

CREST「EMS領域」第8回領域会議

2016年8月29日

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

内田チームの研究概要

- **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
- 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
- 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
- **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

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



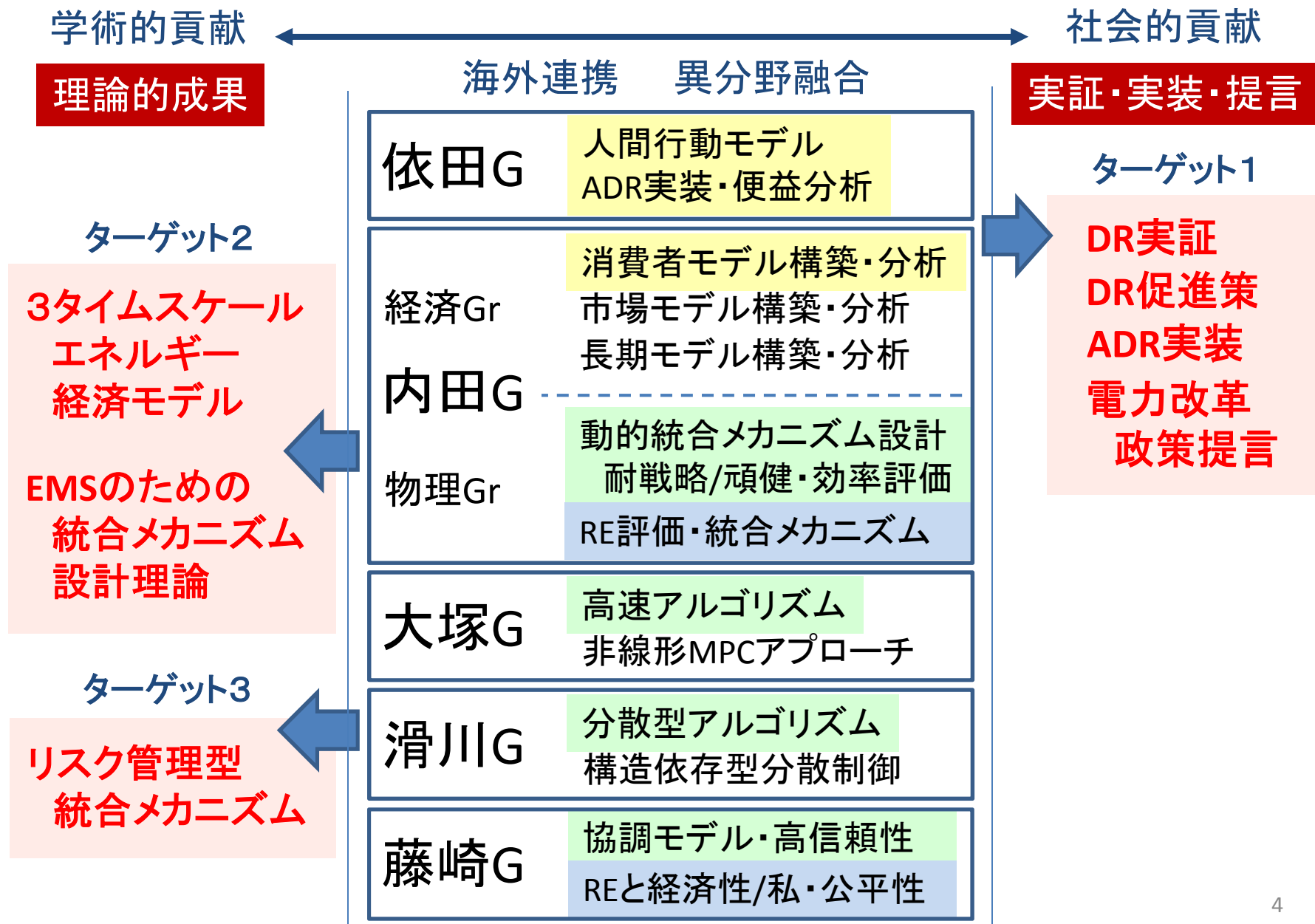
○滑川G



○藤崎G



内田チームの研究課題、ターゲット、研究体制



報告内容

- 研究進捗
- 国際連携
- システム構築

依田G研究課題名

スマートグリッドの社会実装化
を見据えたエネルギー消費の
デマンド・レスポンスの行動経済学的研究

依田G研究実施体制

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

依田G研究課題

- FSから最強チームへ向けて、アドバイザーのコメントを考慮し、**内田物理・経済モデル・チーム**と連携して、**社会実証データ収集・社会実装化促進**を担う。
 - 依田GRでは、以下の**4つのターゲット**を狙う。
 - ① HEMS・DP・ADR**普及諸条件**を検証する
 - ② HEMS・DP・ADR**社会実装化**を実現する
 - ③ HEMS・DP・ADR実装化の**経済的効果**を算定する
 - ④ 電力改革のあるべき道筋の**政策提案**を行う
- * Home Energy Management System (HEMS), Dynamic Pricing (DP), Automated Demand Response (ADR)
- **表明選好・顕示選好分析**を中心に、**HEMS社会実装化社会実験(=中間ターゲット)**を、**東急田園都市線**で1,000世帯規模で実施する。

依田G研究進捗状況

- 共同研究パートナー東急電鉄・東急建設とは、多摩田園都市のフィールド実験に関して、定例ミーティングを持ち、順調に研究は進捗している。

① 2015年4月10日(金)@京大東京オフィス

② 2015年5月25日(金)@京大東京オフィス

③ 2015年7月31日(金)@京大東京オフィス

④ 2015年9月4日(金)@京大東京オフィス

⑤ 2016年3月1日(火)@京大東京オフィス

⑥ 2016年6月17日(金)@京大東京オフィス

⑦ 2016年9月9日(金)@京大東京オフィス

- 共同研究計画の進捗状況は次の通りである。

① 2015年度夏・・・東急グループ管内のHEMS導入済み1,000世帯対象に、時間帯別電気利用データを収集する。

② 2015年度秋・・・冬期に実施予定の質問調査票を作成し、合わせてフィールド実験の設計を固める。

③ 2015年度冬・・・質問調査サーベイ(第1版)を行い、家庭での節電の取組、電気料金メニュー希望意向、小売全面自由化後の電力会社選択意向等を調べる。

④ 2016年度夏・・・質問調査サーベイ(第1版)の計量経済分析を行い、小売全面自由化前後の消費者選好を分析する。

⑤ 2016年度秋・・・再度、質問調査サーベイ(第2版)を行い、小売全面自由化後の電力会社選択・電気料金メニュー変更の実態を調べる。

依田G中期目標(2017年度末)

- **2017年度末**における**中期目標**は、電力小売全面自由化前後に、東急田園都市線沿いで**フィールド実験**を実施し、その**計量経済学分析結果**をとりまとめることである。
- **問題意識① 全面自由化前の消費者選好の計量分析**
時間計量データとアンケート調査票第1版を用いて、自由化前の消費者選好を調査する。一体、どういった世帯が電力会社乗換に熱心なのか。
- **問題意識② 全面自由化後の消費者選好の計量分析**
アンケート調査票第2版を用いて、自由化後の消費者選好と実際の選択を調査する。一体、どういった世帯が電力会社乗換を行ったのか。
- **問題意識③ 全面自由化前後の消費者選好の比較分析**
電力小売全面自由化の機会を利用して、前後の消費者選好の計量経済分析を行い、消費者選好の変化、実際の選択行動への影響を調査する。

全面自由化前後の消費者選好をフィールド実験を通じて調査し、**スマートグリッド技術の社会実装化**を目指した政策提言を行う。

内田G研究課題名

エネルギー需給システム構築のための
経済モデルと統合メカニズムの創出

内田G研究実施体制

【経済】 赤尾, 有村, 庫川(早大) 塚本(三菱)

田中, 松川(武蔵大) 馬奈木(九大) 他

【物理】 内田(早大) 村尾(金沢工大) 平田(長岡技科大)

辻(横国大) 小島(三菱) 畑中(東工大) 他

内田G研究課題

経済Gr

- **消費者行動** 経済理論・実証・実験に基づくデマンドレスポンスに関する消費者行動モデルの構築と制度設計の検討（依田Gとの連携）
- **市場の経済モデル** 電力・エネルギー自由化市場の効率性評価と市場デザインのための経済モデルの提案と分析
- **長期政策** 長期における動学的効率性および世代間衡平性の視点からの電力・エネルギー需給システムの検討

物理Gr

- **統合メカニズムの設計・評価1** 動的需給システムに対するリアルタイムオークション理論構築、耐戦略性・ロバスト性・経済効率性の検討（大塚G・滑川G・藤崎Gとの連携）
- **統合メカニズムの設計・評価2** エージェント組織及び市場ルールの変更に伴う統合メカニズム及びその経済的効率性の検討
- **再生可能エネルギーの統合メカニズム** 再生可能エネルギーの不確かさ克服、リスク管理と市場メカニズムの検討（藤崎G・大塚Gとの連携）₁₁

内田・経済G研究進捗状況

DR消費者行動に関する経済実験

- 実験に基づく停電制約下の消費者行動の分析
([J. of Energy Engineering2016掲載](#))
- 実験モデルの拡張によるアルタイムプライシング制度のpeer-effect分析
([J. of Economic Structures投稿](#))
- 個人行動要因と集団行動要因が電力消費行動に与える影響の識別

社会実験データの分析

- 家計のデマンドレスポンス分析: In-Home Display(宅内電力情報表示)及びHome Energy Report(住宅エネルギー情報)の効果を計測 ([WEAI2015報告](#))
- 電力利用に関する「見える化」の家計部門における節電効果に関する行動仮説の検証 ([Energy Economics2016掲載](#)、[Nature Energy2016報道](#))

電力自由化市場の効率性評価

- 総括原価方式と自由化市場の比較 ([J. of Economic Structures2016掲載](#))
- 需要者が非対称であるときの小売電力価格予測モデル開発 ([GCET2016予定](#))

動学的CGEモデル

- GTAPをベースとした2030年までの動学ベースモデルの構築
- 電力部門の細分化

内田・物理G研究進捗状況

統合メカニズムの設計・評価1 – 市場ベース統合

- LQGモデルにおける動的メカニズムデザイン (IEEE TAC投稿)
 - 出力情報に基づく動的メカニズムデザイン (SICE論文誌2016掲載)
 - 漸近的メカニズムデザイン (ECC2016発表)
- モデル予測制御とインセンティブ設計 (CDC2016発表)
- リアルタイムオークションとインセンティブ設計

統合メカニズムの設計・評価2 – 組織化・取引・契約ベース統合

- マーケットパワーを最大化するアグリゲータ
(連合'16発表、ICCOPT2016発表)
- マーケットと最適契約に基づく統合メカニズム

再生可能エネルギーと統合メカニズム

- アグリゲータとエージェントとのリスク分散型契約による統合
- 確率推定によるリスクを考慮した市場取引による運用
(電学論文誌B2016掲載)

内田G中期目標(2017年度末)

経済Gr

- 効率性向上に寄与する消費者行動要因の提示
- 効果的なDR制度設計の検討
- アグリゲータの一形態としての小売業者の役割の分析
- 再生可能エネルギー普及の各産業への影響試算

物理Gr

- リアルタイムオークション/**インセンティブ**理論の確立と評価
- **アグリゲータの設計法**
- REのリスク管理型リアルタイム統合メカニズム
- **シミュレータ開発とシミュレーションに基づくメカニズム評価**

大塚G研究課題名

統合メカニズムの高速最適化と 不確かさの考慮

不確かさを含む経済行動と物理現象を統合した
実時間最適化

大塚G研究実施体制

大塚(京大) 加嶋(京大)* 橋本(阪大) 河野(京大)

*井村チームが主

大塚G研究課題

リアルタイムプライシングによる負荷周波数制御

- 不確かさを考慮した問題設定(適応, 確率)
- 実時間最適化アルゴリズム(数値計算, 数式処理)
- 数値シミュレーション
- 経済実験(内田Gとの連携)

需要者・供給者・市場のモデル

- モデルの一般化(汎用的なパラメトリックモデル, 動的モデルなど)(内田Gとの連携)
- 数値シミュレーションや経済実験の結果を踏まえた制度・市場への提言

大塚G研究進捗状況(その1)

リアルタイムプライシングによる負荷周波数制御

- タイムスケールを考慮したリアルタイムプライシングと直接制御の組合せによる負荷周波数制御
(ICSET2016発表、連合'16発表)
 - 需要側非線形モデル予測制御(制御周期10s価格提示)と供給側発電・蓄電池直接制御(制御周期0.01s)の組み合わせ
 - 消費モデルのオンライン同定による非線形適応モデル予測制御を検討中
- 再生可能エネルギー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
(IMA Workshop2016発表、SICE論文集投稿)

大塚G研究進捗状況(その2)

需要者・供給者・市場のモデル

- 需要家・発電事業者・送電事業者を考慮して社会厚生を最大化する1日前市場
- 確率モデル予測制御
 - 確率分布の事前情報を考慮した解析 (IJMCPECE'15掲載)
- 制御に適した形での電力システムのモデリングとモデル低次元化, 実時間最適化への応用
 - 微分平衡実現による非線形系の低次元化 (NOLCOS'16発表)

大塚G中期目標(2017年度末)

- 送電制約、再生可能エネルギー、不確かさを統合した実時間最適化によるリアルタイムプライシング
- 制御に適したモデリングとモデル低次元化の確立

滑川G研究課題名

統合メカニズムの分散最適化

経済行動と物理現象を統合した
分散最適アルゴリズムの設計・評価と提言

滑川G研究実施体制

滑川 徹(慶應大) 他

滑川G研究課題

分散最適アルゴリズムの開発

- 反復勾配法を用いた分散最適化
- 情報結合構造を考慮した分散制御
(内田Gとの連携)
- 分散最適化の高速化とアルゴリズム開発
(大塚Gとの連携)

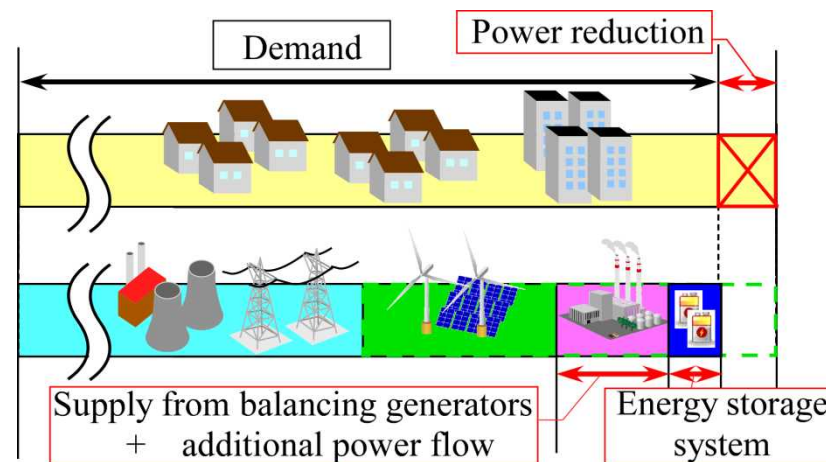
大規模複雑電力システムの表現

- 重複システムの接続構造の検討
- 階層システムの分散階層制御系の設計

滑川G研究進捗状況(その1)

分散最適アルゴリズムの開発

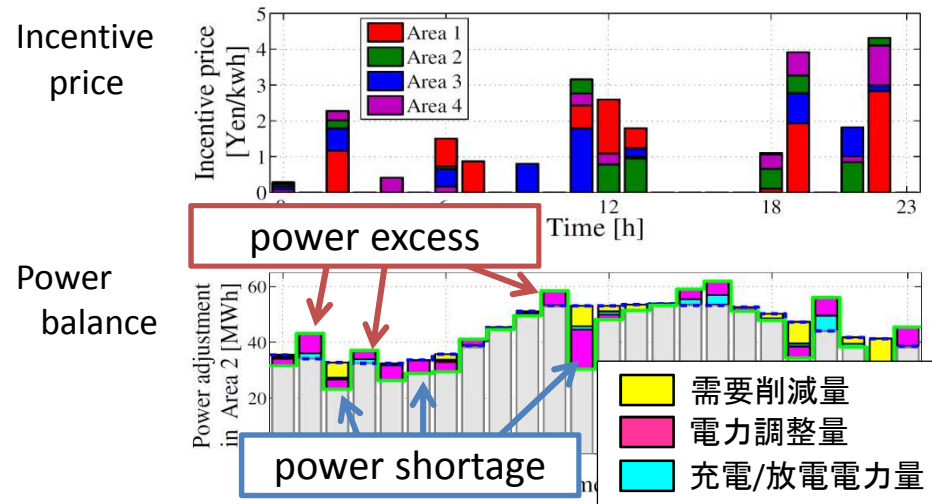
- 蓄電設備の充放電を考慮したネガワット取引に基づく分散型電力需給管理
 - 確率的制約条件に対する凸近似および双対分解を用いた需要家に対する最適インセンティブ価格設計とネガワット取引に基づいた分散型市場アルゴリズム



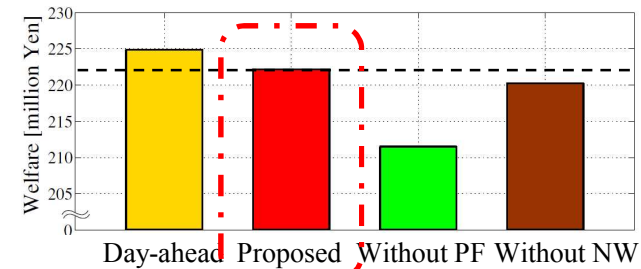
Power adjustment problem with power reduction by from consumers

滑川G研究進捗状況(その2)

Simulation results



Social welfare with real-time power adjustment



- 発電量超過/不足による需給偏差を市場取引に従って需要家と共に解消
- 電力需給調整費用の削減を達成

中期目標(2017年度末)

分散最適アルゴリズムの開発

- 情報結合構造を考慮した分散制御
- 分散最適化の高速化と
アルゴリズム開発

大規模複雑電力システムの表現

- 階層システムの分散階層制御系の設計

藤崎G研究課題名

エネルギーサービスの品質を
保証するための
システム構築論の創出

藤崎G研究実施体制

藤崎泰正(大阪大) 土屋達弘(大阪大)
浅井 徹(大阪大) 増淵 泉(神戸大)
和田孝之(大阪大) 他

藤崎G研究課題

QoESを保証するためのシステム構築論の創出

合意形成・協調・高信頼性のためのシステム原理

- エネルギー需給ネットワークにおける需要者あるいは供給者の合意形成と協調のモデル（イタリアCNR-IEIITとの連携）
- エネルギー需給データの高信頼かつ安全な管理と利用の枠組

経済性・プライバシー公平性を実現するシステム最適化

- エネルギー需給ネットワークに於いてプライバシーと公平性を実現するEMSアルゴリズム（滑川Gとの連携）
- 再生可能エネルギーの不確かさに対して経済合理性のあるEMS構築手法（内田G、大塚G、滑川Gとの連携）

QoES: Quality of Energy Service

藤崎G研究進捗状況

合意形成・協調・高信頼性のためのシステム原理

- ゴシップアルゴリズムによる合意形成 (SICE 2016)
- 協調モデルとしての部分構造をもつネットワーク (SCI' 16, 連合' 16)
- 高信頼なデータ収集に適用可能なデータ伝播の検討
 - 雑音の存在のもとでの合意アルゴリズム (AJC 掲載予定)
- 高付加価値サービスの実現を支えるエネルギーデータの収集・管理・操作技術の開発

経済性・プライバシー・公平性を実現するシステム最適化

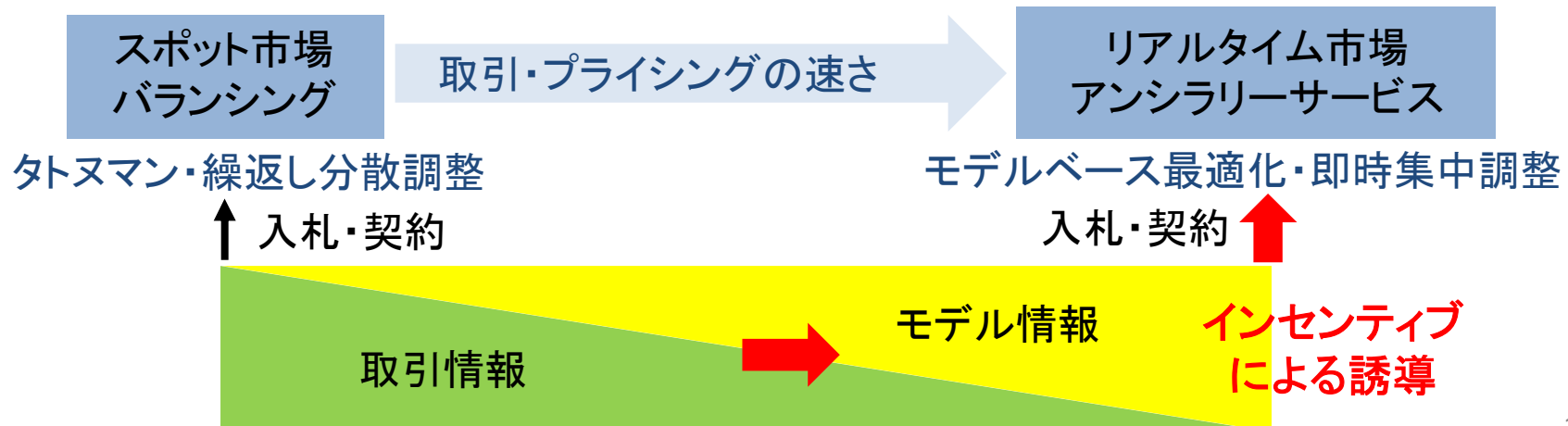
- プライバシーを確保しつつ公平な意思決定を可能とする分散最適化アルゴリズムの高機能化 (SICE JCMSI 掲載予定)
- REの不確かさに対して経済合理性のあるEMS構築手法 (連合' 16)

中期目標(2017年度末)

エネルギーサービスの品質を保証するためのシステム原理とシステム最適化のためのモデリング・解析・設計手法の確立

内田チームの重点研究テーマ

- **フィールド実験** (依田G) と **ラボラトリー実験** (内田・経済Gr) との **補完・総合** による **消費者行動モデルの構築・分析**
- **市場とインセンティブ・契約とを融合した統合メカニズムと制御** - シミュレータによる評価
(内田・物理Gr、滑川G)

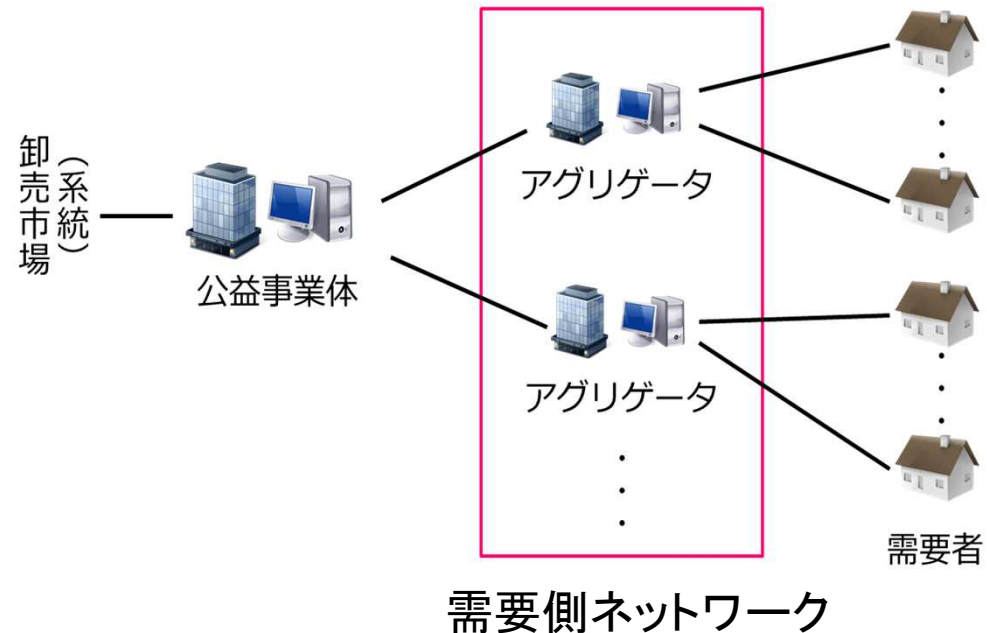


■ アグリゲータの役割の経済分析・評価と設計論

- シミュレータによる評価 (内田・物理Gr 内田・経済Gr)

アグリゲータ

- 目的:
 - ・ネットワークの取引の簡略化、合理化
 - ・需給バランスの円滑化
 - ・需要／供給者の便益増加
- 懸念:
 - ・ネットワークの経済的効率性の低下
 - ・戦略的行動の発生(寡占市場化)
- 形態
 - ・エネルギー需給の集約システム
 - ・エネルギー需給情報の集約システム



契約ベースのアグリゲータの仕様例

例1. マーケットパワーの最大化
アグリゲータ

例2. 再生可能エネルギーの
リスク負担アグリゲータ

Subject to
社会厚生 of 最大化条件
参加条件・誘因両立条件
ネットワークの物理的制約

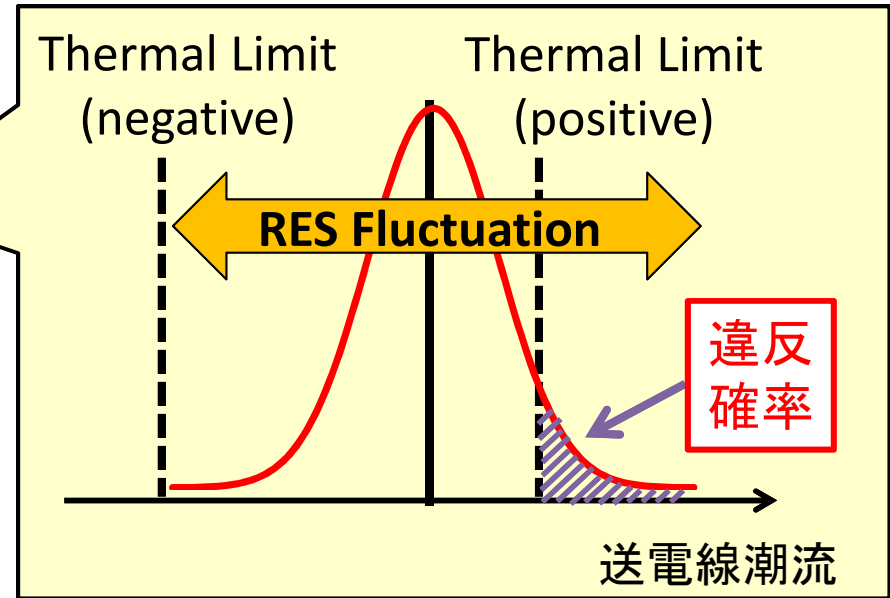
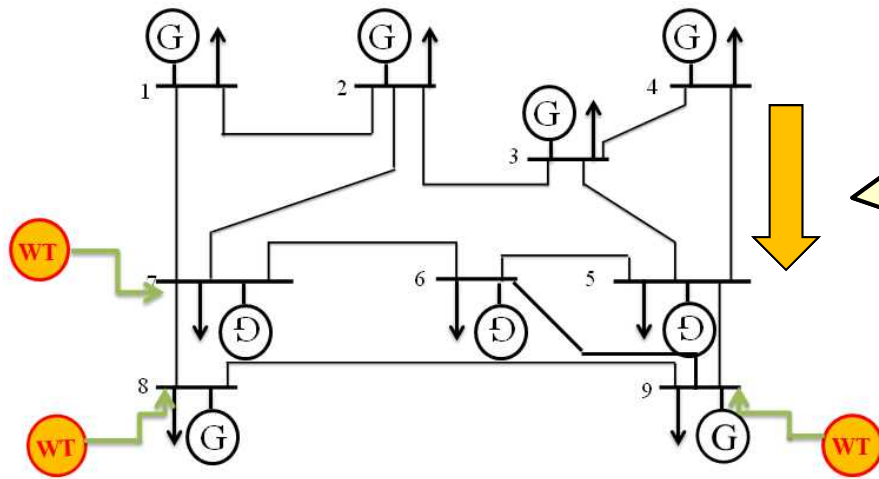
■ アンシラリーサービスを可能にする再生可能エネルギー導入グリッドの制御及び統合メカニズム

- シミュレータによる評価

(内田・物理Gr、大塚G、滑川G、藤崎G)

- 確率モデルの構築
- アグリゲータとエージェント間のリスク分担契約
 - リスク中立型アグリゲータ
 - リスク回避型エージェント
- リスク管理型の需給と取引、その高速化
- 確率計算・リスク計算の高速化

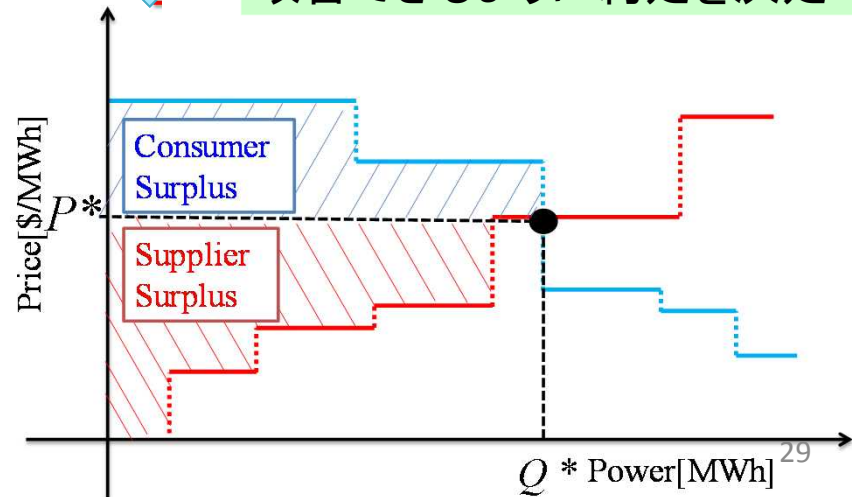
再生可能エネルギー・リスク管理手法(送電系統)



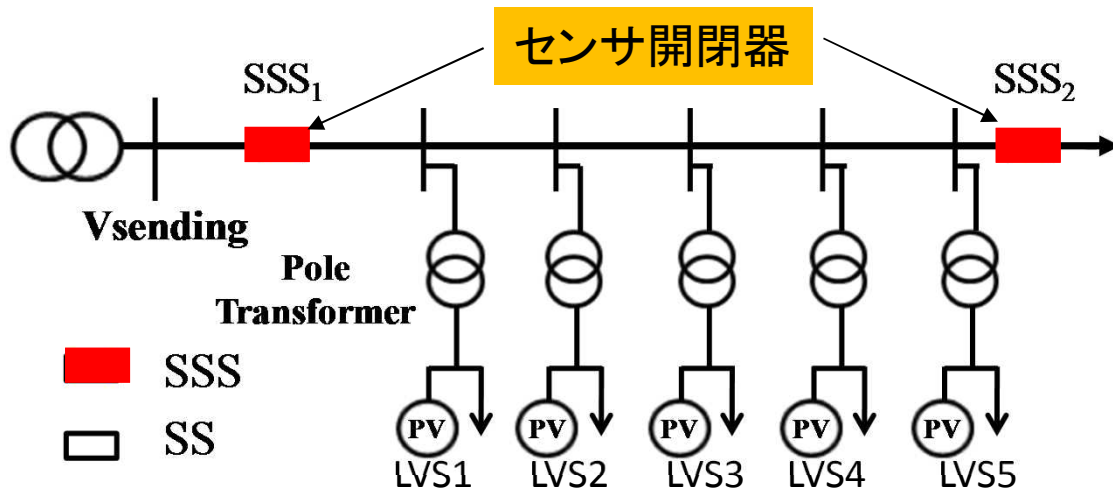
サイト間での相関性を有する風力発電の出力変動に対して、需給バランスの維持と共に、ネットワーク制約の違反確率を許容値以下にする管理手法

制約違反確率を経済効率的に改善できるように約定を決定

- 方法①: リスク管理を考慮した市場決済方式の適用
- 方法②: 地点別価格(LMP)の適用



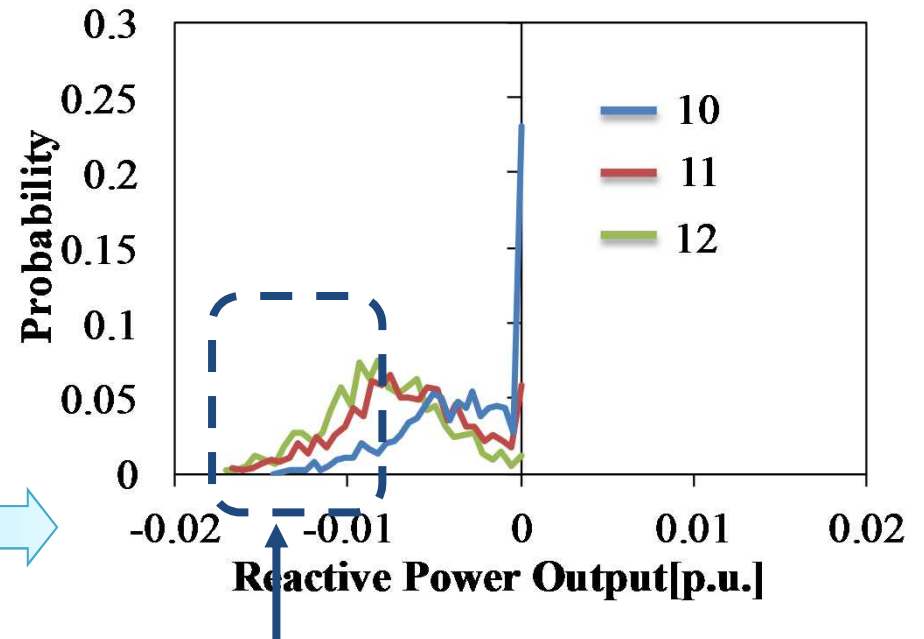
再生可能エネルギー・リスク管理手法(配電系統)



PVが普及拡大した配電系統に着目して、配電系統内の限られた計測情報から
PV出力抑制(過電圧で発生)の有無を確率分布として推定する手法を開発

- ・ センサ開閉器での計測情報 (有効・無効電力潮流, 電圧)
- ・ 負荷変動の確率密度関数 (正規分布 or ワイブル分布)
- ・ 設備容量や線路インピーダンス

疑似逆行列を用いた解析



Q制御量増加時に抑制発生と想定

○電気学会論文誌B(2016年4月)で発表

内田チーム国際連携

NSF／RCN／DFGとの共同研究(国際強化支援受給、内田・滑川担当)

- The 3rd Workshop on “Energy Supply-demand Networks with Renewables based on Integration of Economic Models and Physical Models -Toward international collaborations between NSF and JST CREST projects” Sep. 6, 2016
報告者 NSF:3名 JST:4名(内田チーム) 特別講演1件
- RCNとの共同研究(RCN側3名)(オスロ;滑川)
- NSFとの共同研究(NSF側2名)(フロリダ、ノースカロライナ;滑川)
- DFGとの共同研究;2017年2月にワークショップ予定(東京;内田)

CNRとの共同研究(藤崎担当)

- COOPS: EMSのための協調制御 CNRとの共同ワークショップ Nov.15-17, 2016
トリノ、報告者 CNR:3名 JST:3名 見学会実施 (準備会ボストンJuly 7, 2016)

SINTEFとの共同研究(藤崎担当)

- SINTEFとの共同研究(トロンハイム) Sep. 7-9, 2016

個別の共同研究

F. Magoules 教授(Ecole Central Paris)(辻)／J.P. Hespanha 教授(UCSB) (平田)／
Y. Lecler 教授(Lyon大学) (依田)／J.M.A. Scherpen教授(Groningen大学)(河野)

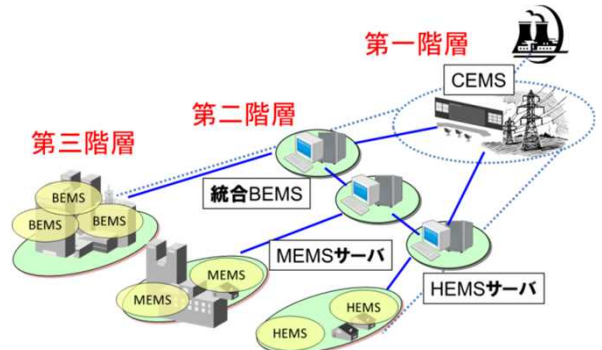
内田チームシステム構築・デモ概要

<シミュレーションの狙い>

- ・市場現象(寡占市場等)評価
- ・市場ルール検証
- ・市場構造(アグリゲータ参入等)評価

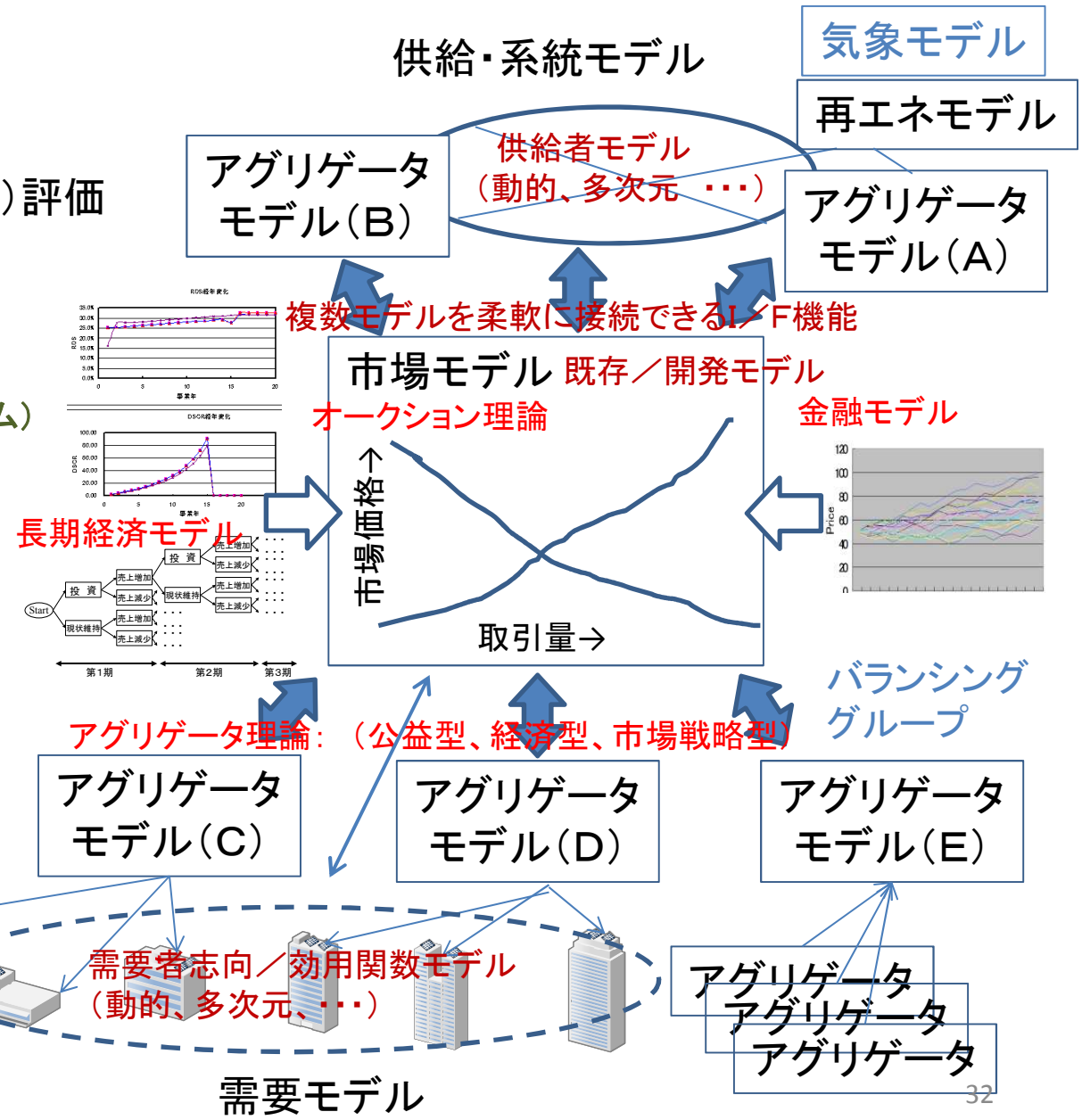
<開発メンバー・体制>

- ・アドバイザー: マルタ、飯野
- ・メンバー: 平田、和佐、塚本、平田・内田・滑川研究生
- ・関連システム: コラボルーム(井村チーム)



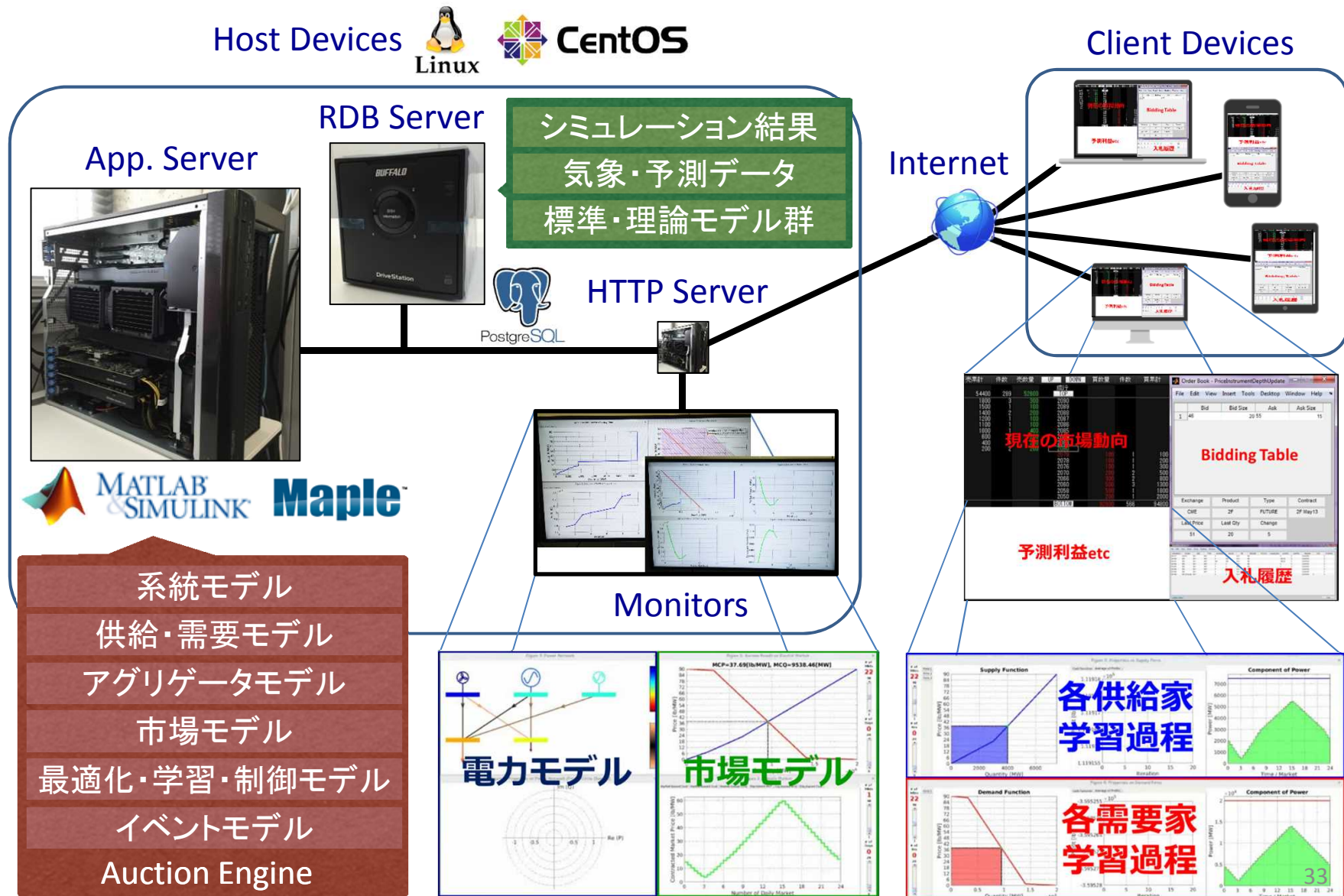
階層型EMSモデル

- リアルシミュレータ (小規模実験装置) (ハイブリッドシミュレータ)
- 仮想都市シミュレータ(田辺) energyplus+BCVTB(畑中) SinVerBEST:TRNSYS(Hu)

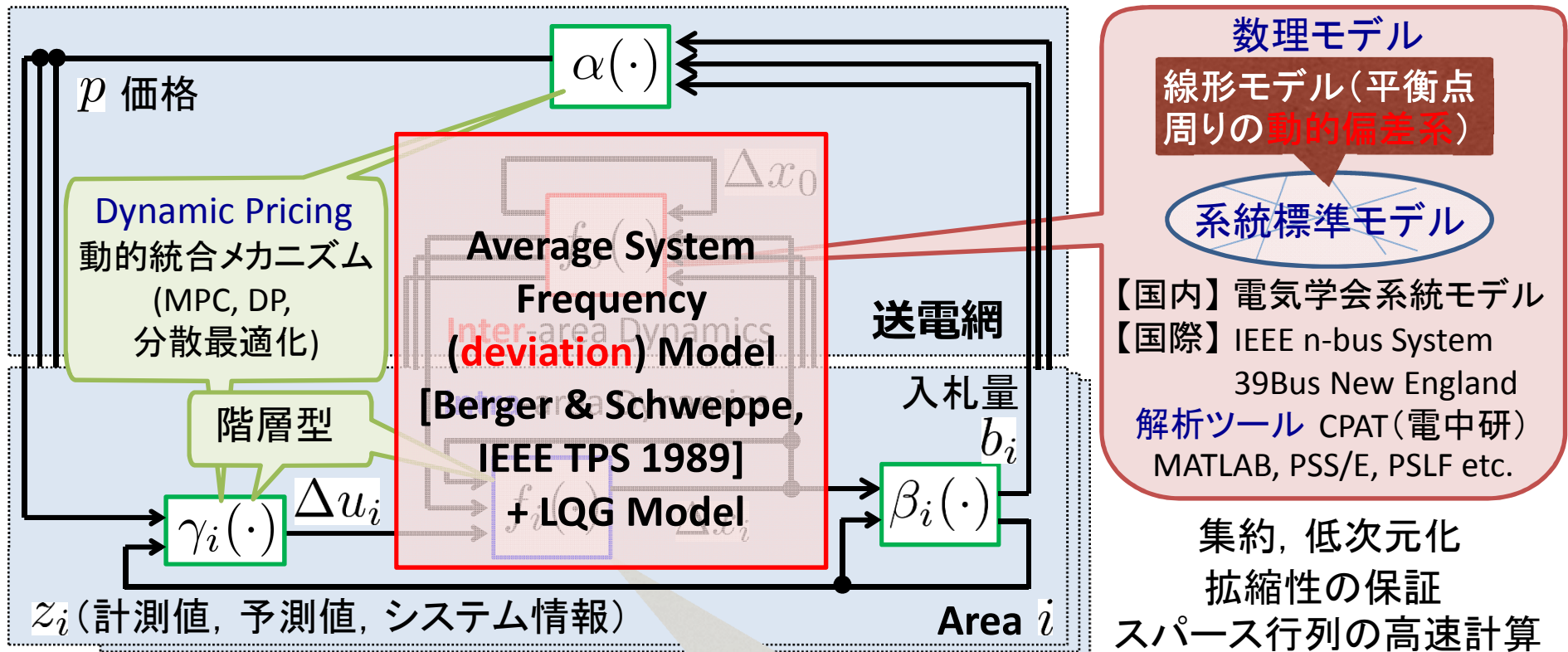


需要モデル

内田チームシステム構築 - シミュレータ開発環境と機能



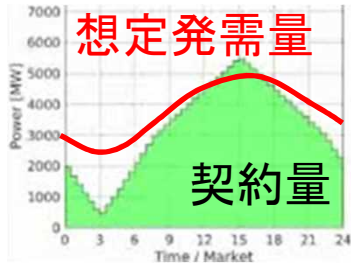
内田チームシステム構築 - 標準モデル・理論モデル (動的・偏差モデル)



標準動的モデル(具体)	再エネ	発電機	モータ	アグリゲータ	xEMS/消費	バッテリー
数理モデル(汎用)		IEEE, IEEJ Berger & Schweppe etc.	IEEE, IEEJ LQG	内田G	ADR (依田G/内田・経済Gr)	
データベース	PV(井村チーム)				SII BEMS data	
詳細モデル	FASTv8 (Wind Turbine)				リアルシミュレータ/仮想都市シミュレータ energyplus+BCVTB/SinVerBEST:TRNSYS	

収集中

内田チームシステム構築 - 標準モデル・理論モデル (静的・定常モデル)



収益

最適化・学習モデル

人間行動, 消費者
気象, 再エネ, 金融

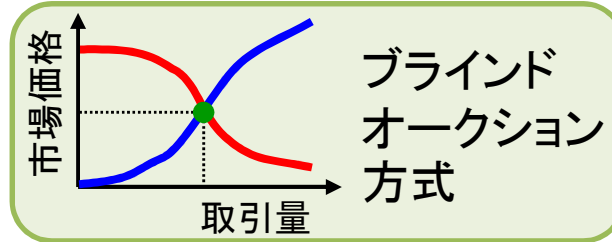
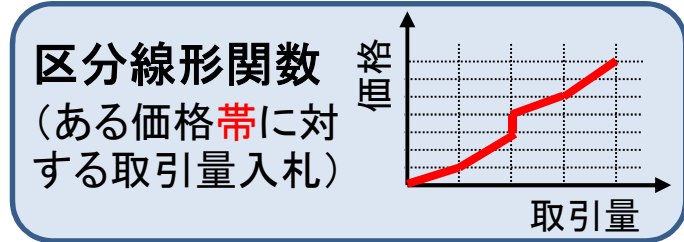
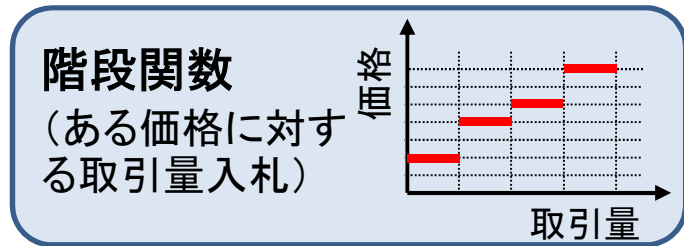
外ヌマン・
繰返し分散調整



モデルベース最適化・
即時集中調整

入札・契約モデル

市場取引モデル



Single/Double Auction

数理モデル

非線形モデル
(潮流計算)

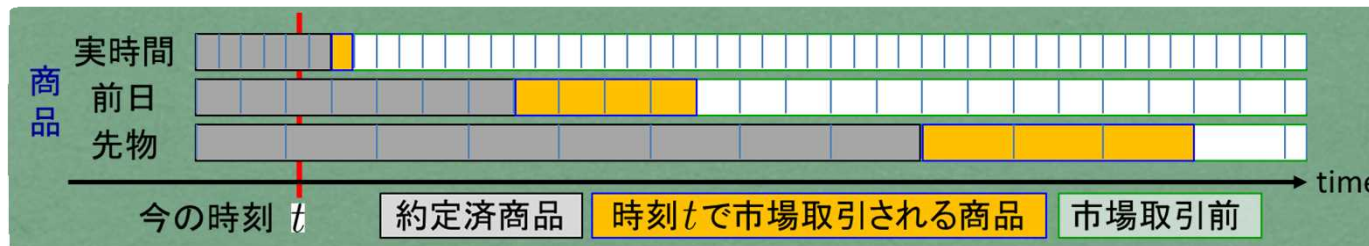
システムモデル

【国内】CPAT(電中研)
【国際】MATPOWER

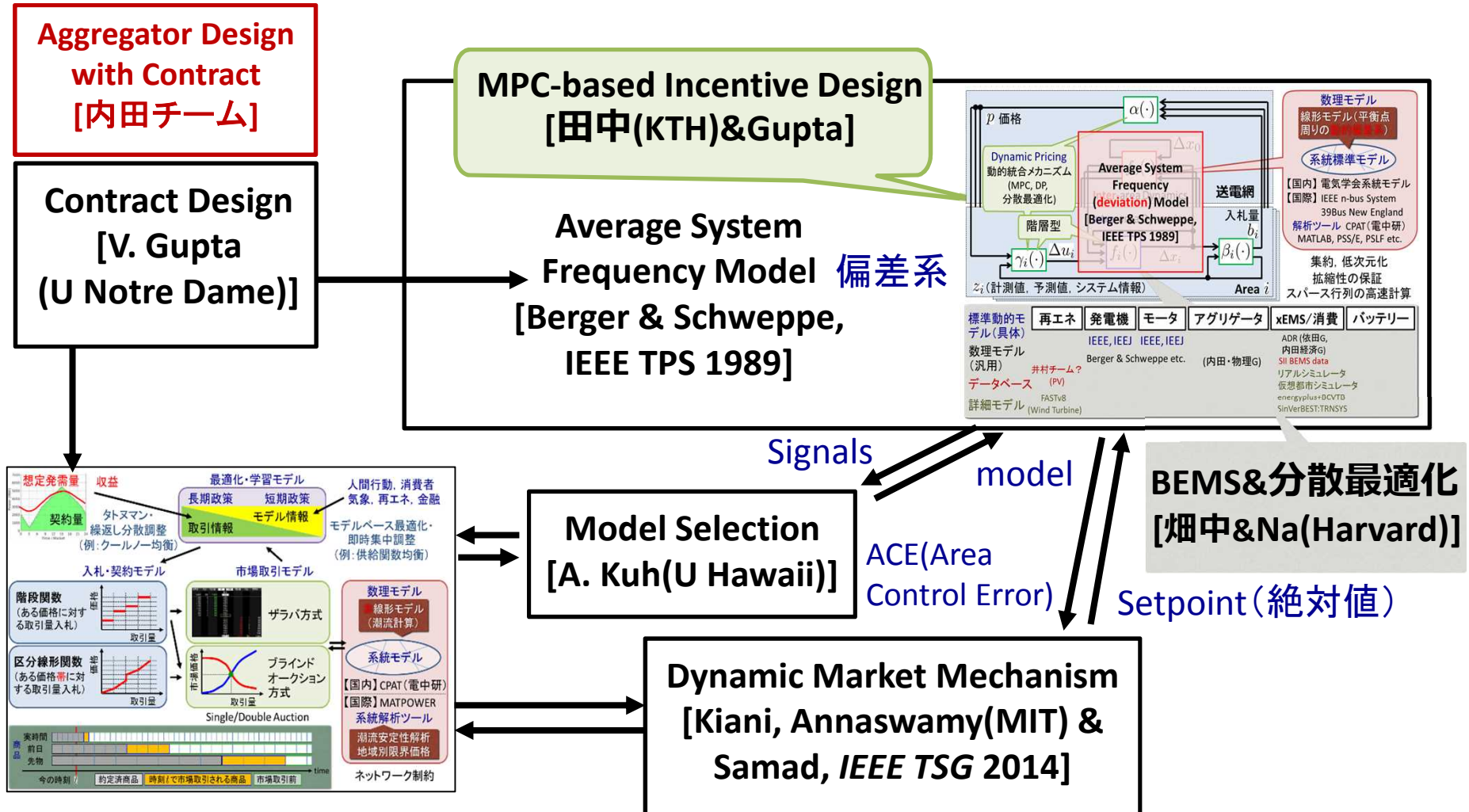
系統解析ツール

潮流安定性解析
地域別限界価格

ネットワーク制約



内田チームシステム構築 シミュレータ上の国際連携



CREST「EMS領域」第8回領域会議
2016年8月29日

ご清聴ありがとうございました

内田チーム