

エネルギー効率に優れたヘットネットを実現するための 基地局オンオフアルゴリズム

米谷 凜太郎[†] Abolfazl Mehbodniya[†] 安達 文幸[‡]

^{†‡}東北大学大学院工学研究科通信工学専攻

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]{yoneya,mehbod}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 近年、無線資源に対する需要が急速に増大している。そこで、エネルギー利用効率に優れた無線ネットワークへの期待が高まっている。本稿では、大セル内に多数の小セル基地局を配置するヘットネットにおける消費エネルギーの削減を目指した小セル基地局のオンオフアルゴリズムを提案している。本アルゴリズムでは、各小セル基地局が自律してトラフィック負荷と消費エネルギーのバランスを取りながら、その動作をオンオフする。また、意思決定主体が他者と交渉せずに自身の行動を決定する非協力ゲーム理論を活用している。ヘットネット内で利用者が移動した場合のヘットネット全体における電力消費量の、基地局がオンオフしない場合や移動しない場合と比較した場合の変化について議論する。

キーワード ヘットネット, ゲーム理論, 基地局オンオフアルゴリズム, エネルギー利用効率

Highly Energy-Efficient Base Station ON/OFF Switching Algorithm for HetNet

Rintaro YONEYA[†] Abolfazl Mehbodniya[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

^{†‡}Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
6-6-05, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

E-mail: [†]{yoneya,mehbod}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract The demand for wireless resource is increasing rapidly nowadays. The expectation for wireless networks with high energy efficiency is also increasing. This paper presents a small cell base station ON/OFF switching algorithm for reducing energy consumption in heterogeneous networks (HetNet), which has a big cell with some small cell base stations. In this algorithm, each base station decides independently its action (ON or OFF) with the aim of balancing traffic load and energy consumption. A non-cooperative game theoretic approach is used, in which each player decides its action without negotiating with others. This paper also investigates the effect of user's mobility and switching on the total system performance.

Keywords HetNet, game theory, base station ON-OFF algorithm, energy efficiency

1. まえがき

近年、無線資源に対する需要は、動画のストリーミングやソーシャルメディアの普及等により急速に高まっている。[1] それに伴い、無線セルラーシステムにおけるトラフィック負荷が増大しており、エネルギー消費量の上昇を招いている。そのため、エネルギー利用効率に優れた無線ネットワークへの期待は高い。

大セル基地局(MBS)が作る大セル内に小セル基地局(SBS)を多数配置することで構成されるヘテロジニア

本研究は NICT 個別課題 (1680301) 「無数の端末を接続するための高エネルギー効率および超高密度無線ネットワークに向けて」による委託を受けて実施したものである。

スネットワーク(ヘットネット)を用いれば、大セル内の通信容量を増やすことができる。[2-4] また、消費電力やトラフィック負荷に応じて小セル基地局をオンオフさせるようにすれば、エネルギー消費量の低減が可能となる。なお、大セル基地局は小セル基地局でカバーできないエリアをカバーしなければならないから、常にオンとなるようにする。そこで、中央制御によるオンオフアルゴリズムの研究が進められてきた[3]。中央制御によるオンオフによってエネルギー効率を高めることができることが明らかにされてきた。しかし、各基地局間における消費電力等の情報交換のための通信や、基地局を制御するための制御センター-基地局間

(バックホール)通信を行なう必要があるため、消費電力量が増加してしまう欠点がある[1]. 各 SBS が自律してオンオフの動作を決定するアルゴリズムを用いれば、各基地局間の通信やバックホールでの消費電力量の増加を避けることができる. 本アルゴリズムでは、小セル基地局がトラフィック負荷の変化や消費電力に応じてオンオフを決定する.

筆者らは、さまざまな意思決定の相互依存関係を数理的で厳密な方法論を用いて分析して行動を決定するゲーム理論[5]を活用することで基地局が自律してオンオフを決定するアルゴリズムの構築を目指している. 基地局オンオフアルゴリズムでは、ゲーム理論のうち戦略形非協力ゲームを採用している. 戦略形ゲームにおいて、プレイヤー（意思決定主体）は、効用（結果をプレイヤーにとって望ましいものほど大きくなるように評価する関数）を最大化するためだけに、戦略（取りうる行動）を選択する. 非協力ゲームでは、プレイヤーは他者と交渉せずに自身の戦略を決定する.

これまでのゲーム理論を用いた基地局オンオフアルゴリズムの検討では利用者の移動を考慮していなかった[1]. 本稿では、今まで行われていなかった、利用者の移動を考慮したときの、小セル基地局の本アルゴリズムによる電力消費量の削減について検討を行なう.

本稿の構成は以下の通りである. 第2章でシステムモデルについて述べた後、第3章では文献[1]で提案された基地局オンオフアルゴリズムについて述べる. 第4章で利用者端末が移動した場合の計算機シミュレーション結果を述べ、利用者が移動した場合における基地局の個数と消費電力の関係に関する考察を行なった後、第5章でまとめる.

2. システムモデル

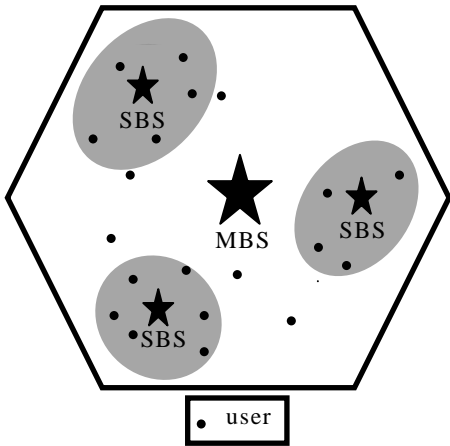


Fig.1: ヘットネットの例

本稿では、基地局の組 $S = \{1, \dots, S\}$ によって構成されるヘットネットの下り方向送信について考える. なお、

大セル基地局は正六角形の大セルの中央に位置するものとする. ヘットネットの例を Fig. 1 に示す.

時刻 t における基地局 s の消費電力は下式で求められる.

$$P_s^{All}(t) = \frac{P_s(t)}{\eta\alpha(1-\alpha_{feed})} + P_s^{Back} + P_s^{Idle} \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} \alpha = (1-\alpha_{DC})(1-\alpha_{main})(1-\alpha_{cool}) \\ P_s^{Idle} = \frac{P_{radio} + P_{base}}{\alpha} \end{array} \right)$$

ここで、 $P_s(t)$ 、 η 、 P_s^{Back} 、 P_s^{Idle} はそれぞれ送信電力、パワーアンプの効率、基幹ネットワークとの接続を行なうバックホールにおける消費電力、基地局オフ時の消費電力である. また、 α_{feed} 、 α_{DC} 、 α_{main} 、 α_{cool} はそれぞれ送信機、DC-DC 変換、給電、冷却における損失であり、 P_{radio} 、 P_{base} はそれぞれ基地局の無線部、ベースバンド部の消費電力である.

地点 z に存在する利用者端末の受信信号電力対干渉および雑音電力比 $\beta_s(z)$ は下式で表わされる.

$$\beta_s(z) = \frac{P_s(t)g_s(z)}{\sum_{\forall s' \in S/s} P_{s'}(t)g_{s'}(z) + N} \quad (2)$$

ここで、 $g_s(z)$ は位置 z に存在する利用者端末と基地局 s の間のチャンネル利得であり、 N は雑音分散である.

地点 z における存在する利用者端末のデータレート $D_s(z)$ は次式で得られる.

$$D_s(z) = w \log_2(1 + \beta_s(z)) \quad (3)$$

ただし、 w は帯域幅を表す.

$\kappa_s(z)$ および $v_s(z)$ をそれぞれ位置 z におけるパケット到来レートおよび利用者端末のパケットサイズとすると、位置 z におけるトラフィック負荷密度 $o_s(z)$ は次式で与えられる[6].

$$o_s(z) = \frac{\kappa_s(z)v_s(z)}{D_s(z)} \quad (4)$$

基地局 s のカバー範囲を A_s とすると、トラフィック負荷 $v_s(t)$ は次式で求められる.

$$v_s(t) = \int_{z \in A_s} o_s(z) dz \quad (5)$$

基地局 s の効用 $u_s(t)$ は消費電力 $P_s^{All}(t)$ 、トラフィック負荷 $v_s(t)$ を用いて以下のように求められる.

$$u_s(t) = -\left(a_s P_s^{All}(t) / P_{sMAX}^{Transmitted} + b_s v_s(t) \right) \quad (6)$$

$$(a_s > 0, b_s > 0)$$

ここで、 a_s および b_s はそれぞれ消費電力およびトラフィック負荷の基地局 s における重み係数であり、 $P_{sMAX}^{Transmitted}$ は基地局 s の最大送信電力である. なお、消費電力とトラフィック負荷のどちらを重視するかによって、 a_s および b_s の値を任意に設定できる.

3. アルゴリズム

オンオフアルゴリズムのフローチャートを Fig.2 に示す. アルゴリズムについて順を追って説明する. ここで, 変数 i を戦略の識別番号とし, $a_s(t)$ を時刻 t における基地局 s が選択する戦略とする.

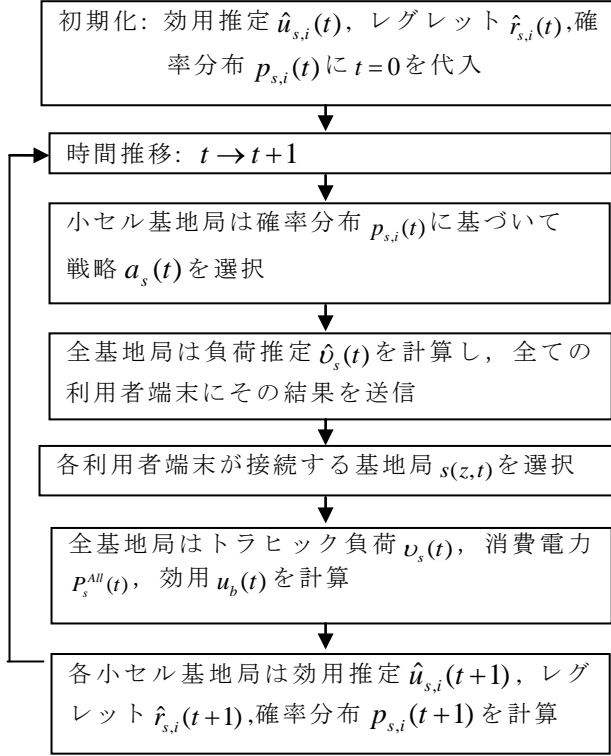


Fig.2: オンオフアルゴリズムのフローチャート

小セル基地局の戦略 $a_s(t)$ は Fig.3 のように確率分布 $p_{s,i}(t-1)$ から求める. なお, 大セル基地局の戦略は常に $i=4$ ($\zeta_s(t)=1$) である. f を確率分布から戦略への変換関数とすると $a_s(t)$ は下式のように表わされる.

$$a_s(t) = f(p_{s,i}(t-1)) \quad (7)$$

このように確率分布に基づいて選択を行なう戦略は混合戦略と呼ばれている [5].

表 1 のように戦略ごとに送信電力係数 $\zeta_s(t)$ を定め, 時刻 t における基地局 s の送信電力 $P_s(t)$ は下式で表わされる.

$$P_s(t) = \zeta_s(t) P_{sMAX}^{Transmitted} \quad (8)$$

トラヒック負荷推定は下式によって表わされる.

$$\hat{v}_s(t) = \hat{v}_s(t-1) + l(t)(v_s(t-1) - \hat{v}_s(t-1)) \quad (9)$$

なお, $l(t)$ は学習率といて, トラヒック負荷 $v_s(t-1)$ とトラヒック負荷推定 $\hat{v}_s(t-1)$ のバランスを取る. また, 各利用者端末による接続する基地局 $s(z,t)$ の選択よりも負荷推定の過程が十分遅くなるような値に設定する. もし負荷推定が頻繁に変化すれば, 利用者端末は接続する基地局を頻繁に変更するようになり負荷推定の精

度が劣化してしまうからである.

各利用者端末は, 全基地局(大セル基地局と小セル基地局の全て)から受信したトラヒック負荷推定 $\hat{v}_s(t)$ とその際の受信電力 $P_s^{Received}(t)$ を用いて, 接続する基地局 $s(z,t)$ を下式のように選択する.

$$s(z,t) = \arg \max_{s \in S} \left\{ (\hat{v}_s(t) + \delta_s)^{-\tau} P_s^{Received}(t) \right\} \quad (10)$$

$$(\delta_s = 1 - \rho_s^{preferred}, \tau \geq 0)$$

ここで, δ_s および $\rho_s^{preferred}$ はそれぞれ基地局 s のオフセットおよびトラヒック負荷の適正值と呼ばれる値で, $\rho_s^{preferred}$ が大きくなるほど接続する基地局として選ばれやすくなる. また, τ はトラヒック負荷やトラヒック負荷推定の影響を表す係数で, 大きくなるほど影響が大きくなる.

基地局 s における各戦略 i の効用推定 $\hat{u}_{s,i}(t+1)$, レグレット $\hat{r}_{s,i}(t+1)$, 確率分布 $p_{s,i}(t+1)$ は下式で計算される.

$$\begin{cases} \hat{u}_{s,i}(t+1) = \hat{u}_{s,i}(t) + c_b(t) \cdot \mathbf{1}(t) \cdot (u_s(t) - \hat{u}_{s,i}(t)) \\ \hat{r}_{s,i}(t+1) = \hat{r}_{s,i}(t) + d_s(t+1) (\hat{u}_{s,i}(t) - u_s(t) - \hat{r}_{s,i}(t)) \\ p_{s,i}(t+1) = p_{s,i}(t) + e_s(t+1) (G_{s,i}(\hat{r}_{s,i}(t)) - p_{s,i}(t)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{1}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{if } a_s(t+1) = a_s(t)) \\ 0 & (\text{if } a_s(t+1) \neq a_s(t)) \end{cases}$$

$$G_{s,i}(\hat{r}_{s,i}(t)) = \frac{\exp(\mu_s \hat{r}_{s,i}(t))}{\sum_{i' \in A_s} \exp(\mu_s \hat{r}_{s,i'}(t))}$$

ここで, $G_{s,i}(\hat{r}_{s,i}(t))$ はボルツマン分布であり, μ_s はその温度係数である. $c_b(t)$, $d_b(t)$, $e_b(t)$ は学習率といい $1/t^q$ (q :ベキ乗指数) の形で表わされ. 以下の条件を満たす.

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t c_s(m) = +\infty, & \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t d_s(m) = +\infty \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t e_s(m) = +\infty, & \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t c_s^2(m) < +\infty \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t d_s^2(m) < +\infty, & \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^t e_s^2(m) < +\infty \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d_s(t)}{c_s(t)} = 0, & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e_s(t)}{d_s(t)} = 0 \end{cases}$$

表 1: 戦略の識別番号 i と送信電力係数 $\zeta_s(t)$ の関係

戦略の識別番号 i	送信電力係数 $\zeta_s(t)$
1	0
2	1/3
3	2/3
4	1

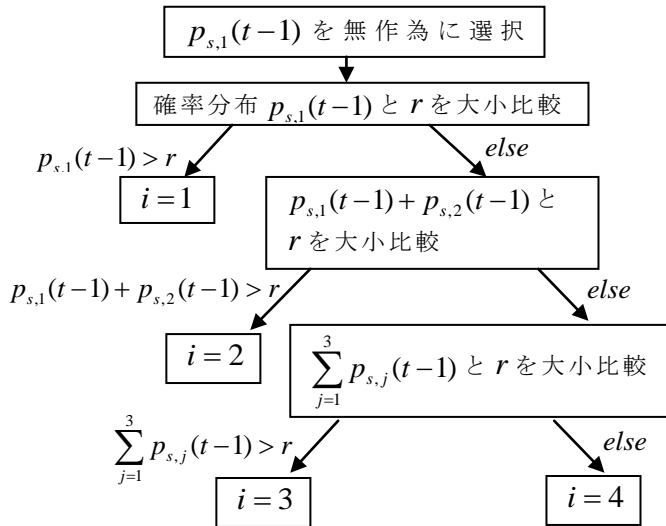


Fig.3: 確率分布 $p_{s,1}(t-1)$ を用いた戦略の選択

4. 計算機シミュレーション結果

まず、小セル基地局が正常にオフ動作するかどうかを確認する。Fig.4 に小セル基地局数を 7, 利用者数を 1 とした場合の、小セル基地局がオフモードとなる確率の時間変化を示す。確率が 95% 付近に収束していることから、近くに利用者がいない場合には小セル基地局が高確率でオフモードとなることが分かる。従って、小セル基地局は正常にオフになる動作を行なっているといえる。

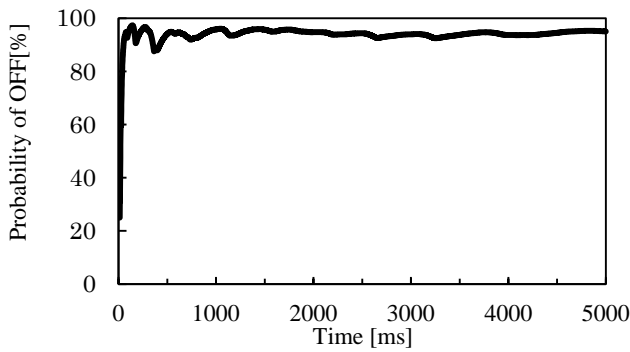


Fig.4: 小セル基地局がオフモードとなる確率 (小セル基地局数が 7, 利用者数が 1 の場合)

ヘッドネットワーク内において利用者が移動した場合における計算機シミュレーションを行なった。計算機シミュレーション諸元を表 2 に示す。なお、初期状態では全ての小セル基地局は最大送信電力で通信するものとする。伝搬損失は自由空間損失のみを考慮した。本計算機シミュレーションにおいて、小セル基地局がオンオフアルゴリズムを行なった場合と、常に全基地局が最大送信電力で通信を行なった場合との比較を行なった。また、両条件下で小セル基地局の個数を 3 個とした場合と 7 個とした場合での比較を行なった。

Fig.5 に利用者の移動速度を変えた場合のヘッドネットワーク全体での消費電力の変化を示す。小セル基地局がオンオフアルゴリズムを行なった場合と常にオンモードである場合を比較すると前者の方が、小セル基地局が 3 つの場合では 13% 以上、7 つの場合では 25% 以上小さく電力削減が達成できている。また、小セル基地局が 3 つの場合では利用者が移動する場合よりも移動しない場合(速度 0km/h の場合)の方が消費電力は小さい。一方、小セル基地局が 7 つの場合では、利用者が移動しない場合よりも移動する場合の方が消費電力は小さい。オンオフアルゴリズムを用いた場合において、このように利用者の移動速度による消費電力の変化の仕方が配置した小セル基地局の数によって異なる理由は以下のように考えられる。

まず、送信電力とトラヒック負荷の関係について述べる。(2)-(5)式より、あるセルのトラヒック負荷は、そのセルの基地局の送信電力が大きくなるほど減少し、他の基地局の総送信電力が大きくなるほど増大する。従って、ある基地局の送信電力が大きくなるとその基地局のトラヒック負荷は小さくなるが、他の基地局のトラヒック負荷は大きくなる。また、基地局と利用者端末の距離が小さくなるほどチャネル利得は大きくなるため、接続基地局が近くにあればトラヒック負荷密度は小さくなる。しかし、オンモードの非接続基地局が近くにあれば干渉電力が大きくなり、トラヒック負荷密度も大きくなってしまう。

小セル基地局が 7 個のヘッドネットワークにおいて利用者が移動しない場合では、他のオンモードの基地局の干渉電力によってトラヒック負荷が大きくなり、自分のトラヒック負荷を小さくするために各小セル基地局は送信電力を大きくしたと考えられる。なお、利用者数は 60 と多いので各小セル基地局のセルに利用者が存在しており利用者は絶間なく各基地局を選択していて、オフモードにはならなかった。小セル基地局が 3 個の場合では総干渉電力が少ないため、送信電力を大きくする必要がなく(1)式よりセル内の総消費電力を低くできるからであると考えられる。一方、小セル基地局が 7 個のヘッドネットワーク内の利用者が移動する場合、移動によって小セル内に利用者がいなくなった場合にその小セル基地局がオフモードとなる確率が上がる。これによって干渉電力が小さくなるから、他の小セル基地局は送信電力を小さくするよう動作し、ヘッドネットワークセルの総消費電力が低減できたと考えられる。小セル基地局が 7 個の場合の方が 3 個の場合と比べ利用者と基地局間の距離が短くなりやすく伝搬損失が小さくなりやすくなるため、小セル基地局の送信電力が小さくても利用者端末の受信電力は大きく保つことができ、結果として(1)式よりヘッドネットワーク全体での消費電力

が小さくなったと考えられる。

Fig.6 に利用者の移動速度を変えた場合の基地局 1 つ当たりの平均トラフィック負荷の変化を示す。小セル基地局がオンオフアルゴリズムを行なった場合と常にオンモードである場合を比較すると前者の方が、小セル基地局が 3 つの場合では 50%以上トラフィック負荷の削減ができていたが、7 つの場合では利用者が移動すればトラフィック負荷が 80%以上削減できているのに対し移動しない場合では約 10%増加してしまっている。また、小セル基地局が 3 つの場合では利用者が移動する場合よりも移動しない場合(速度 0km/h の場合)の方がトラフィック負荷は小さい。一方、小セル基地局が 7 つの場合では、利用者が移動しない場合よりも移動する場合の方がトラフィック負荷は小さい。利用者の移動速度によるトラフィック負荷の変化が小セル基地局の数によって異なる理由は以下のように考えられる。利用者が移動しない場合では、小セル基地局が 7 つの場合の方が基地局の総送信電力は大きく干渉電力も大きいため、トラフィック負荷も大きくなったものと考えられる。利用者が移動すると、小セル基地局が 7 つの場合ではセル全体での消費電力は小さく干渉電力も小さいためトラフィック負荷も小さくなったと考えられる。

表 2: 計算機シミュレーション諸元

Parameter	Value
Network	
Noise variance N	-174dBm/Hz
Arrival rate $\kappa_s(z) \cdot v_s(z)$	180kbps
MBS	
Maximum transmission power	46dBm
Preferred traffic load $v_s^{preferred}$	0.5
SBS	
Maximum transmission power	30dBm
Preferred traffic load $v_s^{preferred}$	0.5
User	
Number of users	60
Maximum transmission power	23dBm
Path loss (d:distance of BS and user (m)) [1] (unit: dB)	
MBS - User	$15.3+37.6\log_{10}(d)$
SBS - User	$27.9+37.6\log_{10}(d)$
Learning	
Boltzmann temperature μ_s	10
Impact on cost of energy consumption and traffic load a_s, b_s	10, 5
Learning rate exponents q for c, d, e	0.6, 0.7, 0.8

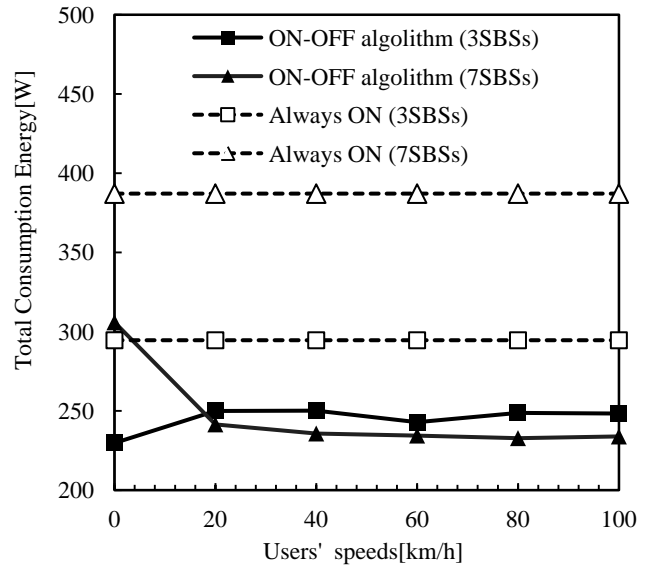


Fig.5: 利用者の移動速度-ヘットネット全体での消費電力

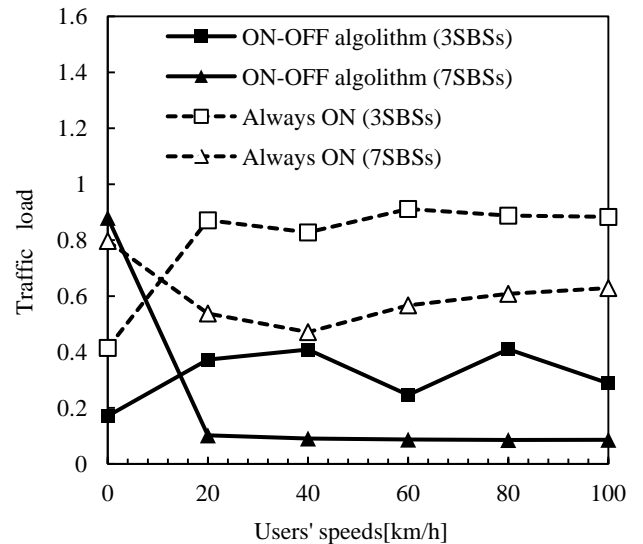


Fig.6: 利用者の移動速度-基地局 1 つ当たりの平均トラフィック負荷

5. むすび

ヘットネット内で利用者が移動した場合における小セル基地局のオンオフアルゴリズムによる消費電力とトラフィック負荷について検討した。まず、オンオフアルゴリズムを用いることによってセル全体での電力消費量を削減することができることを示した。また、ヘットネット内の小セル基地局を多く配置すると、利用者が移動しない場合の方が消費電力、トラフィック負荷共に大きくなる。一方、ヘットネット内に配置する小セル基地局が少ないときには、利用者が移動しない場合の方が消費電力、トラフィック負荷共に小さくなる。

文 献

- [1] Sumudu Samarakoon, Mehdi Bennis, Walid Saad and Matti Latva-aho, "Opportunistic Sleep Mode Strategies in Wireless Small Cell Networks", accepted for IEEE International Conference on Communications 2014 - Mobile and Wireless Networking Symposium (ICC'14-MWS), Sydney, Australia, 10-14 Jun. 2014.
- [2] Kazi Mohammed Saidul Huq, Shahid Mumtaz, Muhammad Alam, Jonathan Rodriguez and Rui L, "Frequency Allocation for HetNet CoMP: Energy Efficiency Analysis", Wireless Communication Systems (ISWCS 2013), Proceedings of the Tenth International Symposium, Ilmenau, Germany, Aug. 2013
- [3] S. Zhou, A. J. Goldsmith, and Z. Niu, "On optimal relay placement and sleep control to improve energy efficiency in cellular networks," IEEE International Conference on Communications , pp.1-6, 2011
- [4] Haijun Zhang, Chunxiao Jiang, Norman C. Beaulieu, Xiaoli Chu, Xiangming Wen, and Meixia Tao, "Resource Allocation in Spectrum-Sharing OFDMA Femtocells With Heterogeneous Services", Communications, IEEE Transactions on (Volume:62,Issue:7), 2014
- [5] 岡田章, "ゲーム理論", 有斐閣, 東京, 1996
- [6] Hongseok Kim, Gustavo de Veciana, Xiangying Yang, Muthaish Venkatachalam, "Distributed α -Optimal User Association and Cell Load Balancing in Wireless Networks", Networking, IEEE/ACM Transactions, pp.177-190, 2012