Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

衛星地上統合移動通信システムにおける動的資源割当による周波数利用効率の改善

阿萬　友洋†　　山里　敬也††a)

Dynamic Resource Allocation for Improvement of Spectrum Efficiency of Satellite/Terrestrial Integrated Mobile Communication System

Tomohiro AMAN† and Takaya YAMAZATO††a)

あらまし　衛星移動通信システム及び地上移動通信システムの相互補完のため衛星地上統合移動通信システムが注目されている．同システムでは同一携帯端末で衛星移動通信システムと地上移動通信システムを利用することができるのでいつでもどこでも安定した通信を提供可能である．また周波数帯域の有効利用のため衛星移動通信システム及び地上移動通信システムで同一周波数を共用する．しかし衛星移動通信システム及び地上移動通信システムではトラヒックが異なり，多くの呼損が発生すると考えられる．呼損の発生によって高い周波数利用効率の達成が困難である．そこで本論文では衛星移動通信システム及び地上移動通信システムではトラヒックに応じて動的に帯域を割り当てる動的帯域幅割当を衛星地上統合移動通信システムに適用し，周波数利用効率の改善を考える．本論文では動的帯域幅割当手法として逐次型帯域幅割当手法を提案する．逐次型帯域幅割当手法とはトラヒックと既に割り当てられている帯域から逐次的に帯域を割り当てていく手法である．提案手法によって帯域を固定とする固定帯域幅割当手法に比べ高い周波数利用効率を達成できることをシミュレーションによって確認した．

キーワード　衛星地上統合移動通信システム，周波数利用効率，動的資源割当，逐次型帯域幅割当手法

1. まえがき

現在利用されている CDMA2000 や W-CDMA などの地上移動通信システム（地上システム）は山岳部や海上などで基地局を設置する事が困難であり通信を行うことができない．また地震や台風などの災害地においても設置された基地局の障害により地上システムを利用できない可能性がある．そこで地上システムが利用できないエリアにおいて衛星移動通信システム（衛星システム）を利用する衛星地上統合移動通信システムが注目されている [1], [2]．衛星システムは地上システムに比べ広域性や耐災害性に優れており，地上システムの補完として利用することができる．図 1 に衛星地上統合移動通信システムのシステムモデルを示す．衛星地上統合移動通信システムは図 1 のように携

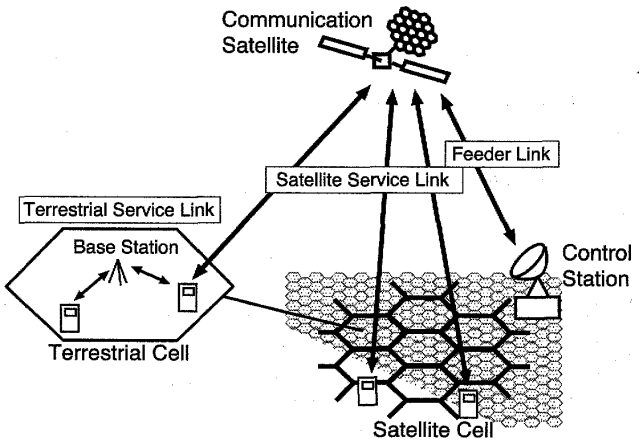


図 1　衛星地上統合移動通信システムのシステムモデル
Fig. 1　System model of the satellite/terrestrial integrated mobile communication system (STICS).

† 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻，名古屋市
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464–8603 Japan
†† 名古屋大学教養教育院教養教育推進室，名古屋市
Institute of Liberal Arts and Sciences, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464–8603 Japan
a) E-mail: yamazato@m.ieice.org

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

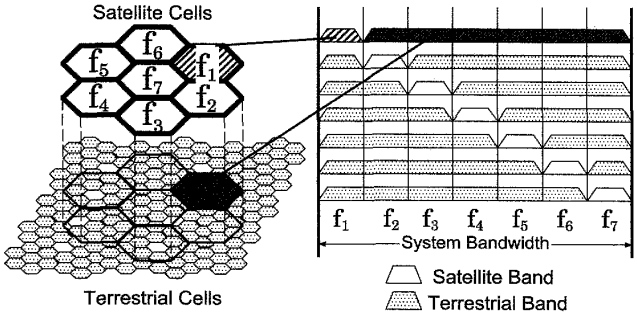


図 2 周波数共用方式
Fig. 2 Frequency bandwidth sharing between satellite and terrestrial systems for the case of fixed bandwidth allocation (FBA).

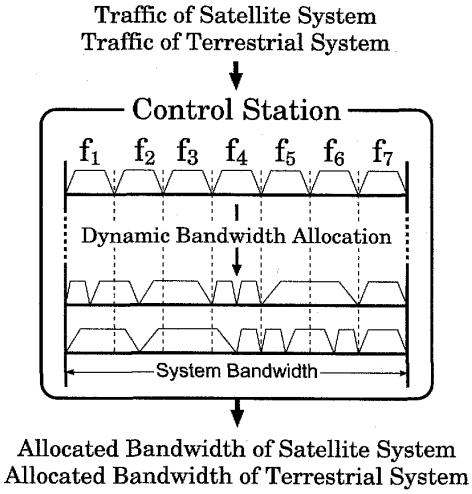


図 3 動的帯域幅割当
Fig. 3 Dynamic bandwidth allocation (DBA) for satellite/terrestrial integrated mobile communication system (STICS).

帯端末と大形展開アンテナを搭載した静止通信衛星，制御局，基地局で構成される．通信衛星に大形展開アンテナを搭載することで利得対雑音温度比や等価等方放射電力が向上でき，小型の携帯端末でも衛星システムが利用できるようになる．また，同一携帯端末で衛星システムと地上システムを利用することができる．衛星地上統合移動通信システムでは離島，山岳地帯や災害地などの地上システムを利用できない場所においても衛星システムを利用し通信を行うことができる．つまりいつでもどこでも安定した通信をより確実に提供することが可能である．

衛星地上統合移動通信システムでは衛星システムと地上システムで周波数共用を行う [3], [4]．図 2 に周波数共用方式の衛星システムと地上システムへの周波数割当を示す．図のように帯域 f_1 を利用する衛星セルのフットプリント内の地上セルでは衛星信号からの干渉のため帯域 f_1 以外の帯域を再利用する．このように衛星システムと地上システムで周波数を共用することにより高い周波数利用効率の達成が期待できる．

これまでに検討されている衛星地上統合移動通信システムでは帯域幅を固定とする固定帯域幅割当が想定されている [1]．衛星システムと地上システムではトラヒック変動が異なり固定帯域幅割当だと呼損が発生し，高い周波数利用効率の達成が困難であると考えられる．そこで本論文では高い周波数利用効率を達成するために図 3 に示す動的帯域幅割当に着目する．動的帯域幅割当では図のように衛星システムと地上システムのトラヒックに応じて帯域幅を動的に割り当てる．動的帯域幅割当によって呼損を抑制でき，高い周波数利用効率を達成可能であると考えられる．動的帯域幅割当手法としてはゲーム理論に基づく帯域幅割当手法が提案されている [5], [6]．しかし文献 [5], [6] では無線 LAN やセルラーシステムなどの混在する地上複合無線通信環境を想定しており，衛星地上統合移動通信システムにおける動的帯域幅割当手法はまだ研究されていない．

本論文では衛星地上統合移動通信システムにおいて高い周波数利用効率を達成するために動的帯域幅割当手法を提案する．具体的には逐次的に帯域を選択し帯域幅を割り当てていく逐次型帯域幅割当手法を提案する．逐次型帯域幅割当手法の周波数利用効率をシミュレーションを用いて評価する．また比較対象として，ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法を取り上げ，提案手法と周波数利用効率の比較を行う．以下 **2.** では衛星地上統合移動通信システムのシステムモデルを示し，**3.** では動的帯域幅割当手法について説明し，**4.** では提案手法の数値例を示し，**5.** で本論文をまとめる．

2. システムモデル

図 1 に衛星地上統合移動通信システムのシステムモデルを示す．図に示すように衛星地上統合移動通信システムでは同一携帯端末で衛星システムと地上システムを利用する．衛星システムは携帯端末，静止通信衛星，制御局で構成され携帯端末–通信衛星間の通信を衛星サービスリンクとし制御局–通信衛星間の通信をフィーダリンクとする．地上システムは携帯端末，地上基地局で構成され携帯端末–基地局間の通信を地上サービスリンクとする．また衛星システムと地上システムで周波数共用を行う．ところで，通常，地上システムの周波数割当は，各基地局で管理される．これに

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

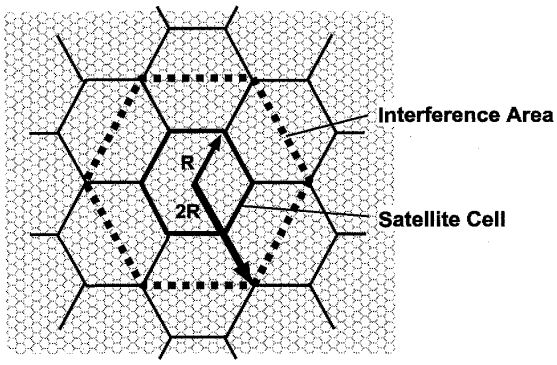


図 4　衛星信号の干渉範囲
Fig. 4　Satellite signal interference area.

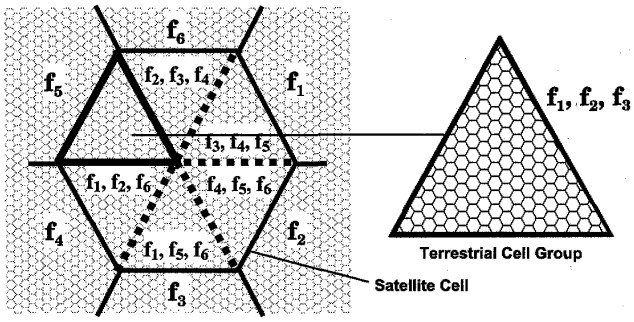


図 5　地上セル群の構成
Fig. 5　Satellite cell sector and a group that shares the same assigned terrestrial band.

対し，衛星地上統合移動通信システムでは，複数の地上セルをグループ化した地上セル群ごとに周波数割当を行う．地上セル群の基地局は互いに制御回線で結ばれており，その中のある基地局が制御局と制御回線で結ばれている．この基地局が，地上セル群の無線アクセスネットワークにおけるトラヒック情報を集約し，制御局へと通知する．制御局では衛星システムと地上システムのトラヒックを集約し，トラヒックに応じて動的帯域幅割当を行う．

2.1　地上セル群

一般に地上セルの数は衛星セルの数に比べ非常に多くなる．例えば衛星セルの直径を約 100～200 km とし，地上セルの直径を約 0.5～10 km とする．すると 1 衛星セル内に 1 万以上の地上セルが存在することになる．したがって制御局において地上セルごとのトラヒックを集約し，動的帯域幅割当を行うことは困難である．そこで複数の地上セルをグループ化し，これを地上セル群とする．本論文では衛星信号の干渉範囲に従って地上セルを地上セル群にグループ化する．地上セルで利用可能な帯域は衛星信号の干渉範囲に依存するので，衛星信号の干渉範囲に応じたグループ化は地上セルで再利用可能な帯域に応じてグループ化することと等しい．したがって地上システムで再利用可能な帯域は地上セル群ごとに異なる．

衛星地上統合移動通信システムでは，衛星システムと地上システムとで同じ周波数帯域を共用するため，衛星システムと地上システムの間でシステム間干渉が発生する．本論文では，文献 [3] の結果を踏襲し，システム間の許容干渉レベルを決定する．具体的には，文献 [3] の図 4 のアンテナパターンを考え，地上セルに対してアンテナゲインが −12.5 dB 以下となる範囲を許容干渉レベルとする．すなわち，衛星信号の電力が −12.5 dB 以下なら地上で周波数再利用できるものとする．

図 4 に衛星信号の干渉範囲を示す．衛星セルの半径を R とし，図のように半径 $2R$ の衛星信号の干渉範囲を想定する [3]．このとき隣接衛星セルの干渉範囲を考えて利用可能な帯域に応じて衛星セル内のエリアを分割すると，図 5 のように 1 衛星セル内に六つのエリアが構成される．このエリアごとに地上セルを地上セル群としてグループ化する．地上セル群では三つの帯域を再利用することができる．例えば図 5 において帯域 f_5 を利用する衛星セルに隣接する地上セル群では帯域 f_1, f_2, f_3 を利用することができる．このように複数地上セルを地上セル群にグループ化し，制御局では地上セル群ごとのトラヒックを集約する．

3.　動的帯域幅割当

本論文では衛星地上統合移動通信システムにおいて周波数利用効率の劣化を抑制するために動的帯域幅割当を適用する．まず，地上システムでは地上セルの基地局が要求呼数を算出する．算出された要求呼数は地上セル群単位で地上セル群内のある基地局に集約され，制御局へと送信される．衛星システムでも同様に制御局にて要求呼数を算出する．具体的には，衛星セル i 及び地上セル群 j において要求呼数 X_i^{sat}，X_j^{grp} から要求帯域幅 bw_i^{sat}，bw_i^{sat} を算出し，制御局へ送信する．

$$bw_i^{sat} = X_i^{sat}/C^{sat} \tag{1}$$

$$bw_j^{grp} = X_j^{grp}/C^{ter} \tag{2}$$

ここで C^{sat} 及び C^{ter} を衛星システム及び地上システムの帯域当り回線容量 [calls/MHz] とする．ETS-VIII 型の音声通信実験 [2] ではビーム当り帯域幅が

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

5 MHz のビームを 3 ビームで伝送速度が 5.6 kbit/s の音声通信で 1000 チャネルを想定しており，C^{sat} は 67 [call/MHz] とできる．また第 3 世代移動体通信では 5 MHz 当り 2 Mbit/s の伝送容量があり [5]，地上システムにおける伝送速度 5.2 kbit/s の音声通信の C^{ter} は 77 [call/MHz] となる．

制御局では衛星セルと地上セル群の要求帯域幅から動的帯域幅割当手法を用いて割当を行う．動的帯域幅割当手法として本論文ではゲーム理論に基づく帯域幅割当手法と逐次型帯域幅割当手法を提案する．

3.1 ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法

ゲーム理論とは複数プレーヤーが存在する状況でペイオフを最大にするように各プレーヤーが戦術を決める手法であり，ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法は文献 [5], [6] において提案されている．文献 [5] では一つの通信端末で IEEE 802.11 WLAN (Wireless Local Area Network)，セルラシステム，IEEE 802.16 WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) を利用できる複合無線通信環境において，ゲーム理論を用いて複数のサービスエリアにトラヒックに応じて各無線通信システムの帯域幅を分配する．文献 [5] では各種無線通信システムをプレーヤーとし，分配する帯域幅を戦略，各サービスエリアに分配する帯域幅を変数とした効用関数をペイオフとして設定する．

衛星地上統合移動通信システムでは文献 [5] で想定する環境と異なり，各衛星セルや地上セル群をプレーヤーとしてゲーム理論を適用することはできない．なぜなら衛星地上統合移動通信システムでは衛星システムと地上システム間の周波数共用や地上システム内の周波数繰返しを考慮する必要があるからである．そこで本論文では衛星セル及び地上セル群でなく各帯域 f_i をプレーヤーとし，割当帯域幅 BW_i を戦略とするゲーム理論に基づく帯域幅割当手法を提案する．これによって周波数繰返しや周波数共用を考慮した割当が可能となる．

プレーヤーを地上セル群や衛星セルとすることも考えられる．その場合，ある地上セル群で利用した帯域をどの地上セル群で繰り返し利用しているのかプレーヤーが把握できないため，結果として特性が悪くなることが予想される．

先に述べたように，衛星地上統合移動通信システムでは，図 2 で示したように帯域 f_i の帯域幅も動的に変更させる．したがって，地上システムでの帯域幅 f_i が変化すると衛星システムの帯域幅 f_i も変化することになる．

さて，提案するゲーム理論に基づく帯域幅割当手法では効用関数 U を帯域 f_i の重み付け要求帯域幅 $\overline{bw_i}$ と割当帯域幅 BW_i を変数とした指数効用関数とする．

$$U = \sum_i \exp\left(-\left(1 - \frac{BW_i}{\overline{bw_i}}\right)\right) \tag{3}$$

重み付け要求帯域幅 $\overline{bw_i}$ を衛星セル及び地上セル群の要求帯域幅 bw_i^{sat}，bw_j^{grp} を用いて以下の式で定義する．

$$\overline{bw_i} = W\, bw_i^{sat} + (1-W)\, \frac{\sum_{j \in \mathbf{GRP}_i} bw_j^{grp}}{K_i} \tag{4}$$

ここで W $(0 \leq W \leq 1)$ は衛星トラヒックの重みとする．W が 0 に近いと地上トラヒックを重視した帯域幅割当になり，W が 1 に近いと衛星トラヒックを重視した帯域幅割当になる．また $\mathbf{GRP}_i$ は帯域 i を利用する地上セル群の集合を示しており，K_i は帯域 i を利用する地上セル群の数を示している．ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法では効用関数式 (3) を最大にするように帯域幅を割り当てる．そのためには，効用関数 U が上に凸で無ければならない．これを調べるために，まず，式 (3) の偏微分をとる．

$$\frac{\partial U}{\partial BW_i} = \sum_l \frac{1}{\overline{bw_l}} \exp\left(-\left(1 - \frac{BW_l}{\overline{bw_l}}\right)\right) \frac{\partial BW_l}{\partial BW_i} \tag{5}$$

ここで帯域 f_m に注目したときに BW_m は BW_i にのみ依存するものと仮定する．更に各帯域幅の合計はシステム帯域幅 BW_{tot} と等しくならなければならない．つまり $\sum BW_i = BW_{tot}$ となる．以上を考えると次式が成り立つ．

$$\frac{\partial BW_l}{\partial BW_i} = \begin{cases} 1 & l = i \\ -1 & l = m \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6}$$

これより効用関数 U は上に凸であるといえる．また，式 (5) は次のようになる．

$$\frac{\partial U}{\partial BW_i} = \frac{1}{\overline{bw_i}} \exp\left(-\left(1 - \frac{BW_i}{\overline{bw_i}}\right)\right) - \frac{1}{\overline{bw_m}} \exp\left(-\left(1 - \frac{BW_m}{\overline{bw_m}}\right)\right) \tag{7}$$

ペイオフが最大となるのは，式 (7) が 0 となる場合で

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

ある．式 (7) を 0 ($\frac{\partial U}{\partial BW_i}=0$) とおき，$BW_m$ について解くと次のようになる．

$$BW_m = \frac{BW_i\,\overline{bw}_m}{\overline{bw}_i} + \overline{bw}_m \ln \frac{\overline{bw}_m}{\overline{bw}_i} \tag{8}$$

更に式 (8) を $BW_{tot}=\sum_m BW_m$ として代入すると次式となる．

$$BW_{tot} = \frac{BW_i}{\overline{bw}_i}\sum_m \overline{bw}_m + \sum_m \overline{bw}_m \ln \frac{\overline{bw}_m}{\overline{bw}_i} \tag{9}$$

これを割当帯域幅 BW_i について解くと以下のようになる．

$$BW_i = \frac{\left(BW_{tot} - \sum_m \overline{bw}_m \ln \frac{\overline{bw}_m}{\overline{bw}_i}\right)}{\sum_m \overline{bw}_m}\overline{bw}_i \tag{10}$$

ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法では要求帯域幅から式 (10) を計算し割り当てる．

3.2 逐次型帯域幅割当手法

ゲーム理論を用いた帯域幅割当手法では衛星セルと地上セル群の要求帯域幅から割当を行うので割当帯域幅については考慮しない．したがって呼損の抑制が不十分で高い周波数利用効率の達成が困難であると考えられる．そこで呼損を十分に抑制するために要求帯域幅からだけでなく，要求帯域幅と割当帯域幅から帯域幅割当を行う逐次型帯域幅割当手法を提案する．逐次型帯域幅割当手法のフローチャートを図 6 に示す．逐次型帯域幅割当ではまず衛星セルと地上セル群の要求帯域幅と割当帯域幅から帯域選択規準に従って帯域幅を割り当てる帯域を選択する．そして選択した帯域へ一定の帯域幅を割り当てる．この操作をシステムの全帯域を割り当てるまで繰り返していく．帯域選択規準によって帯域幅を割り当てる帯域が決まるので割当結果は帯域選択基準に大きく依存する．本論文では衛星セルと地上セル群の要求帯域幅と割当帯域幅を用いた以下の三つの帯域選択規準を提案する．

- 差に応じた帯域選択基準
- 比に応じた帯域選択基準
- セル数に応じた帯域選択基準

以下に提案する三つの帯域選択規準について詳しく述べる．

3.2.1 差に応じた帯域選択基準

差に応じた帯域選択基準では要求帯域幅と割当帯域幅の差が大きい帯域を選択する．この帯域選択基準を用いた逐次型帯域幅割当手法は要求帯域幅の大きい帯域を優先する割当手法であるといえる．

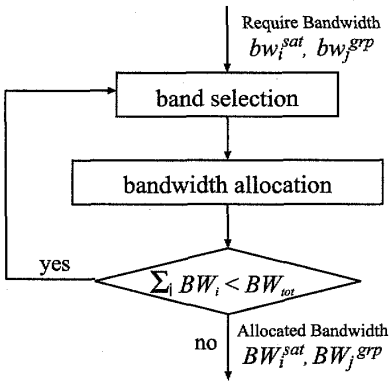


図 6 逐次型帯域幅割当手法のフローチャート
Fig. 6 Flowchart of successive DBA.

差に応じた帯域選択基準ではまず衛星セル，地上セル群ごとに要求帯域幅と割当帯域幅の差 Δbw_i^{sat}，Δbw_j^{grp} を以下の式を用いて算出する．

$$\Delta bw_i^{sat} = \begin{cases} bw_i^{sat} - BW_i^{sat} & \left(bw_i^{sat} > BW_i^{sat}\right) \\ 0 & \left(bw_i^{sat} \le BW_i^{sat}\right) \end{cases}$$

$$\Delta bw_j^{grp} = \begin{cases} bw_j^{grp} - BW_j^{grp} & \left(bw_j^{grp} > BW_j^{grp}\right) \\ 0 & \left(bw_j^{grp} \le BW_j^{grp}\right) \end{cases}$$

算出した要求帯域幅と割当帯域幅の差から帯域ごとに重み付けした要求帯域幅と割当帯域幅の差 $\overline{\Delta bw}_i$ を以下の式で算出し，$\overline{\Delta bw}_i$ が最も大きい帯域を選択する．

$$\overline{\Delta bw}_i = W\,\Delta bw_i^{sat} + (1-W)\,\frac{\sum_{j\in \mathbf{GRP}_i} \Delta bw_j^{grp}}{K_i} \tag{11}$$

ここで W $(0 \le W \le 1)$ は衛星トラヒックの重みとする．また $\mathbf{GRP}_i$ は帯域 i を利用する地上セル群の集合を示しており，K_i は帯域 i を利用する地上セル群の数を示している．

3.2.2 比に応じた帯域選択基準

比に応じた帯域選択規準では呼損が最も大きい帯域を選択する．

3. で述べたように，一つの呼で必要となる帯域幅は音声通信の伝送速度から算出でき，衛星システム及び地上システムのそれぞれで固定値をとる．これより，衛星セル，地上セル群の呼損率 P_i^{sat}，P_j^{grp} は以下の式で表され，要求帯域幅と割当帯域幅の比の関数になることが分かる．

$$P_i^{sat} = \begin{cases} 1 - \frac{BW_i^{sat}}{bw_i^{sat}} & \left(bw_i^{sat} > BW_i^{sat}\right) \\ 0 & \left(bw_i^{sat} \le BW_i^{sat}\right) \end{cases}$$

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

$$P_j^{grp}=\begin{cases} 1-\frac{BW_j^{grp}}{bw_j^{grp}} & \left(bw_j^{grp} > BW_j^{grp}\right) \\ 0 & \left(bw_j^{grp} \leq BW_j^{grp}\right) \end{cases}$$

比に応じた帯域選択基準ではまず呼損率を算出する．算出した衛星セルや地上セル群の呼損率から帯域ごとに重み付けした呼損率 $\overline{P}_i$ を算出し，$\overline{P}_i$ が最も大きい帯域を選択する．

$$\overline{P}_i = W\,P_i^{sat} + (1-W)\,\frac{\sum_{j\in \mathbf{GRP}_i} P_j^{grp}}{K_i} \qquad (12)$$

3.2.3 セル数に応じた帯域選択基準

セル数に応じた帯域選択基準では割当帯域幅が要求帯域幅を満たしていない衛星セルの数と地上セル群の数が多い帯域を選択する．この帯域選択規準を用いた逐次型帯域幅割当手法は割り当てた帯域幅が最も多くの衛星セルや地上セル群で利用される帯域を優先する割当手法である．

セル数に応じた帯域選択基準ではまず帯域 f_i を利用する衛星セルで割当帯域幅が帯域幅を満たしていない衛星セルの数 N_i^{sat} と帯域 f_i を利用する地上セル群で割当帯域幅が帯域幅を満たしていない地上セル群の数 N_i^{grp} を算出する．算出した N_i^{sat} と N_i^{grp} から帯域ごとに重み付けした割当帯域幅が要求帯域幅を満たさないセル数 $\overline{N}_i$ を算出し，$\overline{N}_i$ が最も多い帯域を選択する．

$$\overline{N}_i = W\,N_i^{sat} + (1-W)\,N_i^{grp} \qquad (13)$$

ただし $\overline{N}_i$ が等しい帯域が複数あるときは差に応じた帯域選択規準（**3.2.1** を参照）を用いる．

4. 数 値 例

本論文では動的帯域幅割当手法を適用したときの周波数利用効率をシミュレーションを用いて評価する．シミュレーション諸元を表 1 に示す．なお，本論文では図 7 に示すような衛星セル数が七つの場合のみを考える．衛星セルの周波数繰り返しについては検討しない．

また，割当帯域幅を小さくすると周波数割当の精度が高くなり特性の向上が期待できるが，実際に 0.1 MHz としても，周波数利用効率は 0.5 MHz と比べて変化はみられなかった．むしろ，この変更に伴う計算量が増加したため，本論文では 0.5 MHz としている．

4.1 トラヒックモデル

本論文では衛星セル及び地上セルごとにユーザ数，

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation condition.

衛星セル数 I	7 (セル)
地上セル群数	6 (セル群/衛星セル)
地上セル数	2000 (セル/地上セル群)
衛星平均人口密度	0.01〜0.1 [人/km^2]
システム帯域幅 BW_{tot}	30 [MHz]
帯域当り回線容量 [call/MHz]	地上システム C^{ter} 71
	衛星システム C^{sat} 67
端末伝送速度 r	5.6 [kbit/s]
シミュレーション時間	24 × 7 [時間]
逐次型帯域幅割当手法における 1 回当りの割当帯域幅	0.5 [MHz]

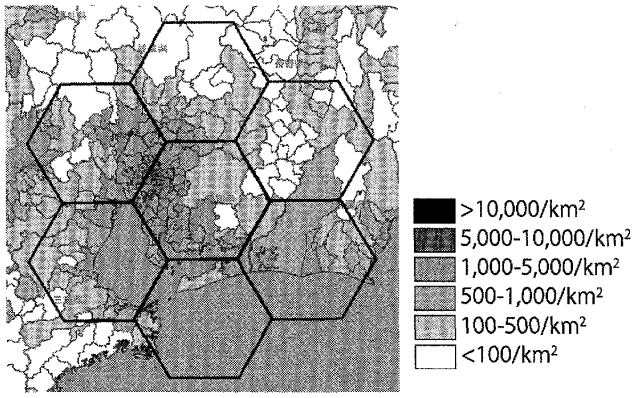


図 7 衛星セルと人口分布図
Fig. 7 Satellite cells and population density.

発呼率，平均通話時間を設定し，以下の式で衛星セル i の要求呼数 $X_i^{sat}(t)$ と地上セル j の要求呼数 $X_j^{ter}(t)$ をモデル化した．

$$X_i^{sat}(t) = p_i^{sat} \times \lambda_i^{sat}(t) \times h_i^{sat}(t)$$
$$X_j^{ter}(t) = p_j^{ter} \times \lambda_j^{ter}(t) \times h_j^{ter}(t) \qquad (14)$$

p をユーザ数とし $\lambda(t)$, $h(t)$ をそれぞれ時間 t における一人当りの発呼率と平均通話時間とする．

地上セルのユーザ数は図 7 のように設定した．図 7 においてユーザ密度が低いエリアは色を薄くし，人口密度が高いエリアは色を濃く示している．海上や人口密度が低いエリア（100 人/km^2 以下）では衛星システムを利用するよう衛星セルのユーザ密度を設定した．シミュレーションは，図 7 の七つの衛星セル及びそのフットプリント内のすべての地上セルにトラヒックがあるものとして行った．ただし，地上システムにおいては個々の地上セルでトラヒックを発生させるのではなく，セル群単位で発生させた．

地上セルの発呼率と平均通話時間は文献 [7] を参考に時間帯ごとに設定した．図 8 及び図 9 にそれぞれ地

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

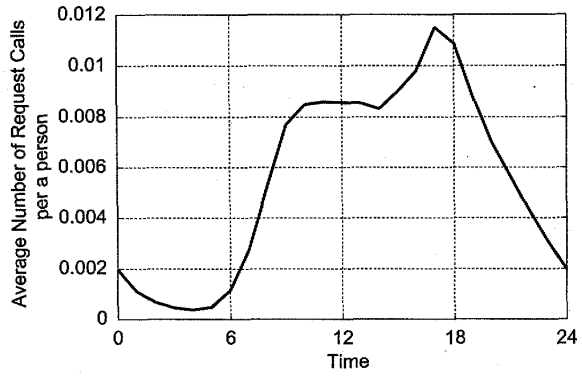


図 8　地上システムにおける一人当りの時間帯別平均発呼率

Fig. 8　Average number of request calls per a person per a terrestrial cell.

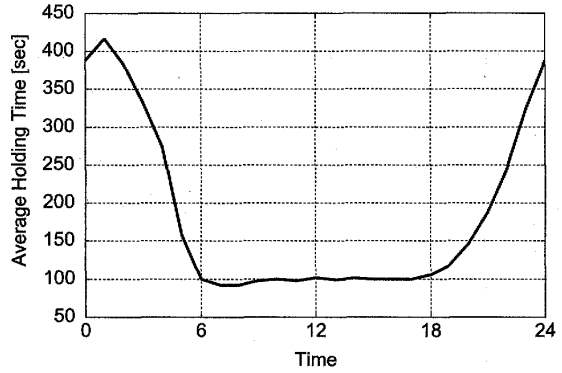


図 9　地上システムにおける時間帯別平均接続時間

Fig. 9　Average holding time of a request call per a terrestrial cell.

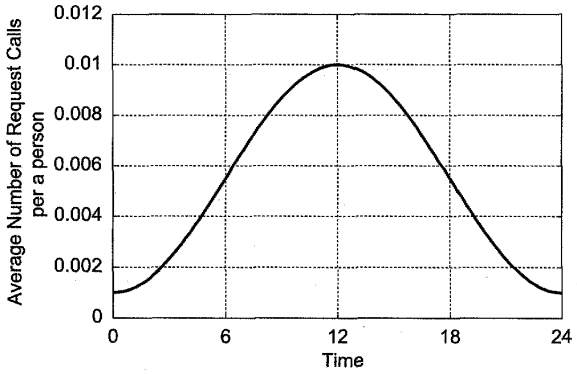


図 10　衛星システムにおける一人当りの時間帯別平均発呼率

Fig. 10　Average number of request calls per a person per a satellite cell.

上システムにおける一人当りの時間帯別平均発呼率及び平均通話時間を示す．横軸を時間とし縦軸をそれぞれ平均発呼率及び平均通話時間とする，また衛星システムにおける一人当りの時間帯別平均発呼率を図 10 に示す．残念ながら，筆者等が調査した範囲では衛星システムにおける一人当りの時間帯別平均発個率を示

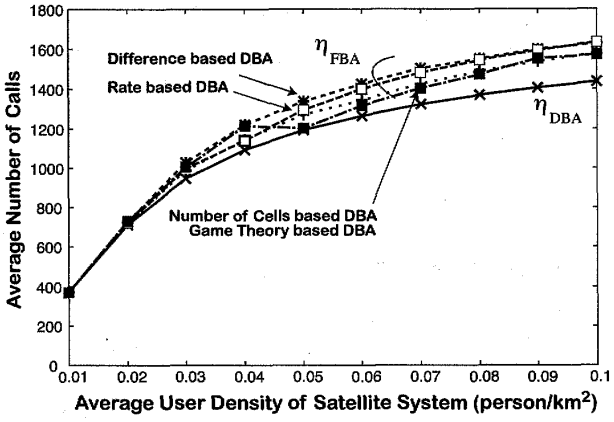


図 11　衛星ユーザ密度に対する衛星システムの平均接続呼数

Fig. 11　Average number of calls of satellite systems for diffent satellite user density.

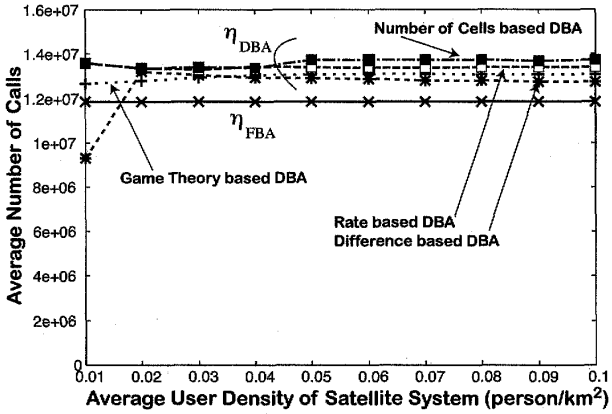


図 12　衛星ユーザ密度に対する地上システムの平均接続呼数

Fig. 12　Average number of calls of terrestrial systems for diffent satellite user density.

している文献は見つからなかった．そこで，図に示すように 0 時に最小値 (0.01) となり 12 時に最大値 (0.1) をとる正弦関数で仮定した．また平均通話時間は携帯電話の 1 通信当りの平均通信時間が 2 分 8 秒であることから 120 秒で一定とした [8].

4.2　衛星ユーザ密度に対する平均接続呼数

図 11 に衛星ユーザ密度に対する衛星システムの周波数利用効率 η を示す．横軸は衛星ユーザ密度であり，縦軸は周波数利用効率（平均接続呼数）である．この図より，衛星システムにおいては衛星ユーザ密度が高くなるほど接続呼数が多くなることが確認できる．また，固定帯域割当手法に比べて動的帯域割当手法の方が接続呼数は多くなるが，その差はそれほど大きくない．

図 12 に地上システムの平均接続呼数を示す．ここでも，動的帯域割当手法の優位性は確認できるが，ゲー

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

ム理論に基づく手法と逐次型帯域割当手法との差はそれほど大きくない．図 11 と図 12 を比較すると，地上システムの接続呼数が圧倒的に多い．例えば，衛星システムのユーザ密度が 0.1 の点で固定帯域割当手法と比較しても，地上システムは衛星システムの約 8,200 倍となっている．

4.3 周波数利用効率改善率

4.3.1 評価尺度

評価尺度として（式 (15)）で定義される周波数利用効率改善率 γ を用いる

$$\gamma\,[\%] = \frac{\eta_{\mathrm{DBA}} - \eta_{\mathrm{FBA}}}{\eta_{\mathrm{FBA}}} \times 100 \qquad (15)$$

ここで周波数利用効率 η を帯域幅 1 MHz 当りの単位時間平均接続呼数とし，η_{DBA} 及び η_{FBA} をそれぞれ動的帯域幅割当及び固定帯域幅割当を適用したときの周波数利用効率とする．固定帯域幅割当とは帯域幅を等帯域幅で固定とする割当方式である．つまり周波数利用効率改善率は動的帯域幅割当による固定帯域幅割当に対する周波数利用効率の改善率といえる．

4.3.2 周波数利用効率改善率

図 13，図 14 に衛星トラヒックの重み W に対する動的帯域幅割当手法による衛星システム及び地上システムの周波数利用効率改善率を示す．ただし衛星システムの平均ユーザ密度は 0.05 人/km^2，割当間隔を 0.1 時間とする．横軸を衛星トラヒックの重み W とし，縦軸を衛星システム及び地上システムの周波数利用効率改善率とする．図 13 より W を大きくすると衛星システムの周波数利用効率が大きく改善できることが分かる．ただし図 14 より W を大きくすると地上システムの周波数利用効率改善率は固定帯域幅割当より劣化することが分かる．このように衛星システムと地上システムの周波数利用効率は衛星トラヒックの重み W に対してトレードオフの関係にあり，W を大きくすると衛星システムを重視した帯域幅割当になり，W を小さくすると地上システムを重視した帯域幅割当になる．

次に逐次型帯域割当手法の三つの帯域選択基準による特性の違いについて考察する．まず，差に応じた帯域選択基準（Difference based Criterion）では，要求割当帯域幅と割当帯域幅の差が大きい帯域を選択し，帯域を逐次的に割り当てていく．このため，一部の要求が大きいエリアに優先して帯域を割り当てていくことになる．一方，比に応じた帯域選択基準（Rate based Criterion）では要求割当帯域幅と割当帯域幅の

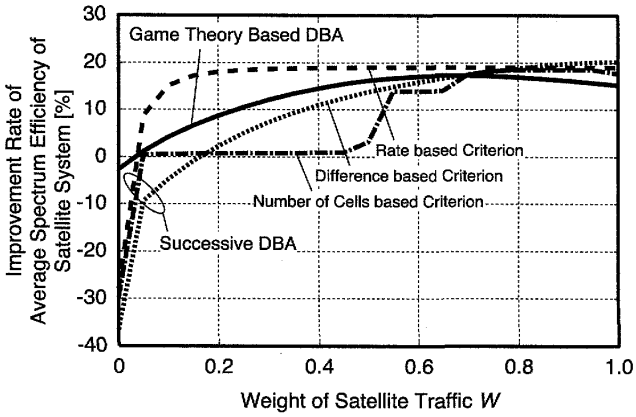


図 13 衛星トラヒックの重み W に対する衛星システムの周波数利用効率改善率
Fig. 13 Improvement rate of average spectrum efficiency of satellite system.

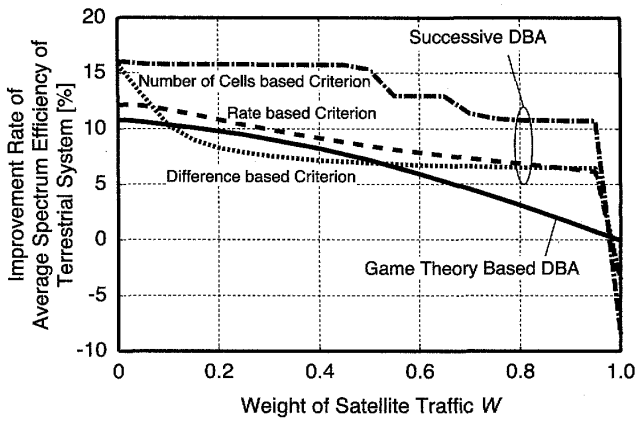


図 14 衛星トラヒックの重み W に対する地上システムの周波数利用効率改善率
Fig. 14 Improvement rate of average spectrum efficiency of terrestrial system.

比（呼損率）が小さくなるように割り当てる．このため，差に応じた帯域基準に比べて割当の偏りが小さくなり，結果として衛星システムにおいて最も良い特性を示す．最後にセル数に応じた帯域選択基準（Number of Cells based Criterion）では，割当帯域幅が要求を満たしていない衛星セルの数と地上セル群の数が多い帯域を選択し，割り当てていく．このため，ある一定の帯域幅の要求が大きいが少ないエリアでしか利用されない帯域より，要求は少なくても多くのエリアで再利用される帯域に優先的に割り当てることになる．したがって，ある一定の帯域幅を最も多くのユーザに利用される帯域へ割り当てる基準であり，最も公平性が高いといえる．結果として，地上システムにおいて最も良い特性を示す．

図 15 に衛星システムの平均ユーザ密度に対する動的帯域幅割当手法によるシステム全体の周波数利用効

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

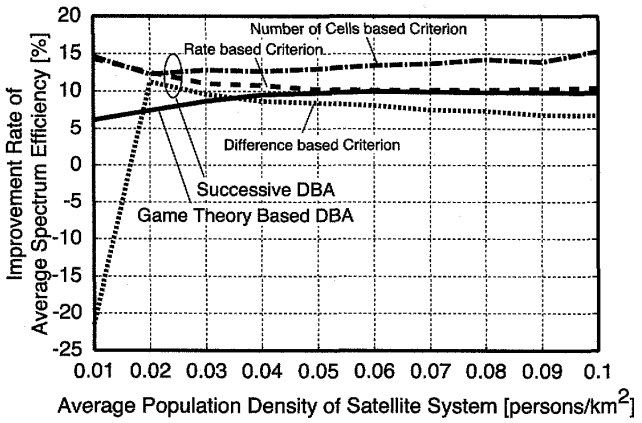


図 15　衛星システムの平均ユーザ密度に対する周波数利用効率改善率

Fig. 15　Improvement rate of average spectrum efficiency as a function of average population density of satellite system.

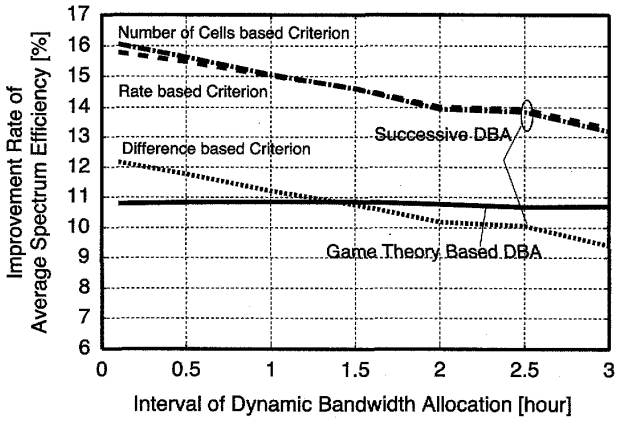


図 16　割当間隔に対する周波数利用効率改善率

Fig. 16　Improvement rate of average spectrum efficiency as a function of bandwidth allocation duration.

率改善率を示す．この図における周波数利用効率改善率とは衛星システムの接続呼数と地上システムの接続呼数の和である．また，W は衛星システムの周波数利用効率を劣化させない程度に調整する．具体的には図 13 の縦軸が 0%となる W を各手法について求め，そのときの W を使って求めていく．割当間隔は 0.1 時間とした．横軸を衛星システムの平均ユーザ密度，縦軸をシステム全体の周波数利用効率改善率 γ とする．これより動的帯域幅割当によって周波数利用効率を改善していることが分かる．特にセル数に応じた帯域選択基準を用いた逐次型帯域幅割当手法によって高い周波数利用効率を達成している．セル数に応じた帯域選択基準では割り当てられた帯域が多く利用される帯域を選択して割り当てていく．このため，ある一定の帯域を割り当てたときに最も効果が高くなる．

衛星システムの平均ユーザ密度が 0.05 人/km^2 のときにセル数に応じた選択基準を用いた逐次型帯域幅割当手法によって固定帯域幅割当に対し周波数利用効率を約 5 万 calls/MHz 改善することを確認した．

図 16 に割当間隔に対する動的帯域幅割当手法による周波数利用効率改善率を示す．ただし衛星システムの平均ユーザ密度は 0.05 人/km^2 である．W については，図 15 と同様に衛星システムの周波数利用効率を劣化させない程度に調整した値とした．横軸を割当間隔，縦軸をシステム全体の周波数利用効率改善率 γ とする．これよりゲーム理論に基づく帯域幅割当手法では割当間隔を変化させても周波数利用効率はあまり変化していないことが分かる．これはゲーム理論に基づく帯域幅割当手法が重み付け要求帯域幅 $\overline{bw_i}$ の比に依存する割当になるためだと考えられる．重み付け要求帯域幅の比は人口密度の比に依存し，人口密度は時間変動しないので重み付け要求帯域幅の比も時間変動しない．したがって割当間隔を変化させても周波数利用効率はあまり変化しないと考えられる．逐次型帯域幅割当手法は衛星セルと地上セル群の要求帯域幅 bw_i^{sat} 及び bw_j^{grp} の大きさに依存した割当になる．衛星セルと地上セル群の要求帯域幅の大きさは時間変動が大きいので割当間隔を長くすると周波数利用効率は劣化する．割当間隔を短くすると動的帯域幅割当で必要となる通信回数が増加するので割当間隔は長い方が望ましい．したがって逐次型帯域幅割当手法を用いるためには衛星システムと地上システムのトラヒックを予測し，予測に基づいて動的帯域幅割当を行うことが必要であると考えられる．

5. む す び

本論文では衛星地上統合移動通信システムにおいて周波数利用効率を改善するために動的帯域幅割当手法を提案した．提案手法である逐次型帯域幅割当手法によって要求帯域幅と割当帯域幅から帯域を割り当てることができ，ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法に比べ高い周波数利用効率を達成できることを確認した．ただし動的帯域幅割当の回数を減らすために割当間隔を長くすると逐次型帯域幅割当手法では周波数利用効率が劣化することを確認した．

今後の課題としては，制御局による地上帯域幅と衛星帯域幅をダイナミックに変更する具体的な手法についての検討，また，制御局でのトラヒック推定誤差に

NII-Electronic Library Service

Institute of Electronics, Information, and Communication Engineers

よる特性劣化の評価，衛星セルの周波数繰返しの検討がある．加えて，ゲーム理論に基づく帯域幅割当手法に異なる効用関数を用いた場合の特性評価がある．

謝辞 本研究を進めるにあたり，適切なアドバイスと有意義な議論を頂いた名古屋大学エコトピア科学研究所の片山正昭教授及び小林健太郎助教に感謝致します．

文　献

[1] 蓑輪　正，田中正人，浜本直和，藤野義之，西永　望，三浦　龍，鈴木健治，“安心・安全のための地上/衛星統合移動通信システム，” 信学論（B），vol.J91-B, no.12, pp.1629–1640, Dec. 2008.

[2] “技術試験衛星 VIII 型（ETS-VIII）特集，” http://www2.nict.go.jp/w/w122/satcom/refs/kihouvol49-3and4.html

[3] 梅比良正弘，“衛星/地上統合移動通信システムにおける周波数共用に関する一検討，” 信学技報，SAT2007-63, Feb. 2008.

[4] M. Umehira, “A system model for frequency sharing study in satellite and terrestrial integrated mobile communication systems,” IEICE Technical Report, SAT2008-21, Nov. 2008.

[5] D. Niyato and E. Hossain, “A cooperative game framework for bandwidth allocation in 4G heterogeneous wireless networks,” IEEE International Conference on Communications 2006 (ICC'06), vol.9, pp.4357–4362, June 2006.

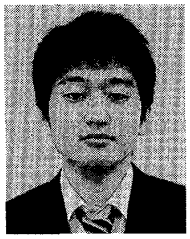
[6] D. Niyato and E. Hossain, “A noncooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol.7, no.3, pp.332–345, March 2008.

[7] 総務省，“平成 21 年度情報通信白書．”

[8] 平成 21 年 2 月 16 日総務省報道資料，“トラヒックからみた我が国の通信利用状況—平成 19 年度における利用状況．”

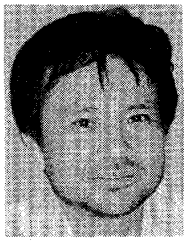
[9] “地図で見る統計，” http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/eStatTopPortal.do

（平成 22 年 6 月 30 日受付，10 月 12 日再受付）



阿萬　友洋　（学生員）

平 20 名大・工・電子情報工卒．平 22 同大大学院博士課程前期課程了．現在 NTT コミュニケーションズ（株）に勤務．



山里　敬也　（正員）

昭 63 信州大・工・電子工卒．平 2 同大大学院修士課程了．平 5 慶大大学院博士課程了．工博．同年名大・工・電子情報・助手．平 10 同大・情報メディア教育センター・助教授，平 16 同大・エコトピア科学研究機構，平 19 同大・エコトピア科学研究所・准教授，平 22 同大・教養教育院・教授，現在に至る．平 9 より平 10 まで，ドイツカイザースラウテルン大・客員研究員．センサネットワーク，可視光通信，ITS，e ラーニングなどの研究に従事．IEEE 会員．平 7 本会学術奨励賞受賞．平 17 本会基礎・境界ソサイエティ特別功労賞受賞．平 17，平 19 本会通信ソサイエティ活動功労賞受賞．IEEE Communications Society 2006 Best Tutorial Paper Award 受賞．現在，和文 B 論文誌編集委員長，USN 研副委員長．

NII-Electronic Library Service