

移動体追跡用小型軽量 GPS データロガーの開発

代表研究者 福 田 明 静岡大学工学部電気電子工学科教授
 共同研究者 樋 口 広 芳 東京大学大学院農学生命科学研究科教授
 〃 長谷川 信 美 宮崎大学農学部食料生産科学科助教授

1 はじめに

近年、渡り鳥の渡り経路の観察に ARGOS 衛星追跡システムが用いられるようになり、従来の人の目による観察・追跡とは比較にならないほどの進歩を示している。しかし、このすぐれたシステムにも、1) 機器が高価、2) 衛星回線の使用料が必要、3) 時として測位誤差が大きい（数百ないし数千米）、あるいは誤差を保障できない、4) 測位間隔の設定に自由度が少ない、などの欠点がある。

そこで近年、これらの欠点を補うものとして、GPS を基にした鳥類追跡システムの開発も行われるようになってきた^{[1][2]}。しかし、研究者にとっては渡りの経路を知ることが重要なのであって、時々刻々リアルタイムに位置が知りたい場合は多くはないと思われる。そこで筆者らは鳥への装着機器は GPS 受信機とメモリのみとする全く受動的なシステム BGD L の開発を思い立ち、1999年より「GPS を用いた渡り鳥の長期自動位置情報収集システム」の開発に取り組み始めた^{[3]~[7]}。2001年6月には、試作機（BGDL-I）によるガラパゴスアホウドリの営巣地（イスパニョーラ島）から南米ペルー沿岸への往復数千キロに及ぶ採食旅行経路の観測に成功した。

初期のものは、測位成功率が（特に鳥の飛行中には）十分に高くはなかったが、その後の改良により、現在最新の BGDL-II⁺では、アホウドリの飛行中でも90%以上の成功率を示している。BGDL は現在、ガラパゴス諸島^[8]、サウスジョージア諸島、ニュージーランドオタゴ半島^[9]、同チャタム諸島、同スナレス諸島、さらには小笠原諸島で各種アホウドリの追跡に用いられ、測位誤差 10m 程度と良質な大量のデータを経済的に取得している。もちろん、BGDL は渡り鳥のみならず各種移動体の追跡に用いることもでき、現在までに太平洋の海流、オホーツク海の流氷、宮崎県放牧地のウシ、都井岬の野生ウマ、青藏高原の放牧ヤクなどの追跡にも用いられている^{[10][11]}。

以下本報告では、本システムの機器構成と性能を概説した後、代表的な適用例として、アホウドリ追跡の1実験と、氷河流動の観測実験の試みについて紹介する。

2 機器の構成と動作

2.1 機器の構成

図1に示すように、BGDL の移動体装着部分は、パッチタイプの GPS アンテナ、18チャンネルパラレル GPS 受信機、タイマー、メモリ、電池（CR123A）、筐体（約3気圧の耐圧・防水性を持つ）などからなる。BGDL-II⁺の重量は 67g で、内訳は、エレクトロニクス部 16g、アンテナ 10g、電池 17g、筐体 24g である。機器は、約6キロバイトの記録用メモリを持ち、緯度・経度を10'分の桁まで記録する。またメートル単位での高度も記録される。CR123A 電池1個により、800回程度の測位ができ、メモリは600個の3次元位置データを記録できる。図2は最新の試作機 BGDL-II⁺の外観である。

機器は、事前に PC より設定されたスケジュールに従って位置測定を行い、結果をメモリに記録する。機器の回収後、再び PC を接続して蓄えられたデータを読み出す。機器は、必要に応じてメモリクリア・バッテリー交換・スケジュール変更をして、再利用される。

本システムの特徴は、機器からの送信は一切行わず、機器の回収によって位置データの収集を行う点にある。これが機器の軽量化・低コストなどの長所につながっているが、回収が困難な移動体には使用できない。しかし、ある程度の確率で回収が可能なら、本システムによって従来の衛星追跡システムの数十分の一の経費により100

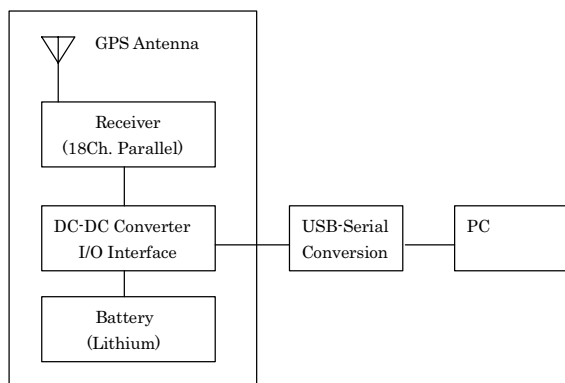


図1 BGD Lの構成

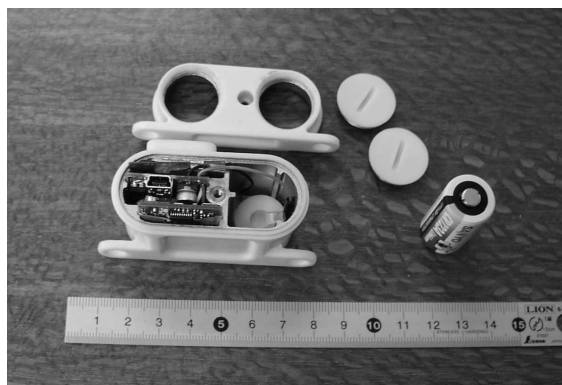


図2 BGD Lの外観

倍程度の位置精度での移動経路調査が可能になる。しかも、位置測定間隔は観察目的に応じて、1分以上24時間以内で自由に設定できる。

2.2 動作原理

実験に先立って、まず機器のイニシャライズを行う。すなわち、アルマナックデータと、その機器が最初に測位を行う予定時刻におけるおおよその緯度・経度（数度程度の誤差は問題ない）がインプットされ、また、PCの持つおおよその現在時刻が設定される。その機器における直前の測位位置・時刻からあまり隔たっていない場合には、この手続きは不要である。次に、毎日の最初の測位時刻と測位時間間隔、必要なら最大測位回数を設定することにより、一日周期の測位スケジュールを入力する。日時には UTC を用いる。さらに、各測定時における動作時間、すなわち、Work time (W), Extension time (E) を設定する。機器は各予定時刻における測定開始から W 後に、3次元あるいは2次元測位が完了していれば受信を終了し、そうでない場合にはその後一定時間 E だけ受信の試みを延長する。この延長時間内では、2次元測位値が得られた時点で受信を終了する。

図3はより詳細な受信タイミングである。スケジュールは UTC に従って立てられるが、うるう秒を用いない GPS 時間は、現在 UT と13秒の差がある。受信機は同期を確立するため、GPS 衛星の各周期の送信開始時刻の

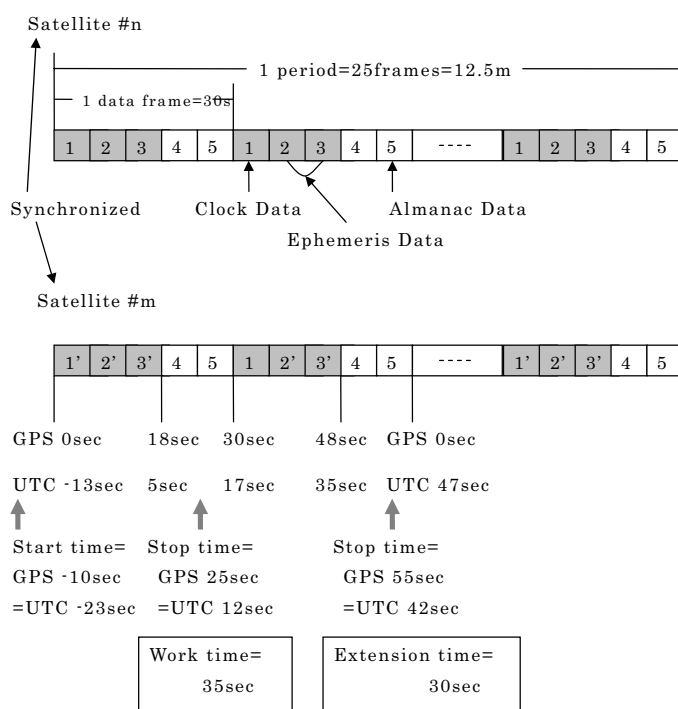


図3 GPS 衛星の送信と BGD L の受信タイミング

10秒前に受信をスタートする。長期にわたる渡り鳥の追跡を主目的としている本機器では、測定間隔は数時間程度を想定しており、従ってエフェメリスデータを受信しなければならないウォームスタートを基準に考えて、 $W=35\text{sec}$ を推奨している。また、最初の周期でエフェメリスデータの受信に失敗した場合に使用する Extension time は、次の送信周期をカバーするため $E=30\text{sec}$ としている。この Extension time 機能の使用・不使用はユーザの選択による。新バッテリーを使用する際にバッテリー容量をインプットすることにより電源管理を行う。すなわち、スケジュール設定の際、機器はバッテリーの残容量による可能な測定回数の推定値を表示し、また残容量が少なくなったら機器は自動的に受信を停止する。

2.3 測位精度

BGDL-II⁺の測位精度は、固定点における多数回の測位実験の結果、2次元位置の 2drms 値は 10m 程度で、通常の GPS 機器と同程度であった^{[5]~[7]}。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4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。ただし、BGDL の高度誤差は時に数 10m に達し、アホウドリのような低空を飛ぶ鳥の観察には精度が十分ではない。

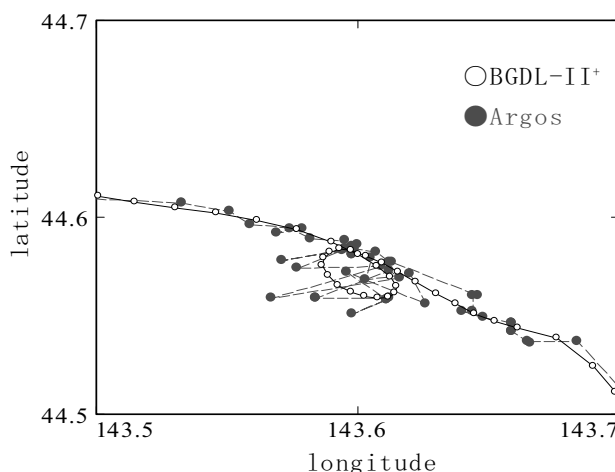


図4 ARGOS システムと BGDL-II⁺による流氷漂流軌跡の比較

3 アホウドリの追跡例

機器の重量と鳥の再捕獲の必要性のため、BGDL はまず各種アホウドリの追跡実験に使用された。表1は、BGDL-II⁺によりこれまでに行われたアホウドリ追跡実験の一覧である。

表中の実験はすべて $W=35$, $E=30$ として行われた。初期の実験では測位率に種々の原因による問題があったが、BGDL-II⁺投入後の測位率にはほとんど差がないので、ここでは代表例としてガラパゴス諸島イスマニョーラ島で行われた Waved albatross の追跡結果について簡単に考察する^[8]。表2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。全平均失敗率は3.6%であった。他の実験の場合も同様であるが、失敗率は営巣中も旅行中もほとんど差が無い。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5に示しておく。図6は機器の装着の様子である。

4 BGDL による氷河流動観測の試み

氷河の流速は一般に極めて遅い（例えば 10m/年）ので、例え DGPS を用いても、測位結果そのものから流動

表1 BGD-L-II+によるアホウドリ追跡実験

時期	場所	主な協力機関
2002-10	サウスジョージア諸島	英国極地研
2002-12	オタゴ半島	ニュージーランド水産局
2002-03	サウスジョージア諸島	英国極地研
2003-07	ガラパゴス諸島	米国 Wake Forest 大
2003-12	チャタム諸島	ニュージーランド環境省
2004-02～04	サウスジョージア諸島	英国極地研
2004-06～	ガラパゴス諸島	Wake Forest 大
2004-11～ 2005-02	オタゴ半島, チャタム諸島, スナレス諸島	ニュージーランド水産局
2005-01	小笠原諸島	森林総研

表2 Waved albatross の追跡における測位失敗率

No.	間隔(分)	Fix 点数	失敗率(%)
1	60	112	16.96
2	60	92	6.52
3	30	321	5.61
4	30	244	5.33
5	60	159	5.03
6	90	61	4.92
7	30	372	4.57
8	60	160	3.75
9	30	333	3.60
10	60	164	3.05
11	30	243	2.88
12	60	144	2.78
13	60	165	2.42
14	60	124	2.42
15	60	253	2.37
16	60	291	1.37
17	30	329	1.22
18	60	255	0.78
19	60	286	0.35
20	60	74	0.00
21	60	123	0.00
Total		4305	3.62

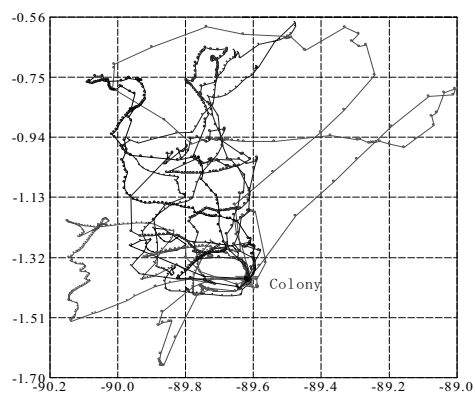


図5 ガラパゴス諸島における6追跡例



図6 Waved albatross への機器の装着状況

状況を考察するのは困難である。しかし、測位結果に適当な平均化操作を施せば、BGDL の単独測位からでも流動を観測できる可能性はある。安価で簡易な BGDL を氷河上多数の地点に設置し長期間連続観測することにより、氷河全体の通年にわたる流動状況を明らかにすることができる。近年は測量用 GPS も用いられるが、流動観測は、毎年夏季の短期間に集中して、しかも少数の地点でのみ行われてきたのである。

4.1 非線形フィルタによるデータの平滑化

筆者らは、測位精度向上のための平滑化操作として、 α -trimmed mean filter を適用することを提案した。これは、データ時系列の連続する $2N+1$ 点を取り、それらを大きさの順に並べ替えたとき中央に来る $2M+1$ 点の平均を取り代表値とするものである (N, M は正整数)。 $M=0$ のときは median filter となり、 $M=N$ とすると単なる移動平均フィルタ (線形) となる。テストの結果、最適な M を用いても median filter の場合との差は小さいが、移動平均フィルタの特性は一般にかなり悪いことが分かったので、以下では簡単のため median filter を適用した例を用いて、議論を進めていく。図 7 は、氷河近傍の固定点における15分間隔600回の測位結果に対するフィルタの適用結果である。谷間状の地形のためか測位誤差がやや大きい (生データの $2\text{drms}=16.6\text{m}$) が、ある程度 N を大きくすれば 2drms 値を 3m 程度にできることがわかる。なお、他の実験により、測定間隔が大きいほどフィルタの効果は大きいことも確かめられている (間隔1時間程度で改善は飽和する)。氷河上では、観測期間 (例えば1年) と BGDL の記憶容量から、1日1、2回の測位となるので、大きなフィルタの効果が期待できる。もちろん、採用可能な N の最大値は、測位間隔と移動体の速度によって決まる。 N, M の選定はオフラインで行われるので、考察目的に沿って種々変更して適用することを考えている。

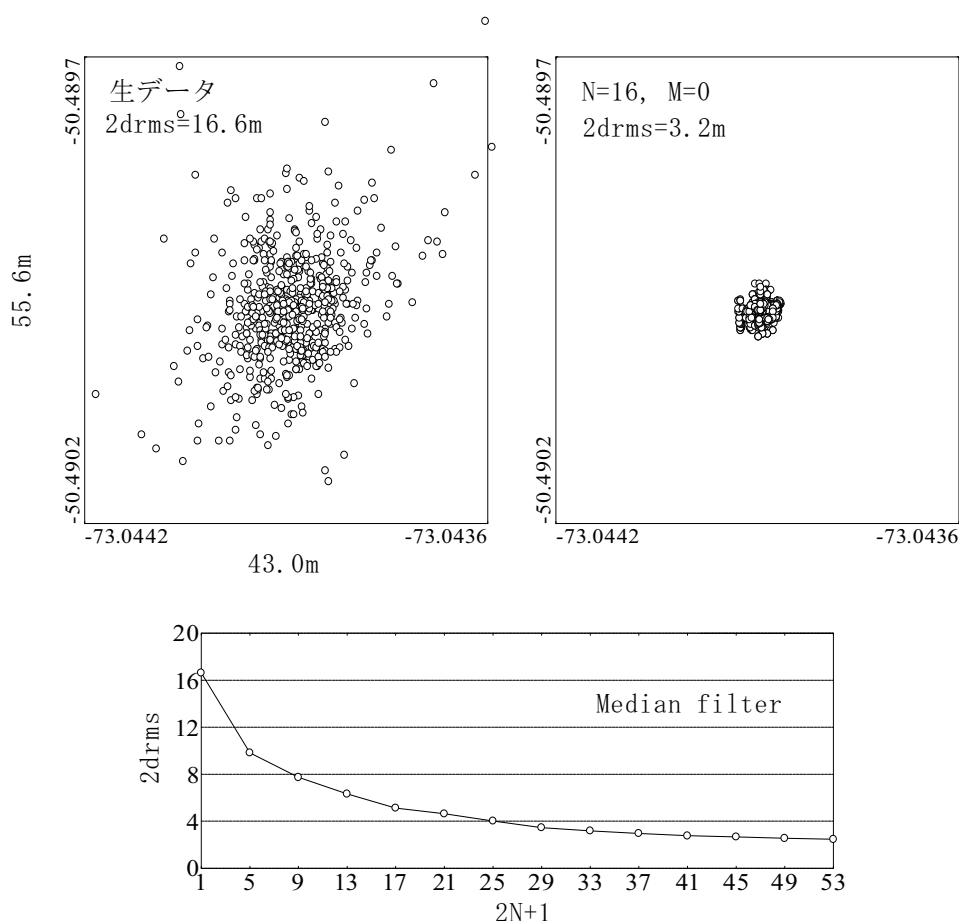


図 7 固定点測位結果 (15分間隔600回) への median filter の適用結果

4.2 ペリート・モレーノ氷河における観測例

2004年11月、南パタゴニアのペリート・モレーノ氷河 (2m/日程度流動する温暖氷河) 中流域に BGDL を設

置し、30分間隔で4日間の予備実験を行った。全測位点は図8内の点のように分布したが、median filter を適用すると図中の実線のようになった。また、図には1日毎に各日の median 値も示した。図より確かに、この氷河は東西方向に約 2m/日の速度で流動しているように見える。そこで、この実験結果を踏まえて、筆者らは2004年12月に、1日1回測位を行う6台のBGDLを氷河上の各所に設置し、1年後に回収することになっている。より流速の遅い氷河に対しては、各測定地点に複数台のBGDLを設置し、各々の1日1回の測位を、時間をずらして行うことも考えられる。

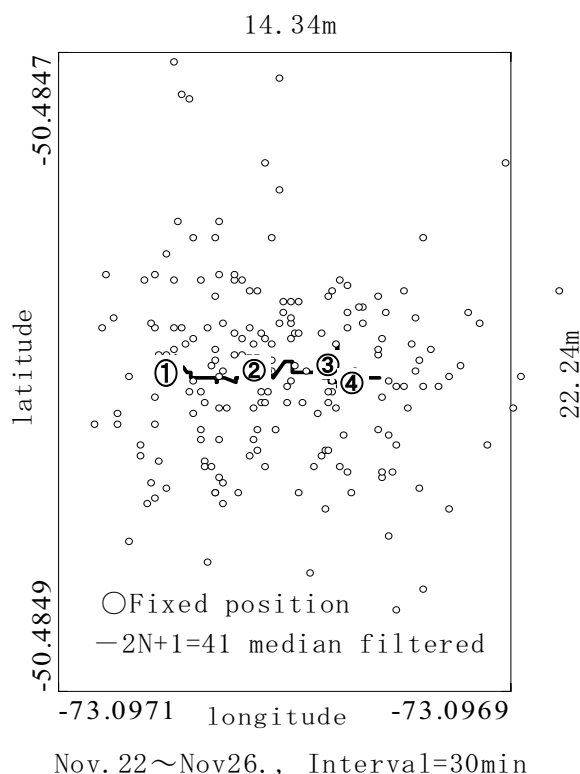


図8 氷河上での観測例（○囲みの数値kは第k日の測位点のmedian値）

なお筆者らは、平滑化と併用してより精度を向上させる手段として、1) 流動観測用に氷河上に設置したBGDLと、近くの陸上に固定したBGDL（場合によっては複数個）との間で座標差方式簡易DGPS方式を適用する、2) DOP値による一種のダイバーシチ方式を適用する、ことを考えている。1)に関しては、測位に際して用いた衛星番号の組をも記憶させ、参照機と組が一致した場合のみを採用してDGPSを行うことを試みたが、精度の改善はほとんど見られなかった。2)に関しては、簡単な予備的考察の結果から、ある程度の効果が期待できるものと思われるので、今後検討を進めていきたい。

5 むすび

本研究によりBGDLの基本機能を実現する技術は確立したと思われるので、今後はより広く各種移動体の追跡に用いていきたい。そのために、1) データ送信機能の付加：数100m、一方向送信のみ、2) 大型高機能機の製作：バッテリー、メモリ容量の増加、3) 小型限定機能機の製作：小バッテリー、使い捨て型、などの計画を持っている。

謝 辞

本研究は、環境省（地球環境研究総合推進費）、財電気通信普及財団、及び財住友財団の研究助成金により実施された。BGDLを用いた各種実験に協力していただいた、Wake Forest大のDavid Anderson教授、ニュージーランド水産省のSusan Waugh博士、BASのRichard Phillips博士、宮崎大の長谷川助教授、北見工大の高橋、榎本両教授、森林総研の川上博士、アルゼンチン南極研究所のPedro Skvarca氏らに深く感謝する。

文 献

- [1] I.Steiner, C.Burgi, S.Werffeli, G.Dell'Omo, P.Valenti, G.Troster, D.Wolfer and Lipp, H, "A GPS logger and software for analysis of homing in pigeons and small mammals", *Physiology and Behavior*, 71, 589-596 (2000).
- [2] H.Weimerskirch, F.Bonadonna, F.Bailleul, G.Mabille, G.Dell'Omo and H.Lipp, "GPS tracking of Foraging albatrosses, *Science*, 295, 1529 (2002).
- [3] 福田, 三輪, 前田, 高見澤, 樋口, 森下, 鈴木, D. Anderson, "渡り鳥調査用 GPS データロガーの開発", 信学総大, B-2-44 (2002).
- [4] 福田, 三輪, 鈴木, 樋口, 森下, D. Anderson, "鳥用 GPS データロガーBGDL-II+", 信学総大, B-2-17 (2003).
- [5] 福田明, "GPS による渡り鳥の追跡", *マイクロメカトロニクス (日本時計学会誌)*, 46., 4, pp.1-8 (2002).
- [6] 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 "Bio-logging Science", pp.235-246 (2004).
- [7] 福田, 三輪, 前田, 平野, 鈴木, 樋口, 森下, "移動体追跡用 GPS データロガー BGDL の開発", 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).
- [8] J.Awkerman, A.Fukuda, H.Higuchi, D.Anderson, "Foraging activity and sub-mesoscale habitat use of waved albatrosses *Phoebastria irrorata* during chick-brooding period", *Marine Ecology Progress Series*, 291, pp.289-300 (2005).
- [9] S.Waugh, D.Filippi, A.Fukuda, M.Suzuki, H.Higuchi, A.Steiawan, L.Davis, "Foraging of Royal Albatrosses *Diomedea epomophora* from Otago Peninsula and relationship to fisheries", *Canadian Journal of Fisheries and Acquatic Science*, (in press).
- [10] 長谷川, 宋, 李, 井戸田, 小藺, 秋田, 園田, 福田, 馮, 周, 周, "中国青海省北部野草放牧地におけるヤク (*Bos grunniens*) の行動", 2005年日本草地学会大会, P39 (2005).
- [11] 長谷川, 宋, 李, 井戸田, 小藺, 秋田, 西脇, 園田, 福田, 索南元旦, 陳, 周, "中国青海省南部野草放牧地におけるヤク (*Bos grunniens*) の行動", 2005年日本草地学会大会, P40 (2005).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
Foraging activity and submesoscale habitat use of waved albatrosses <i>Phoebastria irrorata</i> during chick- brooding period	Marine Ecology Progress Series, 291	2005. 4
Foraging of Royal Albatrosses <i>Diomedea epomophora</i> from Otago Peninsula and relationship to fisheries	Canadian Journal of Fisheries and Acquatic Science	in press
中国青海省北部野草放牧地におけるヤク (<i>Bos grunniens</i>) の行動	2005年日本草地学会大会	2005. 3
中国青海省南部野草放牧地におけるヤク (<i>Bos grunniens</i>) の行動	2005年日本草地学会大会	2005. 3