

「ネットワークダイナミクスとその応用特集号」

解 説

アドホック・センサネットワークにおけるダイナミクス
の問題

田中 久陽*

1. はじめに

現在、筆者はアドホック・センサネットワーク分野の研究に従事し、企業と共同研究を行うなどして、しっかりこの分野に居座っている。ところが、ここに到った道のりはたかだかこの5、6年に過ぎず、しかもそれほど苦労した記憶もない。もともと非線形問題の研究を行ってきた筆者のこの転向は意外に見えるかもしれないが、筆者自身の中では、むしろアドホック・センサネットワークの問題の多くは、ある種の「非線形問題」と思えてならない。つまり、この分野は非線形ダイナミクスやネットワークのダイナミクスを扱う非線形問題や、非線形物理と本質的にオーバーラップしており、いま現場の直面している様々な問題が、まさに「現代の」非線形問題の一つなのではないかという気がしている。

したがって、本稿ではアドホック・センサネットワークの体系を教科書的に網羅するのではなく、筆者自身の経験をもとに非線形ダイナミクスの観点からこの分野の最近数年の研究動向に焦点を絞って紹介したい。そのために、以下の二つのトピックスを順をおって説明する。まず、センサネットワークにおいて複数の端末が互いにその通信タイミングを調整して、「隠れ端末」を解消する多重アクセス方式(3)。また、現在の無線LANの標準規格であるIEEE802.11を用いた場合、アドホックネットワークに生じ得る同期の諸問題(4)。以上の内容は、この分野のすべてを網羅するものではないが、新領域が拓かれていく様子がリアルに伝わればと考える次第である。

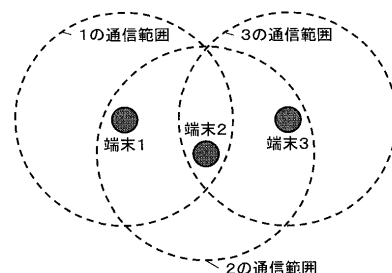
2. アドホック・センサネットワークとの
出会い

2003年3月、筆者は沖電気の伊達正晃さん、福永茂さんの訪問を受けた。その目的は、つぎのような技術相談であった。『結合振動子の同期パターンを応用して、センサネットワークでパケットの衝突を回避するシンプルな通信タイミング制御を構築できないものか?』というものだ。まずここで、アドホック・センサネットワークにはあまりなじみのない方のために、問題の背景を簡単に

説明したい。

アドホック・センサネットワークとは、基地局をもたず集中管理を必要としない分散ネットワークの一つである。つまり、端的にいえば無線版のP2Pネットワークである。アドホックネットワークとセンサネットワークの境界は、少々あいまいである。前者は一般に端末の機能がPCのレベルでありバッテリーの制約がそれほど厳しくない場合が相当する。逆に後者は、端末がたとえば500円玉程度の構成で、センサを内蔵し、CPU、バッテリーともかなり制約されている場合に相当する。

アドホック・センサネットワークでは、一般に基地局が不要である。これはLANや光ファイバネットワークのようなインフラを必ずしも必要としない大きなメリットともなる。その反面、通信ネットワークとして要求される機能を自律分散的に実現しなければならない。そこに解決すべき問題が生じる。その一つとして「隠れ端末問題」が、最も基本的かつ重要な問題と考えられている。いま、第1図のように端末が配置され、隣接端末同士は通信可能であり、端末1と端末3は直接には(電波が届かず)互いに通信できない、つまりお互いにその存在が見えない状況を想定しよう。このような状況は現実に頻繁に生じるものである。ここで端末1と端末3が同時に通信を開始(パケットを送信)したとする。このとき端末2には同時に二つのパケットが到来し、無線の性質から、両者は衝突し、いずれも正しく受信されない。このように、端末1から見て端末3は「隠れ端末」となり、通信を妨げる要因となる。アドホック・センサネットワークを設計する際、この隠れ端末問題を回避、解消することが必須の課題である。したがって、その解決方法はこれまで様々な検討されてきている(たとえば文献[1]などの教科書を参考のこと)。紙面の制限から、ここでそれらを網羅する



第1図 隠れ端末問題の例

* 電気通信大学 電気通信学部

Key Words: adhoc, sensor network, phase model (phase equation), coupled oscillators, hidden terminal problem, timing synchronization.

ことはできないが、一ついえることは、簡便性、柔軟性、通信コストの制約をすべて満たすそのパーフェクトな解消方法は（現時点では）存在しないということである。

冒頭で述べた伊達さんらの問題提起は、つまり、この隠れ端末問題のシンプルな解決方法を求めようというものだった。すなわち、第1図の端末群を振動子集団とみだてて、その相互作用により個々の振動子の発振位相、すなわち各端末の通信タイミングを適切に制御しようというアイデアである。

伊達さんは、その際、筆者の論文[2]や記事[3]を読まれていて、この問題の解決に論文[2]やそのもとネタである参考文献[4]の枠組みを利用する方向を考えられていた。ところが、論文[2]などのダイナミクスは、本来集団同期を生成させるものである。つまり振動子は互いにその発振位相（タイミング）を揃えたがるため、「近傍端末同士がその通信タイミングを適切にずらした状態を維持すること」という目的にはどうも適さないということがわかってきた。また、一歩先をいく物理の分野でも、運動リズムを制御するCPG（Central Pattern Generator）などの少数の例はあるものの、基本的にこのようなタイミングをずらした振動子集団について誰も考えていないことがわかってきた。

当時の状況を整理してみると、インターネットに関しては、すでに統計物理的アプローチや自発的集団同期のダイナミクスが知られていたが、アドホック・センサネットワークとなると、国内の検索結果ではチュートリアル的なコンテンツがいくらかヒットする程度の萌芽的な状況であった。たとえば2002年4月に青山友紀先生（当時、東大）は、センサネットは「生活・社会・産業における「神経系」であり、自己組織型システムが必要となる」と指摘されている。また電子情報通信学会は、2004年5月によりやくユビキタスコミュニケーションのチュートリアルの特集を学会誌に登場させている。要するに2003年3月の当時、センサネットのために自己組織型システムが必要とわかってはいても、由緒正しいネットワーク屋さんから、その具体的実現方法は未提出であり、ましてや結合振動子の応用など考える由もなかったということである。

この状況は逆にいえば、先行研究など気にせずマイペースに研究ができるチャンスではあった。伊達さんらの訪問後、筆者はこの問題に没頭し様々な試行錯誤を行った。そして、これが期せずして筆者のアドホック・センサネットワーク研究に足を踏み入れる第一歩となった。以下では、当時のメモをもとにその足跡をたどってみたい。

3. 「隠れ端末」を解消する分散タイミング制御

アドホック・センサネットワークには、有線のインターネットとは異なり、つぎの二つの重要な制約が存在する。

(a) ある周波数の無線を媒体とするため、一つの端末へ同時にパケットが送られると、両者は衝突（コリジョン）を生じ、いずれも受信されないこと、また、(b) バッテリーで駆動される時、エネルギーの浪費を避けるために必要最小限の通信を行い、かつそのオーバーヘッドも少なく抑えることが望ましい。

したがって、筆者の依頼を受けた問題はつぎのような形に焼き直すことができる。まず上記の(a)に対応して、ある端末に注目したとき、その近傍端末（電波の届く範囲内のすべての端末）から到達するパケットなどのタイミングが、常に互いに異なっているようにしたい。そのために各端末の通信タイミングを自律分散的に制御して、これを維持することが問題となる。さらに上記(b)に対応して、この自律分散制御をできるだけシンプルに構成し、かつ低頻度の通信によって行うことも問題となる。

このように整理したうえで、参考文献[2]などで従来知られている枠組みをどのように応用するか考えてみた。まず最初に浮んだアイデアは、何らかの方法でネットワーク上に一定方向の「進行波パターン」を生成するものである。これによって、端末ごとに通信タイミング差を形成し維持するものと期待される。具体的には、たとえば隣接する端末（振動子）同士がその通信タイミング（発振リズム）をお互いに一定差となるようにすればよい。ところが、このアイデアには少々難点がある。一つは、センサネットという必ずしも規則正しく配置していない端末群において、一定方向の進行波パターンを自律分散的、かつ安定に形成、維持すること自体容易でないこと、つまり、進行波パターンを制御するために、特定の基地局やペースメーカーのような端末が必要になってしまうということである。また、もう一つの難点は、仮に「進行波パターン」が形成されたとしてもネットワークの端末密度がある程度高くなると、「波面」の上の端末同士でそのパケットの送信タイミングが一致するため、別の端末の受信時に衝突が避けられないこと、である。

つぎに浮んだアイデアは、ほぼ自明といえるかもしれない。それは、初めからすべての端末のローカルタイマーを同期させておき、端末同士で互いに自身の通信タイミングのスケジュール（もしくは自身のID）を交換し、そのスケジュール調整により衝突を避けるというものである。ところが、これは明らかにタイミング同期とスケジュール交換の二つの手間が必要で、相当量の通信が必要であり、同時にスケジュールリングのために相応のCPUが各端末に必要となる。したがって上記(b)の制約と相性が良くないと考えられた。

このように、従来知られている振動子集団の同期パターンを利用する方向では、どうもうまくないということが見えてきた。そこで、逆を考えてみた。この問題の本質は上記の「隠れ端末問題」を解決することである。一般にセンサネットで端末の密度が高くなれば、これに

応じ隠れ端末の数も増加する。この同時多発する隠れ端末は第1図の通り、ある端末とその二つ隣の端末とで通信タイミング（発振位相）が揃うことにより生じる。ということは、何らかの方法でこれらの二つ隣り（これを2ホップという）の端末同士でその通信タイミングが揃わないように自律分散制御すればよい。こう考えた時、問題は半分解決したように思われた。そして、後の半分は、上記を満たす結合振動子系を具体的に構成して、確かにそのダイナミクスが隠れ端末を解消することをシミュレーションを系統的に行って裏付ける、またあわよくばその性質を証明すること、となった。

では、どうやって具体的に構成するのか？ これには、結合振動子系について若干のバックグラウンドが必要となる。第1図の「端末」をそれぞれ振動子とみたとする。この振動子をどのように記述するか？ たとえば、これをファンデルポール発振器のように特定の振動子としても悪くはない。とはいうものの、この問題は「隠れ端末」を解消するための理想的な結合振動子のネットワークを構築することが目的であるから、ある程度一般的な枠組みで考えて、その中から適切なソリューションを求めるのが理にかなっている。こう考えると、結合振動子の位相モデルによる記述が望ましいことがわかる。というのは、位相モデルによる記述は、一般のリミットサイクル振動子でその相互作用がある程度弱く、かつ自然周波数のバラツキもある程度抑えられていれば成立するものであり、その守備範囲が広いからである。この位相モデルによる記述とは、具体的にはある振動子 i, j がつぎの微分方程式

$$\dot{x}_i = F(x_i) + \varepsilon p(x_i, x_j), \quad \dot{x}_j = F(x_j) + \varepsilon p(x_j, x_i) \quad (1)$$

により与えられているとき、 ε が小という仮定のもとで、その発振位相 $\theta_{i,j}$ ($\theta_{i,j} \in [0, 2\pi)$) を導入して、

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \varepsilon \Gamma(\theta_j - \theta_i), \quad \dot{\theta}_j = \omega_j + \varepsilon \Gamma(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

となるように縮約するものである。ただし、上で $x_{i,j}, F(\cdot), p(\cdot) \in R^n$, また $\omega_{i,j}, \Gamma(\cdot) \in R$ であり、 $p(\cdot)$ は振動子 i, j の相互作用、 $\omega_{i,j}$ は $\varepsilon=0$ としたときのそれぞれの振動子 i, j の自然角周波数に対応している。このように位相モデル（位相方程式）を導入すると、問題の所在がクリアになる。つまり、どのような相互作用関数 Γ と、どのような振動子間のインタラクションを考えれば「隠れ端末」をうまく解消してくれるかという問題に帰着する。

まず振動子間のインタラクションの仕方を考えよう。たとえば、第1図では端末1と端末3が互いの隠れ端末となっている、これを解消するために、何らかの仕方で端末1と端末3が互いに各自の送信タイミングをある程度ズラす必要がある。これには、つまり端末1と端末3が直接に、あるいは共通の隣接端末2を介して間接にインタラクションしてお互いの送信タイミングを把握する

ことが必要となる。また同様に端末1と端末2、あるいは端末2と端末3のペアにおいてもそれらの送信タイミングはある程度ズレていなくてはならない。もしそうでなければ、これらに隣接する他の端末があるとき、この端末に複数パケットが同時に到来しコリジョンを生じるからである。つまり以上の理由から、ネットワーク内の端末（振動子）は、(1) 互いに隣接するものに加えて互いに「隠れ端末」となる2ホップ離れたもの間でもインタラクションし、(2) そのインタラクションは互いの送信タイミング（発振位相）を歩み寄らせるのではなく、引き離すようなものでなければならない、ことになる。

まずはじめに、このアイデアを位相モデル (2) の枠組みで、つぎのように整理した。

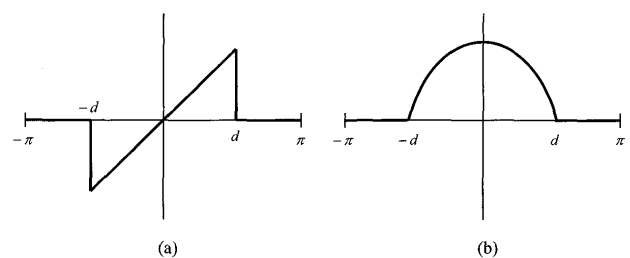
$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \varepsilon \sum_{j \in (1,2\text{-hop})} \Gamma(\theta_j - \theta_i) \quad (3)$$

ここで、インタラクションは隣接する振動子 (1-hop) と二つ隣り (2-hop) の振動子から及ぶものとしている。シミュレーションの設定は簡単さを優先し、 20×20 (=400) 程度の正方格子を想定し、境界あり、隣接端末間の距離は1、とした。また「二つ隣り」の端末としてとりあえず、端末から半径2に収まる端末とした。つまり、通信パケットは距離1の隣接端末間で送受信され、これと独立して別の周波数帯で距離2の通信範囲でタイミング制御信号をやりとりするという設定である。これは、こうすることで（本来の2-hopの場合と若干の差はあるかもしれないが）シンプルになり、物理的な直観が利くものと期待したからである。また、シミュレーションプログラムが簡潔になるという理由にもよる。

一方、肝心の相互作用関数 Γ は第2図 (a) のように設定した。この Γ は他にも選択の余地はあり、ある程度の位相差をもつとき斥力が働くようになっていけばよいのであるが、第2図 (a) の Γ を考えるとその力学アナロジーで得られるポテンシャルが第2図 (b) のように美しくなるので、「何となく良さそう」という直観がこれを選ばせた。

以上のアイデアは、実際には2, 3秒の間にひらめいたもので、その後1時間ほどでこのアイデアを数値シミュレーションに落とし、その結果を待つことになった。

はじめに行ったシミュレーションではすべての ω_i を1と設定し、そのつぎに ω_i に1を中心に若干バラツキ



第2図 相互作用関数と対応するポテンシャル

を与える設定とした。また d は 0.5 程度に設定していた。当時の私の PC の性能はそれほど良くなく、この振動子系が定常状態に収束したとみなされるまで一晩を必要とした。翌日その結果をみると、いずれの場合も少数の例外の端末（振動子）を除き、すべての端末は互いに「隠れ端末」とならず、ネットワーク内でコリジョンが生じない巧妙な通信タイミング（発振位相）が得られることが確認された。そして、この性質は ω_i にある程度のバラツキを与えた場合の方がより早く実現されることもわかった。しかも、このとき振動子集団は一つの発振周波数に同調（frequency locking）していることも判明した。つまり、システムにゆらぎ、あるいはノイズの効果が含まれていると性能の向上が見られるということが予想された。

以上の経緯で、「隠れ端末問題」を回避するシンプルな「発明」が得られたのである。この結果に気を良くしたわれわれは至急、特許出願することを決め、伊達さんが中心となり 2003 年 9 月 19 日出願となった。一方、筆者はその数日後、大同寛明先生（阪府大）に招かれ日本物理学会の秋季大会のシンポジウム講演で、この結果の一部を報告した [5]。このシンポジウムには、結合振動子の分野の錚々たる面子が集まっていたが、蔵本由紀先生（当時、京大）からは「君の発表が一番面白かったです」とコメントをいただいた。それで、何か報われたような気がしたのだった。

この発明はその後、2008 年に特許 [6] となり、現在 [6] を直接、間接に引用した [7] などの改良特許、応用特許など 35 件以上がひしめいている。つまり 結合振動子の応用が、国内初のセンサネットワークの基本特許となったのである！ また最近、生物規範型（生物に学ぶ）分散通信システムの研究 [8] を目にするところがあるが、このような研究分野の嚆矢にも、この特許 [6] はなっている。

とはいうものの、この発明は完璧とはいえず、粗削りな部分が残っている。その後の改良、性能向上の努力は他のグループにより、なされてきた（たとえば、参考文献 [9]）。このような努力は、現在この発明が実機で動作検証されるまで至り、高く評価されるものである。しかしながら、この発明がなぜ、どのようにして有効に動作するのかという「本質的な部分」に関しては、現時点でまだミステリアスであるというのがフェアであろう。本稿を目にされた皆さんのチャレンジが期待されている。

4. アドホックネットワークのタイミング同期の現状と問題点

このように 2003 年にはセンサネットワークに関しちよつとした成果が得られ、同時につぎのターゲットを考え始めていた。当時、アドホックネットワークに関しては、いわゆるアカデミックな研究はすでに一段落して

おり、実機による検証やプロトコルの標準化が進んでいる段階だった。国内では、数十台規模の端末 PC を用いたネットワークの実機実験が間瀬憲一先生（新潟大）やピーター・デイビス氏（ATR）らのグループにより進行していた。つまりアドホックネットはセンサネットと比べ土台が整っており、いくらか先に進んでいたといえる。この実験は、新潟大キャンパスや横須賀リサーチパーク（YRP）の広いフィールドでアドホックネットワークのマルチホップ通信（すなわち、多段のバケツリレーの通信）を目的に行われ、端末は標準的な PC を使い、無線 LAN も標準的な IEEE802.11 のアドホックモードを用いているものだった。

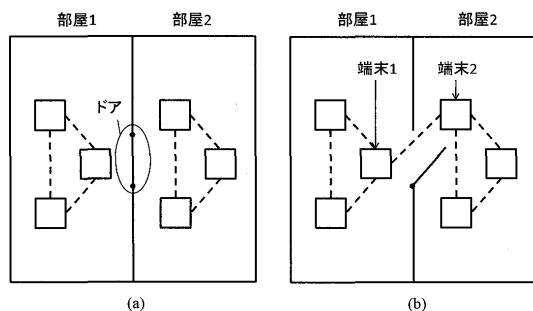
この時期（2004 年春）に、筆者は YRP で、アドホックネットワークのフィールド実験中のピーター・デイビス氏と長谷川晃朗氏と話をすることがあった。ピーターさんによれば、IEEE802.11 を用いるアドホックネットワークにおいてもタイミング同期は重要であり、その割には、マルチホップネットワークではタイミング同期があまりうまくいかない可能性があるということだった。

たとえば、ラップトップ PC や小型モバイル端末でアドホックネットを構成する場合を考えよう。このとき各端末は通信モードと休止モードを交互に繰り返すことにより、バッテリーなどを節約することが望ましい。この工夫は power management とよばれ、IEEE802.11 (802.11) に規定されているものである [10]。ここで、ネットワーク中のすべての端末の通信モードと休止モードの開始（と終了）のタイミングは互いに揃っていなくてはならない。すなわち、各端末のタイマーは互いに同期している必要がある。もしこの同期が保証されなければ、ある端末は休止モードの端末へ無駄な通信を試みることになり、通信が成立しなくなる。

そこで、どのように各端末のタイマーを同期させるかという問題になる。前提となるのは、各端末は基本的に通信モードと休止モードを交互に繰り返して、休止モードの間では通常のデータパケットの送受信が不可能であり、しかも同期を行うための端末間ビーコンの送受信も行わないことである。この前提のもとで、ネットワークに新規参入する端末の対応や、複数ネットワークが動的に融合する機能も自律分散的に実現しなくてはならない。

端末同士のタイマーの同期は、上記の通り「ビーコン」という定期的通信により行われ、これも 802.11 に規定されている [10]。そのメカニズムはひとこと言えば、より大きなタイマー値（ローカル時刻）をもつ端末に他の端末が同期追従するものである。その詳細は、端末同士の競合によるもので、少々複雑なため、紙面の制限上参考文献 [11] などに譲りたい。

以上の状況をピーター氏、長谷川氏から伝授いただき、一つの自明でないケース [12]（第 3 図）を教えていただいた。参考文献 [12] の指摘したケースは、マルチホップ



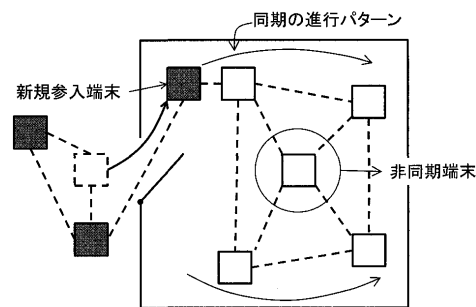
第3図 [12]で指摘された例

のアドホックネットワークでは避けることのできないものであり、おそらく頻繁に生じるものと考えられる。たとえば、第3図(a)のように二つの小部屋が一つのドアを介して隣接しているとしよう。それぞれの部屋にはシングルホップ（各端末がお互いに直接通信可能）のアドホックネットワークがあり、それぞれ独立してタイミング同期しているものとする。このとき第3図(b)のように部屋を隔っていたドアが開いたとする。このときドアの近くにいる端末1と端末2は直接通信可能な場所にいる。したがって、当初独立していた二つのネットワークが一つに融合し、二つの部屋の全端末が互いに通信可能となることが期待される。

ところが参考文献[12]の指摘するように、この二つのネットワークの同期・融合は、802.11のタイミング同期の規定[10]に忠実に考えると、ワーストケースで端末の台数 N 台に比例する $O(N)$ の時間が必要となることがわかる。つまり、ある程度規模の大きなネットワークが同期・融合しようとする時、802.11が想定していなかった不都合が起きるということである。また参考文献[12]の直感的な考察を厳密化したところ、一般に N が大きくなるにつれ同期に必要な時間は $O(N)$ を超えて、 $O(N^{3/2})$ となることも判明した。

第3図の例では、二つの「小部屋」を考え、それぞれのネットワークはシングルホップ（各端末は互いに直接通信可能）とした。それでは第4図のように、隣接する二つの部屋のうち一つは「大部屋」であり、そのネットワークの規模も大きく、マルチホップであるとしたらどうなるだろうか？つまり、マルチホップのネットワークが同期しているところに、他のネットワークに属する別のタイマーをもつ端末が新規参入するという状況である。

結論を先に述べるとつぎのようになる。第4図のように参入した端末がネットワークの端にいるとする。このときネットワークの融合（つまりタイミング同期）が進行するプロセスは端末の密度や通信範囲などのファクターに依存するが、ワーストケースでは第4図の通りネットワークの端（境界部分）で先に同期が進み、一方ネットワークの中央部分の端末では、前章で述べた「衝突」が頻繁に生じる結果同期がなかなか得られないことが明らかになった。つまり「大部屋」の場合、第4図の



第4図 ネットワーク同期の不具合の例

小部屋の場合と比べ、より一層不具合が生じてくるのである。

このようなネットワーク同期の不具合を何とか解消できないものだろうか？それも、なるべく現行のIEEE802.11のタイミング同期のメカニズムを保持して、この問題に対して試行錯誤の結果、意外なほどシンプルな解消方法があり得るということが判明した[13]。そして、そこへ至る経緯はつぎのようなものであった。まず注目したのは第4図の非同期端末の発生である。第3図の場合でもこの非同期端末の発生が端末数 N の増大に比例し生じるため、同期を進行させ完了することの妨げになっている。この非同期端末はなぜ生じるか？丁寧に解析を行ったところ、端末同士のビーコン送信競合が周辺の端末数を考慮しないため、過度になるためと判明した。つまり現行のタイミング同期のメカニズムでは、同期を急ぐあまり、同期を伝播するビーコンに「渋滞」を生じ、逆に同期を遅らせることになっているのだ。

これに気がついた時、その解決の方法が自ずから降ってきた。それは「渋滞」を生じないよう各端末が自律的にビーコン送信を控えて、ネットワーク全体としてより早く同期を完了させるというアイデアである。しかも、その構成は現行のタイミング同期のメカニズムに、ある「条件分岐文」を一行加えるのみでよいことがわかった。そして系統的なシミュレーションから性能評価を行ったところ、この修正により「渋滞」は解消し、どのようなケースでもネットワーク同期が高速化し、最大で8倍ほどの時間短縮が認められた[13]。

さて、以上の二つの例題はつぎのような教訓を示唆しているのではなからうか？まず一つは、このような自律分散システムでは、その要素のわずかな改変により「集団として」大きな差（上の例では、同期の進行）が生じる可能性である。そして、いま一つは、アドホック・センサネットワークのようなシステムは、どうやらわれわれがこれまで親しんできた回路や物理の枠から逸脱した世界を垣間見せてくれるようである。それはたとえば、互いに同期を外そうとする振動子（端末）(3.)、あるいはあえてローカルな同期を遅らせても全体として同期の完了を素早く行う同期手法(4.)の形で現れてきている。

本稿では触れることができなかったが、アドホック・

センサネットワークのダイナミクスの問題として、センシングデータ収集方式 [8], 高精度タイミン同期手法 FTSP [14] とその改良 [15], また新規なフラッディングとセンシングデータ収集方式 [16] など, 次々と現れてきている。これらについてはまた別の機会に譲りたい。

謝 辞

日頃ご議論頂く電通大 AWCC の先生方, ならびに電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会, 非線形問題研究会の諸氏に感謝致します。また, この研究を進めるにあたり, 伊達正晃氏, ピーターデイビス氏, 長谷川晃朗氏にお世話になりました。ここに改めて感謝致します。本研究の一部は平成 16 年度, 18 年度, ならびに平成 20 年度文科省科研費補助金 (課題番号 16760292, 18560370, 20560348) を受けて行われた。

(2009 年 1 月 30 日受付)

参考文献

- [1] 小牧, 間瀬, 松江, 守倉: 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善 (2004)
- [2] 田中, 長谷川, 大場: 集団同期の密度効果 - 東南アジアホテル *Pt. tenar* と *Pt. valida* の棲み分け仮説 - ; 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J84-A, No. 6, pp. 870-874 (2001)
- [3] 田中: 同期現象の科学の最近の進展; 電子通信学会誌, pp. 1175-1179 (1997)
- [4] B. Ermentrout: An adaptive model for synchrony in the firefly *Pteroptyx malacca*; *Journal of Mathematical Biology*, Vol. 29, No. 6, pp. 571-585 (1991)
- [5] 田中ら: 工学に触発される相互同期の新展開: 振り子時計から VLSI、センサーネットワークまで; 日本物理学会秋期大会シンポジウム講演「結合振動子系の動力学 - 同期現象とその周辺 -」 (2003) <http://synchro3.ee.uec.ac.jp/butsuri20030922.pdf>
- [6] 伊達, 田中, 森田: 特許第 4173789 号「ノード、これを用いた通信システムおよび通信方法」; 特願 2003-328530 号, p. 13 (2003) <http://www.ultrapatent.jp/DataView/FullText2.aspx?Key=302L2J471O2B0B0E3R2R2O412Y2J1k0P251x3u1U0n3F3e3m>
- [7] 伊達, 関山, 久保: 特許第 4173122 号「通信制御装置, 通信制御方法, ノード及び通信システム」; 特願 2004-257562 号, p. 22 (2004) <http://www.ultrapatent.jp/DataView/FullText2.aspx?Key=3l2r1G0t0j0p2V1n0l1z162z0q2O472Z333N393C3c3r1i0c>
- [8] N. Wakamiya and M. Murata: Scalable and robust scheme for data fusion in sensor networks; *Proc. of the First International Workshop on Biologically In-*

spired Approaches to Advanced Information Technology, pp. 305-314 (2004)

- [9] K. Sekiyama, Y. Kubo, S. Fukunaga and M. Date: Phase diffusion time division method for wireless communication network; *The 30th Annual Conf. of the IEEE Ind. Electron. Society, IECON2004*, pp. 2748-2753 (2004)
- [10] IEEE Std. 802.11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification, <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>
- [11] 田中, 太田, 増形, 長谷川, デイビス: IEEE 802.11 MAC プロトコルを用いたマルチホップアドホックネットワークにおける時刻同期過程とその障害の解析; 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J90-A, No.3, pp. 228-239 (2007)
- [12] A. Hasegawa and P. Davis: Long coalescences times for ad hoc cells using 802.11 MAC protocol; 2004 信学総大 (通信), B-5-37, p. 407 (2004)
- [13] H. Tanaka, O. Masugata, D. Ohta, A. Hasegawa and P. Davis: Fast, self-adaptive timing-synchronization algorithm for 802.11 MANET; *IEE Electronics Letters*, Vol. 42, No. 16, pp. 932-934 (2006)
- [14] M. Maroti, B. Kusy, G. Simon and A. Ledeczi: The flooding time synchronization protocol; *Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 39-49 (2004)
- [15] K. Yonekura, H. Tanaka and K. Shinohara: Improvement and experimental verification for Flooding Time Synchronization Protocol (FTSP); 信学技報, Vol. 108, No. 33, AN2008-10, pp. 49-52 (2008)
- [16] 菊地, 田中: 省電力センサネットワークにおけるコリジョン回避型ブロードキャスト手法の提案; 信学技報, Vol. 108, No. 33, pp. 13-18 (2008)

著者略歴

たなか ひさあき
田中 久陽



1995 年早稲田大学大学院博士課程修了。同年より日本学術振興会特別研究員 (PD), 1996 年カリフォルニア大バークレイ校客員研究員, 1997 年よりソニーコンピュータサイエンス研究所研究員, 2001 年電気通信大学電気通信学部電子工学科助教授。通信システム, 数理生物学, 非線形物理などの横断的分野の研究に従事。工学博士。2007 年電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術賞) 受賞, 2008 年電気通信普及財団賞 (テレコムシステム奨励賞) 共同受賞。電子情報通信学会, 日本物理学会, 応用数理学会, IEEE 各会員。