

センサネットワーク省電力化機構 HGAF における ノード間ネットワーク接続性に関する検討

稲垣 徳也[†] 石原 進^{††}

無線センサネットワークでは、無線センサノードを観測したい領域に配置し、それらノード間におけるマルチホップ通信を用いて観測者へセンシングされたデータが送信される。センサノードの電源容量は限られるので、ネットワークの維持のために稼働端末の省電力化が重要となる。筆者らはセンサネットワークにおけるノードの位置情報を利用した省電力手法である GAF(Geographic Adaptive Fidelity) に階層構造を導入し、必要最低限のノードを動的に利用することでさらなる省電力化を図る電力制御手法 HGAF(Hierarchical Geographic Adaptive Fidelity) を提案している。HGAF では階層構造を用いて稼働端末の場所を限定するため、ノードの配置とノード配置領域の区切り方によってはノード間の接続性が維持できない場合がある。本稿では HGAF におけるノード配置領域の分割方法とノード密度の関係に着目し、ノード間の接続性を検討した。その結果、HGAF においてグループ細分化を進めるにはより多くのノードが必要であることが分かった。

Node connectivity in wireless sensor networks with HGAF power saving scheme

TOKUYA INAGAKI[†] and SUSUMU ISHIHARA^{††}

In the wireless sensor networks, wireless sensor nodes are placed the observation area, and transmit data to an observer by using the multi-hop communication between those nodes. Because wireless sensor nodes are small and have limited power supply, it is important to save power consumption on sensor nodes for prolonging the network lifetime. In our previous work, we proposed HGAF (Hierarchical Geographic Adaptive Fidelity) which introduces layered structure into GAF (Geographic Adaptive Fidelity), a power saving technique using location information in sensor networks. Because HGAF limits the place of active nodes, the connectivity between nodes strongly depends on the layered grid layout and the density of nodes. In this paper, we theoretically examine the network connectivity between nodes with the density of nodes in HGAF. Adding to this we evaluated the connectivity by simulation. We confirmed that many nodes are required to take the advantage of HGAF for prolonging the network lifetime.

1. はじめに

近年、センシング機能、計算処理機能、無線通信機能を有する小型センサノードを用いて基地局などのインフラに依存しないネットワークを形成し、そのセンサノードが取得したデータの収集を行うシステムである無線センサネットワークが注目を浴びている。無線センサネットワークでは電源容量の限られるノードを人が物理的に接触して管理するには困難な場所へ配置することも考えられており、いかに限られた電源容量で効率よくネットワークを形成するかが重要課題となっている。

ノードを高密度に配置して必要最低限のノードを動

的に利用する適応型トポロジの研究がある。例えば GAF (Geographic Adaptive Fidelity)²⁾ はノード位置に応じて正角格子でノードのグループ分けを行い、各グループ内においてルーティングの役目を担うアクティブノードを 1 台選出し、それ以外のノードをスリープさせる手法である。Lin らは GAF を拡張し、格子状を六角形にした GAF-h も提案している³⁾。SPAN⁴⁾ では各ノードが定期的に HELLO メッセージのやり取りを行い、近隣ノードとの接続性と電力残量をもとに自身のノードがアクティブになるかスリープになるか決定している。

筆者らは GAF におけるアクティブノードの選択に階層構造を導入してさらなる省電力化を図る電力制御手法 HGAF(Hierarchical Geographic Adaptive Fidelity) を提案している。GAF では領域全体を正角格子でセルに分割し、このセルによりノードをグループ分けする。この隣り合うセル内のすべてのノード間の通信は保障

[†] 静岡大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University

^{††} 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

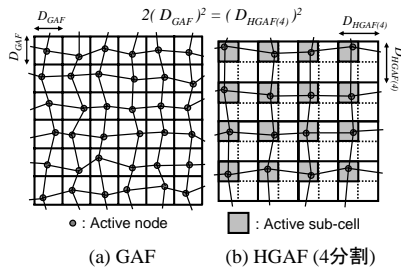


図1 GAFとHGAFの違い

される．各グループでは残存電力に応じてアクティブ（電源 ON）状態のノードが選出され、クラスタヘッドとしてパケットの中継を担う．一方、HGAFでは各セルをさらに正方形でサブセルに分割し、セル内の相対位置が等しいサブセルのみからアクティブノードを選出する．この結果、セルの面積はGAFの場合よりも大きくなるためネットワーク中のアクティブノード数が減り、GAFよりも高い省電力化効果が得られる（図1）．

しかし、HGAFではアクティブノードの存在位置を限定してしまうため、ノード密度が低い場合やノード分布に偏りが大きい場合にはネットワークを構築できない恐れがある．本稿ではこの問題に対し、理論的評価とシミュレーションにより検討を行う．

以下、第2章でHGAFに関連性の高いGAFの概要を述べ、第3章でHGAFについて概説する．第4章ではノードをランダムに配置した場合の接続性の理論的評価、第5章ではノードをランダムに配置した場合と均等に配置した場合の両方でシミュレーションによるGAFとHGAFの比較評価を行う．最後に第6章で本稿をまとめる．

2. GAF (Geographic Adaptive Fidelity)

まず、HGAFのベースとなったGAFについて概説する．GAFはノード位置に応じてノードのグループ分けを行う．各グループ内ではルーティングの役目を担うアクティブノードが1台選出され、それ以外のノードはスリープさせる．アクティブノードを残存電力に応じて動的に交代させることにより、GAFではネットワーク全体の省電力化と全ノードの消費電力の均衡化を実現する．

2.1 セル分割

GAFは各ノードがあらかじめ自身の位置情報を得ていることを前提として設計されている．グループ分けには正方形のセルを用いる．このセルは、隣接セル内のすべてのノード同士が通信できるように構成され

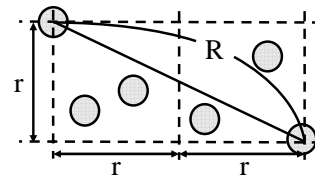


図2 GAFにおけるセルの一边の長さ

る．そのため、GAFでは隣接する2つのセル内の2点間における最長距離をノードの通信可能最大半径以下にすることでセルの一边の長さ r を決定する（図2）．ノードの通信可能最大半径を R とするとセルの一边の長さ r は

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \quad (1)$$

なので r は

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (2)$$

を満たす必要がある．

GAFでは隣接セル内におけるすべてのノード同士の通信を保障する．この条件から、セルの一边の長さ r が決定される．(2)式より、GAFでは少なくとも面積 $R^2/5$ につき1台以上のアクティブノードが必要となる．

2.2 アクティブノードの選出

各セル内のノードは、自身の残存電力が長い程短い間隔でスリープから復帰する．起動中は自身の残存電力を自身の残存電力が多いほど短い間隔で定期的にブロードキャストする．起動中に他のノードが自分のよりも多い残存電力であることを知るとスリープする．この処理により、セル内で最も残存電力の多いノードがアクティブとなる．

3. HGAF (Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity)

3.1 基本概念

HGAFは以下の考えに基づいてセル面積を $R^2/5$ よりも大きくし、ネットワーク内のアクティブノード数を少なくすることで電力消費量を抑制する．隣接セル内におけるすべてのノード同士の通信を保障するのではなく、セル内のアクティブノードの場所を各セルの特定の位置に限定すれば、セル間の接続性はより大きなセルを使って維持できる（図3）．

隣接セル内のアクティブノード間の通信、およびアクティブノードとそれが含まれるセル内の他のノードとの通信が保障できれば、アクティブノードを介した中継により任意のノードからの通信が可能である．したがって、アクティブノード間の距離を R 以下にすれ

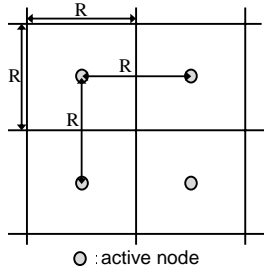


図3 ノード位置を限定した場合のセルの一边の長さ

ばよい．アクティブノード間と同様にセルの一边の長さも R 以下とすることができるので，少なくとも面積 R^2 につき 1 台以上のアクティブノードがあればよい．つまり，GAF においてアクティブノードの場所を限定させることで，ネットワーク上のアクティブノードを最大 $1/5$ まで減らすことが可能となり，ネットワーク全体の消費電力を抑えられる．HGAF ではセルを等面積の正方形（サブセル）で分割し，各セル内の特定の位置のサブセルからアクティブノードを選出することでアクティブノードの位置を限定する．

なお，以下すべてのノードは位置情報を取得しているものとし，時刻同期もされているものとする．配置されたノードは予め登録されているセルおよびサブセルの位置情報を基に自身が所属するセルおよびサブセルを認識する．また，すべてのノードで通信範囲は同じ，かつ不変とする．なお，ノードの途中参加および時刻同期については本論文では扱わないこととする．

3.2 階層化されたアクティブノード選出処理

HGAF はセル内のサブセルのうちの 1 つをアクティブサブセルとし，この中に含まれる 1 台のノードのみを GAF と同様の状態遷移に基づく選出処理によってアクティブノードとして選出する．アクティブセルの選択をすべてのセル内で同期することで，セル内でのアクティブノードの位置を限定する．非アクティブのサブセル内のノードはすべてスリープする．

HGAF では，GAF と同様に隣接セル内のアクティブノード間の通信が保障される必要がある．したがって，隣接セルに含まれるアクティブサブセル内の最長の 2 点間の距離（図 4 の OP）はノードが持つ通信デバイスにおける通信可能最大半径 R 以下となる．また，アクティブノードはクラスタヘッドの役目も果たすことから，同一セル内のアクティブノードと任意のノード間の通信も保障される必要がある．そのため，同一セル内の最長の 2 点間の距離（図 4 の OQ）も同様にノードが持つ通信デバイスにおける通信可能最大半径 R 以下となる．

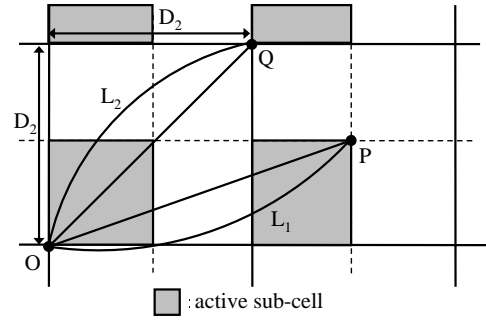


図4 セルを 4 分割した HGAF におけるセルの一边の長さ

3.3 アクティブノード数の減少効果

セル一辺あたりのサブセルの個数を N （分割数： N^2 ）とした時のセルの一边の長さを D_N とする．アクティブノード間の通信を保障するため，隣接セル内において最も遠い 2 点間の距離（ L_1 ）が通信最大半径 R 以下とならなければならないので，

$$L_1 = (D_N/N)^2 + ((N+1)D_N/N)^2 \leq R^2 \quad (3)$$

が満たされる必要がある．よって， D_N は

$$D_N \leq \frac{N}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \quad (4)$$

となる．これにより，セル面積 $S_N = (D_N)^2$ は，

$$S_N \leq \frac{N^2}{(N+1)^2 + 1} R^2 \quad (5)$$

となる．

次に，クラスタ内の通信を保障するため，セル内における最長の 2 点間の距離（ L_2 ）は R 以下とならなければならないので，

$$L_2 = \sqrt{2} D_N \leq R \quad (6)$$

が満たされる必要がある．したがって，式 (4) より

$$\frac{\sqrt{2} N}{\sqrt{(N+1)^2 + 1}} R \leq R \quad (7)$$

となり，これを満たす整数 N は 1 と 2 のみとなる．このことから， $N \geq 3$ の場合においてはクラスタ内の通信を保障するため，セルの対角線の長さを R に制限する必要がある．したがって， $N \geq 3$ における D_N は，

$$(D_N)^2 + (D_N)^2 \leq R^2 \quad (8)$$

と表すことができる．よって， S_N は

$$S_N \leq \frac{1}{2} R^2 \quad (9)$$

となる．つまり， $N \geq 3$ の場合においてはセルの分割数を増やしてもセル面積は $R^2/2$ より大きくすることができない．しかし，この問題は筆者らが提案している拡張 HGAF¹⁾ を用いることで解決でき， N の増加と共にセル面積を拡大することが可能となる．

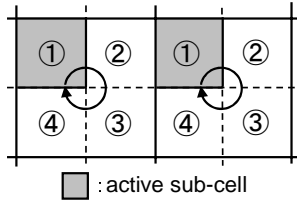


図5 セルを4分割した場合におけるアクティブサブセルの交代順

また、セル内のすべてのノードが均等に電力を消費するようにHGAFでは T 毎にアクティブサブセルのローテーションを行う。アクティブサブセルの交代順はすべてのセルにおいて同じとする必要がある(図5)。

4. サブセル内ノード存在率

HGAFではセルの分割数を増やせば増やすほどサブセル一つあたりの面積が縮小し、サブセル内にノードが存在する確率が下がる。そのため、HGAFでは各ノードとSinkを結ぶネットワークを構築するには十分なノード密度が必要になると考えられる。

理論上の最大セル面積を用いた場合を想定し、GAFおよびHGAF($N \geq 3$ の場合は拡張HGAF)における隣接セル間(上下左右)の接続性をノードの存在確率を用いて考える。

ここではマクロ的な視点からはノードが均等に配置されていると過程する。すなわち、各セルに含まれるノードの数は同じであるとする。したがって、セルを N 分割した場合のセル内のノード数を B_N とすると

$$B_N = B_1 \frac{S_N}{S_1} = B_1 \frac{5N^2}{(N+1)^2 + 1} \quad (10)$$

となる。各セル内ではノードはランダムに配置されるとすると、ノード1台がそのサブセルに存在する確率は $1/N^2$ と表すことができるので、サブセル内のノード数が0になる確率 $P(D_N/N)$ は

$$P(D_N/N) = \left(1 - \frac{1}{N^2}\right)^{B_N} \quad (11)$$

$$= \left(1 - \frac{1}{N^2}\right)^{5N^2 B_1 / ((N+1)^2 + 1)} \quad (12)$$

と表現できる。この式より、あるサブセル内のノード数が0になる確率は B_1 と N との関係のグラフで表すことができる(図6)。

図6($N=1$ はGAFに相当する)より、セルの分割数 N が大きいほどノードが存在しないサブセルが生じやすいことが分かる。これはHGAFではGAF以上にセルの細分化を行う構造を採用したためアクティブになれるノードの範囲が限定されてしまうからである。そのため、HGAFは分割数が多いほど観測領域内

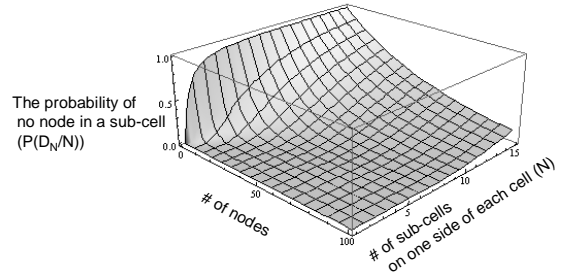


図6 セルの分割数 N とノード数の関係

のノード台数を必要とし、ネットワークを構築するためにはある一定以上のノード密度がないと機能しないことが考えられる。

5. シミュレーション評価

GAFおよびHGAFにおけるノード台数とネットワークの寿命の関係性を調べるため、ネットワークシミュレータns-2を用いてシミュレーションを行った。HGAFでのセルの一辺あたりの分割数 $N=2,3$ 、アクティブセルのローテーション間隔 $T=1000$ [s]とした。

5.1 シミュレーション領域の決定

第3章で述べたように、GAFおよびHGAFを適用した場合のネットワーク上のアクティブノード数はセル面積に依存する。そのため、このセルを適用するためのシミュレーション領域の決定には、HGAF、GAF間の公平性を損なわないように慎重に選ぶ必要がある。

ノードの通信可能最大半径を40[m]とする。(2)式よりGAFにおける最大のセルは一辺の長さ17.89[m]となる。また、(4)式よりHGAF($N=2,3$)における最大のセルは一辺の長さ25.30, 29.10[m]となる。セルをシミュレーション領域にあてはめる際、1つのセルをこの最大のセル以下にする必要がある。そのため、公平性を持たせるためにはGAFおよびHGAFにおける最大のセルと実際に使用するセルの面積比をほぼ一定にする必要がある。

本評価ではシミュレーション領域を250.44[m] × 250.44[m]とした。この領域を隙間なく最小限の個数のセルを敷き詰めると、GAFおよびHGAF($N=2,3$)はそれぞれ196個、100個、81個となる。このとき、GAFおよびHGAF($N=2,3$)のセルはそれぞれ一辺17.89[m]、25.04[m]、27.82[m]の正方形となる。通信可能距離から計算される最大のセルと比較すると一辺の長さはGAFでは1.00倍、HGAF($N=2,3$)ではそれぞれ0.98倍、0.91倍となる。HGAFの方が若干最大のセルに対する比が小さくなっているが、HGAFの優位性を示すためには十分公平な条件であるといえる。

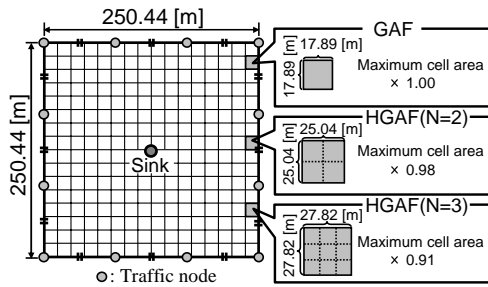


図 7 GAF および HGAF ($N = 2, 3$) におけるセル面積

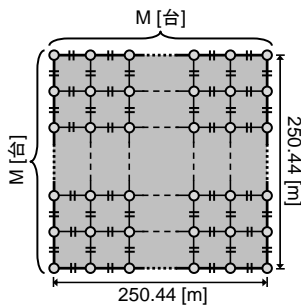


図 8 転送ノードの配置

5.2 トラフィックおよびノード配置

図 7 のように領域の中央に Sink を 1 台、Sink へ向けてデータを送り続けるデータ生成ノードを計 12 台設置した。このほかにデータの転送を行う転送ノードを配置するため、ランダムによる配置と図 8 のように一辺 M 台のノードを格子状に均等配置した場合の二通りを行った。すべてのノードは移動しないものとし、ランダムに配置した場合にはシミュレーションを 20 回行い、その平均値を用いた。すべてのデータ生成ノードは領域の中央に位置する Sink へ 4 分毎に 1 パケット、全体で計 3 [pkt/min] のパケットを送信し、パケットサイズは 80 [bytes] とした。通信規格は IEEE802.15.4/Zigbee (250 [kbps]) とし、ルーティングアルゴリズムには AODV を用いた。転送ノードはデータの生成は行わず、データの転送のみを行い、転送ノードにのみ GAF および HGAF を適用する。

5.3 電力消費モデル

転送ノードの電源容量は 5[J] とし、データ生成ノードの電源容量は無限大とした。電力消費モデルは MPR2400CA (Crossbow Technology)⁵⁾ の値に基づき設定した。電力消費は伝送距離に関わらず送信消費電力 $5.91e^{-2}$ [W]、受信消費電力 $5.22e^{-2}$ [W]、待機消費電力 $6e^{-5}$ [W]、休止消費電力 $3e^{-6}$ [W] とした。また、GAF および HGAF では予め位置情報を与えるものとし、位置情報取得のための消費電力は考えない。

5.4 シミュレーション結果

図 9、図 10、図 11 にランダム配置における転送ノード数、400、800、1200 台の時の GAF と HGAF ($N = 2, 3$) の時間経過に対するノードの存続率の変化、図 12、図 13、図 14 にランダム配置時の転送ノード数、400、800、1200 台の時の GAF と HGAF ($N = 2, 3$) の時間経過に対するパケット転送成功率の変化を示す。これらより、HGAF は常に GAF よりもノードの寿命が延びているが、密度が低い時 (転送ノード 400 台) にはパケット転送率が GAF よりも比較的低い値を推移していることが分かる。これは、式 (13) より HGAF ($N = 2$) の場合 ($N = 2, B_1 = 400/14^2$) における $P(D_N)/N$ を算出すると 0.160 となり、比較的低い数値ではあるが Sink まで 4 ホップ以上必要な本シミュレーション条件ではノードの密度が足りない結果となった。また、この傾向は HGAF ($N = 3$) の場合は特に顕著に現れ、パケット転送成功率は GAF や HGAF ($N = 2$) よりも低い値を推移しやすくなっている。

図 15 にノードを均等に配置した場合における転送ノード数 786 台の時の GAF と HGAF ($N = 2, 3$) の時間経過に対するパケット転送成功率の変化を示す。図 15 とノード密度に近い図 13 と比較するとノードを均等配置した方が GAF も HGAF も高い転送率を推移しており、ノードの配置が通信経路の構築に影響を与えていることが分かる。

6. ま と め

本論文ではセンサネットワークにおける位置情報を利用した階層的省電力手法 HGAF におけるノード間接続性について理論とシミュレーションの両方から検討した。その結果、HGAF のセルの細分化を進めネットワークの長寿命化を図るには、より多くのノードが必要であることが示された。

謝 辞

本研究は科学研究費補助金萌芽研究 19650009 および文部科学省知的クラスター創成事業 (浜松地域オプトロニクスクラスター構想) の助成の下実施された。ここに記して謝意を示す。

参 考 文 献

- 1) 稲垣徳也, 石原進: “センサネットワークにおける位置情報を用いた階層的省電力化手法の提案,” 情報処理学会研究会報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol.2007, No.14, pp.1-8 (2007-02).

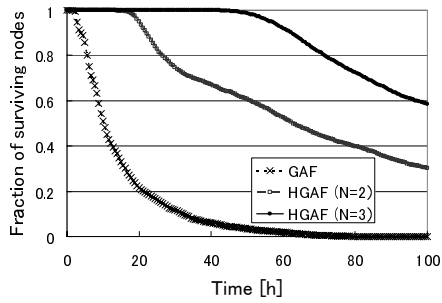


図 9 転送ノード 400 台におけるノード寿命の比較 (ランダム配置)

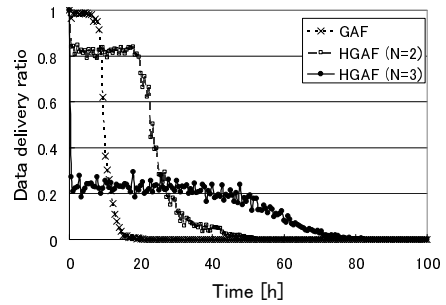


図 12 転送ノード 400 台におけるパケット到達率の比較 (ランダム配置)

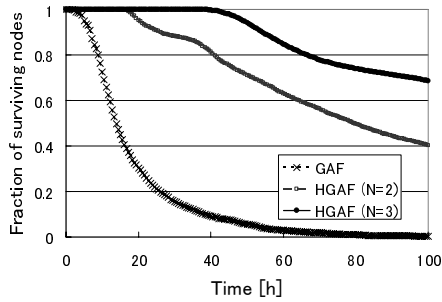


図 10 転送ノード 800 台におけるノード寿命の比較 (ランダム配置)

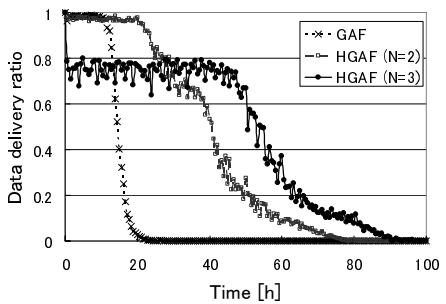


図 13 転送ノード 800 台におけるパケット到達率の比較 (ランダム配置)

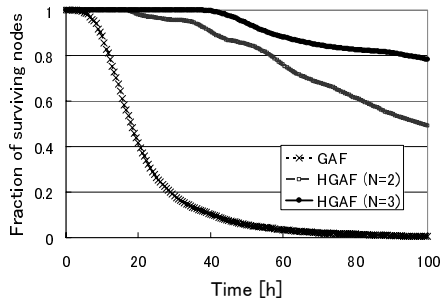


図 11 転送ノード 1200 台におけるノード寿命の比較 (ランダム配置)

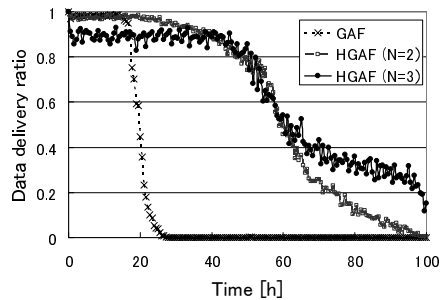


図 14 転送ノード 1200 台におけるパケット到達率の比較 (ランダム配置)

- 2) Ya Xu, John Heidemann and Deborah Estrin: "Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing," MobiCom'01, 2001.
- 3) Ren Ping Liu, Glynn Rogers and Sihui (Sue) Zhou: "Honeycomb Architecture for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks," GLOBECOM'06, 2006.
- 4) Benjie Chen, Kyle Jamieson, Hari Balakrishnan and Robert Morris: "Span: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks," MobiCom'01, 2001.
- 5) Crossbow Technology: <http://www.xbow.com>.

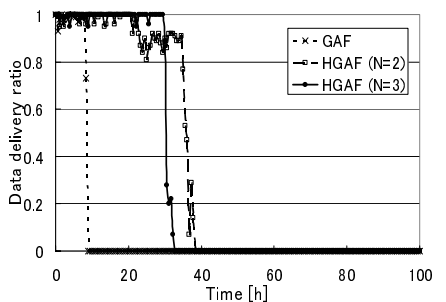


図 15 転送ノード 786 台におけるパケット到達率の比較 (均等配置)