

F-4 高度情報・通信技術を用いた渡り鳥の移動経路と生息環境の解析および評価に関する研究

(3) GPSによる渡り鳥の長期自動位置情報収集システムの開発に関する研究

独立行政法人情報通信研究機構

横須賀無線通信研究センター

静岡大学工学部

沼津工業高等専門学校

井上真杉

福田 明

長澤正氏

平成13-15年度合計予算額 34,062千円

(うち、平成15年度予算額 10,454千円)

〔要旨〕近年、人工衛星を利用した渡り鳥追跡技術が急速に発達し、渡り鳥の保全に関する研究を飛躍的に進展させてきた。そのほとんどはARGOSシステムによるものであるが、機器の価格、衛星回線の使用料、位置の測定精度、測定間隔の設定自由度、欠測率などにいくつかの問題点がある。そこで本研究では、衛星への信号送信を一切行わずGPS信号の受信により位置を測定し、メモリに記録する新しい方式によるシステムを開発した。

平成13年度以来、順次改良を重ねてBGDL, BGDL-II, BGDL-II'を開発してきたが、平成15年度に最終的に完成されたBGDL-II'は、GPS信号受信用パッチアンテナ、18チャンネルGPS受信機、タイマ、メモリ、バッテリー、30m耐水の筐体からなり、重量67gである。これにより、あらかじめ設定されたスケジュールに従って自動的に最大600回の位置測定が行える。

本研究では、開発した機器の性能を実証するための国内での種々の実験のほか、米国、ニュージーランド、英国の研究者の協力を得て、それぞれ、ガラパゴス諸島におけるWaved albatross, ニュージーランドオタゴ半島におけるRoyal albatrossおよびチャタム諸島におけるChatham mollymawk, 南米サウスジョージア島におけるGrey-headed albatrossおよびWandering albatrossの追跡実験を行った。その結果、BGDL-II'では多くの実験において飛行中ですら欠測率が10%程度であった。時に起る欠測率の大きい場合は、明らかに機器の取り付け方法に問題があると思われる。BGDL-II'に至って測定精度、信頼性、操作性などの機器の性能は十分実用レベルに達したと判断される。

本方式の特徴は、信号の送信を一切行わないことにより、機器の小型・軽量・低価格化を達成したことであるが、そのため位置データの取得に鳥の再捕獲・機器の回収が必要となる。この点が各種の応用において根本的な制約となる場合も多いので、特定小電力方式により機器からデータを送信する機能の付加に関しても検討を行い、性能評価機の作成を行った。

〔キーワード〕 渡り鳥保全、渡り鳥追跡、GPS、自動位置測定、アホウドリ

1. はじめに

近年、非常に広い範囲を移動する渡り鳥の渡り経路を研究するために人工衛星を用いる技術が導入され、これにより渡り鳥の保全を目指す研究が飛躍的に進展した。しかしながらこの方法には、機器が高価であること、衛星回線使用料が高額になること、測定精度が十分でないこと、測定周期の設定の自由度が小さいこと、欠測率が高いことなど、種々問題点が指摘されてきた。

そこで本研究では、GPS(全地球測位システム)衛星からの信号受信による位置測定と、測定データの記録・蓄積を基本とする長期自動位置情報収集システムを開発し、主にアホウドリを対象として実証実験を行った。

以下本報告では、製作した試作機の概要、テスト結果、アホウドリを対象とした国際共同実験などについて述べる。

2. 研究目的

上述のように、本研究の目的は、従来の衛星を用いた渡り鳥追跡システムの持つ欠点を克服した代替システムを開発し、これにより従来のシステムでは不可能であった多数の個体の正確な移動経路を同時に観測するなどして、渡り鳥の保全研究に役立てることである。最終年度の平成15年度には、それまでに開発してきた試作機に、これまでのテスト、使用経験を基にした改良を加え、実用レベルの信頼性のある機器を完成することを目標とし、それを達成することができた。このことは、世界各地のアホウドリを対象とした実験によって示された。さらに、今後の実装に向けて、重量の増加を最小限に抑えつつ限定された送信機能を付加する方法についても検討し、評価機を試作した。

3. 機器の概要

(1) 設計方針

衛星使用料の問題を回避するため、測位にはGPSシステムを用いることとした。また、対象とする鳥の移動距離や習性、さらにはその時々の研究目的に応じて一日あたりの位置測定回数や観測日数を自由に設定できるようにするために、タイマを内蔵し、実験に先立ってそのパラメータを設定できるようにした。さらに、機器の重量および価格を低く抑えるために、当面は測定・記録したデータの送信機能は付加しない試作機を製作することとし、位置データの回収は、鳥の再捕獲・機器の回収によることとした。これにより、安価かつ軽量の鳥搭載機器を作成できるかわり、リアルタイムでのデータの取得ができない、再捕獲が困難な鳥種には適用できない、などの制約が発生する。そのため、上記基本方式の有効性が証明された後、データ送信機能の付加について検討することとした。

(2) 機器の概要

最終年度には、18チャンネルGPS受信機・パッチ型GPSアンテナ・タイマ・メモリ・バッテリー・筐体からなる、サイズ55×40×25(mm)、リチウムバッテリーを含む総重量67gの試

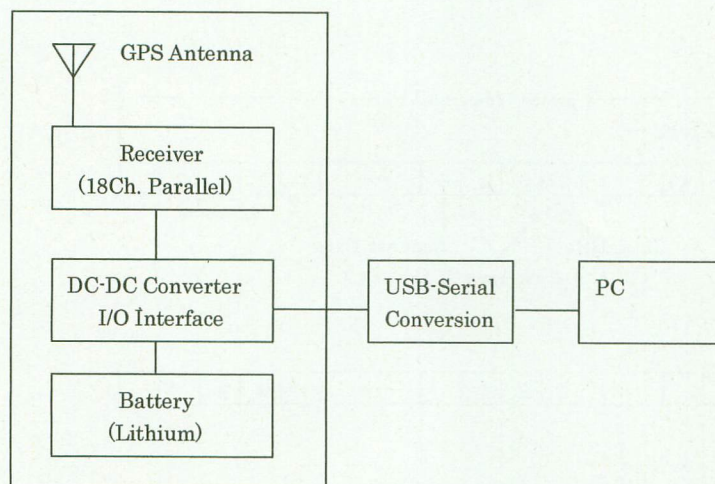


図1 BGD-L-II⁺の構成



図2 BGD-L-II⁺の外観

作機BGDL-II⁺を製作した(図1, 2)。電子機器部の変更により, 前年度の試作機BGDL-IIより1.5gほど重量が増しているが, 性能は格段に向上している。筐体は, アホウドリなどの海鳥を念頭におき, 3気圧防水とした。データ記録用メモリ容量は約6キロバイトで, 最大600個の, 1/10000分までの緯度・経度と高度(m), 秒までの測定時刻を記録できる。BGDL-II⁺においては, 受信スケジュールを改良することにより, これまでと同じバッテリーで600回以上の測定が可能となったので, 各回の実験における最大測定回数はこのメモリ容量によって制限される。測定スケジュールは事前にコンピュータから設定できる。機器は測定開始35秒後に測定値が得られていれば受信を終了し, そうでない場合は30秒間だけ受信を延長する(図3)。

本機器の価格はARGOSシステムのものの数分の一に抑えられている。

(3) 性能テスト結果

① 測定の信頼性と精度

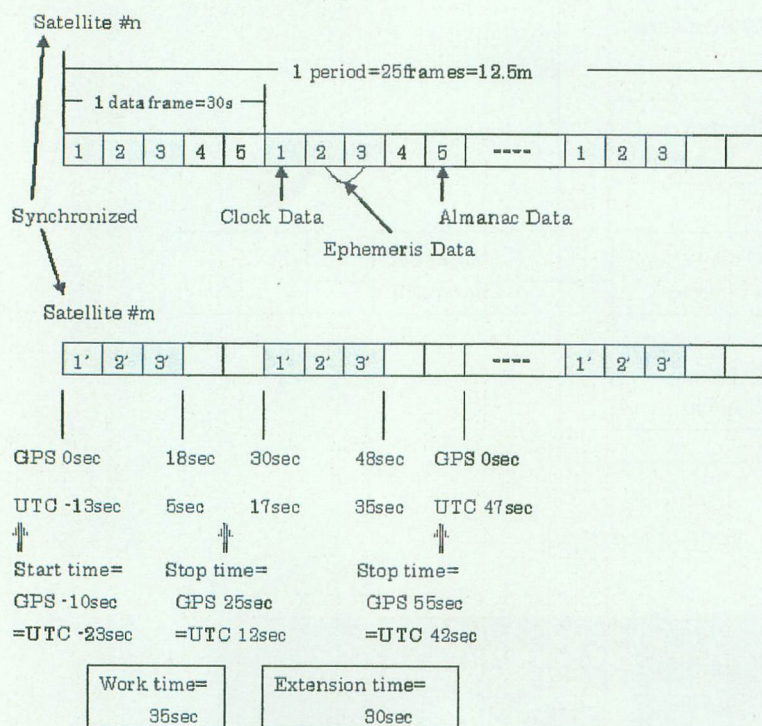


図3 受信機の受信タイミングとGPS衛星の送信タイミング

図4は、本機器による測定精度を調べるために行った実験の結果である。この実験は、2002年8月に2台の機器(BGDL-II)を数m離れた地点に設置し、4分間隔で各々400回測定した結果を示したものである。このときはWork time=50秒とした。すべての測位に成功しており、各機

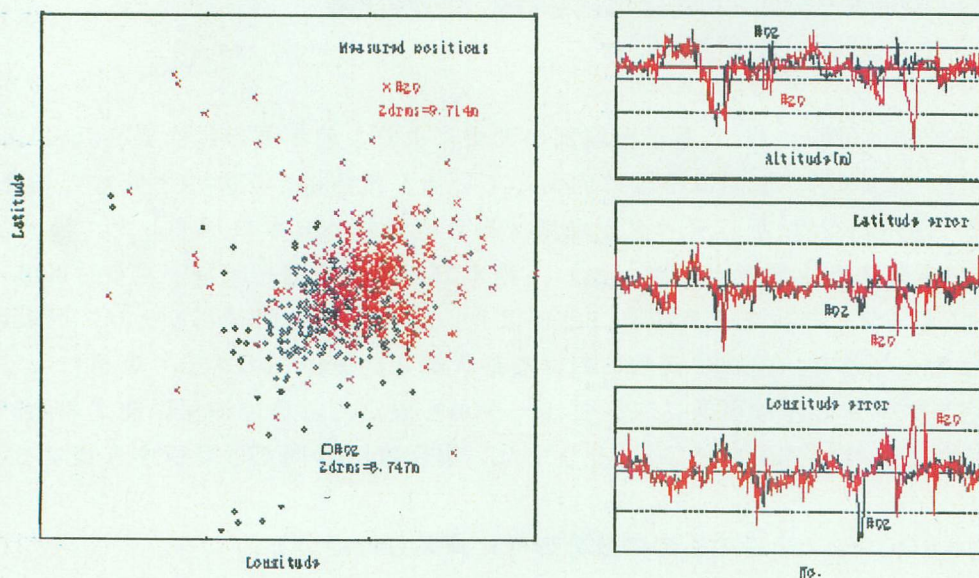


図4 2固定点における400回の測定結果

器の2drms値は約8.7m, 9.7mであった（測定値の98%ほどは真の位置から2drms値を半径とする円内に入ることが知られている）。また、両機器の測定（緯度、経度、高度）誤差のうちゆっくり変動する成分には強い相関があるが、より速く変動する誤差には相関はみられなかった。これは、それぞれの誤差の原因、すなわちゆっくり変動する衛星情報に含まれる誤差などと早く変動する受信機雑音などの性質による。これらはARGOSシステムによる場合の標準的な誤差の数十分の一ないし百分の一のオーダーである。

また、実際の使用状況における精度をARGOSのそれと比較するため、2003年2月、オホーツク海の流氷上にARGOSブイとBGDL-II⁺を置いて漂流実験を行った。両システムにより得られた軌跡の一部拡大図を図5に示す。BGDLは1時間間隔のすべての測位に成功した。一方、ARGOSブイは90秒周期で信号を送信するように設定されたが、時に非常に長い間欠測し、測位成功の間隔は最長3時間26分まで、まちまちであった。図から、両者の精度の差は歴然としており、追跡の目的によってはARGOSシステムの精度では不十分な場合も多々あると思われる。

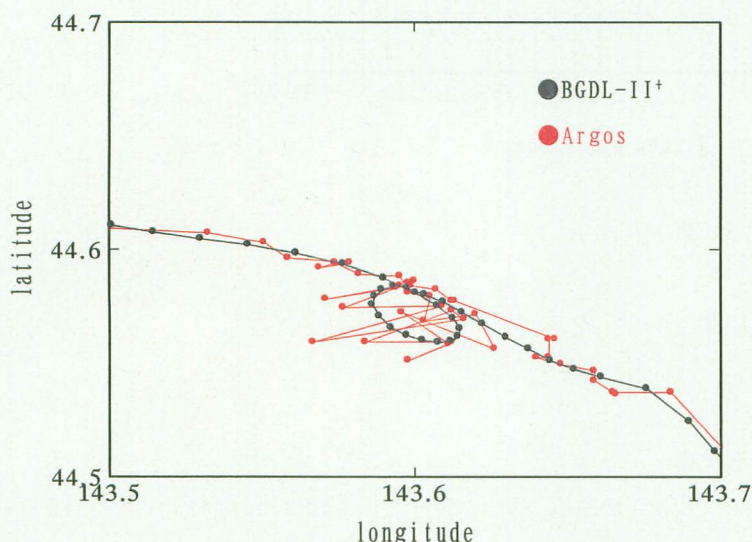


図5 ARGOSシステムとBGDL-II⁺による流氷軌跡の比較

BGDLは高速移動中でも十分な測定性能を持っていることが実験により示されているが、ここでは詳細は略す。一方、将来の森林性の鳥への応用可能性を探るために、各種森林中での測定実験も行ったが、非常に密な杉・檜林の場合を除いては良好な性能を示した。さらに、高度に関しては数十mの誤差が認められ、応用によっては精度不足であることがわかった。

② ホットスタート率

GPSの受信方式には、何の予備知識もなしにスタートするコールドスタート、事前にアルマナックデータ（全衛星の大まかな軌道情報）を持つウォームスタート、事前にさらにエフェメリスデータ（各衛星の精密な軌道情報）も持つホットスタートの3種があり、本機はアルマナックを事前にPCからインストールしておくことにより、ウォームスタートを基準方式としているが、4時間以内に受信されたエフェメリスデータは古いもので代用するように設計してあるので、測定間隔が短いときにはホットスタートをし、これによりバッテリーの節約が

出来る。ウォームスタートでは測定までに35秒ほどかかるが、ホットスタートでは10秒程度である。そこで、work time=10秒、extension time=30秒に設定し、測定間隔を変えてホットスタート率を調べた結果を図6に示す。図より、1時間程度以下の間隔で測定を行うのなら、このような受信スケジュールを採用してバッテリーの節約を図ることが可能であることが分かった。しかし、上述のように現在のBGDL-II+では最大測定回数程度を規定しているのはバッテリー容量ではなくメモリ容量なので、この受信スケジュールは現在のところ採用していない。

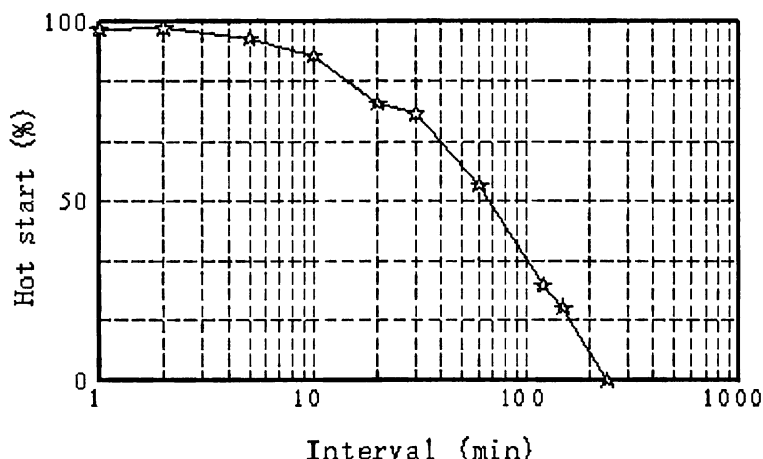


図6 ホットスタート率

4. アホウドリ他の追跡実験結果

(1) アホウドリの追跡実験

① ガラパゴス諸島における実験

ガラパゴス諸島イスパニョーラ島(1°23'S, 89°37'W)でWaved albatross(翼開長約240cm, 体重約4kg)の調査を行っている米国Wake Forest大Anderson博士の協力により、筆者らは2000年にBGDL-Iと名づけた最初の試作機(重量約100g)のテストを行い、改良のための種々のデータと経験を得た。2001年6月には、依然測位失敗率は高かったものの、営巣地から南米ペルー海岸を往復する4000kmに及ぶ採食旅行の追跡に成功した。

その後、BGDL-II, BGDL-II+と改良を重ね、現在では鳥の飛行中でも100%に近い成功率で追跡を行えるようになっている。表1は2003年7月に行われた21回の実験における測位失敗率(予定された測位回数のうち、測位に至らなかった回数の割合)である。失敗なしの場合も見られ、全平均失敗率は3.6%であった。以下に示す他の場合も同様であるが、失敗率は島にいる間も旅行中もほとんど差が無い(表3参照)。また、失敗は連続的に起ることが多く、これは鳥が岩陰などにいることによると思われる。この21例において、extension timeを使用して測位に成功した回数は239回で、全測位数の5.6%に過ぎない。これらの追跡結果のうちから適当に選んだ6ケースの軌跡を図7に示しておく。この時には、島の近傍で採食行動を行う個体の採食場の調査を目的とし、そのような個体を選んで機器を装着した。図8は機器の装着の様子である。

表1 Waved albatrossの追跡における測位失敗率

ID	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
69565	60	112	16.96
69560	60	92	6.52
61555	30	321	5.61
97552	30	244	5.33
32563	60	159	5.03
78561	90	61	4.92
31553	30	372	4.57
72560	60	160	3.75
32554	30	333	3.60
64556	60	164	3.05
69552	30	243	2.88
62555	60	144	2.78
79548	60	165	2.42
77567	60	124	2.42
77556	60	253	2.37
78547	60	291	1.37
82550	30	329	1.22
72544	60	255	0.78
73541	60	286	0.35
65557	60	74	0.00
77548	60	123	0.00
Total		4305	3.62

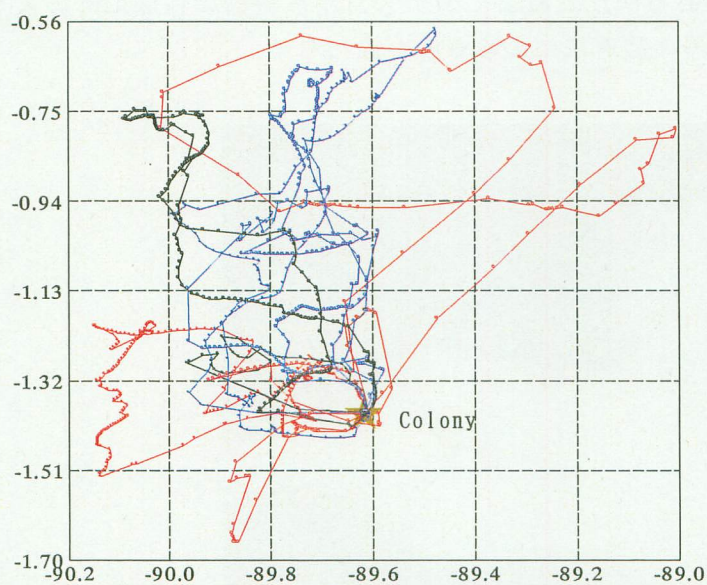


図7 ガラパゴス諸島における6追跡例



図8 Waved albatrossへの機器の装着状況

② ニュージーランドオタゴ半島における実験

2002年12月、ニュージーランドのタイアロア岬のコロニー(45°40'S, 170°44'W)で、同国漁業省Waugh博士の協力を得て、Royal albatross (翼開長約330cm, 体重約9kg)の追跡実験を行った。図9にこのときの機器の装着状況を示し、測位失敗率を表2に、適当に選んだ5ケースの軌跡を図10に示しておく。図より、鳥のチャタム諸島以遠までの往復2000kmにも及ぶ採食旅行の様子が詳細に分かる。同様のデータはこれまでもARGOSにより得られてはいたが、測定点数、精度の上でBGDLの方が格段に優れている。現在共同研究者らがデータの分析に取り組んでいる。全平均失敗率は約24%であるが、中には10%以下の実験もある。一方50%以上の失敗率を示した場合もあるが、これまでのテストから機器の性能にそのような差は認められないので、その差は機器の装着法によるものと思われる。

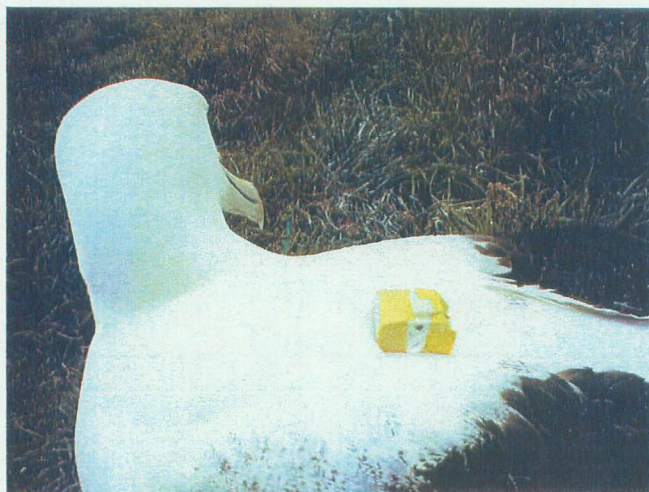


図9 Royal albatrossへの機器の装着状況

表2 Royal albatrossの追跡における測位失敗率

ID	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
73005	60	49	84.39
59007	60	212	40.95
78005	60	294	32.41
77005	60	113	31.93
62007	60	256	28.89
74007	60	131	20.12
88005	60	479	19.90
69007	60	307	19.84
75005	60	239	17.01
87007	60	121	15.97
70005	60	127	13.01
61005	60	274	12.46
84005	60	211	12.45
82007	60	147	11.45
80005	60	221	8.68
71005	60	205	5.09
72007	60	371	3.13
Total		3757	23.61

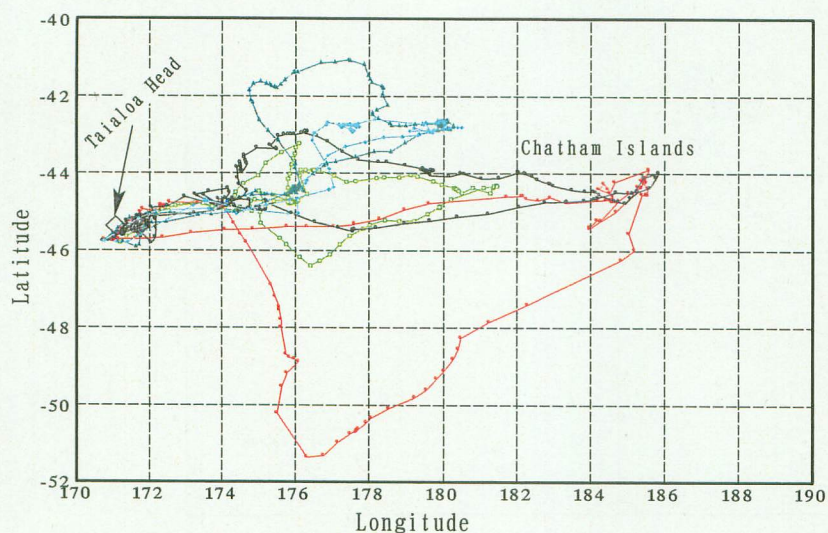


図10 タイアロア岬における5追跡例

本実験により、同海域における漁業とアホウドリの保護との関係に関する貴重な知見が得られ、現在論文”Foraging of Royal Albatross from Otago Peninsula and relationships to fisheries”, S. Waugh, D. Filippi, A. Fukuda, M. Suzuki, H. Higuchi, A. Setiawan, L. Davis の投稿準備中である。ここでは論文より、図11,12,13を示しておく。

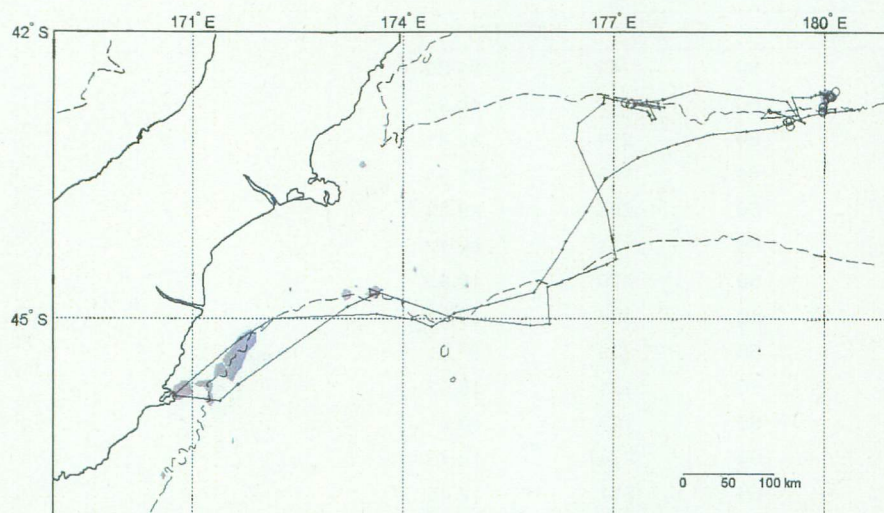


图 11 Density of all study Royal Albatross foraging from Otago Peninsula.

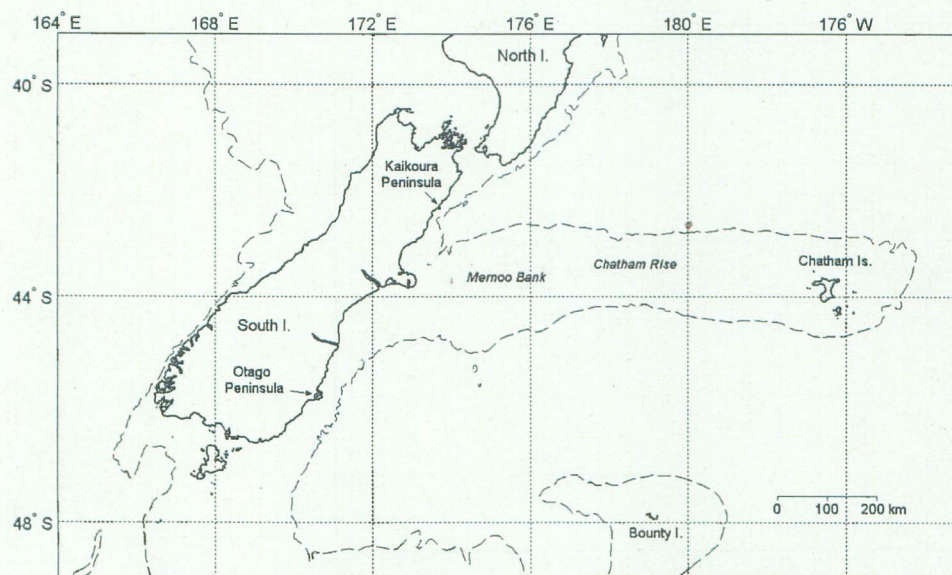


图 12 Density of all bird's usage in cells also used for fishing, showing time spent cumulatively for 18 birds.

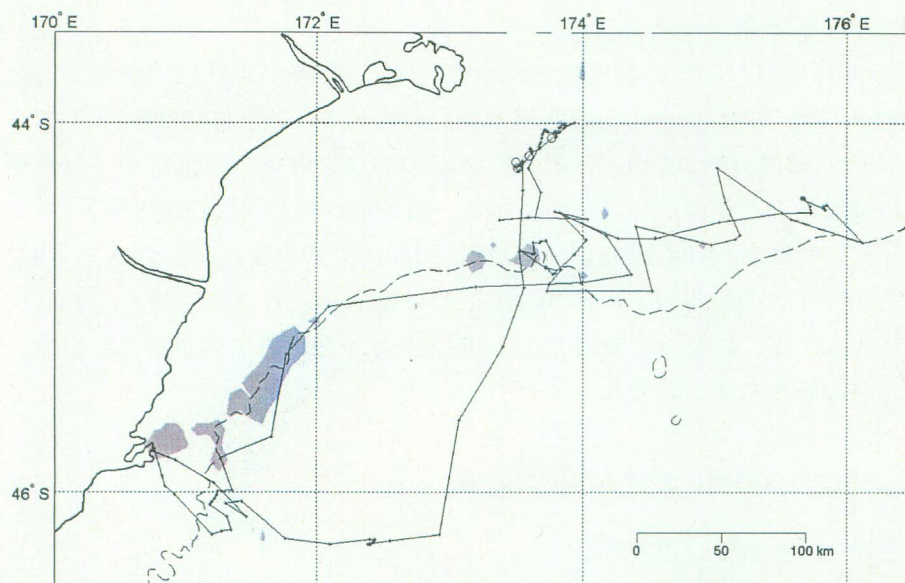


図13 Track of bird 71 foraging during 6.1 days.

③ チャタム諸島ピラミッドにおける実験

ニュージーランド環境保全局（ニュージーランド，ウェリントン）の前研究員Christopher Robertson博士の研究グループと，チャタム諸島ピラミッド（44°26'S, 176°14'W）での共同研究を平成14年度より開始した．同島はすべて絶壁からなる絶海の孤島のため，上陸・実験の成否は気象条件に大きく左右される．そんな中，2003年12月には2個の機器によるデータ取得に成功した．その軌跡を図14に示す．

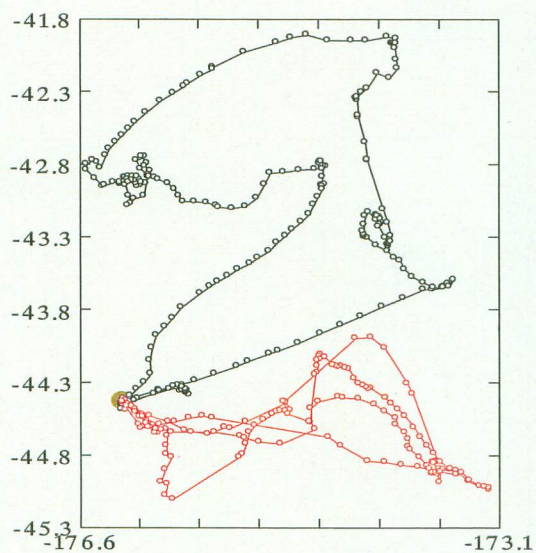


図14 ピラミッドにおける2追跡例

④ サウスジョージア島における実験

サウスジョージア諸島バード島のコロニー(54°01'S, 38°04'W)では、英国BASのPhillips博士らにより、Gray-headedおよびWandering Albatrossの追跡実験が行われている。表3は2002年10月に行われたGray-headed albatross(翼開長約200cm, 体重約3.3kg)の追跡失敗率で、飛行中・営巣中の失敗率も示したが、両者にはほとんど差のないことがわかる。鳥の飛行経路を図15に示す。

同島では、2003年3月にも多数のWandering albatross(翼長約300cm)の追跡が行われた。表4に失敗率、図16に軌跡の12例を示す。この結果は、オタゴ半島におけるものよりさらに優れており、失敗率は全平均で10%ほどである。ここに至って初めて、BGDL-II+は十分実用に供することができる性能と信頼性を持つことが実証されたといえる。

表3 Gray-headed albatross追跡における測位失敗率

Overall			
ID	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
1147616	45	439	13.07
1320601	60	296	11.38
1318273	45	344	4.71
Total		1079	10.08

Trip			
ID	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
1147616	45	210	13.22
1320601	60	203	12.88
1318273	45	277	4.15
Total		690	9.69

Nest			
ID	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
1147616	45	229	12.93
1320601	60	93	7.92
1318273	45	67	6.94
Total		389	10.78

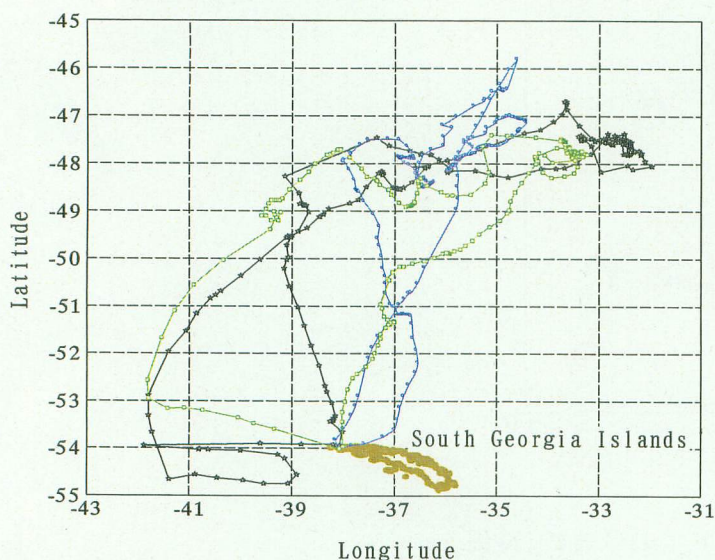


図15 サウスジョージア諸島におけるGray-headed albatrossの3追跡例

表4 Wandering albatrossの追跡における測位失敗率

ID	間隔(分)	Fix点数	失敗率(%)
M567	15	280	27.65
M568	15	139	26.84
M531	15	362	25.36
M557	15	378	21.74
M565	15	402	17.45
F561	15	581	14.18
M539	15	578	14.12
F569	15	586	13.82
M534	15	567	13.17
F546	15	258	11.95
F554	15	507	10.90
F543	15	358	7.97
M551	15	256	3.40
F532	15	357	3.25
F538	15	570	3.23
M545	15	468	3.11
M559	15	284	3.07
F537	15	600	3.07
F539	15	321	3.02
M532	15	364	2.93
M556	15	354	2.75
F562	15	600	2.44
M547	15	600	2.44
M550	15	600	1.96
F545	15	354	1.94
M560	15	389	1.02
M566	15	568	0.87
F568	15	391	0.51
M561	15	600	0.33
F535	15	361	0.28
Total		13033	8.089

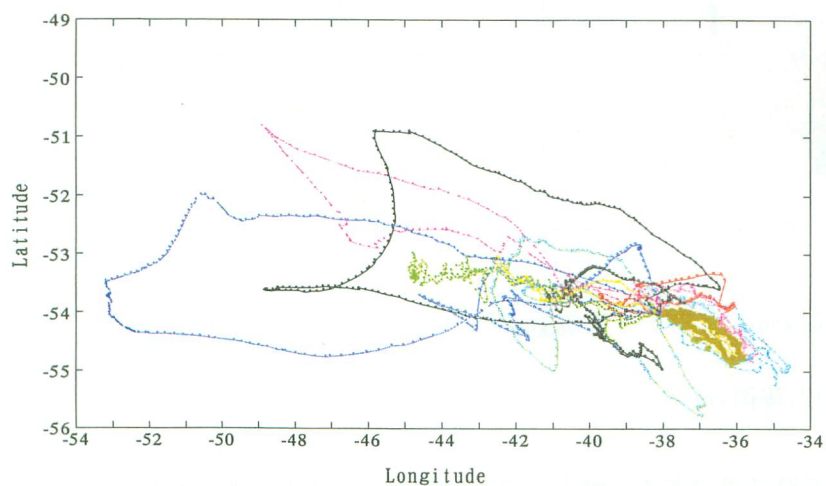


図16 サウスジョージア諸島におけるWandering albatrossの12追跡例

(2) 鳥以外の移動対象への応用例

①チベット高原における放牧ヤクの追跡実験

2003年8月には、宮崎大農学部長谷川助教授の協力を得て、中国青海省玉樹州の青藏高原(32°51'N, 96°53'E)の放牧ヤクを用いて、本機器の哺乳類への適用実験を行った。実験地は上空が十分に開けている上、図17に示すように、機器は2つの角の間に固定されたので、受信状況は極めて良好であり、総計14,000回ほどの測位において失敗率は約2%と極めて良好であった。測定間隔は一部1分としたが、大部分は2分であり、かなりの測位がホットスタートであったと思われる。extension timeもほとんど使われていなかった。



図17 ヤクへの取り付け状況

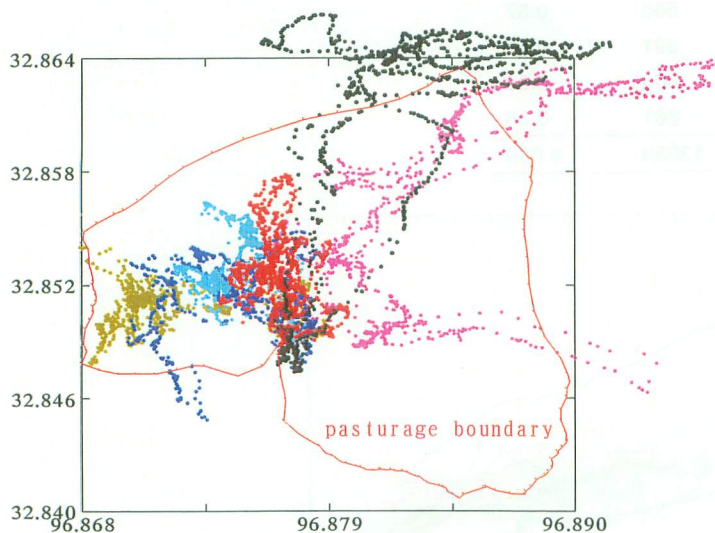


図18 放牧ヤクの追跡例(1)

図18は8月17日における15頭の追跡結果である。図中の実線は子どもの背中に機器を背負わせ(図19)て、放牧地の周囲を一周させた結果であるが、ヤクの行動は一部、境界を越えているこ

とが分かる。また、この実験では測定の初期にこれまでにない大きな誤差を示す機器がいくつかあったが、その原因（マルチパスか）については今後の検討に待ちたい。



図19 少女への取り付け状況

2004年1月には別の放牧地(36°35'N, 101°24'E)で、同様の実験を行った。軌跡の例を図20に示す。冬季は柵内で放牧されているが、柵内のどの部分をよく利用しているかなどが、図からよくわかる。

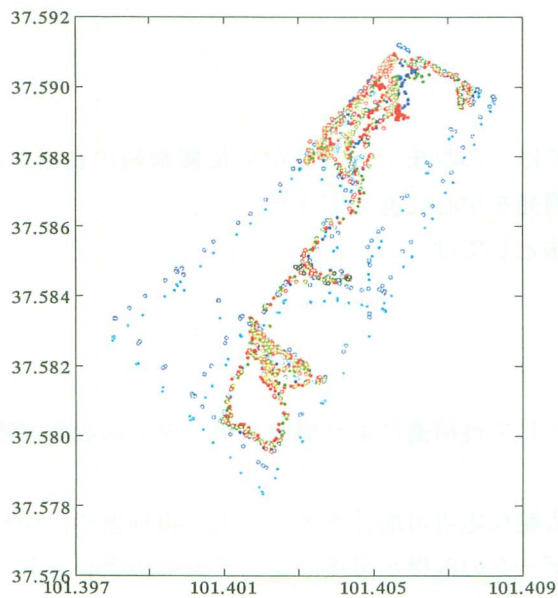


図20 放牧ヤクの追跡例(2)

②アラスカマッコール氷河の流速観測実験

BGDLの全く新しい応用として、氷河の上・中・下流や、中央・両端などにおける流速を安価に測定・比較することが、北見工大の高橋教授から提案された。BGDLの測定精度は2drmsで10m程度なので、年間10m程度の流速を測定するのは困難であるが、各地点に多数の機器を配置して、それらの測定値をかなり長時間にわたって平均すれば意義ある値が出る可能性もあるので、2003年8月にアラスカマッコール氷河上に1台が試験的に設置された(図21)。低温下での動作状況、バッテリー消費などについても調査したいからである。機器は1年間放置したのち、2004年8月に回収・調査される予定である。



図21 アラスカマッコール氷河での設置状況

5. 送信機能の付加に関する検討

(1)装置

GPSを用いた渡り鳥追跡システムについては、これまで、行動中の位置情報の長期にわたる周期的自動収集と蓄積を行う小型軽量の機器の開発を中心に進めてきた。

このようにして蓄積されたデータの回収法としては

- (1)再捕獲による機器の回収
- (2)タイマーによる機器の切り離し・回収
- (3)通信による読み出し

などの方法を検討してきたが、第一段階として再捕獲により機器・データの回収が可能な応用に向けての試作品開発を進めてきた。

しかし、将来の各種の鳥や野生動物への広範な応用可能性を考えると、再捕獲や、切り離した機器の発見・回収が困難な対象であってもデータの取得が可能なシステムへのグレードアップが望まれ、第二段階として通信機能の付加を検討してきた。

ここではまず、GPSユニットからのデータ伝送手段に関する通信方式について検討する。

*GPSユニット

データ伝送の為に下記の機能を加える

- ・時計機能により指定した年，月，日の時間以降のある期間内でGPSの測位データと目標位置が合致した場合のみ送信部を起動しデータを送出する。
1日あたりの送信回数の選択，送信周期の選択，設定位置のエリア選択
- ・各GPSユニットは時分割制御で同時送信によるデータ受信のロスを防ぐ。

*受信処理部

以下の機能を有する

- ・受信処理部はシンプルな構成とし，低消費電力，小型軽量を計る（PCにとらわれない）。
- また，正常動作の可否を判定できる表示を組込む。
- ・受信結果はメモリーカードに記録しデータ処理部で再生できる。

*データ処理部

- ・受信したデータはFDDまたはHDDに自動保存することができる。
- ・メモリーカード内のデータ収集ができる。
- ・地図と編集データをリンクして表示することができる。
- ・編集、サポート機能を有し市販PCで対応

(2)使用電波方式

次に，データの送信法として，まず考えられる微弱電波による方式を採用するとした場合，周波数322MHz以下は3mの距離で500 μ V/mの許容値だがその周波数から10GHzまでは35 μ V/mの許容値となり，小型アンテナが使用できなくなる（400MHz帯のアマチュア無線向けアンテナが使用できない）。従って，144MHz付近を利用することになる。

一方，電波法・機器のサイズなど種々の項目を総合的に検討した結果，とりあえず「テレメータ用及びテレコントロール用無線設備」RCR STD-16の標準規格に基づく特定小電力システムの一つである自動車用キーレスシステムを基にしてシステムを構築することとした。同システムの主な規格は以下の通りである。

周波数：400MHz帯

占有周波数帯域幅：8.5KHz以下，8.5KHz以上16KHz以下（1mw指定周波数，3sec
の送信）

送信電力：1mw，10mw

送信時間：1mwの場合3sec，10mwの場合40sec

休止時間：2sec

変調方式：MSK（1200BPS，2400BPS），FSK（1200BPS，2400BPS，4800BPS）

となっている。種々の制約があり利用できるかどうか調査中であるが，例えば

周波数:400MHz帯

占有周波数帯域幅:8.5KHz以下

送信電力:1mW

送信時間:3sec

休止時間:2sec

変調方式:1200bps MSK

と言った方式が考えられる.

(3) 通信手順

1測定データは, タイムスタンプ2バイト, 測位情報6バイト, 計8バイトである. 従って, 例えば1日2回の測定値を1年間蓄積すると5.84KBYTEとなる. ただし, 鳥の位置・姿勢によっては欠測となる. 測定の周期, 開始・停止日時はあらかじめ設定可能である.

本通信システムは, 重量・サイズの点で, 鳥の側に厳しい制約があるので, 鳥側には受信機能は持たせず, 送信のみの単向方式をとることとした. 従って, 通信プロトコルと言えるほどの手順を組み込むことはできず, パケット構造及び繰り返し送信パターンについて検討を要する程度である. なお, データ送信のためにはGPS測定後の残電池容量を用いるので, 送信回数に厳しい制約が課せられる場合も多いであろう.

以上の点を考慮して, 図1のようなパケット構造を用いることとする.

鳥に装着した通信装置は, GPSからの位置情報とタイマーによる時間情報の両者に関してあらかじめ設定された条件が満たされたとき, 送信を開始する. 送信は, 図の大パケットを送信後2sec休止し, 次の大パケットの送信を行うことを繰り返す.

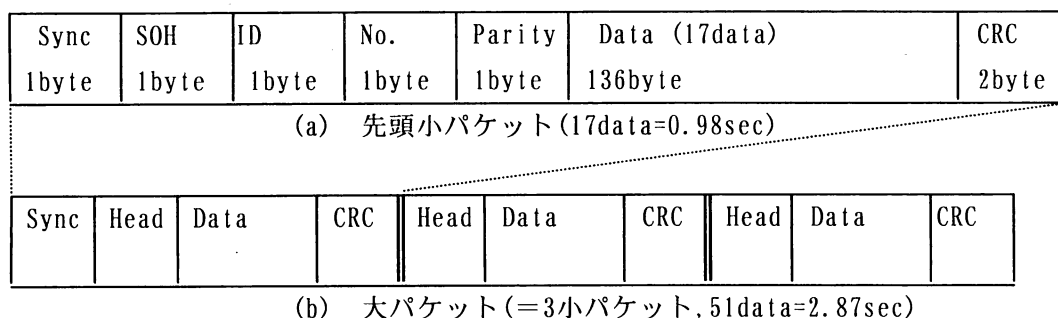


図22 パケット構造

送信すべき全データ数をMとすると, 必要な小パケット数 N_s , 大パケット数 N_B は

$$N_s = \left\lceil \frac{M}{17} \right\rceil, \quad N_B = \left\lceil \frac{N_s}{3} \right\rceil \quad (1)$$

となる. 例えば1日2回の測定を1年間行った場合($M=730$ data), $N_s=43$, $N_B=15$ となり, 全データを1回送信するのに3secの送信を15回(休止時間を含めて73sec)行うことになる. この送信を行った後, ある程度の時間を置いて再度同じ送信を行う. これは, 電池が無くなる前に鳥が受信に都合のよい位置に来て送信するチャンスを増やすためである.

最後にM個のデータの送信順であるが、一部の packets のみが受信できた場合でも鳥の行動経路に関して最大限有用なデータが得られるようにするため、図2に示したように第i小パケット ($i=1 \sim N_s$) は第 $(i+kN_s)$ データ ($k=0 \sim 16$) から構成する。

i	$i+N_s$	$i+2N_s$	-----	$i+16N_s$
---	---------	----------	-------	-----------

図23 第i小パケットで伝送されるデータ番号

(4) 本年度の試作機

以上のような基礎検討を基にして、本年度は特定小電力による下記のような試作機BGDL-II⁺（無線機付）を作製し、通信実験を行った。

図24は試作システムの全体図である。試作機のため、BGDL本体はアルミケースに収納されている。受信機はとりあえず市販のものを用いているが、今後は、ソフトウェアモデムを用いて、各種の新しい復調方式を検討し、送信側における同じ消費電力・同じ送信電力での通信可能距離の増大を目指す計画である。

ホストプログラムの図4の画面のWireless部をSetすることにより、図25の画面に入り、この画面では蓄積データの送信タイミングのための設定を行う。ユニットが送信を行う領域は、図26の画面によって設定する。領域は中心の緯度・経度と半径によって指定され、3か所まで指定可能とした。ユニットは、位置測定によりこの範囲内にあると判断したら、上で設定した時刻に蓄積データを送信する。送信するパケットの構造は3種の中から図27の画面によって設定できる。パケットモード1は上で検討したデシメーション方式によるパケットを送信するものである。

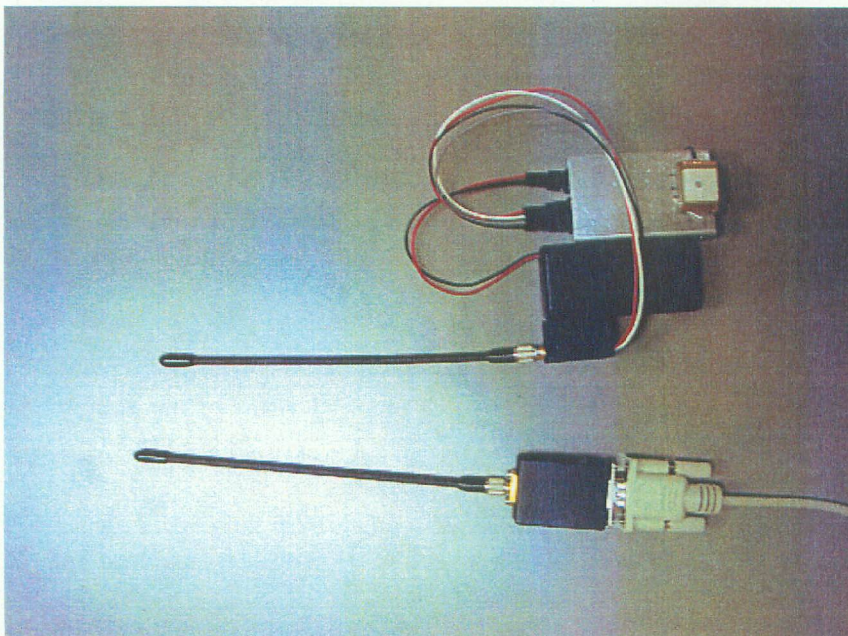


図24 本年度の試作無線機付BGDL（上：BGDL及び送信機，下：受信機）

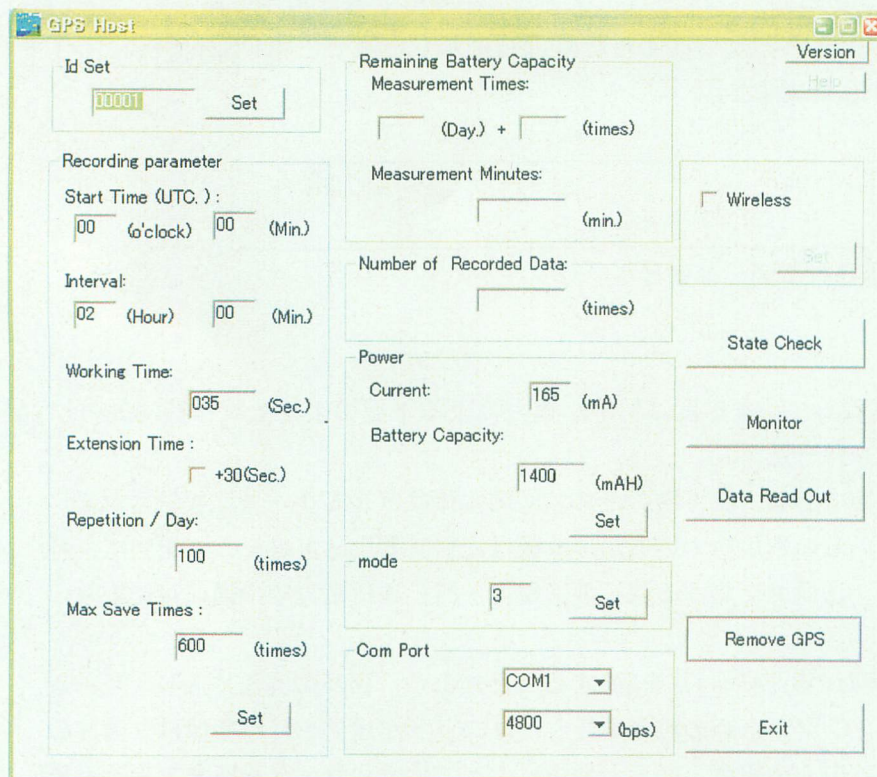


図25 無線機付BGDLのホストプログラムメイン画面

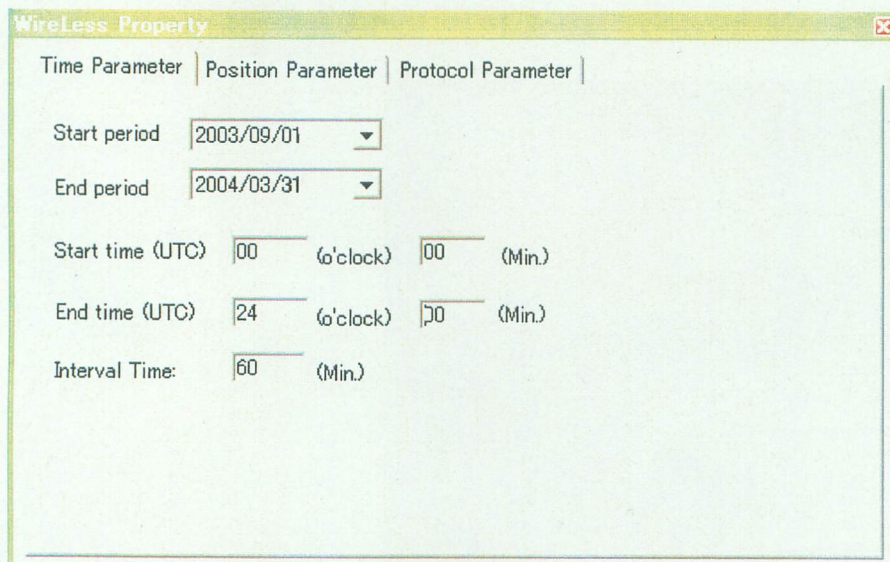


図26 送信タイミングの設定画面

	Latitude	Longitude	R	
☐ Check1	N 36,00.00001	E 139,00.00001	1	km
☒ Check2	N 36,00.00002	E 139,00.00002	1	km
☐ Check3	N 36,00.00003	E 139,00.00003	1	km

図27 送信領域の設定画面

Packet 

図28 送信パケット構造の設定画面

本システムの動作は確認済みであるが、通信可能距離などの詳細な検討は現在実行中である。

6. 国際共同研究の状況

試作機は、その重量(67g)と再捕獲の必要性から、現在まで主にアホウドリを対象として実際の実験が行われている。すなわち、米国Wake Forest UniversityのDave Anderson氏のグループとの

ガラパゴス諸島エスパニョーラ島周辺におけるWaved Albatrossの追跡，ニュージーランドオタゴ大のSusan Waugh氏のグループとのオタゴ半島タイアロア岬周辺におけるRoyal Albatrossの追跡，ニュージーランド環境保全局のChristopher Robertson氏のグループとのチャタム諸島周辺におけるChatham Mollymawkの追跡，そして，英国極地研究所(BAS)のJohn Croxall氏のグループとのサウスジョージア諸島バード島周辺におけるGrey Headed AlbatrossおよびWandering Albatrossesの追跡である．BGDL-II⁺に至って，測定成功率は大幅に上昇し，飛行中・営巣中とも通常90%程度となった．実験員の装着技術の進歩とともに，成功率は日を追って上昇し，ガラパゴス諸島において2003年7月に行われた21回の実験における全平均失敗率は3.6%であった．表5に各実験における測位失敗率(%)を示す．チャタム諸島での実験に用いた機器は調整不足な点があったので，鳥類でないヤクの例とともに参考として示した．表より，タイアロアでの実験を例外として，実験時期とともに失敗率が減少する傾向があることがわかる．一方，アホウドリほどの大きさがあれば，鳥の平均重量には関係ないようである．

表5 BGDL-II⁺による測位失敗率

実験時期	場所	実験数	失敗率(%)	鳥の平均重量
2002.10	バード	3	10.1	3.3kg
2002.12	タイアロア	17	23.6	9kg
2003.03	バード	30	8.1	8kg
2003.07	ガラパゴス	21	3.6	4kg
2003.12	チャタム	2	40.3	?
2003.08	青海	32	1.7	

今後の，渡り鳥以外への応用を探るため，本年度は中国青海省玉樹州の放牧ヤクの追跡実験，およびアラスカのマッコール氷河の流速測定実験も行った．ヤクの追跡は100%近い測位成功率を示した．一方，氷河実験は1年後に機器を回収して，低温での動作状況を確認する計画なので，まだデータは得られていない．GPSの測位誤差と氷河の流速から，実際の測定には複数台の機器からの複数回の測定値を平均するなどの手法が必要と考えられる．

7. 今後の展望

本報告に示したように，BGDL-II⁺に至って初期の開発目標は達成され，世界各地のアホウドリを始めとする研究に実用されている．今後は，より多くの研究対象に適用可能とするため，上記の送信機能の付加に加えて，下記のような開発目標を考えている．

1) GPSチップのグレードアップ化

1. 感度の向上（森の中でも受信できる10dB以上の改善）
2. 動作時消費電力の改善（1/2以下）
3. 待機消費電力の改善（1/2以下）

2) 記録メモリ容量の増加

1. 16MBitのメモリーを搭載しデータの記録に12MBitを使用する
（オフラインDGPSに対応したデータで約1000回，従来の位置データで9万回）

3) 送信部の一体化

1. GPSチップと電源・インタフェースを一体化する

2. 1項と送信部をコネクタで内部接続する
3. 送信アンテナは外部接続用キャップの部分大きくし、組み込む
4. 送信部はオプション扱いを可能にする
- 4) 外部電池の利用
 1. 電池押さえ用キャップを交換し、外部電源入力端子を設ける
 2. 外部電池, 太陽電池の利用を可能とする
- 5) 軽量化への対応
 1. 小型アンテナへの対応（現状品から1/5の軽量化）
 2. 感度が劣化（5dB）するので用途により対応

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表（学術誌・書籍）

＜学術誌（査読あり）＞

- ① A. Fukuda, K. Miwa, E. Hirano, M. Suzuki, H. Higuchi, E. Morishita, D. Anderson, S. Waugh, R. Phillips: "BGDL-II - A GPS data logger for birds", Mem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue, 58, pp.235-246 (2004).

＜学術誌（査読なし）＞

- ① 福田明：マイクロメカトロニクス（時計学会誌）, 46, 4, 1-8 (2002)
「GPSによる渡り鳥の追跡」

＜書籍＞

なし

＜報告書類等＞

なし

（2）口頭発表

- ① 三輪勝二, 前田久昭, 福田明, 樋口広芳, 森下英美子, 鈴木牧夫, 高見澤均:
航海学会航法研究会 (2001)
「移動体位置監視装置」
- ② 鈴木牧夫, 福田明, 樋口広芳, 森下英美子, 三輪勝二, 前田久昭, 高見澤均,
Dave Anderson: 野生生物保護学会P.06 (2001)
「GPSを利用した小型軽量移動追跡機器の開発」
- ③ 福田明, 三輪勝二, 前田久昭, 高見澤均, 樋口広芳, 森下英美子, 鈴木牧夫,
Dave Anderson: 電子情報通信学会総合全国大会B-2-44 (2002)
「渡り鳥調査用GPSデータロガーの開発」
- ④ 福田明: 第10回ウェアラブル情報機器シンポジウム (2002)
「GPSによる渡り鳥の追跡」
- ⑤ 福田明, 三輪勝二, 鈴木牧夫, 樋口広芳, 森下英美子, Dave Anderson:
電子情報通信学会総合全国大会B-2-17 (2003)

「鳥用GPSデータロガーBGDL-II⁺」

- ⑥ A. Fukuda, K. Miwa, M. Suzuki, H. Higuchi, E. Morishita, D. Anderson :
International Symposium on Bio-logging Science, P-24 (2003)
“BGDL-II - A GPS data logger for birds”
- ⑦ 福田明, 三輪勝二, 前田久昭, 平野英二, 鈴木牧夫, 樋口広芳, 森下英美子 : 電子情報
通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会資料, SANE2003-93 (2004)
「移動体追跡用GPSデータロガーBGDLの開発」

(3) 出願特許

- ① 福田明, 樋口広芳, 鈴木牧夫, 高見澤均, 光電製作所 : 「移動体の位置監視システム」,
特願2000-383143, 平成12年12月18日
- ② 福田明, 光電製作所 : 「移動体の位置監視装置」, 特願2003-030401, 平成15年2月7日

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ① 福田明 : ネイチャーインターフェース, 1, 6, 18-19 (2001)
「GPSを使って渡り鳥を追跡する」
- ② 静岡新聞「渡り鳥など追跡システム, GPSで精度アップ」 (14年9月14日夕刊)

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

ガラパゴスなどでまとめたデータが取得された後, 新聞・テレビなどを通じ, 成果の広報・普及に努める.