

# RFID技術を利用した環境動態観測手法の提案： 落葉追跡システムの開発を事例として

船田 晋<sup>1</sup>・森杉 貴紀<sup>2</sup>・吉村 千洋<sup>3</sup>・石平 博<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山梨大学大学院 医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

E-mail: funadas@ccn.yamanashi.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 山梨大学 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

<sup>3</sup>正会員 山梨大学大学院研究員 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

E-mail: chihiroy@yamanashi.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 山梨大学大学院助教授 医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3-11)

E-mail: ishi@yamanashi.ac.jp

ユビキタス社会の実現に向けて注目を浴びているRFID技術はすでに様々な分野で活躍し始めている。特に、ICタグは安価で小型であり、データの書込み読取りが可能など、従来のタグとは異なる最新技術である。一方、森林内での物質輸送については、そのプロセスの複雑さゆえに未解明な部分が多く残されているが、ICタグを用いた個体（個木、個葉）の識別・追跡が可能となれば、森林域から溪流への物質動態の理解に大きく貢献すると考えられる。そこで、研究事例として、着葉している複数の葉にICタグを貼付し、それらを追跡するシステムを開発した後、落葉の動態をモデル化した。これにより、個体の識別を必要とする環境動態観測におけるRFID技術の利用の有効性が示された。

**Key Words :** ubiquitous technology, IC tag, individual leaf dynamics, organic matter supply into stream, GIS spacial analysis

## 1. はじめに

### (1) ユビキタス社会と物体識別技術

「2005年までに世界最先端のIT国家に」を目標にした政府のe-Japan構想が実現した後、2010年を目標にしたu-Japan（ユビキタスネット・ジャパン）戦略<sup>1)</sup>がスタートした。今まではコンピュータや携帯電話など端末同士のネットワークが中心だったのに対し、ネットワーク端末としての機能を持たない商品、製造物、動物やそれらが遍在する広範囲な場所が無線技術で繋がる環境が構築されつつある。この適用分野は多岐にわたり、すでに農学、医学、薬学、地理学、生物学等の諸学間分野をはじめ、災害支援や社会安全の実現、国土インフラ等の国家レベルの施策への適用も期待されている<sup>2)</sup>。

ユビキタス社会の重要な構成要素としてRFID（Radio Frequency IDentification）技術がある。RFID技術とは、一般に、ICタグやICカードとデータ読取装置（以下、リーダ）の間で非接触通信を行うものである。ICタグやICカードは、数mmのICチップ（データを蓄えるメモリ）を核としてアンテナを装着し加工したものである。RFID技術は1940年代に開発が始つ

た技術であるが、その後、さまざまな実証実験を経て、集積回路（IC, Integrated Circuit）の開発やビジネス実務の変化とともに発展してきた。特に各種料金徴収システムなどは世界各地で見られる<sup>3)</sup>。

人間生活においては、物体の識別を行う必要性がしばしば生じる。物体にマークを付けることで物体の識別は可能であるが、これらの識別は目視に頼らざるを得ない。また物体を認識し情報をデジタルに取得する技術としてバーコード（2次元バーコードも含む）があるが、これは遮蔽や角度に対する読取性、視認性、平坦性などの表面条件に対する制約がある<sup>4)</sup>。ICタグは非接触による通信を可能とするため、認識機能を向上させ、上記の制約を克服する技術である。つまり、ICタグは識別機能を持ったアンテナ付きのリーダにより、数cm～数m離れた場所からも検知可能なデバイスである。さらに、メモリが内蔵されているので、従来のマーキングだけでは不可能であった多くの情報を個体に持たせることができる。

### (2) RFID技術を利用した応用研究

現在、物流サービス分野ではICT（Information & Communications Technology）という名称で多様な

RFID 技術の需要が拡大しており、RFID 技術も政府主導のプロジェクトや共同研究により様々な実証実験が行われ、またシステム化が進んでいる。一方、土木分野においては、土木設備の維持に IC タグが利用されたり<sup>5)</sup>、道路、河川、トンネル、ダム、橋梁、斜面などでの災害時早期モニタリングや舗装材料の温度管理等の作業にも IC タグの利用が想定されている<sup>6)</sup>。これらは、システムとしてのモノの管理を利用対象としており、研究対象物に IC タグを利用する例は極めて少ない。

環境システム分野の中でも自然科学を対象とする研究では、環境中での生物や物体を個別に追跡調査することが重要とされる場合が多い。IC タグは、このような調査において、個体識別や記録情報の更新を可能とする。また、物体間の距離や物体の位置を測定することに意味を持つ場合も多い。IC タグによる位置検出技術はまだ理論的研究段階<sup>7)</sup>にあるが、その実用化により環境システム分野での IC タグの有効性がさらに向上すると予測される。今後、利用範囲が屋内だけでなく、屋外も対象となり得ること、また対象物の位置と共にその動的な状態を扱うことが可能となるためである。つまり、屋外における利用シーンや GPS 技術等と組み合わせた位置検出技術が求められている。

そこで本論文では、環境動態観測に RFID 技術を用いることの有効性を論じ、この技術を用いた様々な観測手法を提案した。以下、2章に RFID 技術、3章に研究事例、4章に RFID 技術を利用した研究の提案、5章に結論を述べる。

## 2 RFID技術

一般に、IC タグは電池を内蔵するアクティブ型と非内蔵のパッシブ型がある。前者は、IC タグ自身が電波を発し、リーダとの間でデータを通信することが可能である。一方、後者は、アンテナからの電波エネルギーを電源として作動し、そのメモリに蓄えられたデータを読み取る。

また、IC タグは使用する周波数帯により4つ(135kHz未満、13.56MHz、UHF帯、2.45GHz)に分類できる(表-1)。一般に周波数が大きくなるほど通信距離も伸びるが、IC タグのアンテナの大きさやリーダ/ライタの出力によっても変化する。また形状、通信規格、通信速度、読取り機能への水や金属の影響、適切な利用場所なども多様であるので、IC タグを研究に利用する際には、これらの特性をよく検討した上で利用する必要がある。

表-1 一般的なICタグの種類と特性

| 周波数帯       | 135kHz未満               | 13.56MHz               | UHF帯                   | 2.45GHz              |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 通信方式       | 電磁誘導方式                 |                        | 電波方式                   |                      |
| 通信距離       | 数cm程度                  | 最大1m程度                 | 最大数10m程度               | 最大数m程度               |
| 指向性        | 広い                     | やや広い                   | 広い                     | 狭い                   |
| 読取りへの水分の影響 | 小さい                    | やや小さい                  | 大きい                    | 大きい                  |
| タグの大きさ     | 数10 cm <sup>2</sup> 程度 | 数10 cm <sup>2</sup> 程度 | 数10 cm <sup>2</sup> 程度 | 数 cm <sup>2</sup> 程度 |

## 3. 研究事例 ～河畔林からの落葉損失の推定～

IC タグを利用した森林生態系の事例として、IC タグを落葉の識別と追跡に利用し、河畔林からの落葉損失量の推定を試みた研究を紹介する。

### (1) 森林生態系の炭素動態研究

地球上の炭素循環において、森林は重要な役割を担う<sup>8),9),10)</sup>。森林では、落葉・落枝は有機炭素を土壤に供給する<sup>11)</sup>。植生構造の変化に伴い、土壤中の炭素・窒素の変換過程が変化し、それが再び周囲の環境に影響する<sup>12)</sup>。さらに落葉・落枝の一部は様々な形に変化しながら、林床から溪流に移動し、河川生態系へ栄養や炭素を供給する。水生生物にとって森林から供給される落葉・倒流木・小動物は重要である<sup>13),14),15)</sup>が、実際にどのような形状の落葉がどのような過程で供給されるかはよく分かっていない。着葉時における葉の生態、落葉量、落葉の分解速度、落下の散布パターンの評価<sup>16)</sup>、溪流への側方移入量、河川内の落葉の滞留様式<sup>17)</sup>などについて研究が行われている。また林床上の落葉の移動<sup>18)</sup>についてもいくつかの研究事例が報告されている。このような研究では、リタートラップで回収されその総重量からの炭素量などが計算されている。ただし上記の研究では総落葉量がベースであり、樹種ごとに葉、枝を分別している場合もあるが、一般的に個々の落葉の識別は難しい。実際に動くものは個葉自体であり、落葉の移動を研究するのに総落葉量ベースでは限界がある。さらに落葉の動態は周囲の環境の影響を受け易く、個葉はそれぞれに多様な動きをする。こうしたことから個葉ベースで行う落葉の追跡は、適切な炭素・窒素動態の解明に重要であると考えられる。

物体の動態を調査する時には、研究対象の周囲のデータ、つまり気象・地形データだけでなく、物体自身のデータが必要である。そこで、本研究では、着葉時の葉に IC タグを貼付して個葉の移動を追跡観測す

ることによりモデルを構築し、さらに河畔林からの落葉損失量の推定を行った。具体的には図-1のようなシステムを構成し、個体の検知・識別に IC タグを利用した。

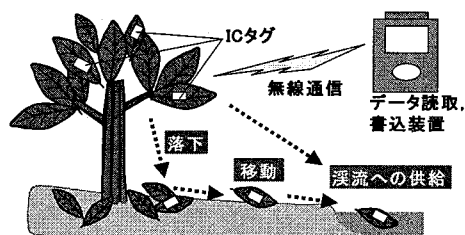


図-1 落葉追跡システム構成図

## (2) 落葉動態への IC タグ貼付の影響

システム構築のために、ICタグを貼付した場合の葉の移動への影響を把握し、追跡観測が可能であるかどうかを確認しておく必要がある。一般にパッシブ型の IC タグは小型であるが、それでも数10mmの大きさになる。今回はごく標準的な IC タグを葉に貼付した場合、葉の移動に対してどれくらいの影響が現われるか検証した。

### a) 実験方法

使用した IC タグ (スマート ID テック社製) は、表-2 に示す 2 種類で、双方とも方形で防水加工がなされている。搭載 IC は Philips I-COE SLI である。葉長 11.2cm~16.1cm、重量約 0.30~0.55g のほぼ均一なブナ科コナラ属のクヌギの葉を 20 枚用意した。これらを、①IC タグを貼付しない(10 枚)、②小型 IC タグを貼付(5 枚)、③大型 IC タグを貼付(5 枚)、という条件に分けた。微風状態において、ビルの 2F(地上約 5.5m)から落下させて、その落下中心位置から着地点の距離を測定し、これを 10 回繰り返した。さらに、5F(地上約 16.50m)の高さからも同様の実験を行った。

表-2 IC タグの寸法および重量

| タグ       | 外寸(mm)    | 厚さ(mm) | 重量(g) |
|----------|-----------|--------|-------|
| 大型 IC タグ | 66.0×26.0 | 0.23   | 0.2   |
| 小型 IC タグ | 34.0×17.0 | 0.23   | 0.1   |

### b) 結果

タグを貼付しない場合と、大型、小型タグを貼付した場合の平均水平移動距離を比較した(図-2)。それぞれの標準偏差は、196.1cm, 167.7cm, 187.2cm となり、大型タグは飛散しにくいという結果となった。この 3 種類の水平移動距離について一元配置の分散分析を行った結果、帰無仮説「3 種類の移動距離は等しい」は、有意水準 5%で F 値 3.04、P-値 0.046 となり、

棄却された。これによりタグの有無が水平移動距離に影響を与えることが示された。また、微風状態では大小の IC タグを貼付した場合、どちらも数 10cm の減少が見られ、水平移動距離にしてそれぞれ 10.9%, 17.6%減少したことが分かった。これらの結果から、より小さなタグを貼付した方が、水平移動距離に対する影響は小さいことが明らかとなった。

また、貼付による通信機能への支障はなく、防水加工がなされていれば、屋外でも十分に使用に耐えるものであることが分かった。さらに、落下高に対する水平移動距離の比は 48.56(%)で、落下高の約半分ほどの移動距離を示すことが明らかとなった。

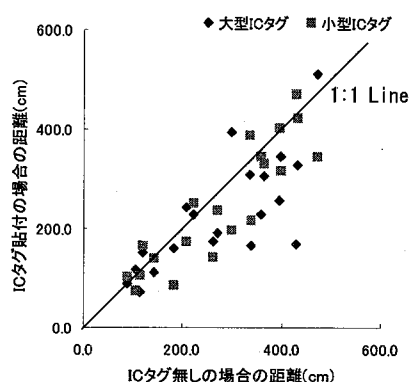


図-2 IC タグが落葉の移動距離に与える影響 (平均移動距離)

## (3) 落葉追跡観測による落葉損失量の推定

### a) 推定手法

対象地域とした山梨県北杜市瑞牆山観測サイトは、北緯 36° 00' 00", 東経 138° 29' 59", 標高約 1500m に位置する。このサイトの主な植生はミズナラやシラカンバなどの落葉広葉樹とカラマツなどの落葉針葉樹である。

対象とした樹木は、ブナ科コナラ属ミズナラ (*Quercus crispula* Blume) の木 2 本(樹高がそれぞれ 7.5m, 8.5m)である。ミズナラは観測サイト内に多く分布していること、葉の大きさが IC タグよりも大きく、貼付作業に支障をきたさない十分な幅と長さ(8cm~15cm)があること、日本の落葉広葉樹を代表する樹種であることが選定理由である。

落葉の落下、移動を個葉レベルで追跡するため、対象木の葉に番号を記した IC タグ(前述の実験と同じ)を使用した。この IC タグは、通信周波数 13.56MHz、メモリは 1024bit、データ保持期間は 10 年間、データ書換え回数は 10 万回、読取り通信距離は

最大 80mm, 書込み通信距離は最大 70mm の性能を持つ。一本の樹木の数千枚から数万枚に及ぶ全ての葉に IC タグを貼付する事は多大な労力を必要とするため, 今回は 2 本の対象樹木の葉の葉脈付近にそれぞれ 50 枚ずつを接着剤で貼付した。

落葉の追跡観測は, 樹木の落葉が開始した 2005 年 10 月 13 日から 2006 年 1 月 24 日までの期間に以下の順序で行った。①気象観測サイトを設置し, 地上 1.8m の風向, 風速を計測した。②大小 IC タグ各々 25 枚を 2 本の樹木に高度別 (約 2.3m, 3.5m, 4.0m, 5.0m, 7.0m) に 5 枚ずつ貼付した。③数日おきに, 落葉後の個葉を目視によって識別し, その位置における基準点からの距離, 方位をトータルステーションにより測量した。④取得した位置データから, 内業によって個葉の絶対座標を得た。⑤観測結果に基づき, 個葉の動態を表すモデルを作成した。⑥個葉の個体からの落下範囲と林床上の移動範囲の確率密度を推定した。⑦仮想的な溪流に移入した落葉量を推定した。⑧河畔林からの落葉損失量を GIS を用いた空間解析により推定した。

③については, 当初, ハンディ型のリーダによる通信機能を使って対象葉の探索, 識別を行っていた。また林床現場において, ノートブック型 PC, あるいは携帯情報端末 (PDA) と連動させることにより, データ (日付や識別番号, 測量した位置座標等) の取得や IC タグへの書込みが可能であることを確認した。しかし, リーダを地表面上数 cm に接近させねばならず, 非常に時間のかかる作業となったことから, 目視による識別に変更した。

なお, 対象の葉が付近の溪流に流入して溪流中を移動した場合に, IC タグが全て回収できるようにするため, 対象木地点から約 50m 下流に網状の IC タグ回収堰を設けた。

## b) 結果

落葉移動は, 樹木から落下時の個葉の移動距離 ( $D_f$ ) と, 林床上の個葉の平均移動距離 ( $D_m$ ) の 2 つの要素によって構成される<sup>10)</sup>。落下中の移動距離は, 主に風速と落下高の 2 変数で決定され, 林床上ではある一定以上の風速が起きたときに移動が始まると予想される。よって本研究では, 物理的パラメータ (風速, 落下高) を用いて,  $D_f$  と  $D_m$  を次のようにモデル化した。

$$D_f = (k_1 z) + (k_2 U_{max}) + C \quad (1)$$

ここで,  $z$  は葉の落下高 (m),  $U_{max}$  は落葉期間内の最大風速 (m/s),  $k_1$  は落下高係数,  $k_2$  は風速係数,  $C$  は定数である。

$$D_m = a \cdot \exp^{(bU)} \quad (2)$$

ここで,  $U$  は期間内平均風速 (m/s),  $a, b$  は定数である。

上記のモデルを最小二乗法により推定した結果,  $k_1=0.486$ ,  $k_2=0.0678$ ,  $C=0.69$ ,  $a=7.96$ ,  $b=0.35$  となった。ここでさらに, 落葉の可動度 ( $M_b$ ) を導入した。 $M_b$  は, 落下日からの日数 (day) と共に減少する係数であり, 指数分布に従うと仮定し以下の式で表した ( $\lambda=0.5$ )。

$$M_b = \lambda \times \exp^{(-\lambda \cdot \text{day})} + 0.9 \quad (3)$$

式 (2) から得られた  $D_m$  に  $M_b$  を乗じ, 式 (1) から得られた  $D_f$  を加えた距離を移動距離とし, 毎回の観測の期間内ごとに日平均移動距離を算出し観測値と比較したところ, このモデルは観測値とよい対応が得られたものの, ばらつきの大きい結果となった (図-3)。

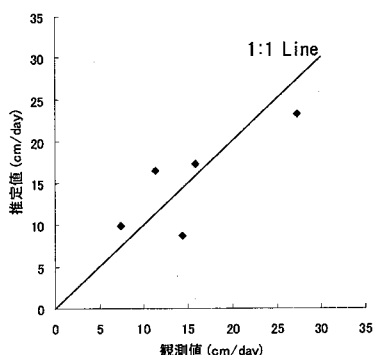


図-3 期間内の日平均移動距離の比較

次に, 落葉の損失量を評価するために, 数値実験を行った。まず, 幅約 50cm の小川に沿った約 1000m<sup>2</sup> の河畔林において 5m 四方ごとに落葉広葉樹が生育していると仮定した。そして式 (1)・(2) から計算された 16 方位ごとの個葉の平均移動範囲 (図-4) と瑞牆山観測サイトで得られた地形データを用いて落葉の存在確率密度分布をシミュレートした。

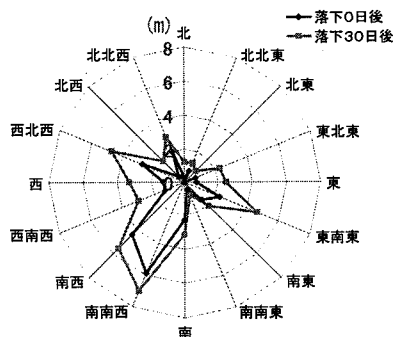


図-4 個木からの落葉の散布パターン (平均移動距離)

さらに、存在確率密度分布と溪流の位置とを GIS を用いてオーバーレイ解析することにより、小川を横切る落葉の合計を河畔林から流出される量として計算した。落下後 30 日間の総落葉重量は、リタートラップによって得られた比葉面積 ( $12.5 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) で除した値とした。その結果、総落葉量  $98.1 \text{ kg}$  に対して、損失量は  $2.516 \text{ kg}$  に達した。

### c) 考察

落葉可動度は、落葉の移動のし易さを示すものである。よって、ある一定の風向・風速の自然条件下で、落葉が移動あるいは停止する現象には、雨滴の付着による自重の増加、草本類などの林床植生や落枝などによる抵抗、風雨による落葉層への絡み付き・沈下、葉の内部水分量の不足による受風面積の減少が影響していると考えられる。

移動モデルによる推定移動距離の結果について、以上の要因により林床上における個葉の移動に対して与えられた抵抗力が、移動モデルで十分に表現されていないことがばらつきの原因と推察される。さらに、落葉の着地点が明確にできないことから、ある期間内の移動距離は、単純に落下による水平移動距離と林床内の移動距離の和で表せられない可能性もある。また、図-3 より、移動距離の小さな場合、つまり落下後にほとんど林床上を移動しない場合は過大評価になる。今回は、簡易な式を落葉可動度に当てはめたが、今後は周囲の条件等を考慮に入れて抵抗の原因を解明し、モデルを再構築することが必要と考える。

北海道の溪流における 2 ヶ月間の調査結果から、風などによる河畔林林床からの溪流内への落葉移入量は  $40 \text{ g/m}^2$  程度<sup>19)</sup>であり、推定結果の約  $2.5 \text{ g/m}^2$  と大きく異なる。これは観測期間や観測対象範囲、樹種、河川幅、地形、気象などの環境条件の違いが大きく影響していると推測される。本研究事例では、推定結果の妥当性の検証までには至っていないが、落葉の移動モデルから落葉損失量を試算する道筋が立てられたと考えられる。また、本研究で対象とした瑞牆山観測サイトの河畔林ではミズナラが優占しており、ミズナラを代表種とすることに問題はないと考えられる。ただし、一般的に、河畔林では他の樹種が優占することが多いため、対象とする樹林に応じて、樹種を適切に選ぶ必要がある。

林床上の落葉の状態を、「移動中」と「停止中」のように時間的に分離し、落葉を移動または停止させる要因を「イベント」と考えると、簡単な落葉の動態を状態遷移表で表すことができる(表-3)。この表は、ある状態中にイベントが起こると、「ある状態」が「別の状態」に遷移するということを矢印で示す。

また、「—」は状態が遷移しないことを示す。実際は、外部・内部要因が複雑に関係し、外部要因の時間スケールは内部要因の進行速度に比べてはるかに短い。IC タグを用いることによって、個葉の移動の内部要因についての解明が進むと期待できる。同時に、IC タグを貼付することによる長期的な落葉の乾燥や分解への影響、林床上における移動への影響を定量的に解明する必要がある。

表-3 落葉移動の状態遷移表

| 葉の状態<br>イベント |                       | 移動中 | 停止中 |
|--------------|-----------------------|-----|-----|
| 外部<br>要因     | 風の状態 ( $U > U_c$ )    | —   | ←   |
|              | 風の状態 ( $U \leq U_c$ ) | →   | —   |
|              | 降雨                    | →   | —   |
|              | 林床植生の増加               | →   | —   |
| 内部<br>要因     | 葉の水分量減少               | —   | ←   |
|              | 受風面積減少                | →   | —   |
|              | 落葉層への<br>沈下・絡まり       | →   | —   |

$U_c$ : 落葉を移動させるための最低風速 ( $\text{m/s}$ )

本研究事例では結果的に IC タグを単なる標識として扱うことになったが、通信距離の制約が課題として明らかとなった。林床上における観測では、タグの大きさや通信距離を考慮すると、 $13.56 \text{ MHz}$  ではなく UHF あるいは  $2.45 \text{ GHz}$  周波数帯を利用することが適切である。標識ラベルの貼付やマーキングした葉の目視による観測では、複数の落葉が重なっていたり裏返っており、また分解の進んだ葉はマークが読めなくなるので、個葉の識別は大変な作業、あるいは不可能となる。そこで無線通信による検知・識別と共に PC を組み合わせた観測システムを構築することが可能となれば、山林現場における作業効率の大幅な向上が期待される。また現時点では IC タグの識別性能は十分にあることから、まずは IC タグの検知機能を充実させた上で、位置の検出、記録機能を開発していくことが必要である。

以上の結果・考察から、個葉の追跡技術が落葉動態モデル構築に対し有用性を示すものであり、RFID 技術の向上とともに、河畔林からの溪流による落葉損失の推定に用いることができることを示した。

## 4. RFID 技術を利用した研究の提案

### (1) 今後の技術動向

RFID 技術は未だ発展段階であり、すべての環境動態観測の需要に応えられるとは言い難いが、無線技術によるシームレスなシステムとの連携の利便性を考慮すると、RFID 技術は重要な役割を果たすことが期待されている<sup>4)</sup>。

今後の課題の一つに、位置情報を如何に精度よく得るかという問題があるが、既に様々な手法で位置検出を目的とした研究が進められている<sup>20), 21)</sup>。また、GPS 技術には限界があることから、自己位置推定機能、無線デジタルデバイスを発見/検知する機能、および両機能から位置情報を合成する機能から構成されるパーソナルセンシングについても提案されている<sup>7)</sup>。さらに、複数のアンテナから発する電波の届く範囲を利用して位置を特定する技術も開発が進んでいる。

IC タグの小型化の代表格としては、超小型の IC チップを内蔵した「ミューチップ」(日立製作所)がある。通信距離は約 50cm であり、アンテナを入れても約 3mm×70mm、約 11mg に収まることから、小さな物体への貼付が可能となり、今後種々の観測に対して、大いに貢献すると予想される。さらに、IC タグを温度や湿度などのセンサーと組み合わせることも検討されている。また昨年より、国内でも電波法の改正によって、UHF 帯(952~954MHz)の使用が認められた。この UHF 帯は、通信距離が長く、広範囲の読取が可能で、かつ安価な製品を製作できることから、将来の RFID 技術の中核をなすものと期待されている。

### (2) 研究の発展方向

近年の RFID 技術の進歩により IC タグの小型化、軽量化、メモリ容量の増大、同時読取技術の開発、通信距離の拡大などが進められている。さらに、温度や湿度などのセンサーとのインターフェイスが充実してくれば、IC タグを利用した空間的に高密度の総合気象観測が実現すると考えられる。複数の種類の情報をロガーに記録するように、物体の位置を自動で検知した後、それを記録する機能も望まれる。

こうした RFID 技術の応用分野は森林生態系の研究にとどまらず、生態学や環境工学全般に広がると予想される。例えば、生態学の分野ではテレメトリー装置により動物の行動パターンを追跡することが可能であるが<sup>22), 23)</sup>、センサー付きの IC タグを埋め込みむことにより、水温や流速などの生息条件と魚類の動態の関係を調べることも可能となる。また、林学分野では木材にタグを付け、倒流木を追跡するなど、今まで解明

が困難であった研究にも応用できる。さらに様々な有機物質や汚染点源に IC タグを取り付けることにより、未解明部分の多い水・物質循環の研究や環境汚染対策にも貢献すると期待される。つまり、多くの個体の識別を必要としている研究において、RFID 技術の利用が有効であると考えられる。

ここで、生物個体に IC タグを貼付した研究を行う場合、まず IC タグが個体におよぼす影響を評価することが重要である。小さな生物の場合、IC タグの重量・形状、貼り付け方法等が生物活動に与える影響は無視できないと予想される。特に本研究事例では、IC タグが葉の移動・乾燥・分解などに及ぼす影響について評価した後に、葉の乾燥や分解が落葉の移動を考慮すべきだと考える。また物体とは違い生物個体が自発的に動く場合もあり、自然環境の下では IC タグと生物が相互に影響し合うことにも注意を要する。

IC タグは安価であるが故に、観測設備の整わない環境などでは、動態観測の新たな手法となりうるものである。また、数 10 個~数 10000 個の大量のタグをシステムの中に簡単に設置することが可能となる。これは従来の観測とは異なり、観測対象の空間の密度を大幅に高める可能性を持っている。その反面、IC タグの遍在性に加え、金属などが含まれているために環境、特に生態系への悪影響が懸念されることも事実であり、環境保全や生態系保全への十分な配慮を行わなければならない。これには通信距離の長距離化に伴う IC タグの全回収に期待するだけでなく、今回の研究事例で示したように、堰を設けるなどして試験地外に排出させないことが必要である。また IC タグ本体や接着剤に生分解性の材料を使用するなどの工夫も考えたい。

「2010 年に向けてわが国が取り組むべきテーマ・課題の抽出」<sup>1)</sup>には、国民生活、医療福祉、交通物流、環境・エネルギー社会、教育などの 10 分野(159 件)の課題が挙げられている。残念ながら、自然科学分野においては IC タグの利用は考慮されていないようである。今後、こういった動きを見据えながら、自然科学分野における IC タグの利用を考案することが必要である。いずれにしても、実証実験の結果は実運用時の課題を明確にする<sup>24)</sup>ものであり、基礎的研究、応用研究共に推進して行くことが望ましい。

## 5. 結論

環境動態を環境システムの一環と捉え、IC タグを利用した RFID 技術による環境動態観測手法を研究事

例と共に提案した。環境動態観測において、今まで個体の識別が不可能であった物体に IC タグを取り付けることで、その動態の解明が可能となる。本事例では、通信距離等の制約のために、IC タグの通信機能を利用しなかったが、通信距離の拡大、検知機能が向上することにより、有効かつ簡易な観測が可能になるものと期待される。

今後は、汎用性のある観測手法を確立するだけに留まらず、ユビキタス社会の最新技術を活用することは、環境システム分野の更なる発展に貢献すると考えられる。

**謝辞：**本研究は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「アジアモンスーン域流域総合水管理研究教育」(拠点リーダー：山梨大学 竹内邦良)の援助を受けた。また中央電子株式会社の町田明氏、株式会社ニッセイコムの小野稔氏には、RFID 技術に関する専門的な助言を頂いた。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 村上輝康, 伊丹敬之, 堀部政男: u-Japan 政策~2010 年ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて~, 「ユビキタスネットワーク社会の実現に向けた政策懇談会」最終報告, 総務省, 2004.
- 2) 坂村健: ユビキタス, TRON に出会う: 『どこでもコンピュータ』の時代へ, NTT 出版, 2004.
- 3) C. M. Roberts: Radio frequency identification (RFID), Computers & Security, No. 25, pp. 18-26, 2006.
- 4) 宇佐美光雄: ユビキタス社会における「ミューチップ」の役割, 情報処理, Vol. 45, No. 4, pp. 410-413, 2004.
- 5) 嶋田善多, 矢吹信喜, 坂田智己: 土木設備の維持管理体系における巡視点検と IC タグの活用, 土木学会論文集, No. 777/VI-65, pp. 161-173, 2004.
- 6) 高田知典, 石間計夫: 無線センサネットワークの建設分野への利用と課題, 土木学会第 60 回年次学術講演会, CS14-010, 423-424, 2005.
- 7) 滝沢泰久, デイビス ピーター, 岩井誠人, 川合誠, 小花貞夫: 無線アドホックネットワークによる自律的端末位置推定方式とその特性, 情報処理学会誌, Vol. 46, No. 12, pp. 2903-2914, 2005.
- 8) 伊藤昭彦: 物質循環としての陸域・海洋生態系との相互作用(陸域), 日本気象学会 2001 年度春季シンポジウム「21 世紀の気象学-将来展望-」の報告, pp. 29-35, 2002.
- 9) 伊藤昭彦, 市井和仁, 田中克典, 佐藤永, 江守正多, 及川武久: 地球システムモデルで用いられる陸域モデル: 研究の現状と課題, 天気, Vol. 51, No. 4, pp. 227-239, 2004.
- 10) 和穎朗太, Phillip Sollins: 森林土壌の炭素動態における土壌中水溶性有機体炭素の役割-微生物による二酸化炭素生産との関係-, 日本生態学会誌, Vol. 52, pp. 111-117, 2002.
- 11) 小松 光, 橋本昌司: 森林生態系における水・炭素・窒素循環の研究に役立つ Process-Based Model, 日本林学会誌, Vol. 84, No. 1, pp. 54-62, 2002.
- 12) 横沢正幸, 米村正一郎, 白戸康人: 陸上生態系における炭素動態のモデリング-土壌内の炭素の分配・流れを中心として-, 日本生態学会誌, Vol. 55, pp. 167-171, 2005.
- 13) 吉村千洋, 谷田一三, 古米弘明, 中島典之: 河川生態系を支える多様な粒状有機物, 応用生態工学, Vol. 9, pp. 85-101, 2006.
- 14) Hall Jr, R. O., Wallace J. B., Eggert S. L.: Organic matter flow in stream flood webs with reduced detrital resource base, Ecology, Vol. 81, pp. 3445-3463, 2000.
- 15) Kawaguchi Y., Taniguchi Y., Nakano S.: Terrestrial invertebrate inputs determine the local abundance of stream fishes in a forested stream, Ecology, Vol. 84, pp. 701-708, 2003.
- 16) 阿部俊夫, 坂本知己, 田中 浩, 延廣竜彦, 壁谷直記, 萩野裕章: モデルによる河畔域の落葉散布パターンの評価, 応用生態工学, Vol. 8, No. 2, pp. 147-156, 2006.
- 17) 岸 千春, 中村太士, 井上幹生: 北海道南西部の小河川幌内川における落葉の収支及び滞留様式, 日本生態学会誌, Vol. 49, pp. 11-20, 1999.
- 18) 阿部俊夫, 坂本知己, 田中 浩, 壁谷直記, 延廣竜彦, 萩野裕章: 落葉広葉樹林の林床における冬期の落葉移動性, 第 56 回日本林学会関東支部発表論文, pp. 247-248, 2005.
- 19) 岸 千春, 中村太士: 小河川における落葉リターの収支と滞留量および保持構造に関する研究, 機能評価に基づいた河畔ゾーンの管理手法に関する研究(中村太士編), pp. 83-107, 北海道大学, 1995.
- 20) 川添朋律: センサネットワークにおける受信信号強度を用いた位置測定システムの構築, 平成 16 年度特別研究報告, 大阪大学基礎工学部情報科学科, 2005.
- 21) 佐藤雅幸, 松尾啓志: 統計的近似とばねモデルを用いたアドホックネットワークにおける端末位置決定手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 2892-2909, 2005.
- 22) Charles J. Amlaner Jr., David W. Macdonald: A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking, PERAMON PRESS, 1995.
- 23) Larry A. Nielsen: Methods of Marking Fish and Shellfish, American Fisheries Society, 1992.
- 24) 坂村健: 次世代ユビキタス情報社会基盤の形成, 情報処理, Vol. 46, No. 5, pp. 502-507, 2005.

## ENVIRONMENTAL DYNAMICS OBSERVATION BY USING RFID TECHNOLOGY: CASE STUDY FOR DEVELOPING LEAF-LITTER TRACKING SYSTEM

Susumu FUNADA, Takanori MORISUGI, Chihiro YOSHIMURA and Hiroshi ISHIDAIRA

In Japan radio frequency identification (RFID) technology is attractive for realizing “Ubiquitous Society”, and has been already prevailed in logistics system. Also in environmental science, RFID is becoming useful for data acquisition. It is because RFID has been recently put into use as IC tag, which has a small chip and allow us to store and transmit data. Thus, this study reviewed the recent development of IC tag and proposed its practical applications in ecology and environmental science.

As a case study, IC tag technology was used to develop the tracking system of individual leaves for understanding leaf-litter dynamics in forests. Based on the leaf tracking by IC tags, leaf-litter dynamics was modeled and its export by a stream was estimated. Those results revealed the advantage of IC tag for tracking individual materials in environments and implied a potential to provide new methods for environmental researches.