富山湾における環境観測用センサネットワークの構築 —システム提案とノードブイの試作—

吉田 将司*・千葉 元**・北條晴正***

A Build of the Sensor Network for an Environmental Observation in the Toyama Bay—The Proposal of a System and a Trial Production of a Node Buoy—

Masashi YOSHIDA, Hajime CHIBA and Harumasa HOJO

Abstract

The authors proposed the development of the environmental observation network in the Toyama bay which is the application of a coast ubiquitous sensor network. Conventionally, coast environmental monitoring had complicated measurement and analytical work. Then, we tried to carry out network connection of the sensor buoys in order to observe two or more points in a real-time. The communication between coordinator routers was possible as a result of the communication experiment with a marine small boat and a land base station. Between the base station and the coordinator buoy, the receiving rate of 19.3 [%] was obtained with the range 1 [km]. However, the measured receiving rate had deteriorated remarkably for the influence of an obstacle. Finally, the buoy for sensor networks was made as an experiment and evaluated.

Keywords : Toyama-bay, Ubiquitous Sensor Network, Buoy, Environmental Observation

キーワード : 通信, 気象・海象, 富山湾, センサネットワーク

1. はじめに

富山湾では多数の河川から淡水が流入するため、生活排水等による河口付近の富栄養化が問題とされている⁽¹⁾。また水深が陸地近くでも深いため、対馬海流に影響されて発生する「寄り回り波」と呼ばれる高波による災害の問題⁽²⁾や、さらには蜃気楼など多くの環境観測に関する研究が行われている。例えば現在富山県漁業組合連合会では定点の観測ブイを設置しその情報を公開⁽³⁾しており、海藻植栽実験⁽⁴⁾なども実施されている。このように、富山県沿岸部における海潮流・海水温度・塩濃度等の季節・時間・場所的な流向流速特性を把握し、その予測技術確立できれば、船舶運航、防災、漁業、海岸施設、海洋環境保全等の多くの分野に貢献できる。

これら沿岸における環境観測では塩濃度や海水温、海面上の気温・湿度など様々なセンサが必要である。また実時間性や観測範囲の拡大、さらにコストの問題などがある。従来の主な環境観測の手法としては①衛星画像の解析、②海上の任意の場所にブイを係留してモニタリング⁽⁵⁾、③海水を採取して後処理分析⁽⁶⁾などが挙げられる。各手法の特徴比較を Table 1 に示す。観測範囲の広さでは①、実時間性では②、解析精度は③が適しているなど、それぞれ特徴がある。継続的に運用する場合、画像購入費用や携帯電話網などの通信回線費用が問題となる。

一方、環境観測の分野では広範囲な地域を多数のセンサと小型無線デバイスで相互接続する、“フィールドサーバ”と呼ばれる手法がある。この手法はユビキタスセンサネットワーク技術を利用したもので、

* 正会員 サレジオ工業高等専門学校 (〒194-0215 町田市小山ケ丘 4-6-8) yoshida@salesio-sp.ac.jp

** 正会員 富山高等専門学校 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合 1 番 2)

*** 正会員 東京海洋大学客員教授 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

Table 1. The feature of the observation approach

Object	Range	Interval	Accuracy	Cost
Satellite imagery	◎	△	△	○
Fixed buoy	△	◎	○	△
Post-Processing	○	△	◎	△
Proposed System	○	◎	○	◎

Fig 1. The model of the system to propose

無線 LAN や ZigBee⁽⁷⁾などの通信インフラや電源獲得手法の発達により近年実用化が進められている⁽⁸⁾。沿岸における環境観測でフィールドサーバはあまり適用されていなかった。これは陸上と異なり、沿岸域ではインフラの整備に課題が多いことが理由として挙げられる。

そこで本研究では沿岸環境観測用センサネットワークシステムの簡易モデルを提案する。我々が提案するシステムは、Table 1 に示すように制限された範囲と観測精度ではあるが、実時間性と観測範囲の拡大及び低コスト化を達成できると考えている。本稿ではまず提案システムの概要を示し、次に基地局ーブイ間の通信距離を富山湾において試験した結果を示す。最後に評価用の小型ブイを試作して係留試験を行い、今後の展開について述べる。

2. システムの概要と構成

2.1 沿岸センサネットワークシステムの概要

Fig. 1 は提案するシステムのモデルを示している。本システムは複数の小型ブイをセンサノードと仮定し、階層化したセンサ網を構成する。まずセンサを

搭載した小型ブイをエンドデバイス (End Device) として海上に配置する。エンドデバイスからのセンシングデータをブイ間で受け渡して、コーディネータ (Coordinator) と呼ばれるブイに集約する。この受け渡し機能をもつブイをルータ (Router) と呼ぶ。最後にコーディネータから基地局へデータが送信される。基地局は収集されたデータを実時間、もしくは後処理で解析することができる。

このシステムはブイに搭載するセンサをモジュール化することで、観測項目の異なるブイを容易に構成できる。また、観測範囲に応じてブイの個数やネットワークを構成できるなど、観測規模・目的・コストに応じて継続した環境観測ができることが最大の特徴である。異なるセンサを搭載した単機能ブイが共通のネットワークに接続されることで、個々のブイの機能を高めることなく観測項目が増加する利点も有る。ただし、提案システムを構築するためには、以下の項目が重要な課題として挙げられる。

① ブイの通信性能

本システムでは、ブイの小型化により電池搭載容量が少なくなるため、消費電流の多い携帯電話や無線 LAN 等を採用できない。現状では 2.4GHz 帯の特定小電力無線を使用するが、将来 ZigBee (もしくは IEEE802.15.4 規格準拠の無線機) を用いたメッシュ型ネットワークへ移行する。この ZigBee は間歇送信により消費電流を低減できるだけでなく、ネットワーク構成ノード数が最大約 6 万と汎用性が高く使用帯域も無線 LAN と干渉しないよう設計されている。

なお、ブイのアンテナ高が低い場合、コーディネータブイーエンドデバイスブイ間及びルータブイーエンドデバイスブイ間の通信距離が短くなることが予想される。

② メンテナンス (整備・交換) のし易さ

洋上に多数のブイを設置する場合、各ブイの電池交換や故障ブイの回収、整備などメンテナンスが問題となる。また、電源の確保も検討項目に挙げられる。

2.2 富山湾観測に関する要求仕様

富山湾での観測具体化の準備として、現在観測中の研究者から要求仕様を抽出した。Table 2 に要求仕様を示す。しかし Table 2 に示す仕様を実現する場合、各観測用センサの精度が高くなる。特に波高は RTK-GPS 受信機が必要であるなど容易に満たすことができない。そこで測定項目の絞込みを行い、本システムのエンドデバイスブイに搭載するセンサを塩濃度測定のための導電率計とした。その理由は、

Table 2. The feature of the observation approach

Object	Requirements Specification
Range	0.2~5[km]
Durability	7~60[Day]
Interval	10~60[min]
Positioning	100[m]
Salt cardinality	± 0.1 [%]
Water temperature	± 0.1 [°C]
Wave pitch	± 0.1 [m]

導電率計は塩濃度だけでなく校正用に温度センサをもっており、水温も同時に計測できるなど有用性が高いからである。GPS 受信機はブイの位置情報と時刻情報を得ることができるが、消費電流が大きく、係留ブイの位置情報は事前に取得可能であるため優先順位を下げた。ただし波の周期と波高観測は重要であることから、1 周波 RTK-GPS 受信機の搭載を検討している。

ブイに要求される動作は、まず海水面近くの塩濃度及び水温をセンサプローブで測定する。出力形式は抵抗値の変化となるため、測定値を電圧変化に変換後にマイコンに入力し、データを間歇送信する。電源は設置場所が陸地近くであることから、二週間程度で充電電池を交換することとした。また耐久性に關しても交換時期を同程度と仮定した。

3. 通信実験とその評価

3.1 実験システムの構成

本システムの構築で重要な未決事項は基地局ーコーディネータブイ間及び各機能ブイ同士の通信距離である。そこで、実際に利用が想定される富山湾において無線評価実験を実施した。この実験では基地局ーコーディネータブイ間の実用的な通信距離を調査することが目的であるため、基本的な構成（基地局とブイ 1 機）で評価を行うこととした。ただし実験時ブイが完成していなかったため、小型船からのデータ送信に変更した。基地局（受信点）には富山高等専門学校射水キャンパスの校舎展望台（6 階相当）を使用した。選定理由は、この場所を本システム稼働時の基地局の候補としているためである。Fig. 2 に実験構成、Fig. 3 に実験に使用した富山高専所属の実習用小型船舶「わかしお 3 号」を示す。そして Fig. 4 は受信点から見た送信側の状況、Fig. 5

Fig.2 The model of the system to propose

Fig.3 Training Ship "Wakashio No.3"

Fig.4 The sight seen from the receiving point

は送信側から見た富山高専の観測塔の内部に設置した基地局である。本実験は通信距離を確認しながら以下の順番で実施した。ただし括弧内は通信距離を示す。

- ①富山高専校内（180m, 280m）
- ②堤防 - 受信点間（380m）
- ③海上 - 受信点間（700~1100m）

実験①は校内における予備実験であり、実験②は海岸沿いの堤防と受信点間の通信が可能かどうかを調査した。さらに実験③では「わかしお」との通信

Fig.5 The receiving point seen from the transmission point

実験である。実験手順はまず、ノート PC から 2.4[GHz] 帯小電力データ通信モデムを介して 124[kByte] のテキストファイルを送信する。この送信データと受信点で取得したファイルを比較して受信文字数から受信率を測定した。送信時間はおよそ 100 秒である。

なおこの実験における通信距離は送信点で測位したハンディ型 GPS 受信機（精度 10[m] 以内）の位置と受信点近くのアンテナ位置から求めた。また実験①と実験③における送信アンテナ高は約 1[m] で、③の場合、都合上「わかしお」の後部甲板に設置した。実験②の送信アンテナ高は約 3[m] である。一方、受信アンテナ高さは約 30[m] で展望室内に設置した。なおアンテナは送受信機ともに無指向性ダイポールアンテナを使用した。

3.2 実験結果とその考察

本実験は実験機材と日程の都合により、2009 年 8 月 3 日の 1 日のみで実施した。Fig. 5 が示すように、天候も良く海面の状態も良好な環境であった。ただ電池の消耗が予想以上に早かったため、実験途中（900[m] と 1000[m] の間）で電池の交換が必要となった。また潮流や風の影響により船位の固定・維持が困難であり、データ送信中に船首が回転し送受信機間が船橋で遮られる状態が生じた。さらに同様の理由から送信点に 20[m] 四方程度のばらつきが生じ、防波堤の防風林で見通しが遮られる場合もあった。

Table 3 に実験①～③における受信率を示す。この結果から、受信率が低いものの、1[km] までデータの受信が可能であることを示している。しかし、本

Table 3. The measurement result of a receiving rate

*: $h_1=3$ [m]

No.	Distance[m]	Receiving Rate[%]
①	180	47.4
①	280	24.3
②	380	50.6*
③	700	3.2
③	800	9.9
③	900	3.8
③	1000	19.3
③	1100	0.0

Fig.6 Propagation characteristic
(Pt-Lf: Free space model, Pt-L: 2 way model)

実験では距離と受信率に相関が見られなかった。その理由を以下に考察する。

まず実験①及び②における低下の原因は、伝搬特性とハイトパターンによるものと考えられる。自由空間伝搬における損失 L_F は、

$$L_F = 20 \log(fd) - 27.56 - G_a \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

と求められる⁽⁹⁾。ここで f は搬送波周波数 [MHz]、 d は距離 [m]、 G_a はアンテナ利得である。一方 2 波モデルによる反射損失 L_R は、

$$L_R = 20 \log \left| 2 \sin \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right| \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

である。ここで h_1 、 h_2 はそれぞれ送受信アンテナ高さ、 λ は波長である。このとき伝搬損失 L は、

$$L = L_F + L_R \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

であり、受信電力 P_r の理論値は、

$$P_r = P_t - L \quad [\text{dBm}] \quad (4)$$

で表される。ここで $f=2402[\text{MHz}]$ 、 $P_t=10[\text{dBm}]$ 、 $h_1=1[\text{m}]$ 、 $h_2=30[\text{m}]$ を代入した結果を Fig. 6 に示す。図中の実線 (P_t-L) が 2 波モデル、破線 (P_t-L_f) が自由空間伝搬モデルを示している。今回の実験では h_2 と通信距離が概算であったため、受信電力が低下する地点だった可能性がある。実験②も h_1 が $3[\text{m}]$ に変更となるが、受信電力が変化する間隔が短くなるものの同様の理由で受信率が低下したと考えられる。

実験③では、通信距離が 700m 以上であったため、伝搬特性やハイトパターンによる影響は少なく、前述した実験中における通信路遮断の影響が大きいといえる。これら通信路遮断と受信率低下の関係は、実験中において受信点側からの観測で確認された。例えば送信時間の半分の時間が遮られると受信率が $50[\%]$ に低下することになるため、影響が大きい。

このように通信環境による受信率の低下が見られたが、 $1[\text{km}]$ 程度まではデータ送信が可能であり、受信率の改善が見込めることを考慮すれば、基地局—コーディネータブイ間の通信距離として十分な結果が得られたと考えられる。しかし受信率確保のためには送受信機間の見通し確保が重要である。対策の一つとして、堤防や岸壁近くの施設に受信機のみ設置し、インターネットを介して基地局にデータ送信することを検討している。

消費電力の問題は送信データの送信間隔やデータプロトコルの制御が必要である。Table 2 で示した必要なデータ送信間隔は最低でも 1 時間に 1 回以上である。送信間隔を 10 分とすれば、1 時間当たり 6 回のデータ送信となり、このうち 1 回受信に成功すれば良い。この場合、許容受信率は 16.7% となる。また、送信データも現在テキストデータであるが、バイナリ伝送方式とすれば送信時間が短縮できる。それに加えて誤り訂正符号を加えることにより、受信率の向上と低消費電力化を目指す。

4. 小型ブイの試作と評価

4.1 評価用小型ブイの構成

Fig. 7 に評価用小型ブイの構成を示す。このブイは、エンドデバイスブイもしくはルータブイを想定しており、センサを一種類のみ搭載し、送信機には IEEE802.15.4 規格の Xbee-Pro (Digi 社製) を採用した。この機器はファームウェアの変更だけで ZigBee 規格に変更することができる。これをマイコンと接続したものを、市販の容器と発泡ウレタンで製作した簡易ブイに搭載した。電源は $6[\text{V}]$ 以上を確保するため、便宜的にアルカリ電池を 4 本直列、5

Fig.7 Structure of a buoy

Fig.8 Condition of the buoy under mooring

個並列に接続した。また湿気対策として吸湿材を隙間に充填した。浮かべた時のアンテナ高さは $20[\text{cm}]$ であった。これらブイ 1 機あたりの価格は 1 万円以内となり、低コスト化が可能である。ただし、価格は今後搭載するセンサの種類により変動する。

4.2 係留試験

富山高専射水キャンパス実習場で係留試験を行った。この試験の目的は簡易型ブイの耐久性と、Xbee-Pro の通信性能確認である。Fig. 8 に係留中のブイを示す。ブイと受信機との距離は $45[\text{m}]$ 、送信側から見た受信アンテナ高さは送信点の潮汐の影響を受けるが、概ね $3\sim 4[\text{m}]$ 程度である。ブイに内蔵されたマイコンから毎秒データ生成して連続送信し、継続時間を測定した。

一回目 (2010/04/07-09) は約 41 時間の連続送信に成功したが、受信側 PC の不調により通信が遮断されたため、実験を中止した。二回目 (2010/04/16-29) は 20 日にデータ送信が中断したが、耐久試験も兼ねている為係留を継続して 29 日にブイを引き上げた。

係留期間中、雨天の日が二回の実験で合計 7 日あったが、浸水はなくデータも受信できていた。なおこの実験期間中電池交換をしていない。この結果から、荒天の場合を除けば簡易な防水構造のブイでも

耐久性と実時間性に関して要求仕様が実現できる。ただし、充填した吸湿剤は水分が多く含まれており、気温や湿度の変化に対しての検討を要する。

また、実験後の調査で Xbee-Pro の通信手順では受信側のコーディネータが電源 OFF となった場合、送信側のエンドデバイスも一旦 OFF とし、コーディネータを再起動してからエンドデバイスも電源を投入する必要があることが判明した。そのため、受信側の都合でデータ受信が遮断された場合、ブイを開封しなければ再起動できない。そこで微弱電波無線を使用し外部から電源を制御する方法を検討した。しかしこの方法も問題の根本的な解決とはならないため、Xbee-Pro のファームウェアを「Digi-mesh」に変更することを検討中である。このファームウェアは Digi 社独自の規格であるため、ZigBee 規格ではなくなるが、ネットワークがメッシュ型に変更でき、ZigBee 規格とほぼ同等の機能を持つ。そのため受信側が一時的に通信不能となってもネットワークは維持され、受信側の復帰が容易となる。

5. まとめ

本稿では、富山湾の環境観測用に小型ブイを用いたセンサネットワークを提案し、その実証のために富山湾において通信試験を行った。次に観測用ブイについて仕様を決定し、評価用ブイを試作した。得られた結果を以下に示す。

- ① 基地局ーコーディネータブイ間の通信システムは見通しを確保できれば 1[km]程度まで可能である。ただし、本実験では受信率が低かったため、システム構成を含め改善する必要がある。
- ② 係留試験の結果、簡易な防水構造のブイでも通常の雨天程度であれば2週間のデータ送信が可能であることを確認し、耐久性、実時間性と低コスト化が可能であることを示した。しかし、通信遮断時の復帰手順に問題が判明し、観測範囲の拡大については示すことができなかった。

今後は ZigBee を利用したエンドデバイスブイ間通信の通信距離を確認し、ルータブイを挿入してネットワーク化を行う。さらに実用化に向けエンドデバイスブイによる長期係留実験を行う予定である。また、既存ブイにモジュール設置することによりネットワークを構築することについても検討中である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な御助言を下された富山高専の水本教授及び実地観測でご協力頂いた

同校臨海実習場の技術職員の皆様に深く謝意を表します。

なお、この研究は科研費補助金課題番号 21700725 の一部を利用して行われました。

参考文献

- (1) 千葉元, 古山彰一, 横井幸治, “船上 CTD/ADCP システムを用いた富山湾の海洋環境計測(環境系)”, “日本建築学会北陸支部研究報告集 (47)”, pp112-115, 2004.
- (2) 河合雅司, 笹谷敬二, 千葉元, 西井典子, “富山湾における波浪災害に関する一考察”, “日本航海学会論文集, Vol. 120, pp. 137-144, 2009.
- (3) 富山県水産情報システム: 富山県地先の情報, <http://www.jf-net.ne.jp/tygyoren/buoy/pc/>.
- (4) NPO 法人富山湾を愛する会, “海藻植栽実験の報告”, “富山湾, Vol. 1, NPO 法人富山湾を愛する会, 2010.
- (5) 寺内元基, 石坂丞二, “衛星データを用いた富山湾における富栄養化のモニタリング”, “沿岸海洋研究, 45(1), pp. 43-49, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 2007.
- (6) 和田雅昭, 畑中勝守, “水産業における情報技術の活用について-V. -マリンブロードバンドの活用-, “日本航海学会論文集, Vol. 122, pp. 53-60, 2010.
- (7) ZigBee Alliance: トップページ, <http://www.zigbee.org/>
- (8) 総務省近畿総合通信局, センサネットワークに関する調査検討会報告書, 2005.
- (9) 横山光雄, スペクトル拡散通信システム, pp. 467, 科学技術出版, 2002.

質疑応答

和田雅昭 (公立はこだて未来大学) :

- ① IEEE802.15.4 の実験における通信エラーの状況はいかがでしたでしょうか?
- ② 基地局とノードブイ間の通信エラー率が高く見受けられますが、実運用時にはどのようにデータを保証するのでしょうか?
- ③ 基地局とノードブイ間の通信に 2.4GHz 帯の小電力無線を使われていますが、2.4GHz 帯であれば無線 LAN の利用も考えられます。なぜ小電力無線を選ばれたのでしょうか?

吉田将司 :

- ① 係留試験では受信側 PC 不調による通信遮断を除き、通信エラーは生じていません。

- ② 通信エラー率の高さは実験状況が原因と考えられるため、①のようにブイではほとんど改善できると考えています。また、発表で紹介したように、基地局の受信アンテナを沿岸に設置して遠隔操作とする回避策を検討中です。
- ③ 無線 LAN は消費電力が高いことが大きな理由です。また陸地近くですと無線 LAN の利用率が高く、実験で使った観測塔近くにもアクセスポイントが設置されているなど干渉が考えられますが、IEEE802.15.4 は無線 LAN の帯域を回避するよう設計されているのでこちらを採用しました。