2005－DPS－123（14）
2005／6／3

無線ネットワークにおける距離2の彩色を利用したTDMAスケジュール手法

山内由紀子†，中南良浩†，大下福仁†，増澤利光†

無線ネットワークにおける通信方式として，衝突なし通信を実現するTDMA（時分割多重）通信がよく用いられている．効率的なTDMA通信を実現するには，各ノードが送受信するタイミングを決めるTDMAスケジューリングが重要である．これまでにいくつかのTDMAスケジューリングが提案されているが，それらの手法は，帯域の利用率が低い，各ノードの送信帯域の最小保証値が示されていないなどの問題を有する．そこで，本稿では，距離2の彩色結果を利用した，帯域の利用率の高いTDMAスケジューリングを提案する．また，提案手法における，各ノードの送信帯域の最小保証値を示す．さらに，シミュレーションによって，既存のTDMAスケジューリングに比べ，提案手法が帯域の高い利用率を達成していることを示す．

TDMA Slot Assignment for Wireless Networks based on Distance-2 Graph Coloring

Yukiko Yamauchi†, Yoshihiro Nakaminami†, Fukuhito Ooshita†, Toshimitsu Masuzawa†

TDMA (Time Division Multiple Access), one of communication protocols for wireless networks, is commonly used to provide collision-free communication. To realize efficient TDMA communication, TDMA scheduling that determines the timing of communication at each node plays an important role. While some TDMA scheduling algorithms have been proposed, they cannot make efficient use of bandwidth or give a guarantee of the minimum bandwidth assigned to each node. This paper proposes TDMA scheduling algorithms based on distance-2 graph coloring with the aim of improving the bandwidth usage. These algorithms give guarantees of the minimum bandwidth assigned to each node. This paper also presents simulation results to show that proposed algorithms can make more efficient use of bandwidth than previous ones.

1　はじめに

近年無線アドホックネットワークやセンサネットワークが注目されている．これらのネットワークでは，各ノードは同一周波数を用いた無線通信を行なうことが多い．そのため，近接するノードが同時に送信すると，通信の衝突が起こる．つまり，隣接ノードどうしが同時に送信を行なうと，互いに無線の干渉を起こして正しく受信できない．また，あるノードに隣接する複数のノードが同時に送信すると，受信ノードでは無線の干渉が発生し，いずれのデータも正しく受信することができない（隠れ端末問題）．同一周波数を利用した無線ネットワークで衝突なし通信を実現する方法として，TDMA（時分割多重）通信が利用されている [1, 2, 3, 4].

TDMA通信では，無線ネットワークに参加している全ノードで1つの周波数を共有し，各ノードは定められたスケジュールにしたがって送信受信を周期的に繰り返す．1周期中でノードが送信を行なう連続な時間区間を送信スロットと呼び，各ノードのスケジュールは複数の送信スロットから構成される．同一周波数を用いた通信では，各ノードは自身の隣接ノード，隠れ端末と通信の衝突を起こす可能性がある．TDMA通信では，これらのノードに異なる送信スロットを割り当てることで，通信の衝突を回避できる．

Ramanthan [3] は，無線ネットワークに対する距離2の彩色からTDMAスケジューリングを行なう手法を提案した．この手法は，TDMA通信における1周期を彩色に用いた色の数と同数のスロットに分割し，各ノードは自身の色に対応するスロットで送信を行なう．したがって，各ノードは1/(彩色に用いた色の数)の帯域を得る．この方法では，2-近傍のノードの色の数が彩色に用いた色の数に比べて小さい場合，局所的に利用されないスロットが多数発生し，帯域が有効に利用できない．

Hermanら [1] は距離2の彩色を利用したTDMAスケジューリング手法として，ノード p について，$cset_p = \{p$ の2-近傍のノードの色 $\} \cup \{$ p の色 $\}$ と定義し，p が利用できる帯域を $1/|cset_p|$ とすることを提唱した．これは，ノード p にとって，2-近傍のノードの色の数が，互いに衝突を回避しなくてはいけない帯域の利用要求の数とみなすことができるためである．しかし，文献 [1] では，この帯域割り当

†大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

てを実現する具体的なスケジューリング方法を示していない．

Ramanthan [3]，Herman ら [1] の手法はネットワークの動的な変化を考慮していない．ネットワークの動的な変化に対応するには，スケジューリングの再計算が必要である．神崎ら [2] は動的な変化に適応的に対応する手法として，アドホックネットワークを対象とした ASAP(Adaptive Slot Assignment Protocol) を提案した．ASAP では，ネットワークに新規参加したノードが自身の近傍の帯域利用状況に合わせて送信スロットを決定する．このとき，新規ノードが周期を動的に設定することにより，帯域の利用効率を向上させている．しかし，ASAP では新規参加ノードが送信に利用できる帯域の保証値は示されていない．

本稿では，ネットワーク中の各ノード p に対して $1/|cset_p|$ の送信帯域割り当てを実現する方法（手法 1）を示す．手法 1 はスロットの断片化が非実用的であるので，スロットの断片化を改善した手法 2，手法 3 を示す．これらの手法はいずれも Ramanthan [3]，Herman [1] と同様にネットワークの動的な変化は考慮していない．手法 3 については，シミュレーション実験を行ない，ASAP，Ramanthan の手法と送信帯域についての比較を行なった．その結果，各ノードが送信に利用できる帯域が ASAP，Ramanthan の手法よりも向上することを示す．

2 無線ネットワークのモデル化

無線ネットワーク $G = (V, E)$ は，ノード集合 V とリンク集合 E で定義される．リンクは相異なるノード間の双方向通信リンクであり，ノード p, q 間にリンクが存在するとき，p, q は**隣接**するという．ノードを頂点，リンクを辺とすると，無線ネットワーク G はグラフとみなせるため，グラフに対する用語を無線ネットワークについても用いる．

ノード p に隣接するノードの集合を N_p と表す．ノード p について p から距離 i 以内のノードの集合 (ただし，p は含まない) を p の i-**近傍**と呼び，N_p^i と表す．N_p^i を再帰的に次のように定義する．

$$N_p^1 = N_p$$
$$N_p^i = N_p^{i-1} \cup \bigcup_{q \in N_p^{i-1}} N_q \setminus \{p\} \quad (i \geq 2)$$

ノード p, q について，$q \notin N_p^{i-1}$ かつ $q \in N_p^i$ であるとき，p と q の**距離**は i であるという．

無線ネットワークでは，ノード p での送信は各ノード $q \in N_p$ へのブロードキャストとなる．

TDMA 方式の通信において，各ノードは周期的に送受信を繰り返す．この 1 周期を**無線通信周期**と呼ぶ．各ノードは無線通信周期に関して大域的に同期していると仮定する．

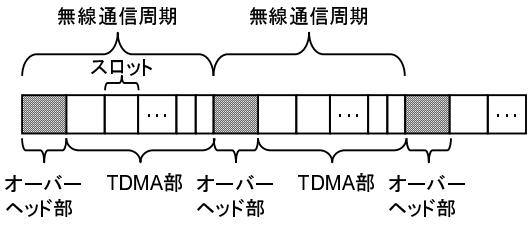

図 1: 無線通信周期

無線通信周期は 1 つの**オーバーヘッド部**と 1 つの**TDMA 部**から成る (図 1)．各ノードはオーバーヘッド部を用いて，隣接ノードと情報交換をすることによって TDMA 部における **TDMA スケジュール**を決定する．オーバーヘッド部では CSMA/CA などのランダム遅延を用いて衝突回避を行うメディアアクセス方式を使用する．TDMA 部では，各ノードは TDMA スケジュールに従って TDMA 通信を行い，完全な衝突なし通信を行う．TDMA 部は $[0, 1)$ の時間区間と見なす．

TDMA スケジュールとは，各ノードにおける送信のタイミングを規定したものである．TDMA スケジュールにおけるノード p の送信可能時間を $send_p \subseteq [0, 1)$ によって表す．$send_p$ は集合 $\{t | x_p^i \leq t < y_p^i\} \subseteq [0, 1)$ で表される連続な時間区間である**スロット** $s_p^i = [x_p^i, y_p^i)$ の和集合によって定義される．ノード p が送信可能なスロットの集合を p の**送信スロット集合** $S_p = \{s_p^1, s_p^2, ...\}$ とする．S_p は次の条件を満たす：

1. $\bigcup_{s_p^i \in S_p} s_p^i = send_p$.
2. すべての $s_p^i \in S_p$，$s_p^j \in S_p$，$(i \neq j)$ について，$s_p^i \cap s_p^j = \phi$.
3. すべての $s_p^i = [x_p^i, y_p^i) \in S_p$，すべての $s_p^j = [x_p^j, y_p^j) \in S_p$ $(i \neq j)$ について，$y_p^i \neq x_p^j$.

また，$|s_p^i| = y_p^i - x_p^i$ を**スロット長**と呼ぶ．

TDMA スケジューリング問題:TDMA スケジューリング問題とは，グラフ $G = (V, E)$ を入力とし，衝突なし TDMA スケジュールを出力とする問題である．**衝突なし TDMA スケジュール**とは，以下が成り立つような各 $p \in V$ の送信可能時間 $send_p$ の集合である：

$$\forall p \in V \quad \forall q \in N_p^2 \quad send_p \cap send_q = \phi.$$

衝突なし TDMA スケジュールにおけるノード p の**送信時間長**を $\sum_{s_p^i \in S_p} |s_p^i|$ と定義する．また，ノード p の**最小スロット長**を $\min\{|s_p^i| \, | s_p^i \in S_p\}$ と定義する．さらに，ノード p の**スロット数**を $|S_p|$ と定義

する．スロット長が非常に小さければ，p はそのスロットでは非常に少ないデータしか送信できず，意味のあるデータを送信できない．よって，スロット長は実用的なサイズであることが必要である．スロット数が大きければ，p は TDMA 部において送信器のオン・オフの切替を繰り返さなければならない．したがって，スロット数は実用的な大きさであることが望まれる．

本稿では，TDMA スケジューリングアルゴリズムを提案する．TDMA スケジュールリングアルゴリズムの評価は，作成された TDMA スケジュールを評価することによって行なう．TDMA スケジュールは，ネットワーク内の任意のノードに対する送信時間長，最小スロット長，スロット数によって評価する．

TDMA スケジュールを作成する方法として，グラフにおける距離 2 の彩色を利用する方法がよく知られている．以後，本稿では距離 2 の彩色を N^2-彩色と呼ぶ．本稿ではグラフにすでに N^2-彩色がなされていると仮定する．彩色とは，各ノードに色と呼ばれる自然数を割り当てることを指す．ノード p の色を $color_p$ と表現する．N^2-彩色はすべてのノード p について以下が成り立つ彩色である：

$$\forall q \in N_p^2 \quad color_p \neq color_q.$$

ノード p について，$cset_p$ を次のように定義する：

$$cset_p = \{color_q | q \in N_p^2 \cup \{p\}\}.$$

また，関数 $MaxColor(V')$ を次のように定義する：

$$MaxColor(V') = \max\{color_q \,|\, q \in V'\} \quad (V' \subseteq V).$$

よって，$MaxColor(V)$ はネットワーク全体で N^2-彩色に用いた最大の色を表し，$MaxColor(N_p^2)$ はノード p の 2-近傍の最大の色を表す．

3 提案手法

本節では任意の無線ネットワークに対して，衝突なし TDMA スケジュールを求める 3 つの手法を提案する．全手法は，あらかじめ与えられている N^2-彩色の結果を利用する．つまり，各ノード p は N_p^2 のノードに割り当てられている色の集合と自身に割り当てられた色から $send_p$ を決定する．

すべての手法は，各ノードで 2-近傍の色情報をもとに**スロット分割**を作成する．スロット分割とは TDMA 部を複数のスロットに分割し，各スロットに色を割り当てたものである．ノード p はこのスロット分割のうち，自身の色 $color_p$ と同じ色が割り当てられたスロット集合を $send_p$ とする．

各ノードが求めた $send$ が衝突なし TDMA スケジュールの要素となるには，各ノードのスロット分割が次の条件を満たしていればよい．

表 1: 提案アルゴリズムの評価

	送信時間長	最小スロット長	スロット数
手法 1	$1/\|cset_p\|$	$1/\alpha!$	$\alpha!$
手法 2	$1/\beta$	$1/\beta!$	2^{color_p}
手法 3	$1/2\beta$	$1/2^\gamma$	$2^{\gamma-2}$

ただし，
$\alpha = MaxColor(V)$，$\beta = MaxColor(N_p^2)$，
$2^{\gamma-1} < MaxColor(N_p^2) \leq 2^\gamma$.

衝突なし TDMA スケジュールとなる十分条件：ネットワーク内のノード p のスロット分割を div_p，スロット分割 div_p 上に出現する色の集合を $cset(div_p)$ と表す．このとき，任意のノード p，$q \in N_p^2$，$c \in cset(div_p) \cap cset(div_q)$ なる任意の色 c について以下が成立する：

- div_p 上の $color(s_p^i) = c$ なる任意のスロット s_p^i，div_q 上の $s_p^i \cap s_q^j \neq \phi$ なる任意のスロット s_q^j について，$color(s_q^j) = c \vee color(s_q^j) \notin cset(div_p)$.

3 つの提案手法は送信時間長，スロット数と最小スロット長についてトレードオフがある．提案アルゴリズムの送信時間長，最小スロット長，スロット数を表 1 にまとめる．手法 1 は送信時間長については 3 つの手法のうち最も大きく，各ノードの送信時間長は $1/|cset_p|$ となり，Herman [1] の提唱した帯域を実現している．しかし，最小スロット長，スロット数については非実用的である．手法 2 は，手法 1 の最小スロット長，スロット数を改善したものの，これらの値は非実用的である．送信時間長についても，$\beta \geq |cset_p|$ より，手法 1 より減少している．手法 3 は送信時間長については 3 つの手法中もっとも少ないが，実用的な最小スロット長，スロット数を実現している．

また，手法 1 では，ノード p がスロット分割を作成する際に，大域情報である $MaxColor(V)$ を必要とする．一方，手法 2，手法 3 は大域情報をまったく必要とせず，ノード p は 2-近傍の情報のみからスロット分割を作成することが可能である．よって，各ノードが自律分散的に TDMA スケジュールを求める環境にも適していると考えられる．

3.1 手法 1

手法 1 は，ノード p のスロット分割作成にグラフの N^2-彩色に使われた最大の色 $MaxColor(V)$ を利用し，p の送信時間長は $1/|cset_p|$ となる．ただし，最小スロット長は $1/MaxColor(V)!$，スロット数は $MaxColor(V)!$ となる．

ノード p について，$palette_p = \{1, 2, ..., MaxColor\ (V)\}$，$bucket_p = palette_p \setminus cset_p$ と定義す

る．手法 1 では，TDMA 部を $MaxColor(V)$ 個に等分割し，色 $c \in palette$ を小さいものから順に割り当てたスロット分割を元に，スロットの細分化と色の塗直しを行なうことによって $cset_p$ のみからなるスロット分割を作成する．つまり，最初のスロット分割において，$cset_p$ に含まれないすべての色のスロットに対して，細分化，色 $c' \in cset_p$ での塗り直しを行なう．この操作は再帰関数 $recursive_div(x, y, bkt, plt)$ によって表現される．$recursive_div$ の引数のうち，x, y は操作を行なう TDMA 部が区間 $[x, y)$ であることを示し，bkt は塗直しを行なう色集合，plt は区間 $[x, y)$ 中にある色集合をさす．この関数は最初 $recursive_div(\ 0, 1, bucket_p, palette_p)$ で呼ばれる．関数 $recurive_div(x, y, bkt, plt)$ の動作は次の通りである：

- $bkt = \phi$ であれば終了
- bkt に含まれる任意の色 c について，区間 $[x, y)$ 中の c で塗られたスロット $s = [x', y')$ に対して次の操作を行なう．
  - $|plt| - 1$ 個に等分割し，前から色 $plt \backslash \{c\}$ の色を小さい色から順に割り当てる．
  - $recursive_div(x', y', bkt \backslash \{c\}, plt \backslash \{c\})$ を実行する．

$MaxColor(V) = 5$，$cset_p = \{1, 3, 5\}$ の場合のスロット分割作成の様子を図 2 に示す．

以上のようにして作成したスロット分割のうち，色 $color_p$ のスロットを $send_p$ とする．$MaxColor(V) = 5$，$color_p = 3$ であるとき，$send_p$ は図 2 における色つきのスロットとなる．

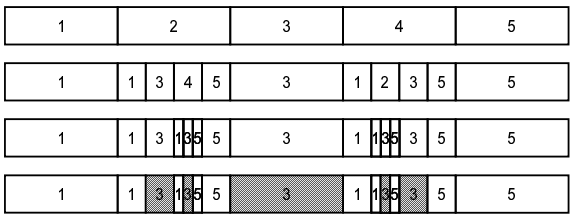

図 2: $MaxColor(V) = 5$，$cset_p = \{1, 3, 5\}$ の時のスロット分割作成の様子

3.2 手法 2

手法 2 はノード p のスロット分割作成に 2-近傍のノードの色情報のみを利用する．p の送信時間長は $1/MaxColor\ (N_p^2)$ であり，最小スロット長は $1/MaxColor\ (N_p^2)!$，スロット数は 2^{color_p} である．

手法 2 では，ノード p は TDMA 部に 2 色のスロットのみが存在するスロット分割をもとに，スロットの再分割と色の塗直しを行なうことによって，$\{1, 2, ..., MaxColor(N_p^2)\}$ のすべての色のスロットが出現するスロット分割を作成する．手法 2 において利用する $\{1, 2, ..., k\}$ $(2 \leq k \leq MaxColor(N_p^2))$ のすべての色が出現するスロット分割を $div_2(k)$ と表す．$div_2(k)$ は次のように定義される（図 3）：

- $div_2(2)$ は TDMA 部を 2 等分割し，前半を色 1，後半を色 2 としたものである．
- $div_2(k+1)$ は $div_2(k)$ から以下のように求める．
  - $div_2(k+1)$ における色 1 のスロットを $[0, 1/(k+1))$ とする．
  - $div_2(k+1)$ における色 2 のスロットを $[k\ /\ (k+1), 1)$ とする．
  - $div_2(k)$ において，色 $c(c \neq 1, 2)$ のスロットが $[x, y)$ ならば，$div_2(k+1)$ における色 c のスロットを $[\frac{x+y}{2} - \frac{k}{k+1}(y-x),\ \frac{x+y}{2} + \frac{k}{k+1}(y-x))$ とする．
  - 色が塗られていないスロットの色を $k+1$ とする．

このような操作を繰り返して求められる $div_2(MaxColor(N_p^2))$ がノード p の計算したスロット分割である．ノード p は作成したスロット分割のうち，色 $color_p$ のスロットを $send_p$ とする．

ノード p について，$MaxColor(N_p^2) = 5, color_p = 4$ である場合の $div_2(k)\ (k = 2, 3, 4, 5)$ のスロット分割作成の様子を図 3 に示す．$send_p$ は図 3 の色つきのスロットとなる．

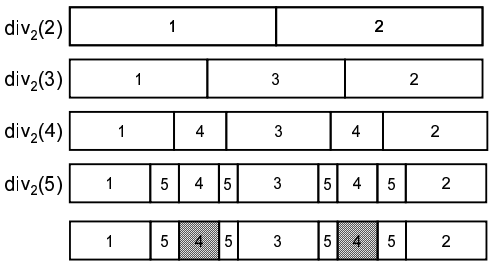

図 3: ノード p のスロット分割作成の様子

3.3 手法 3

手法 3 は，ノード p のスロット分割作成に 2-近傍のノードの色情報のみを利用する．p の送信時間長は $1/(2MaxColor(N_p^2))$ であり，最小スロット長は $1/(2MaxColor(N_p^2))$，スロット数は γ $(2^{\gamma-1} < MaxColor(N_p^2) \leq 2^{\gamma})$ である．

手法 3 では，ノード p は最初に，TDMA 部に 2 色のスロットが存在するスロット分割をもとに，スロットの再分割と色の塗直しを行なうことによって，$\{1, 2, ..., 2^{\gamma}\}$ の色のスロットが出現するスロット分割を計算する．手法 3 において利用する $\{1, 2, ..., 2^k\}$ $(k \geq 1)$ の色が出現するスロット分割を $div_3(k)$ と表す．$div_3(k)$ は次のように定義される：

- $div_3(1)$ は TDMA 部を 2 等分割し，前半を色 1，後半を色 2 としたものである．
- $div_3(k+1)$ は $div_3(k)$ から以下のように求める：$div_3(k)$ において，色 c のスロットが $[x, y)$ なら，$div_3(k+1)$ における色 c のスロットを $[x, (x+y)/2)$ とし，色 $c+2^k$ のスロットを $[(x+y)/2, y)$ とする．

$div_3(1)$，$div_3(2)$，$div_3(3)$，$div_3(4)$ を図 4 に示す．

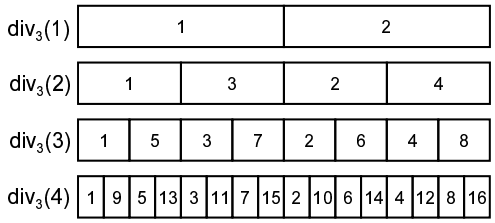

図 4: $div_3(1)$，$div_3(2)$，$div_3(3)$，$div_3(4)$

ノード p はこのような操作を $2^{\gamma-1} < MaxColor(N_p^2) \leq 2^{\gamma}$ なる $div_3(\gamma)$ まで行なう．次に，p は $div_3(\gamma)$ をもとに $cset_p$ の色のみが出現するスロット分割を作成する．つまり，$div_3(\gamma)$ 上にある $\{1, 2, ..., 2^{\gamma}\} \backslash\ cset_p$ に含まれる色について，その色のスロットを $cset_p$ に含まれるいずれかの色に変更する．

ここで，関数 $bit_reversal(int)$ を整数引数 int のビットリバーサル値を返す関数と定義する．整数 int のビットリバーサル値とは，int の 2 進数表現を左右反転した整数値である．

ノード p は以下の操作により，$cset_p$ の色のみが出現するスロット分割を作成する：$\{1, 2, ..., 2^{\gamma}\} \backslash cset_p$ に含まれる色 c と色 c のスロット $[x, y)$ について

- c が $cset_p$ に含まれるいずれかの色に一致するまで次の操作を繰り返す：
  - $c_{bin} = bit_reversal(c-1)$.
  - c_{bin} を 1 ビット右シフトする．
  - $c = bit_reversal(c_{bin}) + 1$.
- スロット $[x, y)$ の色を c とする．

以上のようにして作成したスロット分割のうち，色 $color_p$ のスロットを $send_p$ とする．$MaxColor(N_p^2) = 8$，$cset_p = \{1, 2, 3, 6, 8\}$，$color_p = 2$ の場合のスロット分割を図 5 に示す．

4 性能評価

本節では，手法 3 の有効性を検証するために行なったシミュレーション実験の結果を示す．手法 3 は送信時間長は提案手法では最も少ないが，最小スロット長は手法 1，手法 2 とは異なり実用的な範囲である．よって，シミュレーションでは，手法 3 の送信時間長に着目する．

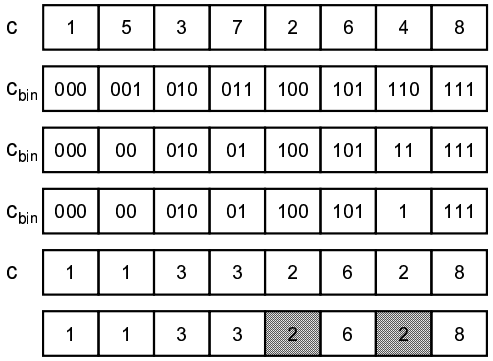

図 5: ノード p のスロット分割作成の様子

シミュレーション実験では，Ramanthan [3] の手法，神崎ら [2] が提案した ASAP を比較対象とした．

Ramanthan の手法では，N^2-彩色に対して，$\alpha = MaxColor(V)$ とすると，各ノードの送信帯域は $1/\alpha$ となる．これは，N^2-彩色に基づいて自明なスロット割り当てを行なう Ramanthan の手法に対し，手法 3 によるスロット割り当ての計算の効果を調べるためのものである．

ASAP は，ノードの参加・退出が起こる無線アドホックネットワークを対象とした TDMA スケジューリング手法である．ASAP では，ノードの参加・退出が発生したときに，そのノードの 2-近傍のノードが TDMA スケジュールを作成し直す．この際，TDMA 部の長さを各ノードが動的に設定することにより，帯域の利用効率を上げている．シミュレーションは静的な無線ネットワークを対象に行なうので，動的な環境での TDMA スケジューリングに対応している ASAP との比較は適切ではない．これは，動的な無線ネットワークに対して適応的に TDMA スケジューリングを行なう ASAP に対し，オーバーヘッド部を用いて，ネットワーク全体の TDMA スケジュールを再計算することの効果を調べるためのものである．

4.1 評価環境

シミュレーション実験では，ユニットディスクグラフに対し，手法 3，Ramanthan の手法，ASAP を適用した．実験に用いたユニットディスクグラフは，100×100 のフィールドにランダムに 50 個のノードを配置し，距離 R 以内のノードは互いに送受信可能であるとして作成した．ディスク半径 R を調整することにより，ネットワーク全体での平均次数を調整し，$R = 15, 20, 25$ のユニットディスクグラフに対してシミュレーション実験を行なった．作成したユニットディスクグラフのディスク半径と平均次数は表 2 の通りである．

ASAP は静的なトポロジに対して TDMA スケジュールを作成することを想定していない．よって，ASAP のシミュレーション時には入力ユニットディ

表 2: ディスク半径 R と平均次数

ディスク半径 R	15	20	25
平均次数	2.4	4.7	6.8

表 3: 平均送信帯域

R		平均値	最大値	最小値	改善率
15	ASAP	0.1924	0.2181	0.1676	1.2240
	$1/\alpha$	0.1243	0.1667	0.0909	1.8946
	手法 3	0.2355	0.2600	0.2025	
20	ASAP	0.1153	0.1351	0.1047	1.1735
	$1/\alpha$	0.0923	0.1000	0.0833	1.4659
	手法 3	0.1353	0.1538	0.1138	
25	ASAP	0.0780	0.0929	0.0674	1.2064
	$1/\alpha$	0.0726	0.0909	0.0588	1.2961
	手法 3	0.0941	0.1175	0.0863	

スクグラフ中の 50 ノードが，ランダムな順番でネットワークに参加してくるとしてシミュレーションを行なった．

また，Ramanthan の手法，手法 3 が前提としている N^2-彩色は次のような貪欲法を用いた．

- $|N_p^2|$ が大きいノード p から順に彩色を行なう
- $|N_p^2|$ が同じノードが複数存在すれば，それらのノードはランダムな順で彩色を行なう
- ノードは彩色を行なう際，2-近傍で使用されていない最小の色を取得する

4.2 評価基準

本実験では，手法 3，Ramanthan の手法，ASAP の帯域に着目する．ノード p の TDMA 部のサイズに対する $send_p$ の割合を p の**送信帯域**と定義する．更に，ネットワーク内の全ノードの送信帯域の平均値を**平均送信帯域**と定義する．シミュレーション実験では，平均送信帯域を評価した．

4.3 評価結果

シミュレーションの結果を表 3 に示す．表 3 は 10 回のシミュレーションを行なった平均送信帯域の平均値，最小値，最大値，各平均値に対する**改善率**である．改善率は以下の式で定義する．

$$\text{改善率} = \frac{\text{手法 3 による平均送信帯域の平均値}}{\text{該当手法の平均送信帯域の平均値}}$$

表 3 より，N^2-彩色をもとにした TDMA スケジューリングでは，手法 3 が Ramanthan の手法より平均送信帯域が大きいことがわかる．また，手法 3 が ASAP より平均送信帯域が大きく，ASAP に比べ，20%前後の改善を実現していることがわかる．シミュレーション結果より，動的変化が頻繁でなく，TDMA スケジュールの再計算があまり生じない場合，手法 3 を用いることで，ASAP より通信帯域を効率的に利用できることがわかる．

5 おわりに

本稿では，無線ネットワークにおける 3 つの TDMA スケジュール作成手法を提案した．3 つの手法はいずれも N^2-彩色を利用している．手法 1，手法 2 は最小スロット長，スロット数が非実用的であり，この点を改善する手法として手法 3 を提案した．しかし，手法 3 の送信時間長は 3 つの手法中でもっとも小さい．更に，手法 3 については，既存の TDMA スケジューリング手法を比較対象としたシミュレーションによる性能評価を行なった．その結果，手法 3 の平均送信帯域が ASAP [2] よりも大きくなることを示した．

今後の課題としては，3 つの提案手法に最適な彩色アルゴリズムの考案とネットワークの動的変化への適応が挙げられる．さらに，ネットワークの動的な変化に対応可能な彩色アルゴリズムであれば，本稿で提案した TDMA スケジュールリングを無線アドホックネットワークにおいても適用することができる．また，ASAP で，定期的に手法 3 を利用して再割当を行なうハイブリッドな手法が考えられる．

謝辞 本研究の一部は，文部科学省 21 世紀 COE プログラム（研究拠点形成費補助金）の研究助成，日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (B) 15300017），および，文部科学省科学研究費補助金（特定領域研究 16092215）によるものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

[1] T. Herman, S. Tixeuil. A Distributed T D M A Slot Assignment Algorithm for Wireless Sensor Networks. *Proc. of ALGOSENSORS 2004*, LNCS 3121, pp.45–58.

[2] 神崎, 上向, 原, 西尾．アドホックネットワークにおける端末数の変化に応じたＴＤＭＡスロット割り当て手法．情報処理学会論文誌 Vol.45, No.3, pp824-837 (2004.3).

[3] S.Ramanthan. A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks. *Wireless Networks*,5,1999,pp81–94.

[4] S. S. Kulkarni, U. Arumugam. Collision-free communication in sensor networks. *Proc. of SSS 2003*,LNCS 2704, pp.17–31.