

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：安全・安心のためのアニマルウォッチセンサの開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

伊藤 寿浩((独)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 副センター長)

(平成19年7月～)

(東京大学大学院工学系研究科 准教授)(平成18年10月～平成19年6月)

主たる共同研究者

須賀 唯知(東京大学大学院工学系研究科 教授)(平成19年7月～)

塚本 健司((独)農業・食品産業技術総合研究機構動物衛生研究所 上席研究員)

澤田 廉士(九州大学大学院工学研究院 教授)

須藤 正巳(茨城県畜産センター養鶏研究室 室長)(平成22年4月～平成24年3月)

前田 育子(茨城県畜産センター養鶏研究室 室長)(平成20年4月～平成22年3月)

池原 毅((独)産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門 研究員)

(平成18年10月～平成19年6月)

3. 研究実施概要

本研究では、動物の病態変化解析と、デジタル出力型 MEMS センサ、カスタム LSI などの新たな超低消費電力無線センサ端末用要素デバイスの開発とを行い、平均消費電力が  $1\mu\text{W}$  以下となる動物の健康状態をモニタする無線センサ端末(アニマルウォッチセンサ)を実現した。また、この端末を用いて、三万羽鶏舎における鳥インフルエンザ発生の早期発見システムとしても応用可能な、動物集団の健康管理を行うアニマルウォッチセンサネットワークの開発を行った。

感染鶏の病態変化解析に関しては、本研究で鶏実験用に開発したプロトタイプ無線センサ端末等を用いた実験システムを構築し、これを用いることにより、病原性が異なる3株の高病原性鳥インフルエンザウイルスに感染した鶏の病態変化(体温変動、発熱、死亡時間)を明らかにした。また、成鶏は雛に比べて、ウイルスの増殖が遅く、力価も低い、高熱と強いサイトカイン応答を示し、死亡時間が雛の1.5倍長くなることも解った。さらに、ウイルスが鶏へ伝播する機構を調べたところ、病原性の高いウイルスほど伝播力が強く、短時間に大量のウイルスが放出されていることも明らかになった。そして、これらの感染実験データを利用して、農場(鶏舎)の監視プログラムの開発を行った。また、無線センサ端末を用いた実験により、アジアで流行が続いているH5N1ウイルスの病原性の分子基盤が解明され、ウイルスの遺伝子合成が増強されることによって、病原性の高いウイルスが誕生する機構を明らかにした。さらに、鳥インフルエンザウイルスがカモから鶏に馴化するのに必要なNPの2つのアミノ酸残基を世界に先駆けて同定することができた。

これらの病態変化解析データをもとに、超低消費電力無線センサ端末用要素デバイスとして、圧電デジタル加速度(活動量)センサ、バイメタルデジタル温度センサ、表皮効果を低減した高効率 UHF 帯微小ループアンテナ、センサからの信号処理と300MHz帯の無線通信機能を有するカスタム LSI、発振回路高速起動用カスタム IC(従来比1/5以下の時間で起動を実現)、振動発電システム(2Hz,0.1Gの加速度により1V以上の起電圧を実現)、小型・低消費電力血流量センサプローブ等の開発を行った。特に、2つのセンサに関しては、感染変化解析データより病変判別基準を定め、必要な仕様を決定し、それらに基づき、高調波共振現象を利用して鶏の低加速度の動きを検出可能な圧電加速度センサと、実装方法を容易にした in-plane 型バイメタル温度センサとを実現した。また、カスタム LSI は上記の病変判別に必要なデータを低消費電力で取得するため、そのデータが入力されたときのみ送信動作を行うイベントドリブン機能を有し、更にそのイベントは鶏の健康状態に応

じて自動的に変更するため効率良くデータの取得が可能である。このような動作を低消費電力で実現するため、LSIにはCPUを組み込まず、設計時に予め定めた端末動作に対応した専用の論理回路を構成し、低コストであるCMOS0.18 $\mu$ mのデジタルプロセスで作製した。さらに、センサの入力回路として15nW程度で動作する超低消費電力コンパレータを組み込み、端末のスタンバイ時の平均消費電力が1 $\mu$ W以下となるように設計した。これにより、加速度4段階の測定は検出回路込みで消費電力100nWで実現できる。これらの要素デバイスを用いて、重量1.03g(+電池重量0.6g)、平均消費電力1 $\mu$ W程度のイベントドリブン方式翼帯型無線センサ端末(基板サイズ:8mm×24mm×1.6mm)を実現した。また、血流量センサプローブ(プローブ重量2.8g)を組み込んだ無線センサ端末では、6分間隔間欠動作モードで120時間連続動作を実現し、鶏実験に適用して日内変動データ等を取得することができた。

開発した無線センサ端末を用いたアニマルウォッチセンサネットを実現するため、送信データ最適化による低消費電力化を行った鳥インフルエンザ早期病変判別方法や、翼章型端末を用いたプロトタイプ鶏健康モニタリングシステムを開発した。このシステムを用いて、実験鶏舎において夏季の暑熱ストレスをモニタリングする実証実験を実施し、例えば、ミスト散布と大型送風機を稼働させた鶏舎においては、暑熱ストレスによる生産性の低下が防止できることがわかった。また、受信機を高性能化することで、通信における端末の負担を軽減するというコンセプトの無線センサ端末用通信システムの開発を行った。具体的には、体温などの送信データ以外の、通信だけに必要な電文情報量を低減することや、端末の送信周波数が同一の場合に生じる電文の衝突を防ぐ多チャンネル化などの機能を有する受信機を開発した。加えて、この受信機で得られたデータを取り込み、上記の早期病変判別手法用い、感染実験で得られた病態変化解析データベースの参照が可能な養鶏場監視システムを開発した。そして、2011年10月より、実験鶏舎においてこのシステムの実証実験を開始した。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

要素技術である小型・低消費電力血流量センサプローブ、カスタムLSI、受信機等の新たな超低消費電力無線センサ端末用要素デバイスの開発等においては、大きな成果が得られている。特にカスタムLSIは、端末の小型化、メンテナンスフリー化を実現するための要となるものである。センサからの入力回路に用いているコンパレータと参照電圧発生回路により、感度調整が必要なMEMSセンサを容易に使用可能とし、MEMSセンサ開発側の負担をLSIにより低減している。また、それらを数十nAの消費電流で動作させることを可能にしたことで、体温と加速度の常時モニタリングを可能にした。低消費電力を謳うMCUやRF-ICは様々な企業で開発されているが、同LSIほど目的に特化しているものではなく、汎用性を有しているため、その分消費電力が高い。一方で、同LSIは鶏の健康モニタリング用として開発しているが、体温、加速度(活動量)のモニタリングによる健康管理は多くの生体にとって有用なものであるため、無線センサ端末による健康モニタリング用のLSIとしては広く活用できる可能性がある点が、評価できる。

同LSIの開発では、1.55Vの小型ボタン電池で動作し、体温、加速度を常時モニタリングするスタンバイ時の消費電力が0.5 $\mu$ W以下となるように設計を行った。体温、加速度は常にモニタリングしており、データの取り込みや送信動作は、必要なデータの入力検出されたときのみに行われる(イベントドリブン動作)ため、タイマー動作のように不要なデータを取り込むことはなく、端末の低消費電力化が可能となる。本端末では2つの動作モードがあり、これはバイモルフ温度センサにより決定される。バイモルフ温度センサは鶏の体温が30 $^{\circ}$ C以下となる場合(死亡)、42 $^{\circ}$ C以上となる場合(発熱)を検出し、30~42 $^{\circ}$ C以内であれば通常体温、それ以外であれば異常体温と判断する。通常体温の場合は、鶏のある閾値以上の加速度を伴う動きの回数をカウントし、そのカウント値がある閾値以上になったとき送信イベントを発生する。カウントする理由は、上記のある閾値以上の加速度検出時毎に送信すると送信回数が増加して消費電力が増加するためであり、また加速度閾値を増加した場合には、取得したい動作が検出できないためである。送信イベントが発生すると、サーミスタを用いた体温測定がおこなわれ、その体温データのみを電文で送信する。鶏の加速度(活動量)のデータは、電文の受信頻度で分かるため、端末の送信時の消費電力を低減するために、加速度のデータは電文には含有しない。一方、異常体温時には、鶏が元気を喪失している可能性があるため、通常体温時のように加速度によるイベントが発生されな

い可能性がある。その場合でも、例えばウイルス株の毒性を感染実験データと比較して判断するためには体温データが必要になるため、タイマー動作により送信イベントを発生させ、通常体温時と同様に体温データのみを送信する。設計の基本コンセプトとしては、消費電力の増加となる CPU を組み込まず、設計時に予め定めた端末動作に対応した専用の論理回路を構成することとした。但し、端末の送信周波数やセンサの信号処理に必要な参照電圧値などの設定は、部品実装後に設定する必要があるため、これらについては One Time Programmable ROM (OTP)を用いて、実装後に設定できるようにした。演算を行うことがなくなったため、信号処理においては高周波クロックを使用する必要がなくなり、低消費電力で動作可能な低周波クロックを用いている。通常の Micro Controller Unit (MCU)ではスリープ動作時などの低周波クロックとして 32kHz の水晶振動子を用いてクロック信号を生成しているが、本 LSI では、クロックの精度や信号処理速度を必要としないため、水晶振動子ではなく、低周波 RC 発振回路により 1kHz のクロック信号を生成している。その消費電力は、計算値で 130nA 程度である。

試作した受信機は、端末の送信時の低消費電力化を行う上で極めて重要なものである。これまでの受信機では、1つの受信チャンネル(周波数)を選択し、そのチャンネルの電文の復調を波高弁別法により行っている。この手法では1つのチャンネルにつき1つの復調回路を必要とすることになり、FDMA により多数のチャンネルを同時に受信する必要がある場合には、回路規模が膨大になる。また、波高弁別法では閾値を基準として復調を行っており、S/N 比が低い場合には当然復調が難しくなるが、このような低 S/N 比でも受信を行うことが可能な高感度受信が実現できれば端末の放射電力を低減し、端末の低消費電力化に役立つ。加えて、現状では信頼性の高い受信を行うために、電文には受信に必要な同期を行うためのヘッダー情報がある。本研究では送信データは鶏の体温の 10bit だけであり、その場合には電文のヘッダー情報の割合が高くなり、通信のエネルギー効率が悪くなる。このような課題に対し、時系列周波数スペクトルデータから電文を抽出するという手法は世界にも例がない。開発した無線センサ端末に関しても、評価が高い。本研究においては、2年間メンテナンスフリーで体温と活動量をモニタリング可能な、重量1g程度、平均消費電力 1 $\mu$ W 以下のイベントドリブン方式翼帯型無線センサ端末(サイズ:8mm × 24mm × 1.6mm)を試作した。

このように各要素技術に関する研究成果は、非常に高い評価に値する。但し、当初の計画にある「アニマルウォッチセンサ」に関して、システム全体としては十分に稼動する段階には至っていない。今後は実装コストの低減に向け、MEMS センサと LSI の3次元実装によるモジュール化など実装プロセスの最適化を行っていく予定であると事なので、その成果を期待したい。

研究発表面においては、5年間で29件の原著論文が発表されており、十分な成果が出ていると考えられる。MEMS 研究分野においては、重量1g程度、平均消費電力 1 $\mu$ W 以下のセンサ端末は、非常に高く評価されるものである。更に病態学的研究においても、感染鶏における病態変化の解析、鶏舎内におけるウイルス伝播機構の解析、成鶏の病態変化の解析等、十分な成果が得られていると言える。

特許は 14 件の国内出願があり、優れた成果といえることができる。特に、従来の波高弁別法とは異なり、メモリ内に保存した時系列周波数スペクトルデータを用いた多チャンネル同時受信機(特願 2010-230526、「信号受信機」)は顕著な成果といえることができる。開発した受信機は、センサネットワークに必要な多チャンネル化と、通信時の端末の低消費電力化を可能とする技術が組み込まれており、野生動物の健康モニタリングなど、広範囲の無線通信を必要とする場合等、他のセンサネットワークへの応用が期待できる。一方、海外でも同様のニーズが期待されるにもかかわらず、海外特許出願が無いことに関しては、今後の検討を期待する。

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

動物実験で得られた知見は、実際の鶏舎での実用に関して未確認な点が多いが、今後鶏舎等への実用システムへの展開への見通しが得られており、社会へのインパクトは大きい。今後はマイクロセンサの応用先を増やすことにより、コストダウンが求められる。更に、開発したカスタム LSI は、今回は鶏の健康管理に特化した仕様で開発を進めてきたが、体温と活動量は、鶏に限らず、牛や豚などの畜産動物はもとより、野生動物や人間も含めた生体の健康状態の基本的な指標であるため、その方面への展開が期待できる。

#### 4-3. 総合的評価

病態変化の解析、無線センサデバイスの開発等の面においては、小型化、低消費電力化を図るなど、当初の目標に対して、十分な成果が達成されている。動物衛生研究所と協働して遂行した点も評価できる。今後、社会実装を目指した当初計画における目標達成のためには、更なる実証実験を重ね、提案システムが経済的にも成立することを検証する必要がある。