

安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発

— 無線センサーによる鶏健康モニタリングシステム —

伊藤 寿浩*, 増田 誉, 塚本 健司

動物の健康状態をモニターする無線センサー端末と、動物集団の健康管理を行うアニマルウォッチセンサーネットを開発している。特に、パンデミック対策として、鳥インフルエンザ発生の早期発見システムへの応用に主眼をおいた小型・軽量・フレキシブル・メンテナンスフリーな無線センサー端末を実現することで、人への感染防止など、人類の健康と食の安全の確保に資することを目的としている。システム実現のため、特に、これまで培ってきたMEMS技術と、鶏の生体・行動特性やインフルエンザ症状などの解析にかかわる生命分野、無線技術などの情報分野の各技術との融合により、イベントドリブン型の超低消費電力端末や、超短電文化に対応したダイレクトコンバージョン方式の受信システムなどを開発している。

キーワード: 無線センサー端末、センサーネットワーク、デジタル MEMS、イベントドリブン、鳥インフルエンザ

Development of a sensor system for animal watching to keep human health and food safety

– A health monitoring system for chickens by using wireless sensors –

Toshihiro Itoh*, Takashi Masuda and Kenji Tsukamoto

We have been developing wireless sensor nodes for monitoring animal health and networks that care animal groups. “Animal Watch Sensors” - miniaturized, light, flexible and maintenance-free sensor nodes, will be utilized for the early detection of avian influenza outbreaks in poultry farms to defend human beings from an influenza pandemic. Key technologies to realize the sensor network system are ultra low power “event-driven” sensor nodes and a direct-conversion type receiver system for ultra short message communication. These technologies are developed by the integration of MEMS technology, life science and information technology.

Keywords: Wireless sensor nodes, sensor network, digital MEMS, event-driven, avian influenza

1 はじめに

2009年の新型インフルエンザ(H1N1亜型)発生と世界流行(パンデミック)は記憶に新しいが、近年発生が危惧されてきたのは、これとは別のH5N1亜型の鳥インフルエンザウイルスがヒトインフルエンザウイルスとの再集合によって変異し、強い毒性を獲得した新型インフルエンザである。厚生労働省の推計では、仮にこのウイルスにより1918年に発生したスペインかぜのような重度のパンデミックが起こった場合には、我が国だけでも死者数は最大64万人にも達するとされている。すでにアジアを中心に世界中で、鳥インフルエンザ発生および人への感染が確認されているが、我が国でも、2004年1月に山口・京都で、2007年1～2月に宮崎・岡山でそれぞれ養鶏場においてH5N1亜型鳥インフルエンザの発生が確認され、現在も依然として人類の安全・安心に対する重大な脅威となっている。

このような鳥インフルエンザの脅威に対して、養鶏場における対策の基本は次の4点である。

- 1) 衛生管理と野鳥対策の強化によるウイルス侵入防止策の強化
- 2) サーベイランスによる農場監視の強化
- 3) 診断の迅速化
- 4) 発生農場の防疫措置によるウイルスの早期撲滅

動物衛生研究所などでは、3)に関わる研究、すなわち多様性がある鳥インフルエンザウイルスの遺伝子を幅広く検出できる遺伝子検査法の開発が進められてきた。一方、産総研を中心とする研究チームでは、2)に関わる農場の自動監視システムの開発を進めてきている。

この養鶏場での鳥インフルエンザ感染の対応については、ウイルスの毒性が極端に強いために感染から死亡までの期間が1～2日の場合には、明らかに死亡鶏が異常増

産業技術総合研究所 集積マイクロシステム研究センター 〒305-8564 つくば市並木1-2-1 つくば東
Research Center for Ubiquitous MEMS and Micro Engineering, AIST Tsukuba East, 1-2-1 Namiki, Tsukuba 305-8564, Japan * E-mail: toshihiro-itoh@aist.go.jp

Original manuscript received March 29, 2010, Revisions received May 24, 2010, Accepted May 25, 2010

大するため、現在義務付けられている生産者による報告によって、時間的には侵入から比較的短期間で発生が検知される。しかし、後出図7で示すように毒性が強いということは伝播感染力も強く、目に見えて異常が確認されるような状況では相当な広範囲に感染が拡大している可能性が高いため、経営的な損失が拡大するだけでなく、生産従事者にも危険である。一方、毒性がそれほど強くない場合には、他の要因との間で見分けがつきにくく、死亡鶏数が報告義務を要しない範囲に収まっている場合には、必ずしも迅速な通報は望めない。さらに、我が国では、近年急速に養鶏場の大規模化が進んでおり、農家の深刻な高齢化・人手不足と相まって、従来ならば見つけられた健康異常のサインも見落としたりやすくなっている。つまり、鳥インフルエンザ発生の早期発見という公衆衛生や食の安全の確保からの必要性とともに、生産性の向上という観点からも、鶏集団の健康状態を高いレベルで把握できるような技術を導入することが望まれている。

このような背景のもと、本研究では、図1に示すような養鶏場の鶏の健康をモニタリングするネットワークシステムの開発を試みている。基本的には、数%以上、将来は全羽の鶏に無線センサー端末を装着して、その活動量や体温をモニタリングすることで、それぞれの健康状態を管理・監視しようとするものである。例えば、ある端末で体温異常が検出された場合には、体温変化パターンとあらかじめ集積された実験データとを照合して鳥インフルエンザなどの感染の疑いを自動的に判断したり、集団での異常パターンから個体の問題なのか、感染症なのか、環境制御の問題なのかを推定したりするなどして、必要に応じて生産者への警告、獣医への連絡あるいは行政への報告を自動的に

行うようなシステムである。

私達はこのような無線センサーネットワークシステムを実現するためには端末の小型化、低消費電力化、低コスト化が必須であり、それらのキーとなるのは、近年さまざまなセンシングデバイスあるいはマンマシンインターフェースデバイスの製造技術として成熟し、More than Moore（機能の多様化による電子デバイスの進化）の主役として期待されているMEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）技術の活用とその他必要関連分野技術との融合だと考え研究を進めてきた。本稿では本研究プロジェクトで得られた感染実験データなども紹介しながら、MEMS技術を活用した超低消費電力（Ultra Low Power: ULP）小型無線センサー端末の開発コンセプトを中心に述べる。

2 アニマルウォッチセンサー端末

前述したように、本研究では、鳥インフルエンザ発生の早期発見システムへの応用が可能な鶏健康モニタリングシステムの開発を行っているが、開発している無線センサー端末は、鶏以外の畜産動物はもとより、将来的には野生動物や愛玩動物への適用も視野に入れて（図2），“アニマルウォッチセンサー端末”と呼んでいる。動物といっても多種多様であるが、主に鶏のような比較的小さな畜産動物を想定したアニマルウォッチセンサー端末とヒト用の端末を比較すると表1のように整理することができる。重要なのは、開発しようとしている端末はヒト用として開発されてきた端末とは要求仕様が何から何まで全く異なるということであり、特に端末の低消費電力化にかかわる技術的なハードルがかなり高いということである。

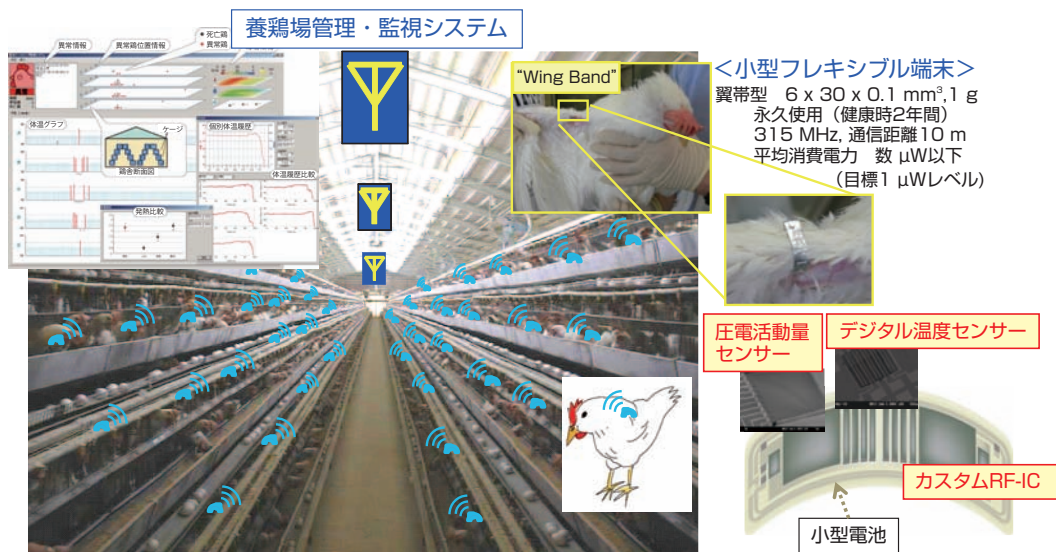


図1 鶏健康モニタリングシステムのイメージ

具体的に消費電力を検討してみると、採卵鶏の場合、550日程度で淘汰（廃鶏）されるので^[1]、端末寿命としては2年程度確保する必要がある。仮に腕時計などに使われる酸化銀電池 SR721 という 0.5 g 程度の小型ボタン電池を使う場合、SR721 の公称電池容量は 25 mAh なので、2年間動作するためには、平均消費電流を 1.4 μ A 以下にしなければならない。無線センサー端末は、通常、センサー素子、センサーインターフェイス回路、マイクロコントローラー（MCU、マイコン）、無線通信用 IC および電源などで構成される。表 2 に示すように、低消費電力型のマイコンを用いた場合でも、マイコンと無線通信 IC のみの消費電流で 1 μ A 程度になるため、さらにセンサーや増幅器の待機および動作分、動作時のマイコンと無線送信による消費電流分などを考えれば、消費電流 1.4 μ A 以下というのは実現が容易ではないことがわかる。そこで、本研究では、マイコンなどの半導体素子のさらなる低消費電力化を図るといような方法ではなく、通信およびセンシングの低消費電力化を図ることにより、平均消費電力を従来の 1000 分の 1 の 1 μ W レベル（消費電流 0.65 μ A レベル）の端末を目指している。つまり、待機電力を極力減らしてセンシングや通信の効率化を図ること、端的にはセンシングや通信の頻度や量を必要最少限にしたり、アンテナの高効率化を図るといった方法により、低消費電力化を達成しようというのが本研究の戦略である。

上述した“センシングや通信の頻度や量を最小化する”ために最も重要なコンセプトと考えているのが、イベントドリブン（Event-driven）という考え方である。センシングや通信の頻度や量を単に減らすだけであれば、間欠動作をさせれば良い。例えば、鶏の健康管理を体温測定だけで行うのであれば、1分ごとに体温を計る必要はなく、30分に1回程度で十分であり、センシングや通信に要する電力を平均

表1 アニマルウォッチセンサー端末とヒト用健康モニタリング端末との比較

主な仕様	端末	アニマルウォッチセンサー端末（主に鶏）	ヒト用健康モニタリング端末
端末サイズ・重量		鶏の場合は、数 cm 角、重量は数 g 以下	腕時計サイズなどが典型、重量は数 10 g なら許容範囲
電源		充電不可、メンテナンスフリーが基本	携帯電話程度の充電頻度なら許容
受信機・通信距離		最短でも 10 m 程度の通信性能が必要	受信機は携帯電話、通信距離は 1 m 以下
センサーの種類		当面、体温センサー、活動量(加速度)センサー程度	体温センサー、活動量(加速度)センサー、脈波センサー、心電センサーなど
端末価格		100 円（1 米ドル、ユーロ）程度	数千円～

表2 無線センサー端末を構成するデバイスの典型的な消費電流値の例

	マイコン(MCU:MSP430)	無線通信 IC
待機（スリープ）時	0.8 μ A ^[2]	0.2 μ A 程度
動作（無線送信）時	250 μ A/MIPS ^[2]	650 μ A (1 mW) 程度

消費電流でいえば 0.1 μ A 程度にすることは難しくなく、待機消費電流と合わせて 1.4 μ A 以下にすることは十分可能である。しかし、ヒトの場合でも高熱の出る病とそうでないものがあり、私達はしばしば体温だけでなく、“疲れているようだ”、“元気がない”といった活動の低下も合わせて、医療機関にかかるかどうかを判断する。そこで、本研究のアニマルウォッチセンサー端末でも、ある種の活動量センサーの搭載は不可欠だと考えていた。実際、後出図 7 に示した山口株のように H5N1 の中でも毒性の強いものでは体温が上昇することなく死に至る場合があり、体温モニタリングだけでは早期発見ができないが、その場合でも活動量の低下から感染の推定を行うことが有効であることがわかっている^[3]。活動量をセンシングする場合、30分に一回測定を行うといった方法では、その瞬間の活動状態しかわからず、その瞬間の値のみをもって活動的であるかないかを判断するのは難しい。したがって、本研究では、一定時間間隔でセンシングして送信するタイムドリブン型ではなく、例えばある閾値以上の活動が行われたら、センシングおよび通信を行うイベントドリブン型にすべきであると考えた。イベントドリブン型で難しいのは、適切なイベントの選定とその閾値設定であり、この閾値を鶏の感染実験データ分析から取得するとともに、それに適したセンサーを開発するというのが、本研究の重要なオリジナリティの一つである。

また、送信電力は電文量に比例するため、通信回数の低減とともに、送信電文の短文化も重要である。電文は、

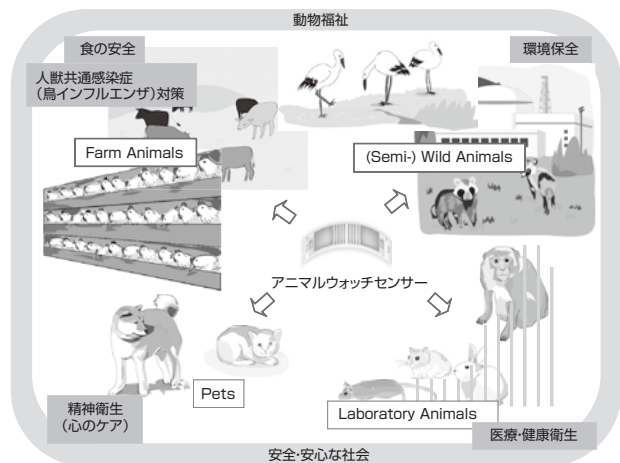


図2 アニマルウォッチセンサーの応用

データそのものの他に、クロック同期用序文やフレーム同期用通信定型文などのオーバーヘッド部や、ID（端末の個体識別符号）などが含まれているが、本研究では、新たな同時多チャンネル受信方式を採用することにより、オーバーヘッド部分を不要にするとともに、送信周波数やポーレート（変調速度）をIDとして利用して短電文化を図っている^[4]。さらに受信間隔から活動量を算出するようにすれば^[5]、理論的には、体温データとパリティビット（最も単純な1ビットの誤り検出符号）だけで構成される従来の1/3以下の最短電文を構成することが可能となる。

以上述べたように、養鶏場用の鶏健康モニタリングシステムを実現するためには、技術的には無線センサー端末の低消費電力化が最も重要であり、そのためには鶏の行動・病変を実験的に把握することによる適切なイベントとその閾値の設定、さらにはそれに合わせたデバイス・端末システムの開発を行う必要がある。表3はシステム実現に必要な主な要素技術をまとめたものである。本研究では、図3に示すような開発プロセスに沿って、無線センサー端末による感染動物実験・解析と、それらで得られたデータに基づくイベントドリブン方式に適した低消費電力MEMSセンサーおよび他の要素デバイス開発を行うとともに、プロトタイプ端末の試作と、それをベースに実験鶏舎用のモニタリングシステムを構築して、鶏舎応用における課題抽出を行ってきた。今後は開発を行ってきた要素デバイスを組み込んだ実用型端末の開発とそれを用いたモニタリングシステムの構築を行って、実験鶏舎におけるデモンストレーションへと進める予定である。

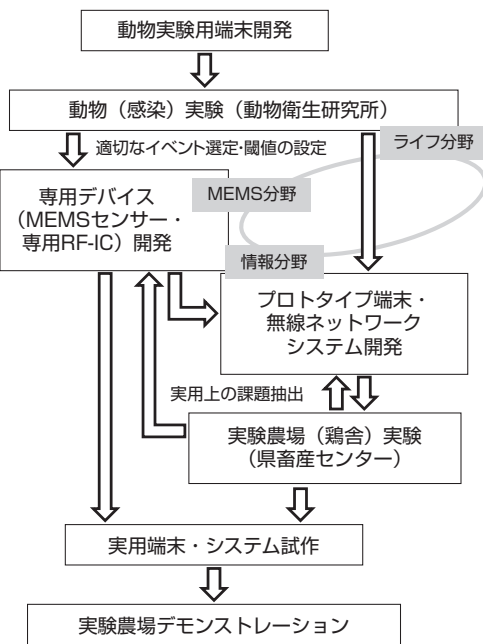


図3 開発プロセスの全体像（シナリオの概要）

表3 鶏健康モニタリングシステムの主要要素技術

ULP 無線センサー端末	デジタルバイメタル温度センサー
	デジタル圧電加速度（活動量）センサー
	カスタム RF-IC（イベントドリブン方式）
	小型アンテナ（315 MHz）
	フレキシブル端末実装技術
ダイレクトコンバージョン（直接変換）方式受信システム	
鶏舎モニタリングシステム	

3 端末の超低消費電力化戦略

小型（翼帯サイズ）・軽量（1 g 程度）・フレキシブル・メンテナンスフリー（寿命 2 年間）な無線センサー端末を実現するために、本研究では、MEMS スイッチを利用したデジタルセンサーを新たに考案した^{[6][7]}。このデジタル MEMS センサーはスイッチ型センサーのアレイで構成され、AD 変換回路無しに直接デジタル信号を出力できるセンサーであり、スイッチ型であるためスリープ（時計停止）モードにある無線センサー端末の起動トリガーとしても利用できる。センサーを構成する個々のスイッチは MEMS 技術を用いた微小機械スイッチであり、スイッチそのものの ON/OFF には電力を要しないのが特徴である。以下、本研究で開発を進めているデジタルバイメタル温度センサーとデジタル圧電加速度センサーを例に具体的に説明する。

図4にデジタルバイメタル温度センサー^[7]の模式図を示す。原理的にはとても単純であり、所定の温度以上で対向電極と接触するバイメタルカンチレバーのアレイで構成される。鶏の平熱は 41 °C 程度なので、後出図7の横浜株に感染した場合のように、42.5 °C 以上に上昇すれば何らかの健康異常を来して発熱していると考えられる。そこで、例えば 42.5 °C 以上で接点が ON となるようなバイメタルカンチレバーを用意しておき、体温上昇によって接点が ON となった時に、端末がスリープ状態から目覚めて接点が ON になったことのみをセンシング情報として含む電文を送信するというのがイベントドリブンという考え方の基本である。タイマーを使った間欠動作モードの場合は、体温上昇というイベントの発生とは関係なく、検出タイミングは設定間隔で決定されるが、イベントドリブン型端末においては、体温の値の代わりに体温上昇時点を検知できるのが特徴である。イベントドリブンは、イベント時の1回送信というだけでなく、端末をスリープ状態から緊急タイムドリブン測定モードに変化させるというように使うこともできるし、またイベントに関しても個体差を考慮するとともに、粗い体温変化などがわかるように、各設定温度値に対応した複数のバイメタルカンチレバーを用意することもできる。例えば ON 温度が 0.5 °C といった一定間隔刻みになるように

サイズの異なるバイメタルカンチレバーを複数用意すれば、デジタル型の温度センサーとなる。“デジタル”の意味は、センサー出力が直接デジタル信号になっている、すなわち四つのスイッチが（ON, ON, OFF, OFF）であれば、そのまま1100というデジタル信号として検出されていることであり、加工することなく電文に乗せられるからである。このような機械式スイッチのON検出はわずかな消費電力で可能であり、センサーの待機電力は基本的には半導体スイッチのそれだけである。バイメタルスイッチはMEMS技術でなくても構成できるが、バイメタル温度センサーの小型化・低コスト化のためには、半導体微細加工技術を利用して多数の立体マイクロ構造をシリコンウェハ上に組立工程なしに一括して実現することができるMEMS技術の利用が不可欠である。

活動量センサーの場合も、ある値以上の加速度が入力されたらONになるといった機械式スイッチで構成することも可能であるが、私達が開発しているのは、図5に示すようなカンチレバー上に圧電薄膜を形成したタイプのセンサーである。ここでは技術の詳細^{[8][9]}の説明は省くが、カンチレバーが運動すると圧電効果によって発電が行われ、この電力によってトランジスタのON/OFFを行うことが可能であり、原理的にはゼロ消費電力のデジタル加速度センサーが実現できる。バイメタル温度センサーと同様、感度の異なるカンチレバーを並べることもできるが、同じカンチレバーを並べて直列つなぎにしたり^[6]、カンチレバーは一本にして、回路の工夫により所定の加速度閾値に対応したデジタル出力を取り出せるようにすることも可能である^[10]。第5章で後述する実験用端末を用いた感染実験の結果から、

例えば感染による顕著な体温上昇が見られない山口株の場合でも、一定時間（例えば30分間）内にある閾値を超える加速度の発生回数（活動量）をカウントし、その回数を24時間前の回数と比較するといった方法により、体温低下よりも10時間程度前に健康異常が検出できることがわかっている^[3]。発電型の圧電センサーを使えばこの活動量のカウントを低消費電力で行うことができる。このようなデバイスを小型・低コストで実現するためには、MEMS技術と圧電薄膜形成技術を組み合わせた圧電MEMS技術が必要である。

図6に示すように、超低消費電力端末を実現するためには、センサーそのものをイベントドリブ型に対応したデジタルMEMSセンサーにするとともに、マイコンや高周波無線通信集積回路（RF-IC）といった半導体素子もそれらに対応したものにカスタム（専用）化する必要がある。これまで述べてきたように、本研究で開発を行っているイベントドリブ型端末とは、「センサーからは直接デジタル信号が出力され、それによって端末がスリープ状態から起動してそのままそのデジタル信号を無線送信する」というものである。したがって端末には高級な演算処理は不要で、センサーインターフェイス機能と電文作成機能といった単純な処理機能を有するRF-ICがあれば十分である。逆に言えば、オーバースペックの汎用マイコンを搭載することを前提にすると、電力的にもコスト的にも鶏用の端末の実現は困難となる。このようなカスタムRF-ICの導入には、半導体素子技術として新たな技術開発が必要となるわけではないが、イベントドリブ型端末専用のRF-ICは世界でも例がなく、自ら設計開発を行う必要があるキーとなるデバイスの

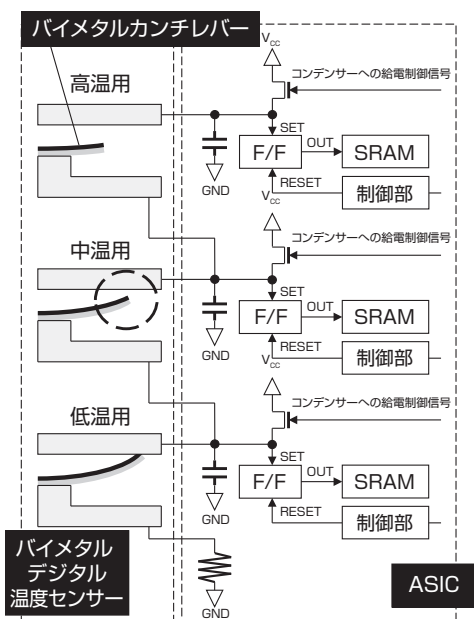


図4 デジタルバイメタル温度センサー

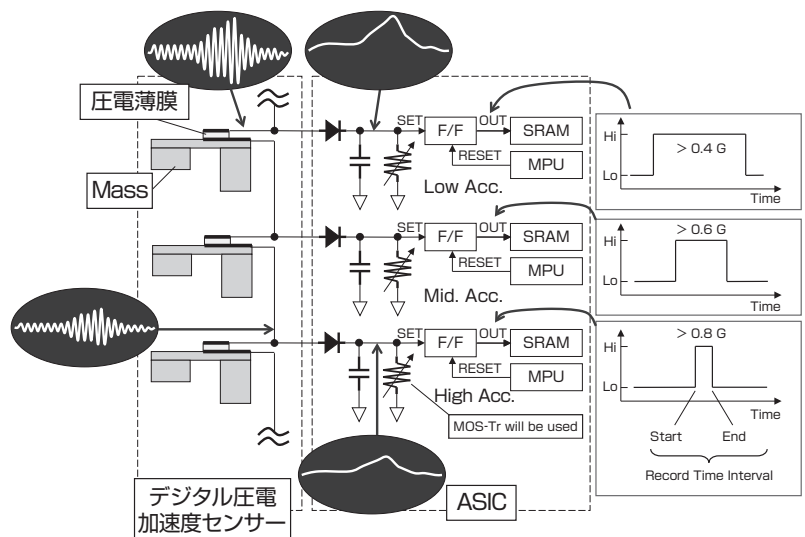


図5 デジタル圧電加速度センサー

一つである。もちろん、これら以外にも、基板のフレキシブル化やアンテナの小型化・フレキシブル化などが実用上重要であることは言うまでもない。

4 アニマルウォッチセンサーのイメージ

本研究プロジェクト終了時（2011年度末）に実現を予定している無線センサー端末の様子は以下のとおりである。

端末本体サイズ・重量：基板（フレキシブル）サイズ6×30×0.1 mm³、重量（電池含む）1 g程度

装着方法：翼帯型

センサー：デジタルバイメタル温度センサー、デジタル圧電加速度（活動量）センサー

無線送信：周波数315 MHz帯（310～320 MHz）、変調方式GFSK、見通し通信距離10 m以上

待機時消費電力：0.5 μW以下

電源：酸化銀電池（1.55 V）

本研究の無線センサー端末は、データ送信のみで受信の方は行わない。受信待ち受け電力が大きく、サイズやコストなど所要スペックを満たせないというのが一番の理由であるが、そもそも端末が受信を行う必要もないと考えるからでもある。端末側で受信を行う必要があるのは、端末間で通信したり、受信不良の場合に再送信要求を受信したりするためなどだが、今回のシステムでは、データ送信頻度が30分～1時間に1回程度、送信電文は10 bit以下と短いものを想定していることなどから、端末数が一万を超える数になったとしても、送信信号が衝突する確率はほとんどないと考えるからである。しかし、イベントドリブン型システムでは、1回の送信データの重要度は高いため、通信には高い信頼性が要求される。本研究では、境界条件の厳しい端末側のシステムをできるだけ簡素にするため、逆に受信機側を高度化するというを基本コンセプトにしている。

このような考えのもと、本研究で受信方式として採用し、

開発を行っているのが、ダイレクトコンバージョン（直接変換）方式である。これはソフトウェア無線とも呼ばれるものの一種で、基本的には上記で示した周波数帯域310～320 MHzの周波数スペクトル自体を取り込んでメモリに保存し、それを解析することで電文の解釈を行おうというものである。私達はこのために同時多チャンネル受信機を試作して受信システムの開発を進めている。このようにすれば、周波数と送信データレートによる端末識別も可能であるし、先に述べたように、プリアンプなどのオーバーヘッド部がなくてもデータ受信が可能となる。また、各端末からの受信信号強度の比較を行うことで、1 m以下の精度での端末の位置同定、すなわち端末のID管理を行わなくても、健康異常を来した鶏の位置や病変の発生・拡大の様子を検出することも可能であると考えている。短電文化のもう一つのポイントが、受信頻度による活動量の推定である。例えば最も単純には、ある閾値を超える加速度が入力されるとONとなるようなスイッチを用意し、ONの回数が一定量に達すると1回電文送信を行うといったものである^[11]。活動的であれば、送信間隔が短くなり、逆に活動が鈍い場合には送信間隔が長くなるため、受信時間間隔が活動状態を表すことになる。もちろんこの場合は1回の送信データそのものから活動状態に異常があるかどうかは分からないが、過去のデータと比較することにより、個体差も考慮した活動量のモニタリングが可能となる。このような方式によれば、電文中に活動量に関わるデータも入れる必要がなくなるため、究極的には信号送信時のデジタル温度センサーからの出力+パリティビットのみを送れば良いことになる。この受信システムの開発においては、同時多チャンネル受信機（プロトタイプ）試作と動作確認、電文解析基本ソフトウェアの有効性確認、端末位置同定アルゴリズムの開発などが終了しており、端末位置同定については理想環境においては1 m以下の精度が得られることが実験的に確かめられている。

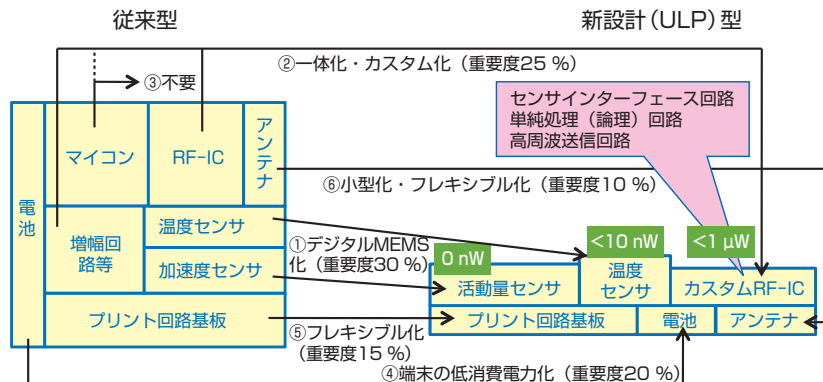


図6 超低消費電力 (ULP) 無線センサー端末と従来端末との比較

以上述べたように、本研究では、高性能受信システムの採用による端末の簡略化によって、端末の小型軽量化、低消費電力化（長寿命化）、低コスト化を図っている。

5 感染実験とプロトタイプシステム

既に述べたように、本研究の重要なポイントの一つは、センサー端末の最適化のために、まずは鶏（の病変）をよく調べるということである。本研究プロジェクト開始時点で、既に我が国の養鶏場などで発生していた鳥インフルエンザが人類にとって大変な脅威であることが認識されているが、鶏が H5N1 に感染したら体温がどのように変化するのかさえ調べられていなかった。もちろん、養鶏場の鶏が健康時にどのような生活サイクルを刻み、感染によってそれがどのように変化するのかというデータも定性的なものしか存在していなかった。デジタル MEMS センサーあるいはイベントドリブン型端末は、対象となるものの性質、本研究では鶏の生態がわかってはじめて実現できるものであり、研究チームでは感染実験などの動物実験を進めてきた。

動物衛生研究所が実施した感染実験では、図 7 に示す体温挙動の結果などから、「高病原性鳥インフルエンザウイルスに感染した鶏の発熱や死亡時間は株間で異なる」こと^[12]や、「鳥インフルエンザウイルスの鶏伝播性はウイルス排泄量と相関している」こと^[13]が、無線センサー端末の活用で初めて明らかとなった^[14]。なお、実験に用いたプロトタイプ端末は、感染実験や鶏舎実験において鶏の装着負担

をできるだけ低減するため、外形 1 円玉サイズ、本体重量 3 g 以下（電池重量込み）であり、体温測定用の温度センサー、活動量モニタリング用加速度センサーを搭載するとともに、一定時間間隔（自由に設定可能）で体温・加速度データを取得・送信するタイムドリブン型の無線モジュールを搭載した。

上記の感染実験では、体温データだけでなく、加速度データも記録されているが、これらの知見・データをもとに、体温パターンと活動量のパターン双方を用いる感染判別プログラムを開発し、従来と比較し、感染の疑いが早期に自動的に発見（認識）できるようになった。さらに、デジタル温度センサーのプロープ本数やそれぞれの閾値などが設定でき、活動量センサーについても適切な加速度閾値の設定が可能となる。また、感染伝播速度のデータを用いて伝播シミュレーションプログラムを構築し、端末濃度と感染の疑いを発見する時間との関係を調べ、モニタリングプログラムの開発に活かしている^[3]。なお、このシミュレーションによって、例えば、3 羽の異常により感染を疑う状況と判断するとした場合、5 % の鶏にセンサーを装着すれば、現状の行政で決められている見回り観察による報告時期よりも、山口株で 2 日間ほど早い検知が可能であることがわかっている。

またこのような無線センシングシステムを鶏舎に適用した場合の課題を抽出するため、上記で用いたプロトタイプ端末を翼章型にすることにより、鶏へ容易に装着できるようにす

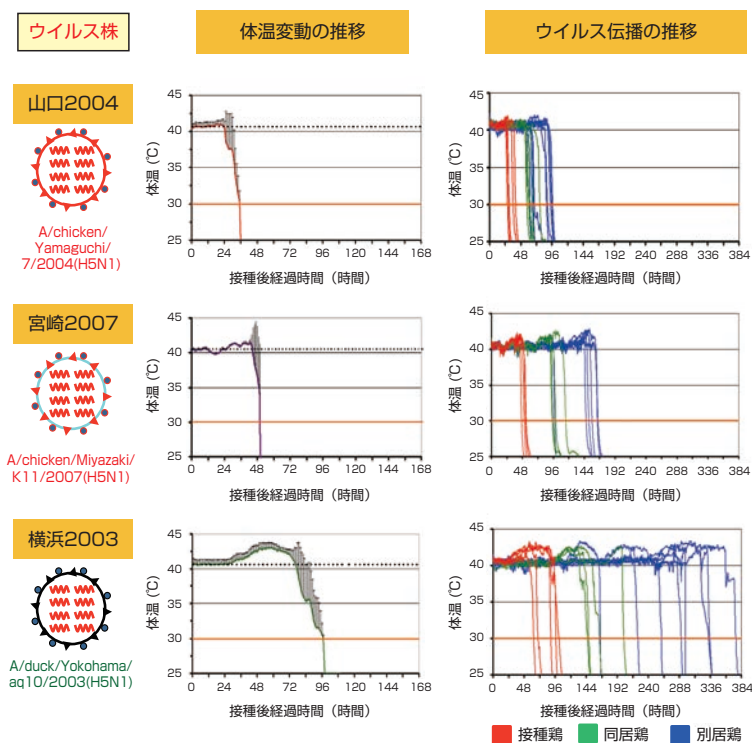


図 7 感染実験により得られたデータ例

るとともに、茨城県畜産センター実験鶏舎内に無線ネットワークシステムを構築して、夏季の暑熱ストレスをモニタリングできる養鶏場の健康管理システムについて検討している^[14]。

6 研究の進捗と見通し

本研究は、2011年度末に実用レベルの鶏健康モニタリングシステムを完成させることを目標としているが、表3に上げた各要素技術の開発進捗度には多少の違いはあるものの、当初目標と比較した全体の到達度は現時点で60～70%である。要素デバイスの中でも、キーデバイスの一つとして開発を進めているデジタル圧電加速度センサーについては、試作デバイスを使ったプロトタイプ端末のデモンストレーションができるようになっており、デジタルバイメタル温度センサーについても、実装を含めたウェアラブルでの製造を考慮した新構造の開発が進んでおり^[15]、2010年度にはこれらの量産化プロセスの検討を行う予定である。また、カスタムRF-ICについても2010年11月の完成を目指して設計試作が進められており、最終目標に近い形の端末は早ければ2010年度中に完成する見通しである。技術的課題としては

- ・受信システム用ソフトウェア開発
- ・デジタルMEMSセンサー用低コストウェアラブル実装技術開発

が挙げられる。特に、後者の実装技術については、デジタルMEMSセンサーデバイスの製造コストを大きく左右するものであり、デバイス本体の製造プロセスを含めた最適化を行う必要がある。

本研究の最終目標は、“実用レベル”のシステムを構築してデモンストレーションを行うことではなく、実用そのもの＝民間養鶏現場への導入であるが、そのためには技術開発だけでは解決しないさまざまな課題がある。低コスト着脱方法の開発といったものに加え、農場でそれをどう生産性向上に結び付けるかといった問題や、行政での監視体制システムをどう構築できるかなどの検討を進める必要がある。

本研究では、アプリケーションを一見特殊な鶏健康モニタリングシステムに絞って開発を進めることで、安価なものでも数千円は下らないアクティブ型（RFタグと違いリーダーを必要としないタイプ）の無線センサー端末を、ワンコインにまで低コスト化するとともに、絆創膏並みのサイズまで小型軽量化することを試みている。確かにこの端末は、バイタルサイン（生命情報）そのものを計ることはできないため、ヒトへの応用は限定的かもしれないが、体温や活動量（元気さ）のモニタリングは健康管理の基本であり、施設での見守りが必要な乳幼児や高齢者の健康モニタリング応用への適用性の検討を行っていきたいと考えている。

7 おわりに

本研究を実際に進めていく中で分かったことは、MEMSや実装技術分野の研究が、全体の課題解決に必要な技術群から見ればほんの一部にすぎないということであった。MEMSの研究とは基本的に製造プロセス技術の研究であり、例えば“非常に細くて深いまっすぐの穴をあける”研究であったが、今世紀に入ってこのような技術が成熟しつつある中、私達が直面しているのは、むしろ何を（何のためのどんな仕様のものを）つくるべきかという問題である。その答えの一つが超小型の無線センサー端末の中で使うデバイスだと考え、その流れの中で本研究を始めたが、鶏の健康モニタリング応用の場合に、本当にMEMSが必要かというのはこれまでも度々俎上に載せてきた。幸いなことに、今のところMEMS技術は必要不可欠な技術として位置付けてきているが、境界条件が変われば、（例えば豚や牛応用になれば）本当にMEMSが必要なのかどうかはそのつど議論しなければいけない。

当初、本研究はあくまで農場における鳥インフルエンザの早期摘発が主たる課題であったが、畜産研究者らといろいろ議論する中で、動物福祉という観点からもアニマルウォッチセンサーについて考えるようになった。畜産の大規模化に伴って、都市部では特に生産現場が生活圏から離れているためか、動物性食品を食すことに対する実感が薄れている。もちろん畜産動物は経済動物であるので、愛玩動物や野生動物と同様に考えることはできないが、高カロリーの食事を摂られ生産病罹患のリスクの高いメタボ状態の動物から、卵・牛乳・肉などを得ているということを理解した上で、今後もそれらを食していけるのかはもう一度考えてみる時にきているのかもしれない。欧米では家畜福祉という考え方が浸透しつつあり、2010年からは家畜福祉認証畜産物（Welfare Quality Products）が販売される予定であるが、その評価会議の中で技術的な問題点として挙げられているのがAnimal Based Measurement：動物側からの評価、すなわち「動物がどう感じているか」の評価手法であり、アニマルウォッチセンサーは動物とのインターフェイス技術として、畜産動物の福祉の確保という点からも重要性を増していくものと考えている。

本稿で紹介した無線センサーネットワークに関するコンセプトや技術の多くは、アプリケーションを鶏の健康モニタリング応用に特化して検討したことで生まれたものであるが、個々の技術は、農業応用や防災応用を含めた環境モニタリングなどの他のアプリケーションへ応用可能なものも少なくない。時にアプリケーションを絞り込んで研究を進めることは、分野の開拓や発明創出にとっても有効な方法となりうることを改めて実感できたことも大きな成果だと考えている。

謝辞

本稿で紹介した研究開発成果は、動物衛生研究所・塚本健司上席研究員、東京大学・増田誉特任講師、産総研・小林健研究員、張毅研究員、岡田浩尚研究員他で構成される研究チームが実施するJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」で得られたものである。

参考文献

- [1] <http://www.toukei.maff.go.jp/digest/tikusan/tiku06/tiku06.html>
- [2] テキサスインスツルメンツMSP 430マイクロコントローラ <http://focus.tij.co.jp/jp/mcu/docs/mcugettingstarteddetail.jsp?sectionId=97&tabId=1511&familyId=342>
- [3] H. Okada, K. Suzuki, K. Tsukamoto, T. Itoh: Wireless sensor system for detection of avian influenza outbreak farms at an early stage, *Proc. IEEE Sensors 2009*, 1374-1377 (2009).
- [4] 伊藤寿浩, 増田誉, 中村公亮, 岡田浩尚: 低消費電力無線センサー端末およびセンサーネットワークシステム, 特願2009-232154.
- [5] 伊藤寿浩, 増田誉, 中村公亮, 岡田浩尚: 無線活動量センサー端末およびセンサーネットワークシステム, 特願2009-232153.
- [6] 小林健, 伊藤寿浩, 池原毅, 一木正聡, 前田龍太郎: 加速度センサー, 鳥インフルエンザ監視システム, 特願2008-151562.
- [7] 池原毅, 伊藤寿浩, 張毅, 一木正聡, 小林健, 前田龍太郎: 温度センサー, 生体の健康管理システム, 特願2008-151555.
- [8] T. Itoh, T. Kobayashi, H. Okada, T. Masuda and T. Suga: A digital output piezoelectric accelerometer for ultra-low power wireless sensor node, *Proc. IEEE Sensors 2008*, 542-545 (2008).
- [9] T. Kobayashi, H. Okada, T. Masuda and T. Itoh: A digital output piezoelectric accelerometer using patterned Pb(Zr,Ti)O₃ thin films electrically connected in series, *22th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (Sorrento, Italy, Jan. 25-29, 2009).
- [10] 小林健, 伊藤寿浩, 増田誉, 岡田浩尚, 張毅, 前田龍太郎: 圧電加速度センサー, 特願2010-098993.
- [11] H. Okada, T. Kobayashi, T. Masuda and T. Itoh: Ultra-low power event-driven wireless sensor node using piezoelectric accelerometer for health monitoring, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48 (7), 070222 (2009).
- [12] K. Suzuki, H. Okada, T. Itoh, T. Tada, M. Mase, K. Nakamura, M. Kubo and K. Tsukamoto: Association of increased pathogenicity of asian H5N1 highly pathogenic avian influenza viruses in chickens with highly efficient viral replication accompanied with early destruction of cytokine responses, *Journal of Virology* 83 (15), 7475-7486 (2009).
- [13] K. Suzuki, H. Okada, T. Itoh, T. Tada and K. Tsukamoto: Critical determinants of avian influenza viruses for transmissibility in chickens, Submitted to *Journal of General Virology*.
- [14] 2009.10.6産総研プレス発表「無線センサーによる鶏の健康モニタリングシステムを開発」.
- [15] 張毅, 岡田浩尚, 小林健, 伊藤寿浩, 前田龍太郎: MEMSの技術による温度センサー及びこれらの製造方法, 特願2009-067117.

執筆者略歴

伊藤 寿浩 (いとう としひろ)

1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年、東京大学先端科学技術研究センター助手、同講師、同助(准)教授を経て、2007年産業技術総合研究所入所。2010年より集積マイクロシステム研究センター副研究センター長。圧電MEMS、MEMSプローブカード、MEMS実装、無線センサー端末などの研究に従事。2006年より、JST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」研究代表者。2008年より、NEDO異分野融合型次世代デバイス製造技術開発(BEANS)プロジェクトMacro BEANSセンター長として、ウィービングMEMSなどの研究に従事。本論文では、主としてMEMSセンサーと無線センサー端末の開発を担当した。



増田 誉 (ますだ たかし)

2001年静岡大学大学院電子科学研究科電子工学専攻博士課程修了、2002年群馬県立群馬産業技術センター独立研究員を経て、2006年太陽誘電(株)R&Dセンター主任研究員と東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻特任講師を兼務し、現在に至る。過去には湿度センサー、シリコンピエゾ抵抗式圧力センサー、サファイア静電容量式圧力センサー、ボール式傾斜センサーなどの素子や信号処理に関する研究/開発に従事し、現在はJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」の特に超低消費電力無線センサーにおけるイベントドリブン通信プロトコル開発や圧電振動発電システムの開発、超低消費電力カスタムLSIの開発、300MHz帯用小型アンテナ開発に従事。本論文では、主として超低消費電力化技術や無線ネットワークシステムの開発を担当した。



塚本 健司 (つかもと けんじ)

1982年東京大学大学院農学系研究科修士課程修了。同年、農水省家畜衛生試験場(現動物衛生研究所)採用。研究員、主任研究員、室長を経て、2007より上席研究員。2004年から鳥インフルエンザの野鳥疫学調査、遺伝子診断法の開発に従事。また、2006年よりJST CREST「安全・安心のためのアニマルウォッチセンサーの開発」に主たる共同研究者として参加し、鳥インフルエンザウイルスに感染した鶏の病態変化の解析と、鶏病原性の分子基盤の解析に取り組んでいる。本論文では、主として感染実験とプロトタイプシステムの開発を担当した。



査読者との議論

議論1 無線センサー端末の構成

コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所研究コーディネータ)

無線端末をイベントドリブン型に対応させるために、新たに設計した端末のコンセプト項目とそれらの重要度(難易度でもよい)が不明確です。一つの案として、従来型の無線端末の構成と新たに設計開発したそれとの構成を図面で比較した上で、要素ごとに解決すべき課題を項目ごとに図示し、その中で重要度(あるいは難易度でもよい)を記述するとMEMSには慣れ親しんでいない技術者を含む一般読者にとって理解が深まると思います。

回答（伊藤 寿浩）

ご教示にしたがって、図6を修正いたしました。

議論2 技術用語

コメント（清水 敏美）

共同研究先として、動物衛生研究所とあります。査読者の知る限り、動物衛生研究所には多くの獣医がいると聞いており、獣医学的立場から鶏の感染予防あるいは感染防止に関して、どのような最近の研究動向があるのでしょうか。農林省の技術政策や施策の点からも、解説を加えていただければと思います。

回答（伊藤 寿浩）

「1.はじめに」の第2段落「・・・養鶏場における対策・・・」に関連の記述を加筆しました。

コメント（清水 敏美）

技術者を含む一般読者には、カタカナ表示による難解な技術用語が多くあります。例えば、タイムドリブン、プリアンプ、パリティビット、ダイレクトコンバージョン、カスタムRF-IC、バイタルサインなどは当該学会では一般的な用語であっても、一般読者にとっては意味が不明です。日本語訳が可能であれば和訳を、不可能であれば、説明など工夫が必要だと思います。

回答（伊藤 寿浩）

少なくともご指摘の語句に関しましては、初出部分にできるだけ括弧書きなどで和訳あるいは説明を入れました。

議論3 MEMS技術活用のメリット

質問（濱 純：産業技術総合研究所評価部）

加速度センサー、温度センサーともにスイッチ方式による超省電力化へのMEMSの活用は、動物用センサーのシンプル化に加えて、MEMS技術で一体製造できることによると記述されていますが、図3、4の各センサーの製造上のメリットを具体的に教えてください。

回答（伊藤 寿浩）

スイッチ方式のセンサーを実現するためには3次元的な機械構造が必要です。MEMS技術は、シリコンウェハ上に3次元マイクロ構造およびそれらを保護する実装構造を一括して製作することを得意とする技術であり、小型かつ低コストな3次元機械構造を含むデバイスを実現する唯一の技術といえます。具体的には、加速度センサーについては圧電薄膜が形成された振動子および封止構造の作成、温度センサーについてはバイメタル片持ち梁アレイ、接点構造および封止構造の作成にMEMS技術が必要不可欠です。

議論4 閾値の設定

質問（濱 純）

センサーシステムのハードやソフトができて、それと同等以上に重要なのが鳥の異常行動と判定する閾値の設定であると思われしますが、非日常的行動としての最終的な閾値の設定は、実際にはどのように決定されたのですか？公開できる範囲でその決定プロセスを説明下さい。

回答（伊藤 寿浩）

動物実験用の無線センサー端末を使って、動物衛生研究所で同時に数10羽の鶏を使った実験を複数回実施してきました。基本的には、ウイルスを接種した鶏（複数のウイルス株について実施）と未接種の鶏の体温データ・加速度データを比較分析することにより、検出体温の設定や加速度閾値の設定などを行っています。

議論5 低コスト化

質問（濱 純）

健康モニタリングシステムの低コスト化には、安価なセンサーシステムの技術開発のほかに、サンプリング数（装着数）を最小化するなどの工夫もなされていると思いますが、統計的なサンプリング総数（取り付け総数）については動物の特性によって違いがあるのでしょうか。

回答（伊藤 寿浩）

動物の特性によって相違があるかどうかはわかりませんが、動物衛生研究所の専門家の意見をうかがったところでは、養鶏場の鶏集団の健康を見るためのサンプリング数としては0.3～1%で十分ではないかとのことでした。また、実験データを利用して、センサー濃度と検出時間（最初に鶏が感染してから異常と判断して通報するまでの時間）との関係をシミュレーションした結果から、現在は5%程度が必要最小限の数だと考えています。

議論6 MEMS技術の実用化

質問（濱 純）

MEMSという技術ベースからの用途開拓の一つとして鳥の健康モニターという実際の製品化普及を狙っていますが、一方で、鳥の健康モニターというニーズの視点からの競合製品などの出現に対する競争力の検討が実用化普及には重要であることを「おわり」において示唆されていると思います。MEMS技術における優位性のある出口の見通しについて、より具体的にご説明ください。また、健康行動モニタリング以外でどのような用途が有力と思われるか、現状での考えをお聞かせ下さい。

回答（伊藤 寿浩）

一般論では、MEMS技術は特に小型・低コストが求められるあらゆるセンサーの製造基盤技術だと思いますので、アンビエント社会^{注)}のさまざまなセンサーインターフェースデバイスがMEMS技術で実現されていくはずですが、鶏以外の動物の健康行動モニタリングまでは、同様のコンセプトのシステムが適用可能であろうことは予測できるものの、例えば施設環境モニタリングといった別の用途では、(MEMSが必要かどうか含めて)一から検討しなければいけないと考えています。しかし、端末の側をできるだけ“軽い”システムにしてより広範囲に多数ばら撒けるようにし、受信側のシステムを高度化するというコンセプトは、農業応用や防災応用を含めた環境モニタリングへの応用へは有効だろうと考えています。

注) アンビエント社会

「ユビキタス社会」は、人間が「いつでも、だれでも、どこでも」必要な情報を能動的に取りにいける世界に対して、「アンビエント社会」は、人を「取り巻く(= ambient)」情報環境が人の状況を賢くセンシングし、環境側から必要な情報を必要な時に提供する世界。