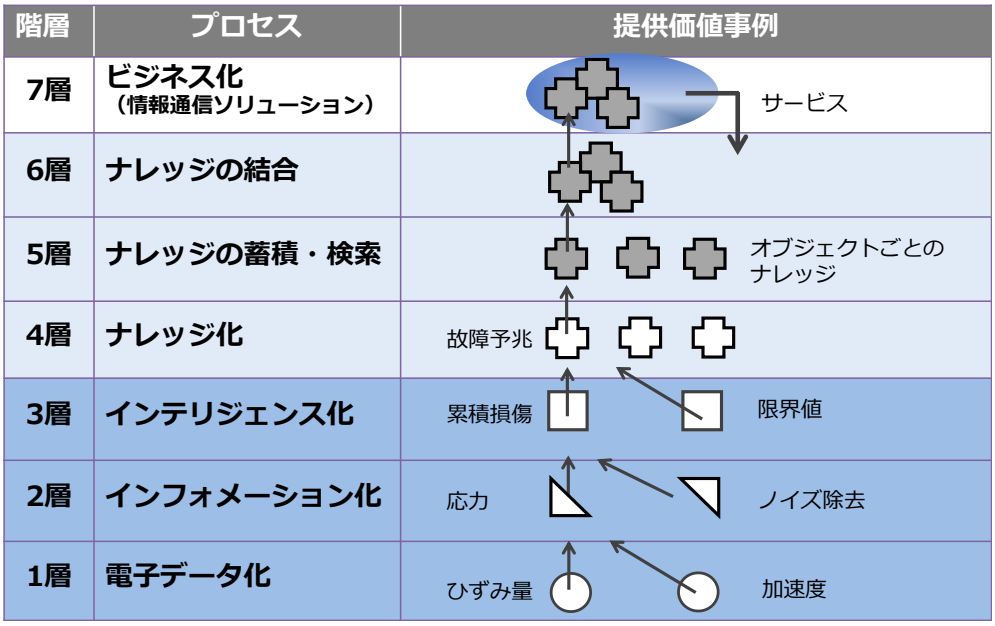



図 11. センシングの 7 階層

これまで情報工学、情報経済学、情報社会学の各領域で情報について論じられてきたが、その定義はさまざまである。本稿で定義したセンシングの 7 階層に依拠すれば、第 1 階層の情報の定義としては Wiener[1961]、加藤[1972]、野口[1974]が該当する。第 2 階層としては McDonough[1963]、第 3 階層としては Shannon[1967]が、第 4 階層としては Marshak[1974]の情報論が代表的なものと言える。

IoT におけるセンシングにおいても、論点を明確にするために情報の細分化、定義、そして体系化が必要と考える。

## ４．　ひずみセンサーの開発

### 4.1　従来技術

ひずみ量を計測する手段として実用化されているものには、抵抗式のひずみゲージと光ファイバーセンサーがある。抵抗式ひずみゲージは 1930 年代に米国で発明され、現在まで基本的には同じ構造のものが使い続けられている。有機物のフィルムを介して計測対象に接着剤接合する。計測対象物の伸縮によって抵抗式ひずみゲージも伸び縮みし、電気抵抗が変化する。この変化を外付けアンプで増幅するというものである。

しかし、その構造から「温度依存性が大きく、計測値の信頼性に欠ける」（電力会社）、「感度が低く外乱ノイズに弱い」（カーメーカー）、「外付けアンプが必要となるため装置が大掛かりとなる」（機械メーカー）、「消費電力が大きく機器組み込みが困難」（エレクトロニクスメーカー）、「接着剤接合によりフィルム部分が経時劣化する」（ゼネコン）などの意見が出されている。実験計測には適しているが、機械製品、エレクトロニクス機器、インフラ構造物での長期的モニタリングには適さない（表 1）。

表１．ひずみセンサー導入に対するニーズ

| 導入効果・目的 | 製鉄 | 自動車 | 建設機械 | 工作機械ロボット | ベアリング | 航空宇宙 | 自転車 | 医療機器 | ゼネコン |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高精度な制御が可能になる<br>・製造プロセスの改善による高付加価値製品の創出<br>・燃費の改善、消費電力の改善<br>・スムーズな操作性実現 | ◎ | ◎ | ○ | ◎ | | ◎ | ◎ | | |
| 設計マージンが小さくできる<br>・機器本体が小さく軽く安価に | | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ | ○ | | ○ |
| 新たな入力インタフェースの開発<br>・指などの繊細な動きの再現・感知 | | | | ◎ | | | | ◎ | |
| センシングできなかったデータの取得<br>・大きな故障・事故が発生する前に修理 ・保全<br>・人命を救える可能性の拡大 | ◎ | ○ | ○ | ○ | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ |
| 機器レベリング<br>・熟練エンジニアでなくてもメンテナンスが可能<br>特に海外進出先におけるリモート保守 | | | | ○ | | | | | ○ |

注：◎最重視、○重視

資料：日立ヒアリング調査（2009 年 12 月－2010 年 3 月）

光ファイバーセンサーは光源から出た光が、計測ポイントの外部環境に応じて変化する特性を利用したものである。ひずみ量などの物理センサーとしても、ガス検知などの化学センサーとしても用いることができる。この方式では多数の計測ポイントを設けることができ、インフラ構造物の計測に適しているが、機器組み込みには適さない。

その他、静電容量型 MEMS センサー、共振型 MEMS センサー、SAW（Surface Acoustic Wave）センサーが発表されているが、本格的な実用化には到っていない。

### 4.2　高性能半導体の開発

従来技術に対する課題から、本開発ではワンチップによる製品組み込み、ひずみゲージの数万倍の感度、常時計測への対応を開発目標とした。エレメント部分に用いている原理は、ピエゾ抵抗効果である。この原理は 1856 年に英国のケルヴィン卿よって発見された。金属素子に機械的な負荷を掛けると電気抵抗が変わるという現象である。20 世紀後半になって半導体が発明されると、この効果に対する注目が集まることとなった。

単結晶シリコンで構成されている半導体に外部から応力が加わると、その結晶格子にひずみが生じ原子間の距離が変化する。それにより半導体のキャリア（電子またはホール）の数や移動度が変化し、電気抵抗が変わるという現象である。原子レベルでのひずみ量を計測のベースとしているため、センシングの感度が向上するのは言うまでもない（図 12）。

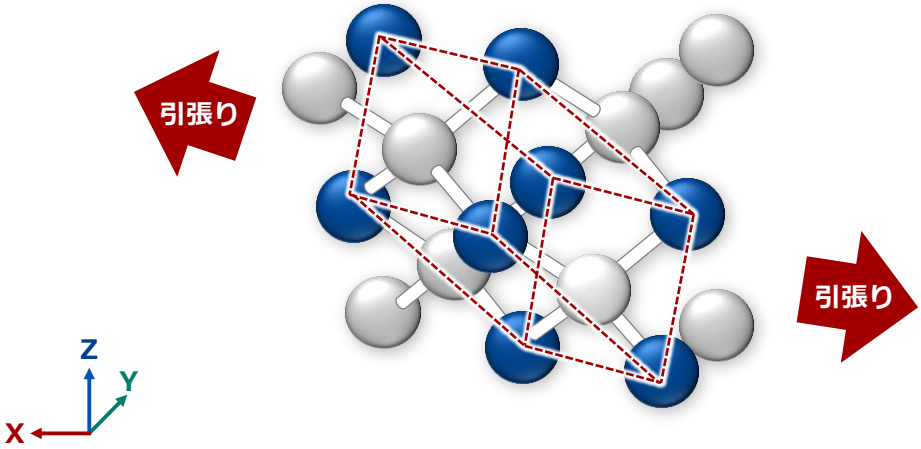
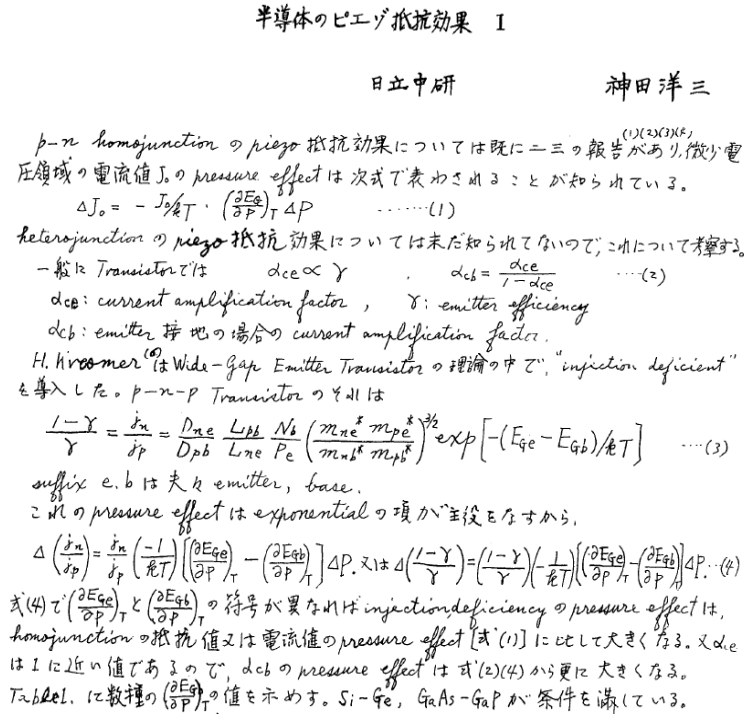



図 12.　ピエゾ抵抗効果の原理

日立におけるピエゾ抵抗効果の研究は、中央研究所での研究に始まる。神田洋三主任研究員（当時）によって 1960 年頃に研究着手され、1964 年には「半導体のピエゾ抵抗効果　I」が日本物理学会で発表されている（図 13）。



半導体のピエゾ抵抗効果 I

日立中研　　神田洋三

p-n homojunction の piezo 抵抗効果については既に二三の報告[(1)(2)(3)(4)]があり、微少電圧領域の電流値 $J_0$ の pressure effect は次式で表わされることが知られている。

$$\Delta J_0 = -\frac{J_0}{kT}\cdot\left(\frac{\partial E_G}{\partial P}\right)_T \Delta P \quad \cdots\cdots(1)$$

heterojunction の piezo 抵抗効果については未だ知られてないので、これについて考察する。

一般に Transistor では　$\alpha_{ce} \propto \gamma$　,　$\alpha_{cb} = \frac{\alpha_{ce}}{1-\alpha_{ce}}$　$\cdots(2)$

$\alpha_{ce}$: current amplification factor ,　$\gamma$: emitter efficiency

$\alpha_{cb}$: emitter 接地の場合の current amplification factor.

H. Kroemer[(6)] は Wide-Gap Emitter Transistor の理論の中で、"injection deficient" を導入した。p-n-p Transistor のそれは

$$\frac{1-\gamma}{\gamma} = \frac{j_n}{j_p} = \frac{D_{ne}}{D_{pb}}\frac{L_{pb}}{L_{ne}}\frac{N_b}{P_e}\left(\frac{m_{ne}^* m_{pe}^*}{m_{nb}^* m_{pb}^*}\right)^{3/2} \exp\left[-(E_{Ge}-E_{Gb})/kT\right] \quad \cdots(3)$$

suffix e, b は夫々 emitter, base.

これの pressure effect は exponential の項が主役をなすから、

$$\Delta\left(\frac{j_n}{j_p}\right) = \frac{j_n}{j_p}\left(\frac{-1}{kT}\right)\left[\left(\frac{\partial E_{Ge}}{\partial P}\right)_T - \left(\frac{\partial E_{Gb}}{\partial P}\right)_T\right]\Delta P. \text{ 又は } \Delta\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right) = \left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)\left(-\frac{1}{kT}\right)\left[\left(\frac{\partial E_{Ge}}{\partial P}\right)_T - \left(\frac{\partial E_{Gb}}{\partial P}\right)_T\right]\Delta P. \cdots(4)$$

式(4)で $\left(\frac{\partial E_{Ge}}{\partial P}\right)_T$ と $\left(\frac{\partial E_{Gb}}{\partial P}\right)_T$ の符号が異なれば injection deficiency の pressure effect は、homojunction の抵抗値又は電流値の pressure effect [式(1)] に比して大きくなる。又 $\alpha_{ce}$ は 1 に近い値であるので、$\alpha_{cb}$ の pressure effect は式(2)(4)から更に大きくなる。

Table I. に数種の $\left(\frac{\partial E_G}{\partial P}\right)_T$ の値を示めす。Si-Ge, GaAs-GaP が条件を満足している。

資料：日本物理学会発表原稿（部分・1964 年）

図 13. 日立におけるピエゾ抵抗効果研究の黎明期

時代を経て３次元微細構造を実現する MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技術との融合が進み、1986 年に中央研究所が「シリコンのマイクロメカニクス応用」を精密工学会で発表した。ピエゾ抵抗効果を汎用的センサーとして用いる研究は、機械研究所（現在の日立研究所）で 2003 年に研究着手され、2009 年に本社新事業開発本部が事業化に着手した。2010 年には第１世代半導体、2011 年に第２世代半導体が開発された。第３世代半導体は 2013 年に開発され、同年に量産化を開始している。第３世代半導体では、感度では一般的な抵抗式ひずみゲージの 25,000 倍[5)]、消費電力は 1,000 分の１となり、当初の開発目標を達成した。それに続く第４世代半導体は 2016 年に完成している。

感度の向上とともにノイズ低減が重要となる。いくら感度に優れていてもノイズ量が大きいとその誤差に埋もれてしまうからである。一般的に性能を追加していくとノイズ量は増加する。本開発でも同様の課題に直面した。第３世代半導体ではデータ補正回路を本格的に追加、それに続く第４世代半導体ではフォールスセーフ機能や電流のサージ機能を追加する一方で、ノイズ量を低減させることに成功している。第１世代半導体では±1.0 マイクロストレイン（100 万分の１のひずみ量）であったノイズ量が、第３世代半導体では±0.5 マイクロストレインに、第４世代半導体では±0.1 マイクロストレインに減少した。これにより、1,000 万分の１のひずみ量を計測することが可能となった（図 14）。

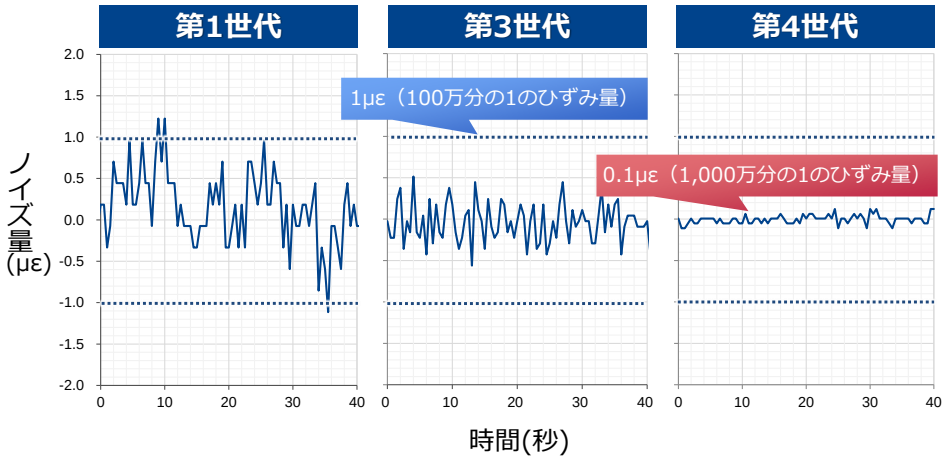
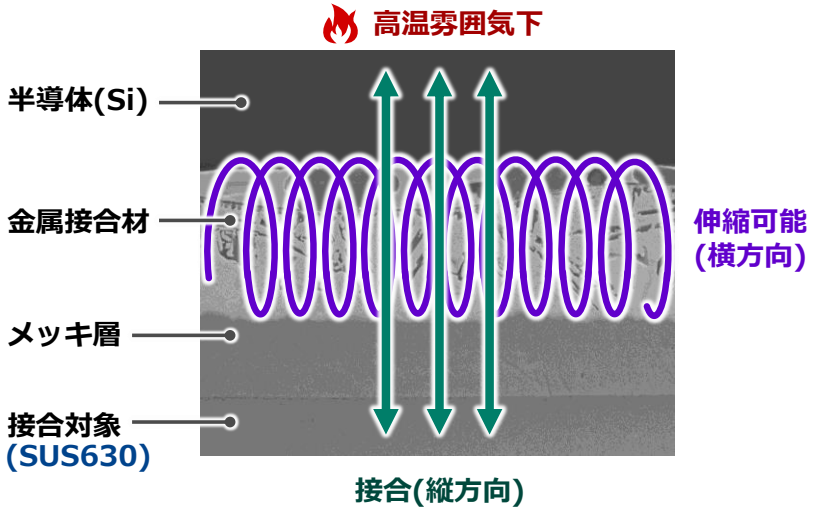



図 14. ひずみセンサーの進化

### 4.3 耐高温金属接合技術の開発

高性能半導体の開発とともに重要となるのが、耐高温金属接合技術の開発であった。半導体の感度向上とともに、計測対象のわずかなひずみ量を正確に半導体に伝える必要が生じる。通常のセンサーであれば半導体の計測対象の垂直方向の接合が確実に接合されればよいが、伸縮量やせん断を計測することを目的とするひずみセンサーでは、高温や低温雰囲気下にあっても水平方向の伸縮に柔軟に追従することが求められる。硬過ぎれば全体を引き伸ばした際に接合部分にクラックが生じる。一方、柔らかければ伸ばした際に元の状態に戻らないというクリープが生じる（図 15）。




資料：電子顕微鏡断層撮影写真に説明部分を筆者加筆

図 15. 耐高温金属接合技術

この金属接合材の開発には２年半を要した。目標とする性能は 125℃雰囲気下で連続 8,000 時間に及ぶ耐久性の確立である。上記条件下で半導体を金属接合した計測対象物を、半導体の破壊限界で牽引し続ける。金属接合したひずみセンサーの出力が 1%低下すればそれが限界時間と考える。

2010 年の金属接合技術の開発着手時には、日立が当時保有していた金属接合技術を活用することにした。適用対象とした技術は、水冷式汎用大型コンピューターのために開発された金属接合技術であった。[6] 当時、この用途としては最も耐久性があると考えられた接合技術をもってしても、上記条件での限界時間は 30 分であった。そこからは接合層の厚みの変更、ボイド低減接合プロセスの開発、金属接合材料の変更、接合プロセスの変更などにより、2012 年度末にようやく開発目標を達成することができた。その後も接合材料の検討を重ね、さらに耐久性のある接合材料とプロセスの開発に成功している。

### 4.4　多様な発展形態

こうして完成した高性能半導体と耐高温金属接合技術をベースとして、加重・圧力、トルク、張力、せん断力、低周波振動などの分野に向けたコンポーネントを開発した。そこからは多様なソリューションや関連ビジネスが生まれようとしている。例えば、加重・圧力については圧力制御、トルク計測からはバルブの開閉検知、動力機構の制御、張力計測からは架線やワイヤーの張力制御、せん断力からはプラントモニタリングや機器のレベリング、低周波振動計測からは破壊を検知することによるセキュリティといった応用ソリューションが考えられる（図 16）。ここでは、それらのソリューション開発の一端を紹介することにしたい。

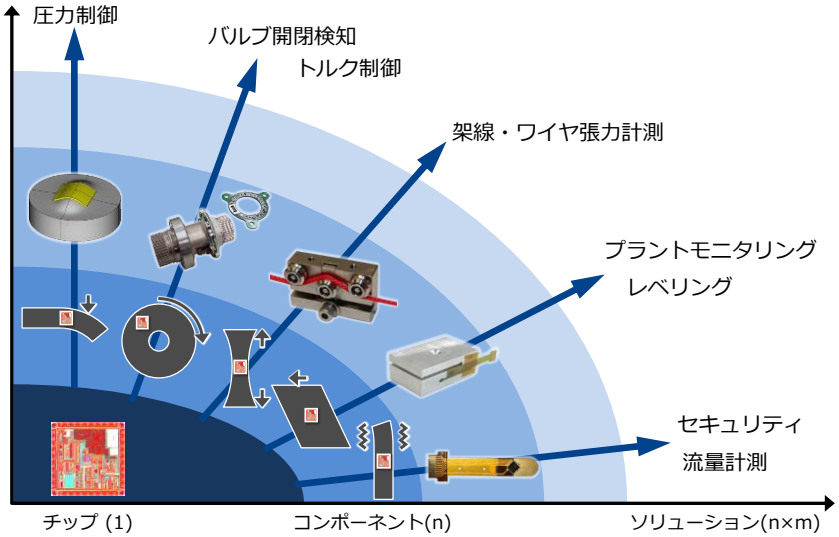



図 16.　多様な発展形態

## ５．　ソリューション開発例

### 5.1　トルクセンサーの開発

回転機構の制御のためにはトルクセンサーが不可欠となる。これまでは磁歪方式[7]や電動モーター駆動であれば電流値の変化を見る方式などが取られてきたが、センシング精度に課題があった。磁歪方式では感度を上げるために測定対象となるシャフトの剛性を下げなければいけない。設計強度の限界でシャフトが設計されていれば、その設計変更が必要になる。本開発ではシャフトのせん断力を直接計測することで、より正確かつ計測対象となるシャフトの設計変更を必要としないトルク計測方式の確立をめざした。

課題は電力供給とせん断力のデータ取り出しにあった。電力供給については有線による給電では配線が回転するシャフトに巻きついてしまう。電池を用いたとしても機構内部のため組み付け後の交換が難しい上に、シャフトが回転する際の重心バランスが崩れる。データ取り出しについても、トルクセンサーの周囲が金属構造物に取り囲まれているため、通常の無線方式を用いることはできない。そこで本開発では磁気共鳴方式[8]をベースとする非接触型の電力搬送・データ伝送方式を開発することにした。

固定された１次側コイルから、シャフト軸に同心円状で形成した２次側コイルに電力を搬送する。電力搬送については実用化の事例も見られるが、本方式では電力搬送だけではなく、搬送波にデジタル変換したせん断ひずみ量を重畳させることに成功した。この方式により、製品組み込み型のトルクセンサーとしては世界最高精度となる非直線性 0.2%、ヒステリシス 0.3%を実現している（図 17）。[9]

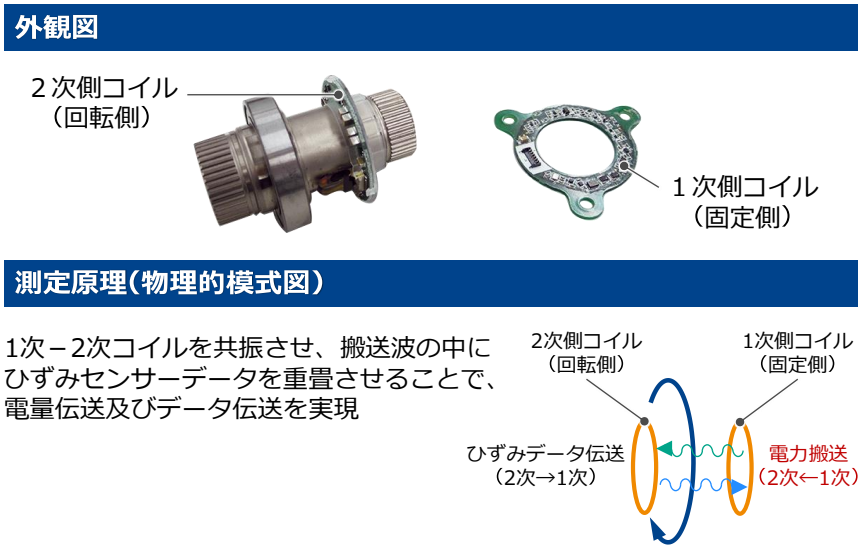



図 17.　トルクセンサー初号機（2013 年）の外観と原理図

現在、高速回転するシャフト、大口径のシャフトへの対応が求められている。動力源の精緻

な制御を目的として、機械産業の各分野で本技術の応用が期待されている。

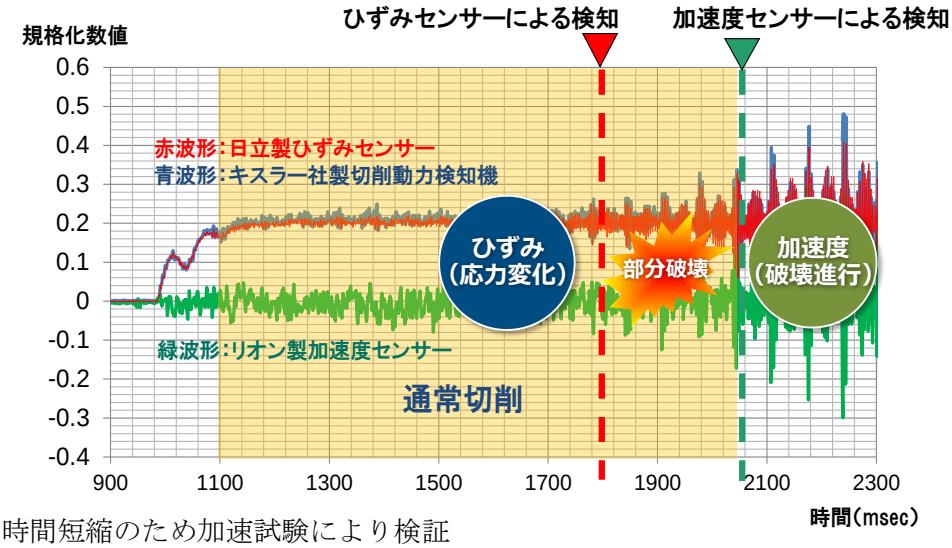
### 5.2　故障予兆検知

故障予兆の最も端的なケースとして、静岡大学の酒井・静研究室と共同して、工作機械切削バイトの「びびり」検知の研究を行っている。切削バイトが磨耗したり、異物が付着すると「びびり」と呼ばれる振動して顕在化する。いくつかの研究機関によってこれまで画像、音、加速度などによる検知が試みられているが、いずれも切削バイトに何らかの異常が起こってからの現象を捉えることにとどまっている。故障通知ではなく故障予兆のためには、切削バイトにかかる応力の変化を捉えることが望ましい。

応力の変化を見る方式としては水晶圧電方式があるが、水晶でできた検出素子が高価である上に脆弱である。実験段階で用いることがあっても、経済性から見て工程内で日常的に用いることは現実的ではない（図 18）。

本実験では水晶圧電方式のセンサー、ひずみセンサー、加速度センサーをバイトホルダーに装着し、切削バイトに負荷を掛けた状態での加速試験を実施した。[10] ひずみセンサーや水晶圧電方式では 1,800msec（切削開始以降の経過時間）で応力の偏在による異常を検知しているが、加速度センサーが振動として異常を検知したのは 2,050msec（同）である。ひずみセンサーによるセンシングでは水晶圧電方式と同様に、「事前」検知が可能になっている。

本実験では切削バイト、留め具、バイトホルダーという部品 3 点で構成されたシンプルな構造物を検討対象に選んだ。今後は多数の部品で構成された構造物にも検討対象を広げる予定である。異常を「事後」ではなく「事前」に検知することに道を開くものと考える。




注：実験時間短縮のため加速試験により検証

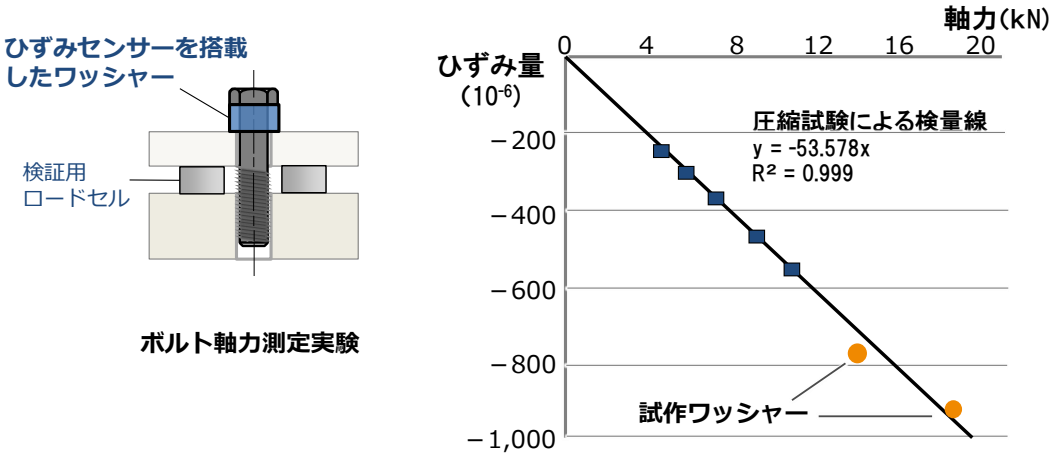
資料：静岡大学－日立製作所の共同研究（2016 年 12 月－）

図 18.　切削バイトの振動現象

### 5.3　ボルト緩みモニタリング

ボルトの緩みを継続的にモニタリングすることも機械やインフラ構造物での課題である。そのためにはボルトの軸力を直接計測することが決定的な手段となる。そのための実装方式について芝浦工業大学の橋村研究室と共同研究を行っている。

実験はひずみセンサーを装着した専用のワッシャーと検証用のロードセルの２方式により、同一の軸力を取得できるように準備した。本実験と原理検証はまだ緒に就いたばかりである。計測対象としたボルトや計測サンプル数は少ないが、事前に設定した検量線に沿った有効な結果が得られている（図 19）。[11] この研究により、インフラ構造物などにおけるボルト締結管理が高度化されることが期待される。



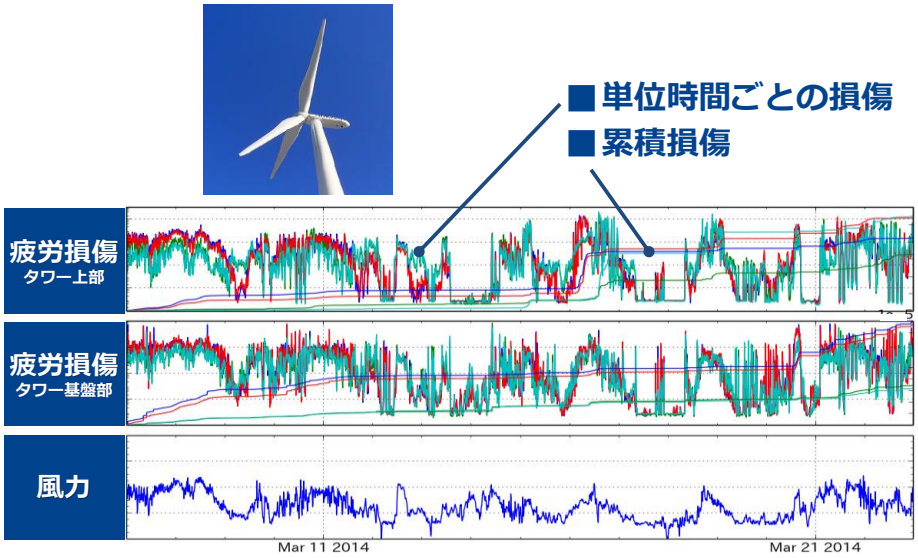

資料：芝浦工業大学－日立製作所の共同研究（2016 年 12 月－）

図 19.　締結ボルト軸力の計測

### 5.4　洋上風力発電機の故障予兆検知

日立が開発する 5MW クラスの発電量を持つ風力発電機は、洋上に設置することを前提として開発されたものである。これまでの陸上設置型とは異なり、洋上設置型では風力の強まる冬場は海が荒れ、修理のボートが近づくことができない。そのため、オーバーホールは台風シーズン前の夏場となる。陸上設置型では１ヶ月であった故障予兆のリードタイムを洋上設置型では６ヶ月に拡張しなければならない。そのため６ヶ月前の段階で故障の予兆を検知できるセンシングと解析技術が求められるようになった。

高精度の故障予兆のためには、加速度センサーなどとともにひずみセンサーがタワー上部、タワー基盤部などに取り付けられている。これらのセンサーから得られるデータを長期にわたりモニタリングすることにより、単位時間での損傷に加え、風力稼動以降の累積損傷を積算している（図 20）。




資料：日立研究所が鹿島港沖サイトで取得したデータ
（2014 年 3 月 7 日－2014 年 3 月 23 日）

図 20.　洋上風力発電機のモニタリングデータ

その結果は次世代機の設計にフィードバックするとともに、日々のオペレーションで重要な役割を果たしている。風力が強くなることはより大きな操業電力を得ることができる一方で、風力発電機の損傷リスクも高まる。正と負の経済コストを自動計算して、強風下での稼動を続けるべきか、停止するかの判断が下される。

第３章で述べた「センシングの７階層」に従えば、加速度センサーやひずみセンサーのデータは第１層に過ぎないが、そこから得られた累積損傷データは第３層に相当する。第３層のインテリジェンスを他の経済データなどと複合させることにより、第７層に当たるビジネス化に帰結している事例といえる。

## ６． 機械工学との融合に向けて

### 6.1 ナレッジ開発者の育成

第３章で記した第４層のナレッジ化には、分野を超えたナレッジ開発者の参画が必要となる。想定されるナレッジ開発者としては、制御ソフトの開発ベンダーや、メカ機構、例えば回転機構の研究に取り組む研究者などが挙げられる。

そうしたナレッジ開発者には開発支援環境の提供が必要となる。具体的には、先ず高性能センサーを内蔵した汎用モジュールやカスタムモジュールを広く使えるように提供することである。さらに高級言語で記述されたデータ処理・解析ソフトのモジュールがあれば、プログラミングが容易になる。さらに、制御ソフトを開発した場合、対象機器にセンサーを取り付け、クラウド環境に接続し検証するための一連のネットワーク環境が必要となる。こうした開発環境の提供により、ナレッジ開発者が育成されることが産業界全体の発展にとって重要と考える。

情報通信産業の発展の歴史を振り返ってみても、黎明期に市場に提供されたものは汎用大型コンピューターと基本ソフトだった。コンピューターは画期的な技術であったが、それを使いこなすユーザーはごく一部に限られた。その後ハードウェアのダウンサイジングと低価格化が進み、ミドルウェアも整備されていったが、市場拡大のために最も決定的であったのは、応用ソフトを開発するサードパーティー群の出現だったのではないだろうか。

IoT の分野においても、サードパーティー系のナレッジ開発者とナレッジ流通の仕組みづくりが市場拡大の鍵を握るものと考える（図 21）。

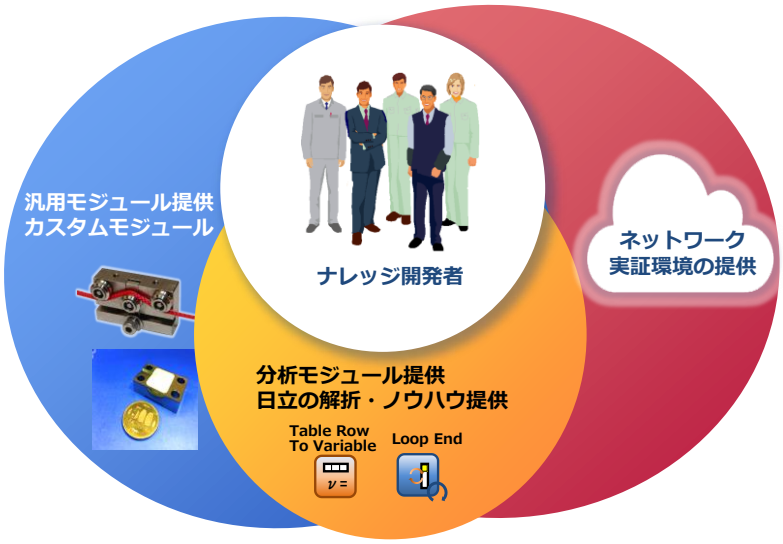



図 21. ナレッジ開発者への開発環境提供

### 6.2　IoT の中で

センシング、リアルタイム解析、フィードバック制御は IoT において鼎の三脚を構成する。その中でセンシングは、新しい市場を切り拓くためのカッティングエッジといえる。リアルタイム解析は競争優位性を確立するための源泉である。そしてフィードバック制御によりユーザーにとっての価値が生まれる。ビッグデータを対象とするポスト解析は人工知能の得意領域であり各国がしのぎを削っているが、フロント部分でのリアルタイム解析には機械工学などの知識に基づく現物解析能力が重要性となる。この分野は長年の技術蓄積が必要であり、日本が得意とする分野である。

情報通信分野でグーグルは Cloud 処理を提唱した。シスコが提唱したエッジコンピューティングは Fog とも呼ばれる。本稿で提唱する先端処理は、さらにオブジェクト近傍での処理を進めるものである。知能を持った「考えるセンサー」がセンシングとリアルタイム解析の一部を統合するものと考える（図 22）。

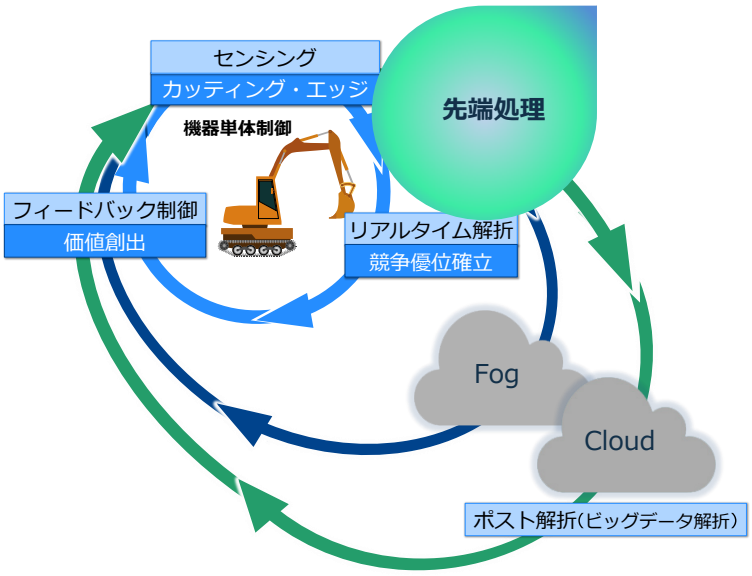



図 22.　IoT における先端処理

### むすび

今後、センサーの性能向上、インテリジェント化が進み、センサーレベルでの「先端処理」が加速するものと思われる。センシングが質量ともに向上するとともに、関連するナレッジが組織の壁を越えて結合することで、産業革新の速度が飛躍的に高まる可能性がある。その起爆剤となるのが、サードパーティー系のナレッジ開発者である。

センシングや機械工学は日本が得意とするアナログ技術の世界である。両分野を基盤として日本発の技術革新、産業革新が生まれることが期待される。本稿の副題とした「1,000 万分の 1」の世界が切り拓く新領域は、伝統的なアナログ技術と最先端のデジタル技術との融合により、今まさに出現しようとしている。

## 注

1） ギリシア神話に登場する 1,000 の目を持つ巨人。それらの目が交代で眠るため、空間的にも時間的にも死角がないと言われる。

2） 集積回路上のトランジスタ数は 18 ヶ月（1.5 年）で 2 倍になるというもの。

3） 2012 年に J. Brysek 氏によって提唱された。年間出荷個数 1 兆個（トリリオン）を上回るセンサーを活用し、社会に膨大なセンサーネットワークを張り巡らせることにより、地球規模での社会問題の解決に活用しようとするもの。

4） Google は利用者の引用履歴からサイトの重要性を判断し、その掲出順位を決める。アマゾンの電子書籍 Kindle には、他の利用者の注意書きやコメントも参照できる。このようにして、社会全体で情報が洗練される仕組みができ上がっている。

5） 日立製ひずみセンサーに内蔵された 1,000 倍のアンプ使用時。

6） Bipolar トランジスタを用いたコンピューターでは電流増幅回路を用いた高速処理を採用した。消費電力が大きくなり、デバイス冷却のための水冷方式を採用した。そこではデバイスと冷却装置を接合するための耐高温金属接合技術が必要となった。

7） 磁性体を印加したシャフトにトルクが加わると、その大きさに応じた磁場の変化が生じる。その変化を検出する方式である。

8） マサチューセッツ工科大学が原理を開発し、2007 年に実証実験を行った。電界結合方式に比べて、送受信コイル間の距離設定の自由度が高い。

9） 標準器としては島津製作所製のねじり試験機を用いた。

10) 実験日時は 2017 年 2 月 27 日。工作機械はオークマ株式会社製 LS 型旋盤を使用。切削バイトには三菱マテリアル製 PTGNR2020K16、TPGN160304 UTI20T を使用した。切削対象は炭素鋼 S45C である。加工条件は切削速度 250m/min、送り 0.05mm/rev、切り込み 1.5mm で行った。

11) 実験日時は 2017 年 2 月 27 日。実験対象としたボルトは M10、首下長さ 50mm（首下部 10mm より 40mm がねじ部）、材質は炭素鋼 S45C。ワッシャーは S45C を用いた自作。レファレンスとして用いたロードセル（×3 台）は共和電業製 LMR-S-20KNSA2-P、トルクレンチは東日製作所製ダイヤル式トルクレンチ T90N-S を用いた。

## 参考文献：

Kurzweil, R. (2005), *The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking.

Laney, D. (2001), *"3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety"*, Gartner Group.

Marschak, J. (1954), *Economic, information, decision and prediction*, D. Reidel Publishing Company.

Shannon, C.E. (1967), *The Mathematical theory of communications*, the University of Illinois Press.

Wiener, N. (1961), *Cybernetics, Second edition: Or the Control and Communication in the America and the Machine*, MIT Press.

加藤秀俊（1972）「情報行動」, 中央公論社。

**神﨑亮平** （2014）「昆虫の脳を理解し､脳をつくる」｢化学工学 特集：バイオミメティックエンジニアリング｣ 78(6):387-390。

日本経済新聞（2015）, 「日立の超小型センサー　車や医療への活用拡大」, 2015 年 7 月 3 日朝刊, 第 1 面。

野口悠紀雄（1974）「情報の経済理論」, 東洋経済新報社。