

# 超低電力無線通信技術による社会基盤施設の 防災情報取得システム構築に関する研究

A study on an acquisition system of disaster information of infrastructure using a ultra low power radio communication technique

玉置晴朗\*, 矢澤正人\*\*, 松本健作\*\*\*, 岡田崇\*\*\*\*, 酒井直樹\*\*\*\*\*, 鷹野澄\*\*\*\*\*

Haruo TAMAKI, Masato, YAZAWA, Kensaku MATSUMOTO, Takashi OKADA, Naoki SAKAI and Kiyoshi TAKANO

- \*教学, 株式会社数理設計研究所 代表 (〒373-0019 群馬県太田市吉澤町 1066 ぐんま産業高度化センター101)
- \*\*株式会社数理設計研究所 大田研究室長 (〒373-0019 群馬県太田市吉澤町 1066 ぐんま産業高度化センター101)
- \*\*\*博(工) 群馬大学大学院助教, 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
- \*\*\*\*修(工) 群馬大学大学院, 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
- \*\*\*\*\*博士(工学) 独立行政法人防災科学技術研究所(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)
- \*\*\*\*\*工学博士 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター教授(〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

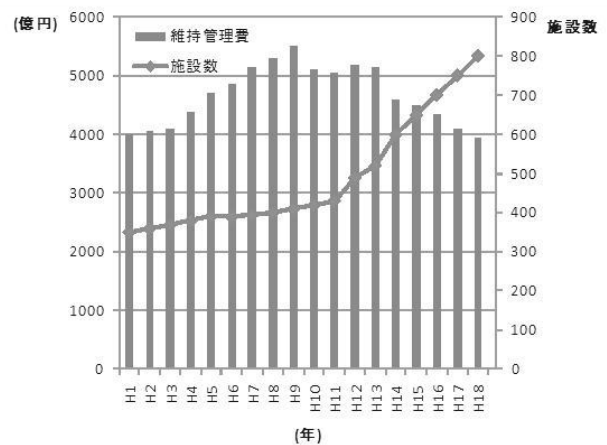
An ultra low power radio communication was developed. This new technique can communicate by 5 per a hundred million watt. This means that the communication system can work by a size D battery for a year. This simplicity is suitable for personal monitoring of disaster. Alarm sensors against the mudflow, the landslide and the flood were also developed. These sensors can work as a disaster monitoring system by using ultra low power radio communication technique. A monitoring system of disaster not only by governance but also by inhabitants was proposed. The disaster monitoring system will be able to provide the information of disaster prevention more detail.

*Key Words: ultra low power radio communication, information of disaster prevention, monitoring of disaster preventions*

キーワード: 超低電力無線通信技術, 防災情報, 防災モニタリング

## 1. はじめに

市民生活の安全・安心を考えるうえで、防災は欠くことのできない要素である。しかしながら、この防災を取り巻く環境は、昨今大きく変化し、その対応が喫緊の課題となっている状況にある。1955年から1973年辺りの第一に、社会的背景からもたらされる要因として、社会基盤施設の劣化が挙げられる。高度経済成長期に施工された社会基盤の多くが、施工から50年以上経過したことになり、その多くが経年劣化によって補修を必要とする状況となってきている。図一に河川施設を例にとった、河川整備に対する予算の経年変化および施工後50年を超える河川施設の数の推移を示す。図一から、河川整備に対する予算が今後、少なくとも増加する傾向は見られないこと、補修の必要が生ずる構造物が今後急増することが見て取れる。このような現状であるため、行政



図一 河川維持管理費および施工後50年を超える河川構造物の推移(平成元年～平成19年)

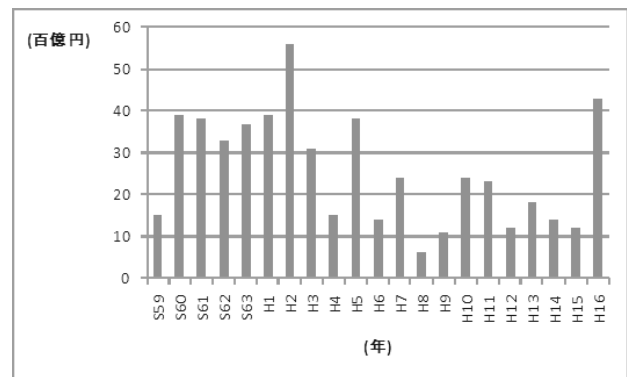
としても、その必要性を把握していながらも、社会基盤の点検・補修を十分に行うことができない状況にある。

いまひとつの要因が、自然災害の多発化、激甚化である。図一2に、同じく河川施設を例にとった、直轄管理区間と補助管理区間を合わせた被災総額の経年変化(昭和59年～平成16年)を示す。図一2を見ると、災害の頻発した平成2年度には5,500億円、平均しても2,000億円程度の損害を受けていることがうかがえる。自然災害は今後も頻発することが予想されるが、上記のような社会基盤施設の劣化状況を鑑みると、更に被害が増加することが予想される。また、地球温暖化や、メディアによって折に触れて用いられているゲリラ豪雨と称される突発性の集中豪雨の発生など、自然災害の発生状況も多発化・激甚化の傾向を見せている。

こうした状況のなかで、自然災害を完全に防ぐことはできないという考えのもと、防災から減災へと、行政はその対応の指針を変化させている。たとえ災害が発生したとしても、その被害を最小限に抑え、少なくとも人命を失うことの無いようにするという方針である。投資力が限られていること、災害が激甚化しているということを考慮すると、ハード面での対策には限界があり、ソフト面での対策が重要となることは明らかであり、そのための取り組みが活発に行われているところである。

ソフト面での取り組みは多岐に亘るが、災害発生前から災害に対する意識および知識を高めておく、災害が発生した際の対応を事前に準備しておくなどの取り組みと並び、いまひとつ重要となる課題が、「いつ、どこで、どのような災害が発生した」、あるいは「発生しそうである」、という情報を入手および通信するための計測・診断を行うモニタリング面での取り組みである。このモニタリングの結果は、施設の劣化を示す場合にはその補修を行う指標となることでハード面での取り組みにフィードバックされ、また、災害発生に関する情報である場合、ソフト的対策を含めたその後の対応の起点となる最重要情報となる。

しかし、自然災害自体が大規模で複雑且つ激しい現象であること、防災社会基盤が広範囲に存在し全域をカバーすることが困難であることなどによって、現状においても十分なモニタリング体制が構築できているとは言い難い。阪神大震災後に全国の自治体に設置された約2,800台の震度計を例にとると、そのうち約8割が財政的理由などで機器更新を行うことができず、既存の震度計の約5割が老朽化によるセンサや回路の不具合で正常な運用ができない状況となっている。実際にこれら機器を運用している地方自治体にとって維持管理のために必要なことは国からの財政援助であるとの報告があるが、前述のように、国にも既に財政的余裕はない。このような事態が、防災におけるモニタリングに関し、実に多くの現場で発生しており、また、状況改善の打開策の無いまま放置されている状況にある。



図一2 直轄区間および補助管理区間を合わせた河川施設の被害総額(昭和59年～平成16年)

以上のような背景を受け、本研究では、防災におけるモニタリングの計測および通信の両面において新たな技術を導入し、特に通信技術において、効率的で持続可能な防災モニタリングシステムの提案を行う。

## 2. 超低電力無線通信技術による防災モニタリング

### 2.1 超低電力無線通信技術開発の背景

防災施設の劣化・損傷状態、あるいは災害発生の兆候をモニタリングすることは困難である場合が多い。その要因の1つは、モニタリングの対象となる施設が、広範囲且つ多岐に亘り、そのうちのどこが被災するか判断が難しいこと、及び災害がいつ発生するか分からないため、連続計測を行わなければならないことに起因する。また、計測したデータを一旦ロガーに記録し、そのロガーを回収して解析するのでは、その計測情報を瞬時に防災に役立てることができない。このため、実用的な防災モニタリングでは、リアルタイムでの監視が基本となることも防災モニタリングを難しくしている。

モニタリングには通常、何らかの電子機器を必要とするが、そのための電力供給施設および計測データの通信施設の準備が必要となる。観測ポイントは多いほど診断の精度は向上するが、その全てのポイントに、電力及びデータ通信施設を準備すると、予算的な負担が大きくなる。更には、荒廃急山間地における土石流等の監視の場合など、ある程度の予算をかけてもそれらの施設を設置することが困難な場合もある。計測データの通信は、防災モニタリングが劣悪な環境下で行われることが多いことを考えると無線による方法が望ましい。しかし、従来の無線通信では、①バッテリー使用では長期に亘る自動計測が困難であり、頻々とバッテリー交換に赴くのであれば安全性の面からも労力的・経済的・面的にも効率的とは言えないこと、②既存の携帯電話通信や衛星通信を利用したシステムではランニングコストがかかり、更に、これら通信技術は広域災害発生時には不通となる危険性があること、③特定省電力無線や携帯電話通信で使われる

UHF 帯以上の電波は周囲環境(地形, 植生, 天候など)の影響を受け易いこと, ④自由に使用周波数帯を選べる電波法の規制以下の低電力無線通信では, 従来法では 10m 程度が限界で, 広範囲な観測が必要となる防災モニタリングには使用できないことなどの問題点があった。(このタイプの免許を要しない無線機を電波法では微弱無線局という。)これらの問題を解決するため, 著者はスペクトラム拡散無線通信の高速同期法による超低電力無線通信を開発した<sup>1), 2)</sup>.

## 2.2 超低電力無線通信技術の概要

スペクトラム拡散無線通信は, 従来, 深宇宙探査, GPS, 軍事技術などに用いられてきた無線通信技術であり, 通常の無線通信に比べ実験例では 1,000 倍以上の耐雑音性能を有しているため混信に強い。言い換えれば従来と同じ通信距離を維持するならば 1000 分の 1 の送信電力で通信が可能になる。傍受されても解読が困難であり, 秘匿性に優れた無線通信技術でもある。原理は, 元信号を規則 (拡散信号) にしたがひ細切れに送信し, 規則に従って復元するものなので規則を知らなければ通信できない。また, 送信側と受信側で時間軸上の規則位置が同期し, 搬送周波数が厳密に一致にしていなければならない制約がある。この制限のために, 従来のスペクトラム拡散の無線通信では通信開始までに長い同期時間を必要としていたので, スペクトラム拡散法を低電力の即時通信に適用することができなかった。

そこで著者は, 送受信間の即時同期と厳密な周波数一致が無くても通信を可能にする高速同期法を開発した (特許技術)。これは拡散信号にあるトグル点<sup>1,2)</sup>と呼ばれる特徴情報を指標にして高速で送受信機の間で時間同期させることができる手法である。これによって, 極めて高速に, 低電力で, 無線通信を行うことが可能となった。このことは, 防災モニタリングにとって極めて大きな意義を持つ。

従来型の通信機との比較であるが, 無線通信は山野で運用するため, 室内運用する装置のように定量的・定性的に確定的な結果を示すことが難しい。そこで, 実証試験結果として行った, 従来型と本技術の比較を表一1 に示す。送受信機のアンテナ地上高は 1.5m で実験した。本技術では平地で 1/40 のデータ転送速度で従来型同様の 500m 通信が可能となっていることが分かる。従来品の 20 万分の 1 の送信電力で低速通信ができ, 周波数 50MHz とした実験においても同様の距離で通信することも確認している。興味深い特徴として, 従来利用している周波数では堤防を越えて通信することは困難であったが, 周波数を低くすると堤防や尾根を越えて通信できることである。また, 本技術を 420MHz・10mW と同じ送信電力で運用すると 500m の通信距離が 20 倍の 10km になる。目視できる範囲のテレメトリから市域全体の通信が可能になる。山地では実験例として, 送信電

表一1 平地で従来型と本技術の比較

従来 420MHz 10mW FM		本技術 150MHz 50nW SS	
500m	400BPS	500m	10BPS

力を  $3\mu\text{W}$  にした 145MHz 実験機では富士山頂から「ひたちなか」まで 200km の通信が確認できた (アマチュア無線免許による合法局)。また, およそ 400m 高さの頂上から微弱無線局を運用して 2km の通信を赤城山の地蔵岳から火口湖の対岸までの実験で確認した。

これらの成果によって電池運用せざるを得ない環境での中長距離通信に対する有効性を確認している。完全密閉の内臓電池による通信機が実現できるので火山観測や, 日本国内のみならず環太平洋の島嶼や極めて厳しい環境での通信実験にも取り掛かっているところである。

## 2.3 超低電力無線通信技術を用いた防災モニタリングの概要

超低電力無線通信技術を用いることによって, 防災のためのモニタリングシステムは飛躍的に向上する。まず, 50nW (1 億分の 5 ワット) 以下での超低電力無線通信が可能となったため, 電波法の制限を受けず, 特定の無線資格を持たなくても, 誰でも自由に無線通信を行うことができる。これは市民レベルでみたときに極めて大きなメリットとなる。行政による防災モニタリングのみでは行き届かない個々の住宅周りなどの詳細なモニタリングシステムを迅速に構築できることを意味する。

平成 21 年 7 月下旬の山口県防府市で発生した集中豪雨による土砂災害を受け, 被災住民が, 行政に頼るのみでなく, 独自に降雨量を計測し, 独自の判断で避難を行う体制づくりを構築した例は記憶に新しいが, 同様の計測を, 無線で迅速に構築することができる。

超低電力であることで電波法の制限を受けないことのもう一つの大きな特徴は, 使用する周波数帯の制限を受けないという点である。無線通信技術は他にも多々存在するが, 無線法の制限を受けない低電力通信で数 km の通信を可能とした技術はこれまで無かった。この, 使用する周波数帯の制限は, 従来法にとって技術的に大きな障害となっていた。すなわち, 無線電波は周囲の地形に大きく影響を受けるため, 平地であれば数 km の通信が可能であったとしても, 周囲に植生が存在することで要求される性能が発揮できないということが多々あった。

本手法では, モニタリングを行う個々の環境に最適な周波数帯を自由に使用することができるため, 様々な環境下で使用されることが想定される防災モニタリングにとって大きな技術革新であるといえる。

## 3. 防災モニタリングと超低電力無線通信技術

### 3.1 防災モニタリング計測装置の概要

超低電力無線通信を用いた防災モニタリングの適用例を示すにあたり，先に計測装置の概要を示す．荒廃急山間地における土石流警報装置としての水位センサ，地すべり・斜面崩壊の監視装置としての静電容量型加速度検知型傾斜計，堤体監視用加速度計および地温計測器の概略を示し，これらのセンサによる計測結果に超低電力無線通信技術を適用した場合の有効性を示す．

### (1) 荒廃急山間地での土石流監視用水位センサ

図-3 に，土石流警戒監視用差圧型水位センサの概観を，表-2 にその諸元を示す．センサは荒廃急山間地用であるので，落石の衝撃などに対して生残性を持つステンレス製であり耐加重は 10 トンである．図-4 は長野県蒲原沢における水位センサの設置状況である．蒲原沢では巨石の落下や崖崩れが日常的に発生しており，警報装置のための電力供給やデータ通信施設の設置が困難であり，たとえ設置できたとしてもすぐに破損してしまう．このような状況下での監視装置は無線センサが適しているが，設置作業自体にも大きな危険が伴うため，出入りは極力少ないことが望まれる．

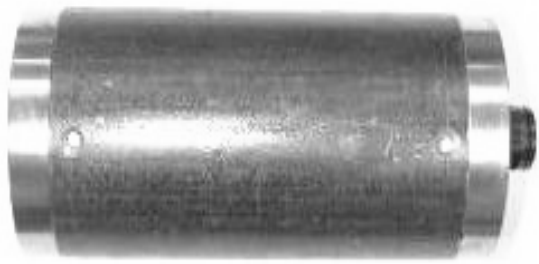


図-3 荒廃急山間地土石流監視用水位センサ

表-2 水位センサの諸元

名称	GID-SS	測定感度 (mm/mV)	2.5
サイズ (mm)	φ 76.3× L180	出力電圧 (mV)	1000～ 5000
総重量 (kg)	3.3	出力電圧 (0kPa 時, mV)	1000
測定範囲 (m)	0～10	保証温度 範囲(°C)	-10～60

### (2) 地すべり・斜面崩壊監視用傾斜計

地すべり・斜面崩壊監視のための傾斜計による土砂災害の監視システムにも本手法を実験中である．傾斜計自体も著者らが独自開発したもので，重力加速度に対する静的感度を有した MEMS 型加速度計であり，0.01 度の角



図-4 蒲原沢における水位センサ型土石流警報装置の設置

度分解能を有している．傾斜計の精度検証および斜面崩壊に対する早期予測の兆候検知性能に関する検証は，独立行政法人防災科学技術研究所の大型降雨実験施設を用いた斜面崩壊実験によって実施している．図-5 に大型降雨実験施設を用いた斜面崩壊実験の様子を，写真-6 に，傾斜計設置の様子を示す．



図-5 防災科学技術研究所大型降雨実験施設における斜面崩壊実験の様子



図-6 傾斜計の設置状況

### (3) 河川堤防リアルタイムモニタリング計測

河川堤防は、最も防災モニタリングの困難な社会基盤の1つである。その理由は、①堤体が歴史的経緯を内包する構造物であり、その時代ごとに構成材料も施工法も異なり、それらが積み重なってできている構造物であること、②大規模且つ長大で広範囲に存在するため、損傷を起こす箇所の特定が困難であること、③被災の主因である出水という現象自体が、その激甚さ故に計測困難であり、堤体を被災させる入力値の取り扱いが困難であること、④堤体内の僅かな不均質構造が水ミチ形成の要因となり得るため、モニタリング用のセンサとはいえ埋設には細心の注意を要すること、⑤堤体被災のメカニズム自体が十分に解明されていないことなどである。しかし、洪水災害は他の自然災害と比して、災害発生から被災拡大までの時間的猶予があるところが1つの特徴である。このことは、いち早く堤防の被災を検知することができれば、その情報の減災効果が極めて大きい災害といえる。

著者らは数年前より河川堤防のリアルタイムヘルスマニタリングに関する研究を進めてきており、加速度、地温、自然電位などの諸量を計測し、堤体の健全性について診断するシステム構築を行っている。図-7 に、著者らが開発した河川堤防をはじめ各種河川構造物の出水時における状態推定に用いている加速度センサの概観を、表-3 にその諸元を示す。



図-7 加速度センサの概観

この加速度センサに加え、自然電位、地温などの様々な物理探査を行い、これまでデータの収集を行ってきており、出水時における河川構造物の状態をそこから診断するための知見を得つつある。図-8 に渡良瀬川堤防に加速度センサを設置している様子を示す。図-9 に、出水時における河川橋梁直下の河川堤防の出水時における加速度振動の原信号およびパワースペクトル図を示す。上図は縦軸が原信号(gal)、横軸は時間(sec)で、下図は縦軸がパワースペクトル、横軸は周波数(Hz)である。出水によって 30Hz 付近にスペクトルのピークが見られ、河川橋梁のみならず、河川堤防も出水によって振動している

表-3 加速度センサの諸元

計測原理	静電容量型	A/D 変換	12bit
計測軸	3 軸	レンジ	64dB
Sampling	1600Hz	サイズ	3×3×8cm
計測範囲	±1.5G		



図-8 渡良瀬川河川堤防への加速度センサ設置の様子

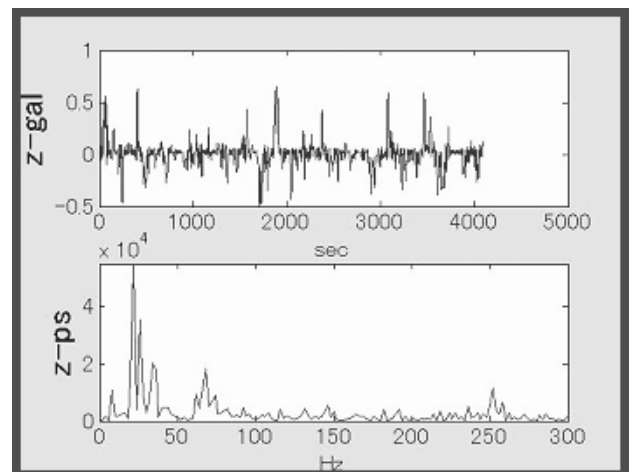


図-9 河川橋梁直下の河川堤防の出水時における加速度振動(上図：原信号，下図：パワースペクトル)

ことが分かっている。この振動特性の変化を監視することで河川堤防の監視を行うシステムの知見の収集がなされ、計測による診断システムが確立されつつある。そこで、計測したデータをリアルタイムで取得する手法として本手法を用いるシステムを検討している。

### 3.2 防災モニタリングへの超低電力無線通信の適用

以下に、(1)荒廃急山間地における土石流監視モニタリング、(2)地すべり・斜面崩壊監視モニタリング、(3)河川堤防の出水時リアルタイムモニタリングの各防災モニタリングにおける、超低電力無線通信技術による技術的改善内容をまとめる。

### (1) 荒廃急山間地における土石流監視モニタリング

従来は、センサへの電力供給および計測結果の通信施設の設置が行える環境でないとリアルタイムモニタリングによる監視が行えなかったが、それら施設の設置無しでも、乾電池数個の電力で1~2年の無人自動計測が行えるようになり、現場の安全に資することができるようになった。

また、電池で運用することにより深い谷や豪雪地帯で太陽電池が使えないところで利用でき、ケーブル設置が必要でないことも設置コストの大幅な低減になる。

### (2) 地すべり・斜面崩壊監視モニタリング

傾斜計を監視したいポイントに埋設または既存物に固定するだけで、迅速にモニタリング体制を構築できるようになった。地すべり・斜面崩壊の危険性がある場所、被災者救済行動への2次災害の監視を行う場合など、センサ設置が小型センサを配置するだけで良いのは大きな利点となる。また、地すべり・斜面崩壊危険地域では植生が繁茂していることが多いが、通常の無線通信技術にとって、植生による遮蔽効果がこれまで未解決の課題であった。本手法が超低電力であることで無線法の適用を受けず、従って自由に使用する周波数帯を選択できることも大きな利点である。従来の2.4GHzの10mW送信機では50mの通信が限界であり、雑草が茂れば30mも届かなかった。本技術の実証試験では150MHzの微弱電波(50nW)では500mの通信性能があり20万分の1の電力で10倍の通信距離であり草木の影響は見られなかった。

### (3) 河川堤防のモニタリング

堤体に設置するセンサは小さいほど望ましいが、超低電力の実現で、通信機は飛躍的に小型化することができるようになった。堤体付近には植生が繁茂していることが多く、また堤体が芝生に覆われている、という無線通信にとっての課題も、前述のように大きく改善できた。国土交通省の行っているモニタリングのみでは行き届かない領域をカバーし、既設の通信網や光ファイバネットワークと連携させることで、更に広範なリアルタイムモニタリングシステムを構築することができる。

## 4. まとめ

市民の安全を考えるうえで欠くことのできない防災情報が、市民1人1人に行きわたっていない。市民の間でも、従来の、行政のみに頼った防災情報の取得のみではもはや自分の身を守ることは困難であるとの認識が広がりつつある状況といえる。本研究で示した超低電力無線通信技術を用いると、行政のみではこれまで行き届か

かった様々な環境下において、迅速に防災モニタリングシステムを構築できる。行政のみでは行き届かない領域には地域性があり、そこではそれぞれの地域に合った警報の出し方がある。しかし、例えば火災警報は通常その周辺のみに出され、その建物中にある者の多くは自分自身に直結する情報として対応しようとする。ところが現在の災害警報は火災警報に匹敵するほどのきめ細かさを持っておらず、そのため、警報が出たとしても自分に関することと瞬時に思えない、思っていないも本当に被災が自分に直結するのかわ判断できないという事態となり、結果的に被害を甚大化させている。広域に対する警報であることで、実際に多くの者にとって空振り情報となってしまう状況が、今後の防災情報への対応の鈍化を助長するという結果をもたらしている側面もある。火災警報に比喻して言えば、「火災が発生した!」と市域全体に警報するようなもので、このような警報を10万人の市域全体に出し続け、そのたびに警報が的中して10人が被災するとしても多くの市民感覚としては1万分の1の確率であり、実際には何の被害も起きないことも多く、市民は次第に「私には無関係な情報」と判断するようになることは避けられない。また、警報の出し遅れは行政担当者の責任問題に発展するため、責任逃れ的に警報を発すると指摘されることもあり、適切な情報を与え得るシステムとは言い難い側面もある。警報を発する担当者に十分に決定的な情報を与えずに判断させる現在のシステムでは、もともと無理があり、ともあれ警報を発しておこうということでは警報の信頼性を低めていく。

警報はその重大さゆえに、関与する住民に特定したものととして与えるのが基本であり、災害の予兆や発生を避難出来る時間余裕を持って報知しなければならない。これが、防災情報が狼少年的な情報とみなされることを防ぐ。したがって、可能な限り小地域を特定して情報提供するためには小地域の詳細な防災情報を収集し、警報を発する者に分析後の確定情報を提供する必要がある。

本手法による、きめ細かい防災モニタリング体制の構築はそれらに対する対策の1つとなり得るものと思われる。

## 参考文献

- 1) <http://www.madlabo.com/mad/product/ss/>  
SS 通信技術の解説と実験レポート
- 2) SS 特許 「スペクトラム拡散方式の通信装置、及び、その高速同期法」  
米国 Patent No.: US 7,471,716 B2  
欧州 Patent No.: 1528690  
韓国 特許第 10-0688329 号  
日本 特許第 3639839 号

(2009年8月7日受付)