

## ユーザーポリシーによるコグニティブ無線の 最適無線リンクおよび経路制御法

内田法彦<sup>†</sup> 高畑一夫<sup>††</sup> 柴田義孝<sup>†</sup>

災害時において無線をベースとした防災災害情報ネットワークは、ネットワーク機器やケーブル断線による故障や電力供給の停止などによる障害から、迅速にネットワーク網を復旧を行える点で有効な通信手段である。しかしながら、単一規格の無線で構築をした場合、距離や利用帯域など物理的特性により利用できる通信サービスの制限や、他の同一周波数帯の無線ネットワークとの電波干渉などの問題が発生する。そこで本稿では、ユーザーポリシーとネットワーク環境を考慮したコグニティブ無線をベースとした防災災害情報ネットワークを提案する。提案方式では、ユーザーポリシーとネットワークの状態量を常に計測し、それぞれの通信サービスの品質要求に対して最適な無線リンクや経路を決定し、切り換え制御が可能である。そしてユーザーポリシーに変化における提案手法をシミュレーションによって検証した。

## Wireless Link and Route Selection Method for Cognitive Wireless Network by User Policy

Noriki Uchida<sup>†</sup> Kazuo Takahata<sup>††</sup> Yoshitaka Shibata<sup>†</sup>

Wireless Network of Disaster Information System is expected an effective method under disaster because it is quickly recovered from network system breakdown or electrical power disconnection. However single wireless transmission has difficulty for network reconstruction due to the limitation of physical wireless characteristics or the user demand changes. Therefore, in this paper, optimal transmission method of Cognitive Wireless Network for Disaster Information System with user policy and network condition is proposed. In our proposal methods, user policy and network conditions are continuously observed, and then optimal wireless link and route are decided. Finally, simulation is held to examine for the change of user policy by our proposal method.

## 1. 背景

日本をはじめとして、大地震、津波、豪雨など自然震災が世界中で発生し大きな被害を与えている。筆者らは[1]、中山間地域において、情報ネットワークシステムの故障、有線ケーブルの断線、電力供給の停止などによる障害から、速やかなネットワーク網の復旧を行うため自給電源や気球による無線ネットワークによる広域無線防災災害情報ネットワーク網を提案し屋外実験や避難訓練を通じてその有効性を確認してきた。しかしながら、単一の無線 LAN など防災災害情報ネットワークを構成した場合に、以下のような問題点がある。第一に、使用する無線通信の物理特性により利用できる通信サービスが制限される。これは、高周波数帯での通信は、ビデオなどの広帯域での通信は適しているが、通信距離が短かく、建造物や樹木などの障害物による影響も大きくなる。一方で、低周波数帯での無線通信は、通信距離が長く、木などの障害物の影響が少ないが、狭帯域でマルチメディアコンテンツなどの転送には適さない。第二に、近年の無線 LAN の急速な普及のため、利用者間での同一無線周波数帯での電波干渉の影響が懸念される。IEEE802.11b/g など一般家庭にも普及し、これらの機器は屋外において防災災害情報ネットワークとしても利用されているため干渉する可能性がある。

そこで本研究では、中山間部における広域無線防災災害情報ネットワークにおいて、有効なコグニティブ無線[2][3]の通信方法を提案し、その有効性をシミュレーションによって確認を行う。想定している無線通信は IEEE802.11a/b/g/j、IEEE802.16 (WiMax)、アマチュア無線など複数の無線通信リンクを持ち、周囲の環境などによって、時間変化とともに最適な無線リンクと経路を決定し選択する。また、最適なリンクを決定する方法として、受信電界強度、スループット、遅延、ジッタ、パケット誤り率等ネットワーク状態量を計測し、それらを基に AHP (Analytic Hierarchy Process) を拡張した無線リンク法を提案する。また本手法を End to end 間の最適経路を選択するため、従来のモバイル経路プロトコル AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) に Min-Max 法を導入した extended AODV 法により経路選択を行う。そして本稿で提案する手法の有効性を ns2 によるシミュレーションによって性能評価を行い、そのユーザーポリシーの変化による有効性を検証する。

<sup>††</sup> 岩手県立大学

Iwate Prefectural University

<sup>††</sup> 埼玉工業大学

Saitama Institute of Technology

## 2. ネットワークモデル

本稿で想定している防災災害情報ネットワークは、図1に示すように災害対策本部と被災地との通信確保のため無線ノードを搭載した複数の移動中継車や固定中継局より構成される[4]。無線ノードは、IEEE802.11a/b/g/j, IEEE802.16 (WiMax), IMT2000などの複数の無線リンクを持ち、ルーティング、アドホック、マルチホップ機能を持つ。そして、ネットワーク状態などの計測値やリンク切り換え情報の伝達に使う制御用の無線リンク(Link 0)として、狭帯域であるが長距離通信が可能なアマチュア無線周波数帯を使用する。またすべての無線ノードは無指向性アンテナを使用する[5]。

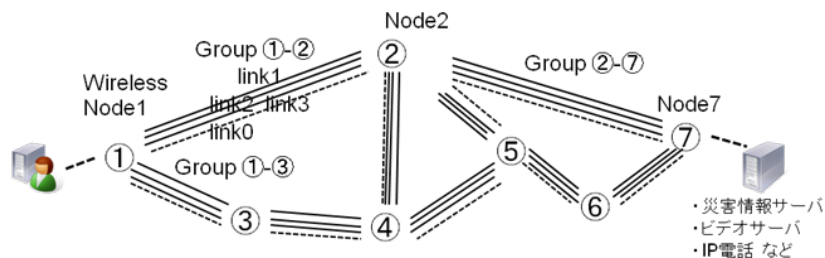


図1 無線ネットワーク構成

## 3. コグニションサイクル

### 3.1 計測ステージ

本稿ではコグニティブ無線の無線リンクおよび経路選択をコグニティブサイクルに基づいてネットワーク状態変化を計測し、リンクや経路選択の適切な判断を行い、切り換えを実行する[2][3]。まず、計測ステージでは、各層でのネットワーク状態量を定期的に計測する。無線通信では無線ノードの移動や周囲の障害物などによって通信環境が変化するため、ユーザの要求する QoS を常に満足させるためにはこれらの状態量を計測しておく必要がある。本稿においては、利用するアプリケーションごとに通信サービスやメディアサービスに必要とされる要件（例えば、帯域重視や、遅延時間重視、パケット誤り率重視あるいはこれらの組み合わせ等）をあらかじめユーザポリシーとして決めておき、これらに関するネットワーク状態量（受信電界強度、スループット、遅延、ジッタ、パケット誤り率等）を計測する。そして、これらの値は次のステージにおけるネットワーク環境の変化の把握と再構成の判断に利用される。

### 3.2 判断ステージ

ネットワーク状態の変化に対して適切な無線リンクや経路選択のための判断は、この判断ステージで行われる。提案する手法においては、ネットワーク状態が変化した時、スループットや遅延や電界強度などのネットワーク計測値と、ユーザポリシーを適合させることにより、最適なリンクと経路を求める。そしてこれらのリンクや経路決定計算法として本研究では従来研究として用いられている AHP をユーザポリシーとネットワーク計測値が組み込めるよう拡張し、ノード間において求められた最も高い評価値を有する無線リンクが選択される。またネットワーク計測値が特定の必要条件を下回った際は、従来の経路プロトコルである AODV 法にさらに Min-Max 法を導入して、最適な無線経路の決定を行う。

### 3.3 実行ステージ

最適な無線リンクまたは経路選択の決定が行われた後、この実行ステージでリンクまたは経路の再構成が行われる。決定されたリンクや経路の情報は、制御用の Link 0 を通じて対象の無線ノードに伝えられる。制御リンクは最も低い無線周波数帯のものを使用しており、リンク変更の場合は、この制御リンクを通じて隣接したノードへ決定した無線リンクの情報を伝達する。そして相互のノードにて、無線 Link の切り替えを同時に行い、経路変更もリンク変更と同様にして行われる。

この実行ステージの後、コグニションサイクルは計測ステージに戻りこのサイクルは通信中繰り返される。

## 4. リンク選択法

### 4.1 AHP

AHP (The Analytic Hierarchy Process)は意思決定法の一つで、複雑な決定を扱う際に利用される構造的な手法であり、Thomas L. Saaty[6]らによって 1970 年代に提唱された。

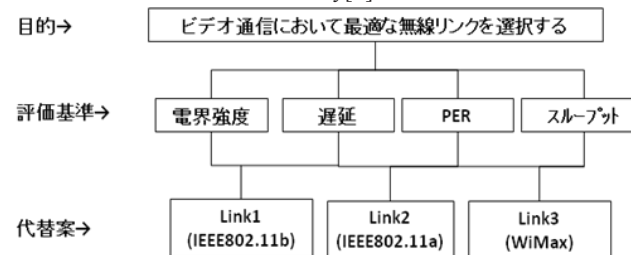


図2 AHP における階層例

AHPにおいては、エラー、遅延などの複数の要素をユーザの意思に反映して1-9段階の重みを反映できることから本研究に適している。また、その計算過程は、問題の階層化、評価基準の対比較評価、代替案の対比較評価、総合値の算出といった順で行われる[7]。階層化がなされた後、AHPでは、評価基準の優先度を算出する。評価基準の個数を  $n$  とし、それぞれの重み(weight)を  $w_1, w_2, \dots, w_n$  とすると、各要素における対比較は、 $a_{ij} = w_i/w_j$  と表現される。また、これらの対比較は以下の対比較行列  $A$  になる。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_1}{w_j} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_j}{w_j} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_i}{w_1} & \dots & \frac{w_i}{w_j} & \dots & \frac{w_i}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_j}{w_j} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \dots & \frac{w_n}{w_j} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_1}{w_1} & \dots & \frac{w_j}{w_j} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

そして正規化された行列  $A_{norm}$  は以下のように表現できる。

$$A_{norm} = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1j} & \dots & b_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & \dots & b_{ij} & \dots & b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nj} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}, \quad \text{但し、} b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (2)$$

そして、評価基準における各優先度  $p_i$  は次の方程式により算出される。

$$p_i = \frac{\sum_{l=1}^n b_{il}}{n} \quad (3)$$

このとき、各評価基準の重み  $w_n$  は対象ユーザ考慮して1-9段階の重みが決められおり、対比較評価  $a_{ij}$  や優先度  $p_i$  の計算に用いられる。例えば、本研究におけるユーザ要求を考慮した各目的別の評価基準に関する表1に、また式(1)~(3)により各Goalに対する評価基準の優先度  $p_1 \sim p_4$  は表2のようになる。

続いて、代替案についても、評価基準と同様に重みを用いて、評価基準毎に優先度が計算される。しなしながら、次節で述べるように、本稿においては代替案の優先度計算において、無線ネットワーク状態の環境変化を考慮するため、Packet Probing 法を

用いたスループットや遅延などのネットワーク状態の計測値を利用して重み  $w_n$  を算出し、各代替案の優先度の計算に適用する。

表 1 評価基準における対比較行列例

Goal1(Video 優先)	電界強度	エラー	遅延	スループット
電界強度	1	1	3	1/2
エラー	1	1	3	1/2
遅延	1/3	1/3	1	1/5
スループット	2	2	5	1
Goal2(VoIP 優先)	電界強度	エラー	遅延	スループット
電界強度	1	1	1/2	3
エラー	1	1	1/2	3
遅延	2	2	1	5
スループット	1/3	1/3	1/5	1
Goal3(Text 優先)	電界強度	エラー	遅延	スループット
電界強度	1	1/2	3	3
エラー	2	1	5	5
遅延	1/3	1/3	1	1
スループット	1/5	1/5	1	1

表 2 評価基準の優先度結果例

目的	電界強度	エラー	遅延	スループット
Goal1(Video 優先)	0.2346	0.2346	0.0819	0.4480
Goal2(VoIP 優先)	0.2346	0.2346	0.4489	0.0820
Goal3(Text 優先)	0.3300	0.4673	0.1145	0.0885

それから、AHPにおいては各評価基準と各代替案の優先度を用いて総合値の計算がおこなわれる。総合値は、各評価基準の重みと対象の代替案の優先度の積を計算し、それらの総和によって求めることができる。そして、算出された代替案の総合値の大

きいものが、最適な無線リンクとして選択される。

#### 4.2 Extended AHP

本研究においては、コグニティブ無線において、ネットワーク環境の外的要因もしくはノードの移動に伴う状態変化に対応するため、代替案の重みの算出にネットワーク状態の計測値を使用する[8]。各代替案の重みを  $S_i$  とし、 $u_i$  を各代替案の上限値、 $l_i$  を下限値、また、 $n_i$  を計測期間の移動平均値とすると、電界強度に関しては(4)式、遅延、PER については(5)式によって重みが求められる。また、スループットに関しては(6)式のように代替案のスケールが異なるため  $u_{max}$  が利用される。

$$S_i = \begin{cases} \left[ \frac{n_i - l_i}{u_i - l_i} \times 10 \right] & ; l < n_i < u_i \\ 1 & ; n_i \leq l_i \\ 9 & ; n_i \geq u_i \end{cases} \quad (4)$$

$$S_i = \begin{cases} \left[ 1 - \frac{n_i - l_i}{u_i - l_i} \times 10 \right] & ; l < n_i < u_i \\ 1 & ; n_i \geq u_i \\ 9 & ; n_i \leq l_i \end{cases} \quad (5)$$

$$S_i = \left[ \frac{n_i - l_i}{u_{max} - l_i} \times 10 \right] \quad \text{但し } u_{max} = \max(u_i) \quad (6)$$

但し  $\lceil \cdot \rceil$  は小数点2桁以下を四捨五入

なお、この際、適切な等間隔でスコアを配置するため四捨五入して1から9の整数値を以後の計算に適用する。そして、これらの値は前節(1)式の  $w_i$  と置き換えて計算され、同様にして各評価基準毎の優先度が算出される。そして、最後に評価基準と代替案の優先度の結果を用いて、総合値の計算を行い、最大値を示した無線リンクが最適な無線リンクとして選択される。

表 3 総合値結果例

目的	電界強度	エラー	遅延	スループット	総合値
802.11b	0.0938	0.0469	0.0273	0.0500	0.2180
802.11a	0.0938	0.0938	0.0273	0.3000	0.5142
802.11g	0.0469	0.0938	0.0273	0.0995	0.2678

## 5. 経路選択法

### 5.1 AODV

本研究の提案手法において、もし隣接するノード間でリンク状態が確保できない場合は、ネットワーク経路の変更を行う。この際、従来の経路プロトコル AODV を新たに拡張した Extended AODV を本研究では導入する。

AODV は、MANET(mobile ad hoc network)に利用されている経路プロトコルであり、経路変更の要求があった時のみに経路構成を行う reactive 型の経路プロトコルである。このため AODV の特徴としては、OLSR や TBRPF といった proactive 型に比べ、経路再構成の速度が遅いが、通常の通信時において制御情報が少なく済むのでネットワーク資源の利用性に優れているという特徴がある。本研究にて想定している災害情報ネットワークにおいては、限られたネットワーク資源において、それほど頻繁に通信経路の変更はないことから、AODV を基にした経路選択法を採用する。

### 5.2 Extended AODV with Min-Max Method

従来の AODV プロトコルでは、送信元から送信先の間で最小ホップ数を与える経路が選択されるが、これが本研究においては必ずしも最適な経路とは限らない。なぜなら、各ノードが複数の物理的性質の異なる無線リンクを有するので、例えば1ホップの IEEE802.11b 通信よりは、2ホップの IEEE802.11a 通信の方が高帯域のためユーザがビデオ通信を優先した場合には適しているなどの結果が得られることがあるからである。このため、本研究ではリンク選択において計算された AHP による各無線リンクの優先度の計算結果を RREQ と RREP に加え、Min-Max 法により最適な経路選択を行う手法を提案する。

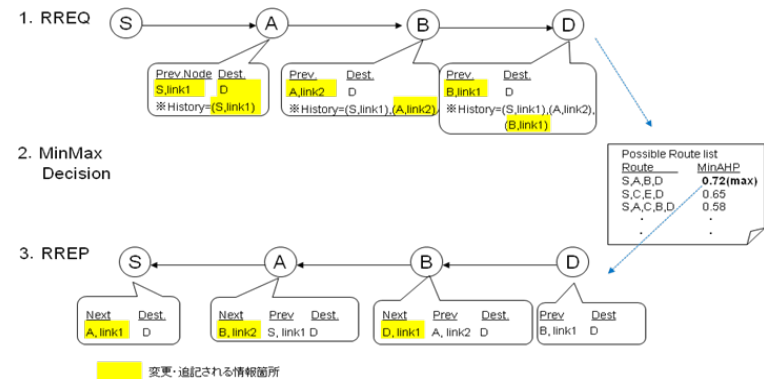


図 3 拡張 AODV パケット

本提案手法では、図 3 に示すように送信元ノード S から送信先 D にデータ送信を行いたい場合、まず、通常の AODV 法と同様にノード S は RREQ パケットをブロードキャスト配信する。隣接する中継ノード A は前の隣接ノード ID の他、使用された最適無線リンク ID 及び AHP による優先度の値を保存し、固有 RREQ に準じた経路履歴に追記する。次に、ノード A は同様にノード S を除く隣接ノードへ RREQ パケットを配信し、受信した隣接ノード B は同様の処理を繰り返す。このようにして最終的に目的の送信先ノード D に到達するまで処理が繰り返される。

次に、RREQ パケットが送信先ノードに達すると、送信先ノードは一定時間複数の RREQ パケットの到着を待ち、経路情報と AHP による優先度情報を持った候補経路のリストを作成する。そうして作成された候補経路は各候補経路リストにおいて、それぞれの最適無線リンクの優先度を比較し、その中の最小値を候補経路毎に抜粋する。その次に、これら候補経路毎の最小値を比較し、その中から最大値を有する経路が最適な経路として選択される。その後、この Min-Max 法により選択された経路に従い、ノード D は RREP パケットを送信先へ返信するのだが、その際中継ノードは RREQ パケット送信時に作成した隣接した送信ノードを参照しながら返信を行い、これにより各中継ノードは隣接する送信、受信ノードを知ることになる。

このようにして選択された最適経路は、以前述べたように、実行ステージにおいて、Link 0 を通じて各ノードに伝達され、同時に経路接続の再構成が行われていく。

## 6. シミュレーション

### 6.1 シミュレーション環境

本研究における提案手法の有効性を評価するため、ns2 (Network Simulator 2)による検証を行った。

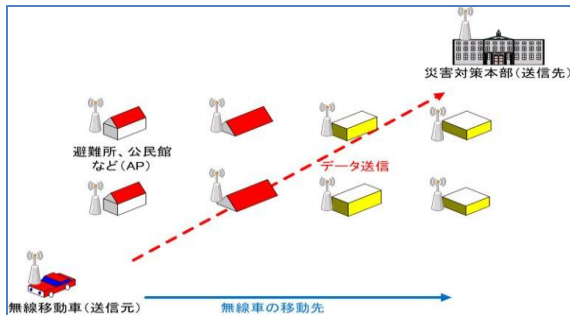


図 4 想定する simulation 環境

想定する環境としては、一定の速さで移動している移動中継車をデータ送信元とし、市役所や役場などの災害対策本部をデータ送信先として想定する。なお、移動中継車と災害対策本部との間には避難所や学校、公民館といった公共施設を無線中継点として配置した。

そして、本稿においてはユーザポリシーの重みによる選択結果を検証するためにビデオ通信優先のシナリオを設定し、(電界強度,PER,遅延,スループット)の重みベクトルを; ①重みなし(1,1,1,1)、②スループットと遅延にやや重みをおいた場合 (3,3,1,3)、③スループット最優先 (3,1,1,9)の3段階の強度でシミュレーションを行い、スループットによる変化を検証した。また、他のシミュレーション環境は以下の表に示す。

表 4 シミュレーション環境

項目	シミュレーション内容
無線ノード	Node0 (送信元): 座標(x,y,z)=(5,5,5)から(800,5,5)へ 5m/s で移動。 Node1(送信先): 座標(800,300,5)に固定 また Node0 と 1 の間に均等に 8 個の無線ノードを配置。
アンテナ	無指向性
転送データ	(1)320x240 MJPEG(15fps, 1/15 Compressed data, スループット平均 1.84Mbps) を node0 から node1 へ送信。
Link Interface	IEEE802.11a/b/g. また各無線リンクは 1channel で、アマチュア無線を Control link (link0)として使用。
空間データ	実環境実験データから引用
観測値	電界強度、スループット、PER、遅延

### 6.2 シミュレーション結果について

まず初めに、比較のため、通常の AODV による単一の無線リンクのみの場合のシミュレーション結果を以下の図 5 に表わしている。次に 3 パターンのユーザポリシーの重みによる提案手法を用いた場合のコグニティブ無線の結果を図 6 に示す。

まず、ポリシーによる重みがない場合、最小 hop 数の経路を選択され 68sec 付近まで IEEE802.11b を利用した最小 hop 数の経路が選択され、その後 IEEE802.11g の hop 数が減少すると同時に経路選択が変化し、138sec 付近で IEEE802.11a が選択される結果となっている。次にスループットと遅延を優先した場合、IEEE802.11g を利用した経路が遅延とスループットの優位性からか選択されており、最終的に 145sec 付近まで選択されている。そして、最後にスループット優先に重みが設定された場合、単一

の無線ネットワークが示すように、最大スループットの無線リンクおよび経路が選択されていることが示されている。

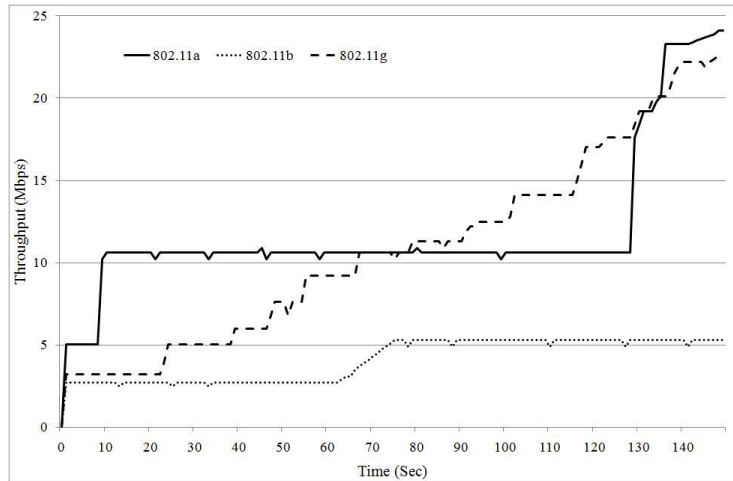


図 5 ビデオ通信時の単一无線リンク通信

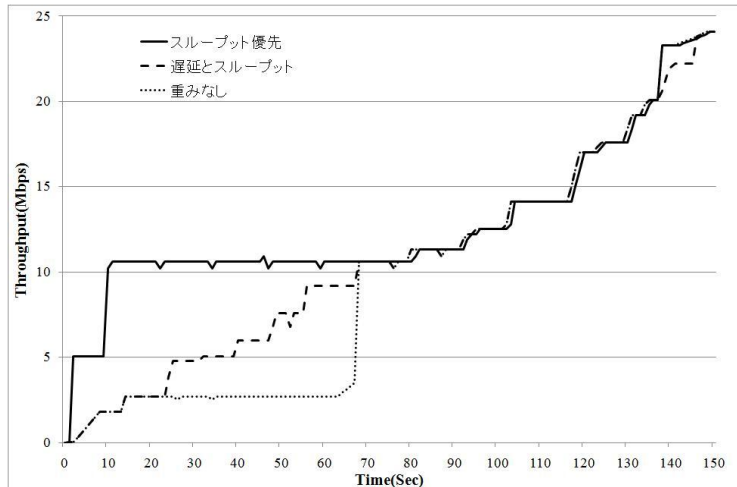


図 6 ビデオ通信時のコグニティブ無線通信

## 7. まとめ

本研究では、防災災害情報ネットワークにおける単一无線リンクによる問題点を考慮し、コグニティブ無線を導入した場合の無線リンクと経路選択のための最適な制御法を提案し、シミュレーションによってその有効性を議論した。

提案した複数の異なる物理特性を有する無線ノードから構成されるコグニティブ無線通信方式は、ネットワーク状態量を計測しながら、利用するサービス品質の優先度を考慮するため AHP により隣接ノード間で最適な無線リンクに切り換えることが可能となる。またこの方法をさらに従来の AODV に拡張することにより、end-to-end 間でサービスに要求する品質への優先度を考慮した経路選択が可能となる。

そして本提案手法の有効性を確かめるために ns2 によるシミュレーションを行い、ビデオ通信時におけるユーザポリシーの重み別に性能評価を行った。その結果、本研究で提案した手法は、災害時におけるユーザのサービスへの品質要求に複数の重みを変化させることで無線リンクおよび経路を選択することができ、その結果コグニティブ無線通信の制御法として有効であることを確認することができた。

今後の課題としては、実際に本手法をプロトタイプシステムとして実装し、実際に屋外実験を行い、実環境での有効性や問題点を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- 1) Sato, G. Asahizawa, D. Asahizawa, Kawano, Y. Shibata, Y. : Power Saving Radio LANs for Disaster Information System, NBS2009 (2009).
- 2) Mitola, J, III. Maguire, G.Q, Jr. : Cognitive radio: making software radios more personal. Personal Communications, IEEE Volume 6, Issue 4, pp.13 – 18 (1999).
- 3) Mitola, J, III.: Cognitive Radio; An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Dissertation, Doctor of Technology, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden. TRITA-IT AVH 00:01ISSN 1403-5286. ISRN KTH/IT/AVH.00/01-SE.
- 4) 佐藤剛至, 柴田義孝.: 異種無線 LAN を用いた災害情報ネットワーク. FIT2009, Vol.4, pp435-436.
- 5) T. L. Saaty. “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process”, European Journal of Operational Research, Vol48 (1990).
- 6) AHP, <http://www.isc.senshu-u.ac.jp/~thc0456/AHP/>.
- 7) Ahmed, T, Kyamakya, K, Ludwig, M.: Design and Implementation of a Context-Aware Decision, Algorithm for Heterogeneous Networks Symposium on Applied Computing, Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing, Pages: 1134 - 1138 (2006)
- 8) 杉本武之, 山口実靖, 浅谷耕一: 異種無線環境下における複数のハンドオーバートリガを用いた無線システム選択方式の提案と評価. 信学技報, vol.108, no.457, NS2008-159, pp.89-94 (2009)