

# 無線トークンリングによる鳥鳥通信の実装

代表研究者 中島 功 東海大学 医学部学部 役職 教授

## 1 目的

鳥の生体データ（RR 間隔・呼吸パターンなど）を鳥間で相互に持ち合い鳥インフルエンザ感染のスクリーニングを目指す。この重要な手段となる鳥に搭載するパケット無線端末において、多対多ファイル交換を効率良く行うための時分割タブレット方式の無線プロトコルを開発し、オオハクチョウに試験的に実装・評価した。

## 2 背景

### 2-1 鳥から直接感染する疫学的根拠

これまでインフルエンザは鳥類から豚に感染し、ヒトに直接感染しないと言われていたが、詳細に調査すると、鳥類からヒトに直接感染していることが疫学的に推定される。

#### 1) 海獣のインフルエンザ感染

1982年6月から1983年3月、ニューイングランド海岸において細菌性肺炎で死んだと思われたゼニガタアザラシから H4N5 亜形を分離し、遺伝的に鳥類のウイルスと関係が深いと報告している[1]。さらに1980年代にアザラシから分離された H7N7 もカモなどの腸管で増殖していることが確認されており、海鳥からアザラシに感染したと考えている。

#### 2) イノシシのインフルエンザ感染

2010年から2013年の間に385匹の野生イノシシから得た血清中の抗体を調べた結果、13頭（3.4%）から H1N1 抗体が検出された。ことに山口県と栃木県のイノシシから H1N1 2009年のウイルスであった[3]。その他のタイプのウイルスは検出されておらず、豚からイノシシへの感染を強く示唆し（図1）、このことは2018年の豚コレラ感染症が野生イノシシを仲介して広まったことを支持している。なお野生のイノシシには鳥由来のウイルスは報告されていない。



図1 イノシシのインフルエンザはすべて豚型

#### 3) 豚便所

豚便所とはヒトの排泄物を豚の餌として与え、家畜として豚を効率よく飼育する方法で、広く東アジアから南アジアに広がっている。もしヒトがインフルエンザに感染すれば、高い確率

で豚はインフルエンザに感染することとなる。逆にヒトは「シロコロ」や中華の食材として豚の消化管を食しており、十分に加熱されていなければ、豚からヒトに感染する機会がある。

#### 4) 米国における豚のインフルエンザ感染

北米大陸の豚のインフルエンザ感染は、1998年までH1N1だけであり、1998年にヒトよりH3N2が豚に感染したことが判っている。しかし、米国ではH5、H7は豚からは確認されていない。

#### 5) H7は低病原性か高病原性なのか

中国全土で2017年2月から2018年1月まで53,884例の家禽からサンプリングを分析した結果、家禽用ワクチン(H5,H7)を使っても252例のH7N9低病原性ウイルス、69例のH7N9高病原性ウイルス、さらに1例のH7N2高病原性ウイルスを同定している。このことは赤血球凝集素(HA)分子の開裂部位の塩基性アミノ酸連続とH7とは100%相関しておらず、H7で低病原性となるものはHA1とHA2の解列部のHA1側端が[RRR]ではなく[- - R] (欠損、欠損、R)となっている。このことはH7でもあっても必ずしも高病原性とは限らない。

#### 6) スペイン風邪は鳥型であった

北極圏、現在はノールウェイ領スヴァールバル諸島に1918年10月、6名の若者が金鉱を探しに上陸したが、彼らは乗船中に当時流行していたスペイン風邪に罹患しており、上陸後、次々に亡くなった。遺骸は地下1.8mの凍った大地に丁寧に埋葬された。この島では、埋葬されてもすぐに遺骸が凍ってしまうので「この島では死んでは行けない」という伝説がある有名な島であった。約70年後、ロンドンの研究者がこの記録を発見し、カナダ、米国、ノールウェイの研究者を巻き込み、凍った大地から6名の遺骸を掘り起こした(図2)。遺骸から92サンプルの組織が取られ、ウイルスが分離され、後日、そのタイプは豚由来ではなく、鳥型(原種H1N1)そのものであったことが判明した。なお、この研究が引き金となって過去100年間に3回のパンデミックのすべてのウイルスが、すべて鳥型であることが判明している。

### Six unearthed bodies yield clues to 1918 Spanish influenza outbreak; Frozen corpses found in Norwegian Arctic help scientists study virus

By Cox News Service

THE BALTIMORE SUN Nov. 18, 1999

**S**ix bodies unearthed last year in the Norwegian Arctic have unexpectedly yielded a scientific prize: They hold part of the virus that caused the Spanish influenza of 1918, which killed at least 40 million people in one of the worst disease outbreaks in history.

Researchers at a scientific meeting in London said this week that they have identified fragments of the long-sought virus in the brains and organs of six young men who died in October 1918 on Svalbard, an island less than 800 miles from the North Pole.

The bodies were unearthed in August 1998 by a multinational research team that had traveled to the Arctic in hopes of finding frozen corpses in which the flu virus had been preserved. But the bodies were found thawed and decayed, and scientific gossip during the past year had dismissed them as worthless to research.



図2 北極圏の島で6名の遺体を掘り起こしているというCOX紙の一報

### 7) ヒトのシアル酸レセプタ

シアル酸は生体内で、単体のほか、セラミドと呼ばれる長い炭化水素鎖をもつ複合糖質の構成成分として細胞膜表面の糖鎖の末端に存在し、重要な生物学的機能をもっている。その種類はかなり多く、発癌などとも関連していることが注目されている。その中でインフルエンザウイルスが初期に侵入するシアル酸レセプタは、呼吸器系、消化器系の二つが主なもので、この複合糖質の先端にシアル酸があるので、一般にシアル酸レセプタと呼んでいる。シアル酸レセプタは、肺の深部（呼吸細気管支と肺胞細胞の一部）に  $\alpha$  2,3 型すなわち鳥型のレセプタが豊富に存し、一方、上部気道には  $\alpha$  2,6 型すなわち人型のレセプタが主として存在し、ことに乳児ではその傾向が強く、乳児が H5N1 に感染すると肺炎が重篤化するのはこのためである [3]。さらに出現頻度は多いとは言えないが、ヒトでも時期によって小腸上皮細胞に  $\alpha$  2,3 型が出現する [4] (図 3)。

このことは、ヒトの遺伝子には  $\alpha$  2,3 型、 $\alpha$  2,6 型の両方が乗っており、これまで豚やペレットだけが両方のタイプが発現されており、これらの中間宿主を介さないと鳥型はヒトに感染しないという説とは反している。

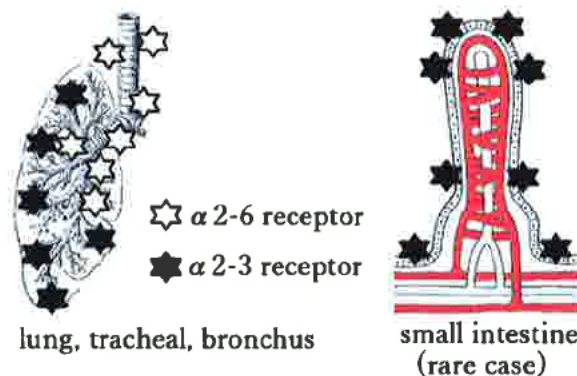


図3 気管支下部以下肺胞までは鳥型レセプタが多く、同様にヒトの小腸にも鳥型レセプタが出現することがあり、これにより鳥インフルエンザが直接感染する。

### 8) 疫学的なまとめ

一般的な仮説であるが、ウイルスは原種から突然変異し、時間が経てばたつほど毒性が低く、毒性が高いと宿主が死ぬので、伝播できないからである。逆に時間を経た方が何度も個体を持ち換えてきているので伝播力がある (図 4)。WHO の 2009 年パンデミック宣言は、豚型で季節性インフルエンザと変わらず、豚型は時間を経ているものとする。疫学的なまとめを図に示した。

なお過去 100 年に三回発生したパンデミックを興したウイルスは、すべて鳥型であることが判っている。

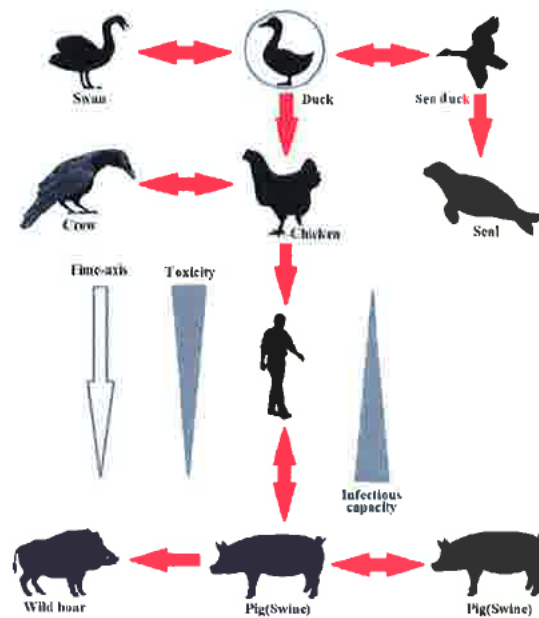


図4 文献調査から描かれる鳥由来のインフルエンザウイルスの伝播ルート

文献調査をまとめると図のごとく鳥から始まって豚に終わっている。インフルエンザは豚由来で鳥から感染しないという説は、遺伝学上、疫学上、あるいは社会科学的な合理性を欠いている。そのため鳥の健康状態を把握するスクリーニング研究は、予防対策としての側面を有している。

### 3 手法

#### 3-1 原理

鳥類に装着するポケット無線端末で生体データを収集することをここで検討することにする。安静時、角速度センサで体外から心拍の間隔、呼吸パターンを得て、これを生体データの指標とする。感染症は、他の個体から遷されることもあるので、周囲に居る個体のデータも持ち帰れば、どの時点で感染したかが推定できるかもしれない。このため多対多 (n対n) のファイル交換を効率良く行うための時分割タレット方式による同報通信ポケット無線プロトコルを開発したので、その概要と把握できるネットワークトポロジーの有用性を研究開発した。このような通信プロトコルは局所に複数の端末が集中し、周波数資源が限られ、直接端末とセンタが通信できない通信やトポロジーにより感染伝播を推定する疫学的手法に有用と考えている。

#### 3-2 繁殖地の集団環境

ハクチョウが夏季に繁殖のため訪問するロシアやモンゴルの原野やツンドラには人家もなければ携帯電話の中継器もない。仮に衛星通信を行うことを想定しても自由空間伝搬損失が地上波に比して極めて大きいので多量の情報を送り届ける事は難しい。そこで蓄積転送型の無線通信で、この悪環境を乗り切る方法を検討した。繁殖地であっても餌の取れる湿地帯に流れ込む河口は限られており、狭い範囲であることが現地調査で判っており、マクロの同期を決めれば、無線通信が成り立つ。

### 3-3 手順

IP上のマルチキャストUDP (UDP User Datagram Protocol) では、確認応答順序制御、再送制御、ウィンドウ制御、フロー制御などの機能をもたせず、データを垂れ流し、データの流れは枝分かれした形状を取る。一方、今回提案する時分割タブレット方式による同報通信パケット無線プロトコールでは、送信権が順に移っていくのでリング状に順に通信が実施される(図5)。

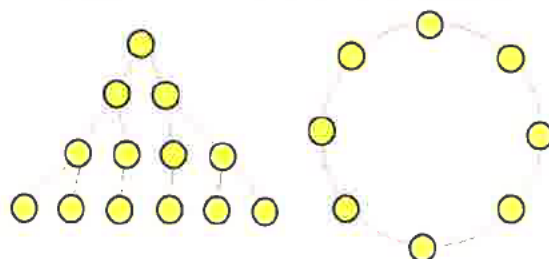


図5 送信権からみたIP上のマルチキャスト(左)と提案する時分割タブレット方式(右)の違い

リング状の通信は、インターネットが普及する以前に、IBMが提唱したLANのプロトコールであるIEEE802.5がある。このプロトコールでは何らかの理由でタブレットが消滅するとネットワーク全体の通信が止まってしまうという現象が起きていたため、この通信手順をタブレットが消滅するリスクの高い無線に応用することはこれまで行われて来なかった。我々はタブレットの消失を防ぐため、見かけのタブレットを時間割で前もって設定する方法を取っている。具体的には各端末はGPS受信器から正確な時計を得て、これよりマクロ同期を割り出している。時間単位で送信権(タブレット)を順に移動させていくので、同一周波数で多くの端末が順にネットワークに参加できる。この間、各端末は、それぞれの信号を受信し、各局の受信電力を計測できるので、自由空間伝播損失の式より各局との距離をリストに記載することができる。その距離は至近距離で20-30cm、遠方でも200-300m、この差は受信電力(RSSI: Received Signal Strength Indicator)としてダイナミックレンジ20dBもあり、アンテナ利得の誤差を鑑みても、上空21000kmを飛行するGPSよりも各端末の受信電力の方が空間的な相関を把握しやすい。この相関がネットワークトポロジであることはいうまでもない。基本的な通信手順は、次のごとくである。

#### 送信開始まで

1. CPUはスリープ状態
2. タイマで定刻にCPU機動
3. 角速度計より生体からの振動を得る
4. 3のデータをFFTし、帯域を絞ってIFFTを施行しRR間隔と呼吸パターンを得る。
5. 曜日によりタブレットの回る順番をCPUが決定する

#### 呼びだしメインチャンネル

1. タイマで時間を確認、送信のタイミング
2. キャリアセンス(CS) 受信電力ノイズレベルを計測
3. 1と2が共に成立する時に送信可
4. 自分のコールサイン、GPS測位データを(2m+1)回送信
5. 受信(多数決の原理でフレーム間補正)
6. 0と1が共に成立する時に送信可
7. 受信できた局のリストを(2m+1)回送信
8. 受信(多数決の原理でフレーム間補正)



9. 参加局のすべての局をカウント

10. 自分の送信タイミングと同じ局数  $k$  を確認する

11. 各局の測位データよりネットワークトポロジを把握する

12. 通信距離が遠い局を推測する (隠れパケットの把握)

データ用サブチャンネル

13. 受信 (多数決の原理でフレーム間補正)

14. メインチャンネルに移動し、

15. 0 と 1 が共に成立する時に送信可

16. 生体データ  $(2m+1)$  回送信

17. 受信 (多数決の原理でフレーム間補正)

18. 0 と 1 が共に成立する時に送信可

19. データ受信局のリスト  $(2m+1)$  回送信

20. 受信 (多数決の原理でフレーム間補正)

送信終了

ファイル処理

1. 受信した相手のファイルをそれぞれのディレクトリーに記録する

2. 受信ファイルのリスト (ファイルテーブル) に記載する

3. CPU をスリープ状態にし、タイマを稼働させる

終了

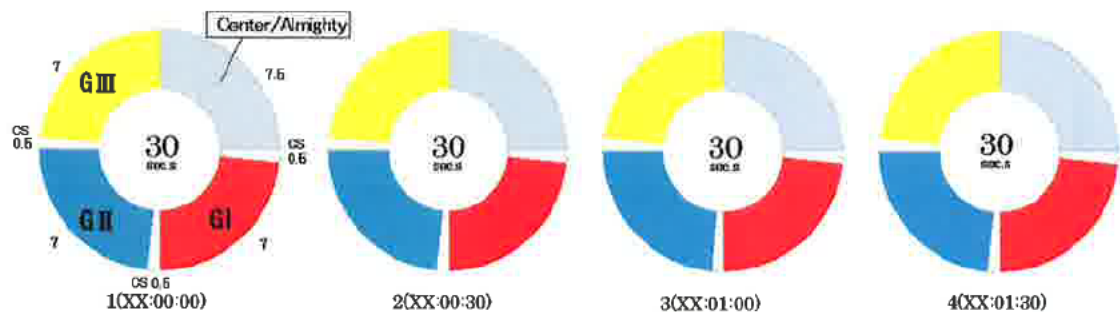


図6 呼びだしチャンネル 30秒間で4グループで割振る例

### 3-4 シミュレーション

ここでは計算機上のシミュレーションにて同報通信と1対1通信の比較を行い、その有用性を比較することにする。通信条件として餌場に集まった端末があり、それぞれ通信エリア内に存在し、単純な比較を行うため隠れ端末が存在しないと仮定する。

250kbps マンチェスター符号化 (+)、38KB の各局が保有する生体ファイルを相互に持ち合うケースを想定する。それぞれのパケットでは誤り訂正が発生しないと仮定し、最大端末数 40、パケット長と受信枠の時間比 0.2 とする。初めに回線数 1 と 8 を CSMA ALOHA 方式による 1 対 1 通信で行った場合の呼損失を求める。もし呼が衝突し損失する場合、そのまま繋がるまで待つ場合は Erlang C 式であるが、このパケット無線通信では、待たずに

別タイミングに再送信するので、Erlang B 式が適応となる。 通信量 = x 「単位 erlang」、回線数 : n とすれば呼損率  $B(n, x)$  は次のごとくである。

$$B(n, x) = (x^n/n!) / (1 + x + x^2/2! + x^3/3! + \dots + x^n/n!)$$

次に CSMA (Carrier Sense Multiple Access) ALOHA 方式パケット無線通信で、空きを確認するためキャリアセンス時間 (carrier sensing time) との比較を行う。通信開始し終了するまでのキャリアセンス総所要時間を 0 (遅延無し)、4, 8, 12, 16 秒とし、同じ量のファイル交換を行うものとする。1 対 1 通信での所要時間と同報通信との所要時間を比較し、キャリアセンス方式による 1 対 1 通信の端末数  $m$  局以上ならば、時分割タレット方式による同報通信が有利となる分岐点をも求める。時分割タレット方式による同報通信の所要時間は最  $n$  ( $n=40$ ) まで一定であるが、1 対 1 通信の所要時間は次のごとく算出できる。

$$1 \text{ 対 } 1 \text{ 通信の所要時間} = T1 * n(n-1)/2$$

手法の条件として 1 チャンネルと 8 チャンネルの CSMA アロハ方式の周波数アロケーション、メインチャンネルで時分割タレット方式と CSMA アロハ方式を行う。周波数アロケーションは、図 7のごとくとする。なお、 $T1$  にはキャリアセンスに伴う総遅延時間 0 (遅延無し)、4, 8, 12, 16 秒を有する値が加算する。

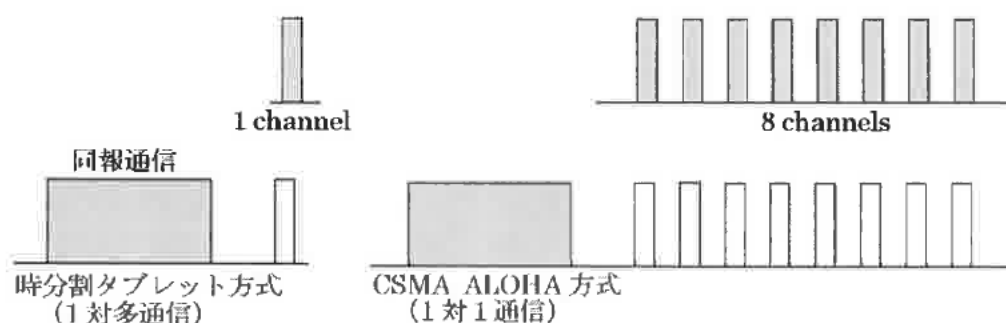


図 7 上段 : 1 チャンネルと 8 チャンネルの CSMA アロハ方式の周波数アロケーション、下段 : 時分割タレット方式と CSMA アロハ方式の周波数アロケーション

### シミュレーションの結果 呼損率の比較

1 対 1 通信、1 チャンネルに複数局がパケットを送信する環境では、呼損率が直ぐに上がってしまい実用にならないことが判る。これでチャンネル数を 8 として周波数資源を 8 倍とした場合、30 局弱までならば、10% 程度の呼損率であることが判る。公衆回線網の固定電話呼損率 5%、呼損 携帯電話率 10% を鑑みれば、最大 40 局が参加できるホットスポットでのチャンネル数 8 は妥当な数と思われる (図 8)。

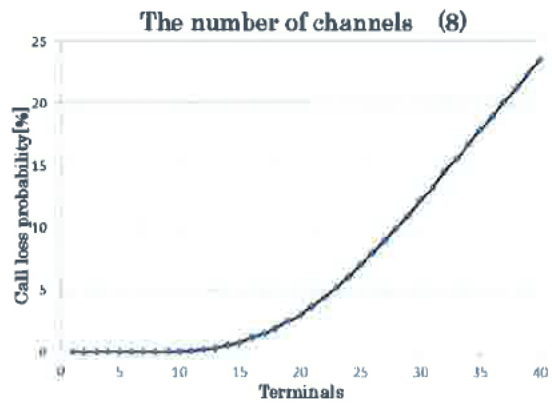
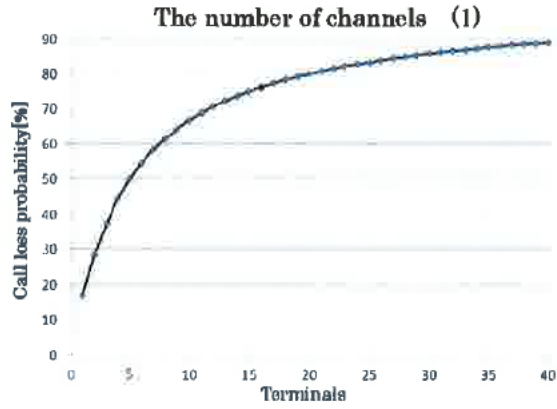


図8 1対1通信 参加無線端末数と呼損率の関係  
 図上 チャンネル数1、図下 チャンネル数8  
 CSMA ALOHA方式と時分割タブレット方式の比較

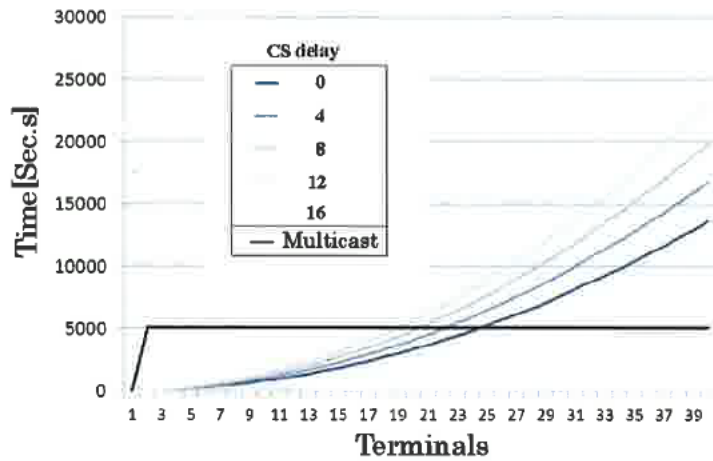


図9 CSMA ALOHA方式パケット無線通信の積算遅延が0, 4, 8, 12, 16秒となる  
 1対1通信の所要時間と同報通信方式の通信時間の比較

通信完了までの時間と局数を比較すると図7のごくなる。この条件では19-24局以上の場合、時分割タブレット方式による同報通信の通信時間が顕著に有利となる。さらに1対1



通信は呼び出しチャンネルの周波数資源が8倍必要であり、この点も時分割タブレット方式による同報通信のメリットと言えよう。

### 3-5 回線設計

次に端末相互の通信 500kbps と端末とデータ収集局 2.4kbps 論理的な伝播路の限界を計算した(表1)。

表1

端末相互 500kbps 理論的な限界

鳥・鳥通信 距離:400m		
項目		設計値
鳥送信	周波数 (GHz)	2.43
	アンテナ利得 (dB)	3
	送信電力 (dBW)	-30
	輻射電力 (dBW)	-27
大気伝搬	自由空間伝搬損失 (dB)	92.2
	大気吸収損失 (dB)	0
鳥受信	周波数 (GHz)	2.43
	アンテナ利得 (dB)	3
	受信電力 (dBW)	-116.2
	雑音温度 (K)	600
	雑音電力密度 (dBW/Hz)	-200.82
	利得/温度 (dB/K)	-24.78
	搬送波雑音電力密度 (dB/Hz)	84.62
	500kbps受信限界 (dBW)	-116.33

端末とデータ収集局 2.4kbps 論理的限界

鳥・地上通信 距離 35km		
項目		設計値
鳥送信	周波数 (GHz)	2.43
	アンテナ利得 (dB)	3
	送信電力 (dBW)	-30
	輻射電力 (dBW)	-27
大気伝搬	自由空間伝搬損失 (dB)	131.04
	大気吸収損失 (dB)	0
地上受信	周波数 (GHz)	2.43
	アンテナ利得 (dB)	23
	受信電力 (dBW)	-135.04
	雑音温度 (K)	600
	雑音電力密度 (dBW/Hz)	-200.82
	利得/温度 (dB/K)	-4.78
	搬送波雑音電力密度 (dB/Hz)	65.78
	2.4kbps受信限界 (dBW)	-135.15

### 3-6 実装技術

低消費電力 1.2-500kbps まで伝送できる S-band(2.4GHz)の packets 送受信機で、packet のためのメモリである FIFO は 64 バイトと極めて小さいが、割り込みと併用することにより大きい packet も扱える。変調方式 2FSK, GFSK, MSK を選択でき、誤り訂正として FEC(Forward Error Correction)、変調部のマンチェスター符号化のどれか一つが選択できるが、構造上併用はできない。自動再送制御 (ARQ:Automatic Repeat Request) は独立して作動し、同報通信では、FEC を付加可能である。

A:素子 (CC2500) の構造

packet 素子 (CC2500) の構造、そのブロックダイアグラムを図 10 に示した。

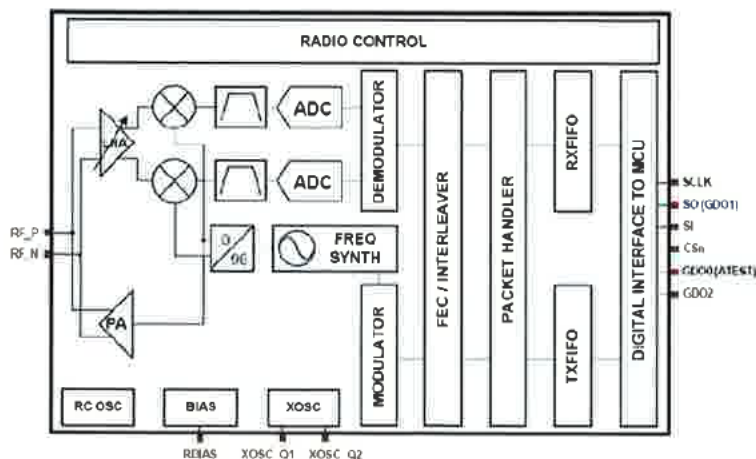


図 10 CC2500 の内部構造

B: FEC とインターリーバ (interleaver)

伝送路で発生する誤りを受信側で訂正する誤り訂正 FEC が搭載されている。インターリーバは送信側で符号の順番の入れ替えを行い、伝送路上で発生したバースト誤りに対して受信側で入れ替えの逆の操作 (デインターリーバ) を行うことにより、集中したバースト誤りをランダム化している。

### 3-7 素子の評価

鳥・センタ間の通信は、距離が長く信号がノイズレベルに近いので、伝送速度を遅くし、FEC ではなく、マンチェスター符号化を選択したほうが有利である。評価実験として、図4のごとく2つの CC2500 基板を接続し、その間にアッテネーターを付加し、受信電力を低下させ、相対に C/N (信号雑音比) を変化させ、最適な変調方式、伝送速度、中間周波数 (IF) 帯域を実験より求めた。この時、FEC、ARQ は動作を止めておく。



図 1 1 評価実験の概要と通信制御プログラム

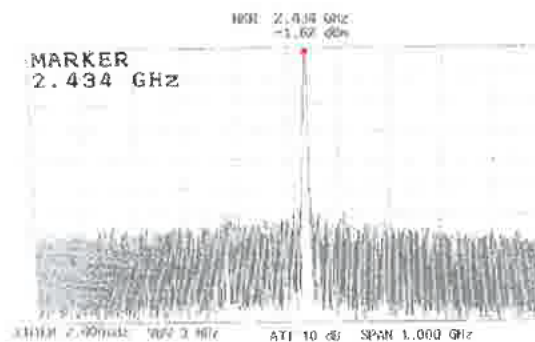


図 1 2 RF 信号の信号強度をモニタ

なお、CC2500 の通信制御プログラムは、IAR 社から無償で提供を受けた EW430 キックスタート版 (JAJA173.zip) を使用した。PC よりシリアルポートを介してターゲットボードの CC2500 に対しコマンドを送ることにより、連続変調波送信、無変調出力、連続受信動作、各種パラメーター設定を行うことができる。アッテネーター後の信号レベルの確認は、図 1 1, 図 1 2のごとくスペクトラムアナライザーを用い、2つの基板間の伝送に伴う誤り率を計測した。

2FSK, GFSK, MSK の選択では、2FSK が最も C/No が良い。2FSK では、2FSK 周波数偏差は図 1 3 のごとく 14.28kHz、マンチェスター符号化(+)で最小、受信帯域は図 1 4 のごとく 101.56kHz で最も誤り率が低かった。

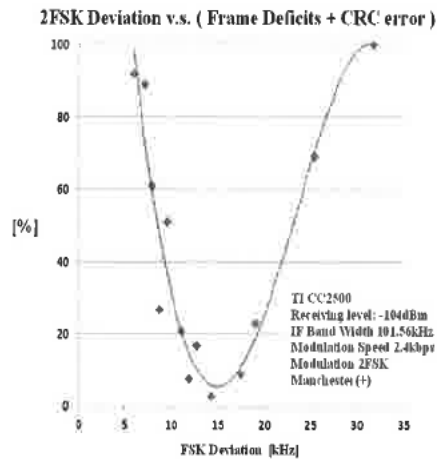


図 1 3 周波数偏差と誤り率

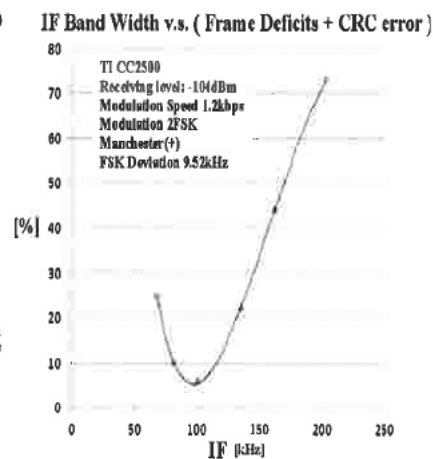


図 1 4 IF 帯域と誤り率

### 3-7 免許

2.4GHz 出力 1mW (0dBi アンテナ使用の場合)、鳥鳥間の通信距離は伝送速度 250kbps (MSK) で 200m を想定している (マージン 6dB)。このために技適を申請し、27 台 (データ収集局 1 局を含む) の合格証を総務省傘下の団体より得た。

### 3-8 装着

山階鳥類研究所と東海大学医学部は本分野における開発研究に関して、長年、共同研究書(MOU)を交わしている。オオハクチョウ、およびコブハクチョウに装着して、生体データ、および位置データ、通信状態の記録、データ収集を行った(図 1 6, 1 7)。

通信装置の重量は 100g であるが、アクリルケースとハーネスを合わせた重量が同等ぐらいで、重量 200g となったが、防水、およびバイト (鳥が装置を噛む) による損傷を防ぐ目的で厚いケースに入れている。

軽量化であることが最適であるが、各国 (韓国など) の端末がハクチョウに噛み切られていること、初期の ARGOS システムの端末が 250g であり、ペイロードが体重の 4% まで許容されるので、今回は初回でもあり 200g とした。



図15 オオハクチョウへの装着例



図16 黄色矢印が端末（コブハクチョウ）

#### 4 実験成果

トークンリングによるパケット通信は、日本時間で8時00分、12時00分、16時00分に取り行われた。ただし、日陰に入ったり、曇りの日は、電圧が不足し、既定の時間に送信に参加できない端末があった。ニッカド電池が規定の3.7Vを超し、送信がONなる確率は、概ね30%前後である。この運用はGPS（鳥がどこにいるのか？という第一希望のデータ）を重視しているため、GPSによる太陽電池の消費は極めて大きく、測位を3回から1回に減らし、かつ、送信出力をもっと下げるなど修正しなければならない。ネットワーク参加局のスループットは、相手が通信のコンディションに達していれば概ね67%であり、マクロ同期だけの自動通信にも取りこぼしがあることが判明している。この対策は、呼び出しチャンネルでの呼（同報通信）の回数を数倍増加して発呼に対する受信チャンスを増やし、さらにサブチャンネルへのスキップ時に見失うなど周波数を移動するタイミングの対策が改善のポイントと推測される。

なお、確保した生体データから安静時の角速度センサより心拍、呼吸が把握できることを医学的に確認した。

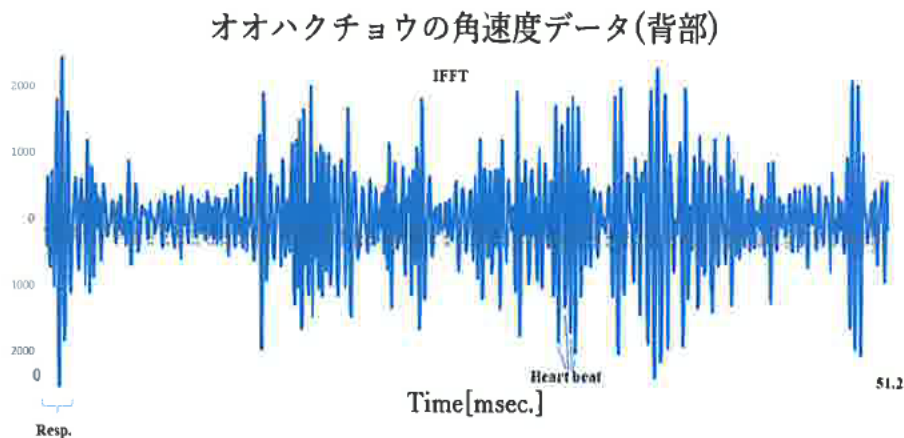


図17 収集したデータの例

安静時の角速度センサより心拍、呼吸が把握できる

水が入っているというバーダーの指摘で、回収したが、水圧試験では水が入らず、加熱すると結露で水滴が内部に現れた。これは封印の時、内部に多量に固定用として用いた接着剤から気化したものと見られる。今後、密封は二段回で、多量に使う時は完全に密閉せず、時間を置いて水蒸気を逃がし、最後に少量の接着剤で完了することが望ましいであろう。を使う必要があることも把握できた。



図18 気温上昇に伴う結露 密閉されているが結露が発生 (←)

## 5 検討

### 5.1. 送信権の時分割配布の有効性

IEEE802.5で規定されている有線でのトークンリングは、宛先ノードが故障してパケットが正常に受け取り、消去が行われないと、そのパケットが永遠にリングを周回してしまう。またノードのエラーでトークンが消失して、どのノードも送信ができないということも起こり得た。このような事態に対処するため、トークンリングでは特別なノードを設け、1周以上回っているパケットを監視してそのパケットを除去したり、トークンが一定以上の時間回ってこない場合はトークンを再生したりするというような機能が設けられている。また、リングでは、故障したノードを切り離すため、リング入力とリング出力を直結して故障ノードをバイパスする機能を備えていたが、無線では輻輳が起りやすいので、有線で行われているタブレットで実装することはきわめて難しい。我々は、コールサインの一部を数字で割り振り、除数でグルーピングを行い、送信権を時分割で割り振る手法を採用し、パケット無線通信に実装した。このような通信プロトコルは、直接端末とセンタが通信できない生体内に複数投入する端末やマイクロマシンに応用可能と思われる。

### 5.2. ネットワークトポロジ把握の有用性

ネットワークトポロジの把握は、感染症の伝播の把握のためには必須である。感染症は感染個体に接近しなければ感染しないので、群れの中で多くの個体に接する、つまり群れの中心にいる個体が感染しやすい。人間の場合も山に住んでいる仙人のような人よりも満員電車で揺られて職場に通っているサラリーマンの方が、インフルエンザに罹患しやすい。鳥類の群れでは、感染し衰弱した個体が発生すると群れの中心から外され、周辺に追いやられる。もし感染した個体の群れの中での位置が把握できれば、野鳥家によるこれらの野外観察を通信網学的に証明できるであろう。そのためにはネットワークトポロジの解析として次の語彙に留意する必要がある[2]。

中心連結度 (Degree Centrality)



相互に通信の対象性が保たれている端末をスコア 1、受信だけ、送信だけの状態をスコア 0 とし、一つの端末と隣接している別の端末の合計数を Degree Centrality とする。この値は構造的なネットワークの形状は考慮せず、端末が周囲に多く居る局は集団の中心に居ると判断できる。感染症からみれば、中心に居る個体は感染の機会が高いと考える。

#### 近接度 (Closeness)

送信出力、アンテナ利得が同一ならば、端末の受信電力と自由空間伝搬損失の式から各端末のそれぞれの距離  $r$  が得られ、それぞれがどれだけ空間的なトポロジー関係にあるのかを距離  $r$  でスコア化する。NET という拡張子のファイルにはそれぞれの受信電力と距離  $r$  が記載されているので、このスコアからファイル転送ルートを一ゲートウェイさせる最短距離を算出するのにも使える。また Closeness がある閾値を越している端末を最初から排除してしまい、再送要求を頻繁に出させないなどネットワーク全体への負担を軽減させることができる。

#### 間隔度 (Betweenness)

端末がどれだけの数ゲートウェイとして自局を利用するかをスコアとして表わすもので、この値が高い局はパケットの衝突が多く、無駄な輻輳が増加するので、1対1通信のファイル転送では、閾値を越した端末に関して別なバイパスルートを設定させることが考慮できる。

#### 固有ベクトル (Eigenvector)

各端末の中心性スコアは隣接する端末の中心性に比例し計算される。中心性が高い端末の隣にいる端末を意味し、中心性が高い端末が群れのボスと考えれば、他の個体に比して情報を得やすいことになる。Eigenvector が高いスコアの渡り鳥が日本に帰還した場合、ボスでなくとも群れ全体のファイルの多くを持ち返ったと判断することができるであろう。

### 5.3. 最短ルートの実装

マルチキャストではどうしても成り立たないファイル交換が生じた場合、直接、相手をコールできるフラグを使用する。ここではつぎのプログラムを C 言語で実装している。最短経路問題を効率的に解くグラフ理論におけるアルゴリズムで、スタート端末からゴール端末までの最短距離とその経路を求めることができる。ここでは無向グラフとして扱う。例えば図 8 を表 1 のごとく実装する。

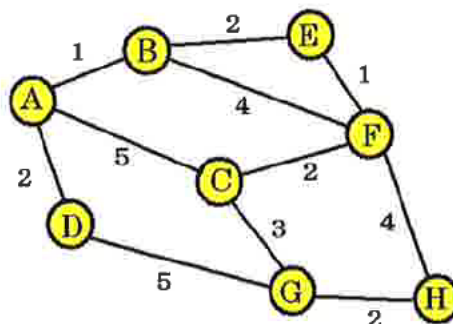




図15 受信電力よりルート算出を行う

表2 最短距離 ルートの検出 (ダイクストラ法 Dijkstra's Algorithm) の実装例

```
% F= no signal, distance matrix
int a[N+1][N+1]={ { 0, 1, 5, 2, F, F, F, F},
                  { 1, 0, F, F, 2, 4, F, F},
                  { 5, F, 0, F, F, 2, 3, F},
                  { 2, F, F, 0, F, F, 5, F},
                  { F, 2, F, F, 0, 1, F, F},
                  { F, 4, 2, F, 1, 0, F, 4},
                  { F, F, 3, 5, F, F, 0, 2},
                  { F, F, F, F, F, 4, 2, 0}};

int v[N+1]; void Ikerutokoro(int);
{ int i; for (i=1;i<=N;i++) v[i]=0
Ikerutokoro(1); }
```

## 6 結語

ハクチョウに搭載するノックアウト無線端末での時分割タレット方式による同報通信ノックアウト無線プロトコールを開発し、免許を取得後、実装、試験運用を行った。通信手順を国際電気通信連合 (ITU-D SG2 Q2/2) で発表し、本寄書はITU-Rヘリエジンステートメントとして報告された。

この手法は複数の端末が集中し、周波数資源が限られ、直接端末とセンタが通信できない環境に有用で、さらにネットワークポロジを把握することにより感染伝播を推定する疫学的手法に応用できる。

## 7 謝辞

基板の作成は、日本システムデザイン (広島市)、アクリルケースとハーネスの作成は、田定工作所 (高岡市) による。検証実験とC言語ROM化・プログラミングに関しては十蔵寺寛氏より多大なご支援を受けました。オオハクチョウ、コブハクチョウの検証実験に関しては、山階鳥類研究所 尾崎清明氏、仲村昇氏、我孫子市鳥の博物館 小田谷嘉弥氏のご協力を得、心より感謝致します。

### 【参考文献】

- [1] Hinshaw V. S, Bean W. J, Webster R. G, et al: Are Seals Frequently Infected with Avian Influenza Virus?. J Virology, 1984; 51:863-865.
- [2] Shimoda H, Nguyen D. V, Yonemitsu K, et al : Influenza A virus infection in Japanese wild boars (*Sus scrofa leucomystax*). J Vet Med Sci. 2017; 79:848-851.

- [3] Nicholls J. M, Bourne A. J, Chen H, et al :Sialic acid receptor detection in the human respiratory tract: evidence for widespread distribution of potential binding sites for human and avian influenza viruses. Respiratory Research 2007; 8:73.
- [4] Shinya K, Ebina M, Yamada S, et al :Avian flu: influenza virus receptors in the human airway, Nature 2006; 440 :435-436.
- [5] Shi J, Deng G, Ma S, et al :Rapid Evolution of H7N9 Highly Pathogenic Viruses that Emerged in China in 2017; Cell Host Microbe 2018, 24:558-568.

【発 表 資 料】

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Bird-to-Bird packet communication using wireless token rings	International Telecommunication Union (ITU) SG2 Document <u>2/86-E</u>	April 2018
Packet Transceiver on 2.4GHz for Whooper Swan	J of Multimedia Information System, VOL. 5, NO. 2, pp.91-98	June 2018
Communications Protocol Used in the Wireless Token Rings for Bird-to-Bird	J of Multimedia Information System, VOL. 5, NO. 3, pp.163-170	September 2018
鳥インフルエンザを疑う個体のスクリーニングに関する基礎研究	日本救急医学会関東地方会誌 VOL. 39, NO. 2, pp.214-218	2018年11月