生態系モニタリングのためのマルチテレメトリシステムの開発

The Development of Multitelemetry sytem for monitoring ecosysytem

傳田正利*　島谷幸宏**　久木田重蔵***　岩本俊孝****

1．はじめに

バイオテレメトリとは野生生物に発信機を装着し、発信機から発信される信号をもとに生物の位置・行動形態を把握する手法である。その歴史は古く1970年代から広く用いられ[1)2)3)]、現在ではヨーロッパ、アメリカを中心に野生生物調査のツールとして一般的に用いられている。バイオテレメトリは、発信機から発信される信号に電波、超音波を用いる方式がある。この中で、野生生物調査に最も多く用いられているのは、発信信号に電波を用いた電波テレメトリである。建設省土木研究所では、従来からの電波テレメトリを改良し、マルチテレメトリシステムを開発した。マルチテレメトリシステムは、複数生物の位置、行動を同時に追跡できる機能を持っている。同時追跡は、電波発信機の発信を遠隔制御で管理することにより可能になる。また、遠隔制御は、観測者が生物の行動を知りたい時だけ発信機を発信させる観測スケジュール管理も可能にする。これらの機能により必要期間以外の発信機の発信をなくし、長期間の発信を可能にしている。また、発信機から発信された電波を複数の受信局により受信し解析することで、発信機の位置を10m×10mの精度で検出することを可能にしている。本報文では、マルチテレメトリシステムの開発とその適用性検討のために行った実河川における野生生物(中型哺乳類)の観測結果について報告し、マルチテレメトリシステムの適用性とその課題、今後の展望について報告する。

2．テレメトリ調査の現状とマルチテレメトリシステムの開発

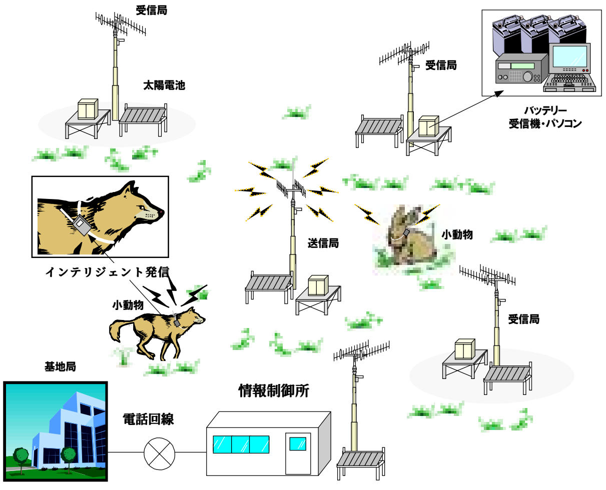
2.1　テレメトリ調査の現状とその問題点

テレメトリ調査は、アメリカ、ヨーロッパを中心に鳥類、陸上哺乳類、魚類等の野生生物の行動形態調査等で多くの実績がある。野生生物の個体位置を特定することにより、野生生物の行動形態の把握には最も有効な方法と考えられている。しかし、従来のテレメトリ調査は公共事業を対象とした環境アセスメント等に用いる場合には多くの問題点を持っている。最も深刻な問題は、テレメトリ調査自体が人力に頼る部分が多い調査手法であることである。現在のテレメトリ調査は、野生生物に発信機を装着し放した後、人間が探査用アンテナ持って野生生物を追跡し位置を特定するという調査方法である。このような調査方法では位置を特定するのに莫大な時間と労力を必要とし、その位置精度は低く、長期間の継続調査は難しい。また、公共事業による物理的環境の改変が生態系に与える影響の把握のために必要なデータである、複数の種、複数の個体の野生生物の行動を同時に把握することは不可能に近いのが現状である。

2.2　マルチテレメトリシステムの開発

このような背景から、マルチテレメトリシステムの開発に際し、以下の機能を開発目標として設定した。

① 複数個体の野生生物の位置を同時に特定できること。
② 位置特定精度を向上させること。
③ 長期間の継続的調査を行えること。



図—1　本システムの機器構成図と位置計測原理

①により生態系を構成する野生生物の複雑な関係を把握することが出来る。②により野生生物の行動形態を正確に把握し、野生生物がどのように物理的環境を利用しながら生活しているかの予測が可能になる。③により短期間の行動では予測できない洪水の影響や季節変動などを把握することが可能になる。

このような開発目標を考慮し開発した本システムの機器構成と位置計測原理を図－1に示す。本システムは、送信局、インテリジェント発信機、複数の受信局と情報制御所から構成される。送信局はフィールド内の任意の発信機ごとに発信命令を送信する機能を持っている。インテリジェント発信機は、送信局から発信命令が送信された時のみ発信するインテリジェント機能を持ち、発信間隔、発信スケジュール等を遠隔で制御できる。従来型の発信機は生物に装着し、発信機が発信を始めると一定間隔で発信し続けるため、観測していないときでも電池を消費し、発信機の寿命を短くしていた。インテリジェント機能により、余分な電池消費を防ぎ、長期間の連続観測を可能にする。受信局は発信機から発信される電波を受信し、受信した電波の到来角データを無線LANを通じて情報制御所に伝送する機能を持っている。情報制御所は受信局からの伝送されるデータを解析し、位置を特定し地図上に表示する。実際の受信局の設置状況を写真－1に示す。

写真－1　マルチテレメトリシステム受信局設置状況

本システムは、従来のテレメトリ調査のように、発信機から一定間隔で電波が発信され、その信号をもとに位置を特定するだけでなく、インテリジェント発信機により任意に観測スケジュールを変更し、夜行性の生物には夜間観測の回数を増やす等の柔軟な観測を可能にしている。また、複数の受信局を設置し受信局のデータを解析するプログラムにより、自動的かつ高精度に野生生物の位置を特定することを可能にしている。

3.　五ヶ瀬川支川北川におけるマルチテレメトリシステムの実証実験と哺乳類調査への適用性

3．1　北川の概要及び調査地点付近の概要

北川は傾山（1,602m）に源を発し、桑原川、小川などの支川を合わせながら、河口で祝子川、五ヶ瀬川と合流し、日向灘に注ぐ流域面積587.4k㎡、流路長50.9kmの１級河川である。その流域は宮崎県北部と大分県南部にまたがり北浦町、宇目町、北川町及び延岡市から構成されている。北川沿川においては、平成 9 年9月の台風19 号に伴う豪雨により、甚大なる被害が発生した。この洪水を契機として、河川激甚災害対策事業が平成９年より実施されている。

河川生態学術研究会[4]では北川を対象に、大規模な河川改修が河川生態系に与える影響の把握と評価手法確立のために調査地区を選定し学術調査を実施している。調査地区の一つのとして、五ヶ瀬川分流点から 10km 地点、的野地区(宮崎県東臼杵郡北川町的野地区)を対象に平成 12 年 5 月から実験を開始し、現在も実験を継続中である。北川は写真－2 に示すように的野地区付近で大きく湾曲し、湾曲の内側には植生が発達した河川高水敷が形成されている。

写真－2　的野調査地区と掘削予定地域[4]

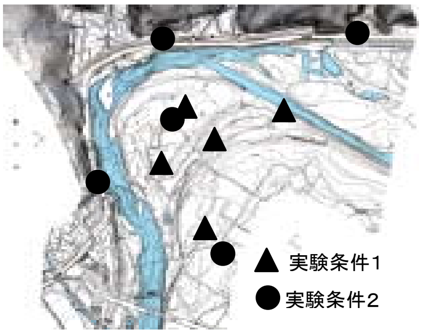
この河川高水敷を生息空間としてアカネズミ、イタチ、ノウサギ、タヌキ、キツネ、アナグマ、イノシシ等の多くの哺乳類が確認されている。的野地区においても大規模な河川改修が行われ

る予定で、河川高水敷の一部を掘削し切り下げる予定である。河川高水敷に生息する野生生物にとっても何らかの影響が予測され、現在、河川生態学術研究会で野生生物の生態調査と河川改修工事による野生生物への影響把握の研究が行われている。

3．2　本システムの実証実験と位置特定精度の検証

3．2．1　実験の目的と方法

実験は、図－2に示す北川的野地区の湾曲部で2回行った。調査地区内にマルチテレメトリシステムの送信局兼受信局を1局、受信局を4局及び情報制御所を設置し、以下の 2 点を目的として実験を行った。



図―２　調査地区における受信局の設置状況

表―１　位置特定精度検証実験の実験条件

	実験時期	調査地区面積	最大受信距離
実験1	平成12年4月29日	0.25k ㎡	300m
実験2	平成12年7月14日	1k ㎡	450m

(1) インテリジェンス機能、発信機からの電波伝搬実験等のマルチテレメトリシステム実証実験

実験に際しては電波工学分野で頻繁に見られる電波伝搬障害について留意した。留意した点は以下の通りである。[4)5)]

① 送信局からの遠隔制御により発信機を制御できるか。また、遠隔制御によるスケジューリングにより多個体の同時追跡が可能か。

② 実際の野生生物調査時、野生生物に装着した発信機は地表面に非常に近い位置で発信することが想定され、植生の中を電波が透過して伝搬し、発信された電波が受信局まで伝搬しないこと可能性がある。また、野生生物が雨天時に植生内にいる場合、植生に付着した雨滴がシールドとなり、電波が受信局まで伝搬しないことが予測される。このような状況でも十分に発信機の位置を特定できるか。

③ 発信機から発信された電波が調査地区周辺の構造物、地形等で反射・回折し位置特定の障害にならないか。

(2) 位置特定の精度検証

精度検証に関しては、発信機を一点に固定し、発信機の位置をDGPS（デファレンスGPS：1m精度で位置座標を特定可能な GPS 測量）で特定する。その後、固定した発信機から電波を複数回発信させ、本システムで位置データを収集し、DGPS と本システムによる特定位置の差を検証する方法で行った。なお、実験時、DGPS の衛星捕捉状態は良好で、既知の測量座標との整合性は精度1m以内であった。

3．2．2　実験結果

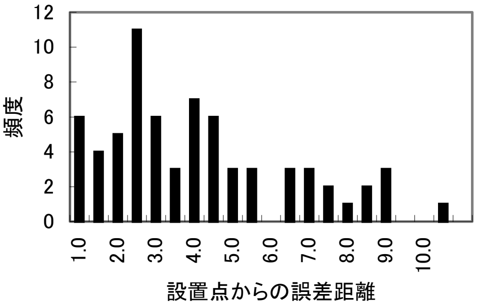
(1) 本テレメトリシステムの実証実験結果

留意点①については、2 回の実験ともに全て問題なく機能し、発信機の遠隔制御、測定スケジュールの制御により多個体の同時追跡が可能であることが確認された。留意点②については、地表面、植生内、植生のない窪地、植生のある窪地、雨滴の付着した植生内、雨滴の付着した植生がある窪地等、さまざまな状況で実験した。その結果、2 回の実験ともにすべての状況で問題なく機能し、実際の野生生物調査での使用は十分に可能と考えられる。留意点③については、発信機から発信される電波は受信局に到達するまで多くの影響を受け電波到来角データが大きく変動することが確認された。単純に受信局で受信したデータを解析するだけでは、位置特定の精度は極端に落ちることが明らかになった。このため、位置特定プログラムを作成し、受信局から送信されるデータを複合的に解析することによって位置特性精度は格段に向上することが確認された。

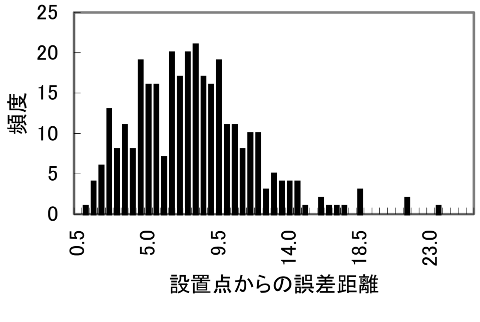
(2) 位置特定精度の検証結果

図－3に実験1、図－4に実験2の位置特定精度の検証結果を示す。図―3、図―4は、誤差距離（発信機が固定された位置と本システムが特定した位置の距離の差）を示している。誤

差距離は、実験1では 3.87±0.56m(信頼区間95％)、実験２では 7.59±0.4m(信頼区間95%)である。調査地区面積が小さい実験1では最悪の条件でも10m四方での位置検出、調査地区面積が大きい実験2では20m四方での位置検出が可能であることがわかる。実験1でので実験1と実験2を比較すると、実験2が位置特定精度が低く、また、本システムでの特定位置のバラツキが大きいことがわかる。これは実験2の方が、発信機から受信局まで電波が伝搬する距離が長く、受信局で得られる電波到来角データの精度が低いことが原因と考えられる。現在、受信局で得られる電波到来角データは市販の無線機器から得られるデータを使っているが、この機器を改良すれば位置特定精度の向上が期待される。



図―３　位置特定精度検証結果（実験１）



図―４　位置特定精度検証結果（実験２）

３．２．３　本システムの機能と位置特定精度の評価

北川における実証実験で本システムの発信機の遠隔制御、測定スケジュールの制御により多個体の同時追跡が可能であることが確認された。また、実際の調査時に想定される厳しい観測条件でも発信機の位置特定が可能であることが確認された。さらに、発信機の位置特定精度は受信局の設置位置により異なるが概ね10m～20m四方の範囲で特定でき、野生生物がどのような物理的環境を利用しながら行動しているかを把握するには十分な位置特定精度が確認できた。以上のことから本システムは実際の野生生物調査で十分に使用できると考えられる。

３．３　実際の野生生物行動形態調査への適用実験

３．３．１　実験の目的と方法

建設省土木研究所河川環境研究室では、宮崎大学教育文化学部生態学研究室と共同で、本システムを用いた的野地区の野生生物、主に中型哺乳類の行動形態調査を行っている。本実験の目的は、実際の野生生物調査を通して、本システムの適用性を検証することである。実験は平成 12 年 7 月から現在も継続中である。実験は、動物捕獲罠により動物を捕獲し、発信機を装着し本システムによって生物の行動を追跡することによって行った。また、ウサギとタヌキには表－2のように異なる仕様の発信機を用いて行った。ウサギには、リチウム電池を用いた発信機、タヌキにはリチウム充電池を用いた発信機を装着して実験を行った。

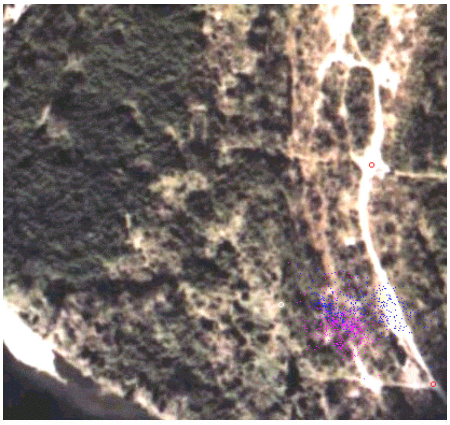
表－２　発信機の実証結果

種名	追跡日数	追跡間隔	電池型
ウサギ	19日	3分／30分	単三3個
ウサギ	13日	30分	充電型
タヌキ	8日	30分／4時間	充電型
タヌキ	3＋α日	30分	充電型
タヌキ	0日	－	充電型

３．３．２　実験結果

写真－3にウサギの3分に１回の行動プロット結果を、写真－4にタヌキの 30 分に１回の行動プロット結果を示す。

写真－3、写真－4とも、青は昼間、赤は夜間の行動圏を示す。ウサギ、タヌキともに昼間は植生が濃い地点から大きく移動せず、夜間に活発に活動していることがわかる。



写真－３　ウサギの行動プロット

写真－４　タヌキの行動プロット

３．３．３　本システムの野生生物行動形態調査への適用性の評価

本システムにより野生生物の行動形態を正確に把握することができ、野生生物の行動形態調査への適用性は十分にあることが明らかになった。しかし、本実験には表－2に示す電池の異なる発信機を用いたが、充電池を用いた発信機は野生生物の行動を追跡するのに十分な期間、発信を続けることが出来なかった。これは、以下の原因が考えられる。

（1）　発信機回路が１回の発信に使う消費電力が大きいこと

（2）　電池の包埋技術（発信機回路を樹脂等で防水防塵処理すること）が未熟であるため、野生生物が植生内を行動した場合、雨天時に行動する場合に発信機回路とアンテナの接合部等が故障する。

（1）は発信機の回路をマイクロチップ化し回路自体を完成した形に改良することで、（2）は従来のテレメトリ調査時に培われた包埋技術を適用することにより解決されると考えられる。特に発信機の小型化、長寿命化は、直接生物の行動にも影響を及ぼすため、更なる改良が必要であると考えられる。

４．　まとめ

今回、自動的かつ高精度に野生生物の位置を特定することマルチテレメトリシステムを開発し、さらにその適用性の検討のために、実河川における実証実験を行った。その結果により、以下のことが確認された。

（1）本システムは野生生物の位置を自動的かつ高精度に追跡でき、またインテリジェント発信機の機能により、その観測スケジュールを変更し、多個体の同時追跡が可能である。また、３．２で示した通り、実際の野生生物調査で想定される厳しい条件においても十分に発信機の位置特定が行え、十分な適用性を持っている。

（2）本システムの位置検出精度は受信局の設置位置により異なるが最大受信距離が450m 以内の場合、概ね 10m～20m四方の範囲で特定できる。

（3）実際の野生生物を本システムで追跡した結果、その行動形態を詳細に把握することができた。しかし、発信機の信頼性には改良の余地があり、技術的な改良と従来からの包埋技術等を活用し発信機の改良を行う必要がある。

５．　マルチテレメトリシステム開発の方向性と21 世紀に向けた将来的な展望

現在、本研究により開発されたマルチテレメトリシステムでは、従来のテレメトリ調査手法と比較して革新的に調査効率が向上し、収集されるデータの量、精度も向上している。しかし、本格的な IT 技術の導入等により今後更なる発展が期待される。以下に今後の開発の方向性と将来的な展望を述べる。

５．１　さらなる発信機のインテリジェンス化

３．３．２でも示した通り、最も開発を急がなければならないのは発信機の小型化、長寿命化、その信頼性の向上である。発信機の小型化・長寿命化が完成すれば、発信機を装着できる生

物の種類が広がる。その結果、多くの野生生物で構成される複雑な生態系を理解する調査ツールとして活用できる。また、現在開発されたシステムは野生生物の位置の特定のみしか行っていない。しかし、将来は発信機から発信される電波に野生生物の体温や心拍数等の生理情報で送信することも可能になると考えられる。このことにより、例えば小型野生生物が捕食者の行動を察知し、逃避する瞬間の身体の緊張や避難行動の状況を詳細に把握することが可能になると考えられる。また、発信機に小型の物理環境センサーを搭載し、野生生物が好んで利用する環境の温度、照度、湿度等のデータを把握することが可能になると考えられる。このように今後マルチテレメトリシステムの開発は、野生生物の位置を特定し行動形態を把握するだけでなく、行動形態を支配する条件、野生生物の生理情報を把握する多くのセンサーを搭載したマルチセンサーシステムに発展することが期待される。

5．2さらなる高精度、高機能な位置特定手法の開発

現在のシステムでは、陸上哺乳類の行動形態は詳細に把握できるが、鳥類、魚類を含めたすべての野生生物の行動を把握することは難しい。今後、マルチテレメトリシステムは、鳥類を対象に調査する場合には 3 次元での位置特定、魚類を対象に調査する場合には水中にいる魚類の位置と深さを特定するシステムに発展することが期待される。

5．3　土木技術への発展

野生生物の行動圏の大きさ、土木工事による騒音や振動が野生生物に与える影響、洪水時の野生生物の避難行動等、マルチテレメトリシステムを利用することにより、公共事業の野生生物への影響の予測、野生生物への保全対策が飛躍的に向上すると考えられる。

以上、3項目が今後のマルチテレメトリシステムの開発の方向性となっていくと考えられる。今後、発展するIT分野の技術を導入しながら、環境調査の省力化・効率化を図るため、積極的にマルチテレメトリシステムの開発を推進する予定である。

6．謝辞

最後に本システム開発にあたり貴重なご意見を賜った九州大学理学部小野名誉教授に甚大なる謝意を表します。また、本システム開発にご尽力いただいたNTTアドバンステクノロジ株式会社久木田部長、中村氏に深く感謝いたします。包埋技術について多くの助言をいただいた九州自然環境研究所の中園氏、捕獲作業にご協力を頂いた宮崎大学教育文化学部生態学研究室の皆様、的野地区在住の横山氏に深く感謝いたします。また、本研究の実施に際し多大なご尽力を賜った九州地方建設局の延岡工事事務所の山本副所長、川添調査課長、宮崎県延岡土木事務所の児玉課長、高橋氏に深く感謝いたします。尚、本研究は河川生態学術研究会北川グループの一環として行われた。

参考文献

1） Charles J.Amlaner Jr. and David W.Macdonald:A Handbook on Biotelemetry and Radaio Tracking, PERAMON PRESS, 1995

2）Larry A. Nielsen :Methods of Marking Fish and Shellfish, American Fisheies Society,1992

３）Robert Kenward: Wildlife Radio Tagging, Academic Press,1993

4）河川生態学術研究会：川の自然環境の解明に向けて　河川生態学術研究会の概要

5）奥村義久、進士昌明：移動体通信の基礎、電気情報通信学会, 1986.9

6）虫明康人：アンテナ・電波伝搬、コロナ社 1986.2