

東大生産技術研究所ESIシンポジウム  
Web開催

# 分散型ビル空調機群の 大量高速DRの可能性

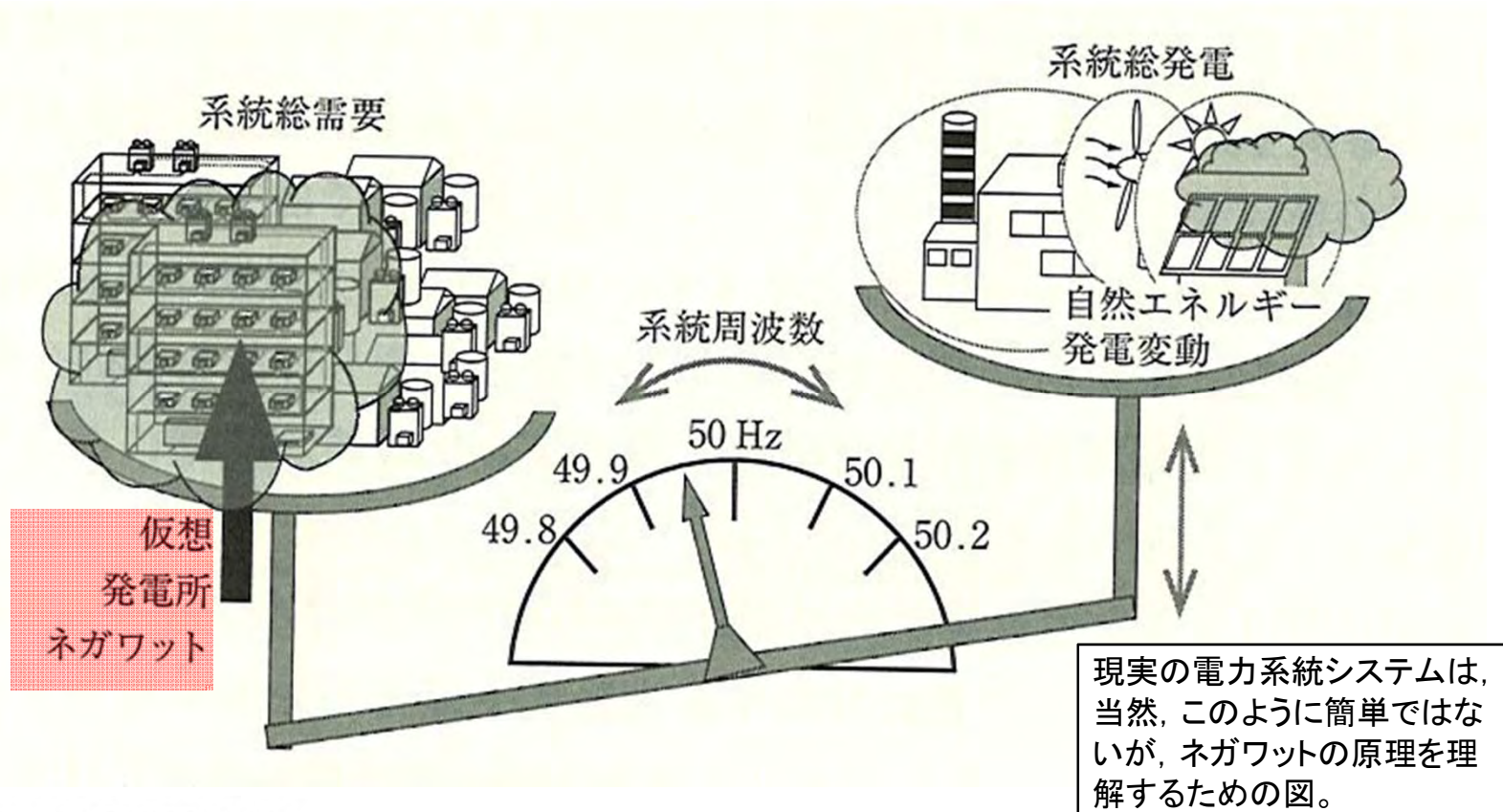
2020年9月3日(木)

岐阜大学工学部  
スマートグリッド電力制御工学共同研究講座  
特任教授 蜷川忠三

# ビルマルチ空調機のFastADR

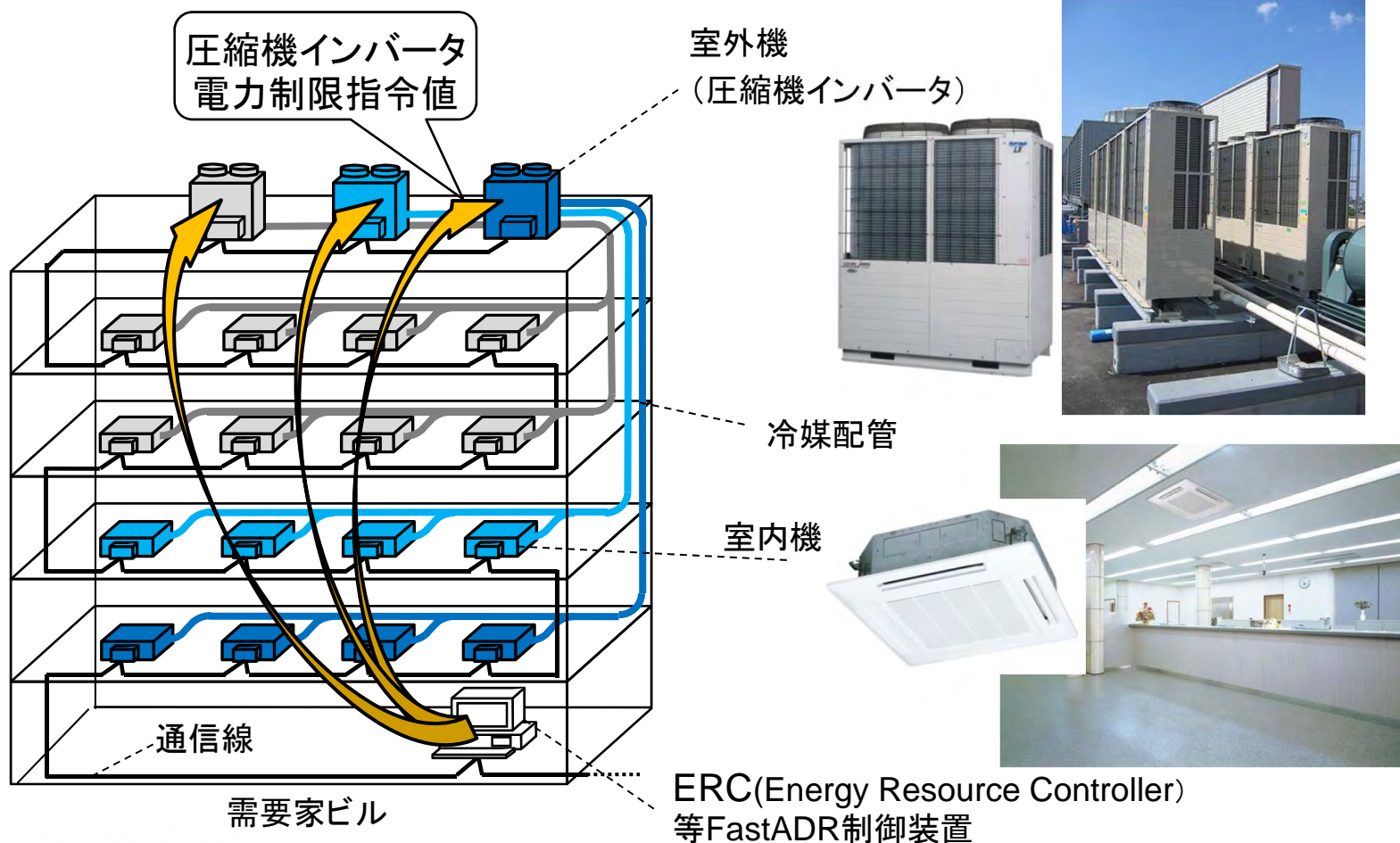
# デマンドレスポンスとは

- 「デマンド」とは電力系統側からみた需要。従来の「デマンド制御」を動的, 精密にしたもの。
- 再エネ発電の大量導入で系統バランスが困難になっている。系統側の要請により設備電力を一時的に抑制することが, 「デマンドレスポンス」(Demand Response: DR)である。
- さらに, 大量のDRを集約制御して「ネガワット発電」として機能させるのが, 「仮想発電所」(Virtual Power Plant: VPP)というICTシステムである。



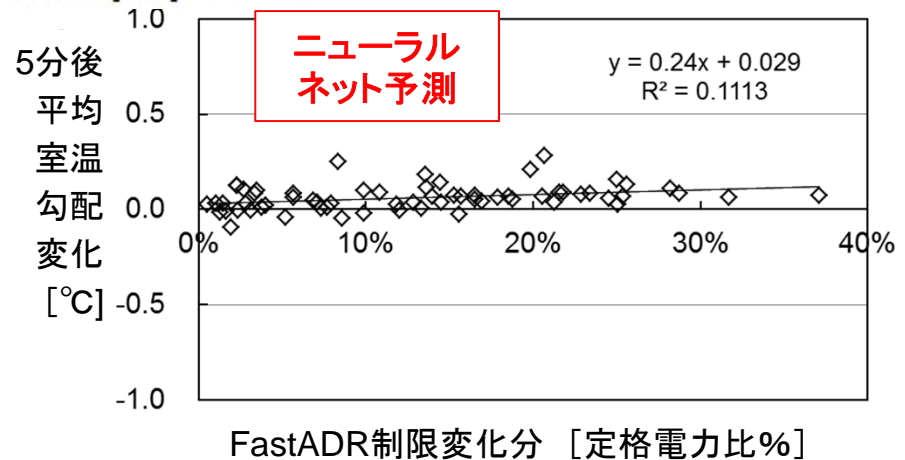
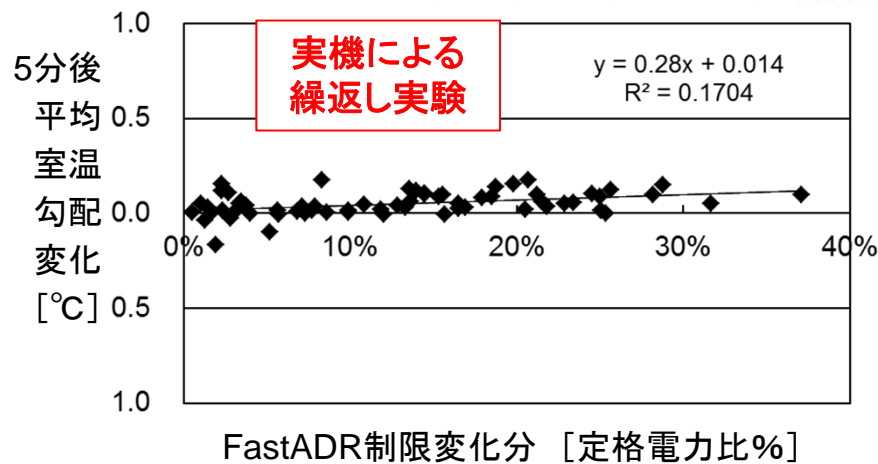
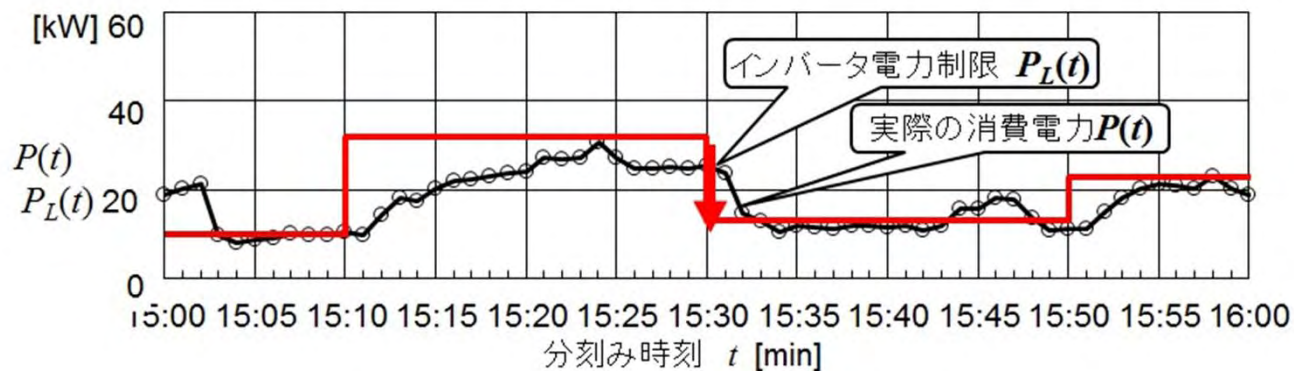
# ビルマルチ空調機のインバータ電力制限FastADR

- 建物蓄熱を活かして、室温を悪化させない程度の**浅く短いFastADR (Fast Automated Demand Response)**を大量にアグリゲートすることが生きる道。
- それには、高速応動と室温維持をめざし、設定温度シフトや運転停止という単純な方法でなく、**室外機の圧縮機インバータに「電力制限指令値」を直接指令して精密電力制御か？**



# 5分間FastADRなら蓄熱効果で室温キープ？

- 典型的な小規模オフィスビル(2階建て延床面積約2000平米)の、実測およびニューラルネットモデルによりFastADRを繰返し、各開始5分後の室温トレンド変化を収集した。
- この例では、壁面のリモコン温度センサーであり、5分間ならDR強度によらず室温トレンド変化は小さかった。(建物の蓄熱効果を観ていることになる?)

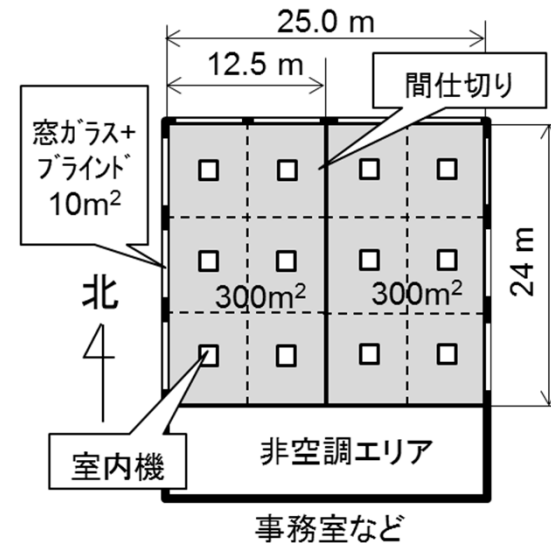
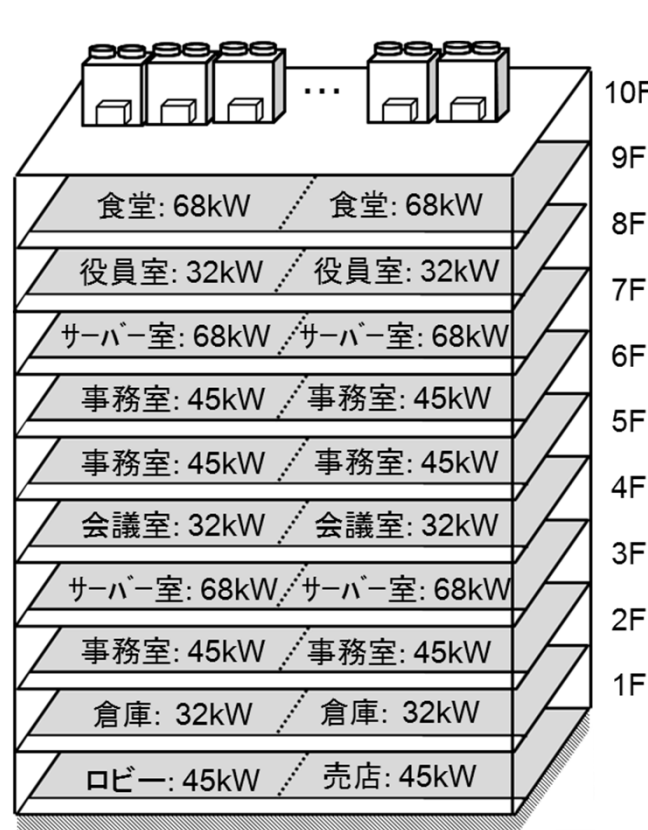


(蜷川ほか:「ビル用マルチ空調機群のFastADRにおける電力制限量配分のための室温副作用予測モデル」, 電気学会論文誌B, Vol. 136, pp.432-438, 2016年)

# ビルマルチ空調FastADR 不確実性エミュレータ

# 仮想ビルマルチ空調機群のエミュレータ「BEM」

- ビルマルチ空調機設置のベースとして、仮想ビルモデルBEM1 (Building Emulator 1)を構築し、それをベースに異なるビルのバリエーションをBEM1, BEM2, ...と作ることができる。
- 現状では、機器組込み制御、通信遅れ、室温許容限界などの不現実性はモデル化した<sup>が</sup>、**居住者の不現実な行動由来の不現実性はモデルに含めていない。ここが課題。**

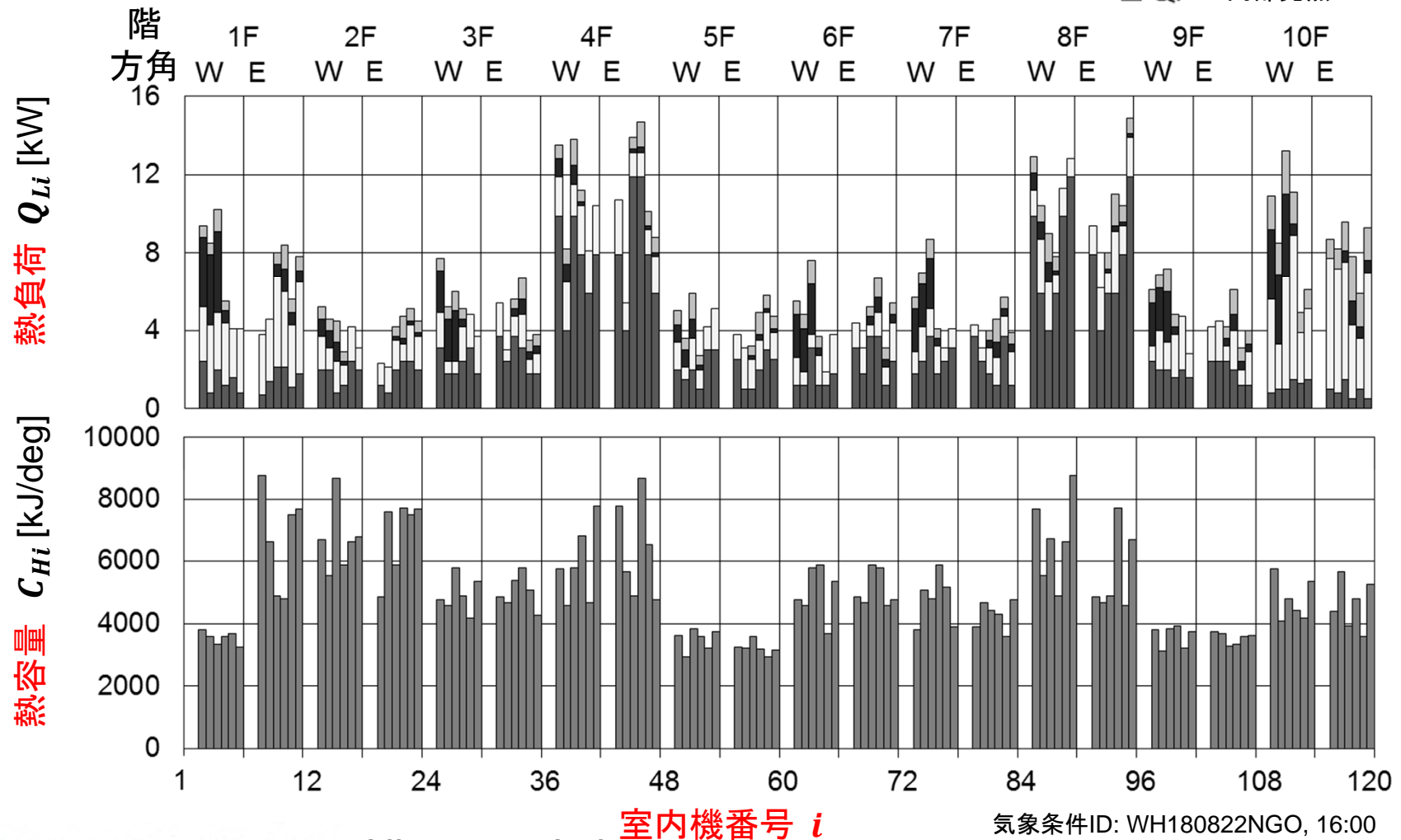


仮想ビルBEM1の空調ブロック構成は、20台のビルマルチ空調機エミュレータAE群から構成される。室外機は、32kW×6台、45kW×8台、68kW×6台の合計20台。それに接続される室内機は、各6台×20ブロック＝合計120台。

# 仮想ビルBEMの熱負荷バリエーション

- 室外機20台の電力と, 室内機120台の熱収支にバリエーション。
- 気象条件: 典型的夏日の夕刻(外気温34°C, 快晴, 16:00)
- 部屋毎に熱負荷は3倍, 熱容量は2倍のバリエーションがある。

- QO : 貫流熱負荷
- QR : 日射負荷
- QV : 換気負荷
- QI : 内部発熱

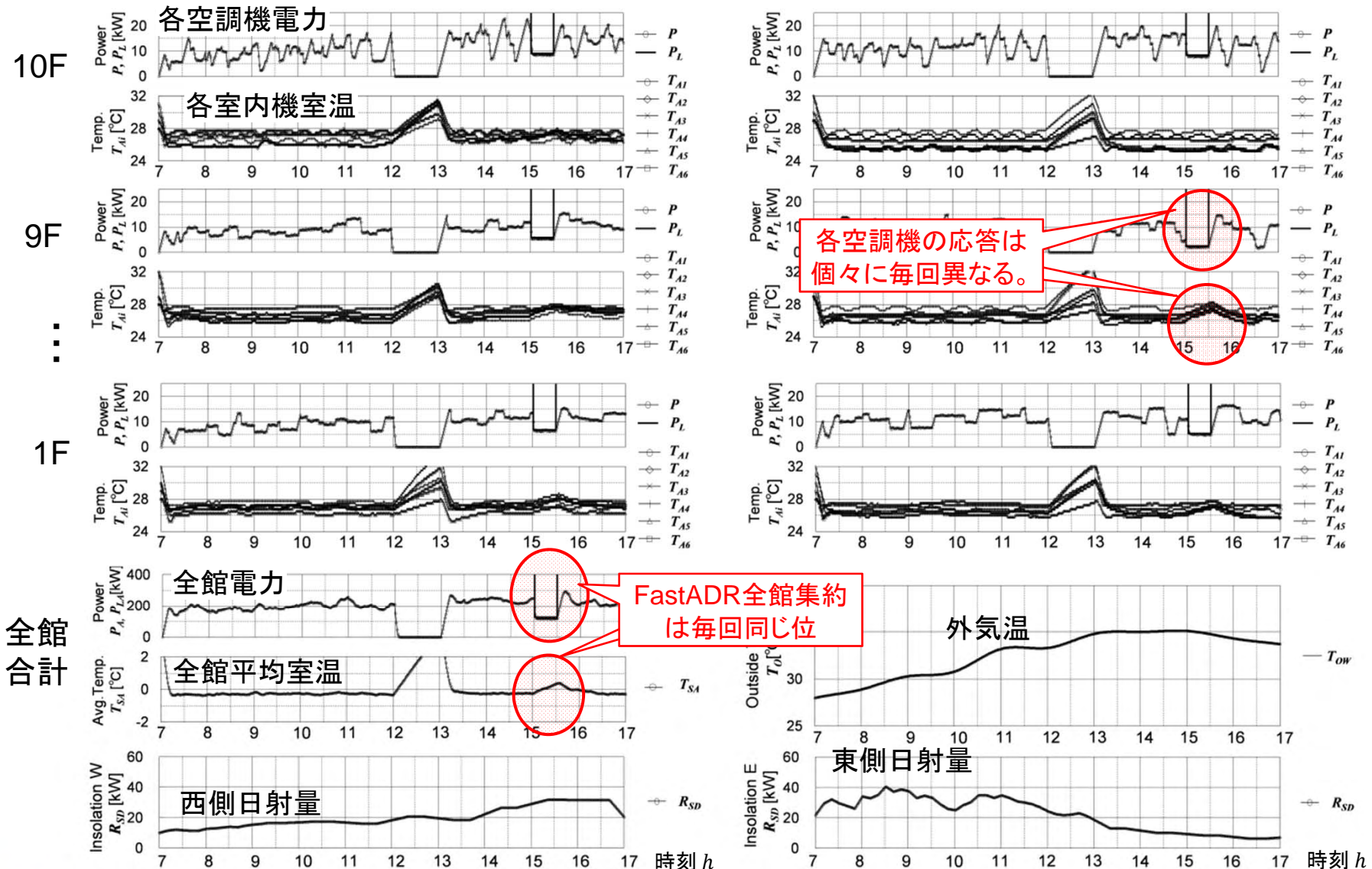


気象条件ID: WH180822NGO, 16:00



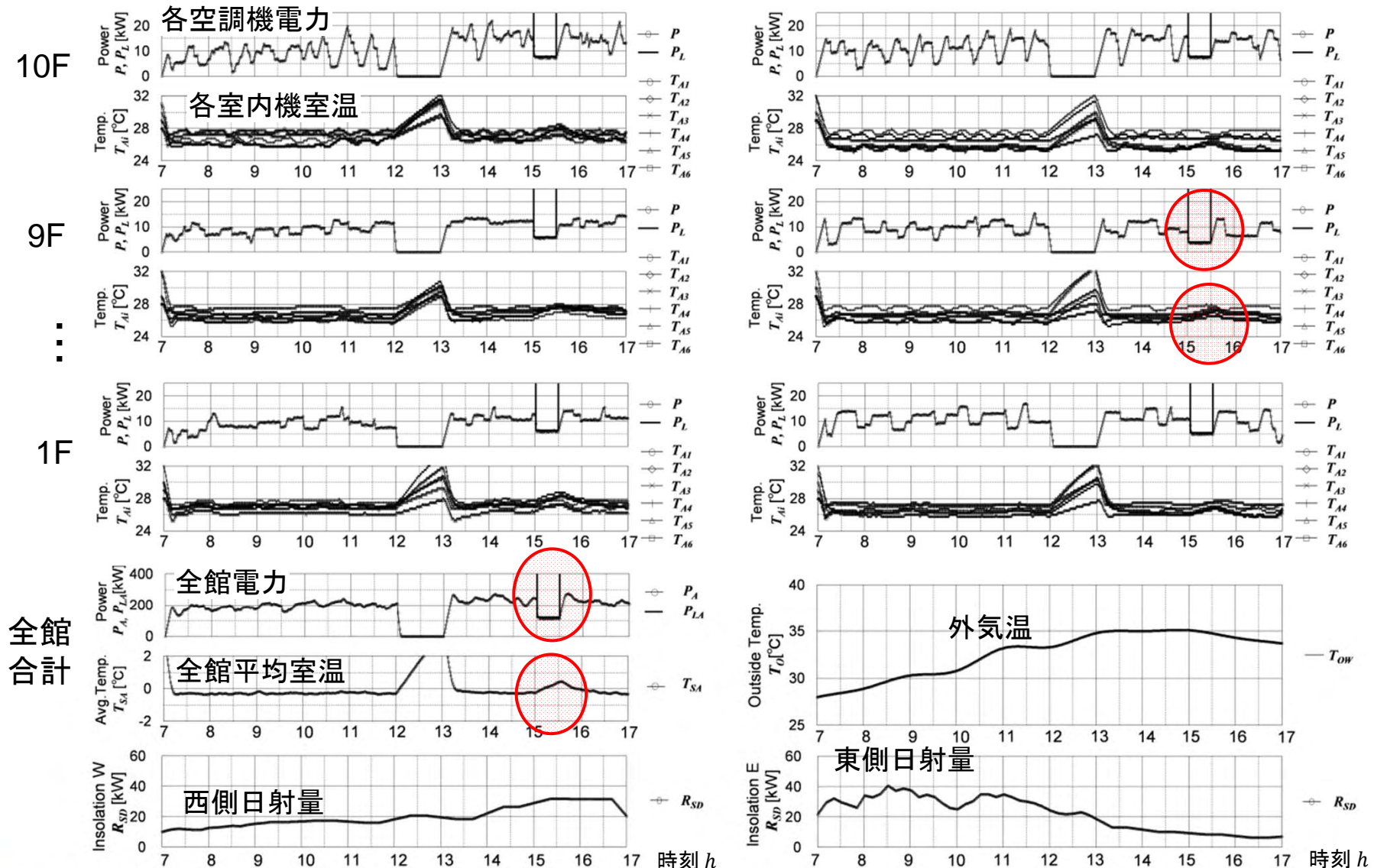
# 仮想ビルBEMのシミュレーション繰返し試行(1回目)

■ BEM1に16時にDRをかけて全日シミュレーションを繰返し試行。不確実性とバラツキをみた。



# 仮想ビルBEMのシミュレーション繰返し試行(2回目)

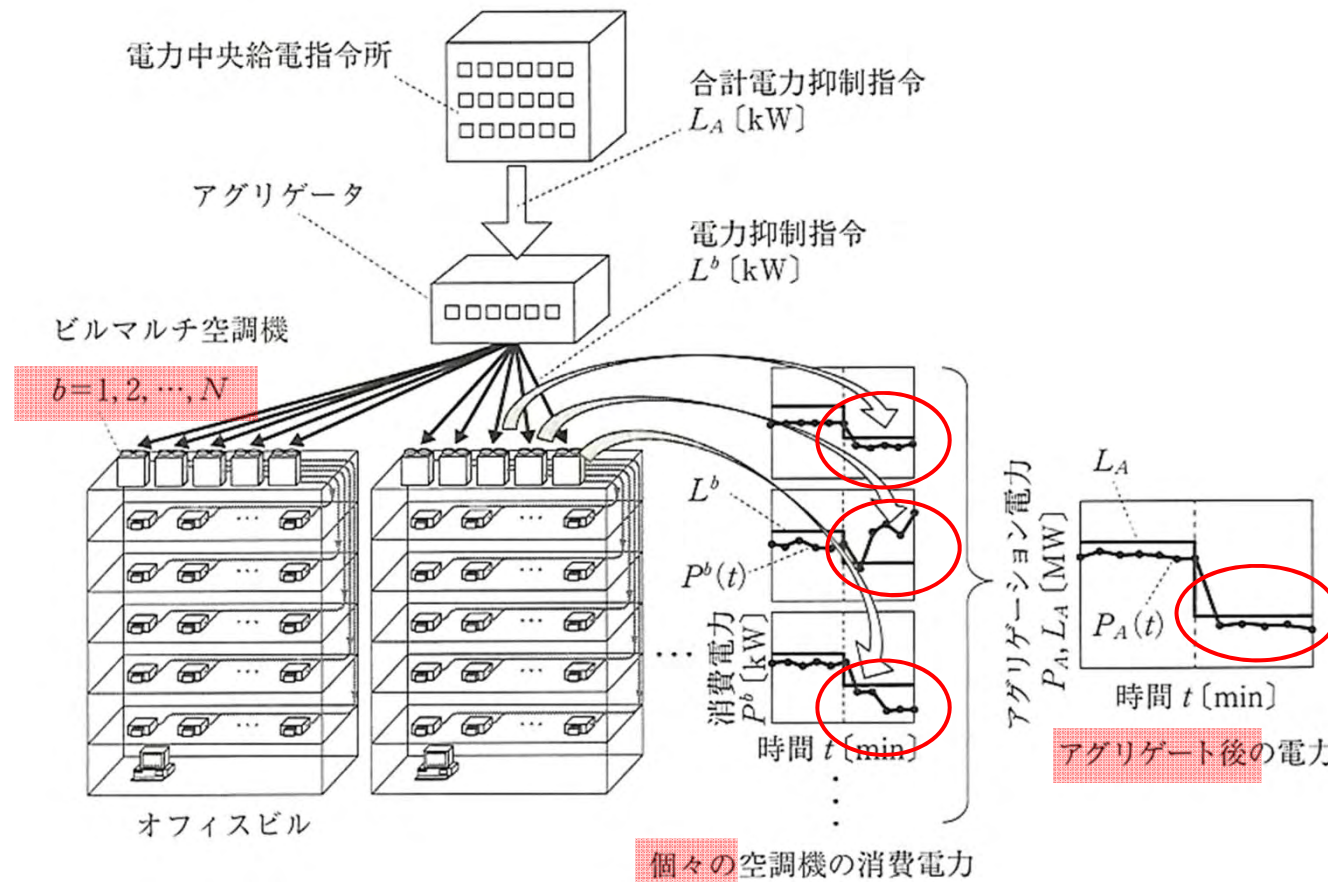
■ BEM1に16時にDRをかけて全日シミュレーションを繰返し試行。不確実性とバラツキをみた。



# FastADR大量アグリゲーション

# 大量アグリゲーションFastADRの不確実性の緩和

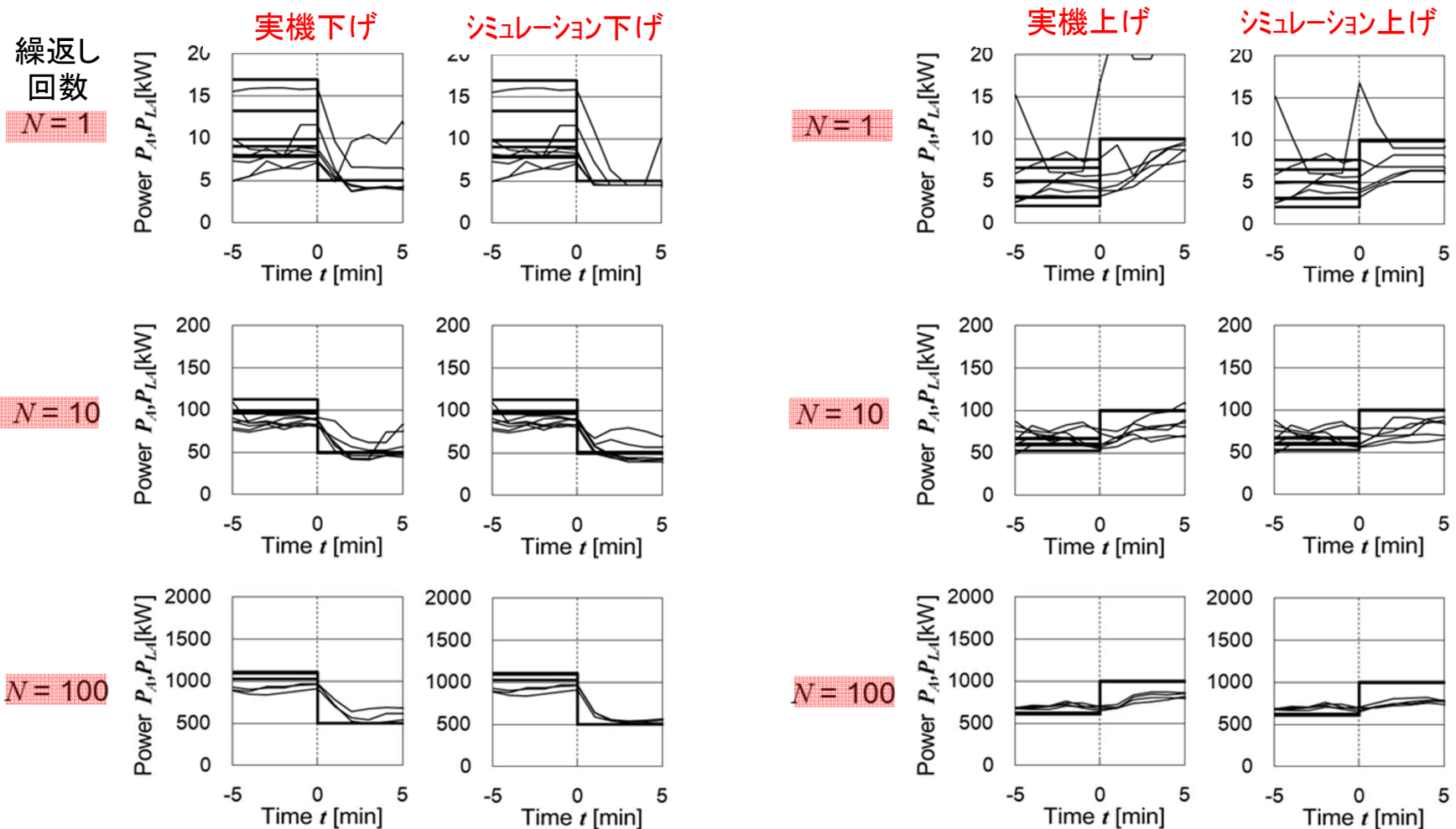
- 現状, ビルマルチ空調DRは仮想発電所には不確実とされている。しかし, 室温変化しない5~10分FastADRを何千台と大量アグリゲーションした場合の確率的均し効果に期待。
- 事実, 太陽光発電では一台一台では不確実な発電出力も大量に集約すると, 不確実性が均されていくことは十分に研究されている。



# ビルマルチ空調仮想発電所の不確実動作の均し効果

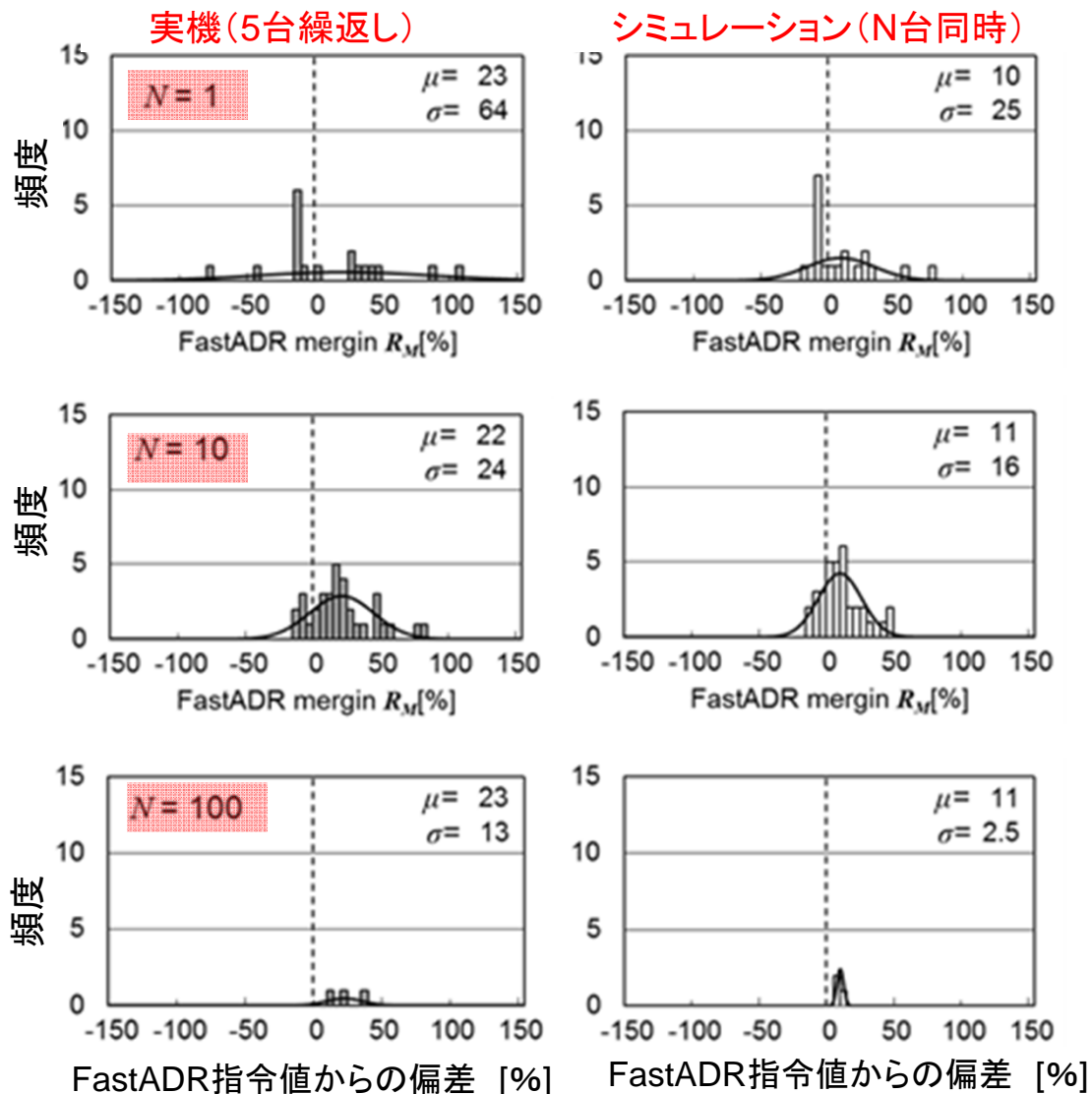
- 仮想発電所シミュレーションに先立ち、個々のビルマルチ空調機応動に不確実応答特性を持たせた上で、アグリゲーションによる均し効果を実機（繰返し加算）と比較しておいた。

(C. Ninagawa, et al., "Averaging Effect Model on Aggregation Margin of Fast Demand Responses of Building Multi-type Air-conditioners", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2019, pp.1274-1279, Melbourne, 2019)



# FastADRアグリゲーション実績値の均し効果

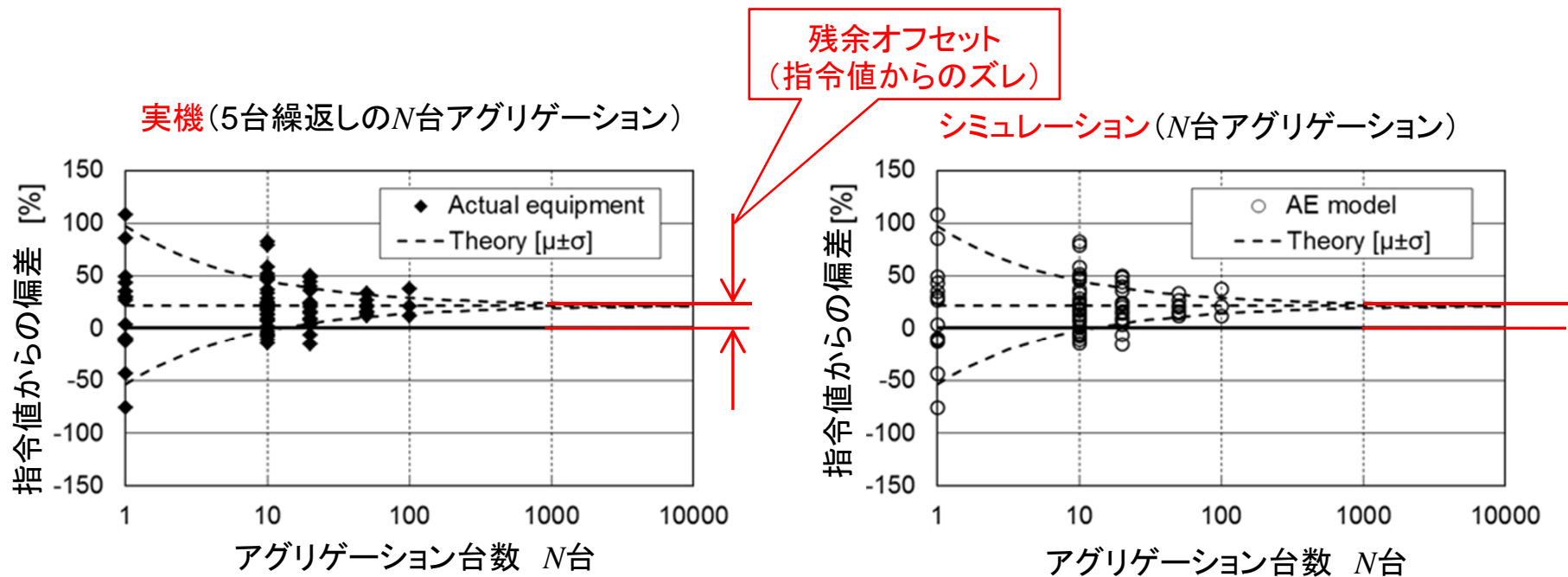
- 実績値の指令値からの差分分布を、実験とシミュレーションで比較。正規分布に近づく。



(C. Ninagawa, et al., "Averaging Effect Model on Aggregation Margin of Fast Demand Responses of Building Multi-type Air-conditioners", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2019, pp.1274-1279, Melbourne, Australia, 2019)

# FastADRアグリゲーションと残余オフセット

- バラツキはアグリゲーション台数が100台～1000台近くなると、不確実性はほとんどOK。  
(もちろん、人為的な操作による不確実性は残るが……。)
- ただし、FastADR指令値に対するアグリゲーション実現値の偏差(オフセット)は、何台アグリゲーションしようと減少していかない。(ただし予測可能であろう)

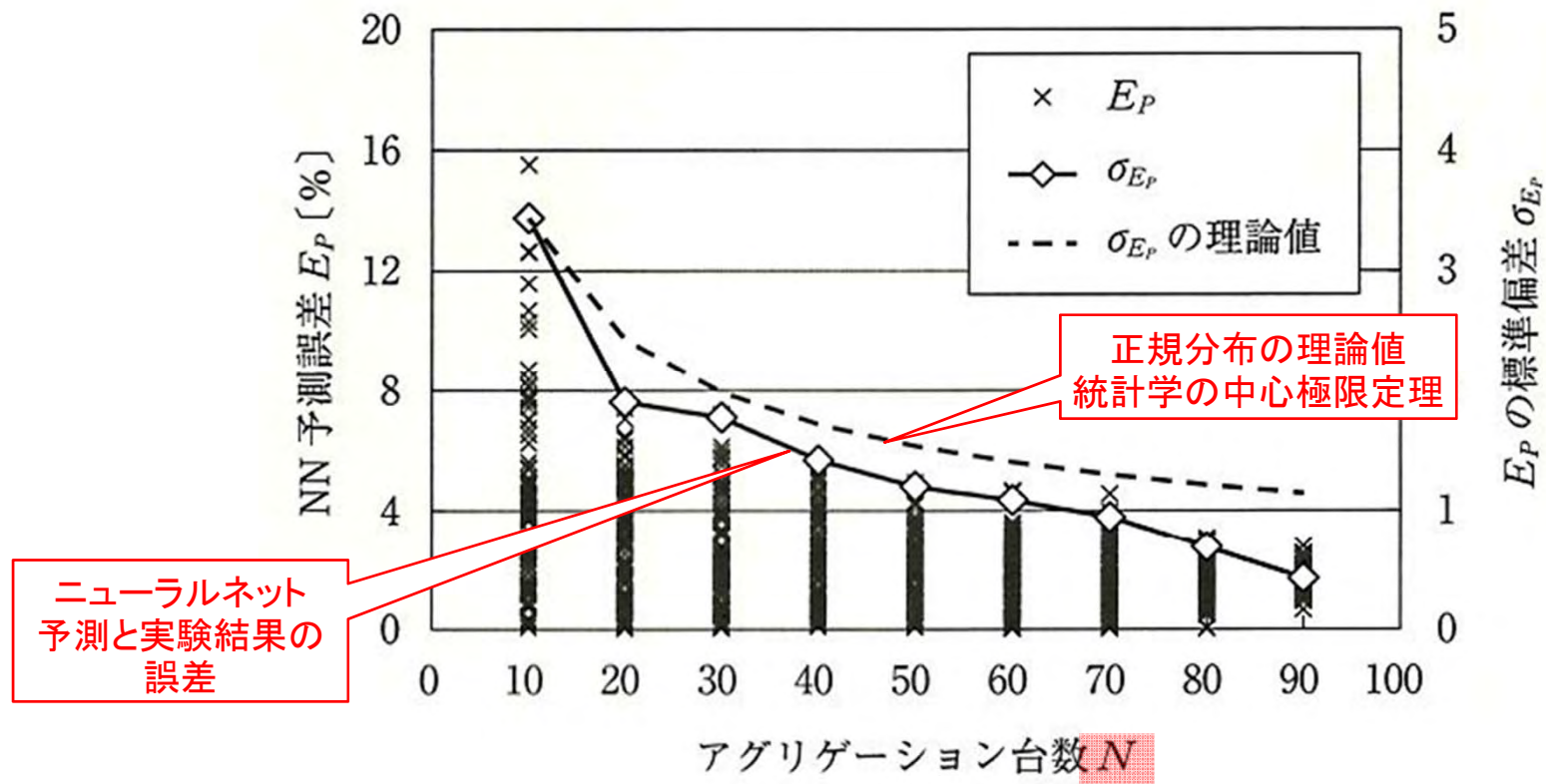


(C. Ninagawa, et al., "Averaging Effect Model on Aggregation Margin of Fast Demand Responses of Building Multi-type Air-conditioners", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2019, pp.1274-1279, Melbourne, Australia, 2019)

# FastADRアグリゲーション予測誤差も均される

- FastADR発令直前に、個々のビルマルチ空調機の電力抑制量をニューラルネット(NN)で予測して、予測誤差におけるアグリゲーション台数による均し効果を評価した実機実験例。
- 予測バラツキの標準偏差の減少率が理論値である $1/\sqrt{N}$ に近い結果となった例。統計学の中心極限定理で解釈できる。

(C. Ninagawa, et al., "Prediction of Aggregated Power Curtailment of Smart Grid Demand Response of A Large Number of Building Air-conditioners", IEEE International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems Dubai, 2016)





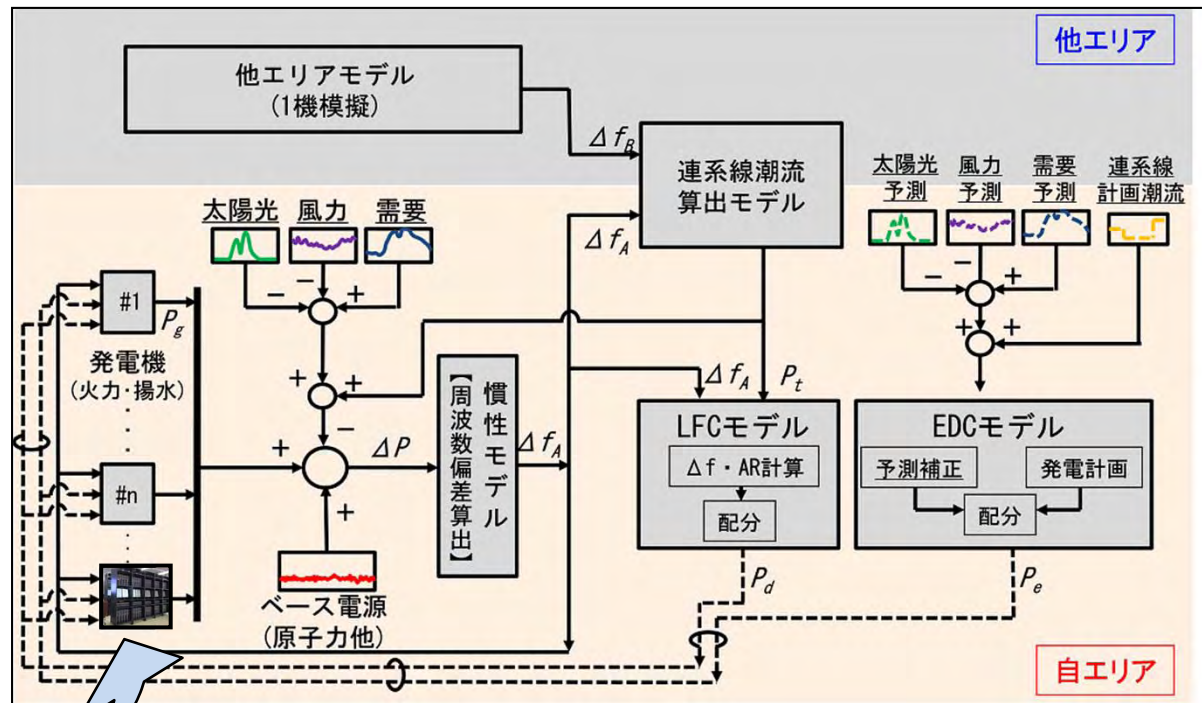
# ビルチ空調仮想発電所への可能性 (応動速度)

# ビルマルチ空調仮想発電所の電力系統シミュレーション

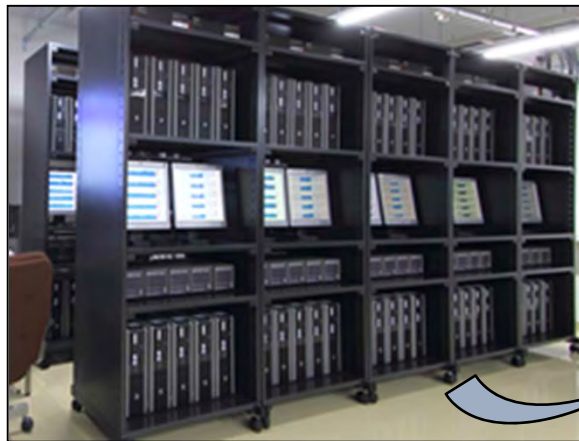
- 電気学会電力系統シミュレータ「AGC30」と、蜷川研ビルマルチ空調FastADRシミュレータを接続。
- ビルマルチ空調機群のFastADRアグリゲーション応動速度を調べる。

(蜷川他:「大規模ビルマルチ空調設備群の高速デマンドレスポンス集積による仮想発電所の可能性」, 電気設備学会論文, Vol. 39, 2019年)

## 電気学会電力系統シミュレータAGC30をリアルタイム化



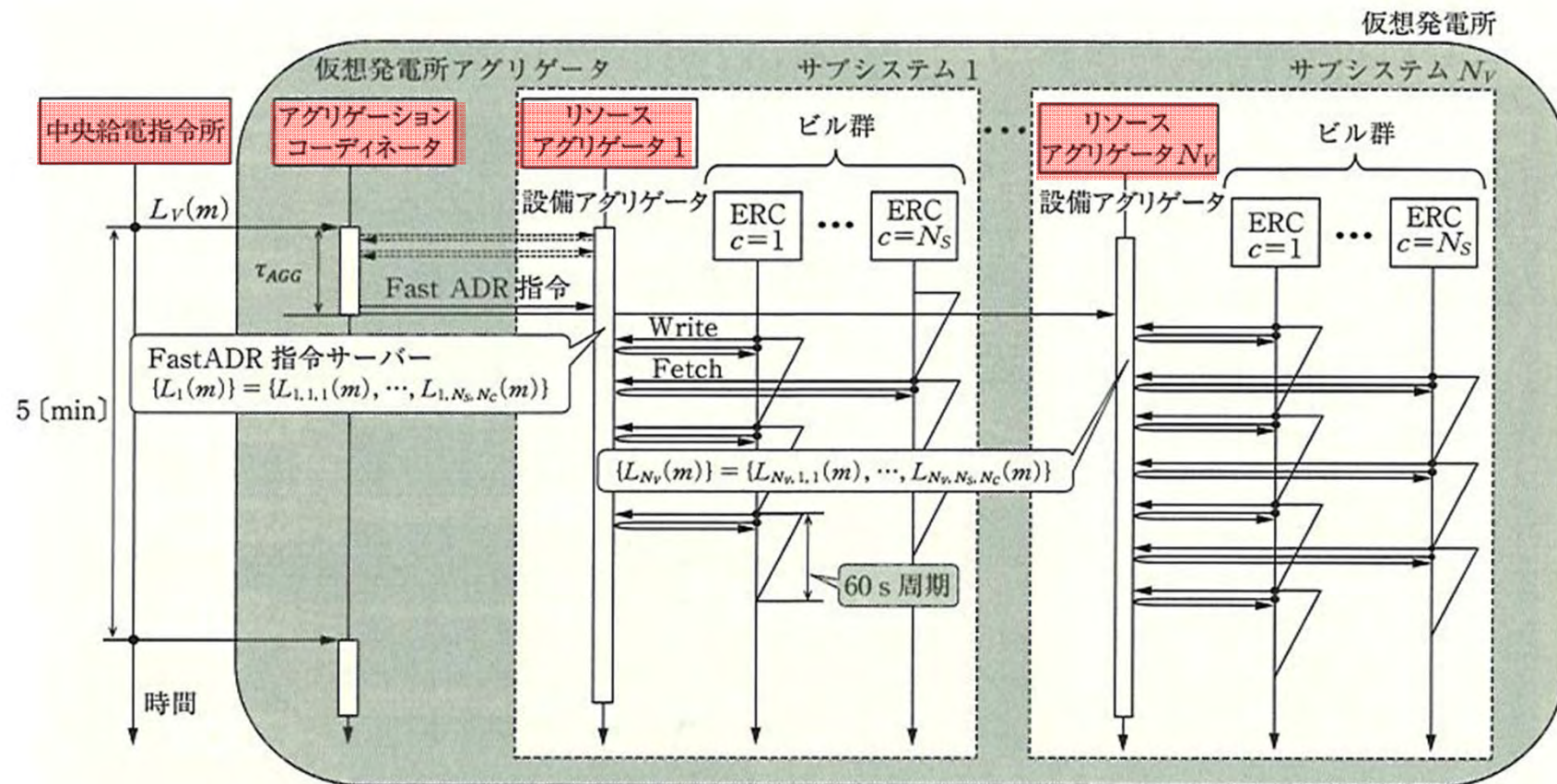
蜷川研FastADRシミュレータ  
リソースアグリゲータ20社  
各社ビル20棟管理(合計400棟)  
ビルマルチ空調機総合計6500台



FastADR シミュレータ と1秒間隔でリアルタイムに電力値を渡す。

# ビルマルチ空調仮想発電所のリアルな通信モデル化

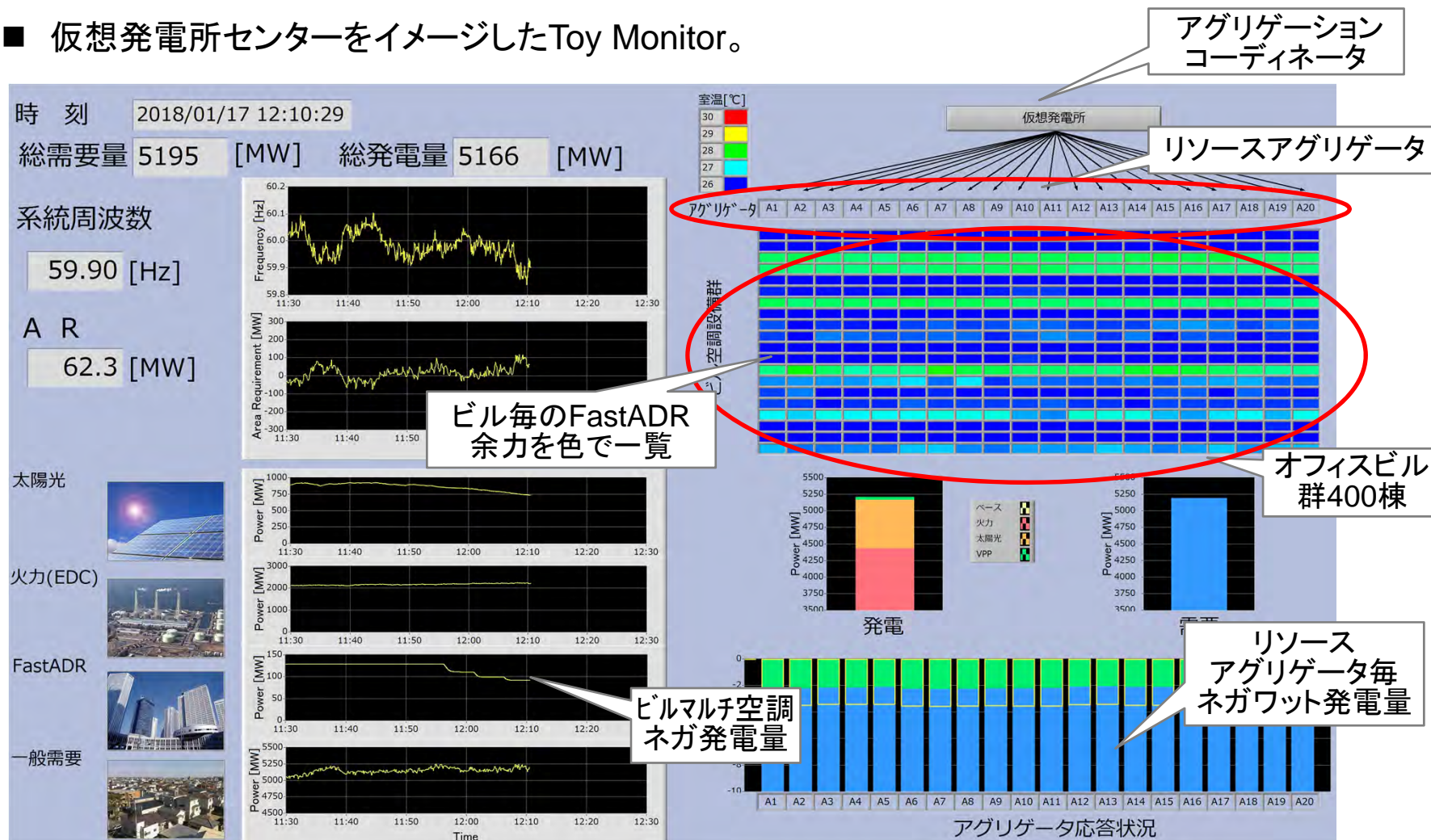
- FastADR自身は高速だが、事前の手続きに何往復もの通信が必要。系統側は簡易通信を仮定し、需要家側は**実際の通信プロトコル (OpenADRとIEEE1888) を実装して遅れをミュレーション**した。



(蜷川ほか:「大規模ビルマルチ空調設備群の高速デマンドレスポンス集積による仮想発電所の可能性」, 電気設備学会論文, Vol. 39, pp.20-28, 2019年)

# ビルマルチ空調仮想発電所のToy監視画面

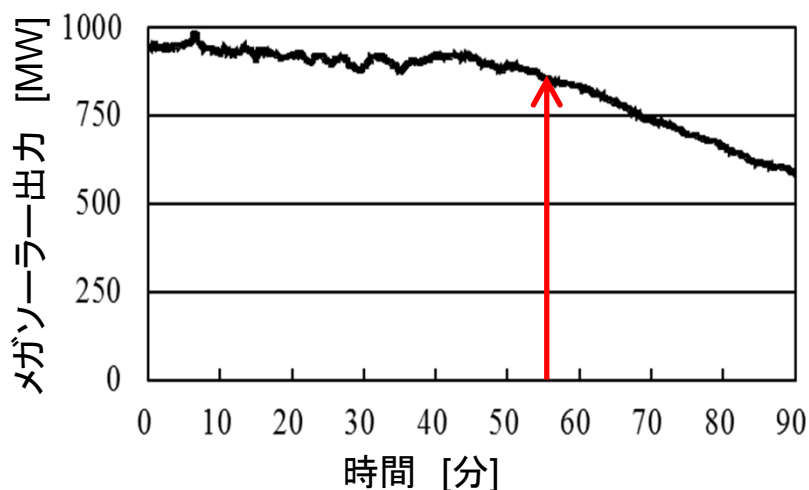
- 蛭川研の仮想発電所システム監視制御画面。リソースアグリゲータ20社, ビル400棟, ビルマルチ空調設備(室外機)6500台。
- 仮想発電所センターをイメージしたToy Monitor。



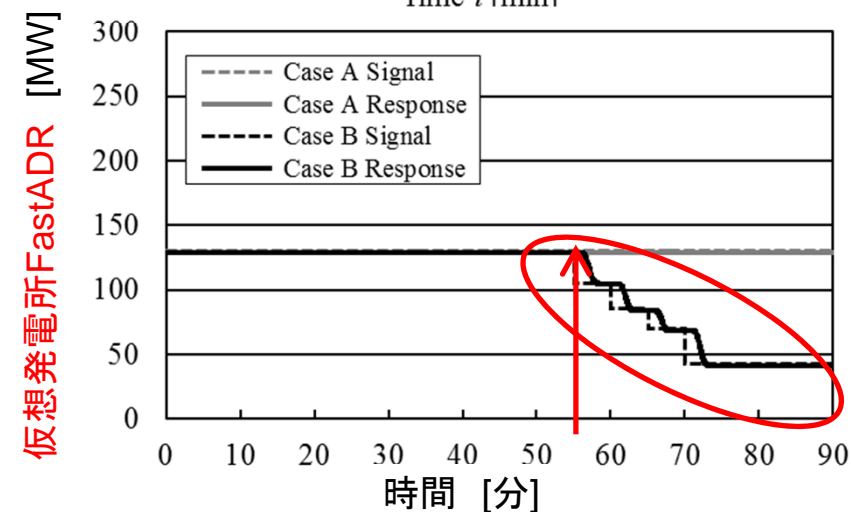
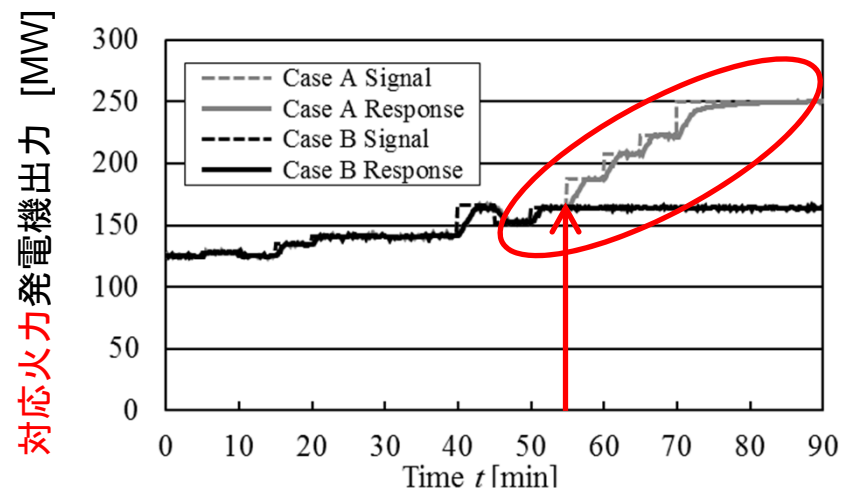
岐阜大学蛭川研究室のビルマルチ空調機群FastADR仮想発電所システムの監視画面

# ビルマルチ空調仮想発電所システムの応動性

- EDC制御として5分毎約20MWずつ加速応動性をAGC30のGTCCと比較した。ビルマルチ空調FastADRアグリゲーションの広域通信による応動は1~2分位かかると思われる。
- ただし、今回は居住者Opt-Outを考慮しておらず、大きな問題が残っている。短時間FastADRをローテーションする等、Opt-Outをさける工夫が現実問題としては大きい。

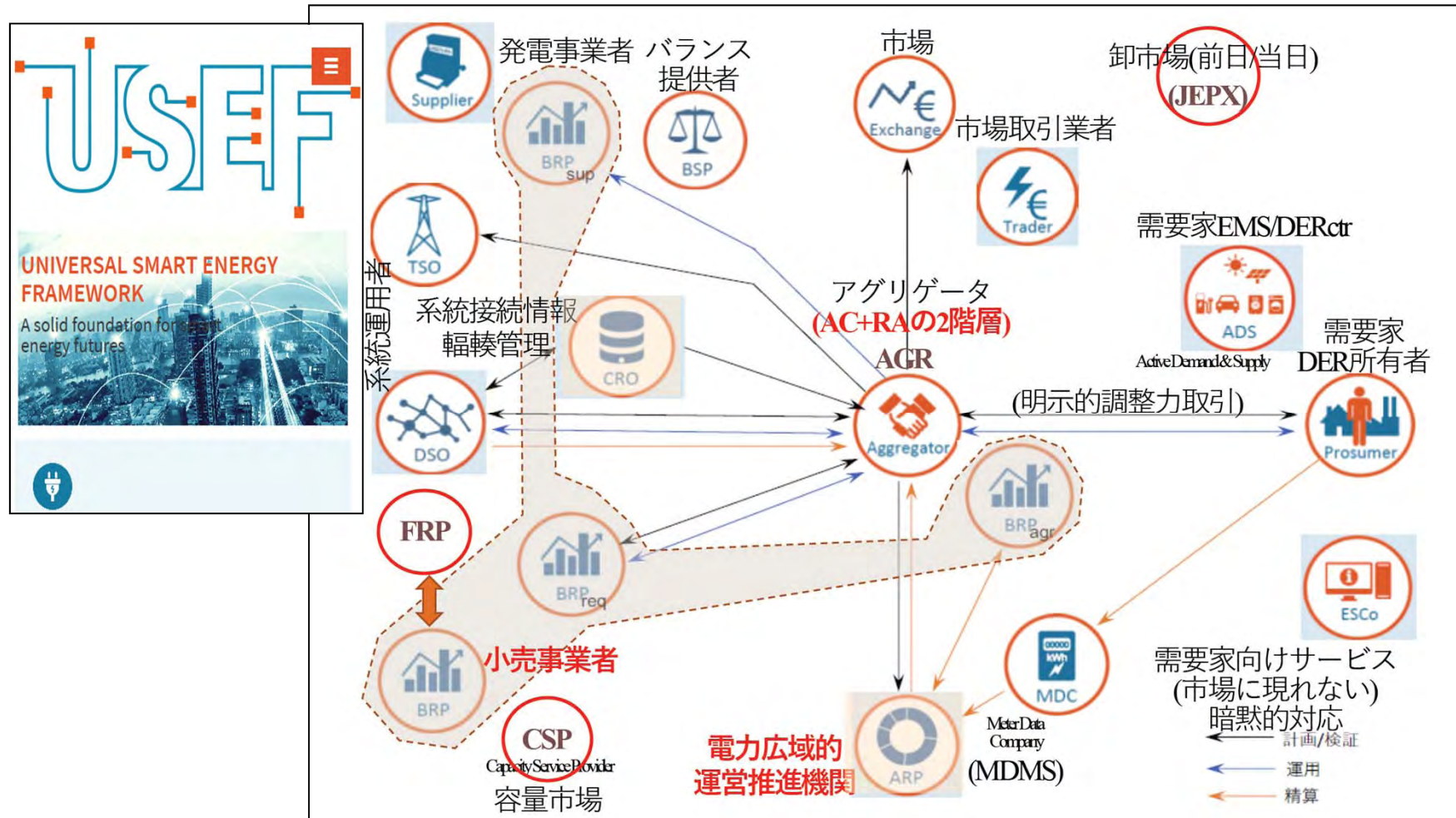


(蟠川ほか:「大規模ビルマルチ空調設備群の高速デマンドレスポンス集積による仮想発電所の可能性」, 電気設備学会論文, Vol. 39, pp.20-28, 2019年)



# 欧州における系統側手続き標準化の検討: USEF

- Universal Smart Energy Foundation (ABB, IBMなど7団体のNon Profit 活動)
- 系統側における, 電力市場, 系統運用者, 需要家等との連携・調整・取引の標準化。

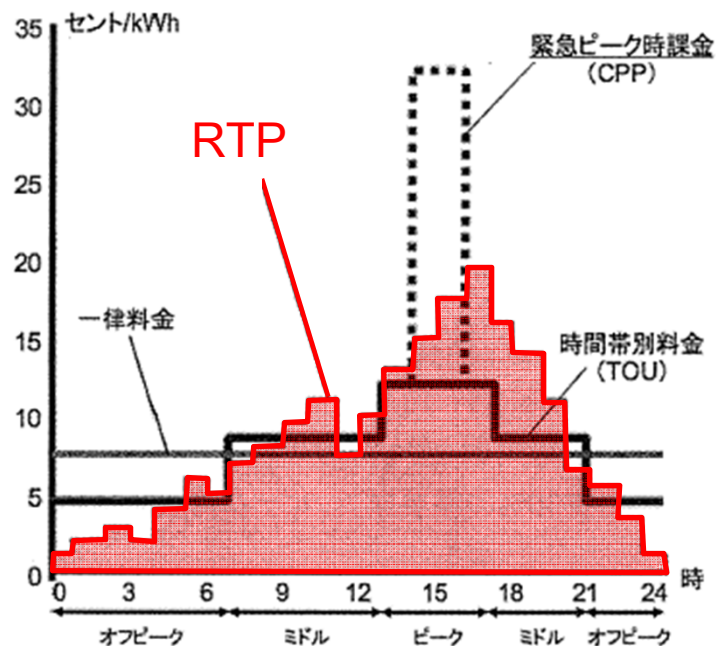


# リアルタイム電力料金FastADR制御

# リアルタイム電力料金制度 (RTP: Real-Time Pricing)

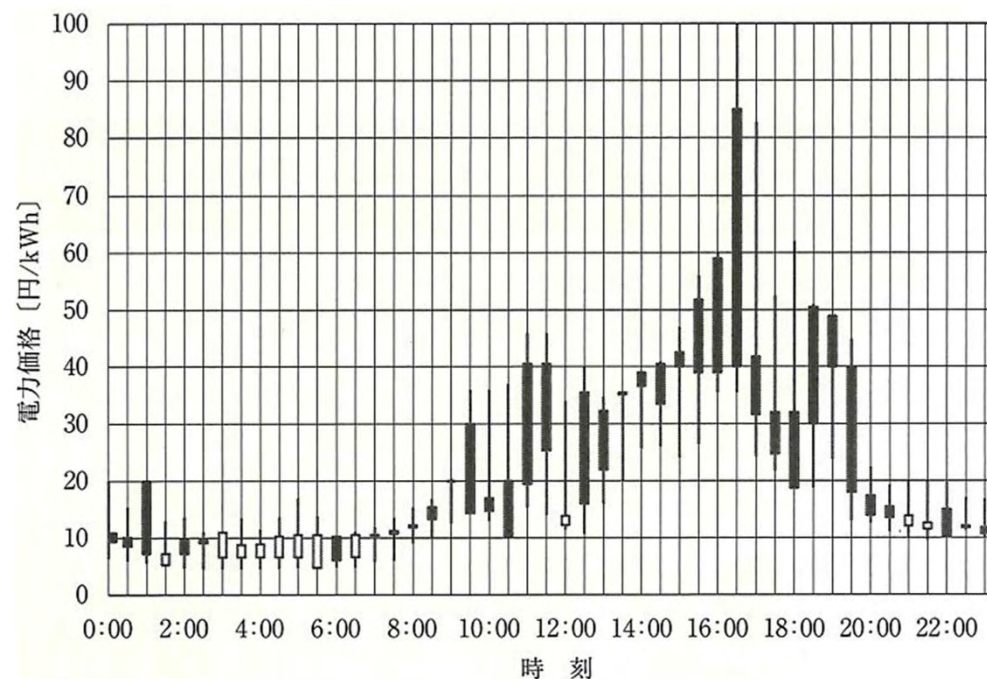
- デマンドレスポンスには、インセンティブ型と、価格型があり、RTPは価格型の最先端。
- FastADRであれば、リアルタイム電力料金制度に対応した省エネ制御の可能性がある。

米国PJMにおけるRTPの例 (※)



電力中央研究所：「米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状」より引用

RTPではないが、卸電力市場価格の例

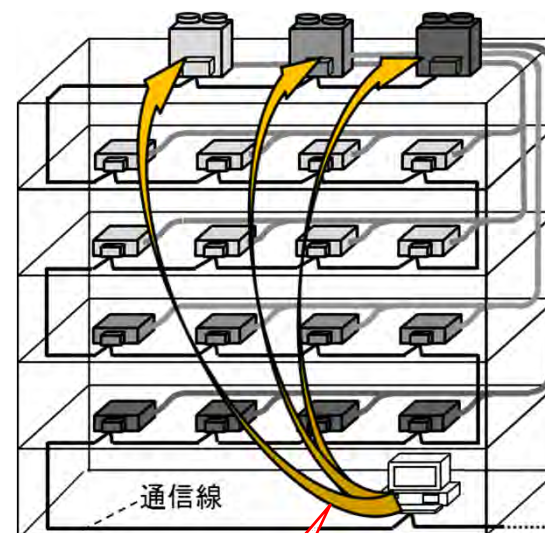
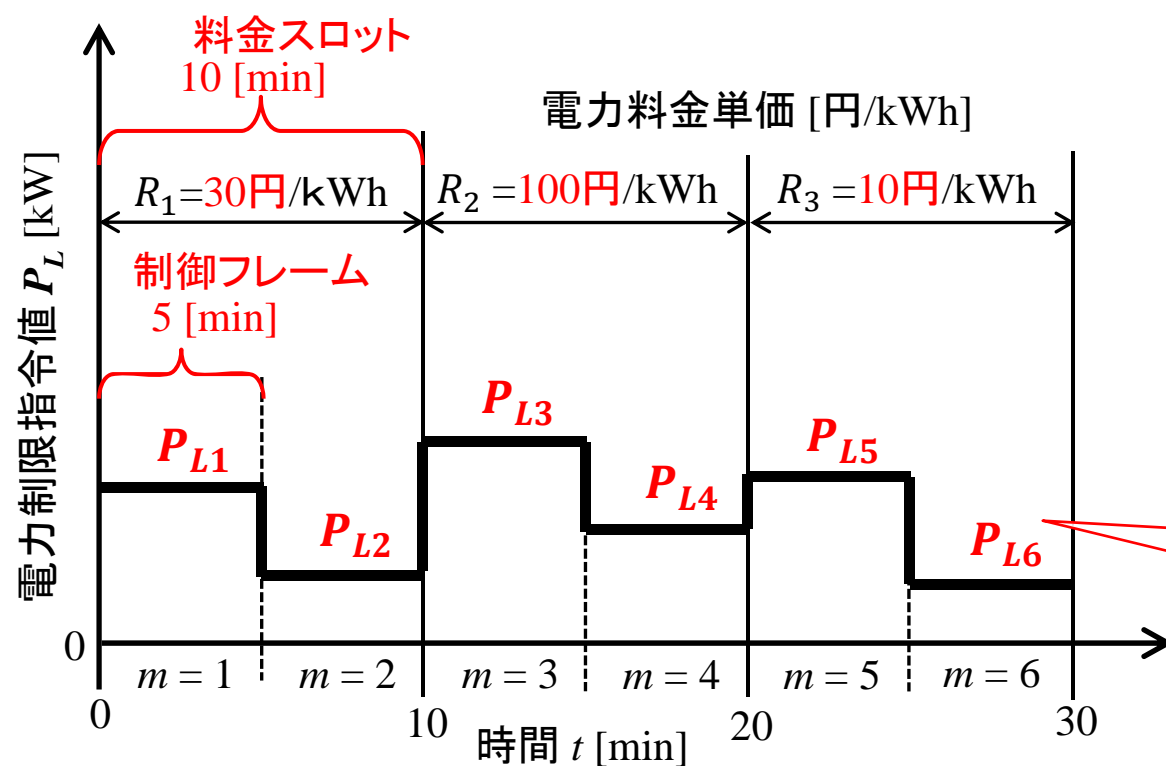


JEPXの1時間前市場の実際の取引 (2018年8月6日)



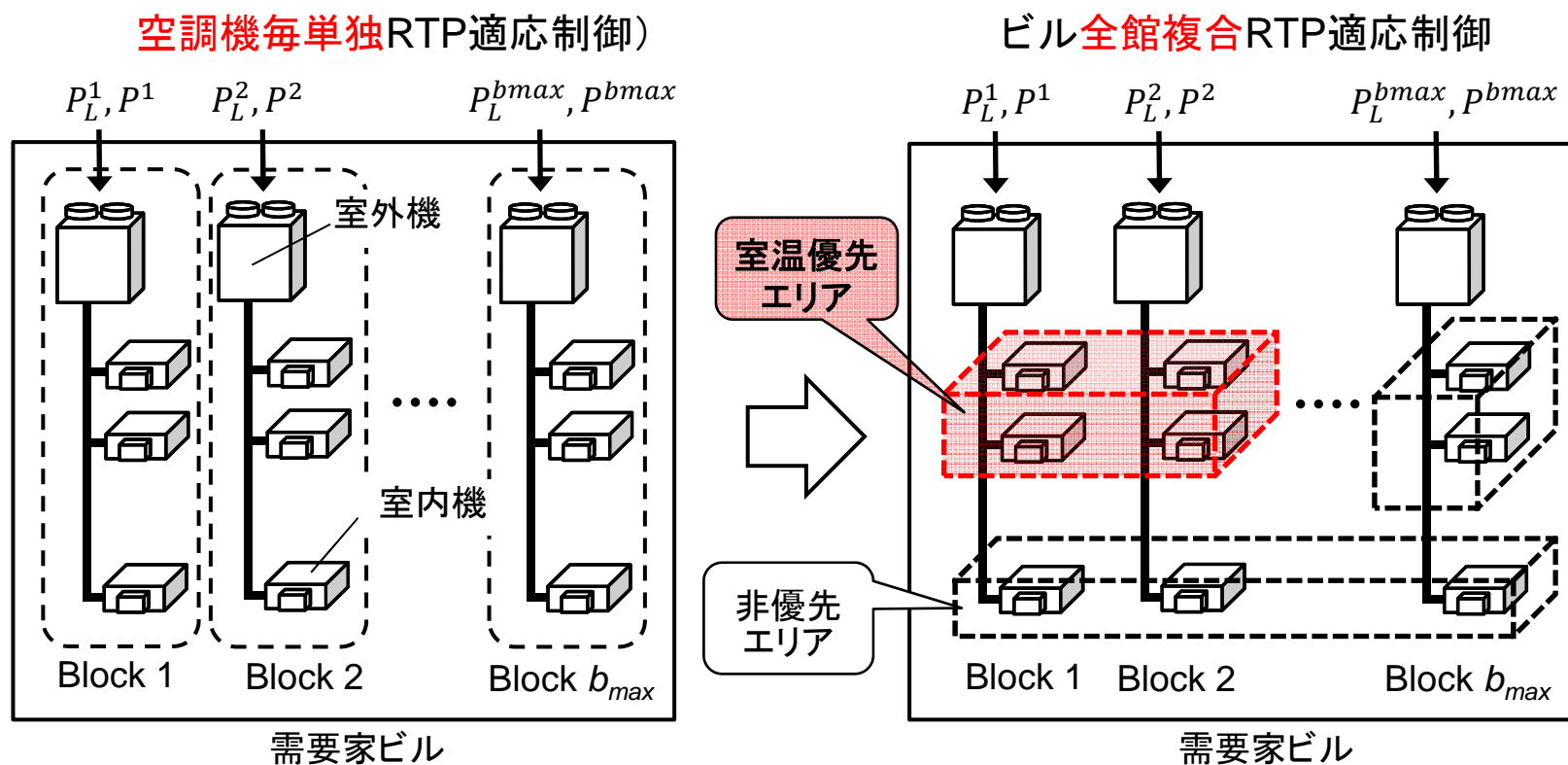
# リアルタイム電力料金に適応するFastADR制御

- 電力料金単価は10分毎に変動, 電力制限指令値は5分毎にFastADR制御指令する。
- RTP適応制御アルゴリズムは, 将来の電力料金単価パターンと電力, 室温応答予測値に基づき,  $m_{max}$  フレーム先までの電力制限指令値の候補順列を計画する。



# リアルタイム電力料金対応省エネと室温維持のトレードオフ

- 先行研究の単独RTP適応制御では空調機毎に室温管理する。
- 本研究の複合RTP適応制御では空調機をまたがる空調エリアを定義して、空調エリア毎に優先/非優先を設定可能とし、全体最適省エネ制御。



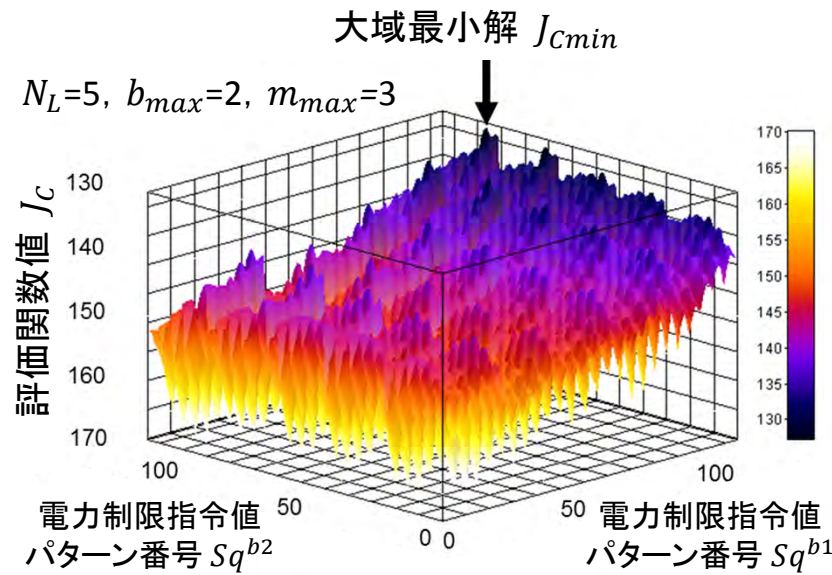
# 評価関数空間のヒューリスティック最適探索

- 評価関数は分布が未知の確率変数の線形和で構成されているので、ビルの規模、すなわち室外機台数 $b_{max}$ を大きくしていくと中心極限定理により正規分布に近づくはずである。
- よって、実用的な範囲で探索打ち切り判断可能であり、大規模ビルにも適用できる。

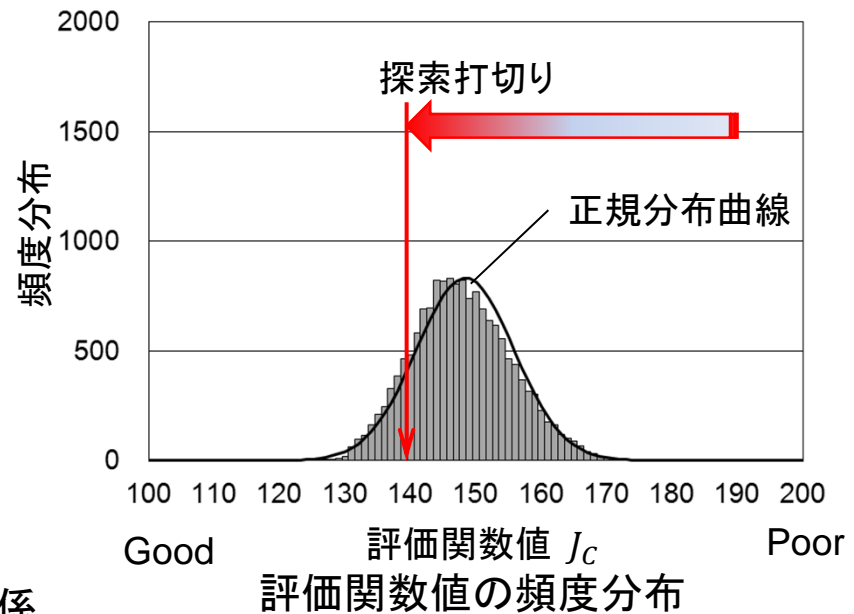
リアルタイム消費電力                      優先度付きエリア室温                      全館許容電力量

評価関数:  $J_C = \alpha \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{b=1}^{b_{max}} R(m) \tilde{W}_5^b(m) + (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{a=1}^{a_{max}} [(1 + \beta^a) \tilde{T}_{SAs}^a]^2 + \sum_{m=1}^{m_{max}} \gamma \Delta W_5^{all}$

(ペナルティ)



電力制限指令値のパターンと評価関数値の関係



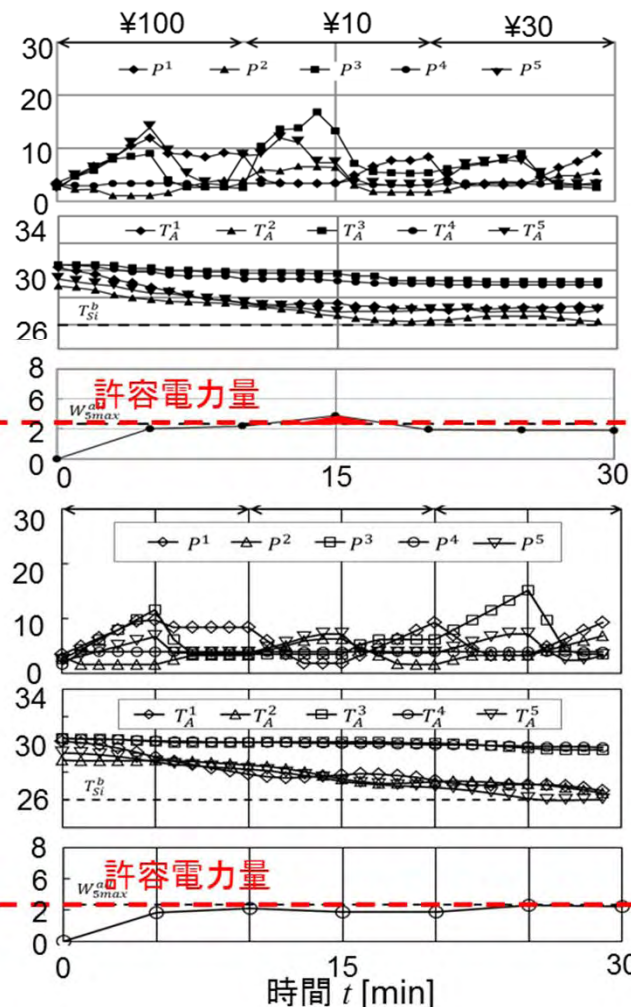
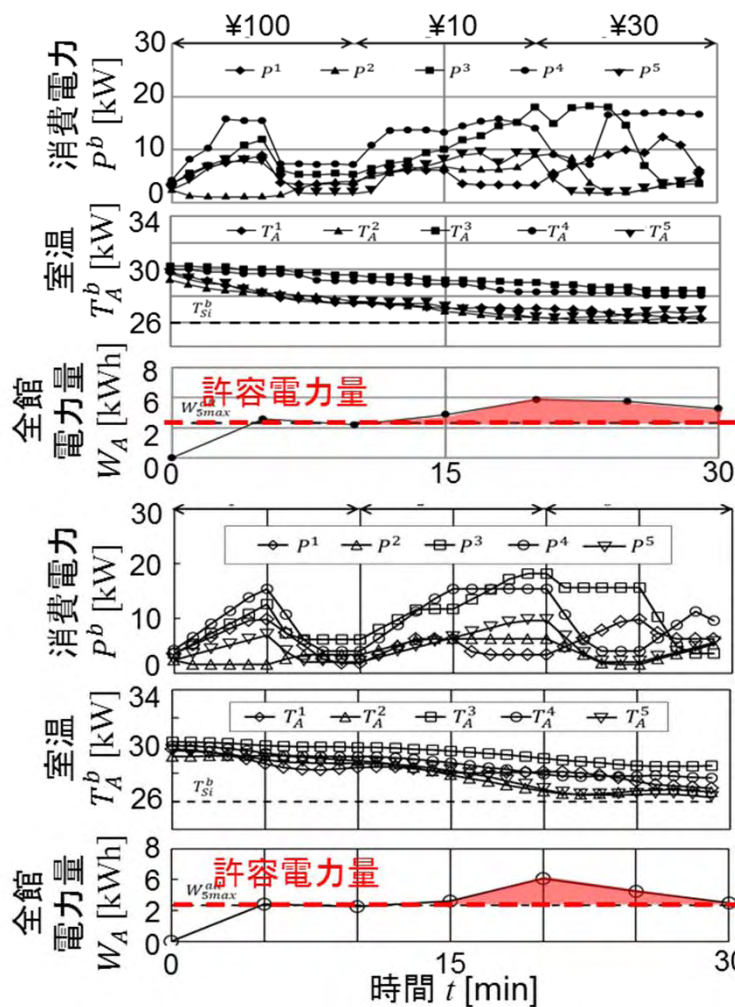
(蟠川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調機群優先エリア複合制御の大規模化」, 空気調和・衛生工学会論文, No.269, pp.11-17, 2019年)

# 室温優先エリア適応複合FastADR制御の例

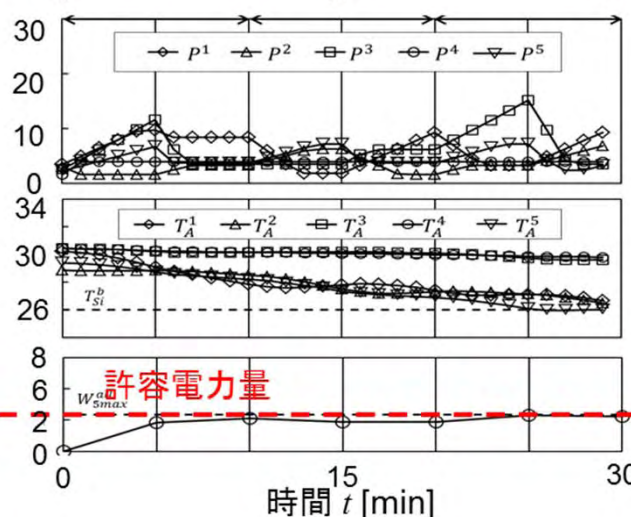
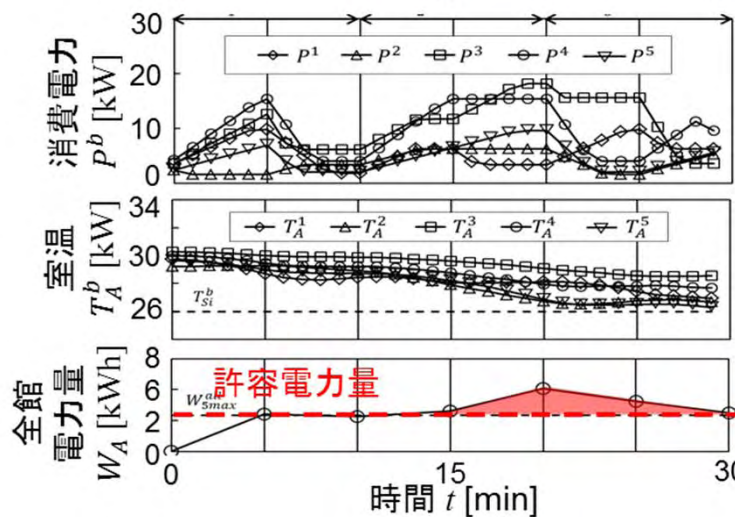
## 空調機毎単独RTP適応制御

## 全館複合RTP適応制御

実機  
試験



エミュレ  
ーション



(蜷川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調の全館電力制限と優先部分室温の複合調整制御」, 電気学会論文誌D, Vol.138, pp.777-786, 2018年)

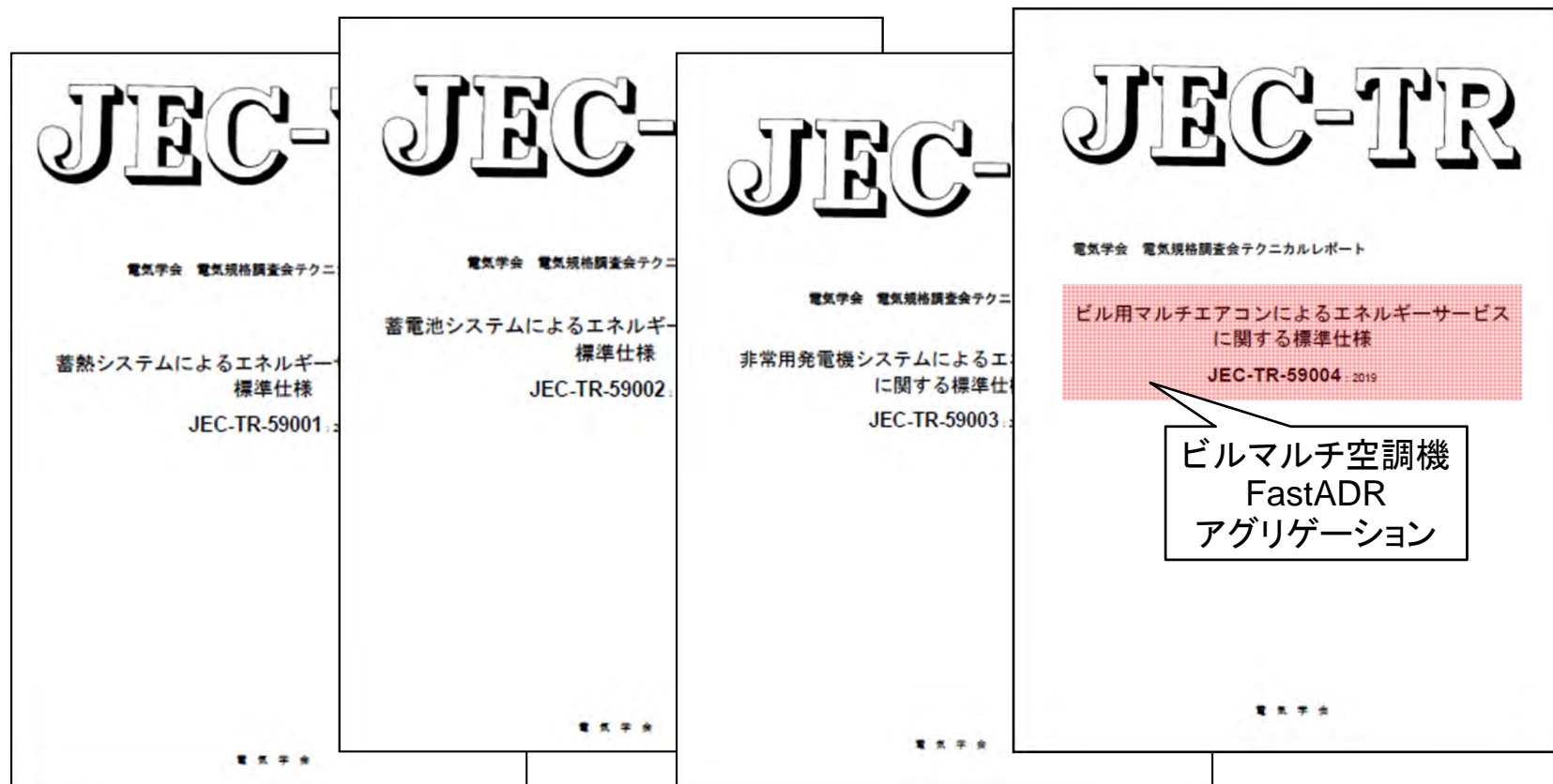
# FastADR制御の標準化活動

# 電気学会SGTEC委員会

- 電気学会・産業応用部門の専門委員会である**SGTEC委員会**(※)では、需要家DER制御の標準化をめざし、JEC電気学会規格テクニカルレポートを順次制定してきた。

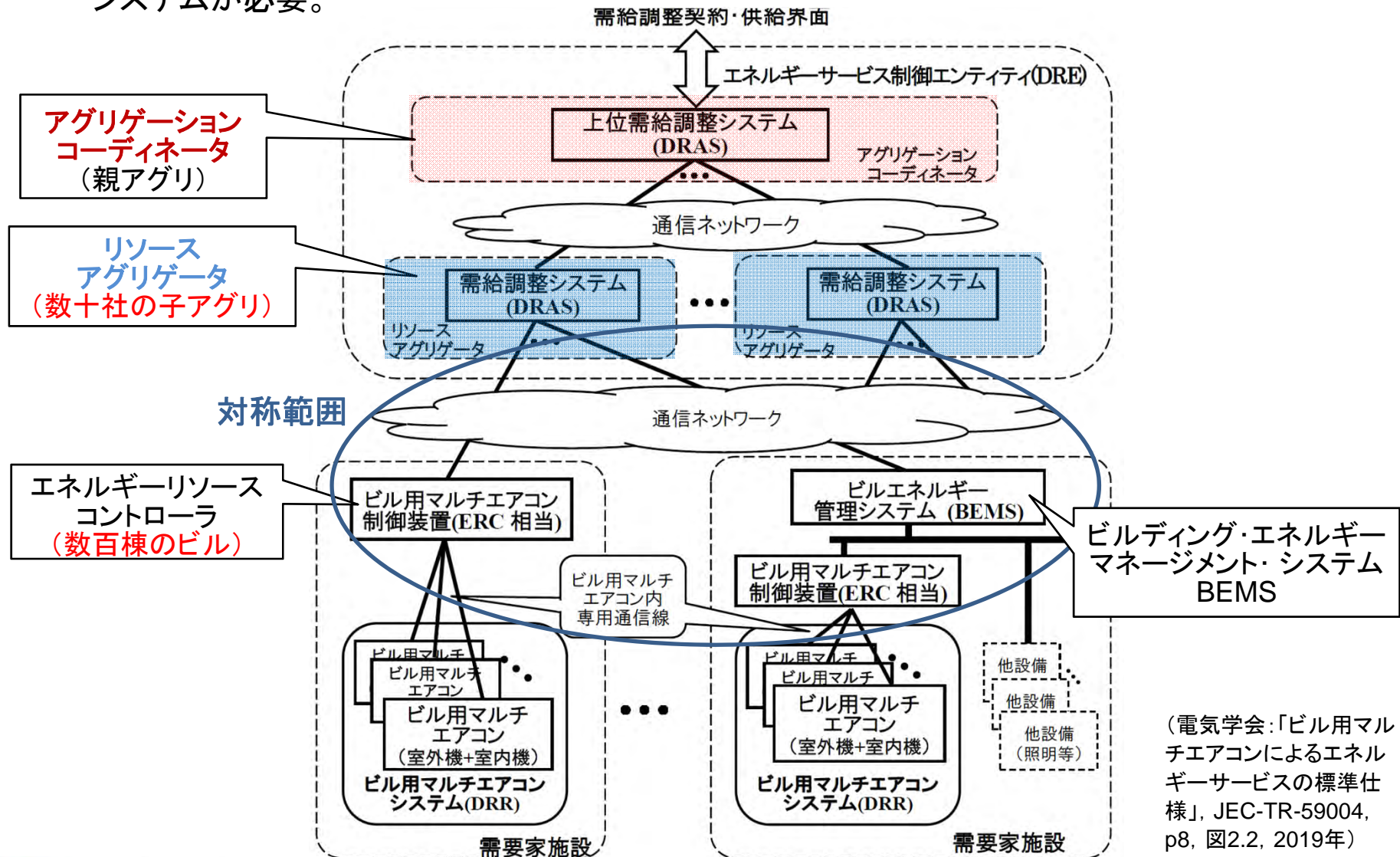
(※) 電気学会スマートグリッドの電気事業者・需要家間サービスインターフェース技術調査専門委員会(通称SGTEC委員会)

- **ビルマルチ空調機も取入れられた**(JEC-TR-59004)。他に、**蓄熱システム**(JEC-TR-59001)、**蓄電池システム**(JEC-TR-59002)、**非常用発電機**(JEC-TR-59003)がある。



# JEC-TR-59004のFastADRアグリゲーション階層構成

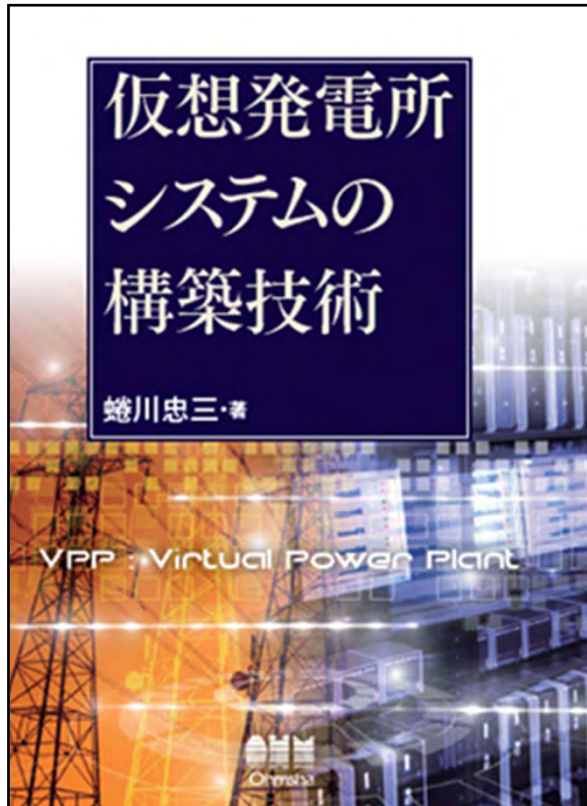
- 浅く短いFastADRを大量・確実にネガワット供給するため、**分散・階層化したアグリゲーション・システム**が必要。



(電気学会:「ビル用マルチエアコンによるエネルギーサービスの標準仕様」, JEC-TR-59004, p8, 図2.2, 2019年)

# ご清聴ありがとうございました

- 詳しいことにご興味があれば。



オーム社, 2019年6月



森北出版, 2020年7月

岐阜大学工学部スマートグリッド電力制御工学共同研究講座  
特任教授 蛭川 忠三  
メール: [ninagawa@gifu-u.ac.jp](mailto:ninagawa@gifu-u.ac.jp),  
HP: <http://www1.gifu-u.ac.jp/~ninalab/index.html>