

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築  
のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」  
研究課題「ネットワーク構造をもつ  
大規模システムのディペンダブル制御」

## 研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成27年3月

研究代表者:藤崎泰正  
(大阪大学大学院情報科学研究科、教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究課題では、再生可能エネルギーの大量導入に対応した安定性の高い電力システムの実現を目指し、ディペンダブル制御の基礎理論構築を行った。電力システムは電力網と情報網から構成される多層的なネットワークであるため、局所的な変動や故障が各層間の相互干渉などにより拡大し、広範囲においてトラブルを引き起こす可能性がある。本研究では、このような変動や故障に対処可能な、ネットワーク系におけるディペンダビリティの解析と設計の基礎理論を構築することを目指し、数理学におけるシステム制御理論を専門とする藤崎グループと情報科学におけるディペンダブル技術を研究してきた土屋グループが共同で、本研究課題に取り組んだ。具体的には

- ネットワーク系の外部変動に対するディペンダビリティの解析と設計(藤崎グループ)
- ネットワーク系の内部変動に対するディペンダビリティの解析と設計(藤崎グループ)
- SCADA ネットワークにおけるディペンダビリティの実現(土屋グループ)
- 電力ネットワークおよび SCADA ネットワークにおける故障のモデル化と解析(土屋グループ)について、研究を行った。

藤崎グループでは、ネットワーク系の外部変動に対するディペンダビリティについて、気象条件に起因する外乱が電力網に加わる場合に対処可能なロバスト発電計画の定式化を行うとともに、この問題を現実的な時間で解くためのランダムイズドアルゴリズムを提案し、数値例による検証を行った。また、通信雑音に起因する外乱が情報網に加わる場合を対象に、基本的な合意プロトコルの耐雑音性の解析法を確立した。一方、内部変動に対しては、電力網と情報網のネットワーク構造をグラフラプラシアンを用いて表現することにより、最適性やロバスト性をもたせることが容易なネットワーク構造の特徴付けを与えた。また、電力網・情報網の内部変動に頑健な分散ミニマックス最適化をおこなう新しいプロトコルを提案した。さらに、内部変動と外部変動の関係を明らかにするために、ネットワーク系の故障を切換系として定式化し、故障時の外乱に対するシステムの振る舞いの解析を行った。

土屋グループでは、監視制御用の情報網である SCADA 網におけるディペンダビリティの実現手段として、SCADA 網の通信容量の制約下で如何に情報収集を効率化し、監視性能を高めるかという点について研究を行った。また、分散電源の大量導入の下で配電システムの安定化に必要な SCADA 網の通信容量について試算を示した。さらに、配電システムを想定しその特性を反映した上で、電力網と SCADA 網との間での相互作用を考慮した障害伝搬モデルの提案を行い、このモデルにおいて、両ネットワークの相似度が高い程、システムのディペンダビリティが高まることを示した。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 相互依存するネットワークのディペンダビリティ (§ 4(1)3, 9)

概要: 2層からなる相互依存するネットワーク系におけるディペンダビリティの実現を目的に、ロバスト性をもたせることが容易なネットワーク構造、故障から生じる障害の影響の少ないネットワーク構造について解析し、特徴付けを与えた。一般に、物理層のネットワークと情報層のネットワークが類似であれば、ロバスト性や耐故障性が高いと予想されるが、本研究ではこの類似性を数理的に定式化し、望ましいネットワーク構造を明確にした。

#### 2. 大規模ネットワークシステムのための分散協調ミニマックス最適化 (§ 4(1)6)

概要: 電力網・情報網の内部変動に頑健な分散ミニマックス最適化問題の定式化を行った。そして、この最適化問題を解くことができる新しいプロトコルを提案した。さらに、このプロトコルの可能性について検討し、通信遅延がある場合への対処法や、冗長な情報通信を不要とする洗練されたプロトコルの構成などを明らかにした。

### 3. 雑音のもとでの平均コンセンサス(§4(1)4、7)

概要：通信雑音に起因する外乱が情報網に加わる場合を想定し、近傍エージェントとの通信を繰り返すことで全エージェントの状態を一致させる合意プロトコルを対象に、耐雑音性を解析した。ここでは、事前に得られる情報のみから合意の達成度を評価する手法を確立するとともに、指定された合意の達成度を実現するために必要な合意プロトコルの反復回数を明らかにした。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

#### 1. 分散電源大量導入時における配電系統の情報ネットワークに必要な通信容量の推定 (§4(1)5)

概要：分散電源が大量導入される近未来の配電系統を想定し、そのような配電系統において収集が必要となるデータを選定し、収集の周期と配電系統の規模から、監視制御ネットワーク(SCADA ネットワーク)において必要となる伝送帯域の見積もりを与え、現在主流のメタル線に代わる通信媒体として、光ファイバーよりも、920Hz 帯無線が適切であることを定量的に示した。

#### 2. 配電 SCADA ネットワークにおける通信容量制約下でのセンシング情報収集の最適化 (§4(1)2)

概要：配電系統における電圧監視について、現状の制御ネットワークの下で監視能力を最適化する手法を提案した。提案法では、SVR や柱上変圧器のタップ比の変化点等の定格電圧からの逸脱の危険がある点を情報収集箇所として、通信帯域の制約下でできるだけ多く選ぶ。配電系統の亘長といった基本情報からどの箇所を選ぶかを決定するルールを与え、系統の特性の変化に対し適応的に情報収集箇所を変化させる機構を開発し、シミュレータに実装することで現実運用可能であることを示した。

#### 3. 気象条件に依存する再生可能エネルギーを含む電力ネットワークの最適運用 (§4(1)8、10)

概要：太陽光発電や風力発電など、気象条件に依存して発電量が大幅に変動する場合にも、各母線での電力制約と電圧制約を違反せず、かつ調整可能な発電所の発電コストをなるべく小さく押さえるような、ロバスト最適な発電計画を求める問題を検討した。この問題に対して確率的解法を構築し、電力系の標準モデルで適切な解が求まることを示した。さらに、提案した確率的解法を大規模な系統モデルに適用して有効性を検討した。

## §2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 藤崎グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
藤崎 泰正	大阪大学大学院 情報科学研究科	教授	H24.10～H27.3
浅井 徹	大阪大学大学院 工学研究科	准教授	H24.10～H27.3
増淵 泉	神戸大学大学院 システム情報学研究科	准教授	H24.10～H27.3
和田 孝之	大阪大学大学院 情報科学研究科	助教	H24.10～H27.3
森田 亮介	同上	特任研究員	H25.4～H26.3
森田 亮介	青山学院大学 理工学部	助教	H26.4～H27.3
Nguyen Thi Hoai Linh	大阪大学大学院 情報科学研究科	特任研究員	H26.4～H27.3
勝浦 大貴	同上	M1～2	H24.10～H26.3
柳澤 啓太	同上	M1	H26.4～H27.3
大岸 寛之	神戸大学大学院 システム情報学研究科	M1	H26.4～H27.3
塚本 潤	神戸大学 工学部	B4	H25.4～H26.3
盛脇 裕介	大阪大学 工学部	B4	H25.4～H26.3

##### 研究項目

- ・ネットワーク構造をもつ大規模システムのディペンダブル制御(藤崎グループ)
  - ネットワーク系の外部変動に対するディペンダビリティの解析と設計
  - ネットワーク系の内部変動に対するディペンダビリティの解析と設計

#### ② 土屋グループ

##### 研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
土屋 達弘	大阪大学大学院 情報科学研究科	教授	H24.10～H27.3
中川 博之	同上	准教授	H26.4～H27.3
小島 英春	同上	助教	H24.10～H27.3
松井 佑記	同上	M2	H25.4～H26.3

##### 研究項目

- ・送配電システムにおける情報ネットワークのディペンダビリティの実現(土屋グループ)
  - SCADA ネットワークにおけるディペンダビリティの実現
  - 電力ネットワークおよび SCADA ネットワークにおける故障のモデル化と解析

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1. Roberto Tempo 博士研究グループ (CNR電子情報通信研究所)、Paolo Bolzern 教授研究グループ (ミラノ工科大学) : エネルギー管理システムのための協調制御に関する研究交流を行った。
2. Li Chen-Fu 教授 (国立台湾大学)、John Koo 教授 (香港大学) : 「Mini-Workshop on Dependable Energy Management」においてディペンダブルEMSについて研究交換を行った。
3. 寺田博文氏 (日立製作所) : 配電システムにおける監視制御のICT化について、共同で研究、および、論文発表を行った。

### § 3 研究実施内容及び成果

3.1 ネットワーク構造をもつ大規模システムのディペンダブル制御 (大阪大学 藤崎グループ)

藤崎グループでは、ネットワーク系の外部変動に対するディペンダビリティについて、気象条件に依存する再生可能エネルギーを含む電力ネットワークの最適運用と、雑音のもとでの平均コンセンサスに関する理論構築を行った。一方、内部変動に対しては、相互依存するネットワーク系における制御の容易さの特徴付けを明らかにするとともに、大規模ネットワークシステムのための分散協調ミニマックス最適化の手法を確立した。さらに、内部変動と外部変動の関係を明らかにするために、切替時  $L_2$  ゲインを用いた合意ネットワークのエッジ切替脆弱性解析の方法を与えた。

(1) 気象条件に依存する再生可能エネルギーを含む電力ネットワークの最適運用

気象条件に依存する再生可能エネルギー由来の電力を電力システムに大量導入するシナリオを考える。現在の技術では電池により電気を大量に蓄えることはできないため、周波数などの品質を保証して電力を提供し続けるためには、電力の発電量と消費量を常にバランスさせる必要がある。例えば、新電力に対しては、30分同時同量が要求される。しかし、風力発電などの再生可能エネルギーは電力の需要量と関係なく、気象条件に依存して発電量が風況に依存して変化するため発電量と消費量のバランスを取ることが困難である。そこで、一部の発電機の発電量が気象条件に起因する外部要因を原因として、一定範囲内で変動するなかで、電力の品質を指定された精度で保証するためのディペンダブルな発電計画について考えた。

解くべき問題として、以下のような目的関数、制約条件をもつ問題を定式化した。

目的関数: 発電コスト 変数  $P_G, Q_G, V_i$

$$\min \sum_{i=1}^{n_G} f_i(P_G) = \min \sum_{i=1}^{n_G} (a_i P_G^2 + b_i P_G + c_i)$$

制約条件 1: 各母線での電力方程式

$$\dot{V}_i \sum_{j=1}^n (Y_{ij} \dot{V}_j)^* + (P_{D_i} + jQ_{D_i}) - (P_{G_i} + jQ_{G_i}) - (P_{W_i} + jQ_{W_i}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_G$$

$$\dot{V}_i \sum_{j=1}^n ((Y_{ij} \dot{V}_j)^* + (P_{D_i} + jQ_{D_i}) - (P_{W_i} + jQ_{W_i})) = 0 \quad i = n_G + 1, n_G + 2, \dots, n \quad \forall (P_{W_i}, Q_{W_i}) \in \Delta$$

制約条件 2: 電力・電圧に関する制約条件

$$\text{発電所 } i \text{ の有効電力制約} \quad \underline{P}_{G_i} \leq P_{G_i} \leq \bar{P}_{G_i}$$

$$\text{発電所 } i \text{ の無効電力制約} \quad \underline{Q}_{G_i} \leq Q_{G_i} \leq \bar{Q}_{G_i} \quad i = 1, 2, \dots, n_G$$

$$\text{母線 } i \text{ の電圧制約} \quad \underline{V}_i \leq |\dot{V}_i| \leq \bar{V}_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ただし、 $P_{G_i}, Q_{G_i}$  は各調整可能な発電機で供給する有効電力と、無効電力を表してい

る。一方、 $V_i$ は各母線での複素電圧、 $P_{d_i}$ 、 $Q_{d_i}$ は母線  $i$  で需要家によって消費される有効電力、無効電力を意味する。また、 $P_{w_i}$ 、 $Q_{w_i}$ は供給家が制御できない発電所の発電量であり、 $Y_{ij}$ は送電線のアドミタンスである。

この問題は、供給家が制御できない発電量が想定内のどのような値を取ったとしても、電力・電圧に関する制約条件を満足する発電計画をたてる問題である。ただし、 $Q_{d_i}$ と  $V_i$ は風力発電量によって変化してもよい。再生可能エネルギーを大量導入したこと起因する電力系の電圧、周波数の変動を低減化する研究は他にもあるが、多くは直流法を用いる場合であり、本研究ではそれを交流のまま取り扱っていることが特徴の一つである。そのため、数分周期で経済負荷分散制御(EDC)を行う問題へも応用可能である。

しかし、定式化した問題は、1) 求めなければならない変数が不確かな再生可能エネルギー由来の発電量に依存する関数であること、2) 求めなければならない変数について非凸な条件となっていること、3) 制約条件が未知である再生可能エネルギーに由来する条件となっているため、想定される全ての発電パターンについて制約条件を満足する解を求めなければならないこと、という3つの意味で現実的な時間で解を得ることが非常に困難な問題である。そこで、確率的な手法と潮流計算を組み合わせる確率的な意味での最適解をえるアルゴリズムを提案した。具

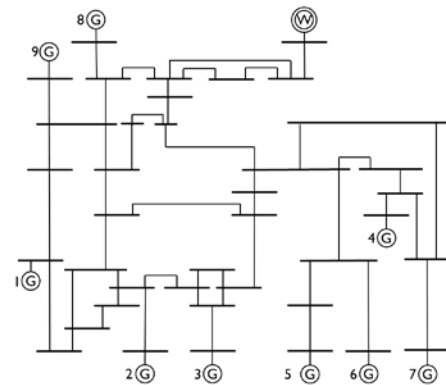


図 1 New England 39 母線モデル

体的には、この発電計画において求めなければならない各バスでの有効電力、無効電力、電圧の絶対値、電圧の位相の中から2つの変数を乱数により生成し、残った 2 つの変数は電力方程式を解くことにより求める。求めた後、電力・電圧の制約条件をチェックし、もし制約条件を違反していれば再度、乱数により2つの変数を生成し、残りの変数を電力方程式から得る、ということを繰り返す。ただし、発電シナリオについて、再生可能エネルギーに由来する不確かな発電量についてすべてのパターンで制約を満足することもチェックしなければならない。無限個の条件をチェックしなければならないため、これもまた現実的には不可能であり、乱数を用いて一定パターンの再生可能エネルギーの発電パターンを生成し、生成された再生可能エネルギーの発電シナリオすべてについて、制約条件を満足する発電シナリオとなっているかをチェックする。この研究で明らかにしたことは、いったい何回乱数を生成すれば、どれほど最適解に近い値が求まるかという問題に解を与えたことである。また、生成しなければならないサンプルの個数はパラメータの逆数についての多項式であり、各ステップの計算を効率的に行うことができれば、現実的な時間で解を得ることが可能であることも分かった。提案した手法の有効性を検証するため、標準的な電力システムモデルである New England 39 母線モデルを対象に提案したアルゴリズムを適用した。このモデルにある 10 の発電機のうち 1 つを再生可能得エネルギー由来の不確かな発電量を出力する発電機とみなして、アルゴリズムを用いて発電計画を行った。その結果、全ての発電機が制御可能な場合の最適値が 62,000[\$/h]程度であるのに対し、表 1 の計算結果他が示すように、再生可能エネルギー由来の発電量の不確定さが定格の 20%程度までの変動ならば、発電コストが安くなるという結果が得られた。ただし、導入した不確かな発電量を出力する発電機は発電コストがかからないとして考えている。結果として、以上の内容を § 4(1)原著論文発表の 8、10 において発表を行っている。

表 1 各変動範囲に対するロバスト最適潮流計算の計算結果

変動範囲[%]	なし	0.9	0.8
発電コスト[\$/h]	54,627.9v	58,327.1	58,531.9

(2) 雑音のもとでの平均コンセンサス

平均コンセンサス問題は、マルチエージェントシステムにおいて、最も基本的な問題の一つであり、ネットワークを構成する各エージェントが互いに通信し、状態変数の更新を繰り返して、ネットワーク全体の平均値に合意(=コンセンサス)する問題である。電力ネットワークなど、マルチエージェントシステムでモデル化できる現実のシステムでは、通信雑音は避けられない問題であり、その状況下において、合意がどの程度達成されるかについて解を与えることは、重要である。本研究では、図 2 のようにエージェント間の通信に雑音が含まれる場合についての収束性

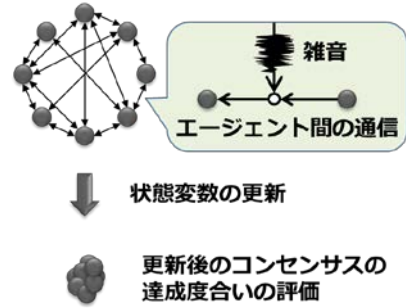


図 2 雑音のもとでのコンセンサス

解析を行ない、所望の合意の達成度の実現するために必要な状態変数の更新回数を陽に示した。以下に詳細を述べる。

通信雑音がある場合、その影響により通常はコンセンサスを達成することは難しい。本研究では、エージェント間の通信量を時間経過とともに減少させる、すなわち、エージェント同士が状態変数の情報を交換する際に乗じる通信ゲインと呼ばれる係数を減少関数に設定し、雑音の影響を次第に減少させる方法を用いて解析を行った。この方法は確率近似法における方法を援用したものである。本研究では、ネットワークが無向連結グラフの構造を持つとき、そのグラフラプラシアン<sup>2</sup>の二番目に小さな固有値を用いて、状態変数の更新回数と、合意の達成度の関係を陽な形式で明らかにした。このことにより、所望の合意の達成度を実現するために必要な更新回数を見積もることが可能となった。

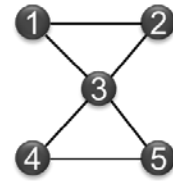


図 3 無向グラフ構造

さらに、無限回の状態変数の更新を考えることで、通信に雑音が含まれていても、ネットワークのすべてのエージェントの状態変数が、初期値の平均に確率収束することを示した。また、更新回数とそのときにおける合意値、すなわち、エージェントがコンセンサスする方向について、確率的性質を明らかにした。通信に雑音が含まれていても、期待値を考えると、各エージェントは初期値の平均に向かってコンセンサスし、分散は状態変数の更新回数によらず、システムのネットワーク構造のみに依存する上界で押さえられることを示した。

本研究の成果において、合意の達成度は、合意値からの各エージェントの距離の和  $\|\delta\|_2$  で表される。つまり、この値が小さいほど、より合意に近いことを意味する。例えば、図 3 に示すネットワーク構造において、k 回目の更新における通信ゲインを  $1/(5+k)$  とする。状態変数の初期値がエージェントの番号順に 6、7、5、3、4 であるとき、 $\|\delta\|_2 = 0.8162$  を確率 0.8 以上で達成するためには、エージェントの状態変数の更新を 397 回繰り返せばよいことが本研究で得られた定理よりわかる。また、得られた定理によれば、397 回更新後における合意値  $\mu$  の期待値は初期値の平均 5 に等しく、分散は 1.645 以下であることが示される。この条件の下で、異なる通信雑音を用いて 10000 回数値シミュレーションを行った結果、397 回目の更新後において、合意の達成度の最悪値は 0.4714、合意値の平均は 4.999、合意値の分散は 0.1745 であった。このことより、得られた定理が合理的な解であったことが確認できる。また、図 4 は、行

った 10000 回のシミュレーションのうちの 1 回のエージェントの振る舞いを示しており、上段は合意値との距離  $\delta$  の変化、下段は合意値  $\mu$  の変化を表している。このグラフより、通信雑音を含んでいても、コンセンサスが達成されていく様子がわかる。

これらの結果により、雑音のもとでの平均コンセンサス問題について、システムの過渡的な振る舞いが明らかとなった。

システムが有向強連結グラフで表されるとき、そのグラフに対応する無向グラフを考えることで、無向グラフの場合と同様に、合意の達成度および合意値と、状態変数の更新回数との関係を明らかにした。この結果、無向グラフの場合に比べて、合意の達成により多くの更新が必要であることが明らかとなった。

本研究では、通信雑音を含んだ平均コンセンサス問題について、通信ゲインを減少関数ではなく、更新回数によらず定数とする代わりに、エージェントの状態変数の時間平均を考えることで、雑音の影響を打ち消す方法を用いた場合の解析も行なった。この方法は確率近似法において、解への収束を加速する方法に基づいており、減少関数を用いる場合に比べて、通信ゲインの選択の自由度が少ないという利点がある。この時間平均でのコンセンサスに関しても、ネットワーク構造が無向連結グラフ、有向強連結グラフで表される場合の両方において、合意の達成度と、状態変数の更新回数との関係を陽な形式で明らかにした。この場合は、通信ゲインとして減少関数を用いた場合と異なり、グラフラプラシアンに小さな固有値に加え、最大特異値を用いた形式で表される。また、合意値に関しては、その期待値はエージェントの初期値の平均と等しくなるが、分散が状態変数の更新回数に依存した値を上界にもつという点で異なった結果となった。

図 3 に示すシステムにおいて、定数の通信ゲインを用いて、時間平均の意味でのコンセンサスの例を示す。各エージェントの初期状態は番号順に 6、7、5、3、4 とし、通信ゲインを 1 とする。このとき、時間平均のもとでの合意の達成度を確率 0.8 以上で達成するためには、本研究の成果により、エージェントの状態変数の更新を 401 回繰り返せばよいことがわかる。また、401 回更新後における合意値の時間平均の期待値は初期値の平均 5 に等しく、分散は 5.327 以下であることが示される。減少ゲインを用いた場合と同様に、異なる通信雑音を用いて 10000 回数値シミュレーションを行った結果、401 回目の更新後において、合意の達成度の最悪値は 0.5298、合意値の平均は 4.990、合意値の分散は 5.282 であった。このことより、得られた定理が合理的な解であったことが確認できる。図 5 の上段は、10000 回のシミュレーションのうちの 1 回の合意値との距離  $\delta$  の変化、下段は合意値  $\mu$  の変化である。通信ゲインとして減少関数を用いた場合とは異なるが、時間平均を考えることで、確かにコンセンサスが行なわれていく様子が分かる。

これらの結果により、雑音のもとでの平均コンセンサス問題について、システムの過

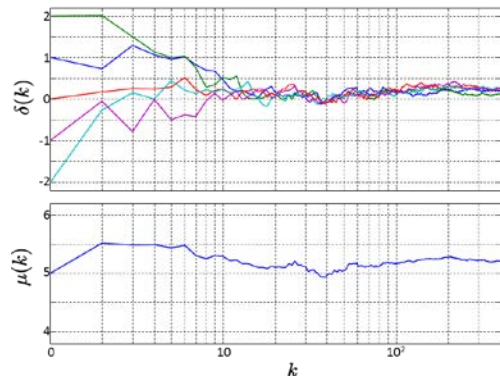


図 4 減少ゲインを用いた場合の合意の達成度と合意値の振る舞い

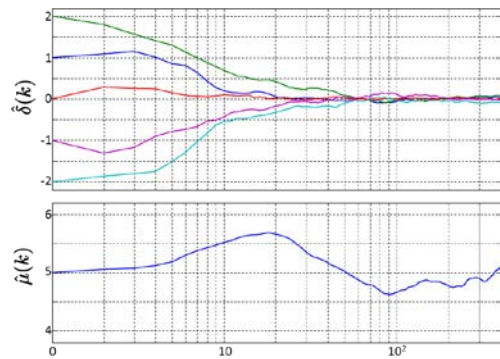


図 5 定数ゲインを用いた場合の、時間平均での同意の達成度と合意値の振る舞い



渡的な振る舞いが明らかとなった。また、ネットワーク構造が変化する場合についても解析を行なった。その結果、合意の達成度、合意値と、状態変数の更新回数との関係が、ネットワークの連結性が崩れない限りにおいて、考え得るネットワーク構造のそれぞれグラフラプラシアン<sup>2</sup>の2番目に小さな固有値の中で最も小さな値および、最大特異値の中で最も大きな値で特徴付けられることを導いた。

以上の内容を § 4(1)原著論文発表の 4、7 において発表を行っている。

### (3) 相互依存するネットワーク系における制御の容易さの特徴付け

マルチエージェントシステムの協調制御の代表的なものとして、エージェントの状態の全てを同一の値に収束させる合意制御問題があり、LMI を用いた合意制御や最適合意制御などの研究がなされている。ただし、これら研究では、分散制御則の情報交換のみのネットワークを考えており、物理層と情報層とからなる電力システムなどのように、多層のネットワークをもつものは対象に含まれない。そのため、対象エージェント間の相互干渉のグラフ構造と分散制御則の情報交換のグラフ構造がどのような関係にあれば制御が容易かといった基本問題についてさえ、十分な解答は得られていなかった。

本研究は、制御対象と制御則が異なるネットワーク構造をもつマルチエージェントシステムの合意問題を対象に、対象エージェント間の相互干渉のグラフ構造と分散制御則の情報交換のグラフ構造がどのような関係にあれば制御が容易かを明らかにするものである。ここでは、最適レギュレータの逆問題に着目し、合意制御則のクラスの中に適当な二次形式評価関数を最小化するものが存在するための条件を考察し、制御の容易なグラフ構造を完全に特徴付ける。なお、制御系が最適レギュレータを構成すればシステム内部の変動に対するロバスト性をもつことが知られている。この意味で、逆最適性を用いて制御の容易さを特徴付けることはネットワーク系の内部変動に対するディペンダビリティ解析の基礎となるものである。

対象としているのは  $N$  個の一次系のエージェントが相互接続しているシステムである。各エージェントへの入力としては、外乱入力と操作入力の 2 種類を考える。この外乱入力を通して、近傍エージェントの状態と自分の状態の差を大きくする(合意を妨げる)ような相互干渉が存在するとする。相互干渉の大きさを表すゲインを  $f$  とする。一方、操作入力に対しては、近傍エージェントの状態と自分の状態の差を小さくする(合意する)分散制御則を施す。制御ゲインを  $k$  とする。相互干渉を定める近傍と分散制御則を定める近傍は、必ずしも同一でないとする。各近傍はグラフ構造を定めるから、これは、対象エージェント間の相互干渉のグラフ構造と分散制御則の情報交換のグラフ構造が異なることを許している。なお、どちらのグラフ構造についても無方向グラフを仮定し、エージェント  $i$  の近傍にエージェント  $j$  が含まれるとき、エージェント  $j$  の近傍にエージェント  $i$  が含まれるとする。

本研究では、まず、平均合意(各エージェントの状態の平均値への合意)が達成される必要十分条件を、制御ゲイン  $k$  と干渉の大きさ  $f$  の関係として与えている。そして、状態の平均値と操作入力に関する 2 次形式評価関数を導入し、制御ゲイン  $k$  による分散制御則が、ある評価関数を最小化するための(最適レギュレータとなるための)十分条件を明らかにしている。さらに、対象エージェント間の相互干渉のグラフラプラシアンと分散制御則の情報交換のグラフラプラシアンが可換であるとき、この最適性の十分条件が、合意のための必要十分条件で  $k$  を  $k/2$  に置き換えたものに対応している

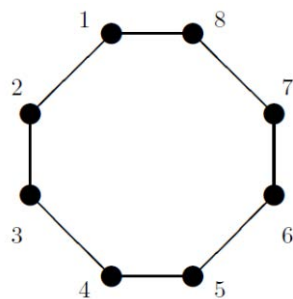


図 6 制御対象

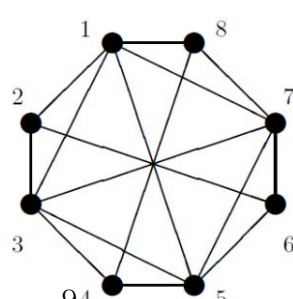


図 7 可換でない例

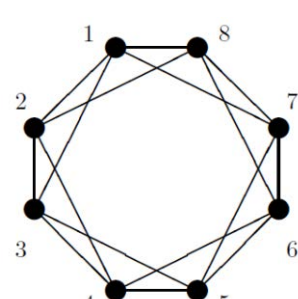


図 8 可換な例

ことを明らかにしている。

一般に、最適レギュレータは、評価関数の重みの選択によらず、ゲイン減少余裕  $1/2$  をもつ。一方、ゲイン減少余裕  $1/2$  をもつ分散制御ゲインは、合意条件で  $k$  を  $k/2$  で置き換えた条件を満たす必要がある。つまり、グラフラプラシアンが可換であるとき、最適性の十分条件は必要条件にもなる。このように、グラフラプラシアンが可換であるという条件のもとでは、ゲイン減少余裕  $1/2$  をもつことが最適性と等価になるという意味で、制御の容易なマルチエージェントシステムの接続関係を特徴付けている(図 6～図 10 参照)。

以上の内容は、§ 4(1)原著論文発表の 9 として発表している。

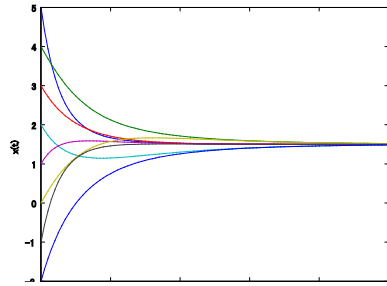


図 9 可換条件が成立しない場合

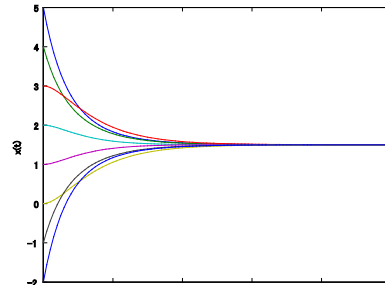


図 10 可換条件が成立する場合

#### (4) 大規模ネットワークシステムのための分散協調ミニマックス最適化

再生可能エネルギーが大量に導入され、多数の電力供給者やアグリゲータ、需要家(これらを以下ではエージェントと呼ぶ。)が参加する将来の電力ネットワークにおいては、電力の融通量や、太陽光発電による電力が供給される配電線の電圧の調整、売買する電力の価格の決定などの様々な問題において、最適化を行うことが必要となる。そこでは、従来のように、地域の電力ネットワークを統括する電力会社が必要すべての情報を集めて最適化を行うことはもはや不可能となる。その理由として、多数の電力供給者や需要家に関する全情報を集めることがコスト的に難しいこと、また独立した電力供給者や需要家が自身の利害や戦略、あるいは契約等の制約により必要な情報であっても他者には知らせたくない、あるいは知らせることが難しい事項がある、等が考えられる。

また、従来の電力供給では、不確実性の原因は(原油価格などの長期的なものを除いて)天候による需要の変動が主であった。しかし、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーの大量導入の下では、天候による発電量の変動など、新たなリスク要因が生じる。送電網においては、風力発電の出力によって潮流が逆転する等の状況が生じる。また、配電線に接続された小口の太陽光発電により、電力潮流が変動するために電圧が所定範囲を逸脱することもある。これらも従来にはないリスクである。また、電力需給の変化を吸収する役割を果たす蓄電池においても、劣化を防ぐような運用が必要となる。これらの新たな問題を解決することが、再生可能エネルギーが大量導入される将来の電力ネットワークがディペンダビリティを有するために不可欠である。

一方、自身の利益を最適化したい多数のエージェントが参加する電力ネットワークにおいては、不公平の存在はできる限り避ける必要がある。たとえば、一部のエージェントのみが売電できない、あるいは蓄電池の過酷な運用が求められる等の状況は、多数のエージェントによる電力ネットワーク形成を阻害する要因となる。

上記のような、リスクや不公平性を取り扱うには、ネットワーク全体の最悪値の最良化が必要になる。このような問題はミニマックス最適化問題として定式化される。また、最適化に必要な情報により定義される評価関数や制約関数を集めるのではなく、それらは各エージェントが秘匿したままで、電力の融通量などネットワーク上で公になる変数のみを逐次的に変化させながら通信して全体最適化を行う分散協調最適化が必要となる。本研究では、その最も基本的かつ一般的な次の問題を取り上げ、プロトコルの

作成を行った。

$$\begin{aligned} & \underset{x^1, x^2, \dots, x^N}{\text{Minimize}} \max\{f^1(x^1), f^2(x^2), \dots, f^N(x^N)\} \quad \text{subject to} \\ & g^1(x^1) \leq 0, g^2(x^2) \leq 0, \dots, g^N(x^N) \leq 0, \quad (1) \\ & x^1 = x^2 = \dots = x^N \quad (2) \end{aligned}$$

ここで  $x^i$  は決定変数、 $f^i(x^i)$  は目的関数、 $g^i(x^i)$  は制約関数であり、 $i=1,2,\dots,N$  はエージェントの番号である。各エージェントは決定変数の任意の(互いに一致するとは限らない)初期値から最適化演算を行い、個々の制約条件((1)式)と、決定変数が一致するという条件((2)式。合意条件という。)を満たす中での目的関数の最大値の最小化を行う。各エージェントは、自身以外の目的関数、制約関数を知ることはできない。さらに、各エージェントが決定変数を含む情報を伝達できるエージェントは限られている。エージェントを節点、情報の伝達が可能なエージェントの組をエッジとするとネットワークのグラフ( $\mathcal{G}$ とする。)が定義される。グラフは、一般には、図 11 に例示するように、情報の送られる方向に応じた有向グラフとなる。図において、1~8はエージェントの番号であり、矢印は情報伝達可能な方向を表す。上述の最適化問題を、劣勾配法をもとにした線形プロトコル逐次最適化により解く。

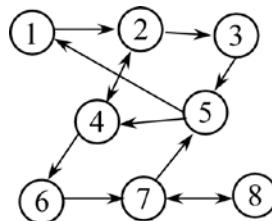


図 11 情報伝達の可能な関係を表すグラフの例

分散協調最適化のプロトコルの研究も従来行われているが、ミニマックス問題を扱うものは少なく、また制約条件の扱いについては、射影型劣勾配法による方法や双対分解法などによる方法があるが、前者では射影が容易に計算できること(制約を満たす領域が既知であること)、後者では双対変数の最適化計算がステップ毎に必要ななど、必ずしも用いやすいとはいえない面があった。そこで、本研究においては、次のような方法で上記の問題を解決し、制約条件のもとでミニマックス最適化を行うプロトコルを作成した。

- ・制約条件は、ネットワーク全体で成り立つ必要がある。ネットワーク全体で制約条件が成り立つ場合には全エージェントが目的関数の減少方向と協調の方向を合成した方向へ決定変数を動かす、一つでもエージェントの制約条件が成り立たない場合には、目的関数の代わりに制約関数を取る。

- ・制約の成立を検出するために、制約の成立・不成立の1ビット情報を決定変数と共に通信する。情報がネットワーク全体に行き渡るまでに上述のグラフの直径 $d(\mathcal{G})$ 分の時間が掛かるため、各エージェントは、その時間だけ前の時刻におけるネットワーク全体での制約条件の成立・不成立しか検出することができない。しかし本研究では、 $d(\mathcal{G})$ ステップ前の制約条件に関する情報を用いて目的関数と制約関数の選択を行っても、(その時点の制約条件の成立状況とは異なっていたとしても、)最適解への収束を示すことに成功している。制約関数を扱うこの手段及び収束性の証明は従来研究には類がなく、まったく新しいものである。

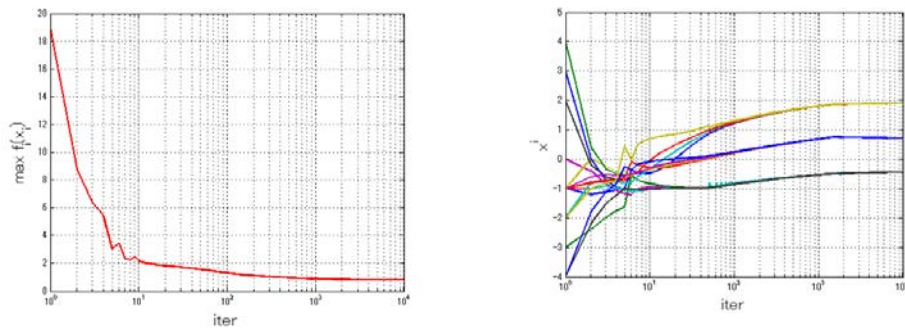


図 12 分散協調 min-max 最適化プロトコルの実行例

上記の方法を発展させながら、§4 (1) の論文 6、(3) ②の口頭発表 2、8、13 および③のポスター発表 1 において成果の発表を行っている。このうち、(3) ② 2 および③ 1 では、最大値を達するエージェントを見つけるために、上記の制約関数に関する方法と同様の手段を用いている。すなわち、ある時点での最大値とそれを達成するエージェントの ID を伝達することで、全エージェントが、時間遅れを伴って最大値を達するエージェントを検出できる。この方法に基づくプロトコルを作成した。図 12 に、口頭発表(3) ② 2 にて提示した数値例を示す。両図とも横軸は逐次計算の繰り返し回数、左図は目的関数(最大値)の値、右図は決定変数 $x^i$ (それぞれ 3 次元ベクトル)の値である。繰り返しと共に最適値に収束し(左図)、また決定変数が同一の値に収束している(右図)。

ここまでの結果においては合意条件のみを扱い、関数 $g^i(x^i)$ による制約条件は扱っていない。(3) ② 8 以降は、最大値の最小化に関しては、等価的に和の最小化問題に帰着する方法を取ることとし、和の最小化問題を扱っている。他方、(3) ② 2 および③ 1 において開発した最大値を見つけるためのプロトコルを関数 $g^i(x^i)$ による制約条件の成立・不成立の検出に用いることに応用し、制約付きの問題を解くことを可能とした。ただし、このプロトコルでは、過去の決定変数の値に対する劣勾配を $d(g)$ ステップ分保持する必要がある。一方論文(1) 6 においては、プロトコルをさらに改良し、 $d(g)$ ステップ前の情報で目的関数と制約関数を選択し、劣勾配は現在の決定変数の値によるものを用いても、依然として最適解への収束が達成されることを示した。口頭発表 (3) ② 13 においては、問題を拡張し、決定変数 $x^i$ の一部の要素のみがネットワーク上の一部のエージェントのものとは一致すればよい場合(たとえば、二つのエージェント間の電力融通量が決定変数である場合、その変数は当該の二つのエージェントのみが共有する。)に効率的に対応できるプロトコルとした。

以上の成果により、将来の電力ネットワークで必要な、リスクや不公平を低減する分散協調ミニマックス最適化問題に関する基本的なプロトコルを作成することができた。また、プロトコルについてはさらに優れたものの開発を続けている。

(5) 切替時  $L_2$  ゲインを用いた合意ネットワークのエッジ切替脆弱性解析

電力システムにおいて電線の切断が発生した場合、状態の変動が大規模に伝播する可能性がある。このような故障などに対してもディペンダブルな電力システムを実現するために、ここでは、電線の切断に伴う変動を解析する手法を考える。具体的には、ネットワークの局所的な故障を切替制御系としてモデル化し、切替時

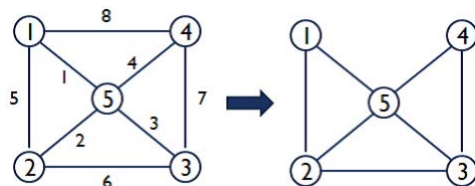


図 13

$L_2$  ゲインを用いることで故障に対する耐性を特徴づけることを考える。

電線の切断を図 13 のようにネットワークのエッジの切替としてモデル化する。ネットワークに切替が発生すると、切替時に望ましくない過渡応答が生じる。外乱と切替の双方に起因するこのような過渡応答が大きくなると、ネットワークは脱調を起し送電に異常が発生する。よって、切替が発生した際、それに伴う過渡応答の大きさを事前に把握しておくことが重要である。

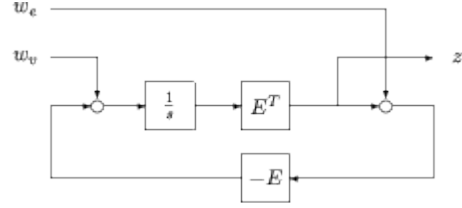


図 14

ここでは、外乱の影響を受けるネットワークのモデルとして、図 14 のフィードバック系を考える。ここで、 $E$  はネットワークの接続行列であり、 $\frac{I}{s}$  はノード状態に対応するダイナミクスである。さらに、図 14 に基づいて、 $t = 0$  でエッジの切替が発生する切替システムを以下の式で考える。

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = -L_p x_p(t) + w_v(t) - E_p w_e(t) & (t < 0), & x_p(-\infty) = 0 \\ \dot{x}_f(t) = -L_f x_f(t) & (t \geq 0), & x_f(0) = x_p(0_-) \\ z(t) = E_z^T x_f(t) \end{cases}$$

ただし、 $x$ 、 $w$ 、 $z$  はそれぞれ状態、外乱、制御量である。添字の  $p$ 、 $f$  はそれぞれ切替前、切替後をあらわす。 $L = EE^T$  はネットワークのグラフラプラシアンである。ただし、切替前後のネットワークはいずれも連結とする。

上記のシステムに対して、切替前の外乱に起因する切替後の応答の  $L_2$  ゲイン

$$\Gamma = \sup_{w \in L_2(-\infty, 0) \cup \{0\}} \frac{\|z\|_{2[0, \infty)}}{\|w\|_{2(-\infty, 0)}}$$

の解析を行うことが本研究の主目的である。これまで、ネットワーク動的システムの切替に対する過渡応答の定量的な解析はほとんど行われていない。 $\Gamma$  はハンケルノルムの一般化になっているものであり、 $\Gamma$  を用いて切替に伴う過渡的な外乱応答の大きさを評価することができる。すなわち、 $\Gamma$  が大きいほど基準値からの逸脱が大きい、すなわちよりディペンダブルでない系であることを意味する。

$\Gamma$  の解析に対して、以下の成果が得られた。

- $E_z = E_f$  であるとき、次式が成り立つ。

$$\Gamma = \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda_2(L_p)}} =: \Gamma_*$$

ただし、 $\lambda_2(L_p)$  は  $L_p$  の 2 番目に小さい固有値である。上式より、 $E_z = E_f$  ならば  $\Gamma$  は切替前のグラフ構造のみに依存し、切替後のグラフ構造には依存しない。

- $E_z = E_p$  とする。切替によってエッジが切断される場合には  $\Gamma \geq \Gamma_*$  が成り立つ。

逆に、エッジが増設される場合には  $\Gamma \leq \Gamma_*$  が成立する。

$\lambda_2(L_p)$  はグラフの代数的連結度であり、従来よりネットワークの合意の速度の指標などとして知られていたものである。本研究は、代数的連結度が切替に対する強靭さにも関連していることをあきらかにしている。Zelazo らは、切替が発生しない場合の  $H_2$  ノルム、 $H_\infty$  ノルムとネットワーク構造との関係を解析しているが、それらの結果と比べて本研究の結果は、ネットワーク構造との関連がより明確な形で与えられている。

さらに、スモールワールドネットワークの例として知られている WS モデルおよび BA モデルのネットワークを構成し、エッジ切断に対する  $\Gamma$  を数値的に解析した。図 15 は構成した WS モデルと対応する  $\Gamma$  の解析結果である。図 15 より、(5,29)、(6,26) のように近い位置で並行しているエッジが存在する場合、 $\Gamma$  は大きくならないことがわかる。反対に、(13,37)、(9,46) のように付近に並行するエッジが存在しない場合  $\Gamma$  が大きくなることを確認できる。

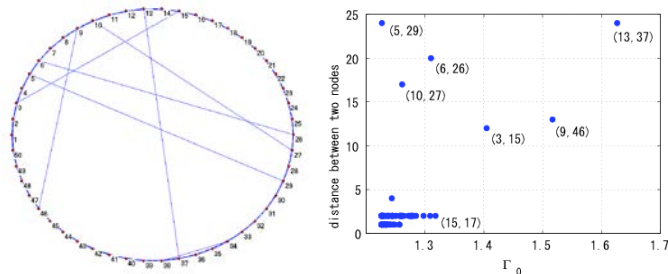


図 15

同様な解析を BA モデルに対しても実行した。図 16 より、次数の小さいノードを持つエッジを除去すると  $\Gamma$  が大きくなることを確認できる。また、次数が大きい 2 ノードを接続するエッジでは  $\Gamma$  が大きくならない。WS モデルの場合と同様に、同等の役割を持つものが少ないエッジほど、除去するとネットワークの状態を大きく乱すことが分かる。

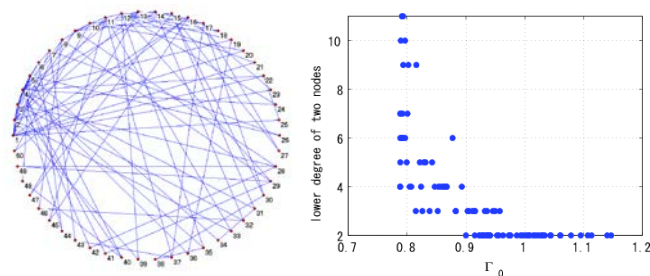


図 16

以上の内容を § 4(3)②口頭発表の 7 において発表を行っている。

上記 5 つの課題に加え、内部変動のもとでの制御パターンの自動生成を可能とする時変システムの反復学習制御にも取り組んだ (§ 4(1)1)。また、本 CREST EMS 領域に関わる融合研究や国際展開を実施した。

### 3.2 送配電システムにおける情報ネットワークのディペンダビリティの実現(大阪大学 土屋グループ)

土屋グループでは、電力システムにおける監視制御部分に注目し、まず配電監視制御用の情報ネットワーク(SCADA ネットワーク)に関わるディペンダビリティの問題について研究を行った。更に、送電レベルでのディペンダビリティに関して、電力ネットワークと情報ネットワークとの相互作用を考慮して説明可能となる障害のモデル化や解析について研究を行った。

#### (1)分散電源大量導入時における配電系統の情報ネットワークに必要な通信容量の推定

正確な監視は配電系統のディペンダビリティの維持に今後益々重要になってくると考えられる。背景として、太陽光発電等の再生可能エネルギーや電気自動車の蓄電池等の蓄放電が可能な機器の導入が進行しており、それらが直接配電系統に接続されることによって引き起こされる不安定化への懸念がある。また、自然災害の大規模化、多発化の実態があり、被害の拡大阻止、早期復旧を実現するディザスタリカバリの必要性が高まっている。更に、近年導入が始まっているデマンドレスポンスのような電力需要家の需給を調整するサービスの効

率的運用が求められている。そこで、本研究では、分散電源普及時に必要となる監視制御ネットワークの通信容量の試算を行った。

配電システムの監視制御を行う SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)システムは、送電システムと比較した場合、国内外において ICT 化が遅れており、上記の課題に対応するために SCADA システムの高度化、具体的には、SCADA システムにおける通信ネットワークの高速化が求められている。そのため、高度化に必要な通信容量の試算が要求されていた。SCADA システムはオンラインシステムのサーバと、変電所にある中継装置である配電 RTU (Remote Terminal Unit)、電柱上の配電設備に接続されそのセンサ情報を RTU に送る役割を果たす FTU (Feeder Terminal Unit)、および、それらを接続する通信ネットワークから構成される。サーバと変電所にある RTU の間の通信インフラは順次大容量化の投資が行われており、光ファイバーによる広域 IP 網が構築されつつあるが、RTU と FTU 間を結ぶ SCADA ネットワークの通信容量は現状非常に小さい。たとえば、現在の主要な媒体であるメタル線による通信容量、は現状大きくて 1200bps 程度である。

将来の配電システムにおいて必要となる通信容量を見積もるため、まず、今後配電システムで収集が必要となる情報を検討し、通信データのサイズを見積もった。FTU が接続される機器としては開閉器と SVR、SVC、蓄電池の PCS、太陽光発電の PCS を想定し、電圧、電流それぞれの情報については 2 バイトで表現するものとして、一つの FTU から一度に収集するデータ量は 80 バイトと試算した。配電システムの規模については、変電所からの高圧電線 (フィーダ) の長さが最長で 40km 程度と想定し、変電所にある RTU とフィーダ上にある FTU の間の SCADA ネットワーク上の通信距離も同じく 40km とした。

これらの値を固定した上で、通信量に影響を与える要因である、情報収集周期 (監視周期)、FTU の総数、通信で中継が必要な距離をパラメータ化し、それぞれ、 $T$ (秒)、 $n$ 、 $y$ (km) で表した上で、必要な通信容量を表す式を導出した。

表 2 に現実的な設定での見積もりを示す。ここで、SCADA ネットワークあたりの FTU 数は現状では最大 30 個程度であるが、将来の SCADA システムではこの 3 倍程度と仮定し、 $n = 100$  とした。また、太陽光発電等の再生可能エネルギーの出力変動の時間スケールを考慮して、 $T = 60, 180, 300$ (秒)の 3 通りについて検討した。中継が必要な通信距離  $y$  については、通信メディアや設置条件によって異なるため、複数の通信メディアを想定し、 $y = 10, 5, 3$ (km) の 3 種類の場合について計算結果を示している。

表 2

(a) 収集時間  $T = 60$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 10.7$ kbps	$\geq 20.3$ kbps	$\geq 34.6$ kbps

(b) 収集時間  $T = 180$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 3.3$ kbps	$\geq 6.0$ kbps	$\geq 9.7$ kbps

(c) 収集時間  $T = 300$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 1.9$ kbps	$\geq 3.5$ kbps	$\geq 5.7$ kbps

試算結果より、現状のメタル通信線よりも大幅に高速な通信ネットワークが必要であることが明らかとなった。一方、スマートグリッドの研究では光ファイバーが導入されることが前提で検討が行われていることがよくあるが、本研究で想定した要求の達成にはそれほど的高速性は必要でないことも分かった。これにより、敷設作業を含む設置コストがより安価な他の通信メディアを採用することができることが明らかになった。このような通信メディアとして、たとえば、920MHz 帯無線が適していることが明らかになった。この研究については、§ 4(1)の論文 5 において発表している。

## (2)配電 SCADA ネットワークにおける通信容量制約下でのセンシング情報収集の最適化

上記(1)で述べたように、今後の太陽光発電の大量導入を想定した場合、配電系統では電力品質維持のためより詳細な監視が必要となり、それに伴って大幅な通信容量の拡張も必要となる。しかし、今後、通信の高速化が進展した場合であっても、配電系統の総規模を考慮すると高速化は段階的にしか進行しないことが強く予想される。したがって、現状の低速な通信ネットワークを前提として監視能力を最適化することで、ディペンダビリティ維持にできるだけ対処することが、現実的な施策となると考えられる。本研究では、このような通信容量の制約がある状況において、監視能力を最適化する方法について研究を行った。

まず、センサ情報の収集を行う箇所を適切に選択することで、特に電圧の適正範囲からの逸脱に関する監視能力を最適化する方法を提案した。提案法では、SVR、柱上変圧器のタップ比の変化点等、不安定化によって許容電圧範囲からの逸脱が最初に起こり得る点を情報収集箇所の候補とする。上記(1)の研究成果に基づき、それぞれの情報収集箇所から1回情報を読み取るのに必要な通信時間を見積もることができる。必要な情報収集周期(監視周期)に収まる範囲で、できるだけこのような点を多く選ぶ。この成果については、§4(1)の論文2において発表している。

このとき、配電系統の特性に関する情報があれば適切な情報収集点をオフラインで決定することは可能である。しかし、設備の拡張や機器の更新、需要家や分散電源の変化に随時対応できるという運用上の利点を考慮して、本研究では、配電系統の変化に対し適応的に選択する情報収集点を変化させる仕組みを検討した。

具体的には、配電系統の互長、分散電源の導入率といった基本情報から、どの配電機器に優先度を与えるのかを決定するルールを設計し、優先度の高いものから監視周期を超えない範囲で情報を取得していく手法を提案した。これにより、配電系統の特性の変化に対し適応的に情報収集箇所を変化させることが可能となる。シミュレータにこの仕組みを実装することで、意図した通りに情報収集箇所を変化させることができ、現実運用可能であることを示した。図17に、配電系統を表示しているシミュレータのスクリーンショットの上に、この仕組みにより選択された情報収集箇所を追記した図を示す。

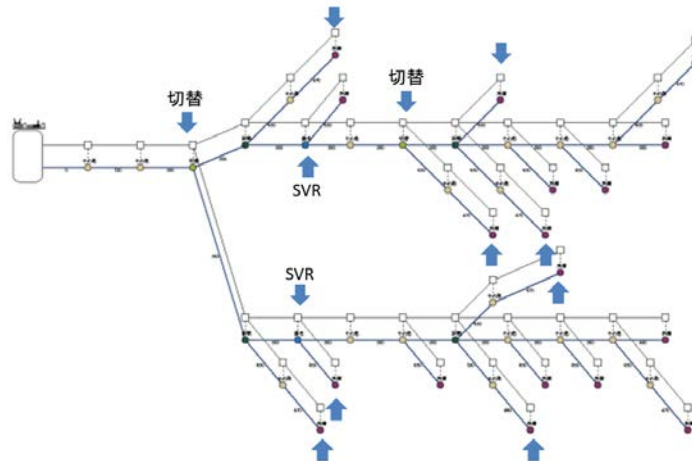


図 17 2層のネットワークと選択された情報収集箇所

また、上記の情報収集箇所の選択手法の研究と同時に、SCADA ネットワーク上に変電所に置かれる RTU と並行して情報収集が可能な集約点を配置することによって、監視周期を短縮化する手法についても研究を行った。集約点はブリッジとして機能し、ツリー上の配電 SCADA ネットワークを上流側と下流側に分割して、両者が独立して通信を行うことができることを仮定している。集約点から下流のサブツリーに位置する FTU については、

研究ではまず、集約点の配置を固定したとき、RTU-FTU 間、集約点-FTU 間、RTU-集約点間の通信をどのようにスケジュールすれば監視周期が最短となるかを示した。具体的には、まず RTU は RTU-FTU 間の通信をすべて実行し、並行して、集約点は集約点-FTU 間の通信をすべて実行する。RTU-FTU 間の通信がすべて終了した後、集約点-FTU 間の通信がすべて終了した集約点から順に、RTU-集約点間の通信を実行することで、監視周期を最短に



することができることを、伝統的なジョブスケジューリング問題との等価性から示した。次に、集約点の数が与えられた際に、どこに集約点を配置すれば、監視周期最短となるかを求めるアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムにより、典型的な配電システムのトポロジーの場合、2, 3個程度の集約点を最適に配置することにより監視周期を半減させることができ、そのような最適配置も1秒以内で探索できることが分かった。この集約点配置に関する研究は、§ 4(3)③の 3 において発表している。

### (3) 電力ネットワークと SCADA ネットワークの相互作用を考慮した故障モデル

電力システムは相互依存する電力ネットワークと SCADA ネットワークからなる SoS (System of Systems) であり、両ネットワークの相互作用により単純な不具合が大規模障害として顕在化することがある。このような大規模障害を説明するモデルとして、2010 年に Nature 誌に掲載された Buldyrev らによるモデルが著名である。このモデルの解析によって得られている知見は、両ネットワークのトポロジーが類似している程、システムとしては堅固であるというものである。

本研究では、まず、Buldyrev らのモデルでは考慮されていない配電系統の特徴を反映させた新しいモデルを提案した。例えば、Buldyrev らのモデルでは電力ネットワークと SCADA ネットワークは明示的に区別されていないが、提案モデルではこれらの性質を具体的に反映している(図 18)。提案モデルでは、電力ネットワークでの障害による停電は、SCADA ネットワーク上のノード (FTU と通信機器) の停止をもたらし、SCADA ネットワーク上の機器の不具合は、電力ネットワーク上で監視制御できない範囲を生じさせる。このような範囲ができるだけ小さくなることを、配電系統のディペンダビリティの一評価基準と考えた。

このモデルを仮定し、ランダムに生成したネットワークポロジをいくつか用いて、局所的な故障から生じる障害の影響を調べた。その結果、二つのネットワークの類似性が高い程、障害の影響が少ないことが分かった。これは、全く異なるモデルである、Buldyrev らのモデルの特性と一致する。この研究成果については、§ 4(1)の論文 3 にて発表を行った。

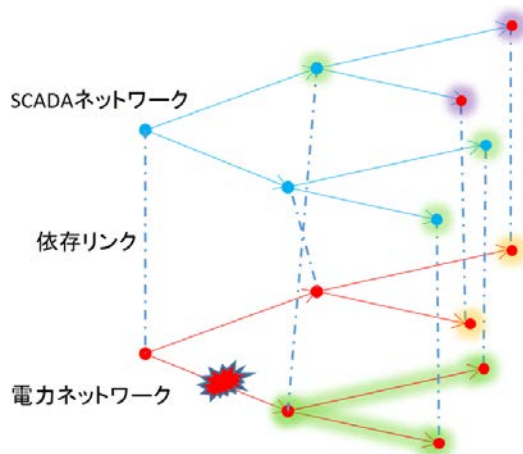


図 18 配電系統の特徴を考慮した 2 層のネットワークでの障害伝播モデル

次に、Buldyrev らのモデル自体の解析を高速化する手法について提案した。このモデルは決定的な振る舞いを仮定しており、初期故障が定まれば、システムの動作を容易にシミュレートすることができる。しかし、たとえば、協調して複数箇所への攻撃が同時に実行されるといった場合を想定したとき、 $n$  を同時に攻撃され得る場所 (すなわち初期故障の場所) の総数として、どの  $n$  箇所を選択した場合に影響が最も大きくなるかといった問いに対しては、 $n$  の大きさに対して考慮すべき初期状態の数が指数的に増加するので、単にシミュレーションを繰り返す方法では現実的な時間で答えることが困難である。

そこで研究では、ブール式の充足可能性判定を用いて、すべての初期状態からの動作を同時に調べる手法を提案した。ブール式が充足可能であるとは、式全体が真となるような、変数への真偽値割り当てが存在することであり、この判定を行うアルゴリズム(SAT アルゴリズム)は、近年目覚ましい高速化を達成している。提案法では、高速な SAT アルゴリズムを用いて無数の動作を一度に考慮することで、高速な解析を実現する。この研究は、§ 4(3)②の 12,14 において口頭発表している。

提案手法では、システムの可能な動作と調べたい性質を、一つのブール式で記号的に表現する。このブール式は、初期状態からの各段階において、システムの各構成要素の状態(正常か故障か)を表すブール変数から成り立っており、モデルに従ってそれらの値が変化するように構成される。このブール式の充足可能性を判定することで性質が成り立つか否か、たとえば、 $n$  箇所の攻撃によって、ネットワークが完全に分離されることがあるか、といった問題を短時間で解くことが可能になった。

## § 4 成果発表等

### (1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1 件、国際(欧文)誌 9 件)

1. Tomoya Hashikawa and Yasumasa Fujisaki, Convergence Conditions of Iterative Learning Control Revisited: A Unified Viewpoint to Continuous-Time and Discrete-Time Cases, Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) (Part of 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control), pp. 31-34, 2013
2. Hirofumi Terada, Tsukasa Onishi, and Tatsuhiro Tsuchiya, A Monitoring Point Selection Approach for Power Distribution Systems, Proceedings of IEEE 8th International System of Systems Engineering Conference (SoSE 2013) pp.190-195, 2013, DOI:10.1109/SYSoSE.2013.6575265
3. Yuki Matsui, Hideharu Kojima and Tatsuhiro Tsuchiya, Modeling the Interaction of Power Line and SCADA Networks, Proceedings of 15th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE 2014), pp. 261-262, 2014, DOI:10.1109/HASE.2014.49
4. Ryosuke Morita, Takayuki Wada, Toru Asai, Izumi Masubuchi, and Yasumasa Fujisaki, Multi-Agent Consensus with Noisy Communication via Time Averaging, Proceedings of European Control Conference 2014, pp. 1530-1535, 2014
5. 寺田博文、土屋達弘, “将来の電力配電監視制御システムに求められる通信容量の考察”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J97-D, No. 6, pp.1142-1146, 2014
6. Izumi Masubuchi, Jun Tsukamoto, Takayuki Wada, Ryosuke Morita, Toru Asai, Yuzo Ohta, and Yasumasa Fujisaki, Distributed Multi-Agent Optimization with Local Constraints via a Subgradient Method with Delayed Information of Feasibility, Proceedings of the 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, pp. 23-28, 2014
7. Ryosuke Morita, Takayuki Wada, Izumi Masubuchi, Toru Asai, and Yasumasa Fujisaki, Convergence Analysis of Multi-Agent Consensus with Noisy Communication, Proceedings of the 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 307-311, 2014
8. Takayuki Wada, Ryosuke Morita, Toru Asai, Izumi Masubuchi, and Yasumasa Fujisaki, Randomized Algorithms for Optimal Power Flow, Proceedings of the 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 199-203, 2014
9. Hiroataka Katsuura and Yasumasa Fujisaki, Optimality of Consensus Protocols for Multi-Agent Systems with Interaction, Proceedings of the 2014 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC) (Part of the 2014 IEEE Multi-conference

on Systems and Control) pp. 282-285, 2014

10. Takayuki Wada, Ryosuke Morita, Toru Asai, Izumi Masubuchi, and Yasumasa Fujisaki, Randomized Solution for Robust Optimal Power Flow, Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 5195-5200, 2014

(2) その他の著作物(総説、書籍など)

該当なし

(3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

- ① 招待講演 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

該当なし

- ② 口頭発表 (国内会議 11 件、国際会議 6 件)

1. Ryosuke Morita and Yasumasa Fujisaki, Distributed Minimax Optimization via Multi-Agent Systems, SICE Annual Conference 2013, pp. 1117-1119, 名古屋, 2013 年 9 月 16 日
2. 増淵泉, 和田孝之, 森田亮介, 浅井徹, 太田有三, 藤崎泰正, 分散協調 min-max 最適化について, 第 56 回自動制御連合講演会, pp. 196-201, 新潟, 2013 年 11 月 16 日
3. 森田亮介, 和田孝之, 増淵泉, 浅井徹, 藤崎泰正, 平均化を用いるマルチエージェント合意アルゴリズムの収束性解析, 第 56 回自動制御連合講演会, pp. 202-205, 新潟, 2013 年 11 月 16 日
4. 勝浦大貴, 藤崎泰正, マルチエージェントシステムに対する合意制御則の最適性, 第 56 回自動制御連合講演会, pp. 1000-1001, 新潟, 2013 年 11 月 17 日
5. 松井佑記, 小島英春, 土屋達弘, 電力網と SCADA 網との相互作用が及ぼす堅牢性への影響について, 電子情報通信学会ディペンダブルコンピューティング研究会, 七尾市, 石川, 2013 年 12 月 13 日
6. 土屋達弘, ウインドファームのディペンダビリティモデル化について, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 5B2-2, 調布, 東京, 2014 年 3 月 5 日
7. 盛脇裕介, 浅井徹, 和田孝之, 森田亮介, 増淵泉, 藤崎泰正, 切替時  $L_2$  ゲインを用いた合意ネットワークのエッジ切替脆弱性解析, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 5B2-3, 調布, 東京, 2014 年 3 月 5 日
8. 塚本潤, 増淵泉, 和田孝之, 森田亮介, 浅井徹, 太田有三, 藤崎泰正, 時変の結合を有するネットワークにおけるローカルな制約条件の下での分散協調最適化, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 5B3-5, 調布, 東京, 2014 年 3 月 5 日
9. 森田亮介, 和田孝之, 増淵泉, 浅井徹, 藤崎泰正, 有向グラフ構造を持つマルチエージェントシステムにおける平均化を用いる合意アルゴリズム, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 5B5-3, 調布, 東京, 2014 年 3 月 5 日
10. 和田孝之, 森田亮介, 浅井徹, 増淵泉, 藤崎泰正, ロバスト最適潮流計算の確率的解法, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会, 222-6, 京都, 2014 年 5 月 22 日
11. Ryosuke Morita, Takayuki Wada, Izumi Masubuchi, Toru Asai, and Yasumasa Fujisaki, Convergence Analysis of Multi-Agent Consensus with Noisy and Directed Communication, The 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, pp. 520-523, Groningen, The Netherlands, 2014 年 7 月 8 日
12. 土屋達弘, 電力システム上の連鎖的障害に対する SAT を用いた記号的故障シミュレーション, 情報処理学会ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム (SES 2014)・ワークショップ, 東京, 2014 年 9 月 3 日
13. Izumi Masubuchi, Hiroyuki Ohgishi, Takayuki Wada, Ryosuke Morita, Toru Asai, and Yasumasa Fujisaki, Distributed Multi-Agent Optimization via Consensus of

Groups of Agents that Share Decision Variables, SICE Annual Conference, pp. 886-891, 札幌、2014年9月11日

14. 土屋達弘、SAT-based evaluation of cascading failures in inter-dependent networks、電子情報通信学会ディペンダブルコンピューティング研究会、信学技報、vol. 114、no. 280、DC2014-21、pp. 1-3、東京、2014年10月27日
15. Nguyen Thi Hoai Linh, Takayuki Wada, Izumi Masubuchi, Toru Asai, and Yasumasa Fujisaki, Multi-Agent Consensus on Noisy Networks with Antagonistic Interactions, The 46th ISICIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 1B3-3, 京都、2014年11月1日
16. Hiroataka Katsuura and Yasumasa Fujisaki, Optimality of General Multi-Agent Consensus under Distributed Disturbance, SICE International Symposium on Control Systems 2015 (Part of SICE Multi-symposium on Control Systems 2015), 611-2, 東京、2015年3月6日
17. Nguyen Thi Hoai Linh, Takayuki Wada, Izumi Masubuchi, Toru Asai, and Yasumasa Fujisaki, Convergence Analysis of a Gossip Algorithm over Signed Graphs, SICE International Symposium on Control Systems 2015 (Part of SICE Multi-symposium on Control Systems 2015), 613-1, 東京、2015年3月6日

③ ポスター発表 (国内会議3件、国際会議0件)

1. 増淵泉、和田孝之、森田亮介、浅井徹、太田有三、藤崎泰正、ディペンダブル制御に向けた分散協調最適化、計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2013、pp. 520-521、大津、滋賀、2013年11月19日
2. 森田亮介、和田孝之、増淵泉、浅井徹、藤崎泰正、雑音環境下でのコンセンサスアルゴリズムのディペンダビリティについて、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2013、pp. 522-523、大津、滋賀、2013年11月19日
3. 小島英治、土屋達弘、配電SCADAネットワークにおける情報収集時間短縮のための集約点配置に関する研究、計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 (SSI2014)、岡山、2014年11月23日

(4)知財出願

- ①国内出願 (0件)
- ②海外出願 (0件)
- ③その他の知的財産権  
該当なし

(5)受賞・報道等

- ①受賞  
1. 塚本潤、計測自動制御学会 2015年制御部門研究奨励賞、2015年3月16日  
( § 4 (3) ②口頭発表 8 に対して )
- ②マスコミ(新聞・TV等)報道(プレス発表をした場合にはその概要もお書き下さい。)  
該当なし
- ③その他

イタリア学術会議(CNR)の国際共同研究プログラム「International Bilateral Joint CNR Laboratories」に対して、研究課題「エネルギー管理システムのための協調制御」を Roberto Tempo 博士(CNR 電子情報通信研究所・研究ディレクター)と藤崎が共同で提案を行い、採択された。

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

CREST 本研究領域において、風況予測システムによる風力発電量の予測に取り組む上田チーム、電力系統技術に強みをもつ薄チーム、造賀チーム、杉原チームとともに、風力発電が大量導入された場合のディペンダブルな EMS のあるべき姿について議論をおこない、その実現に必要な研究課題の抽出をおこなった。

②社会還元的な展開活動

ディペンダブルなエネルギー管理システムのあるべき姿について外部の意見を取り入れ議論を深めるため、公開のワークショップ「Mini-Workshop on Dependable Energy Management」を2014年9月1日に開催した。

§5 研究期間中の活動

主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2012年 11月5日	第1回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	6人	研究進捗報告のためのミーティング
2012年 12月4日	第2回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	6人	研究進捗報告のためのミーティング
2013年 1月22日	第3回チーム会議 (薄チームとの合同会議) (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	6人	学術交流ならびに研究進捗報告のためのミーティング
2013年 2月28日	第4回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	5人	研究進捗報告のためのミーティング
2013年 4月17日	第5回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	8人	研究進捗報告のためのミーティング
2013年 5月20日	講演会 「不確かなネットワーク 制御系における 最悪ケースマーカー 測度」	大阪大学 吹田 キャンパス	約20人	学術交流
2013年 6月5日	第6回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	7人	研究進捗報告のためのミーティング
2013年 7月8日	研究統括サイトビジット (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	9人	研究統括に対する研究進捗報告
2013年 8月22日	第7回チーム会議 兼 第1回FS会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	10人	研究進捗報告のためのミーティング
2013年 9月9日	計測自動制御学会 制御部門制御理論部会 制御理論合宿	ホテルコス モスクエア	約20人	学術交流
2013年 10月11日	第2回FS会議 (非公開)	名古屋大学 東山キャン パス	約20人	研究進捗報告のためのミーティング

2013年 10月24日	講演会 「確率ブーリアン ネットワークの 最適制御と検証」	大阪大学 吹田 キャンパス	約20人	学術交流
2013年 11月12日	第8回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	10人	研究進捗報告のためのミー ティング
2013年 12月4日	CREST-FS ウインドファーム見学会 (非公開)	ウインド パワー かみす洋上 風力発電所 (茨城県 神栖市 南浜地先)	6人	洋上ウインドファーム見学
2013年 12月24日	第9回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	10人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 2月7日	第3回FS会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	13人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 3月5日	第1回制御部門マルチ シンポジウムオーガナイ ズドセッション「次世代 EMSのための制御理論 の融合展開に向けて」	電気通信 大学	約50人	オーガナイズドセッションの 企画と実施
2014年 3月17日	第10回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	8人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 3月27日	京都大学大学院情報学 研究科数理工学専攻 制御システム論分野 研究会(非公開)	京都大学 吉田 キャンパス	約10人	学術交流
2014年 4月30日	第11回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	8人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 6月12日	第1回FS2会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	16人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 7月8日	第2回FS2会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	11人	学術交流
2014年 7月23日	第12回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	9人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 8月23日	第3回FS2会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	12人	研究進捗報告のためのミー ティング

2014年 9月1日	第4回FS2会議 (非公開)	大阪国際会 議場	25人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 9月1日	Mini-Workshop on Dependable Energy Management	大阪国際会 議場	39人	学術交流
2014年 9月17日	第13回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	8人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 9月23日	計測自動制御学会 制御部門制御理論部会 制御理論合宿	上越六日町 高原ホテル	約20人	学術交流
2014年 9月30日	第5回FS2会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	11人	研究進捗報告のためのミー ティング
2014年 10月13日	講演会 「Optimality of Consensus Protocols for Multi-Agent Systems with Interaction」	イタリア ミラノ工科大 学	20人	学術交流
2014年 11月17日	第14回チーム会議 (非公開)	大阪大学 吹田 キャンパス	7人	研究進捗報告のためのミー ティング

## §6 最後に

本研究では再生可能エネルギーの大量導入に対応した安定性の高い電力システムの実現を目指し、ディペンダブル制御の基礎理論構築を行った。システム制御理論とディペンダブル技術の各研究分野の相互理解を深め、融合展開を進めるため、グループ間での情報・意見交換が可能となるよう定期的なミーティングの開催や、学会にて共同でオーガナイズドセッションの企画などを行った。また、CREST EMS



図 19 Workshop on Dependable Energy Systems

者、藤崎を日本側研究代表者として、研究課題「エネルギー管理システムのための協調制御」の提案を行い採択された。このように、次世代EMS構築のための基礎理論に関する議論と意見交換を継続的に行い、融合展開や国際展開を実施しつつ、研究を行った。



図 20 第一回制御部門マルチシンポジウム オーガナイズドセッション「次世代EMSのための制御理論の融合展開に向けて」

領域における Feasibility Study への参加を含め、他チームとの合同会議や外部研究者の講演会を実施した。さらに、国際展開として、イタリア学術会議(CNR)の国際共同研究プログラム「International Bilateral Joint CNR Laboratories」に、Roberto Tempo 博士(CNR 電子情報通信研究所・研究ディレクター)をイタリア側研究代表