

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330122

研究課題名(和文) 災害時蓄積搬送型エネルギー流通方式における制御アルゴリズムの設計

研究課題名(英文) Store-carry-forward method for electric power supply at the time of disaster

研究代表者

巳波 弘佳 (Miwa, Hiroyoshi)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40351738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：電力系統が断絶する大規模災害時、住宅・オフィス・公共施設・マイクログリッドなどにおいて、損傷を免れた発電・蓄電設備と、電気自動車(EV)・プラグインハイブリッド自動車(PHV)のような蓄電機能を持つ移動体による電力および情報の蓄積搬送を組み合わせ、災害直後のエネルギー供給代替手段として配電網とは独立に電力需給マッチングを図る蓄積搬送型エネルギー流通方式の研究を行った。シミュレーションによる性能評価の結果、兵庫県三田市を想定した現実的な状況において、一定の電力供給が可能であることなどを示した。これは、提案方式が災害時のエネルギー供給手段として有効であることを示唆している。

研究成果の概要(英文)： Interruption of the power supply causes serious problems in civic life, life at evacuation sites, and medical institutions; therefore, the rapid restoration of power supply after a disaster is important. To achieve it, we proposed a store-carry-forward electricity supply method such that an electric vehicle (EV) and a plug-in hybrid vehicle (PHV) having a storage facilities deliver electricity from an electric generation plant to the points of demand such as medical institutions. The results of the numerical experiments indicated that it is more efficient to use a greater number of vehicles than to use vehicles with superior performance in terms of the battery capacity, the discharge speed. Furthermore, through numerical experiments using realistic parameters and an actual road network and facility information, it was demonstrated that the store-carry-forward energy distribution method is sufficiently practical.

研究分野：数理工学

キーワード：大規模災害 電力供給 劣通信環境 DTN 配送計画 最適化 アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災で改めて認識され、また内閣府の災害復旧復興施策においても指摘されているように、災害直後の迅速なライフラインの復旧は、安全・安心な社会の実現に向けた最優先課題の一つである。特に電力供給が途切れると、被災地の市民生活や避難所生活に多大な支障が生じ、医療・介護施設においては被災者の病状悪化につながり、業務停滞やサプライチェーン寸断により経済も大きな打撃を受ける。特に医療・介護施設では、短期間の停電でも致命的である一方、非常用電源設備の整備は容易ではない。これまでの災害において、電力は比較的速やかに復旧されているが、それでも東日本大震災時には、電力関連トラブルや自家発電量不足により、約7割の医療施設が診療を限定・中断したという報告もあるため、可能な限り停電期間の短縮が必要である。

震災など大規模広域災害時において電力系統が断絶しても、住宅・オフィス・公共施設・マイクログリッドなど様々な場所に備えられた発電・蓄電設備は損傷を免れている可能性が高い。また、道路網も寸断はあっても全区間が通行不能になることはない。そこで、損傷を免れた発電・蓄電設備と、電気自動車(EV)・プラグインハイブリッド自動車(PHV)のような蓄電機能を有する移動体を組み合わせ、電力の蓄積搬送による電力需給のマッチングを図る方式(図1参照)が、災害直後のエネルギー供給の緊急的代替手段として有効と考えられる。

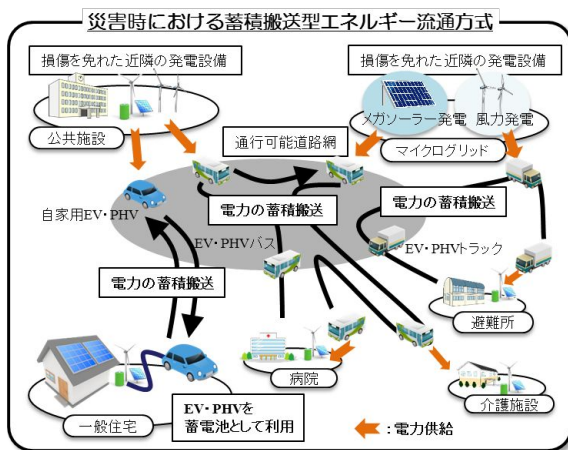


図1. 災害時における蓄積搬送型エネルギー流通方式

この方式の実現のためには、電力需給をマッチングさせるべく、電力を蓄積搬送する移動体の移動経路を適切に決定する必要がある。そのため、通行可能道路網トポロジなどの情報が必要であるが、災害直後は通信困難な劣通信環境下にあるため、通常の通信以外の方法で情報収集しなければならない。申請者らはこれまで、劣通信環境における情報通信技術 DTN (Delay Tolerant Networking) における蓄積搬送型通信方式の研究開発を行ってきた。これは、移動体が情

報を一時的に蓄積し、移動体同士が近づいたときに近距離通信によって情報を転送する方式である。蓄積搬送型エネルギー流通方式においては、エネルギーと情報の両方の蓄積搬送を行うことになる。したがって、蓄積搬送型通信に基づく情報流通によってエネルギー流通のために必要な情報を収集すると同時に、エネルギー流通に対しても有効であるような、電力需給マッチング・移動経路制御アルゴリズムが必要不可欠である。

2. 研究の目的

電力系統が断絶する大規模災害時、住宅・オフィス・公共施設・マイクログリッドなどにおいて、損傷を免れた発電・蓄電設備と、電気自動車(EV)・プラグインハイブリッド自動車(PHV)のような蓄電機能を持つ移動体による電力および情報の蓄積搬送を組み合わせ、災害直後のエネルギー供給代替手段として配電網とは独立に電力需給マッチングを図る蓄積搬送型エネルギー流通方式における効率的な制御技術の確立を目的とし、2つの研究項目を実施した。

- (1) 電力需給マッチング・移動体経路制御アルゴリズムの設計
- (2) 現実的な状況を想定したシミュレーションによる性能評価

3. 研究の方法

本研究では、蓄積搬送型エネルギー流通方式を実現するための制御アルゴリズムの設計と性能評価を行った。具体的には、災害直後は通信困難な、いわゆる劣通信環境下にあるため、通常の通信ネットワーク以外の方法を用いて情報を収集・共有しつつ、それに基づいてエネルギー流通を制御しなければならないという制約も考慮したアルゴリズムを設計する必要がある。そこで本研究では特に以下の2つの項目について研究を行った。

(1) 電力需給マッチング・移動体経路制御アルゴリズムの設計

蓄積搬送型エネルギー流通方式における電力需給マッチング・移動体経路制御アルゴリズムを設計する。蓄積搬送型通信に基づく情報流通によってエネルギー流通のために必要な情報を収集すると同時に、エネルギー流通としても有効であることが必要である。さらに、情報収集が進むにつれて適宜再最適化を行い全体として効率を維持し続けることも考慮する。

(2) 現実的な状況を想定したシミュレーションによる性能評価

現実の市街区を想定した性能評価により、EV・PHV普及率、蓄電性能、自然エネルギー発電普及率、マイクログリッド普及率と、電力不通期間・不足割合の関係性を明らかにすることにより、医療機関・避難所・介護施設など優先順位が高い箇所の電力不通期間の短縮を目指す。

4. 研究成果

(1) まず、効率的な電力供給を行うための車両の移動経路を決定する問題を定式化し、ヒューリスティックアルゴリズムを設計した。前提として、各車両は、力必要施設の位置のみ把握しており、蓄積搬送型通信によって他車の走行予定ルートや稼働している発電施設や電力必要施設、通行不可能箇所についての情報を更新・共有しながら電力供給を行うものとする。

最適化問題の基本的な考え方は、災害直前および直後の道路ネットワーク、各電力必要施設での電力需要量、車両の台数、蓄電池容量や電費（単位距離走行に必要な電力量）等の車両性能を入力とし、供給可能量内で需要を満たすための電力量の需給制約、移動に必要な電力量を抑えるための経路長制約、充放電中は移動できないことによる時間制約を制約条件とし、その上で電力不通期間を最小化する電力配送スケジュール（各車両の経路・充放電スケジュール）を決定するものである。

この蓄積搬送型エネルギー配送計画問題は、通常の配送計画問題を含むため一般にNP困難である。また、そもそも道路ネットワーク全体の情報は災害直後には把握されていないため、入力情報そのものすら一部欠落している状態である。そこで、各車両は平常時の情報に基づいて蓄積搬送型エネルギー配送計画問題をヒューリスティックに解き、蓄積搬送型通信により情報が更新されると、更新された情報に基づいて再度解きなおすことを繰り返すことによってエネルギー配送を行うというアルゴリズムを設計した。アルゴリズムの基本的な考え方としては、ある地点にいる車両が次の移動先として、累計電力供給量が少ない施設を選んで移動し、電力を供給することを繰り返し、蓄電池残量が少なくなると発電施設に移動するというものである。つまり、最も電力が供給されていない施設へ移動していくというグリーディなアルゴリズムである。また、次の目的地を決定する時や経路を計算する時には、その車両が持つ情報のみを用いる。他車両と遭遇した時には各車両の持つ、他車の走行予定ルート・各施設の累計電力供給量・通行不可能箇所情報を共有し、更新する。そして更新した情報をもとに、各車両は新たな移動先を決定し、経路を再計算して電力供給を行っていく。なお、累計電力供給量が最も少ない施設が複数存在する場合は、それらの施設のうちで現在車両が存在する場所から最も近い場所へ移動して電力を供給する。また、移動する予定の場所で既に他の車両が放電中だった場合、その場所を除いて累計電力供給量が最低の場所へ移動する。ただし、発電施設では複数の車両に対して同時に充電可能とする。

(2) まず、アルゴリズムの基本的な性能を評価した。ノード数 50, 100, 150, 200 の双方向部分格子グラフ（図 2 参照）を用いた。

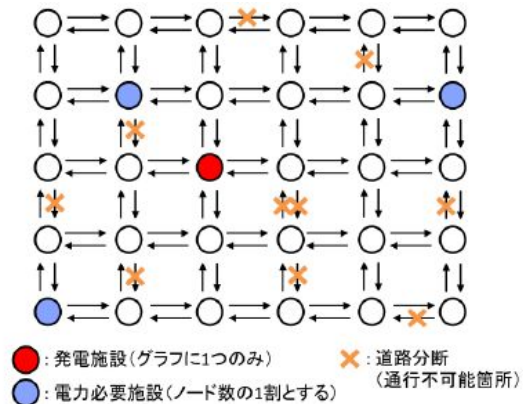


図 2. 道路ネットワークトポロジ

道路ネットワークグラフの各点間の距離は 100m、電力必要施設がノード数の 1 割(それぞれ 5, 10, 15, 20)、発電施設が 1 つのみ含まれるとした。車両については平均時速 30km/h、電費 105Wh/km、蓄電池容量 30kWh、放電時の出力 6kW として実験を行った。また、車両の蓄電池の満充電には 40 分かかるものとして評価実験を行った。

評価実験は入力としてノード数、道路分断率 B(%), 車両の台数 C(台)、一回の放電電力量 D(kWh) を与え、これらのパラメータを変更して行った。道路分断率とは、災害直後に通行不可能な道路が全体のどの程度あるかを示す数値であり、この値にしたがって道路分断箇所がランダムに決定される。各ノード間には双方向にリンク（道路区間）が伸びているが、中央分離帯があるような道路も考えられるため、必ずしも双方向が同時に分断するとは限らないものとする。今回はリンク（道路区間）の分断のみを想定し、ノードの破壊は考慮しないものとする。また、全パターンにおいて 12 時間分のシミュレーションを行った。さらに、各実験において車両台数 C の上限を電力必要施設のおよそ半分程度の数とした。各車両を災害時のみでなく、通常時も公用車として使用することを想定し、相応の台数が存在すると仮定した。

図 3, 図 4, 図 5, 図 6 に、車両台数と一施設に対する平均電力供給量の関係を示す。

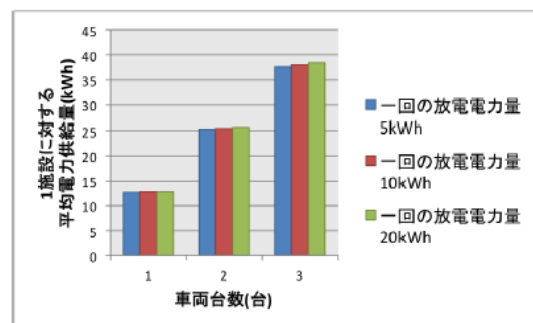


図 3. ノード数 50, 道路分断率 B = 5(%) の時の 1 施設に対する平均電力供給量

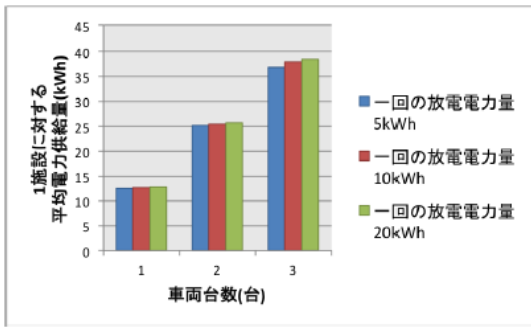


図4 . ノード数 50, 道路分断率 B = 10(%) の時の 1 施設に対する平均電力供給量

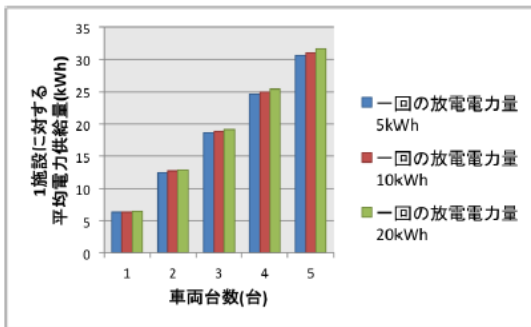


図5 . ノード数 100, 道路分断率 B = 5(%) の時の 1 施設に対する平均電力供給量

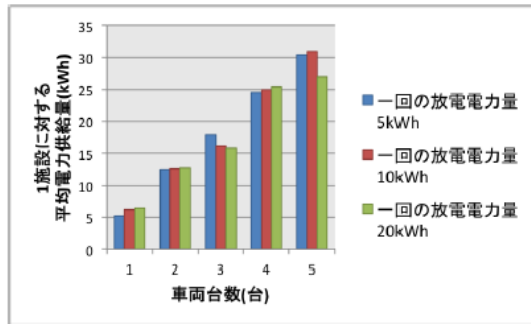


図6 . ノード数 100, 道路分断率 B = 10(%) の時の 1 施設に対する平均電力供給量

上記の結果は、ノード数と道路分断率を固定して、車両台数と一回の放電電力量を変更した時の結果を示したものである。

各図からわかるように、一回の放電電力量を増加させることで平均電力供給量も増加する傾向があるが、その増加量はごくわずかなものである。つまり、一回の放電電力量の値の大小は、平均電力供給量に対してあまり影響を与えないと言える。

一方、各図から、車両台数が増加するとそれにしたがって平均電力供給量が線形に増加していくことがわかる。また、電力必要施設のおよそ 25%程度車両台数で電力供給を行うと、15kWh 近くの電力を各施設に供給できるということがわかった。これは日本の一般家庭における一日の消費電力量とほぼ等しい。

図7は車両台数を1台、一回の放電電力量 D を 5(kWh) で固定して、グラフのノード数と道路分断率を変更した時の結果を示したものである。図より、ノード数に関わらず、道路分断率が大きくなるほど平均電力供給量は小さくなるということがわかる。これは道路分断箇所が増えたので迂回せざるを得ない状況が増えたことと、道路分断によって孤立するノードが出現してしまい、車両が電力供給を続行出来ないという状況が発生していることが理由であると考えられる。

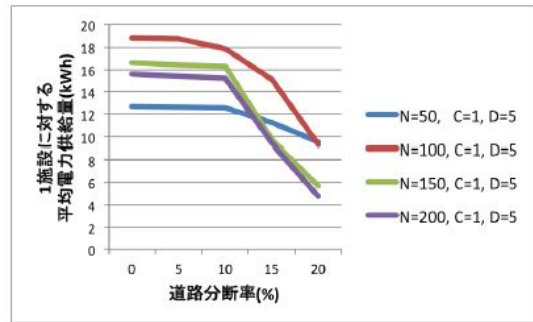


図7 . 道路分断率と 1 施設に対する平均電力供給量の関係

(3)次に、三田市ニュータウン近辺の10km四方の実道路ネットワークトポロジを用いてシミュレーションを行った。この実道路トポロジは発電施設を1ヶ所、病院を7ヶ所、介護施設を4ヶ所、避難所37ヶ所を含む。蓄電池容量 L と放電出力 U は、それぞれ 30kWh, 9kW を用いた。また、三田市では公用車が 40 台使えると想定した。通信に関しては、100m 以内に他車両が存在すればすれ違い、情報の伝達を行うものとした。車両の速さについては制限速度を用い、一回の放電電力量は 5, 10, 15, 30kWh とした。

まず、電力を供給する施設を避難所と介護施設のみとして、避難所と介護施設に対して電力供給を行った時、非孤立施設のみを対象とした平均電力供給量の変化を調べた(図8)。

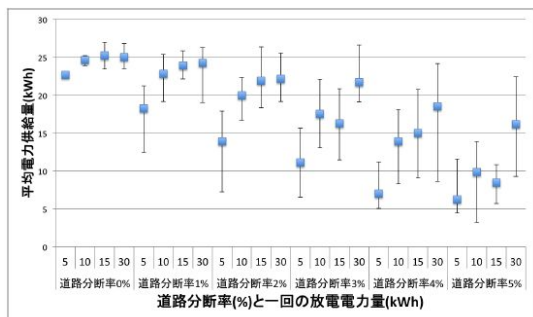


図8 . 避難所と介護施設に対して電力供給を行った時の非孤立施設のみを対象とした平均電力供給量の変化

図8より、道路分断率が4%の時でも各施設に十分な電力量を供給できることがわかる。

次に、電力を供給する施設を病院のみとし、病院が必要とする約200kWhを供給するには電気自動車の性能がどの程度必要なのか調べた(図9)。道路分断率を0%,車両台数を病院の数と等しく7台とし、蓄電池容量と放電出力を入力パラメータとしてシミュレーションを行った。なお、蓄電池容量が1000kWhというのは、シミュレーション終了時まで放電し続けた場合を想定している。

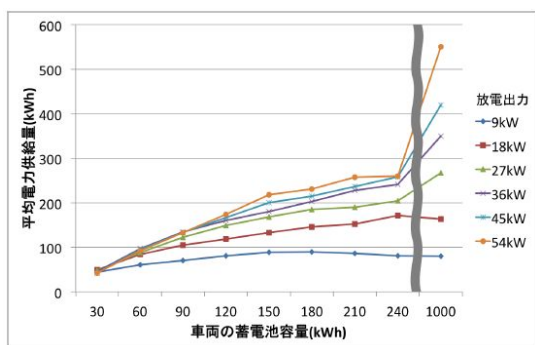


図9. 道路分断率 B = 0(%) の時の各病院に対する平均電力供給量(kWh)

図9の結果から、各病院に200kWhを供給するには、放電出力と蓄電池容量はそれぞれ少なくとも27kWと240kWh以上、もしくは54kWと140kWh以上必要であることが分かる。しかし、現在の電事法では出力10kW未満という制約がある。もし、各病院において複数台の車両が同時に放電でき、十分な数の車両を使えらるとするならば、実現可能性は高まる。例えば、現状の性能でも、一つの病院において4台同時に放電できるならば、28台の車両を用いれば、すべての病院に対して十分な量の電力を供給可能である。

(4)本研究における主な結論をまとめると、以下の通りである。

- ・劣通信環境を前提とした、電力需給マッチング・移動体経路制御アルゴリズムを設計した。特に、Epidemic Routing法を利用することにより、車両同士が近距離に近づいた時に保持している情報を共有し、電力配送計画のための移動経路の再計算を随時行う方法を設計した。

- ・様々な条件におけるシミュレーションにより、蓄積搬送型エネルギー流通方式の性能を評価した。主な知見を下記に挙げる。

- 一回の放電電力量の増加は、平均電力供給量の増加にはほとんど影響を与えないが、車両台数の増加は大きく影響する。

- 兵庫県三田市のニュータウン近辺の実道路網トポロジを用いてシミュレーションを行った結果、道路分断率が4%程度までなら避難所と介護施設に、一日に必要な電力量を十分に供給できることが分かった。さらに、電力消費量が大きい病院に対しては、現状の電気自動車の性能では一日に必要な電力を

十分に供給することはできないが、放電出力と蓄電池容量がそれぞれ27kWと240kWh以上、もしくは54kWと140kWh以上有する車両が病院の数と同数あれば、各病院に対して十分に電力を供給出来ることが分かった。さらに、三田市ニュータウン近辺においては、現状の電気自動車の性能でも、一つの病院において4台同時に放電できるならば、28台の車両を用いれば各病院に対して十分に電力を供給できることが分かった。

以上から、蓄積搬送型エネルギー流通方式が十分実用的なものであることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計13件)

1. 大槻駿介, 巴波弘佳, “車車間通信によるトラフィックオフロードにおけるリアルタイムV2Xコンテンツ配送法,” 信学技報, NS2016-164, Vol. 116, No. 484, pp. 41-46, 2017. (査読無)

<http://www.ieice.org/ken/paper/201703028bRx/>

2. 古川亘, 巴波弘佳, “災害時における被災状況マップ作成のための情報収集ノード制御法,” 信学技報, IN2016-153, Vol. 116, No. 485, pp. 335-340, 2017. (査読無)

<http://www.ieice.org/ken/paper/20170303ZbrF/>

3. 疋田和禎, 巴波弘佳, “地図情報と混雑情報を併用したコンパスルーティングとデジタルサイネージに基づく避難誘導方式,” 信学技報, IN2016-171, Vol. 116, No. 485, pp. 443-448, 2017. (査読無)

<http://www.ieice.org/ken/paper/20170303mbRH/>

4. Akihiko Fujihara, “Estimating Proper Communication Distance for Epidemic Routing in Japanese urban Areas Using SNS-Based People Flow Data,” Proc. INCoS2016, Ostrava, Czech, Sep.7-9, 2016. (査読有)

DOI: 10.1109/INCoS.2016.22

5. Tsuyoshi Yamasaki, Makoto Anan, Hiroyoshi Miwa, “Network Design Method Based on Link Protection Taking Account of the Connectivity and Distance Between Sites,” Proc. INCoS2016, pp. 445-450, Ostrava, Czech, Sep.7-9, 2016. (査読有)

DOI: 10.1109/INCoS.2016.74

6. Daishi Irie, Hiroyoshi Miwa, “Network Design Method by Finding Server Placement and Protected Links to Keep Connectivity to Servers Against Link Failures,” Proc.

INCoS2016, pp. 439-444, Ostrava, Czech, Sep.7-9, 2016. (査読有)
DOI: 10.1109/INCoS.2016.73

7. 巳波弘佳, 山村太樹, “災害時における蓄積搬送型エネルギー流通方式,” 信学技報, Vol. 116, No. 97, IN2016-22, pp. 75-80, 2016. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20160617CbJH/>

8. 山村太樹, 巳波弘佳, “劣通信環境を考慮した蓄積搬送型エネルギー流通方式の性能評価,” 信学技報, IN2015-112, Vol. 115, No. 484, pp. 25-30, 2016. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20160303ubgu/>

9. Syunsuke Otsuki, Hiroyoshi Miwa, “Contents Delivery Method Using Route Prediction in Traffic Offloading by V2X,” Proc. INCoS2015, pp. 239-245, Taipei, Taiwan, Sep.2-4, 2015. (査読有)
DOI: 10.1109/INCoS.2015.34

10. 山村太樹, 巳波弘佳, “蓄積搬送型エネルギー流通方式における劣通信環境を考慮した中継経路制御法,” 信学技報, IN2014-169, Vol.114, No.478, pp.283-288, 2015. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20140306OBkx/>

11. 大槻駿介, 巳波弘佳, “車車間通信によるトラフィックオフロードにおける経路予測情報を用いたコンテンツ配送法,” 信学技報, NS2014-254, Vol.114, No.477, pp.451-456, 2015. (査読無)
<http://www.ieice.org/ken/paper/20150303mBxq/>

12. Taishi Yamamura, Hiroyoshi Miwa, “Store-Carry-Forward Energy Distribution Method and Routing Control Method for Use in a Disaster,” Proc. INCoS2014, pp. 289-295, Salerno, Italy, Sep. 10-12, 2014. (査読有)
DOI: 10.1109/INCoS.2014.81

13. Masato Uchida, “Statistical Characteristics of Serious Network Failures in Japan,” Reliability Engineering & System Safety, Vol.131, pp.126-134,2014. (査読有)
DOI: 10.1016/j.ress.2014.07.001

〔学会発表〕(計1件)

1. 内田真人, “電気通信サービスの事故発生状況に関する統計分析,” 2014年電子情報

通信学会ソサイエティ大会, 2014/9/23~9/26, 徳島大学(徳島県徳島市), 電子情報通信学会.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巳波弘佳 (HIROYOSHI MIWA)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 40351738

(2) 研究分担者

藤原明広 (AKIHIRO FUJIHARA)
福井工業大学・経営情報学科・准教授
研究者番号: 70448687

内田真人 (MASATO UCHIDA)
千葉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20419617