

ネットワークトモグラフィを用いた アドホックネットワークにおける電力推定手法の改善

桑嶋真也^{†1} 中村嘉隆^{†2} 稲村浩^{†2} 高橋修^{†2}

無線通信技術の発達に伴い, 無線接続される機器のみで構成されたアドホックネットワークが注目されている。また, ネットワーク利用率の増加に伴い, ネットワーク内部の状態を常に監視することによって, ネットワーク品質を高い状態で維持することが重要となってきた。このことから, ネットワークの内部状態を低コストで推定できる技術であるネットワークトモグラフィへの関心が高まっている。しかし, 従来のネットワークトモグラフィを用いた内部状態推定は遅延やパケットロス率が主であり, アドホックネットワークにおいて重要な内部状態である電力を推定するための研究は見られない。そのため, 本研究では, アドホックネットワークにおけるネットワークトモグラフィを用いた電力の推定を行う。また, その結果から推定手法の改善案を検討する。

An Improvement of the power estimation method in ad-hoc network by network tomography

SHINYA KUWAJIMA^{†1} YOSHITAKA NAKAMURA^{†2} HIROSHI INAMURA^{†2}
OSAMU TAKAHASHI^{†2}

1. はじめに

無線通信技術の発達に伴い, 無線接続できる端末のみで構成されたネットワークであるアドホックネットワークへの関心が高まっている。アドホックネットワークの特性としてはマルチホップ通信であることや多くの端末がバッテリー駆動であることなどがある[1]。また, インターネットを通じて音声通話を行う Voice over Internet Protocol(VoIP)などの技術を用いたリアルタイム性の高いサービスが近年増えている。こうしたサービスをユーザが快適に利用できるよう安定して提供するには, ネットワークの通信品質を把握し, 常に高く維持しておく必要がある。ネットワークの通信品質はネットワークの内部状態の中でも特に通信に関するものである。

ネットワークの内部状態把握を実現する技術としてネットワークトモグラフィ(Network Tomography)が挙げられる。ネットワークトモグラフィとは計測が困難な内部状態を計測可能な外部要因から推定する技術である[2]。ネットワークの内部状態には遅延やパケットロス率, 輻輳などがある。ネットワークの内部状態を把握することによって, ネットワークのどの箇所が劣化しているかがわかり, それが通信品質に影響を与えているかなどを知ることができる。ネットワークを構成する要素であるノードやリンクを

個々に監視し, その状態を把握する方法もあるが, コストが高いため, ネットワークトモグラフィによる内部状態推定は有用である。

ネットワークトモグラフィの基本的な考え方をパス遅延等の内部状態指標が定められたある閾値を超えた場合に劣化と判定する例で示す(図1)。この例では, ひとつの通信経路(パス)について判定された段階では劣化箇所であろうリンクが2つあり, どちらがパスを劣化させているかわからない(図1①)。しかし, 最初に劣化と判定された通信経路と相関関係(この場合はあるリンクを共有していること)にあるもう一方の通信経路について劣化と判定された場合(図1②), 複数の箇所と同時に劣化が発生するより一箇所劣化が発生する確率のほうが高いというネットワークの性質から2つの通信経路で共有しているリンクが劣化を引き起こす要因を持っていると推定する(図1③)。

エンド・ツー・エンド計測により, 複数のリンクやノードから構成されるパスの計測情報を取得する。得られた複数のパスの計測情報の相関関係などから各リンク性能やノード状態といった内部状態を推定する。図2示すネットワークボロジを例に内部状態の推定方法を示す。 $e_{i,j}$ をノード*i*から*j*へのリンクを表すとすると, 図2におけるパスは $path 1 = (e_{1,2}, e_{2,3})$, $path 2 = (e_{1,2}, e_{2,4})$ のよう

†1 公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

†2 公立はこだて未来大学 システム情報科学部

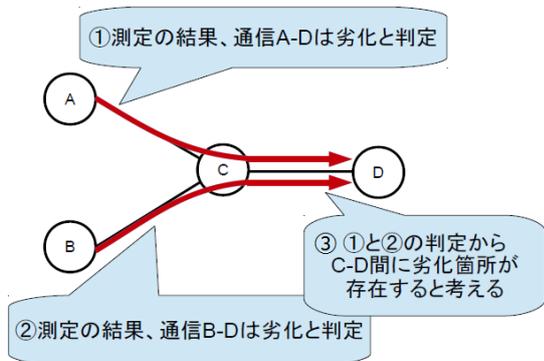


図1 ネットワークトモグラフィの基本的な考え方

になり、図2 中の矢印はノードから別のノードへデータを転送している様子を表す。ネットワークトモグラフィでは、推定したいリンク性能やノード状態といった内部状態を $\mathbf{x} = (x_1 \ x_2 \ x_L)^T$ (L はリンク数, T は転置を表す), エンド・ツー・エンド計測によって得られたパスの計測情報を $\mathbf{y} = (y_1 \ y_2 \ y_M)^T$ (M はパス数, T は転置を表す) とすると, \mathbf{x} と \mathbf{y} の関係はエンド・ツー・エンド計測の際のパスとリンクの関係を表す $M \times L$ の行列 $A \in \{0, 1\}^{M \times L}$ を用いて

$$\mathbf{y} = A\mathbf{x} \quad (1)$$

という線形逆問題として定式化することができる。このときの行列 A は以下のように表される。

$$A = \begin{pmatrix} \epsilon_{1,2} & \epsilon_{2,3} & \epsilon_{3,4} \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{path1} \\ \text{path2} \end{matrix}$$

式(1) を解くことによって内部状態 \mathbf{x} を推定できる。しかし, $M < L$ となると一意に内部状態 \mathbf{x} を定めることができない不良設定問題となるため, 式(1) を最適化問題へと定式化することで, 既存の数学的手法を使用し効率的に解くことができる[2]。

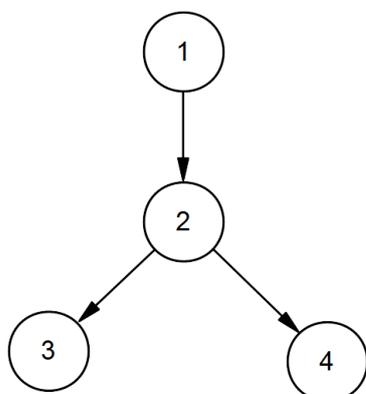


図2 ネットワークトポロジ例

この技術をアドホックネットワークに応用したとき, その特性から, 把握すべき内部状態は遅延やパケットロス率等のネットワーク状態に加えバッテリー残量等の電力の状

態も重要となる。しかし, ネットワークの内部状態を推定する既存研究では電力を推定対象としたものは見当たらない。

2. 関連研究

2.1 アドホックネットワークにおけるネットワークトモグラフィ

Ye, Yら[3]では従来, 有線ネットワーク適用されてきた遅延やパケットロス率を推定するネットワークトモグラフィを無線ネットワークであるアドホックネットワークへ適用する手法について述べている。

式(1)として定式化される線形逆問題を解く数学的手法について, ネットワークトモグラフィで一般的に用いられている MLE (Maximum Likelihood Estimation), ベイズ推定, EM 法(expectation-maximization algorithm)等を用いることができるとしている。文献[3]では他の手法と比べ計算が容易であることから反復法により尤度関数を最大化する手法である EM 法を採用している。このことから, 従来は有線ネットワーク適用されてきたネットワークトモグラフィをアドホックネットワークへ適用することが可能であることを示している。しかし, アドホックネットワークの特性からネットワークトモグラフィ適用の際に解決すべき課題もいくつか示されている。

解決すべき課題の1つ目はネットワークトポロジの動的な特性である。ネットワークトモグラフィを適用する前提条件として, ネットワークトポロジを既知とし, 計測期間中にそれが変化しないことを必要とする。アドホックネットワークにおいて, そのトポロジは時間経過とともに変化する可能性がある。文献[3]ではすべてのリンク接続関係が計測中に変化しない場合, アドホックネットワークトポロジが安定しているとし, この期間中に計測を行うことで動的な特性に関する課題を解決している。

2つ目の課題は計測方式選択についてである。計測方式にはアクティブ計測とパッシブ計測の2種類がある。アクティブ計測は ping 等でネットワークへ計測用のパケットを送る計測方式で, パッシブ計測は SNMP 等ですでにネットワークを流れているパケットを見る計測方式である。アドホックネットワークでは有線ネットワークと異なりアクティブ計測によるトラフィック増加の影響を受けやすく, 輻輳の一要因となりえるため, パッシブ計測の利用がよいとされているが, 文献[3]ではパッシブ計測の欠点として柔軟にデータを計測できない点や推定精度が低いことがあり, さらにはネットワークマネージャがプライバシーとセキュリティのためにデータの収集を禁じることがあるとしている。そのため文献[3]ではアクティブ計測はパッシブ計測よりも柔軟で正確な手法であるとし, アクティブ計測の欠点であるトラフィック増加はパケット数を減らしたり, パケットのサイズを制御することで克服できるとしている。

2.2 無線センサネットワークにおける電力推定

Vehbi, G.ら[4]は無線センサネットワークにおけるセンサノードの電力推定と監視手法を提案している。この研究では、最小のエネルギーでネットワーク全体の電力状況を正確に監視することを目的としている。センサノードのバッテリーの状態を計測し、利用可能なエネルギーを監視することは、いずれ訪れるノードのバッテリー切れに備えた予防策をとるために重要となる。この手法では、センサノードのほかにノードの情報を計測・管理するために監視ノードをネットワークの任意の位置におく。ネットワーク全体の監視のためのエネルギーを最小にするという目的を達成するために、電力状況を監視するエネルギーを最小に抑えるための手法をいくつか用いている。1つはネットワーク集約である。無線センサネットワークのセンサのエネルギー散逸率が空間的に相関しているという事実から、似たようなエネルギー情報を収集した特定範囲内に存在する2つ以上の監視ノードはエネルギー情報を集約することができる。これにより情報の転送や処理にかかるエネルギー消費を削減することができる。次に、利用可能エネルギー予測である。各センサノードの利用可能エネルギーとエネルギー散逸率から将来の利用可能エネルギーを予測する。これにより、各センサノードの利用可能エネルギーを計測し収集する頻度を減らすことができ、ネットワーク監視のためのエネルギー消費を低減できる。利用可能エネルギーの予測には単一パラメータ二重指数平滑化を用いる。この方法は一貫した減少を示す観察データのための効果的な予測技術である。その予測に基づき計測から時間が経ったある時点においても利用可能エネルギーを計測せずに推定し、ネットワークを管理する。他には、各センサノードの電力状況を計測するタイミングをネットワークの挙動にばらつきが出たときとすることで計測頻度を減らし、計測にかかるエネルギー消費を抑えることなどがある。

以上より、既存の無線ネットワークにおける電力推定手法はいかに計測にかかる電力を抑えて計測するかが課題となっているといえる。

3. 提案方式

3.1 研究課題

ネットワークトモグラフィを用いてアドホックネットワークにおける電力を推定するにあたり、3つの研究課題を設定する。

- 課題1. 計測方法の選択
- 課題2. 計測経路の構築方法
- 課題3. 推定に用いる数学的手法の検討

課題1は、計測方法の選択である。2.1節において、アドホックネットワークにおける計測方法の選択が課題であると述べた。また、推定対象が電力であるため、それに留意した選択が必要となる。課題2は、計測経路の構築方法である。アドホックネットワークにおいては送信元と宛先の一対一の通信が主である[3]。そうした場合、式(1)の形で定式化される線形逆問題を解くために用いられるパスとリンクの相関関係をうまくとることができず、不良設定性が強まり、一意に解を定めることができなくなる。そのため、計測経路の構築に関して更なる工夫が必要となる。課題3は、推定に用いる数学的手法の検討である。推定に用いられる数学的手法はいくつかある。その中で研究目的を達成するのに最適なものを選択することが課題となる。

3.2 アプローチ

3.1節に示した課題1に関しては、通常の通信に電力計測用のフィールドを取り、計測することとする。推定対象が電力であり、対象ネットワークがアドホックネットワークであるため、通常の通信以外でパケットを流すのはあまり良い方法ではないためである。課題2に関しては、通常通りにルーティングプロトコルにて経路を決定する際に、それとは別に予備経路をとることで解決を図る。これによりパスとリンクの相関関係を確保し、推定が可能になると考える。課題3に関しては、欠測値を含む問題に使用でき、収束の安定性、適用の汎用性などの点で適していることからEM法を推定に用いる。

3.3 計測方法選択

アドホックネットワークでは通信を行う端末間でやり取りをするパケット以外のパケットを同一経路上に流すとトラフィックの増加が通信に影響を及ぼし、結果として端末の電力を減らすこととなるため、電力計測に制御パケットを用いる手法は不適であるといえる。そこで、端末間でやり取りされるパケットに計測された電力を記録するための領域を確保し、パケットが経路上の各端末に中継される際に確保した領域へ自身の電力を記録する方法を提案する。その際にすでに記録されている他の端末の電力と自身の持つ電力を足し合わせていくことで、電力記録領域の増大を抑える。最終的に得られる経路の電力をネットワークトモグラフィの考え方にに基づき各ノードの電力を推定によって復元する。

3.4 計測経路構築

通信経路を計測経路とするために、通常のルーティングプロトコルによって通信経路を決定する。決定された経路とは別にパスの電力からノードごとの電力を推定するために用いる予備経路を設定する。既存の中継ノードを一部含

むことでより良い相関関係を得ることができるため、予備経路には既存の中継ノードを含ませることとする。

3.5 EM 法

EM 法は期待値最大化法とも呼ばれる反復法であり、E ステップと M ステップからなる。EM 法を利用する目的は、パラメータ θ を最大化することである。E ステップは現在推定されているパラメータ θ^i に基づいて、 $\log p(y_t; \theta)$ で表される尤度の期待値を計算する。

$$Q(\theta, \theta^i) = E_{X|Y, \theta^i} \log p(y_t; \theta), t = 1, \dots, n$$

M ステップは E ステップで決まった尤度の期待値を最大化するようなパラメータ θ^{i+1} を求める。

$$\theta^{i+1} = \underset{\theta \in \Theta}{\operatorname{argmax}} Q(\theta, \theta^i)$$

M ステップで求められたパラメータは次の E ステップで使用される潜在変数の分布を決定するために用いられる。二つのステップを交互に繰り返すことで計算が進行し、パラメータの最尤推定値が定まる[5]。また、EM 法はデータが確率モデルに依存すると仮定することで、データに欠損値が含まれていても尤度の期待値を最大化することができる。

4. 実験・評価

4.1 実験概要

ネットワークシミュレータである ns3[6]を用いて実験を行う。図3に実験で使用したネットワークトポロジを示す。シミュレーションした結果得られるトレースファイルから、シミュレーション時間、任意の経過時間におけるパス上の各ノードの電力を抽出し、パスでの合計電力を算出する。EM 法によってパスの電力からパス上の各ノードの電力を推定する。EM 法は C++ で実装したものを使用する。使用したルーティングプロトコルである DSR (Dynamic Source Routing) によって得られた経路は $S \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow D$ であった。予備経路として $S \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow D$ をとる。これら二つの経路を合わせて計測経路とする。

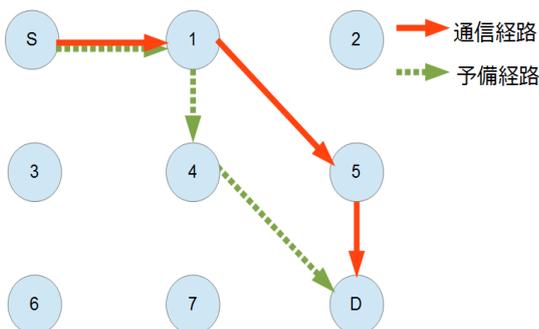


図3 実験トポロジ

アドホックネットワークでは通常、ノードは移動の移動も考慮されていることが多いが、ネットワークトポロジの変化は推定結果に悪い影響を与えることが先行研究から確認されている[3]。従って、本研究では、ノードは移動しないものとして推定を行うこととする。また、推定の際、対象のネットワークのトポロジ全体は既知であるとする。

4.2 シミュレーション実験

実験に用いた環境を表1に示す。また、シミュレーションに関するパラメータを表2に示す。

表1 開発環境

OS	Ubuntu 14.04 LTS
シミュレータ	ns-3.24.1
使用言語	C++, Python

表2 パラメータ

通信方式	IEEE802.11b
電力モデル	Li-Ion バッテリーモデル
ノード数	9
通信プロトコル	UDP
ルーティングプロトコル	DSR
シミュレーション時間	60 sec
データレート	512 kbps
パケットサイズ	1024 byte

ns3 における電力の消費は使用する通信方式とバッテリー一部の 2 つの電力モデルによって表される。通信方式は IEEE802.11b を用いた Wifi による通信で、バッテリー一部はノート PC やスマートフォンなどで用いられる Li-Ion バッテリーモデルの 2 種類を使用した。また、これらの電力モデルは ns3 にあるものを使用した。

4.3 実験結果

シミュレーションにより得られるトレースファイルからシミュレーション時間及びそのときの各ノードの電力を抽出し、それらと EM 法を用いた推定結果から推定精度を算出した。トレースファイルから得られる各ノードの電力を真の値とし、推定結果から得られる推定値と比較し正解かどうかを判断する。推定精度は複数回の計測における推定の平均をとったものである。式は次のようになる。

$$\frac{\text{正解と判断されたノードの数}}{\text{計測回数} \times \text{対象ノード数}}$$

推定に関して、各ノードのバッテリーは使用され、その残量は時々刻々と変化する。そのため精緻に推定する必要性は低い。従って、バッテリー残量をいくつかの段階で表し、それをバッテリーレベルとする。

資料[7]を参考に設定した 4 段階のバッテリーレベルを

用いたものでは 52.5%, 10%ごとに 10 段階にバッテリーレベルを設定したものでは 35%の推定精度であった。また、推定対象である計測経路上の各ノードごとの推定精度を表 3 及び表 4 に示す。ノード 1 及びノード D は予備経路を含めた計測に用いるパスが重複しているノードであり、ノード 4 は通常の通信経路上にはなく予備経路上のみにあるノードである。

表 3 4 段階バッテリーレベルでの各ノードの推定精度

ノード 1	80%
ノード 4	10%
ノード 5	10%
ノード D	70%

表 4 10 段階バッテリーレベルでの各ノードの推定精度

ノード 1	50%
ノード 4	40%
ノード 5	30%
ノード D	20%

バッテリーレベルを用いた推定では重複したノードであるノード 1 とノード D の推定精度が高いという結果となった。10%ごと 10 段階に電力を分けたときの推定では重複したノード 1 の推定精度が高いという結果となった。

4.4 計測経路に関する実験

4.1 節における実験では通信経路に加え、予備経路を一本追加し推定を行った。より多くの計測経路をもって推定する場合を考え、実験を行う。図 4 に示すような新たな予備経路をとると仮定し、4.1 節における実験と同様に EM 法を用いて推定する。

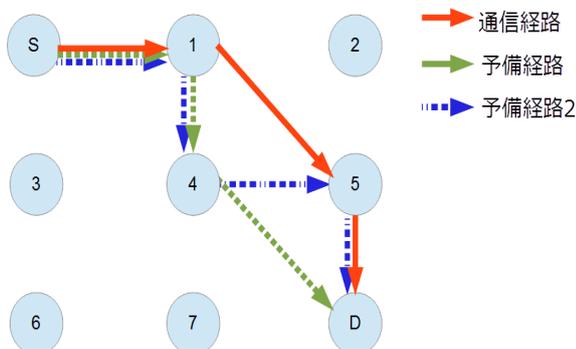


図4 予備経路を追加した実験トポロジ

資料[7] を参考に設定した 4 段階のバッテリーレベルを用いたものでは 95%, 10%ごとに 10 段階にバッテリーレベルを設定したものでは 75%の推定精度であった。ま

た、推定対象である計測経路上の各ノードごとの推定精度を表 5 及び表 6 に示す。

表 5 4 段階バッテリーレベルでの各ノードの推定精度

ノード 1	90%
ノード 4	100%
ノード 5	100%
ノード D	90%

表 6 10 段階バッテリーレベルでの各ノードの推定精度

ノード 1	50%
ノード 4	100%
ノード 5	100%
ノード D	50%

5. 考察

予備経路が 1 本の場合における推定精度は資料[7] を参考に設定した 4 段階のバッテリーレベルを用いたものでは 52.5%, 10%ごとに 10 段階にバッテリーレベルを設定したものでは 35%と低いものであった。しかし、予備経路を追加し 2 本とした場合には 4 段階のバッテリーレベルを用いたものでは 95%, 10 段階にバッテリーレベルバッテリーレベルを設定したものでは 75%と推定精度が向上した。この理由として、予備経路を追加したことで、推定の際に用いられるパスとリンクの間の相関関係が強まり、不良設定性が弱まったことが考えられる。また、予備経路を追加する際に、最初に追加した予備経路と通信経路上にあるノードのみを通るような経路を追加したことが、パスとリンクの間の相関関係が強まった要因の 1 つである。また、それにより解候補が大きく絞られ、推定精度により影響を与えたと考えられる。

2.2 節で述べたように、無線ネットワークにおいて電力は有限であり、電力推定手法の課題はいかに計測にかかる電力を抑えるかにある。本稿における実験はシンプルなケースであったため、より大きなネットワークにおけるトポロジにおいてどれくらいの予備経路を追加すれば実用に耐えうる精度で推定できるかという問題が残る。さらに、その際にかかる電力とのトレードオフを検討することは今後の課題となる。

予備経路を 2 本用いた場合の推定について、表 5 及び表 6 を見るとわかるように、ノード 1 及びノード D の推定精度が低い。これは推定の際に用いた確率モデルの影響を受けていると考えられる。推定にはネットワークトモグラフィにおいて遅延やパケットロス率を推定する際によく用いられるポアソン分布モデルを用いた。3.5 節で示したように、EM 法はデータが確率モデルに依存すると仮定し、推

定を行う。このことから、電力の推定により適したモデルを用いることで、推定精度をより高くし、予備経路の削減や計測にかかる電力の低減ができるのではないかと考える。アドホックネットワークにおける電力消費モデルに言及した研究としては Maher, H.ら[8]などがある。

以上から、ネットワークトモグラフィを用いたアドホックネットワークにおける電力推定手法の改善案としては2通りのアプローチが考えられる。1つ目に、計測にかかる電力と推定精度のトレードオフを考えた予備経路構築に関するアルゴリズムの検討、2つ目に、電力の推定により適したモデルの使用により、各ノードにおける推定精度の向上の検討である。

6. おわりに

本稿では、ネットワークトモグラフィを用いたアドホックネットワークにおける電力推定に関して、計測方法、計測経路、推定手法に関する3つのアプローチを持って対象経路上の各ノードのバッテリー残量である電力を推定することを提案した。予備経路がひとつの場合は推定精度が低かったが、更なる予備経路の追加によって推定精度は改善することを示した。更なる改善案としては5節に示したように、予備経路構築に関するアルゴリズムの検討や電力の推定に適したモデルの検討が挙げられ、本手法全体の有効性の評価の必要がある。

参考文献

- [1] アンドリュー・S・タネンバウム, “コンピュータネットワーク第五版”, 日経 BP 社, pp. 291-318, 2013.
- [2] 宮本, 渡辺, 池田, “アクティブ計測とパッシブ計測を用いたパケット損失率推定法”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 480, pp. 117-121, 2012.
- [3] Ye, Y., Wandong, C. “Ad Hoc Network Measurement Based on Network Tomography: Theory, Technique, and Application,” Journal of Networks, vol. 5, no. 6, pp.666-674, 2010.
- [4] Vehbi, G. “A Forecasting-Based Monitoring and Tomography Framework for Wireless Sensor Networks,” Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Communications (ICC '06), vol. 9, pp. 4059- 4064, 2006.
- [5] Mohammad, K. “Network tomography application in mobile ad-hoc networks,” Doctoral Dissertation of University of Louisville, 2013.
- [6] ns-3, <https://www.nsnam.org/>.
- [7] 富士通: バッテリー残量を確認する, <http://www.fmworld.net/biz/fmv/support/fmvmanual/0510-0603/7441c/hhard>

ware10.html.

- [8] Maher, H., Ammar, B., Ridha B. “Energy Consumption Model in ad hoc Mobile Network”, CoRR abs/1206.1426, 2012.
- [9] 桑嶋, 中村, 高橋, “ネットワークトモグラフィを用いたアドホックネットワークにおける電力推定手法の提案”, 情報処理学会第78回全国大会講演論文集, Vol.2016, 3_135-3_136, 2016.