

Professional Report

「センサとは何か」 ウェブを超えるそのインパクト

What is Sensor? Its Impact Beyond Internet

矢野 和男 Kazuo Yano

インターネットが過去10年、ビジネスや社会を変えてきたが、これをさらに超える変化を今後10年に起こすのがセンサとそのネットワークである。従来、センサは産業分野で活用されることが多かったが、今後、これを超えた幅広い情報システムや社会生活を変える存在となっていく。センサは無線技術、電池駆動と連動し、どこでも設置できるという自由度を獲得し、さらに人間あるいは組織の活動と連携することにより、人間の知覚や思考と強く融合した形で、知識労働の生産性など、21世紀社会の課題を解決するキー技術となっていくであろう。

1 はじめに

1946年のENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) 誕生、1948年のトランジスタ誕生に端を発したIT (Information Technology) 革命は、10年ごとにその意味を変え、過去60年にわたり、段階的に社会への価値を増幅させてきた。特に、1995年ごろを発端とする「インターネット革命」により、世界中のコンピュータがネットワークでつながったため、これまで企業や個人に断片的に蓄積されてきた知恵や情報が検索技術などを通じて瞬時に共有される世界が実現された。

今、これに続く、次の大きな波が現れようとしている。ここで登場するのが「新しい文脈でのセンサ」である。もちろん、従来のシステムにおいても入力手段としてのセンサは必須の部品の一つである。しかし、これから10年におけるセンサの意味は、これまでの60年におけるセンサとは質的に違うものになる。われわれは、4年以上にわたり「センサネット」というテーマでセンサとITと社会との新しい関係を研究してきた。

ここでは、この経験を踏まえ、上記の質的変化が、なぜ、どのような形で起きるか、また、これが社会にもたらす意味を論じたい。

2 なぜ今、センサか：三つの変化

現在、ITは大きな転換点にある。従来のITが価値をも

矢野 和男
1984年日立製作所入社
中央研究所 所属
現在、センサネットの研究開発に従事
電子情報通信学会会員、応用物理学会
会員
IEEE Fellow
工学博士



たらずモデルは、作業の自動化と、それによる省力化や時間短縮である。その基盤は、1911年にテラーにより発表された「科学的管理法」¹⁾にさかのぼり、複雑に見える作業も、要素に分解すれば単純な工程の組み合わせとなり、その多くは機械やコンピュータによって少ないコストで短時間に遂行できるというモデルである。

しかし、21世紀に入り、キーワードとして「人間」、「イノベーション」、「インスパイヤ」に代表される形で、省力化を超える経営やITへの期待が高まり、その模索が始まっている。

この新しいITの姿を決める枠組みとしては、すでに起きつつある三つの変化が鍵となり、センサがこれまでにない大きな役割を果たす。

2.1 変化1：1 ccコンピュータへ

第一の変化は、コンピュータの小型化が次の段階へ進むことである。これまで小型化を牽（けん）引してきたのはムーアの法則²⁾であり、今後も10年以上にわたり継続することは確実である。しかし、コンピュータの小型化の進展は連続的ではなく、むしろ10年ごとに100分の1の飛躍という形で現れ、単なるサイズの問題を超えて、社会へ提供する価値モデルを変え、新サービスを生み出してきた。例えば、PCの登場は「誰でも」という価値を実現し、携帯電話の登場は「どこでも」という価値と多様なサービスを生み出した。

携帯電話は約100 ccのコンピュータであるが、次の飛

躍としてその100分の1の「1 ccコンピュータ」が期待される。この時、新たに「意識しない」という価値が生まれる。これは1 ccという大きさでは、従来の入力手段であるキーボードによるデータ入力が可能となるため、センサが自律的に情報を取り込むことが必然となるからである。すなわち、センサがITへの情報の入り口になる。

2.2 変化2：アップロード型へ

第二の変化は、「ダウンロード型」から「アップロード型」へのシステムアーキテクチャの変化である（図1参照）。従来のインターネットでは、サーバから端末へのダウンロード方向のデータの流れが支配的であった。しかし、上記「1 ccコンピュータ」としてのセンサノード（センサ付きの小型無線端末）、RFID（Radio-Frequency Identification）、カメラなどの入力手段の発展により、アップロード方向のデータが急速に増える。

しかし、むしろ注目すべき点は、現状のダウンロードが支配的な状況においても、少数派のアップロード情報が、より大きな経済的価値を生んでいることである。例えば、インターネットでは、検索サイトが大きな事業価値を持つようになっている。この理由は、世界中からアップロードされる検索キーワードの蓄積を活用して、広告サービスを行うビジネスモデルにある³⁾（総称して「サーチエコノミー」という呼び方もある）。検索事業は、むしろ検索キーワードをセンシングして、広告サービスを提供する事業と見なすことができる。

ここで、断片的な検索キーワードのアップロードが大きな経済的価値を生んでいることを拡大解釈すれば、上記センサ群からの大量センサデータのアップロードが生む事業価値の大きさは計り知れない。この意味で「サーチエコノミー」は、より大きな「センサエコノミー」の

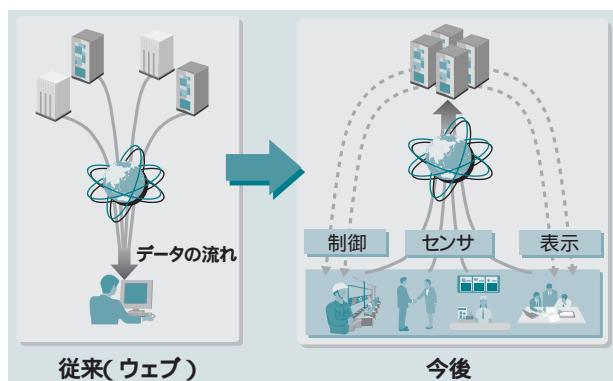


図1 情報システムアーキテクチャのダウンロード型からアップロード型への転換

従来のウェブのシステムでは、サーバから端末へのダウンロード方向のデータの流れが支配的であったが、今後の情報システムでは、アップロード方向のデータが急速に増え、このアップロードデータが情報経済の源泉となる。

序章と位置づけられる。センサは、情報経済の価値の源泉となる。

2.3 変化3：知覚指向へ

第三の変化は、ここで「知覚指向」と呼ぶ、「ITと人間との関係」の変化である。

ドラッカーは、「20世紀最大の偉業が、製造業における肉体力労働の生産性を50倍向上したこと」であり、「21世紀に期待される偉業は、知識労働の生産性を同様に向上すること」⁴⁾と述べている。20世紀のITが、テーラーのモデル上での作業の自動化であったのに対し、21世紀の価値は、知識労働の革新に移る。従来のITでは、人の作業は、分析・分解され、コンピュータに置き換えられた。コンピュータは「論理の申し子」であり、17世紀から、デカルト - ニュートン - ライプニツ - カントと続く「分析・論理に価値を置く世界観」を究極まで進めた存在であった。

しかし、論理の申し子たるコンピュータは、今後人間の知覚の価値をむしろ高める役割をしなければならない。知識労働においては部分の総和は全体ではない。すなわち、作業を分解して、コンピュータで置き換えることができない。論理を基盤とするITと、知覚を基盤とする人間との関係は、20世紀には、論理が知覚を置き換える「対立型」であった。21世紀には「ITの論理と人間の知覚との融合型」に移らねばならない。両者は、相互補完を超えて、ITが人間の五感を地球規模で拡張するものとなる。

この「融合」の具体的特徴として、ITシステムの中に、これまで現れることのなかった、人の「メンタルモデル」や、それに基づく「メンタルシミュレーション」が重要な要素として登場する（図2参照）。これは、ITシステムの記述〔UML（Unified Modeling Language）など〕に「メンタルモデル」が現れないことから明らかにように、これまでは無視されてきた存在に光を当てる。メンタルモデルの重要性は、消防士からCEO（Chief Executive Officer）までの幅広い業務の意思決定において

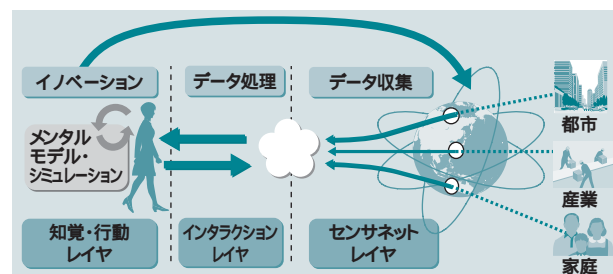


図2 人間とITとの関係における、論理指向から知覚指向への転換

地球規模で業務や生活からセンシングされたデータは、データ処理を経て、人のメンタルモデル（知覚）に影響を与える。この結果、人の行動が変化し、現場や生活を変える。このフィードバックループにより、センサデータの価値は飛躍的に増幅される。

認識され始めている⁵⁾。実は、メンタルモデルとセンサとの連携は一足先にライフサイエンス分野で重要性が認識されている。例えば、体重計というセンサの新しい文脈での役割は、自らの生活行動と体重との関係のメンタルモデルを生みだし、その結果として行動を変えることである。ITにおいても「地球規模の五感」としてセンサから得られる多様な「兆候」や「痕跡」とメンタルモデルが相互作用し、これが社会や組織の行動を変える。これはさらに、精神性、人間性の成熟、意識の変容とも結び付いていく⁶⁾。この新しい文脈でのセンサは従来をはるかに超える重みを持つてくる。

以上の三つの変化は、いずれもセンサが変化の牽引役であるとともに、センサ自身の役割も重みも大きく変わる。この変化と共鳴しつつ、センサとこれまで縁のなかった技術や分野との融合が飛躍的に発展しつつある。これを次に論じたい。

3 センサネット

ここでは、前章で述べた新しい方向を実現するための技術について、日立の取り組みを中心に紹介したい。

センサ自身の技術としては、MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 技術などの半導体センサの進歩が基盤として重要である。最近の発展としては、構造物監視に向けた超低電力の半導体ひずみセンサ⁷⁾、小型装置での遺伝子解析への道を開く半導体DNAセンサ⁸⁾、CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 回路上にLSIプロセスで作成できる集積化MEMSセンサ⁹⁾、ゴルフのスイング解析など幅広い応用が開ける圧電型抵抗型の低電力3軸加速度センサ¹⁰⁾、健康管理や高齢者の見守りの応用が期待される赤外線を用いた腕時計型の脈拍センサ¹¹⁾などが挙げられる。

これらセンサ技術は、センサ情報をITとつなげる広義の「センサネット」という形態で、重要性を飛躍的に高める。特に、以下の3段階のレバレッジ (テコの作用) によって価値が増大する。

3.1 レベル1: センサ×無線

現在技術開発が進んでいるのが、センサと無線技術の連携による「どこでも」センサが設置できる技術である。特に従来、無線の到達距離は10 mから100 m程度であるが、バケツリレー式にデータを転送するマルチホップ・アドホックな無線ネットワーク技術により、この実効距離を数kmレベルまで伸ばすことが可能とな

り、従来接続しにくかった場所や移動する装置などにセンサを取り付けることが可能となった。

標準化の進展もこの動きを後押ししている。特に、IEEE802.15.4規格と、この上で2004年に制定されたZigBee規格は、センサを無線接続することを想定した初めての規格であり、通信速度は250 kビット/s と中庸に抑えつつ、低電力動作で電池駆動を想定している。さらには、インターネット標準のIPプロトコルでの組み込み無線端末までの通信を可能にする技術μWirelessWebを日立は開発している¹²⁾。

さらに、今後に大きな期待が持たれているのが、UWB (Ultra-Wideband) 技術である。3~10 GHz という広帯域を用いるため、従来に比べて、雑音に強く切れにくいのに加え、従来から一けた低電力で、かつ30 cm の高精度の位置検出が可能である。YRPユビキタス・ネットワークワーキング研究所と日立製作所は共同で、世界初の低電力UWBの超小型1 ccセンサノードを開発した^{13), 14)}。IEEE802.15.4aにおいて標準化議論や電波帯の解放に関する議論も行われている。

3.2 レベル2: センサ×電池

上記無線技術は「どこでもセンサ」への道を開くものではあるが、電源の問題が残る。例えば、人や移動する機器にセンサを付けるためには、電池動作が必要である。

ここで新たな課題は、電池寿命を伸ばすための低電力化である。また、端末のサイズは電池で決まるので、「どこでも」の条件となる小型化の観点からも、低電力化が必要となる。従来、携帯電話においても、低電力の無線や情報処理が追求されてきた。しかし、前述した1 cc級センサノードの小型サイズを考慮すると、さらに2けたから3けたの低電力技術が必要である。

日立製作所は、携帯機器の低電力技術において、リーク電流削減回路など基本技術を開発してきた¹⁵⁾。1 ccコンピュータにおいても、この経験を生かし、スタンバイ電流1 μA以下という世界最小電力のセンサノードを実現した^{11), 16)}。これは従来100 μA程度あった携帯電話のスタンバイ電流の2~3けた低い値である。このために「フローズンスタンバイ」と呼ぶ、センサノードと基地局間の非対称な無線通信、センサ、CPU、電源、クロックを独自のシーケンスで制御する技術を開発した (図3参照)。これにより、センサノード側での無線の待ち受け動作に電力を消費することなしに双方向通信を実現した。この技術は、センサネットの基本技術として、今後広く使われていくであろう。

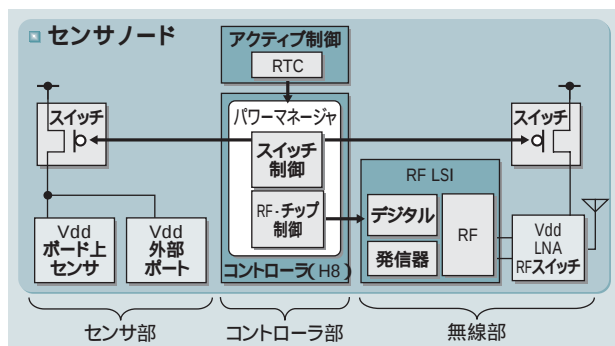


図3 世界最長の電池寿命を実現したフローズスタンバイ技術
日立のセンサノードでは、センサ部や無線部のスイッチ制御と無線動作シーケンスを制御して、1 μ A以下の超低電力動作を実現した。

この超低電力技術を用いた世界初のレベル2センサネットワークシステム「日立AirSense」は、数100ノード対応の大規模センサネットワークの管理ミドルウェア「AirSense-Ware」を含めて、2006年9月製品出荷であり¹⁷⁾、衛生管理などの幅広い応用が期待されている¹⁸⁾。

3.3 レベル3:センサ×人間(組織)

現状のセンサネットワークの研究開発は、前記レベル1が大多数であり、レベル2では、日立AirSenseが先行して実用化に至っている。しかし、センサが破壊的な価値を持つのは、次のレベル3である。

センサは、従来見えていない未知のものを見えるようにすることで価値を生む。21世紀に残された最大の未知の対象は人間であり、その集合である組織である。これを見えるようにするのが、レベル3である。人間を扱うので、純粋に技術の領域を超えて、人間や組織の科学が必要になる。

新たなセンサの登場が、複雑系の発展に、いかにインパクトのある事件であることを示す例として、「カンブリア紀」の大進化が上げられる。5億4,300年前からわずか500万年の間に、それまでクラゲやカイメンしかいなかった世界が、三葉虫など多種多様な生物に満ちた地球に突如変わった。これには「眼の誕生」が重要な役割を果たしていたという説がある¹⁹⁾。レベル3のセンサネットワークは、センサという地球規模の眼を新たに提供することにより、人や組織にカンブリア紀をもたらすことが期待される。

人については、自らを含めて、よくわかっていると思うかもしれない。しかし、そんなことはない。自分が何に時間を使っているかですら、よくわかっていない。知識労働者の生産性を上げるための鍵が、最大の制約条件たる「汝(なんじ)の時間を知る」ことであるといわれている²⁰⁾。もともと、人は機械とは違う。全体を部分の集合として分析・理解することはできない生命体であ



図4 腕時計型の「ライフ顕微鏡」システム
PCに接続された基地局と無線通信によりデータを転送する。

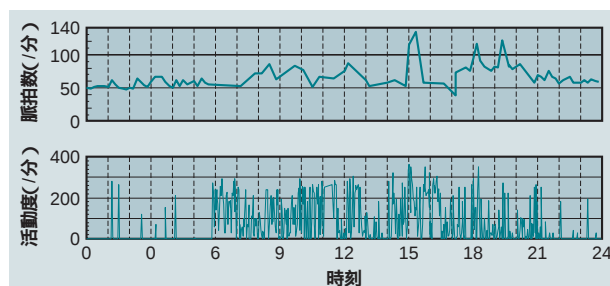


図5 ライフ顕微鏡による一日の脈拍および活動度データ
活動度とは、加速度波形において、一分間当たりのゼロクロス回数である。

る。組織についてはなおさらである。人はひとりひとり違う。多様な人と人との関係が、組織という生命体をさらに複雑にする。

センサは、この複雑系たる人の行動や相互作用を見えるようにする。特に、人に装着することに特化したレベル3のセンサネットワーク技術は、小型で付けていることを意識させない。これにより、従来は不可能だった生活や業務の24時間×365日のセンシングを可能とする。われわれは、このようなシステムを世界に先駆けて開発し「ライフ顕微鏡」と呼んでいる¹¹⁾(図4, 5参照)。腕時計型のセンサノードとPCに接続された基地局とが無線通信するシステムとなっている。図5の縦軸の活動度とは、加速度センサの波形から、1分間当たりのゼロクロス回数を求めたもので、動きの活発さの指標となっている。

4 センサ = 時間 = 鏡

前記した「ライフ顕微鏡」を長期装着して、センサの新しい意味について問い直してみた。

このライフ顕微鏡、すなわちセンサネットワークを使った連続測定結果は、これまで「見たことのない像」を見せてくれる(図6参照)。このデータは、筆者が被験者となり、3か月にわたり連続装着評価を行ったものである。約3か月の人生を一つの図に見るというのは、その間を生きた当事者にとっても新鮮な印象である。ちょうど、自分が住み慣れた土地であっても、あらためて衛星写真

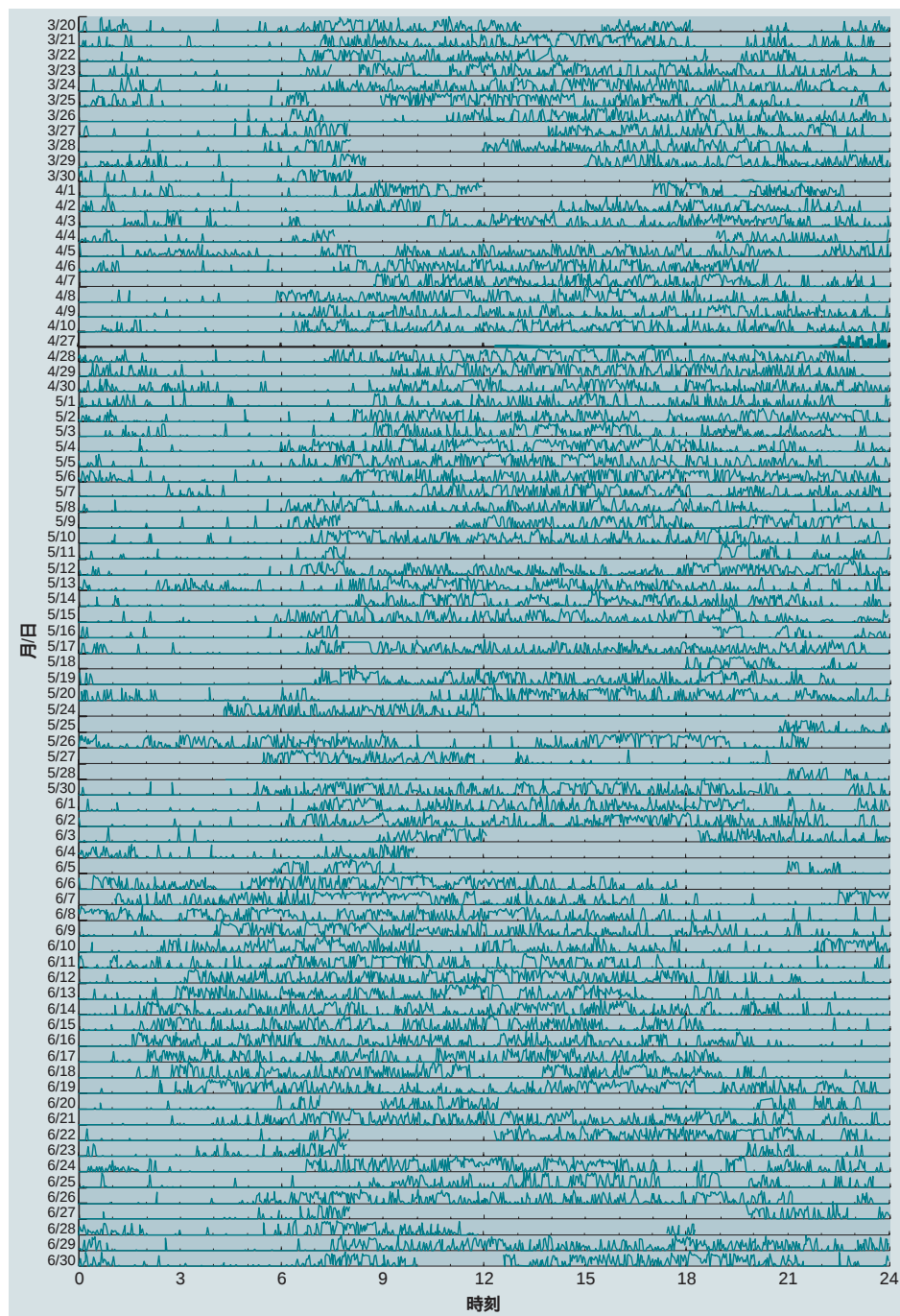


図6 ライフ顕微鏡による約3か月の活動度データ

「上空1万キロから見た人生」に喩えられる、3月20日から6月30日までの筆者の連続装着データを示す。途中一部データが抜けている部分は、機器のメンテナンスなどのためである。

で見ると何とも言えない新鮮な印象を与えるのに似ている。さしずめ「上空1万キロから見た人生」の眺めに喩えられる。

われわれの記憶は、時間軸を連続的にとらえているのではなく、イベントごとに断続的な形で記憶している。このため、時間軸を埋め尽くしたセンサの像には驚きがある（センサのこの特徴を「センサ＝時間」と表現したい）。まず、睡眠中は活動度がゼロとなるので、一目でわかる。寝返りを打っていることも見える。これを見て感じたのが「なんと不規則な生活をしているのだろう」である。特に、夜中に起きていることがここまで多いのは意外である。レベル3のセンサは自分を

再発見させてくれる。

おもしろいのは、当事者である私には、他人には見えない波形の意味が見えることである。ゴルフで歩き回ったこと（3/25）、翌日は朝早く子どもを旅行に送り出したもののゴルフの疲れで二度寝していること（3/26午前）、締め切りに追われて夜中にパワーポイントで資料を作っていたこと（4/5の早朝）、なんとか締め切りに間に合ってほっとしていたところに山形から突然父の訃（ふ）報が来て、気持ちの整理がつかず長風呂に入っているところ（4/5夕方）、お通夜、密葬と続く中で、疲れて読経の間寝てしまっていること（4/7午前）、ゴールデンウィークは遅寝遅起きで夜に読書したこと（4/28～

5/7), 6月前半は海外出張で時間のずれた生活をしていること(6/5~19), この間, 学会出席のため座っている時間が長いこと, など挙げればきりが無い。

このように, レベル3のセンサのデータは, ユーザーの多面的な状況の痕跡や兆候を含んだものであるが, その文脈や真の意味を理解しているユーザー本人に大きな価値をもたらす。これらの痕跡や兆候は, 背景となる経緯や文脈によってエンコードされた情報であり, これらをデコードするための情報は, ユーザー本人の頭にあるからである。ここで鍵になっているのが, センサデータと人の知覚, 思考の連携である。

この連携をさらに深めると, 振り返ることを超えて, 「見える」ことが人のメンタルモデルを変え, これによって人の行動を変える。単純に行動の変更を指示するのに比べると, 一見回り道をしているように感じるかもしれない。しかし, これがレベル3の価値創生モデルであり, 価値ははるかに高い。

特に, 21世紀の最大の課題ともいえるべき, 知識労働者の組織においては, ドラッカーが「ゲリラ戦では, すべての人がエグゼクティブである」²⁰⁾と表現しているように, すべての人が自律的な意志決定者とならなければならない。このために, センサは周りで起きていることを知覚する手段であると同時に, 自らを省みる「鏡」となる。すなわち「センサ=鏡」である。私は, その日のデータをPC上で時々見ながら生活しているが, 人生の日々の新しいページ上に, 私の行動が波形データに変換され, 描かれていくのを感じる。限りある, そして二度とない人生の時間に思いをはせ, その日の行動を顧みるきっかけとなっている。

このように, レベル3「センサ×人間」とは, テクノロジーが到達した「地球規模の五感力」と「人間の知覚と行動」とを融合して, 価値を自律的に増大させるプロセスであり, 従来のITの枠組みを超えた価値を社会にもたらすと期待される。

5 おわりに

センサが, 従来の枠を超えて, 情報化社会を変える破壊的な役割を担うことを述べてきた。まだ端緒についたところだが, センサが真価を発揮するための環境は急速に発展しており, 特に「センサ×人間」という形態で, 人間の知覚や思考と強く融合した形で21世紀の課題を解決するキー技術となっていくであろう。

謝辞

研究開発および将来の方向性に関して議論していただいた, 日立製作所のセンサネット関係者の方々に深く感謝の意を表す。特に, センサネットの価値に関しては鈴木氏, 禰寝氏, 花谷氏, また, ライフ顕微鏡に関しては伴氏, 栗山氏, 山下氏, 愛木氏, 田中氏, 森脇氏, 荒氏に有益な議論, 支援をいただいた。また, この論文の草稿についてイントラブログにおいて, 議論いただいた山崎氏ほか, 多数の方々に感謝する次第である。

参考文献など

- 1) F.W.Taylor : The Principles of Scientific Management , New York and London : Harper & Brothers (1911)
- 2) G. E. Moore , et al. : Cramming more Components onto Integrated Circuits , Electronics , vol.38 (1965.4)
- 3) J. Battelle : The Search , Portfolio (2005)
- 4) P. F. Drucker : Management Challenges for the 21st Century , Butterworth-Heinemann Ltd (1999) , P. F. ドラッカー (上田惇生訳) : 明日を支配するもの , ダイアモンド社 (1999)
- 5) G. Klein : The Power of Intuition , Currency (2003)
- 6) P. Senge , et al. : Presence , Nicholas Brealey Publishing (2005.6)
- 7) 澄川 , 太田 : 半導体ひずみセンサを用いたひずみ検知マテリアル , 機械学会講演論文集 , No. 04-1 , pp.247-248 (2004)
- 8) Y. Yazawa , et al. : A Wireless BioSensing Chip for DNA Detection , International Solid-State Circuits Conference , pp.562-563 (2005.2)
- 9) T. Fujimori , et al. : Fully CMOS Compatible On-LSI Capacitive Pressure Sensor Fabricated Using Standard Back-End-of-Line Processes , the 13th International Conference on Solid State Sensors , Actuators and Microsystems (Transducers '05) , Digest of technical papers vol. 1 , p.37 (2005)
- 10) 仰木 , 外 : ピエゾ抵抗型3軸加速度センサを用いたゴルフスイング技能評価システムの開発 , 日立金属技法 , vol.20 , pp.45-50 , (2004)
- 11) S. Yamashita , et al. : A 15x15 mm , 1_A , Reliable Sensor-Net Module , Enabling Application-Specific Nodes , The 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks , pp.383-390 (2006.4)
- 12) 日立製作所 : ECHONET対応超軽量無線Webサーバモジュール , <http://www.sdl.hitachi.co.jp/japanese/people/sakura/>
- 13) YRPユビキタス・ネットワークング研究所 , <http://www.ubin.jp/press/pdf/UNL060704-01.pdf>
- 14) T. Norimatsu , et al. : Novel UWB Impulse-radio Transmitter with All-digitally-controlled Pulse Generator , Proc. 31st European Solid-State Circuits Conference , pp.267-270 (2005.9)
- 15) K. Itoh , et al. : Trends in low-power RAM circuit technologies , Digest of Technical Papers. IEEE Symposium on Low Power Electronics , pp.84-87 (1994.10)
- 16) K. Suzuki : Ubiquitous Services and Networking : Monitoring the real-world , Symp. on Applications and the Internet (SAINT2004) , pp.11 (2004.1)
- 17) 日立製作所 : ニュースリリース , <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/07/0718.html>
- 18) 日立製作所 : ニュースリリース , <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/06/0629.html>
- 19) A. Parker : In the Blink of an Eye , The Free Press (2003)
- 20) P. F. Drucker : Effective Executive , Harperbusiness (1966) , P. F. ドラッカー (上田惇生訳) : [新訳] 経営者の条件 , ダイアモンド社 (1995)