

CREST「EMS領域」第9回領域会議  
2018年2月15日 秋葉原

エネルギー需給システム構築のための  
経済モデルと物理モデルの融合に基づく  
設計理論及び実証・実装・提言

研究報告

内田健康

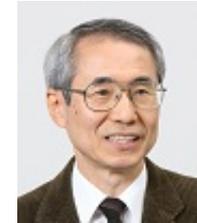
依田G 内田G 大塚G 滑川G 藤崎G

# 内田チームを構成するグループ

○依田G



○内田G (経済Gr + 物理Gr)



○大塚G



○滑川G



○藤崎G



# 内田チーム研究実施体制

- **依田G:** 依田(京大) 牛房(北九州市立大) 村上(京大)  
王(京大) 川村(京大) 石原(京大) 他

---

- **内田G:** 内田(早大) 赤尾(早大) 有村(早大) 塚本(三菱)  
松川(武蔵大) 馬奈木(九大) 平田(長岡技科大)  
辻(横国大) 澤田(九産大) 田中(武蔵大)  
庫川(早大) 和佐(早大) 他

---

- **大塚G:** 大塚(京大) 加嶋(京大) 橋本(大阪工大)  
河野(グローニンゲン大) 岡島(京大) 他

---

- **滑川G:** 滑川(慶大) 他

---

- **藤崎G:** 藤崎(阪大) 土屋(阪大) 浅井(名大) 増淵(神大)  
和田(阪大) 花田(阪大) 他

# 内田チームの研究課題、ターゲット、研究体制

学術的貢献

社会的貢献

理論的成果

実証・実装・提言

国際連携 異分野融合

依田G	人間行動モデル ADR実装・便益分析
経済Gr 内田G	消費者モデル構築・分析 市場モデル構築・分析 長期モデル構築・分析
物理Gr	動的統合メカニズム設計 耐戦略/頑健・効率評価 RE評価・統合メカニズム
大塚G	高速アルゴリズム 非線形MPCアプローチ
滑川G	分散型アルゴリズム 構造依存型分散制御
藤崎G	協調モデル・高信頼性 REと経済性/私・公平性

ターゲット2

3タイムスケール  
エネルギー  
経済モデル

EMSのための  
統合メカニズム  
設計理論

ターゲット3

リスク管理型  
統合メカニズム

ターゲット1

DR実証  
DR促進策  
ADR実装  
政策提言

理論的分析  
政策提言

システム構築

モデル  
メカニズム  
設計・評価・決定

# 報告内容

- 研究進捗
- 中間評価後の研究計画
- 国際連携
- システム構築

# 内田チームの研究概要

**研究課題1:** **人間行動**を考慮したエネルギー消費モデルの構築と、そのモデルに基づくエネルギー需給バランスの分析と最適化、並びにADR促進策の研究

**研究課題2:** 消費者行動、エネルギー市場、並びに長期エネルギー政策の**エネルギー経済モデル**の構築と分析研究

**研究課題3:** 需要者と供給者の利己的・戦略的な意思決定・制御を束ねて、公共の利益を確保する**動的統合メカニズム**の設計理論、経済的効率性の評価、並びに分散型／高速アルゴリズム／信頼性向上の研究

**研究課題4:** **再生可能エネルギー**に対する経済及び物理の融合視点からの統合メカニズム及び制御方策の研究

# 研究課題1: 研究進捗状況(依田G)

## BEMS—ADR実証研究(w. 竹中工務店)

- 2014年度に竹中工務店でBEMS-ADR実証実験を実施。
- 2016年度に分析完了 論文投稿中

## 横浜市フィールド調査(w. 東急電鉄)

- 2015年度 1000世帯HEMSデータ収集・電力利用コンジョイント調査
- 2016年度 800世帯電力利用調査(継続) ← 電力小売全面自由化
- 2017年度～ 今年度中の分析完了を目指す。

## フィールド調査・ラボ経済実験の融合(w. 内田・経済Gr)

- 2016年度 東急調査の200世帯を対象に、早稲田大学で節電実験
- 2017年度～ 今年度中の分析完了を目指す。

## 電力利用WEB全国調査(w. マイボイス)

- 2015年度 11,000世帯を対象に、電力利用コンジョイント調査
- 2016年度 8,000世帯を対象に、調査継続(2年目)
- 2017年度 6,500世帯を対象に、調査継続(3年目)

# 研究課題2: 研究進捗状況(内田・経済Gr)

## デマンド・レスポンスにおける消費者行動

- 「けいはんな大規模電力デマンドレスポンス実証」データ分析完了
- 停電制約下の消費者行動(ラボ実験)の分析を完了
- 学習を考慮した消費者モデル(物理Grと数値シミュレーション実施中)

## フィールド実験とラボ実験の融合(依田Gと共同)

- 京大フィールド調査参加200世帯を対象に早大でラボ実験を実施中  
(分析を実施中)

## 市場モデル

- 卸電力市場取引の双方寡占モデルによる垂直統合化の配分効率の計測
- デカップリング制度の効果に関する理論・実証分析(2017年度完成予定)
- ネガワット市場の価格決定要因と効率性(2017年度中に分析を完了予定)
- モデル構築への契約理論からのアプローチ(物理Grとの共同研究)

## 長期モデル

- 動学的CGEモデル構築(継続)
- 長期プロジェクトのための割引率のあり方の検討(継続)

# 依田 G

- Ito, K., T. Ida, M. Tanaka “Moral Suasion and Economic Incentives: Field Experimental Evidence from Energy Demand,” Forthcoming in American Economic Journal: Economic Policy, 2017.
- Ida, T., K. Murakami, and M. Tanaka “Electricity Demand Response in Japan: Experimental Evidence from a Residential Photovoltaic Generation System,” Economics of Energy & Environmental Policy vol. 5.1: 73-88, 2016
- Ida, T., N. Motegi, and Y. Ushifusa “Behavioral Study of Personalized Automated Demand Response in Workplaces,” Graduate School of Economics, Kyoto University, Discussion Paper E-16-010, 2016



## フィールド実験の位置づけ 依田高典2015

- 伝統的経済学の政策評価を、2つの基準で分類できる。
- 第一の基準は、**ランダム化**。ランダム化が出来ること、自己選択バイアスは発生しない。ラボ実験でランダム化が使われる。
- 第二の基準は、**リアリズム**。自然なフィールドで観察されたデータは、現実妥当性が高い。自然実験などの手法が使われてきた。
- **フィールド実験**は、**ランダム化**と**リアリズム**双方を部分的または完全に満たす、両者の橋渡しをする位置付け

ランダム化 (統制データ)		リアリズム (自然発生データ)
		自然実験
		マッチング法
ラボ実験	フィールド実験	操作変数法
		構造推定

Harrison, G.W. & J.A. List (2004) "Field Experiments," Journal of Economic Literature XLII: 1009-1055. を参考に作成。



## ラボ実験風景 早稲田大学HPより



トリートメントにより情報を変化

## 田中健太2016



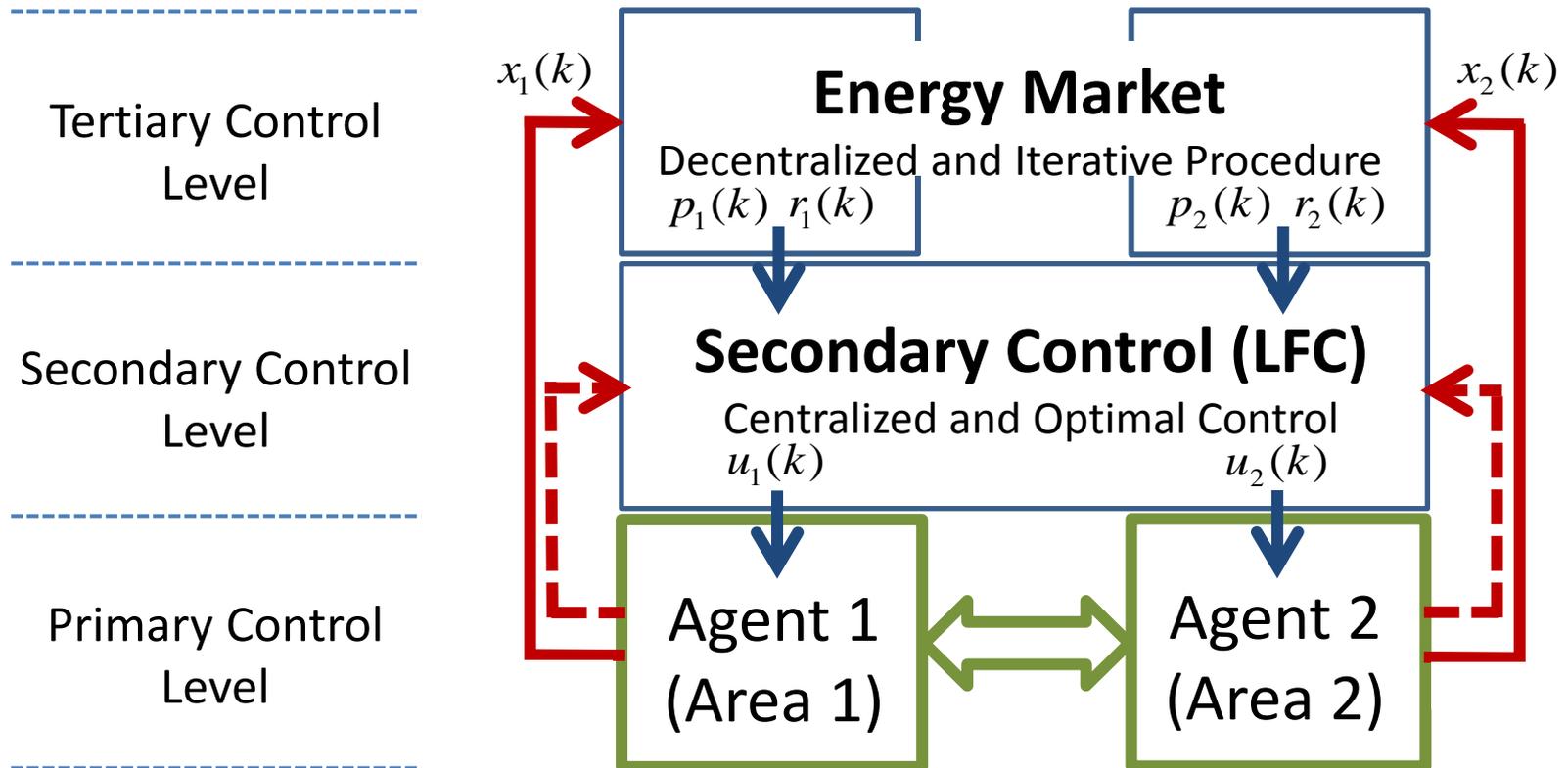
# 内田・経済Gr

- Toshi H. Arimura, Hajime Katayama, Mari Sakudo, "Do Social Norms Matter to Energy-Saving Behavior? Endogenous Social and Correlated Effects," Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, vol. 3, no. 3, pp. 525-553, 2016
- Kenta Tanaka, Yukihide Kurakawa, Eiji Sawada, Ken-ichi Akao and Shunsuke Managi, “Energy conservation and risk of electric outage: A laboratory experimental study”, Journal of Energy Engineering, F4016010, 2016.
- Eiji Sawada, "Effect of Electricity System Reform on Retail Electricity Price Increases in Japan," Journal of Economic Structures, 5: 11, 2016
- Yumi Yoshida, Kenta Tanaka, Shunsuke Managi, "Which dynamic pricing rule is most preferred by consumers?— Application of choice experiment," Journal of economic structures, 6:4, 2017
- Sherstyuk, Katerina, Nori Tarui, Majah-Leah V. Ravago, and Tatsuyoshi Saijo, "Inter-Generational Games with Dynamic Externalities and Climate Change Experiments," Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, vol. 3, no. 2, pp. 247-281, 2016

# 研究課題3: 研究進捗状況

(内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

## Traditional Transactive Control Architecture を統合メカニズムの標準モデル(プロトタイプ)として

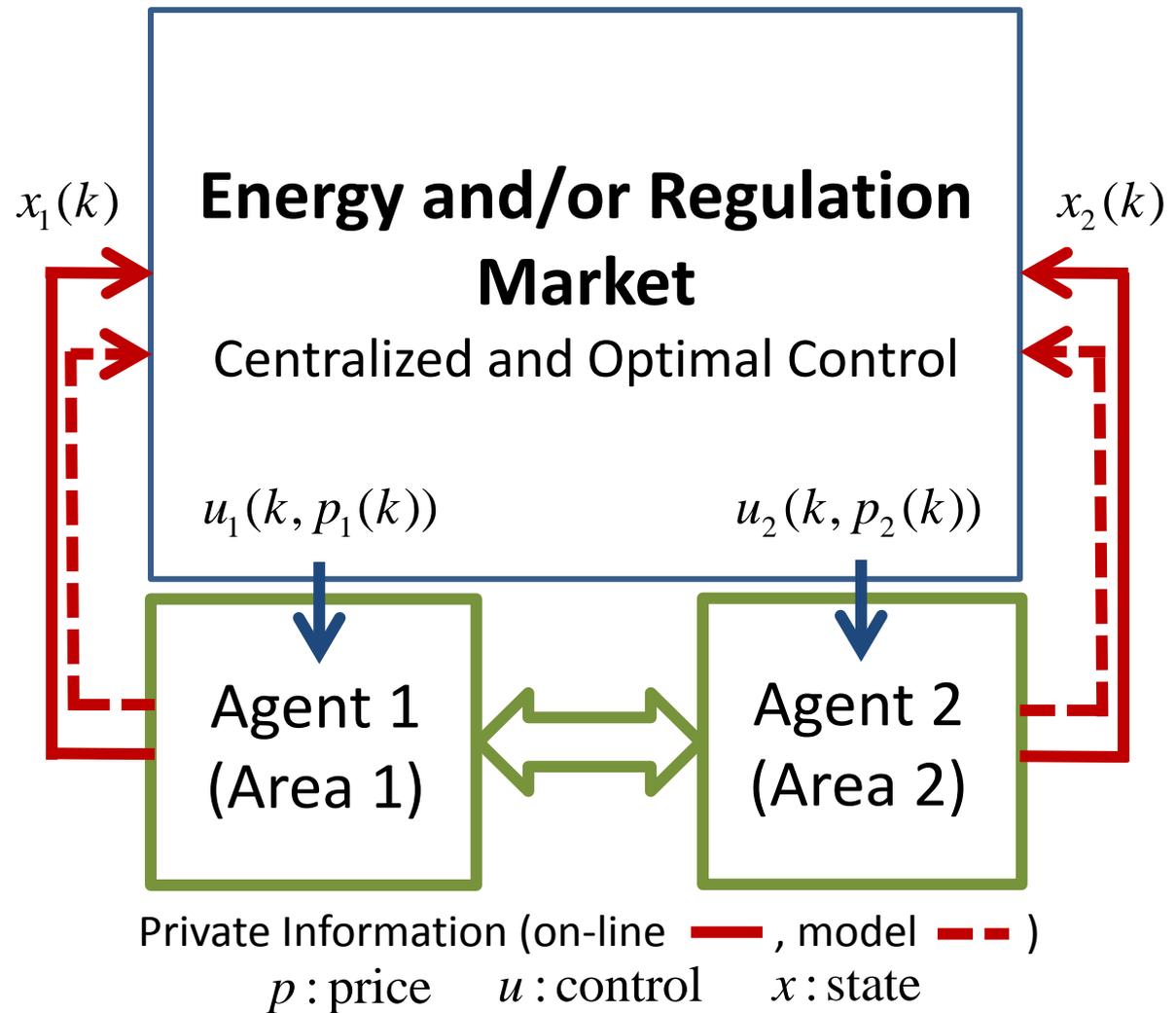


Private Information (on-line **—** , model **- - -** )

$p$  : price    $r$  : reference    $u$  : control    $x$  : state

# 大塚G

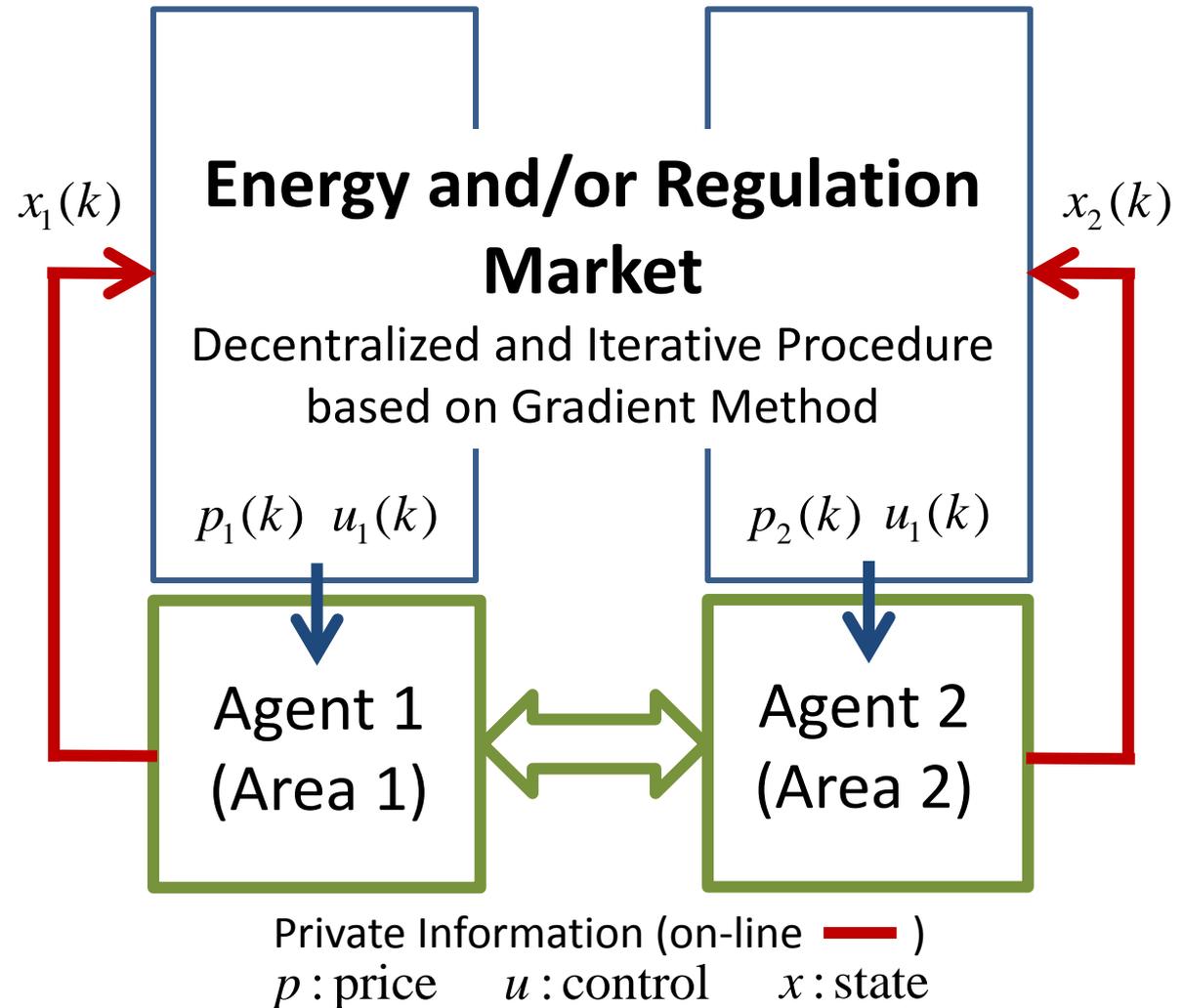
- Fast Computation
- Model Predictive Control Approach
- Nonlinearity
- Nonlinear Control



- R. Satouchi, Y. Kawano, and T. Ohtsuka, "Load frequency control by integrating real-time price presentations for consumers and direct commands issued to generators and batteries," Proceedings of 4th IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp. 380-383, 2016
- 河野, 富山, 大塚, "実時間価格最適化による電力系統の負荷周波数制御 —再生可能エネルギー分配のための評価関数設計—," 計測自動制御学会論文集, vol. 52, no. 12, pp. 653-660, 2016

# 滑川G

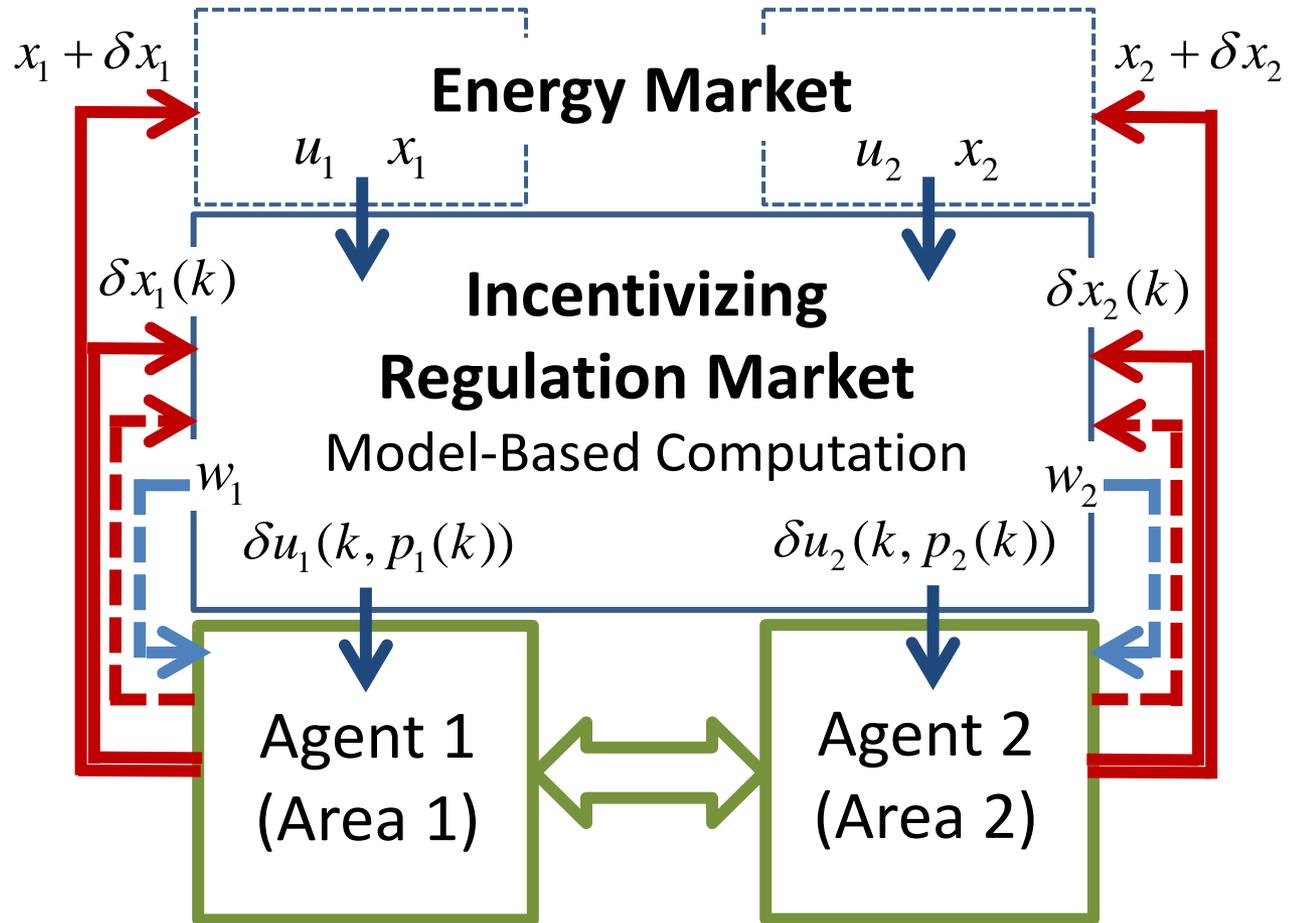
- Decentralization
- Real Constraints
- Various Variations for Real Problems (Ex. Negawatt)



- Y. Okawa and T. Namerikawa, "Optimal Power Demand Management among Consumers with Aggregator considering State and Control Constraints," Proceedings of The 55th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 801-1817, 2016
- Y. Okawa and T. Namerikawa, "Distributed Optimal Power Management via Negawatt Trading in Real-time Electricity Market," IEEE Transaction on Smart Grid, 2017

# 内田・物理Gr

- Incentive Design for Disclosure of Private Information
- Market/Contract
- Ancillary Service Market

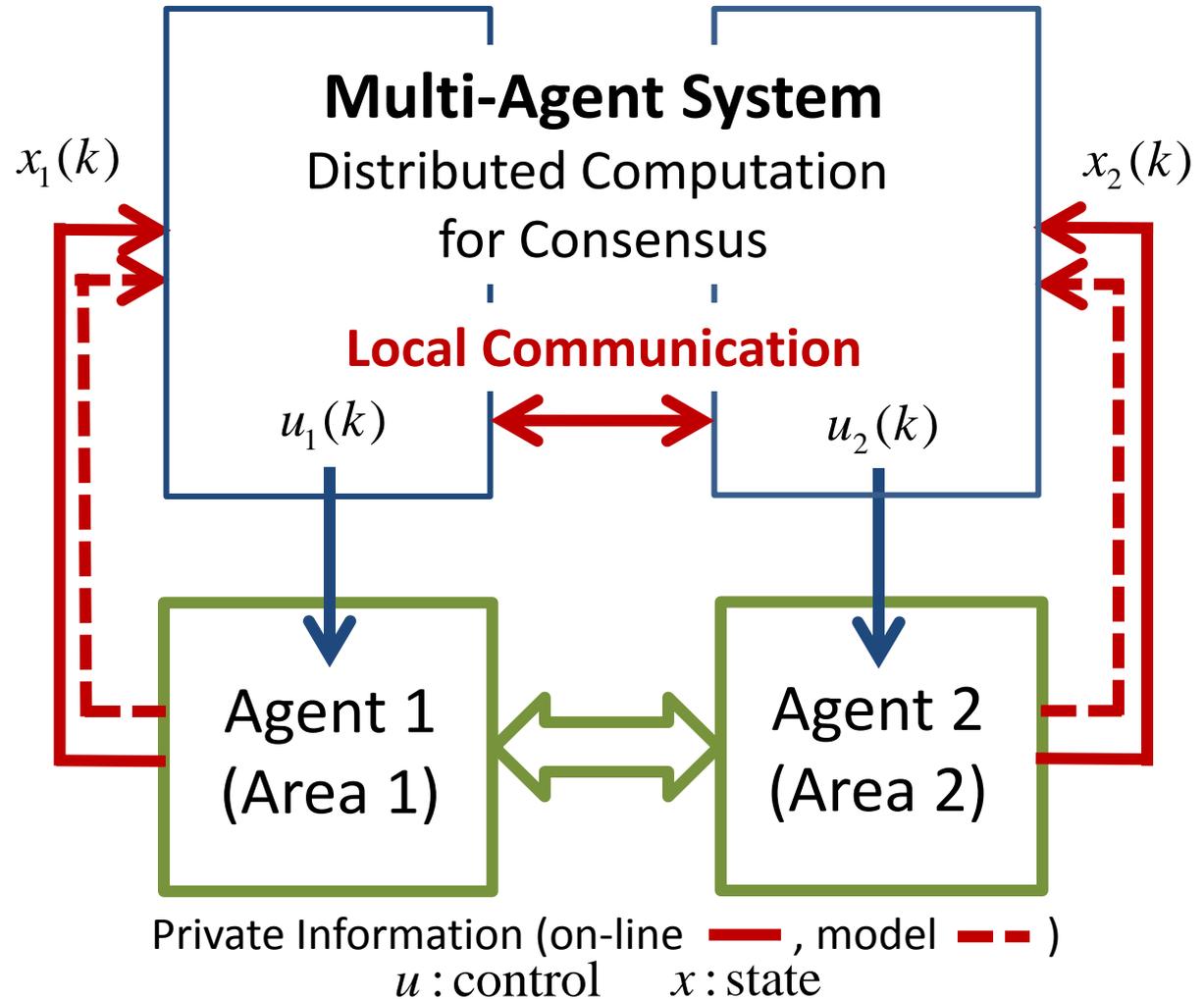


Private Information (on-line —, model - - - )  
 $w$ : incentive     $p$ : price     $u$ : control     $x$ : state

- T. Murao, K. Hirata, Okajima and K. Uchida, "Real-time Pricing for LQG Power Networks Independent Types; A Dynamic Mechanism Design Approach," *European Journal of Control*, 39. pp. 95-105, 2018
- K. Uchida, K. Hirata and Y. Wasa, "Incentivizing Market and Control for Ancillary Services in Dynamic Power Grids," Chapter in *Smart Grid Control: Opportunities and Research Challenges*, J. Stoustrup and A.M. Annaswamy Eds., 2017

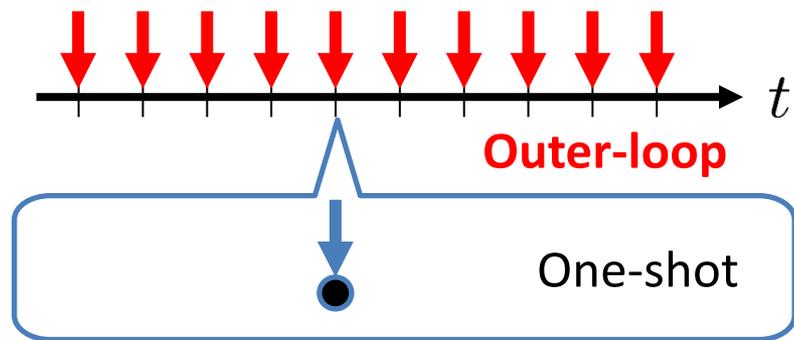
# 藤崎 G

- Modularity
- Scalability
- Reconfigurability
- Robustness
  
- Service-Oriented Architecture

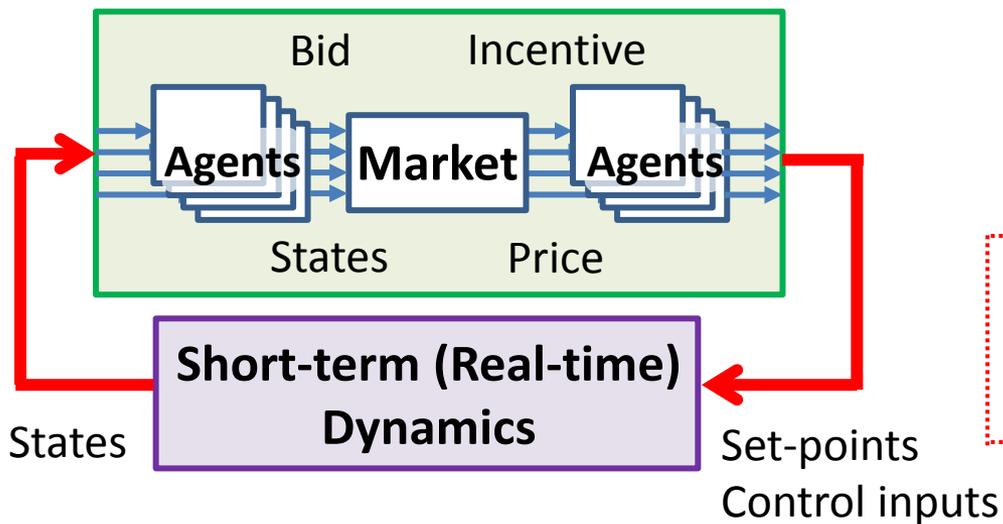


- I. Masubuchi, T. Wada, T. Asai, Nguyen Thi Hoai Linh, Y. Ohta, and Y. Fujisaki, "Distributed Multi-Agent Optimization Based on an Exact Penalty Method with Equality and Inequality Constraints," SICE Journal of CMSI, vol. 9, no. 4, pp. 179-186, 2016
- Y. Kawada, K. Yano, Y. Mizuno, T. Tsuchiya, and Y. Fujisaki, "Data Access Control for Eergy-Related Services in Smart Public Infrastructures," Computers in Industry, accepted.

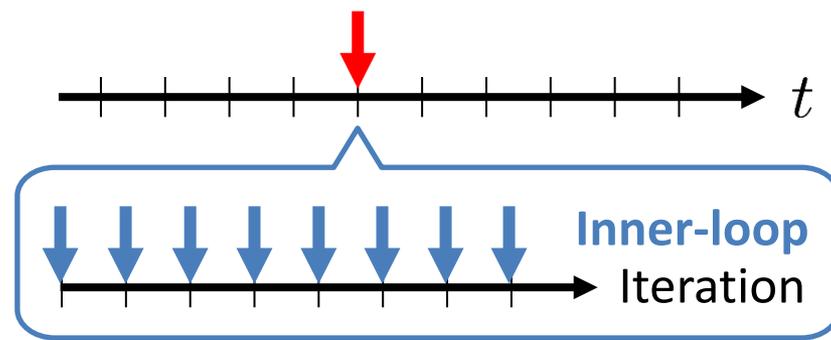
# 市場ベースの需給合意に関する2種類のフィードバック



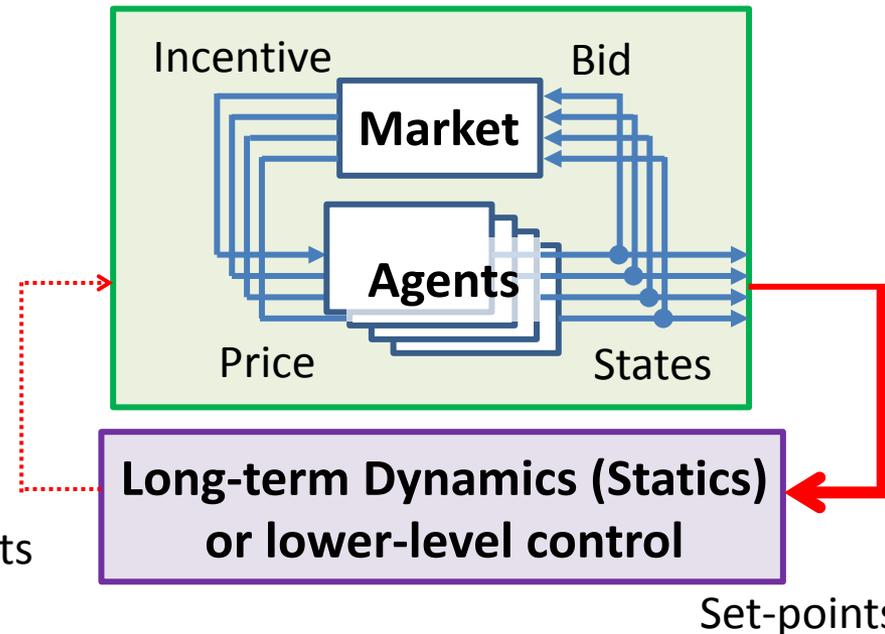
例: 供給／需要関数入札



内田G: LQG/LEQG・解析解  
 大塚G: 非線形・高速化  
 Regulation market



例: タヌマン入札



滑川G: Dual Decomposition  
 藤崎G: MAS/SOA  
 Energy market

# 研究課題4：研究進捗状況

(内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

- リスク管理型システム(確率的モデルアプローチ)
- アンシラリーサービス実現のための制御方式と市場メカニズム
- アンシラリーサービス実現のための供給側アグリゲータ(VPP)

- 小出, 辻, 大山, 合田, 小島, 進士, 内田, F. Magoulès, “センサ付区分開閉器の計測情報を活用したPCSの無効電力制御量の確率的推定手法,” 電気学会論文誌B, Vol. 136, No. 4, pp.410-423, 2016
- 古林, 小出, 辻, 大山, “スマートメータの通信機能を考慮した配電系統の無効電力プライシング方式”, 電気学会論文誌B, Vol. 136, No. 4, pp.382-389, 2016
- N.B. Salim, T. Tsuji, T. Oyama and K. Uchida, "Optimal Reactive Power Control of Inverter-Based Distributed Generator for Voltage Stability Insight using Particle Swarm Optimization", IEEJ Trans. on Power and Energy, Vol. 137, No, 5, 2017
- 裴, 辻, 大山, 内田, “風力発電を含む電力系統における調整力市場ベースの地点別限界価格による需給制御と混雑管理, 電気学会論文誌B, 印刷中
- N.G.M. Thao and K. Uchida, “A Two-level Control Strategy with Fuzzy Logic for Large-scale Photovoltaic Farms to Support Grid Frequency Regulation,” Control Engineering Practice, Vol. 59, pp. 77-99, February 2017
- 里内亮, 河野佑, 大塚敏之, “粒子フィルタによる需要家推定を用いた実時間価格制度,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 53, No. 8, pp. 463-472, 2017.

# 研究進捗のまとめ

- **研究課題1** フィールド実験(竹中)データ取得完了・分析完了及び(東急)データ取得完了・分析開始、ラボ融合実験完了・分析中
- **研究課題2** ラボ実験完了・分析完了、フィールド融合実験完了・分析中、市場モデル構築・分析完了、長期モデル構築中、物理融合進行中
- **研究課題3** Incentivizing/高速/分散/高信頼の動的統合メカニズム設計法提案・評価中、経済融合進行中
- **研究課題4** ターシャリーレベルのリスク管理型市場モデル提案、セカンダリーレベルの市場モデル提案、供給側VPPの制御手法提案

# 研究進捗のまとめ

政策提言

- **研究課題1** フィールド実験(竹中)データ取得完了・分析完了及び(東急)データ取得完了・分析開始、ラボ融合実験完了・分析中
- **研究課題2** ラボ実験完了・分析完了、フィールド融合実験完了・分析中、市場モデル構築・分析完了、長期モデル構築中、物理融合進行中
- **研究課題3** Incentivizing/高速/分散/高信頼の動的統合メカニズム設計法提案・評価中、経済融合進行中
- **研究課題4** ターシャリーレベルのリスク管理型市場モデル提案、セカンダリーレベルの市場モデル提案、供給側VPPの制御手法提案

システム構築

# 報告内容

- 研究進捗
- 中間評価後の研究計画
- 国際連携
- システム構築

# 中間評価会でのコメント

## □ モデル及びシステム構築について

- メカニズム構築の具体的シナリオの作成
- モデル融合の困難克服と推進
- 次世代エネルギーシステムのあるべき姿が前提
- 容量・規模・制約を明確化、容量メカニズムの考慮
- 投資行動を含む長期モデル
- 消費者行動を含むアグリゲータモデル

## □ 全般について

- オリジナルポイントの明確化
- 中間評価後の計画再設定

総括：国際連携の展開・組織化、システム構築等チーム間連携

# 中間評価後の研究計画の重点

- 融合研究推進(経済・経済、経済・物理、フィールド・ラボ)
- システム構築(設計・評価の支援システム)の要点
  - エネルギー需給シナリオ(モデル)の提示
  - 容量・規模・制約(社会的、物理的)の明示
  - 投資モデルを含む長期モデル、容量メカニズム
- チーム間連携の推進
  - 需要研究、システム構築
- 政策提言に向けて(各グループからの提言のとりまとめ)
  - ADR促進策
  - 完全自由化における次世代エネルギー需給モデル提示
  - 長期エネルギー政策 他
- 学術的成果の公開

# 研究課題1: 今後の計画(依田G)

継続中の研究に加えて

経済グループと物理グループの融合(w. 早稲田大学) **新規**

- ラボ経済実験の実験結果を、シンプルな需要家効用関数モデルにまとめて、物理グループに活用してもらう。
- フィールド調査結果を、シンプルな需要関数の回帰分析を行い、物理グループに活用してもらう。

フィールド調査の展開(w. 北九州市立大学) **新規**

- 東急沿線のフィールド調査に目処を付けるとともに、北九州市城野ゼロ・カーボン先進街区のスマートホームを対象に、フィールド調査研究と社会実装化を両面で狙う。

需要研究チームの横串(w. 東京大学・大阪大学等) **新規**

- 藤田CRSTの枠組みの中で、最強チームを挟んで、東京大学岩船グループ・大阪大学下田グループ等と連携し成果を共有する。

# 研究課題2: 今後の計画(内田・経済Gr)

依田Gとの経済・経済共同、物理Grとの経済・物理共同を継続

温暖化対策を前提として投資(設備・インフラ投資、R&D)行動を含めたエネルギー需給の中・長期モデル **新規**

- 代替可能エネルギーの普及を含むエネルギー需給、経済への影響分析:

外生的な送電投資を考慮した応用一般均衡(CGGE)モデルの分析 ⇒ 送電投資が再エネ普及、及び経済全般に与える効果のシミュレーション

- インフラ整備、R&D、実装の最適計画:

2要素学習曲線(two factor learning curve: 2FLC)モデルを応用 ⇒ 設備ストック(実装)及びR&D(研究開発)が技術進歩に与える影響を考慮した最適投資計画の導出

長期投資における適切な割引率の選択 ⇒ エネルギーインフラ整備プロジェクト評価に適用すべき割引率、および推進体制(市場 or 中央集権)の提言

# 研究課題3: 今後の展開(1)

## (内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

### 内田・物理Gr

- アグリゲータの設計と経済的評価 **継続**
- アンシラリーサービスを実現するためのインセンティブ・契約に基づくメカニズム **継続**
- 物理・サイバー・市場融合型最適BEMS **継続**
- 統合基盤モデルとシステム構築 **継続**

### 大塚G

不確かさを考慮したリアルタイムプライシングによる負荷周波数制御

- 需要家モデルの粒子フィルタ(PF)によるオンライン推定 **継続**
- 再生可能エネルギーの機会制約とアフィン外乱フィードバックによる確率MPC **新規**
- PFと確率MPC統合の需要家パラメータの確率分布を陽に考慮した確率MPC **新規**

# 研究課題3: 今後の展開(2)

## (内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

### 滑川G

#### 分散最適化アルゴリズムの開発

- 市場参加者の断続的な参加に基づく電力市場取引 – Plug and Play 及び安定性解析 **新規**

#### 大規模複雑電力システムの表現

- Moving Horizon Estimation・ロバストモデル予測制御を用いた外乱に対してロバストなモデルの構築 **新規**

#### 最適経済負荷配分と分散的電力価格決定

- ネガワット取引に加え、調整用発電機、地域間潮流を組み合わせた需給調整問題への拡大 – 分散的インセンティブ設計 **新規**

### 藤崎G

- 合意形成・協調・高信頼性のためのシステム原理 **継続**
- 経済性・プライバシー・公平性を実現するシステム最適化 **継続**  
(CNRとの共同研究の一年間の延長)

# 研究課題4：今後の計画

## (内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

継続中の研究に加えて

内田・物理Gr

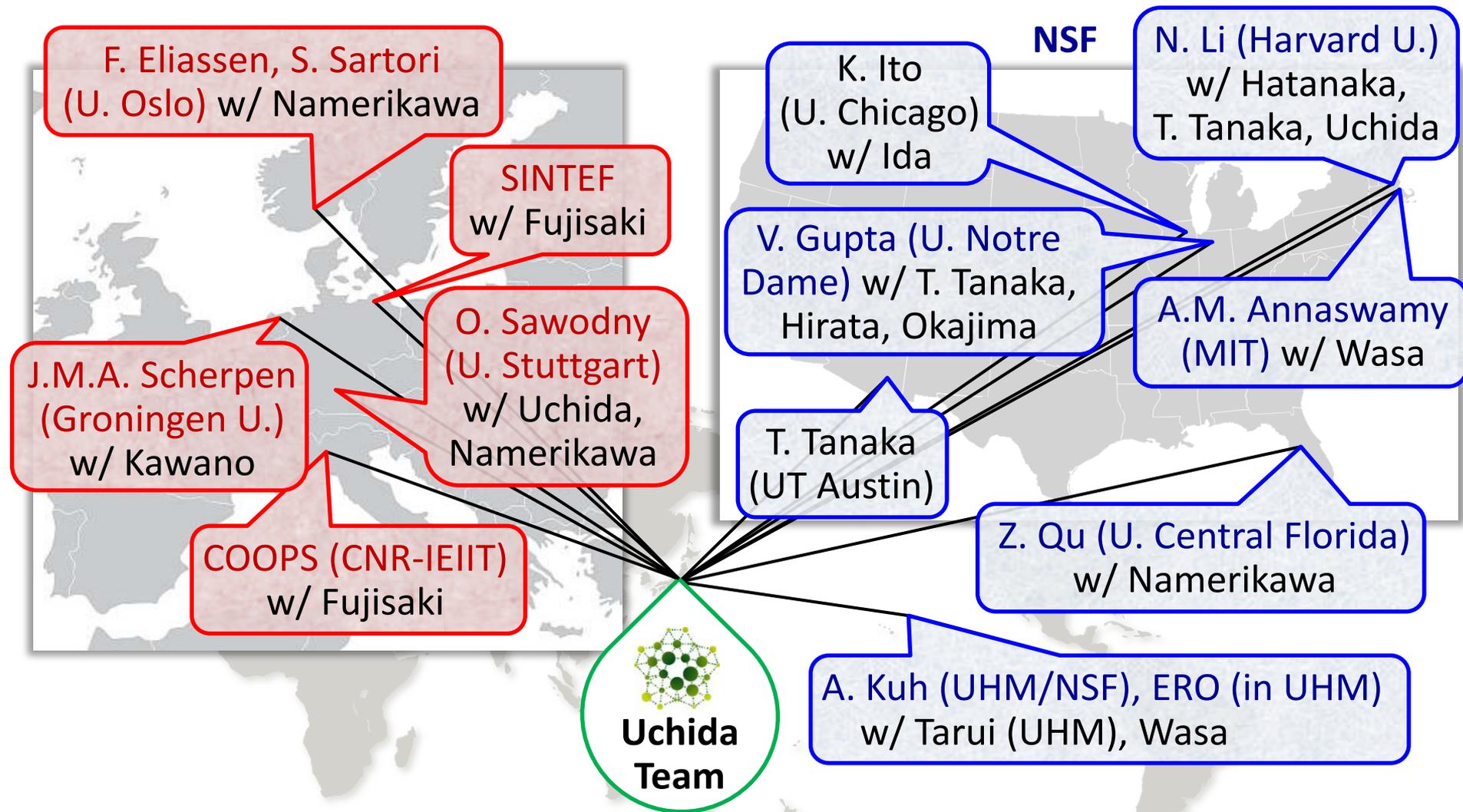
アンシラリーサービス市場との融合 **新規**

- 再生可能エネルギー電源の出力変動リスクに対応するためには、容量( $\Delta kW$ )の調達とエネルギー(kWh)の運用の両面から調整力を適切に確保する必要がある。無効電力をはじめとするアンシラリーサービス市場との関係も考慮して、この双方を含む調整力市場のメカニズムについて検討を進める。本検討の検証に際しては、電気学会標準需給・周波数解析モデル(AGC30)を基にして風力発電ならびに太陽光発電の制御モデルを追加したものをを用いる。

# 報告内容

- 研究進捗
- 中間評価後の研究計画
- **国際連携**
- システム構築

# 内田チーム国際連携



**Workshops:** NSF/JST (Yokohama, Osaka, Tokyo), UHM/CREST (Hawaii),  
DFG/JST (Tokyo, Stuttgart), CREST/COOPS (Torino, Tokyo, Milan)

**NSF/DFG/RCNとの共同研究(国際強化支援受給、内田・滑川・藤崎担当)**

# 報告内容

- 研究進捗
- 中間評価後の研究計画
- 国際連携
- システム構築

# 現状のエネルギー需給システムからの展開

需給計画

需給調整

(wide-area)

(超長期化)  
エネルギー

前日/時間前取引  
卸市場

(超短期化)  
アンシラリー

(kW,kWh) 市場

(市場機能の強化)

(kW,ΔkW) 市場

市場

(小規模・階層化)  
小売市場

Spatial-scale

(appliance)

Time-scale

市場取引量拡大

Tertiary Control  
Secondary Control  
Primary Control

(wide-area)

Spatial-scale

需給

Economic Dispatch  
Optimal Power Flow

(新たな電源・調整力)  
RE, DR, xEMS

(appliance)

Time-scale

20-30years

year

month

day

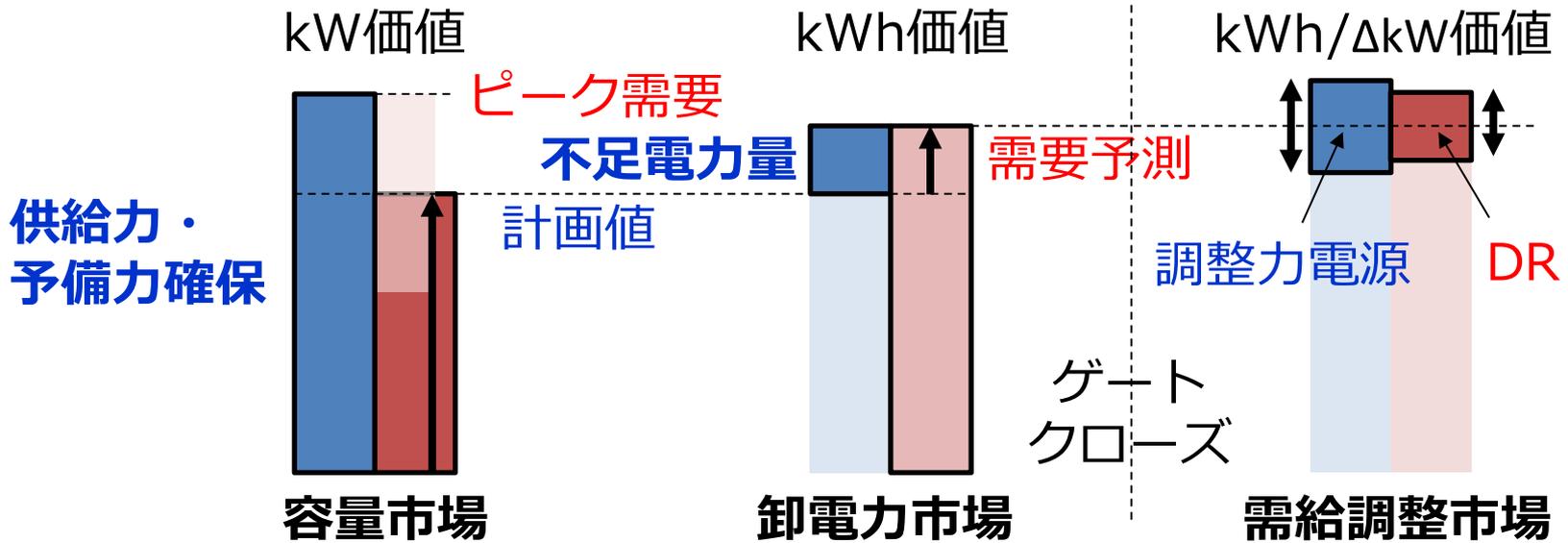
hour

min

s

ms

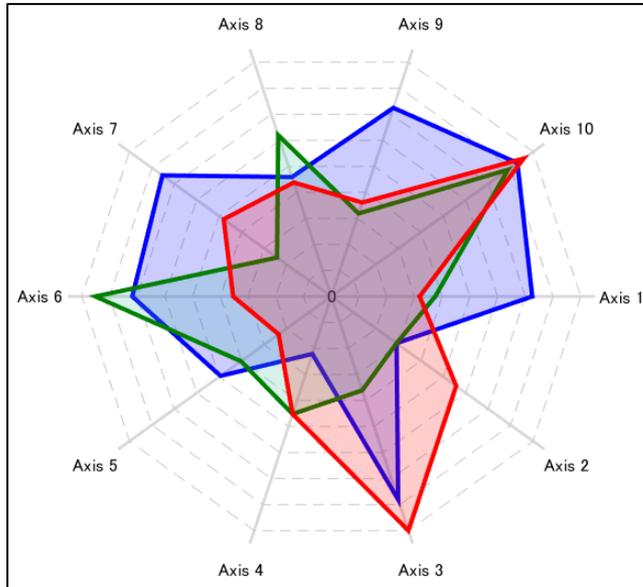
# 現状のエネルギー需給システムからの展開



(OCCTO・資源エネルギー庁の委員会の動向を注視する形で検討)

# システム構築：プランの性能評価に関する定量化

□ モデルの組み合わせ(プラン)の違いによる性能・サービスの分析・評価・比較



■ プラン1  
■ プラン2  
■ プラン3

(レーダーチャート  
を用いた評価の視覚化)

容量市場

卸電力市場

調整力市場

分散性・秘匿性

取引情報量

モデル情報量

高速性

市場設計に  
対する評価軸

RE変動に対するロバスト性、リスク管理

高信頼性、市場効率性、経済的効率性、公共の利益の確保

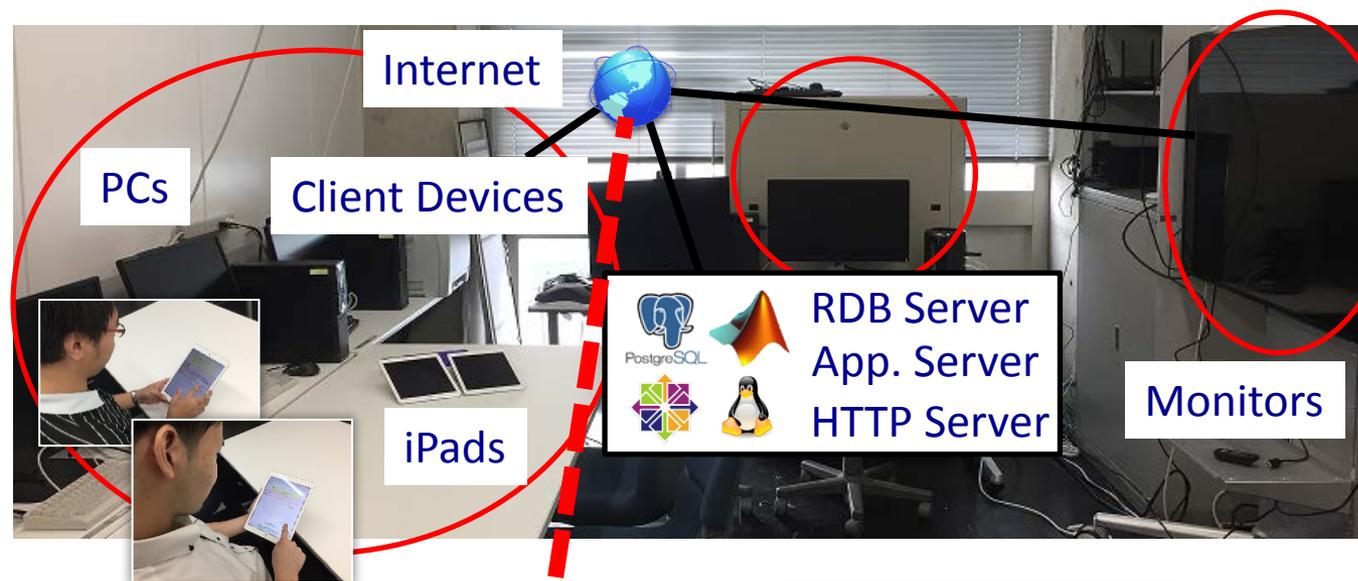
インセンティブ、耐戦略性、頑健性、私公平性

費用便益

学習効率性

# システム構築：実装環境の整備

□ 計算機・人間による入札(意思決定・制御入力)を可能とする環境を整備



データベース内情報

システム・アグリゲータモデル

供給・需要モデル

市場・契約モデル

最適化・学習・制御モデル

過去データ・数値結果

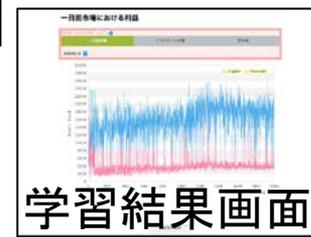
イベント・環境外乱モデル

気象・予測データ

標準・理論モデル群

中間評価後：

井村チームコラボレーションルームとの連携  
中島チーム気象データの利用組み込み



- 大屋, 平田, 和佐, 内田, "異種意思決定者の参加を可能とする大規模電力市場シミュレーション環境構築に関する研究," 自動制御連合講演会 2017.

CREST「EMS領域」第9回領域会議  
2018年2月15日 秋葉原

ありがとうございました

内田チーム