

テックマネッジ株式会社殿向け 蜷川研の研究紹介
(配布可能)

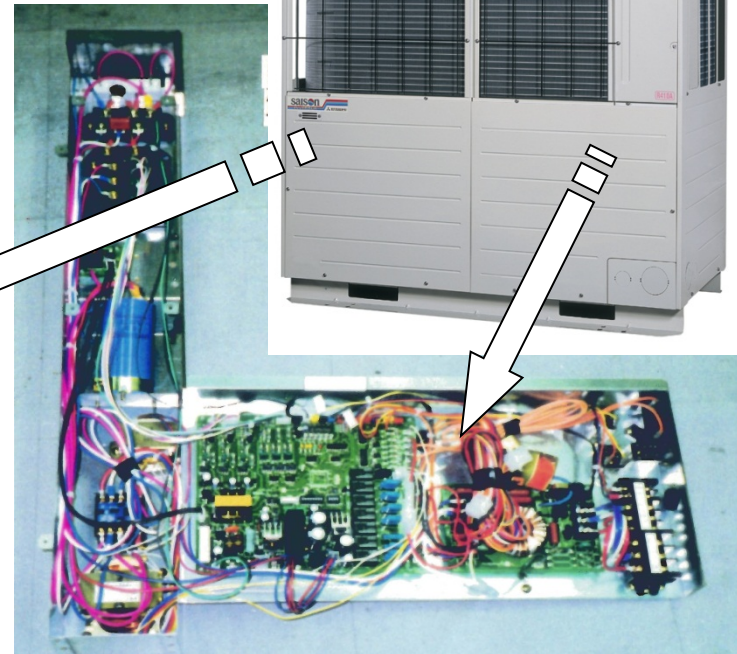
分散型ビル空調の 新しいエネルギー制御技術

2021年2月20日(土)

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

分散型ビル空調の設計キャリア

- メーカーで長年、ビル用マルチエアコンの冷媒圧縮機、インバータ、通信制御の製品設計
- 太陽電池系統連系インバータ(パワーコンディショナ)製品設計



ビル空調電気設備の電力管理システム

- 世界中で、ビルマルチ空調EMS (Energy Management System) の設計・立ちあげ。



横浜ショッピングセンター



マレーシア最高裁判所



品川キャノンビル



世界の現場を立上げ



悪環境でのデバッグ作業

分散型ビル空調の新エネルギーサービス

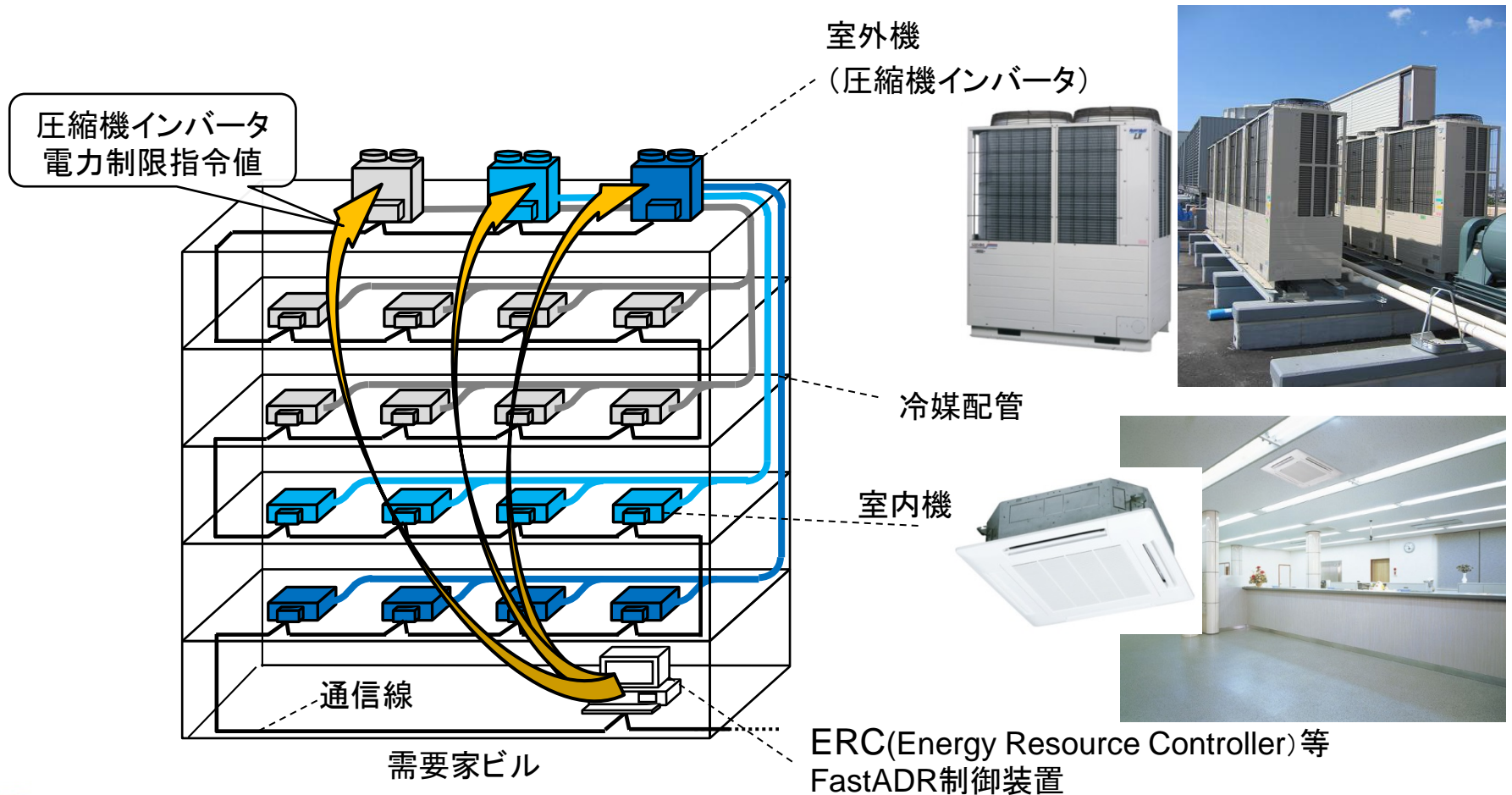
分散型ビル空調:ビル用マルチエアコン

- 全国に150万台, 定格消費電力合計1500万kW(日本冷凍空調工業会データから講師推計)。
- ビルマルチ空調の次世代のエネルギーサービス創出を研究してきた。
- 分野合体: ビル空調+スマートグリッド+IoT制御+時系列AI。



ビル用マルチエアコンの新しいエネルギー制御法

- パラダイムシフト: 室温制御の結果としての消費電力 ⇒ 消費電力そのものも制御対象。
- ビル空調電力をIoT制御して ΔkW 創出: FastADR (Fast Automated Demand Response)。
- 圧縮機インバータにクラウドから直接抑制指令する!



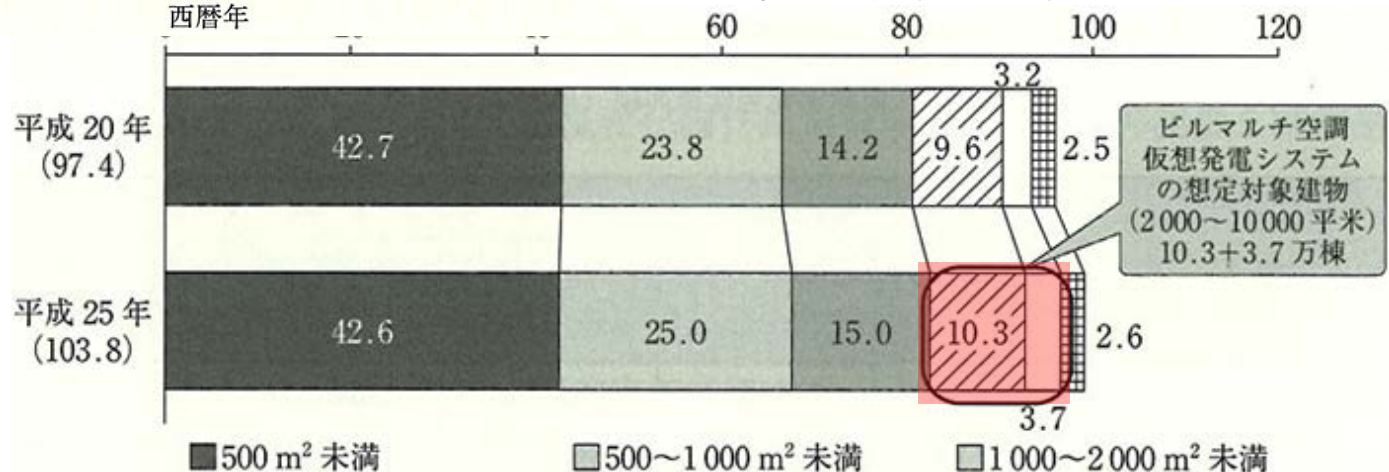
なぜビル用マルチエアコンか？(私見)

- 国内設置台数は**推定約150万台**。定格消費電力として合計**1500万kW規模**のリソース。将来、調整力として使えるのは、30%参加、定格電力の20%FastADRとすれば100万kW位？
- 国内で適した**(2000~10000平米)**商業ビルは**14万棟**。(ただし、場所的な分布を考慮要)。



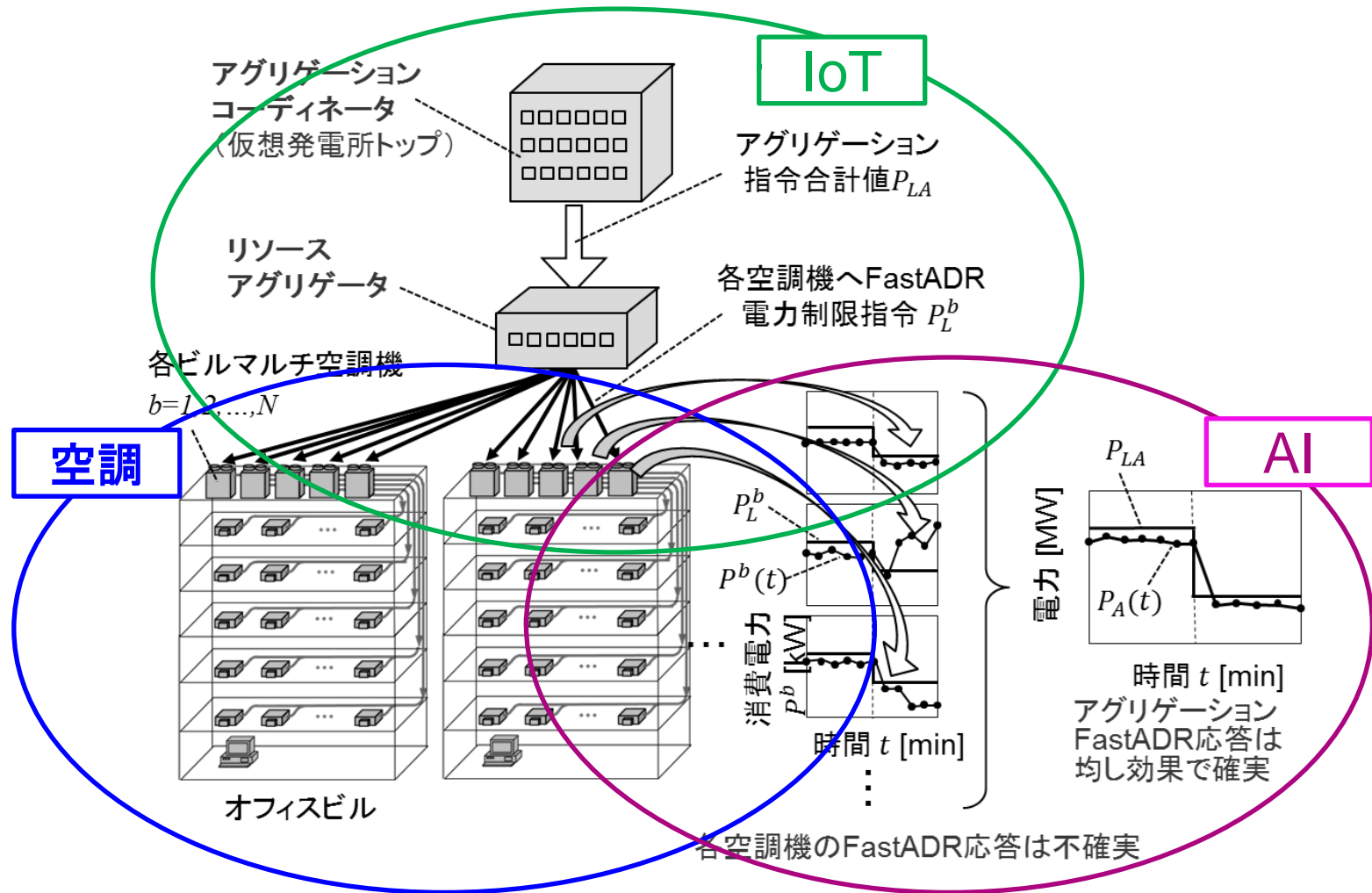
参考文献: 蛭川忠三:「仮想発電所システムの構築技術」, オーム社, 2019年

非住宅法人建物の延べ床面積統計 (国土交通省2015年)



ビル用マルチエアコンの新しいエネルギー制御

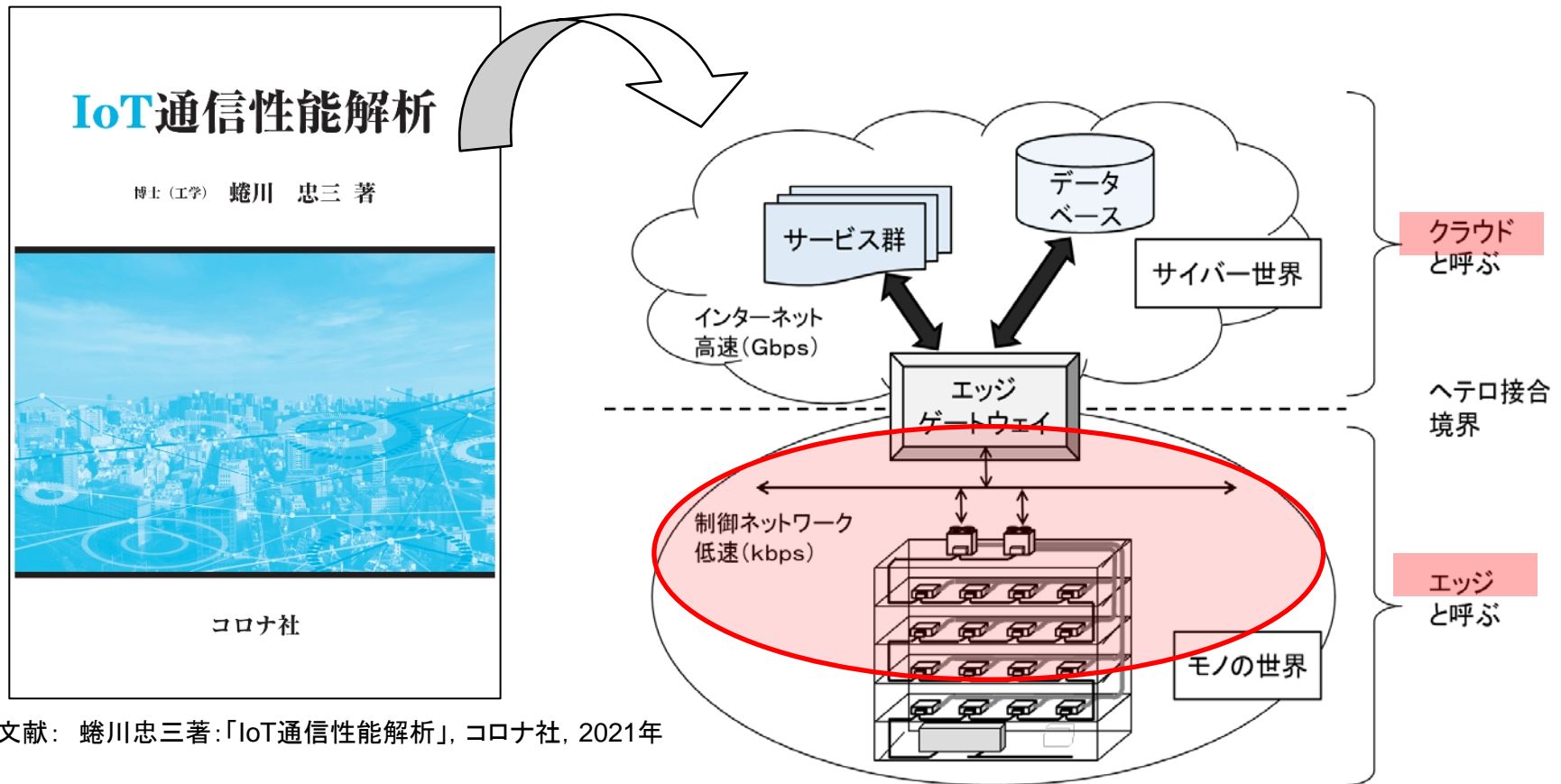
- 30年間の空調機設計経験，大学転出後9年間のスマートグリッド研究，および，時系列データAI技術をインテグレートする研究を目指す。



ビル用マルチエアコンのIoT制御

IoTにおけるクラウドとエッジの概念

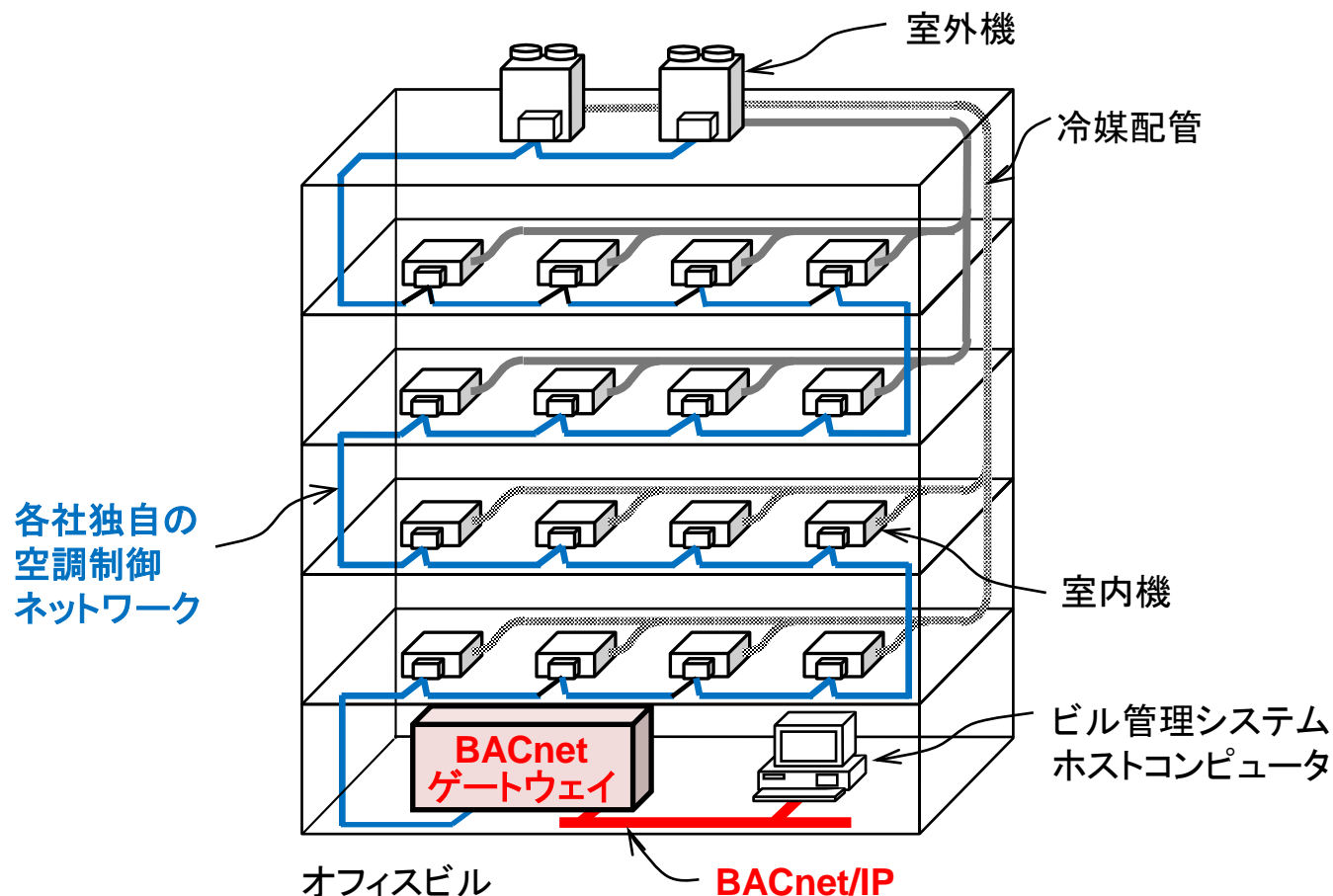
- IoT (Internet of Things) は、クラウドのサーバー世界とエッジのモノの世界をエッジゲートウェイが接合するモデルで考える。
- ビル用マルチエアコンの制御用の通信ネットワークはエッジ側に位置する。



参考文献: 蛭川忠三著:「IoT通信性能解析」, コロナ社, 2021年

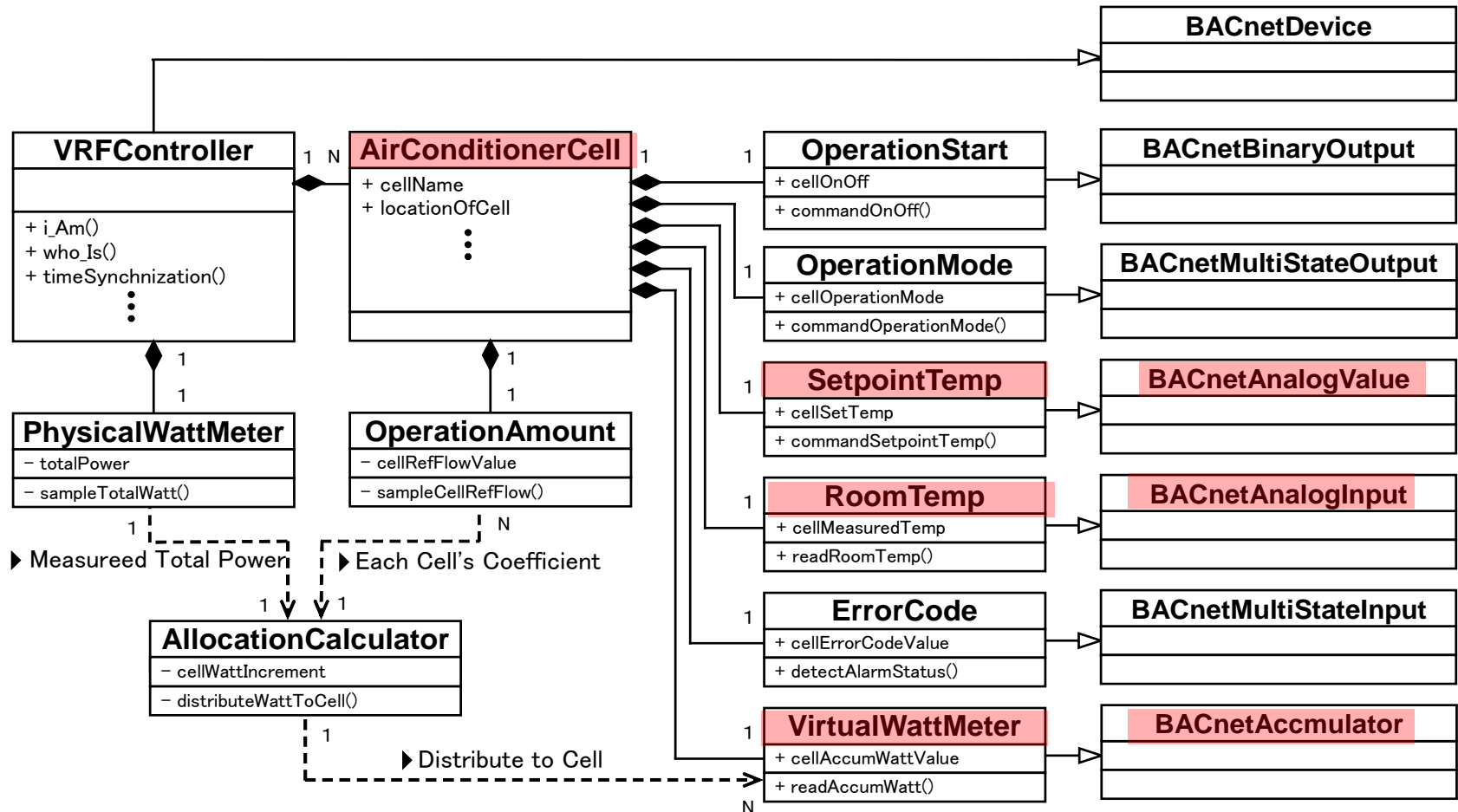
ビル用マルチエアコンへのBACnet/IP適用

- 各室内機・室外機は独自の空調制御ネットワークにもともと接続されている。
- BACnet通信を適用するには、空調制御ネットワークとの変換装置(ゲートウェイ, アダプタ)により通信プロトコル変換される方式をとっている。



BACnet空調セルオブジェクトUMLクラス図

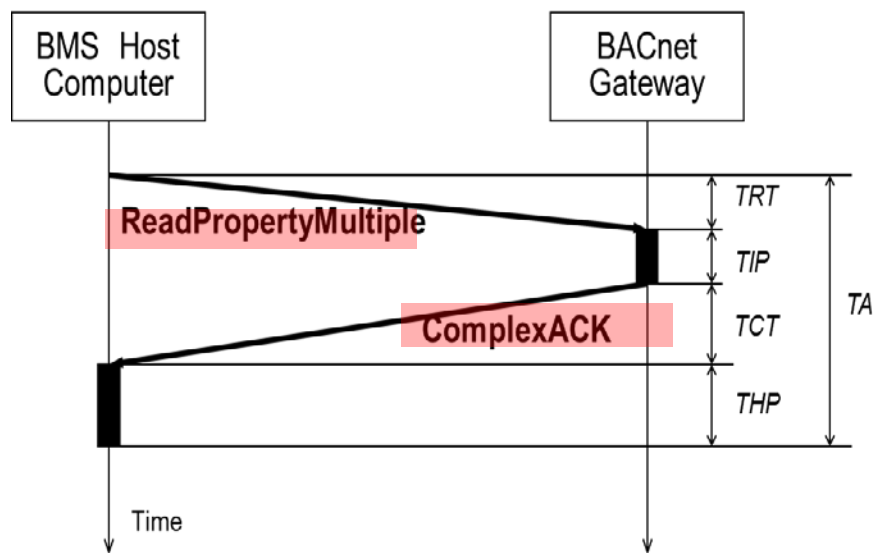
- ビル用マルチエアコン室内機を単位に、BACnet Object間の関連をデータモデルとして定義して、異なるベンダー間のインターオペラビリティを確保する。



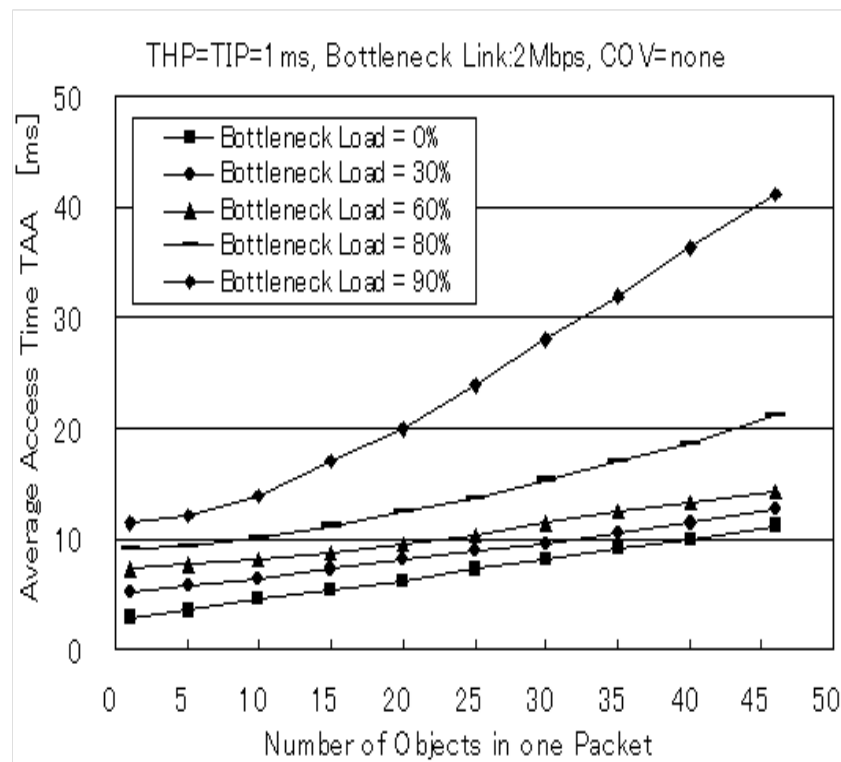
C. Ninagawa, "BACnet Object Modeling by UML on High-Level Functionality of VRF Air-Conditioning Systems", ASHRAE Transactions, Vol. 115, Part1, pp. 338-347, Chicago, U.S.A., 2009

BACnet/IP ObjectへのアクセスService

- BACnet/IPの場合, ビル管理システムのLAN上で, 各機能に対応したBACnet Objectに, ReadProperty, WritePropertyなどのServiceでアクセスする。
- IPネットワークベースではあるが, TCP/IPでなくUDP/IPによる高速なデータ伝送を実現している。ComplexACKというアプリ層で確認している。



BACnet Objectの読出しデータ伝送時間



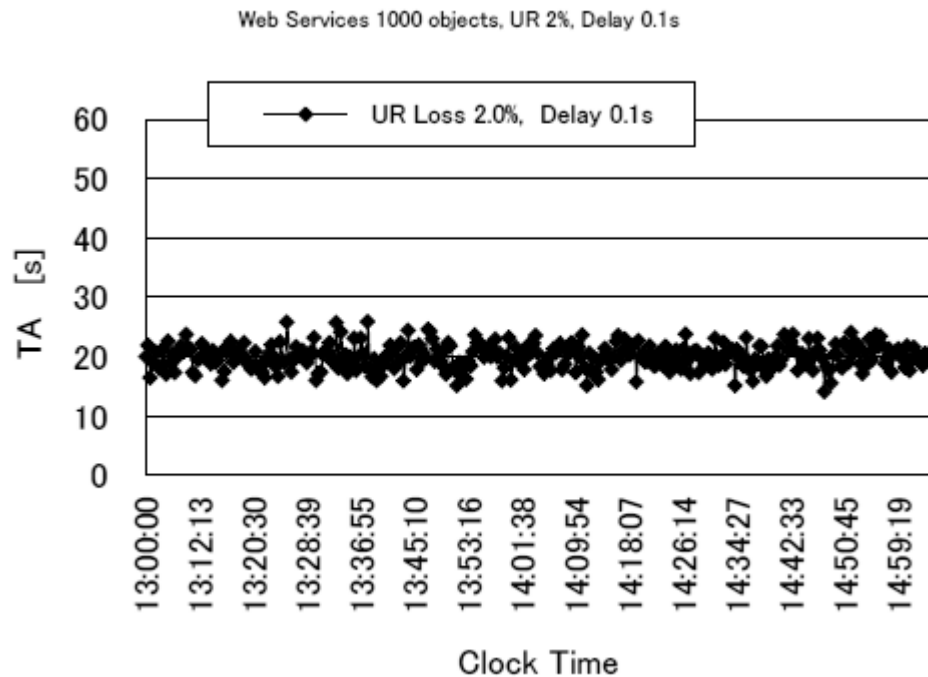
BACnet Objectの一括読出しデータ数

C. Ninagawa, "Communication Performance Simulation for Object Access of BACnet Web Service Building Facility Monitoring Systems", 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2008, pp. 701-704, Hamburg, Germany, 2008.

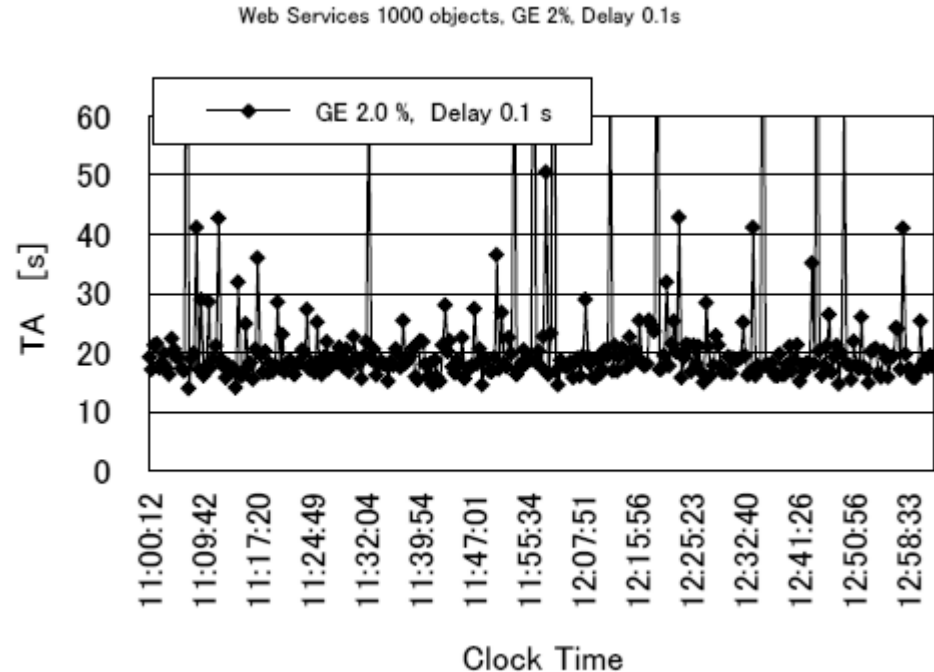
ビル用マルチエアコンのクラウド制御

WEBのHTTP/TCP/IPデータ伝送時間のばらつき

- WEBのHTTP/TCP/IPの一往復ごとのTCP/IP伝送時間を1000回測定してグラフにしたもの。
- パケット往復時間(Ping Round Trip Time)RTT Delayを最悪値 0.1sとして、ビル用マルチエアコンのWEBゲートウェイ監視画面取得のデータ伝送時間を計測した例。



(a) 均一パケットロスの場合
インターネットが調子が良い時



(b) バーストパケットロスの場合
インターネットが調子が悪い時

参考文献： 蜷川忠三著：「IoT通信性能解析」，コロナ社，2021年

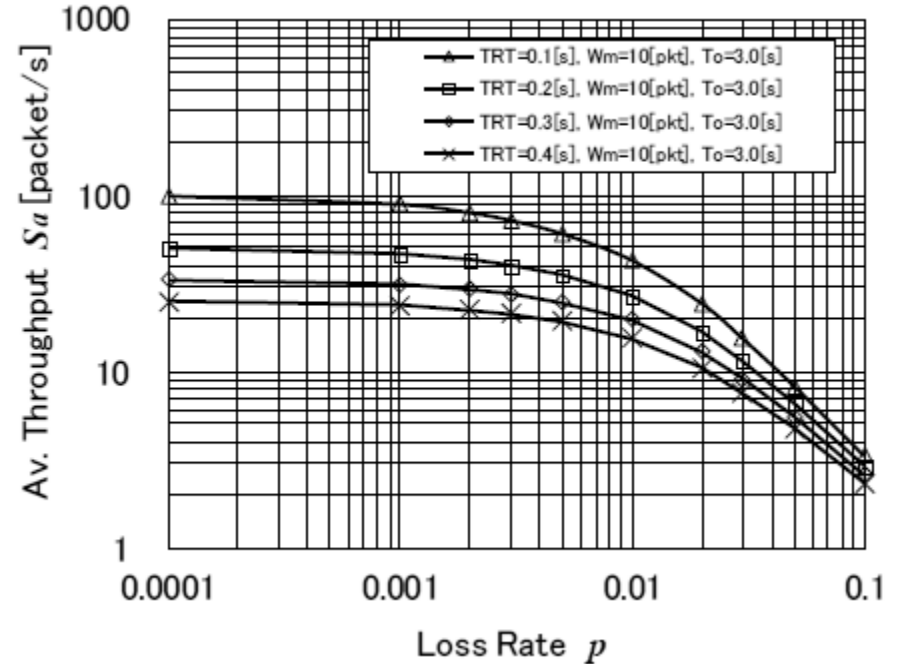
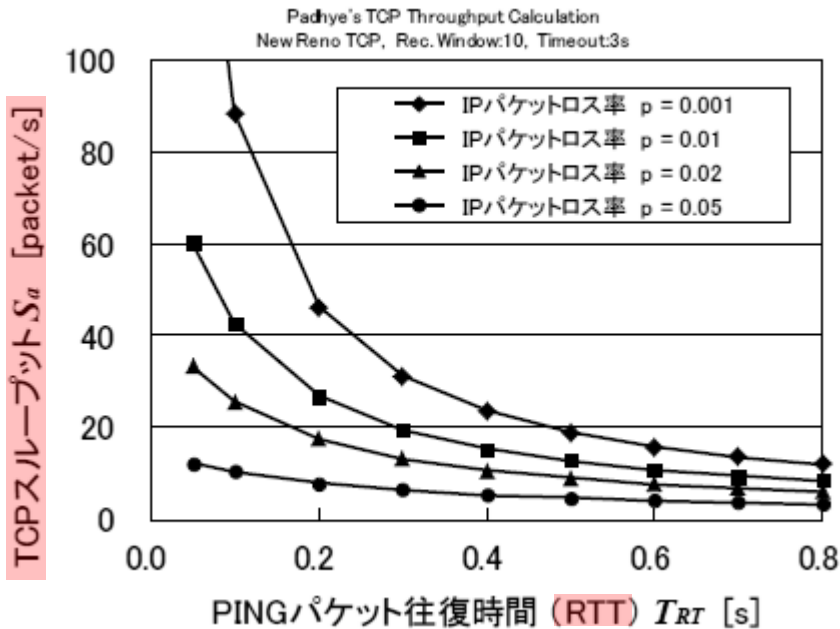
遠隔データセンターとのデータ伝達遅延

- WEBサービス通信は、インターネット上でTCP/IPでデータ授受する汎用な方式だが、IPパケット往復時間(RTT)が大きい場合は、データ伝送時間評価が必要。
- 例えば、外国にサーバを設置するようなケースでは、RTTが非常に長くなり問題が出る。
- インドのIT企業では、50近い大型ビルで数万人のエンジニアが運用する「キャンパス」と称する巨大なセンターを持つ。米国の一流会社が、大規模なサーバーファームを置いている。



TCP/IPデータ伝送性能理論計算

- 平均パケット往復時間(RTT) T_{RT} と平均パケットロス率 p よりTCP/IPデータ伝送スループット $S_a(p, T_{RT})$ の特性を確率モデルにしたもの。
- $S_a(p, T_{RT})$ は単位時間当たりの平均伝送パケット数としてスループットを表す。
- **PadhyeのTCP/IPデータ伝送性能の確率モデルによる理論計算式**
(蜷川忠三, 山田倫久著:「OpenADRによるデマンドレスポンス」, 森北出版)



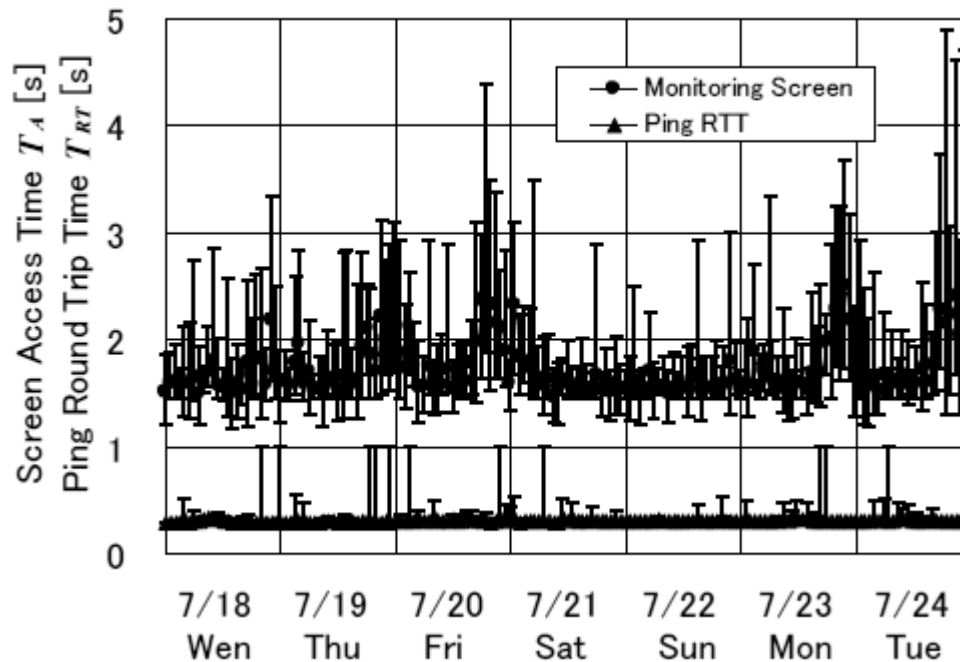
参考文献: 蜷川忠三著:「IoT通信性能解析」, コロナ社, 2021年

TCPサーバーファイルデータ長

TCPペイロード	データ長
文字列データ	23.0 kバイト

TCP/IPデータ伝送時間の時間変化(ばらつき)

- ロンドンのTCPクライアントから名古屋のTCPサーバデータを取得した**1週間**の毎正時トレンドの一例。
- 毎正時のTCPサーバアクセス時間は大きくばらついたが、**PING往復時間**のばらつきは小さいため、PING往復時間の時間平均をその地点間の**解析計算の入力値**として使用可能。

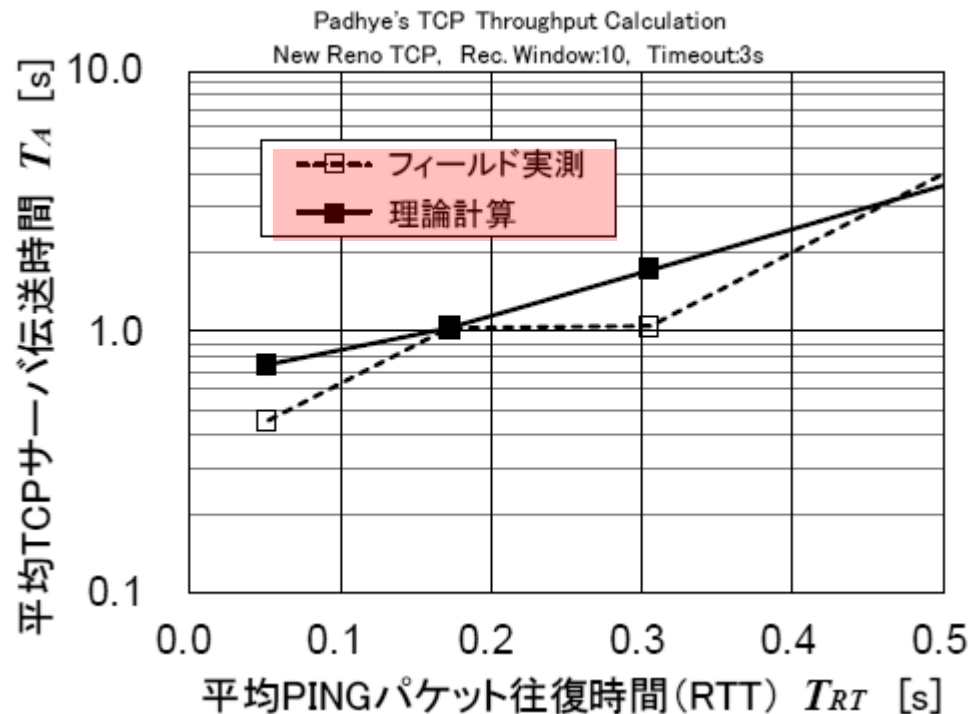


項目	TCPクライアント	TCPサーバー
CPU	Pentium4	Embedded CPU
CPUクロック	1.73GHz	500 MHz
主メモリー	512 MB	256 MB
OS	Windows XP	Linux
クライアントサーバー	IE 6.0	Apache 1.3
TCPバージョン	New Reno	New Reno

参考文献: 蜷川忠三著:「IoT通信性能解析」, コロナ社, 2021年

TCP/IPデータ伝送時間の理論計算と実験比較

- TCPサーバアクセス時間は、市内と大陸間インターネットアクセスでは数倍の違いがあるため、対数目盛りにプロットして比較。
- PadhyeのTCP/IPデータ伝送性能理論式とは何割もの誤差が生ずるが、素早く検討を付けたい場合、おおよその見積もりには使えるかもしれない。

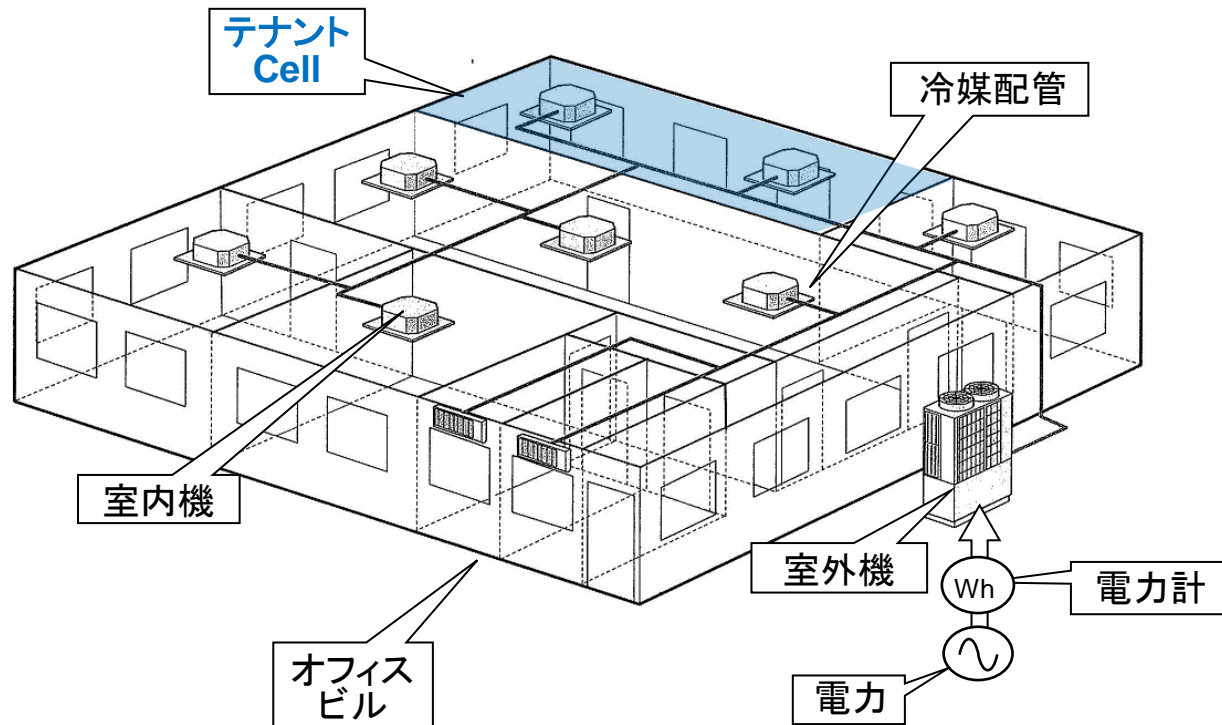


参考文献： 蛭川忠三著：「IoT通信性能解析」，コロナ社，2021年

仮想空調電力スマートメータ

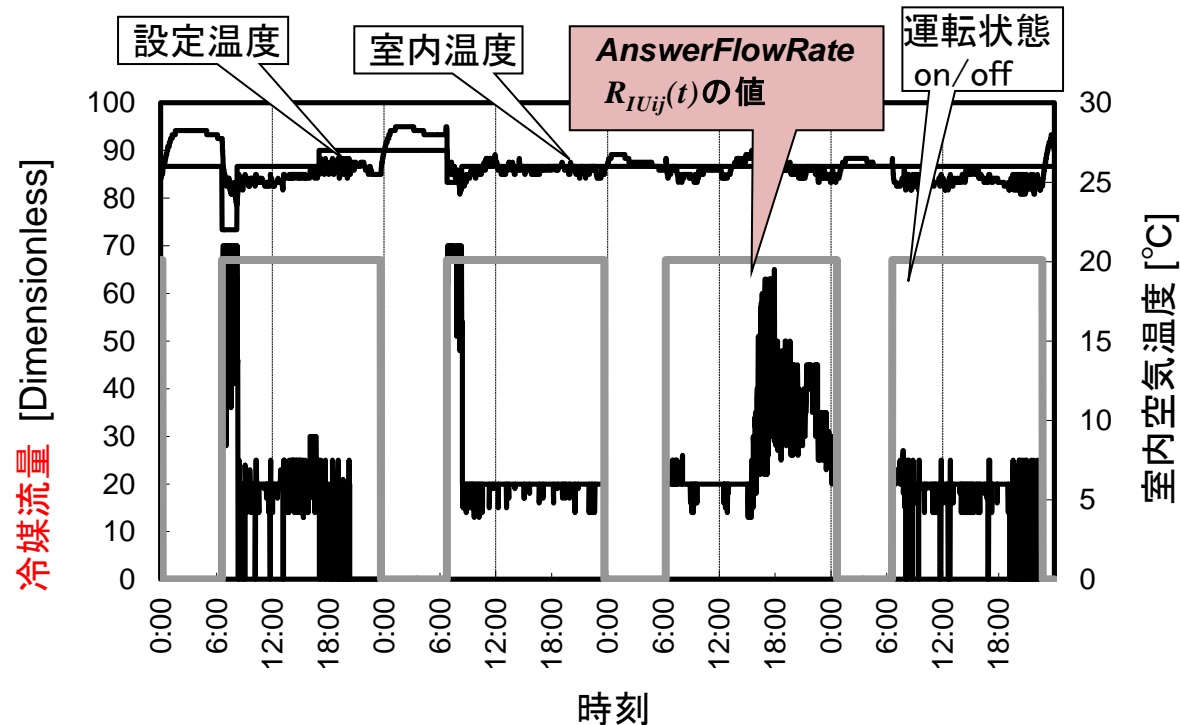
ビル用マルチエアコン空調システムの概略図

- ビル用マルチエアコンは、一台の室外機に複数台の室内機が冷媒配管分岐により接続されているが、電力量計はそれぞれの室内機ごとには設置されていない。
- 室内機グループ (Cell) ごとにテナントが分かれるような場合、1台の室外機の電力量を室内機ごとに分配計算する方法が必要。
- 従来は、積算運転時間で、月末に各室内機Cell (各テナント) ごとに時間按分していた。



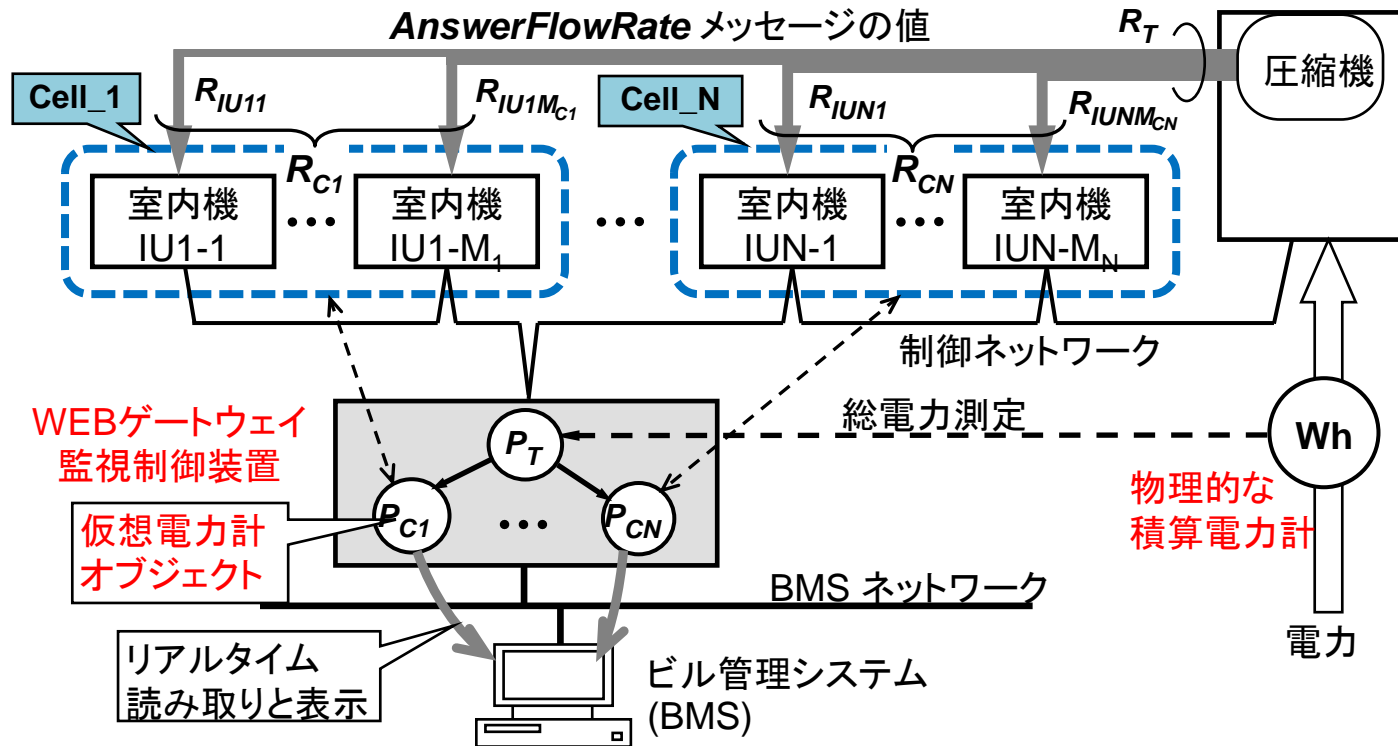
室内機への冷媒流量の変化特性

- 各室内機ごとに消費電力量を正確に評価按分するには、各室内機ごとの熱負荷に応じた冷媒流量の積分値を求める必要がある。
- 各室内機への冷媒流量は分刻みで変動しているが、その値を直接ビル管理システムが通信で読み取れるように製品設計されていない。



仮想電力計方式による電気料金按分の概念図

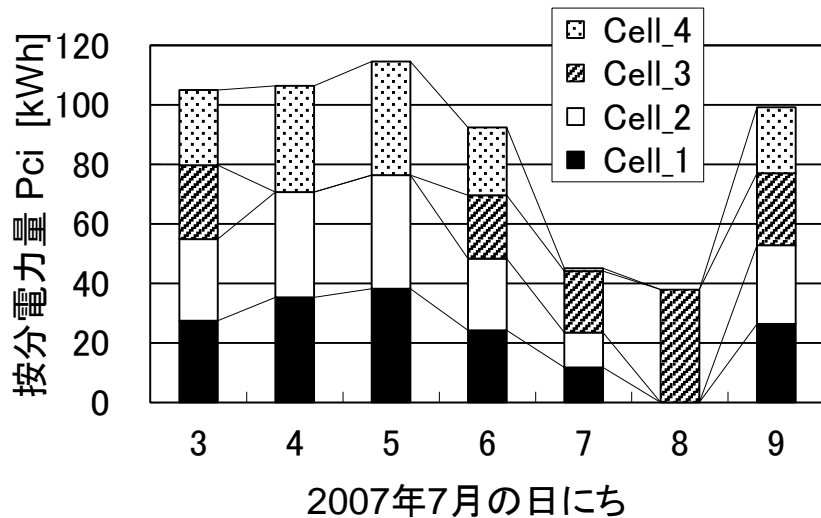
- 室内機群を4軒のテナントに分けて, Cell_1, Cell_2, Cell_3, Cell_4として, それぞれに属する室内機をグルーピング管理する。
- 監視制御装置が, 室外機と各室内機間の空調制御ネットワークの制御信号である, 冷媒流量按分メッセージを読み取ることで, 冷媒流量積分値を得る。
- 全体電力量は, 室外機に接続された物理的な積算電力計から読み出す。



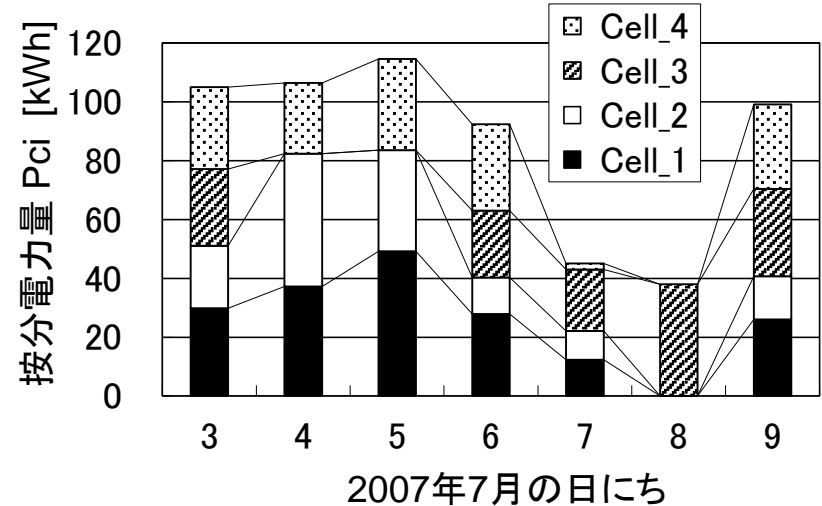
C. Ninagawa, "Virtual Wattmeter Power Consumption Billing Division for Building Air-Conditioners Supporting User's Energy Saving Intention", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 6, pp. 695-700, 2010.

運転時間方式と仮想電力計方式との比較

- 1500平米の小規模オフィスビルにおいて夏季7日間の間、運転時間法と仮想電力計法を同時に動作させて実機実験を実施した。
- 4軒のテナントごとに按分された電力量に優位な差が発生した。単純な運転時間積算値だけで按分すると、実際に各室内機が使った冷媒流量積算値で按分するので違いがでる。



(a) Operation Time Method
運転時間按分法

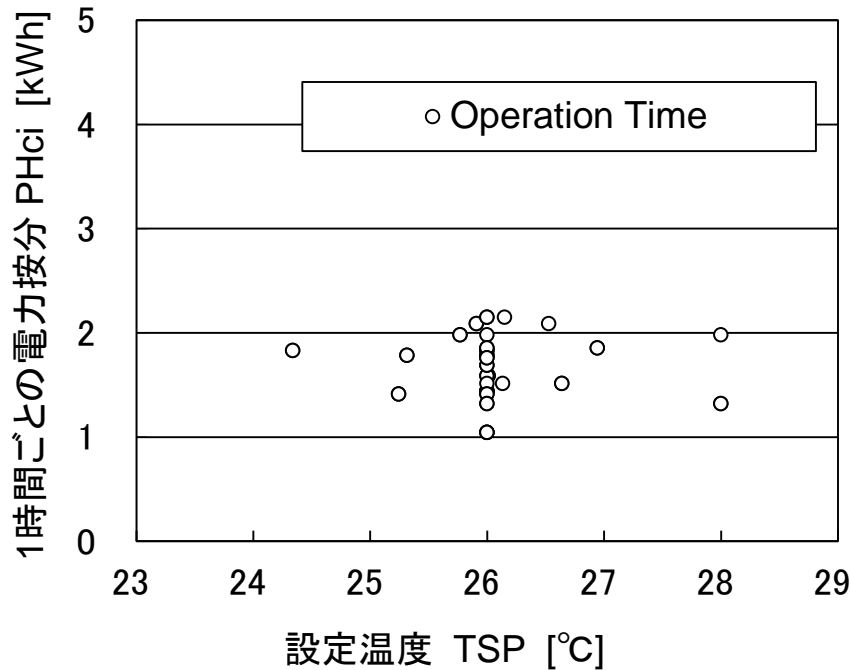


(b) Virtual Wattmeter Method
仮想電力計按分法

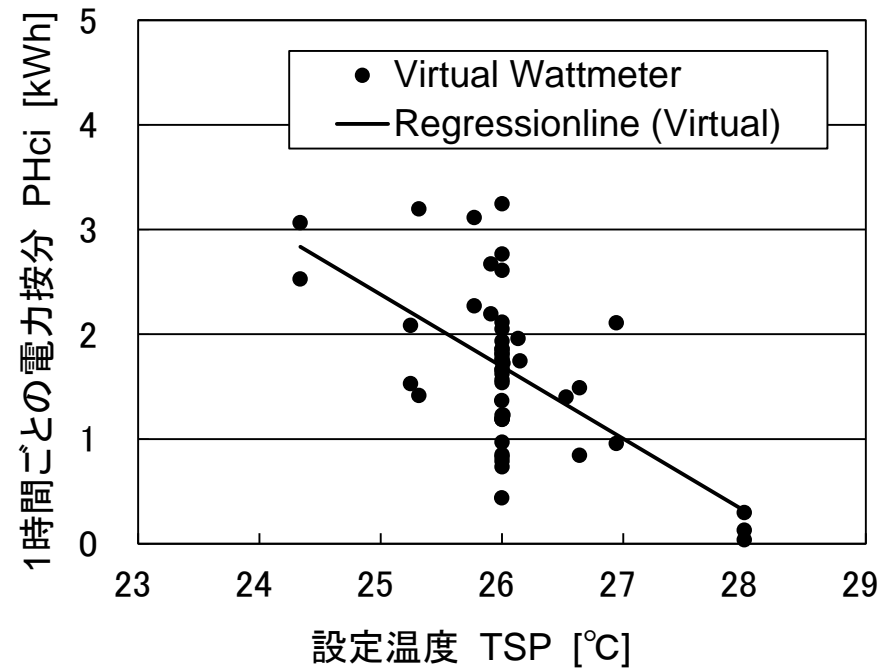
C. Ninagawa, "Virtual Wattmeter Power Consumption Billing Division for Building Air-Conditioners Supporting User's Energy Saving Intention", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 6, pp. 695-700, 2010.

電力料金按分試験結果の散布図

- 運転時間法と仮想法電力計法を、計量計算と設定温度との関係で比較した。
- 運転時間法では設定温度に無関係だが、**仮想電力法では有意差があり設定温度において節電意識を評価可能となる。**



(a) Operation Time Method
運転時間按分法



(b) Virtual Wattmeter Method
仮想電力計按分法

C. Ninagawa, "Virtual Wattmeter Power Consumption Billing Division for Building Air-Conditioners Supporting User's Energy Saving Intention", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, No. 6, pp. 695-700, 2010.

ビル用マルチエアコンFastADR

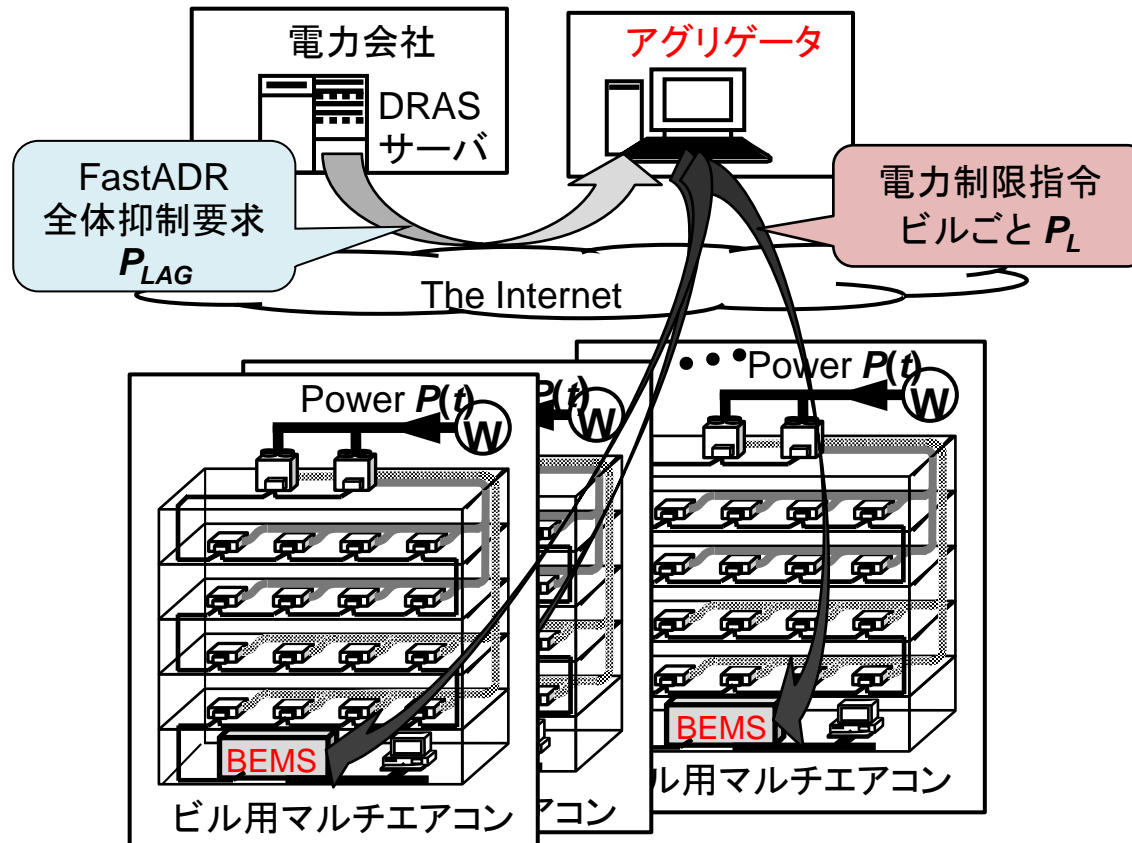
従来型デマンド制御とスマートグリッドFastADR

- 従来から、電力料金制度として、30分電力量を**デマンド制御**として管理制御してきた。
- 近年は、30分～数時間単位の電力系統からの要請による消費電力抑制をデマンドレスポンスが実用化されつつある。
- 次世代電力網では、数分単位の需給バランスに使用する**高速デマンドレスポンス (FastADR: Fast Automated Demand Response)**が研究されている。

	従来型デマンド制御	スマートグリッド対応FastADR
自動化	需要家内の固定的なプログラム	サーバとクライアント間 M2M自動化
時間粒度	30分電力量単位	数分単位 ありうる
制御目標	固定的契約	リアルタイム料金, 需給調整サービス
制御トリガー	契約電力との比較で事前に設定	ADRサーバとのリアルタイムイベント
国際規格	なし	OpenADR など
アグリゲーション (多棟管理)	ほとんどない	クラウドアグリゲーションあり

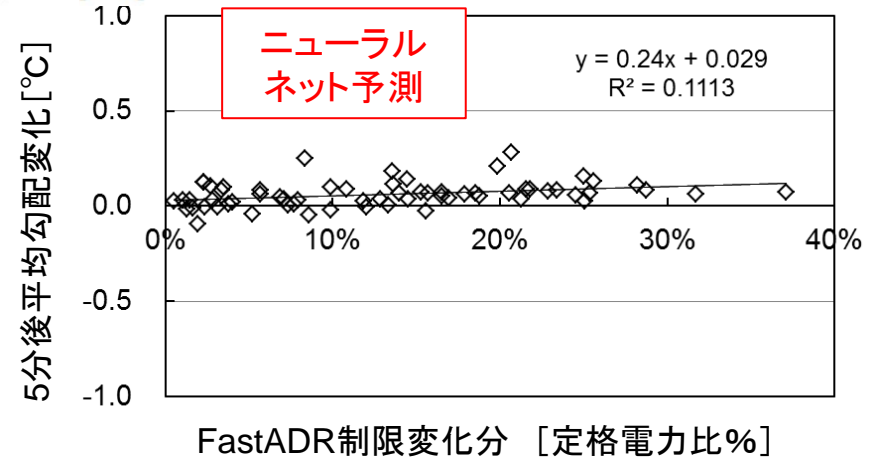
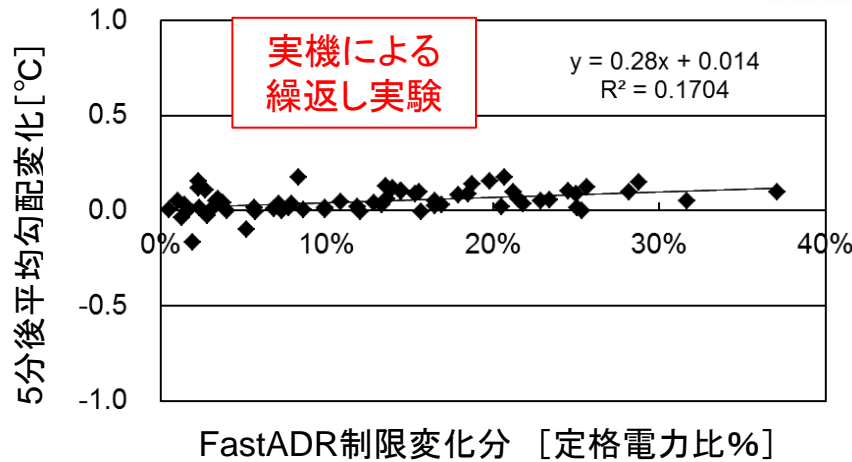
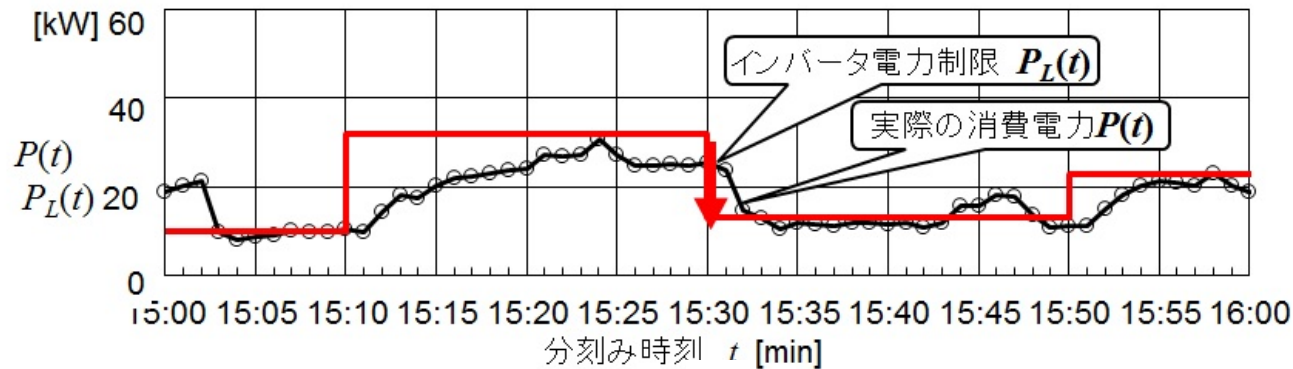
ビル用マルチエアコンのFastADRの概念図

- ビル用マルチエアコンの電力抑制量は，電力系統からみれば微小であり，かつ，確率的不確実応答するので，大規模に集約するサービスプロバイダであるアグリゲータ (Aggregator) が必要。
- アグリゲータは，数十棟，数百棟から数百台，数千台のFastADR電力抑制応答量を予測して発動する必要があり，応答予測モデルが研究されている。



短く浅いFastADRなら建物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?)

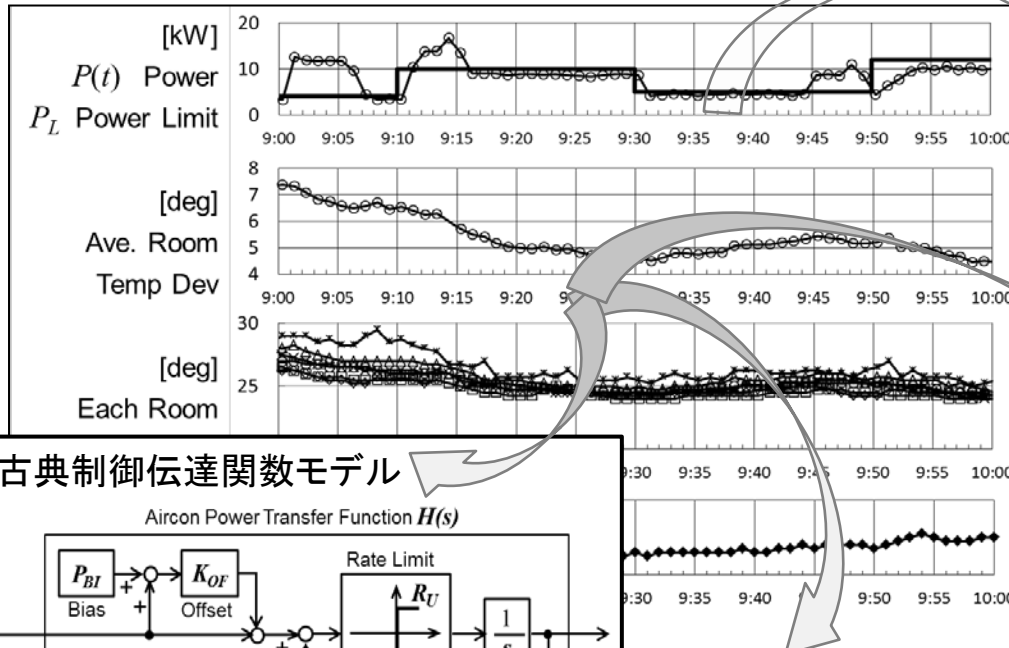


(蜷川ほか:「ビル用マルチ空調機群のFastADRにおける電力制限量配分のための室温副作用予測モデル」, 電気学会論文誌B, Vol. 136, pp.432-438, 2016年)

大量FastADRの評価は動特性シミュレータが必要

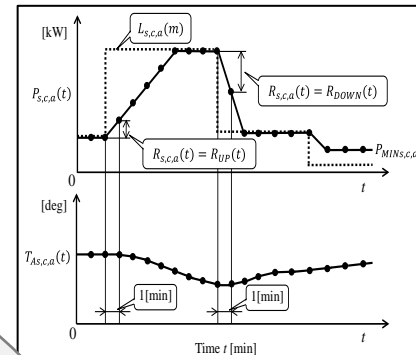
- 蛭川研では、これまでビルマルチ空調電力モデルを実機から種々数理的方法で同定してきた。
- 何千台もの多様な物理モデル(Air-con Emulator:AE)から、仮想ビル用マルチエアコン群を構築。

実際のビルから分単位のFastADR実測データ



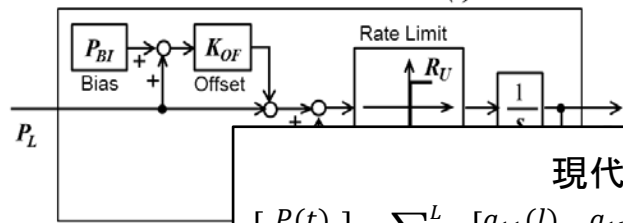
熱収支物理応答モデルAE

$$C_H \frac{dT_A(t)}{dt} = -Q_{AC}(t) + Q_{OA}(t) + \dots$$



古典制御伝達関数モデル

Aircon Power Transfer Function $H(s)$

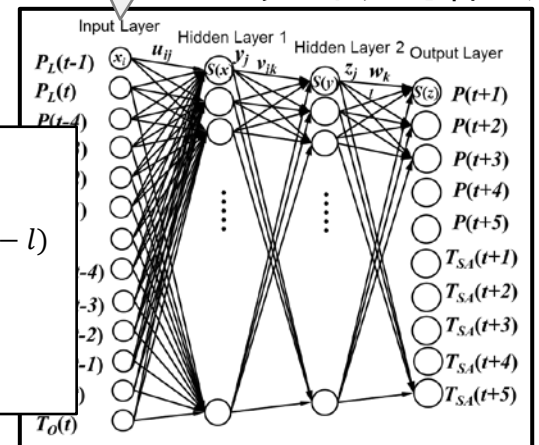


現代制御状態空間モデル

$$\begin{bmatrix} P(t) \\ T_{SA}(t) \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^L \begin{bmatrix} a_{11}(l) & a_{12}(l) \\ a_{21}(l) & a_{22}(l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(t-l) \\ T_{SA}(t-l) \end{bmatrix} + \sum_{l=1}^L \begin{bmatrix} a_{13}(l) \\ a_{23}(l) \end{bmatrix} P_L(t-l)$$

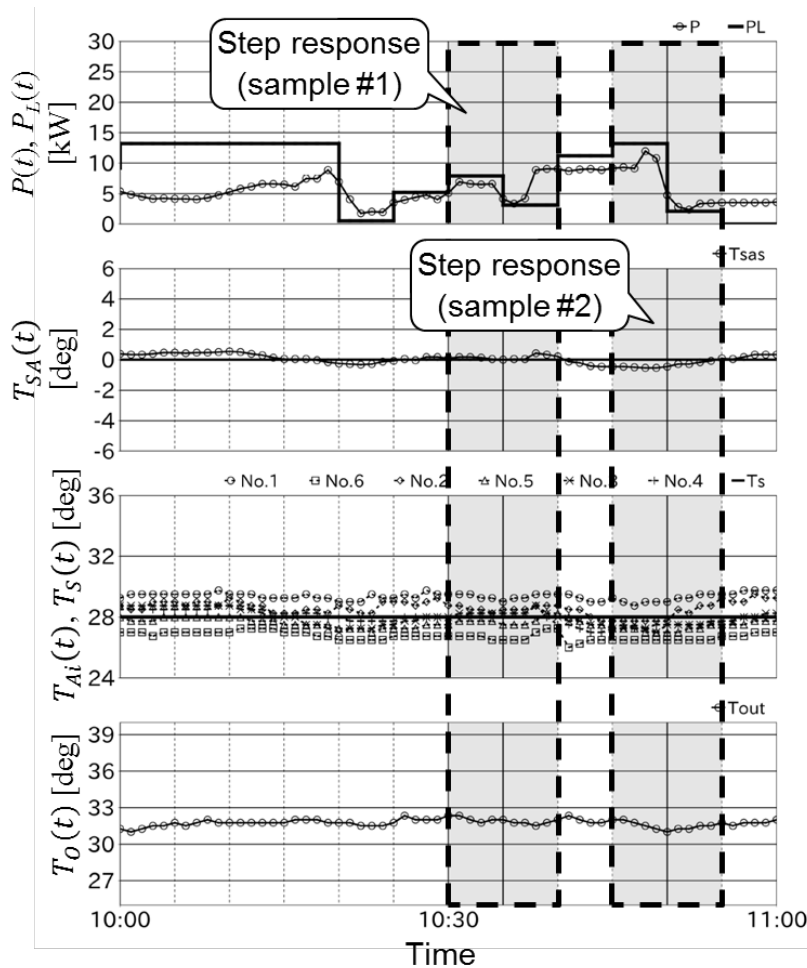
$$\begin{cases} \mathbf{z}(t) = \Phi \mathbf{z}(t-1) + \Gamma u(t-1) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{H} \mathbf{z}(t) \end{cases}$$

ニューラルネット応答モデル



時系列データから電力制限ステップ応答モデル構築

- ビル用マルチエアコンの1分ごとの、消費電力、実測時系列運転データを収集する。
- IoTの技術(例えば、IEEE1888ビル設備監視制御用通信プロトコル)により、時系列データが整った時系列形式でStrage上にデータベースができる。

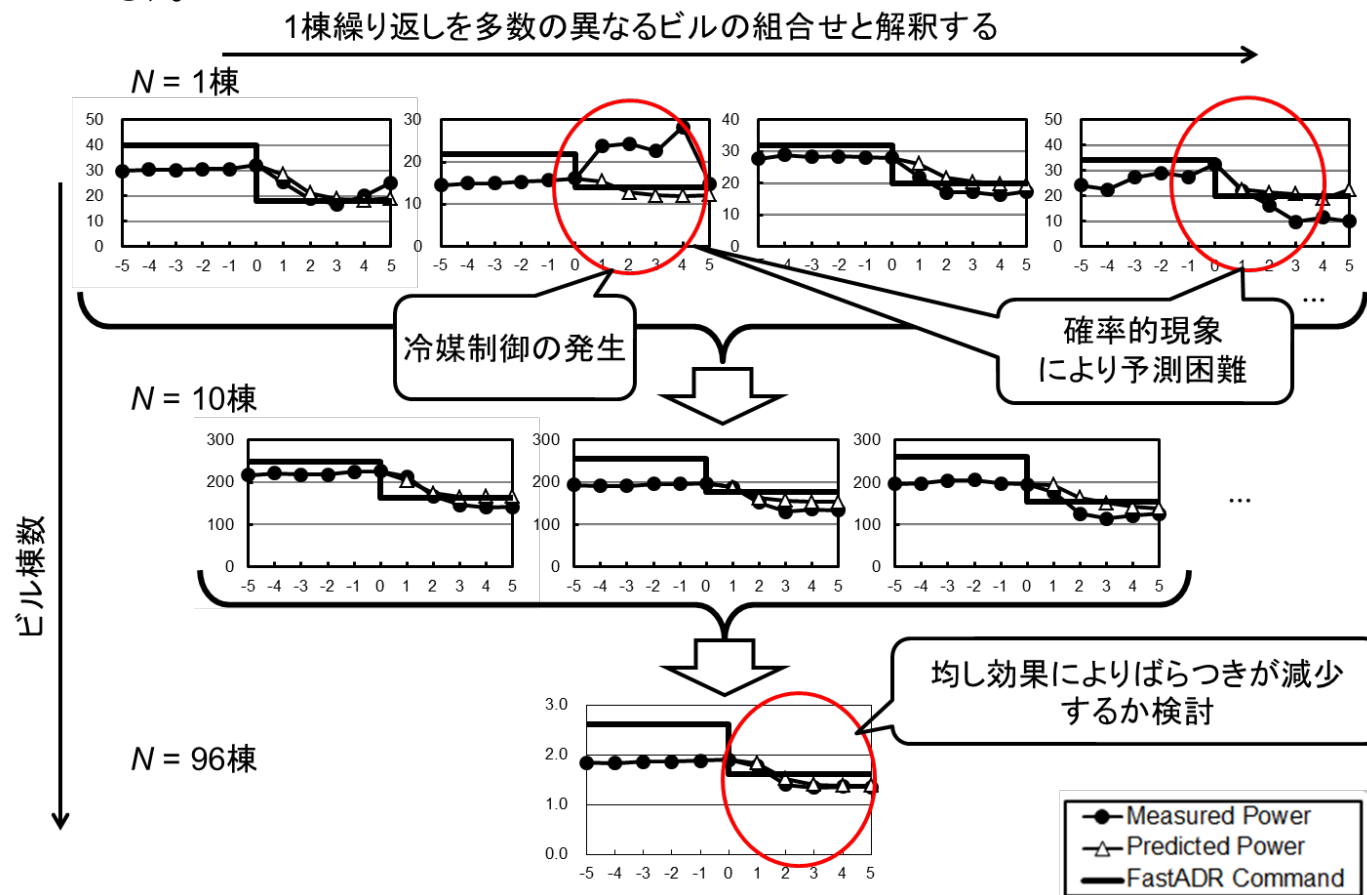


項目	仕様
建物種別	一般的なオフィスビル
諸元	2階建て, 延べ床 1600 m ²
室外機台数	5台
室内機総数	6台 × 5Blocks, 合計30台
定格冷房能力	40, 40, 45, 68, 73 [kW]

蜷川他:「実機計測に基づくビルマルチ空調群DR過渡応答」, 電気学会論文誌B, Vol.138, No.7, pp.582-590, 2018年

均し効果による予測ばらつき減少の想定

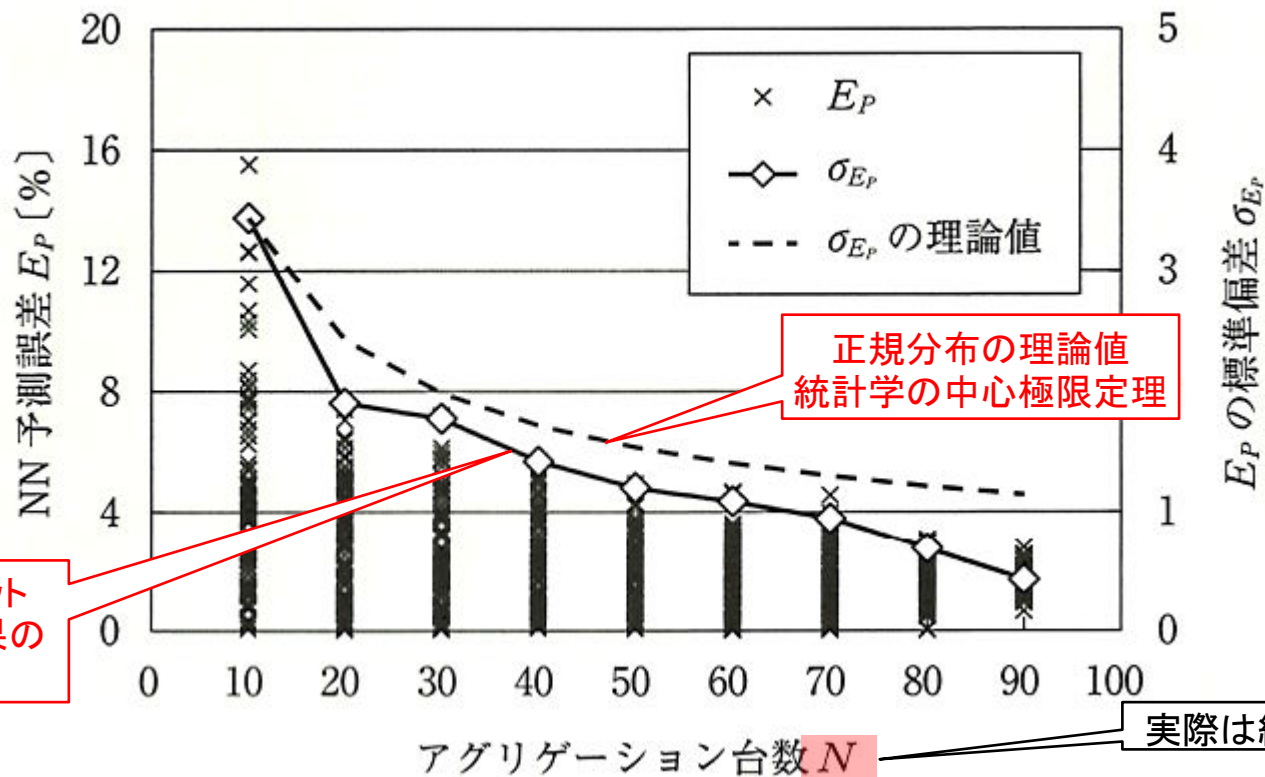
- 個々のビル用マルチエアコンは、その時々でFastADR応答が確率的であるが、数十台以上集約すると、統計的モデルの期待値に近づくと考えられる。
- **多数回の繰り返しの統計値を多数台の統計値の近似**として評価してみる(エルゴート性を仮定している)。



(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)

FastADRアグリゲーション予測誤差も均される

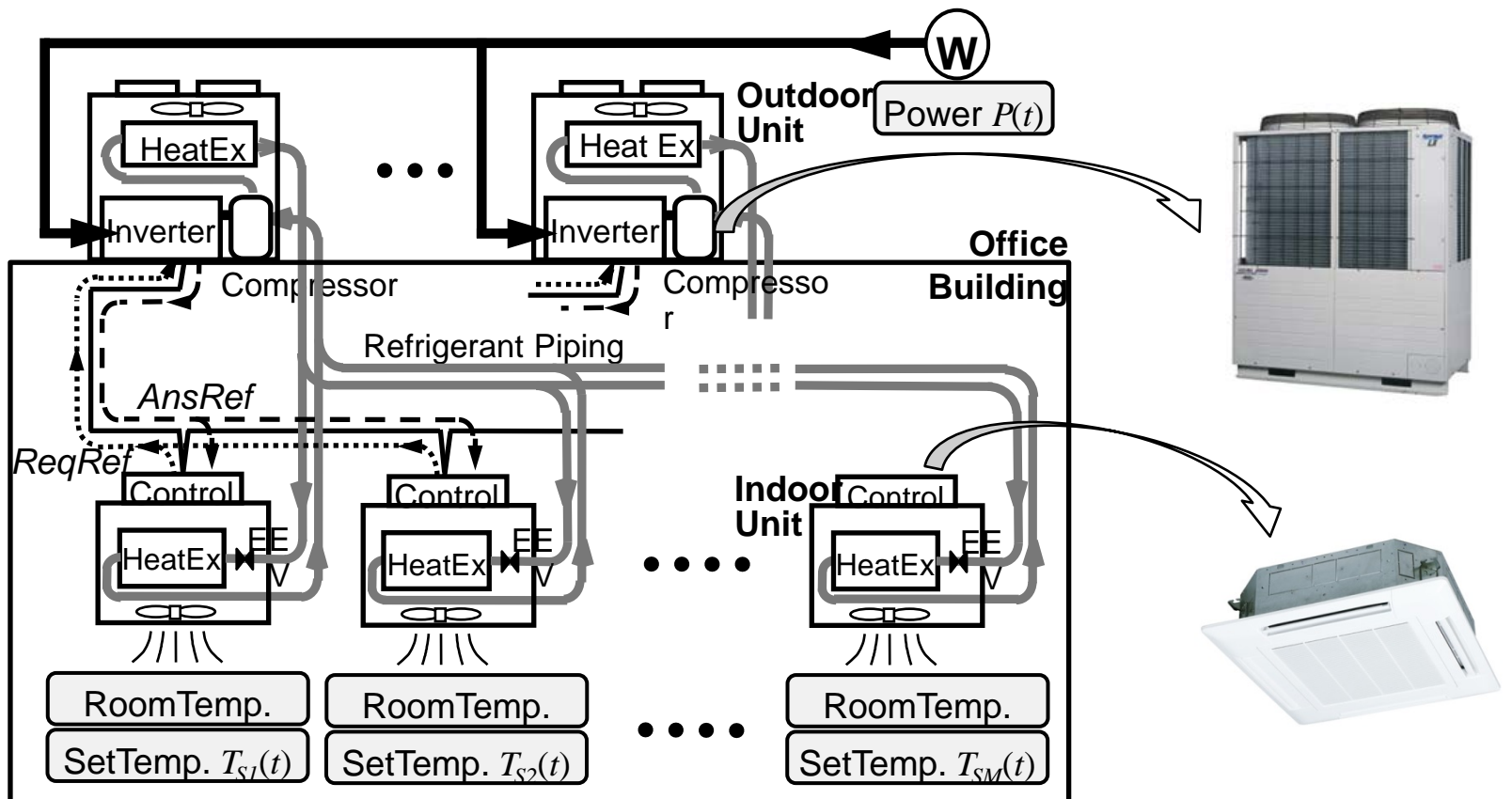
- FastADR発令直前に、個々のビルマルチ空調機の電力抑制量をニューラルネット(NN)で予測して、**予測誤差におけるアグリゲーション台数による均し効果**を想定した実機実験例。
- 予測バラツキの標準偏差の減少率が理論値である $1/\sqrt{N}$ に近い結果となった例。統計学の中心極限定理で解釈できる。**(N 台同時1回実行を5台繰返し実行に置換えているが・・・)**



(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)

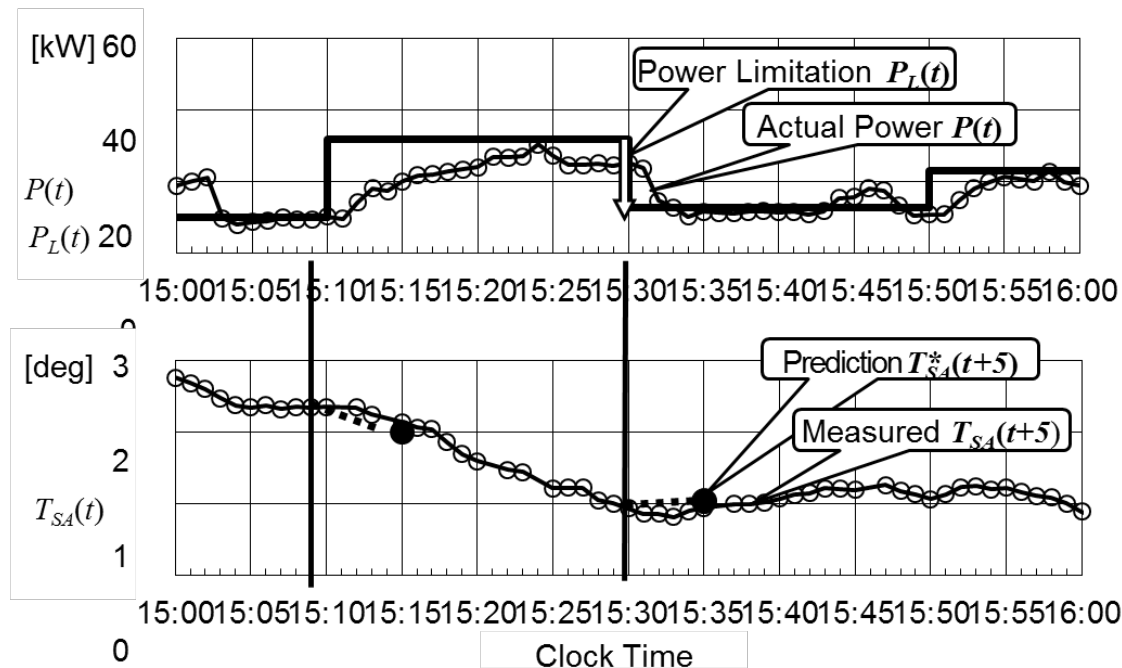
ビル用マルチエアコンの分刻み消費電力

- ビル用マルチエアコン設備は、冷媒配管長さ1000m程度、室外機台数数十台、室内機台数数百台に及ぶ。
- 各室外機と複数台の室内機との間の冷媒回路において、秒単位で冷媒圧力、流量、温度を精密制御しているため、分刻みの消費電力は確率的に変動している。



ビル用マルチエアコンFastADR応答の予測

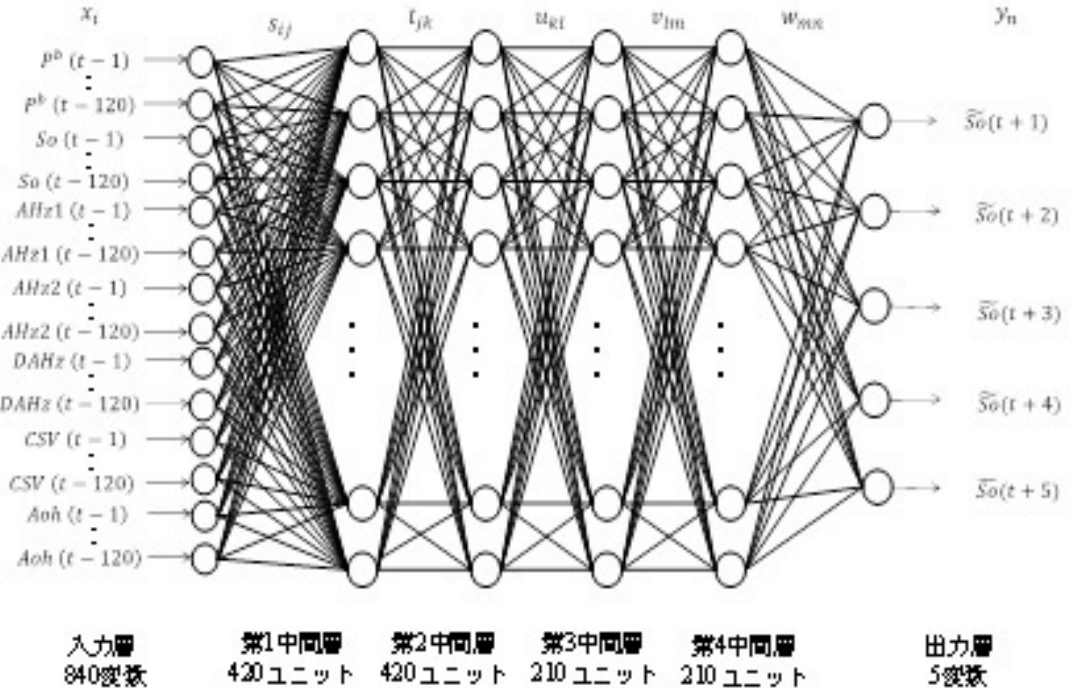
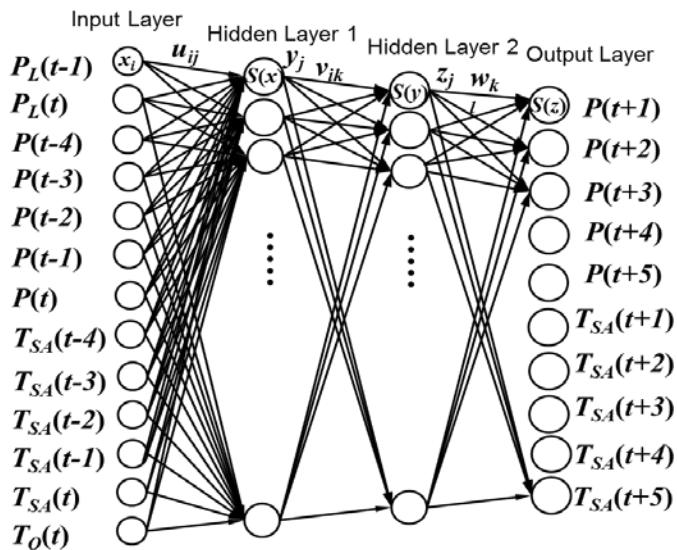
- 従来の1時間単位といった遅いデマンドレスポンス(DR: Demand Response)の場合, 特定室内機の停止, 設定温度のシフトなどゆっくりとした管理だった。
- 将来のFastADRでは, 5分程度の短時間の電力抑制応答, つまり, ΔkW を大規模集約することで高額な取引が期待される。
- 5分程度であれば, 室温を大きく変動させない長所があるが, 短時間電力は熱負荷によらず, 冷媒制御のために頻繁に複雑に変動するので予測が難しい。



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

FastADR応答のディープラーニングモデル

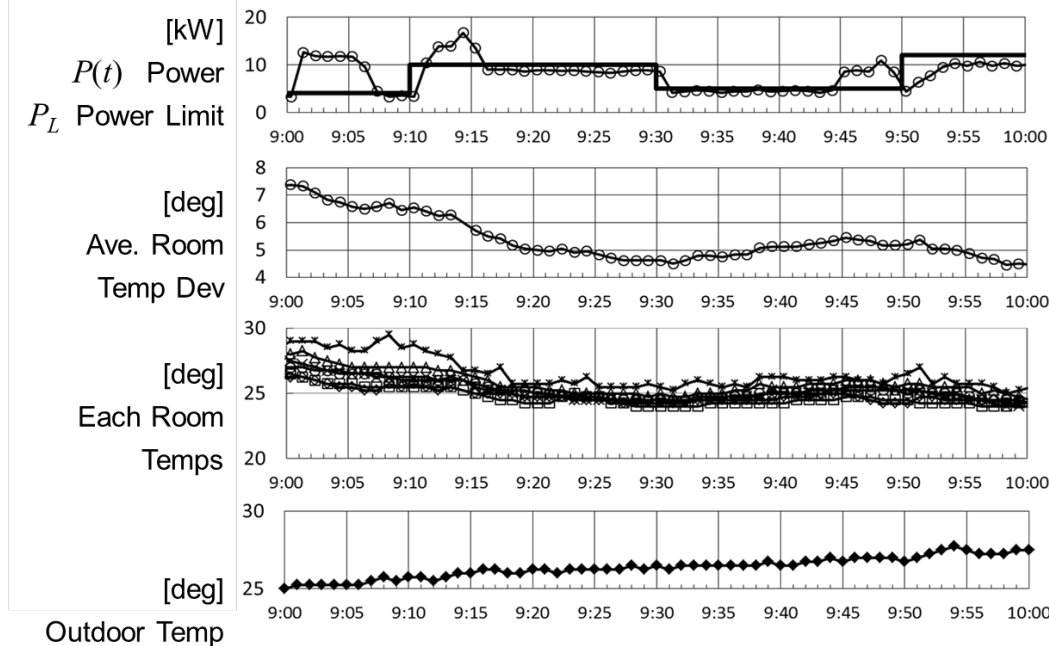
- 昨今のディープラーニングは画像処理など大規模になっているが、ビル用マルチエアコンの電力・室温5分後ステップ応答であれば、数十変数で4層程度の方が使いやすい。
- 1時間程度の動作履歴に依存して突発的に発生する、保全運転など消費電力のスパイク状変化を予測するには、800変数のMLP型や、LSTM型が有効。
- 経験上、FastADRの5分後電力と室温変化の予測モデルでは、4層MLP型NNとAR自己回帰モデルを組み合わせたアンサンブル予測モデルが最もよかった。



蛭川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調機群の優先エリア複合制御」, 空気調和・衛生工学会論文集 No.268, 2019年

FastADR応答数式モデル同定のための時系列データ

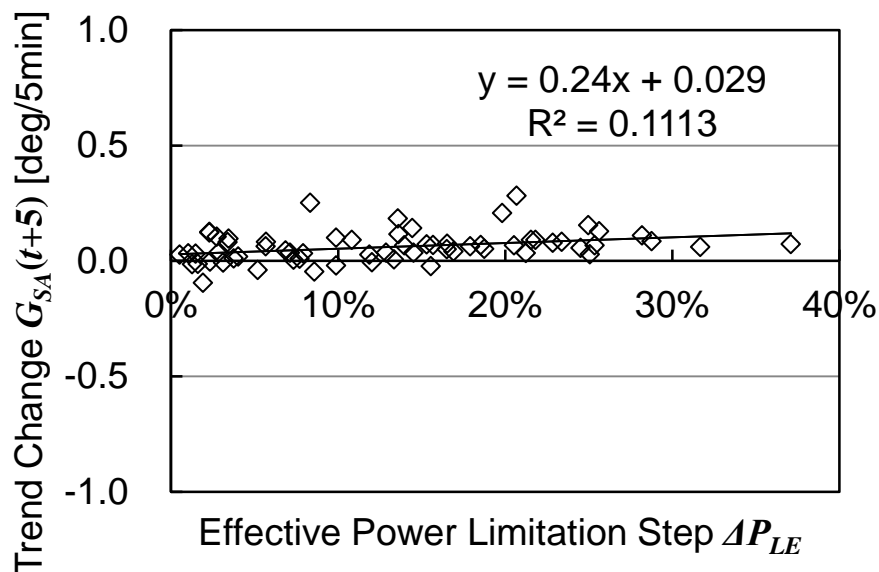
- ビル用マルチエアコンFastADR応答は確率的で複雑なので、大量の実機時系列データからAR (AutoRegressive) とNN (Neural Network) を同定してその組合せモデルを狙った。



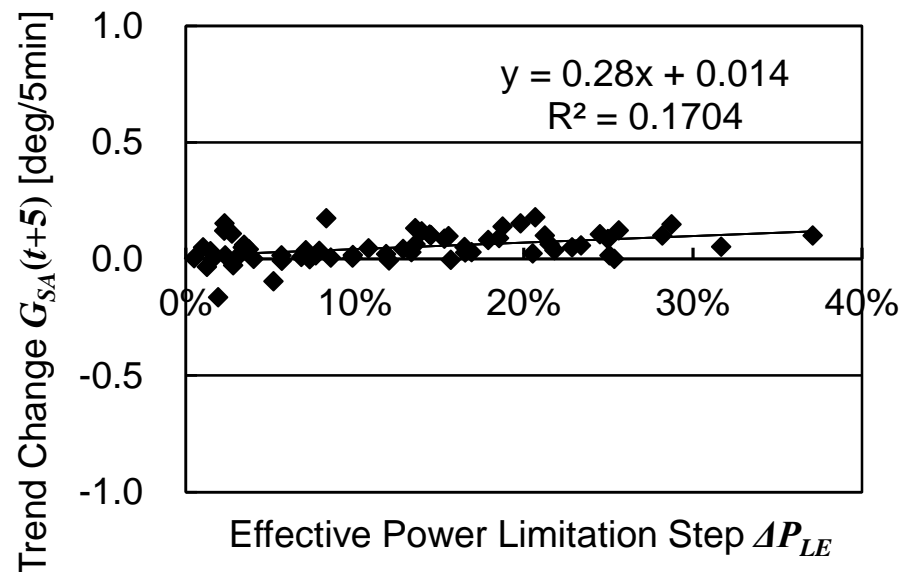
項目	仕様
建物種別	一般的なオフィスビル
諸元	2階建て, 延べ床 1600 m ²
室外機台数	5台
室内機総数	6台 × 5Blocks, 合計30台
定格冷房能力	40, 40, 45, 68, 73 [kW]

FastADRの副作用である室温偏差のトレンド変化

- 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?)。



(a) ディープラーニング・ニューラルネット予測

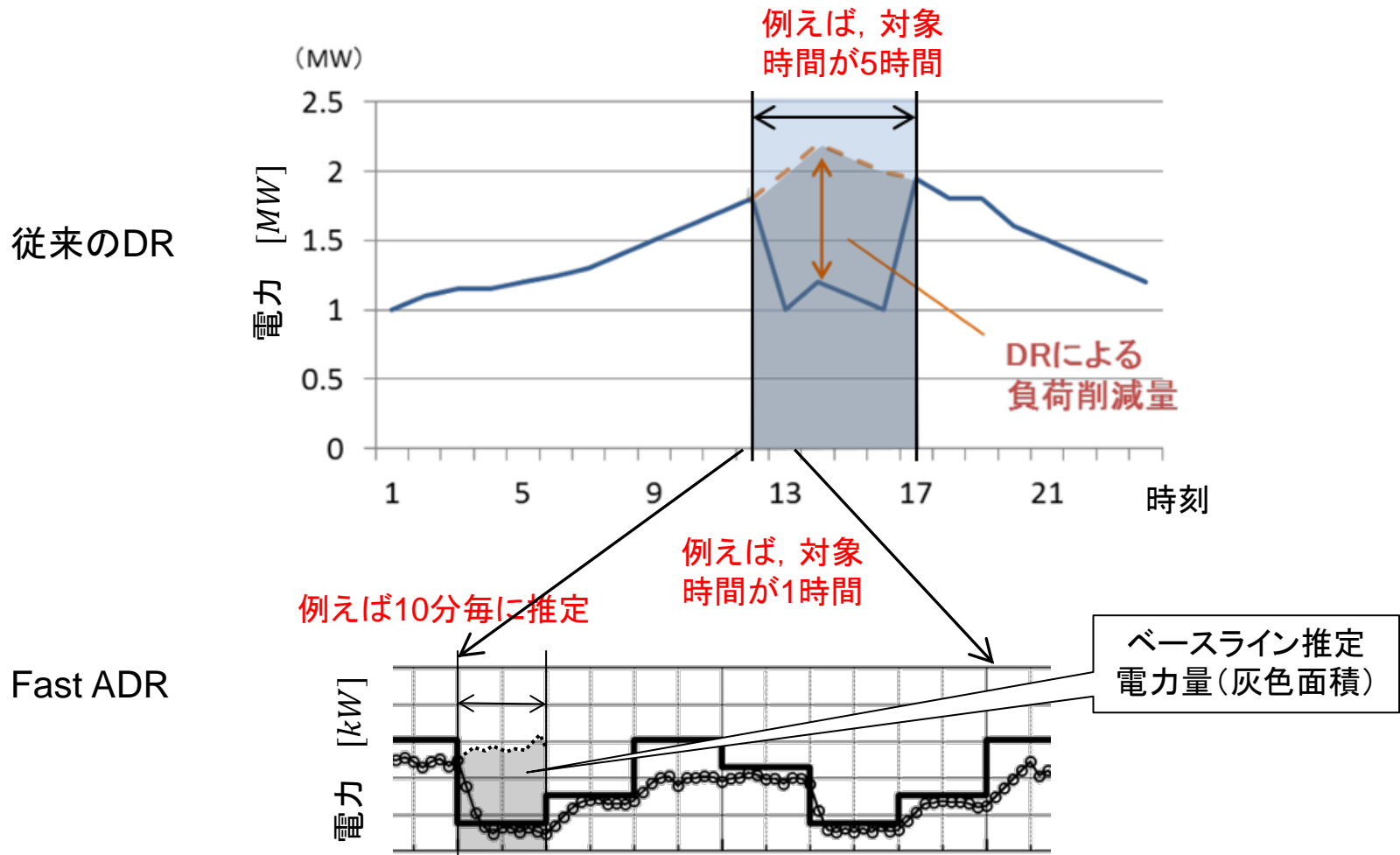


(b) 実機実測データ

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

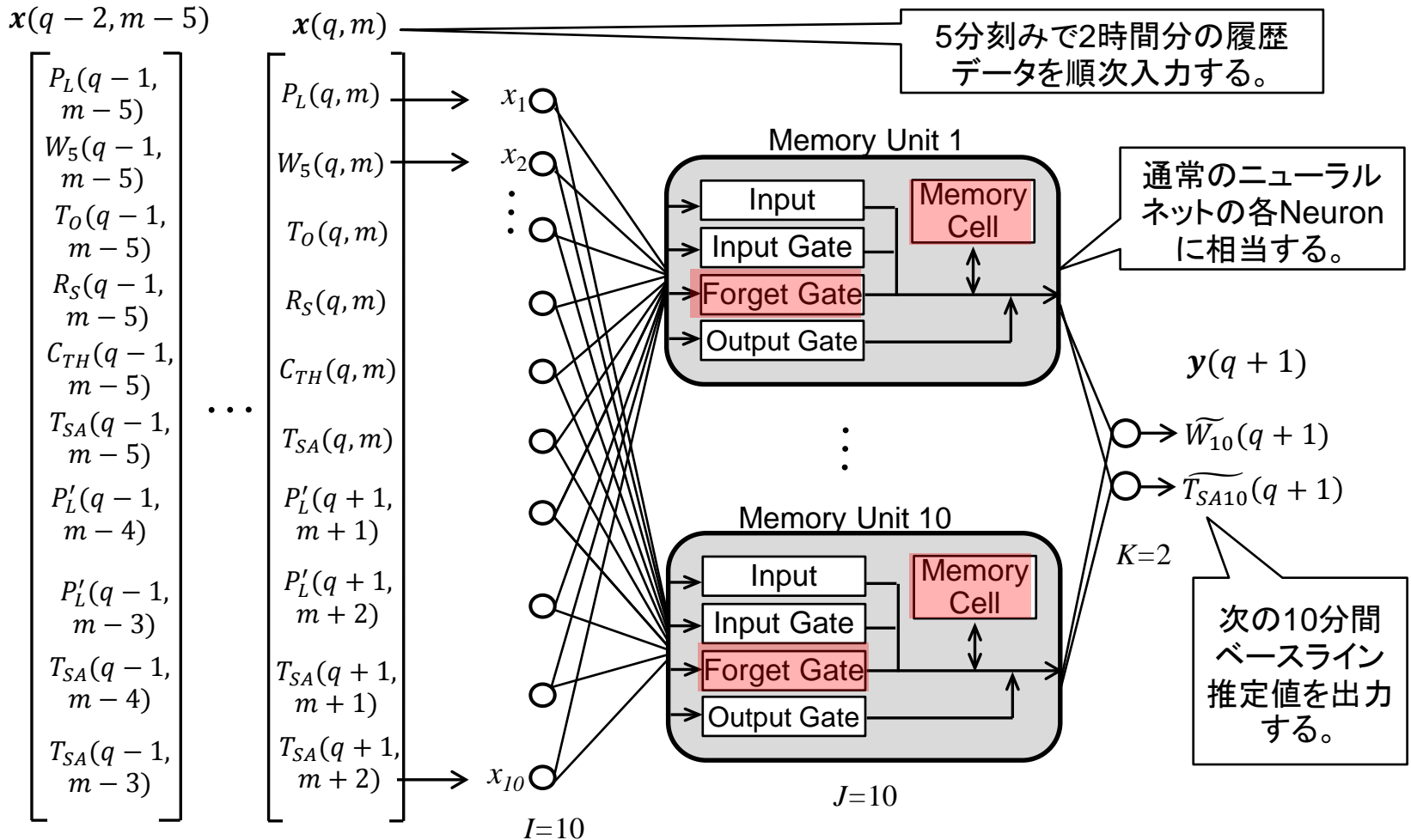
FastADR用の短時間ベースライン推定技術の開発

- 高速な10分程度のFastADRの場合、X of Y法などで過去数日の数時間平均で推定しても、短時間の変動は推定できない。
- 例えば10分毎の電力制限値実施データからベースライン推定する将来技術を開発したい。



FastADR用の短時間ベースライン推定LSTMモデル

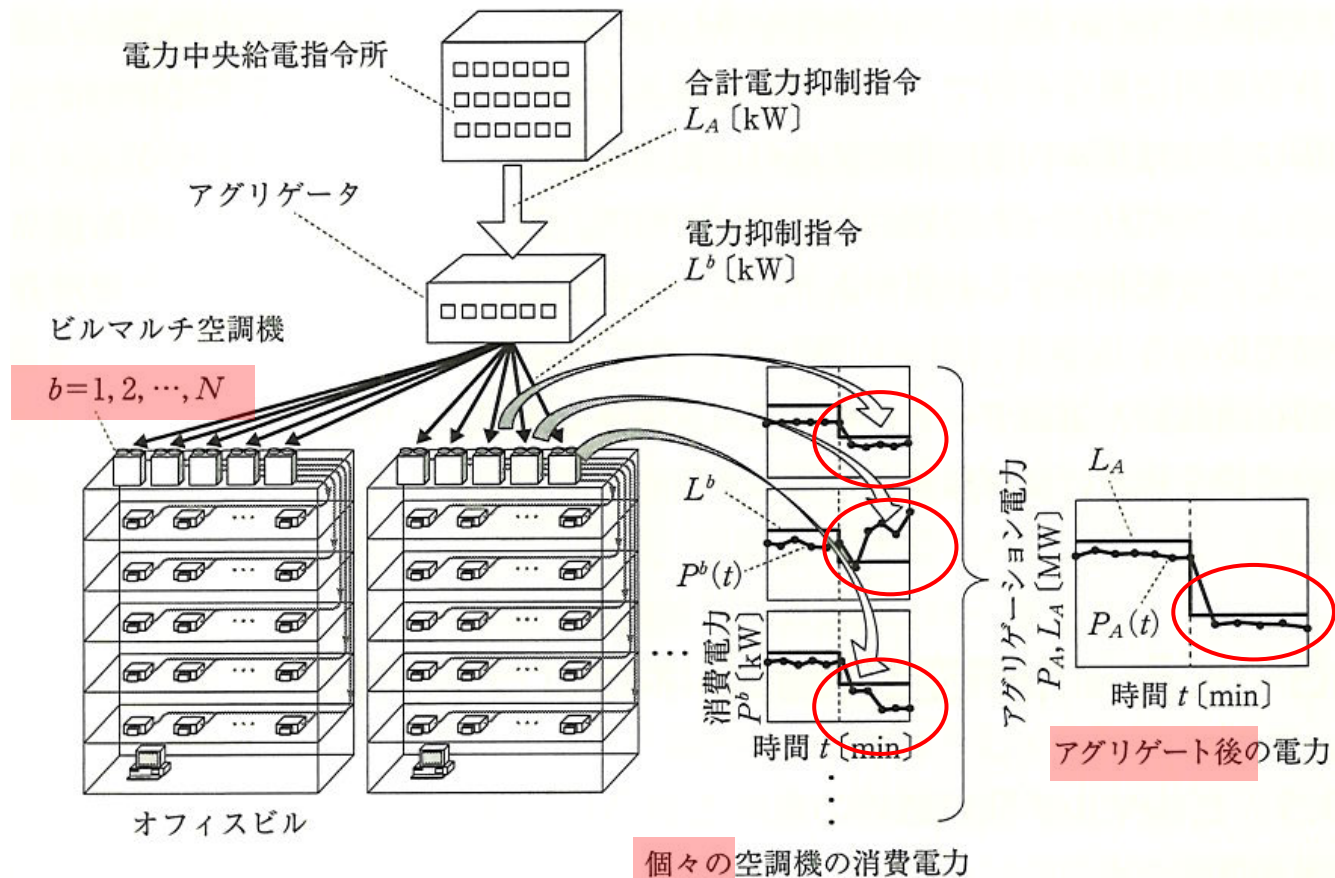
- 5～10分程度といった短時間の空調電力は動作履歴に大きく影響されるので、蜷川研では時系列ニューラルネットLSTM(Long Short Term Memory)モデルを研究している。



(C. Ninagawa, et al., "LSTM Neural Network for Fine-Granularity Estimation on Baseline Load of Fast Demand Response", International conference on Engineering Application of Neural Networks, 2020)

FastADR大量アグリゲーションの不確実性緩和

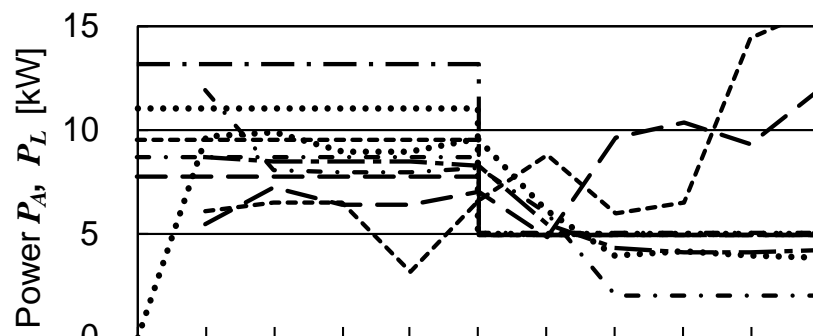
- 現状, ビル用マルチエアコンDRはVPPには不確実とされている。しかし, 室温が変化しない5~10分のFastADRを何千台と大量アグリゲーション(集約)した場合, 確率的均し効果に期待。
- 事実, 太陽光発電では1台1台では不確実な発電出力も, 大量に集約すると不確実性が均されていくので, VPPのリソースとして実現可能になってきた。



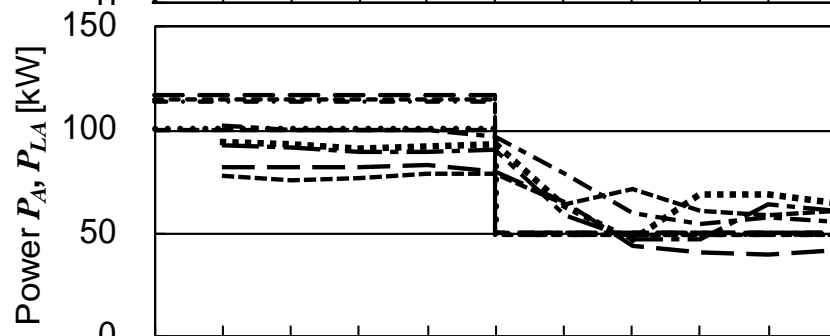
ビルマルチFastADR応答重合せ数 N と均し効果

- FastADR応答時系列波形から N 回合成応答波形(アグリゲーション相当)を求めて、確率的変動の均し効果、および、合成指令値と合成実現値の誤差を評価した。

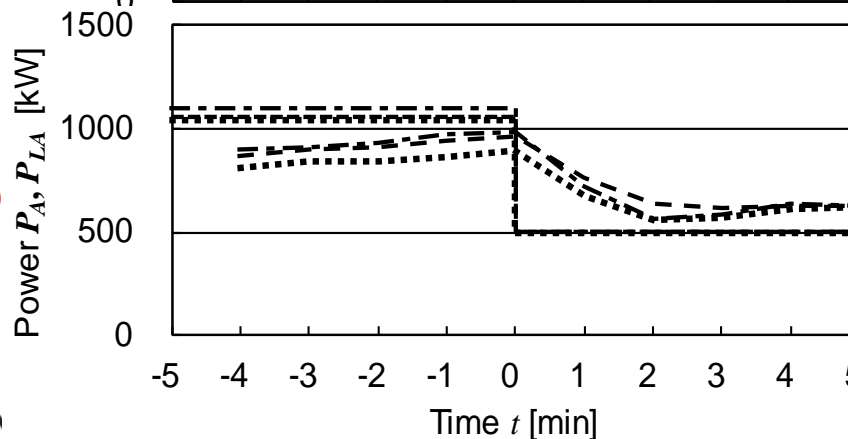
No. of aggregated responses : $N = 1$



No. of aggregated responses : $N = 10$



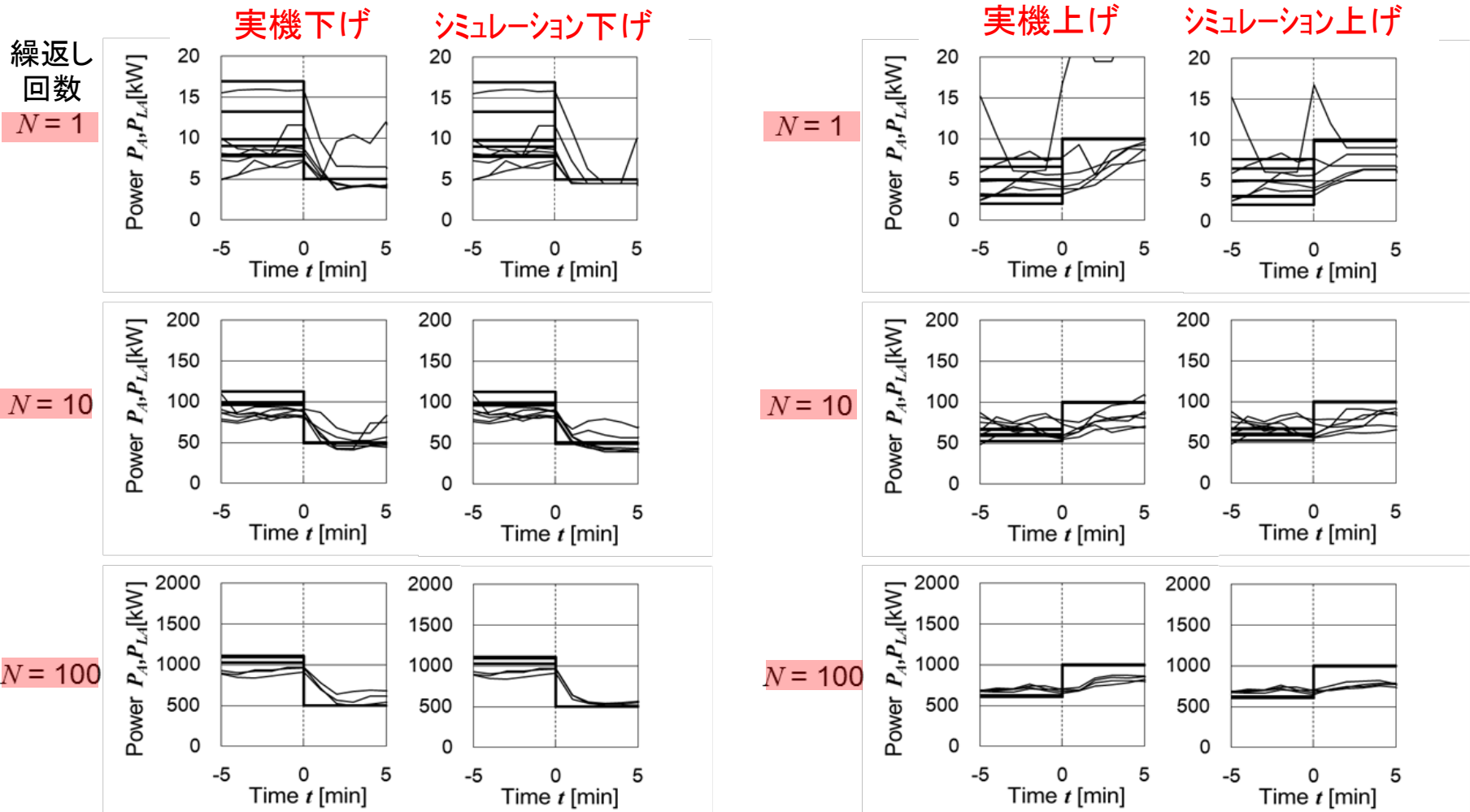
No. of aggregated responses : $N = 100$



蜷川他:「実機計測に基づくビルマルチ空調群DR過渡応答」, 電気学会論文誌B, Vol.138, No.7, pp.582-590, 2018年

ビルマルチ空調仮想発電所のFastADR均し効果

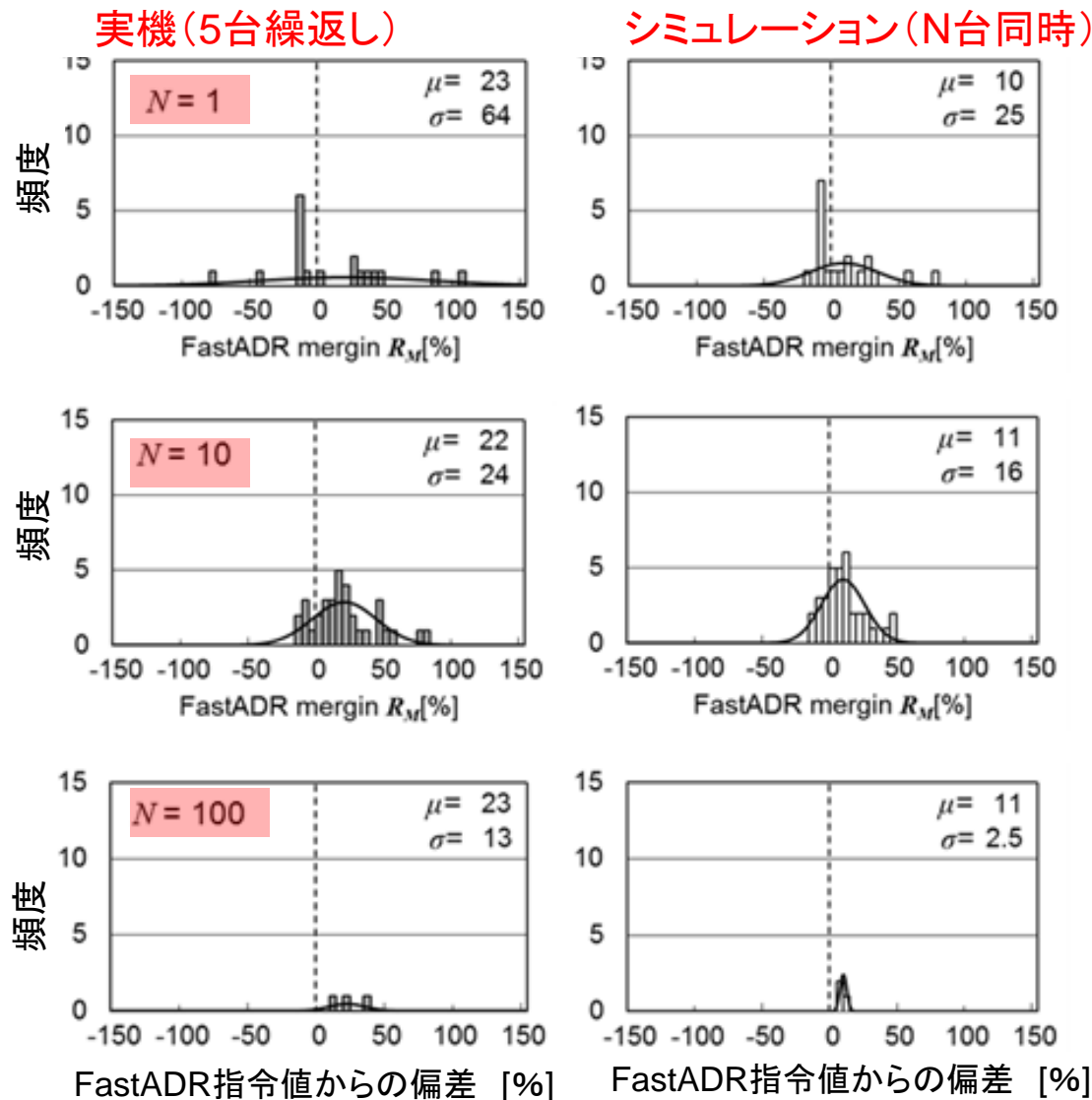
- 仮想発電所シミュレーションに先立ち、ビルマルチ空調FastADR応答に不確実応答特性を持たせた上で、アグリゲーションによる均し効果を実機（繰返し加算）と比較しておいた。



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, 201)

FastADRアグリゲーション実績値の均し効果

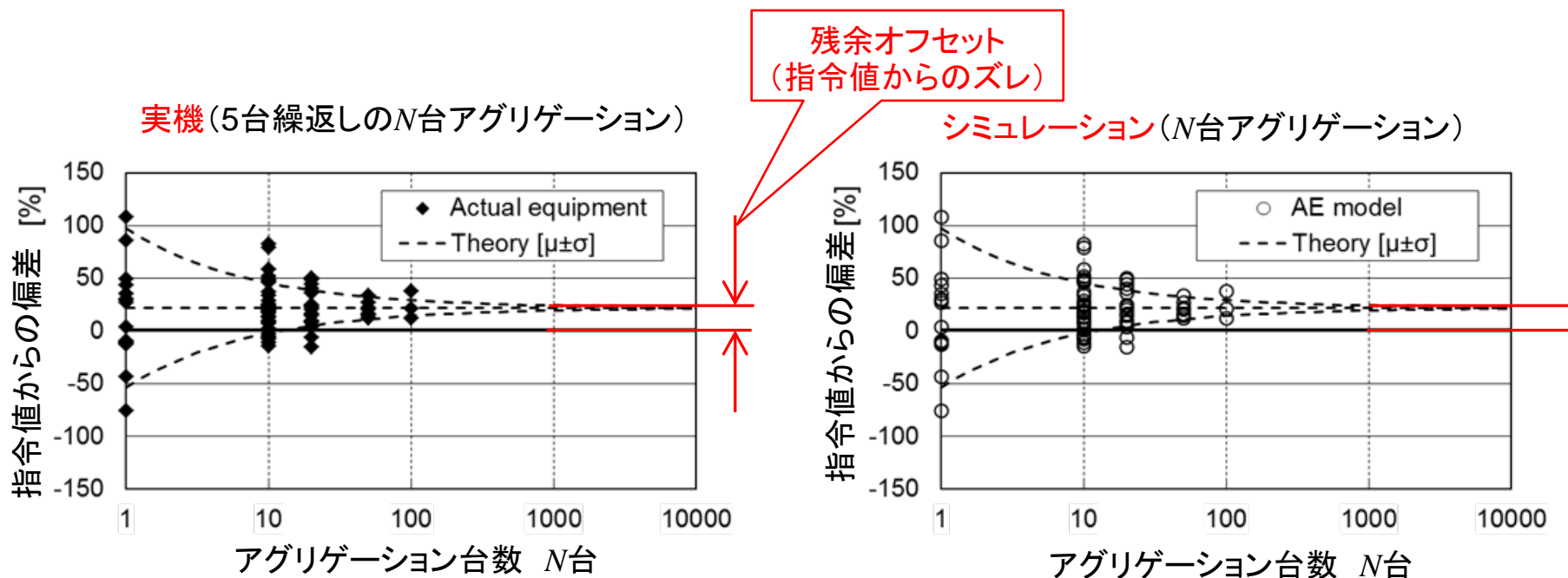
- 実績値の指令値からの差分分布を、実験とシミュレーションで比較。正規分布に近づく。



(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

- ばらつき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、何台アグリゲートしようと減少していかない。(ただし予測可能であろう)

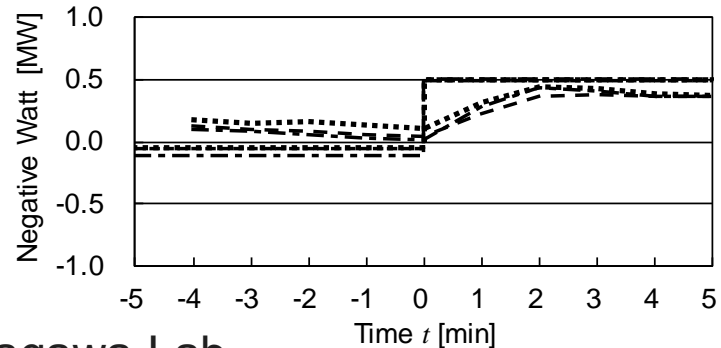
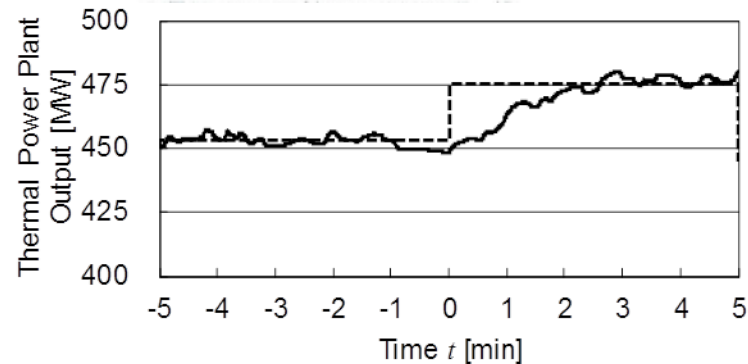
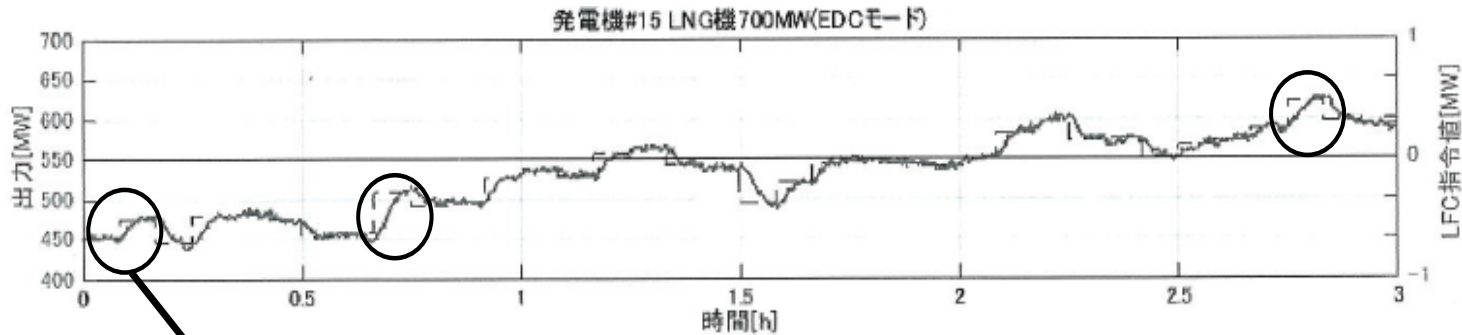


(C. Ninagawa, et al., "Averaging Effect Model on Aggregation Margin of Fast Demand Responses of Building Multi-type Air-conditioners", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT2019, pp.1274-1279, Melbourne, Australia, 2019)

ビル用マルチエアコン群によるVPP

ビル用マルチエアコンFastADRと火力発電の応動特性比較

- 電気学会系統需給シミュレーション標準(No.1386)モデルAGC30のLNG火力EDC応答特性の時間特性と比較した。



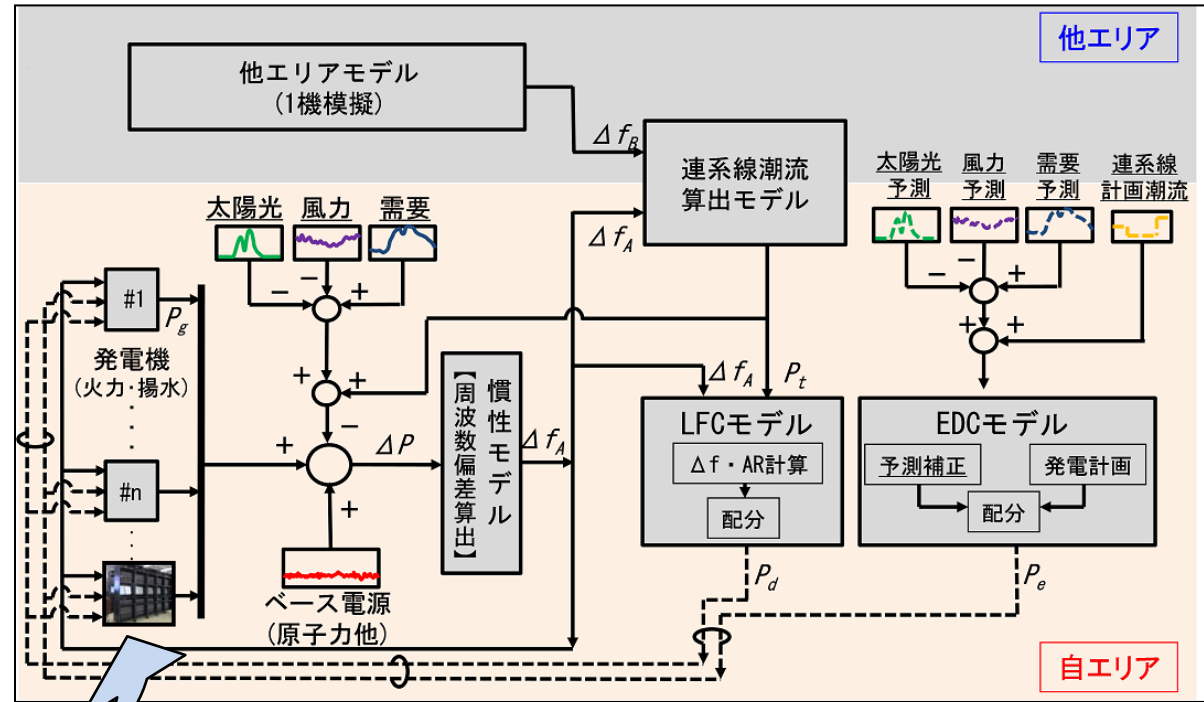
蜷川他:「実機計測に基づくビルマルチ空調群DR過渡応答」, 電気学会論文誌B, Vol.138, No.7, pp.582-590, 2018年

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、蛭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。

電気学会電力系統シミュレータAGC30をリアルタイム化

蛭川研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

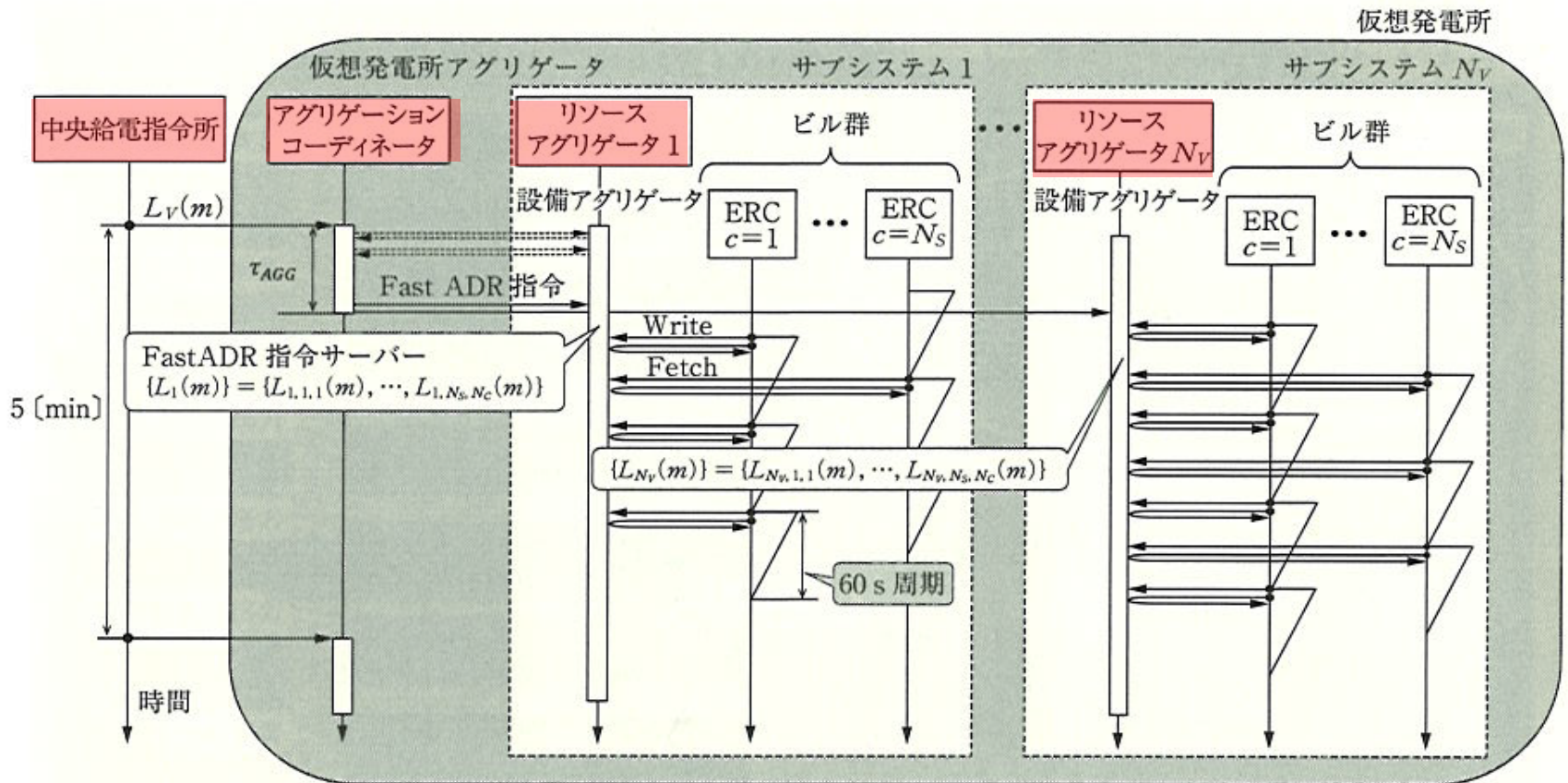


FastADR シミュレータ
 と1秒間隔でリアルタイムに電力値を渡す。

蛭川ほか:「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

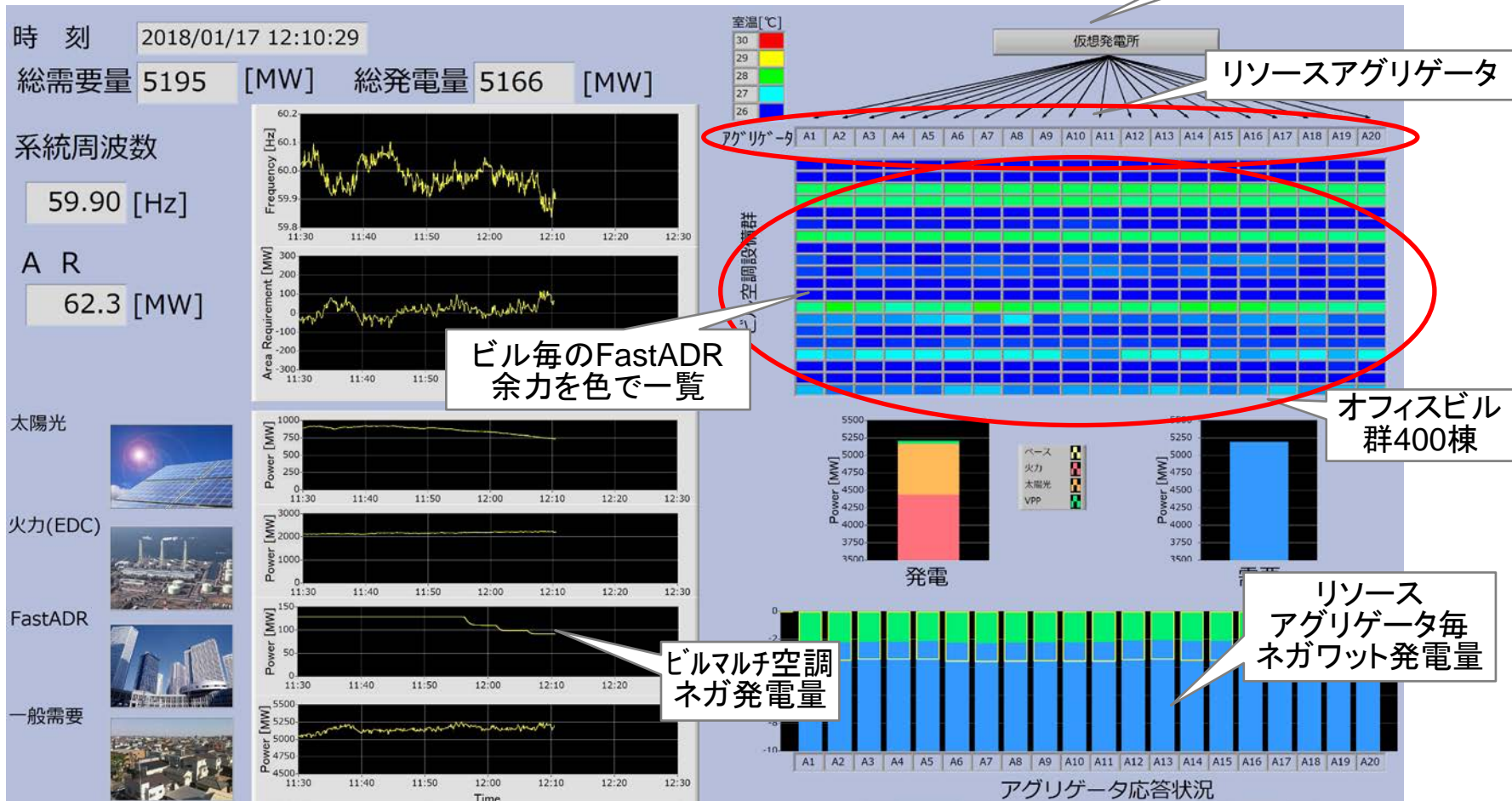
- FastADR自身は高速だが、事前の手続きに何往復もの通信が必要。系統側は簡易通信を仮定し、需要家側は**実際の通信プロトコル (OpenADRとIEEE1888) を実装して遅れをミュレーション**した。



(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

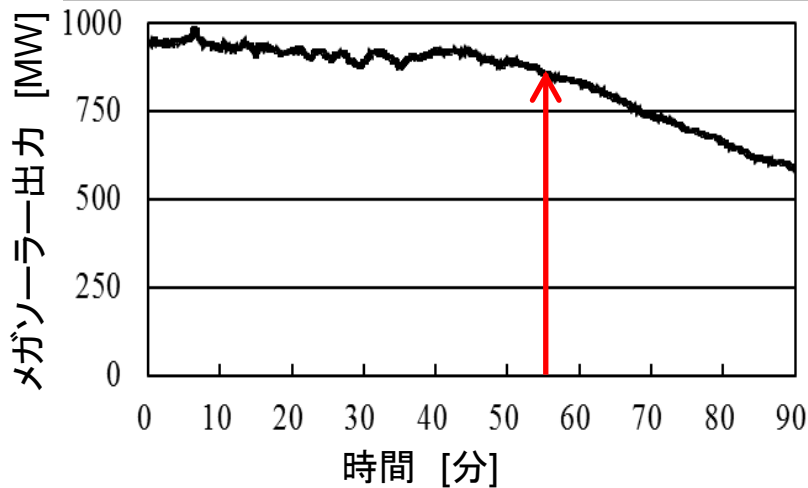
- 蛭川研の仮想発電所システム監視制御画面。リソースアグリゲータ20社, ビル400棟, ビルマルチ空調設備(室外機)6500台。
- 仮想発電所センターをイメージしたToy Monitor。



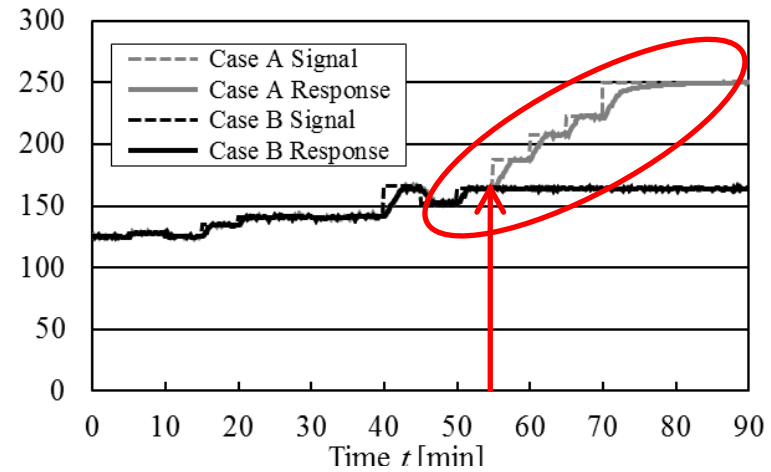
岐阜大学蛭川研究室のビルマルチ空調機群FastADR仮想発電所システムの監視画面

ビルマルチ空調仮想発電所システムの応動性

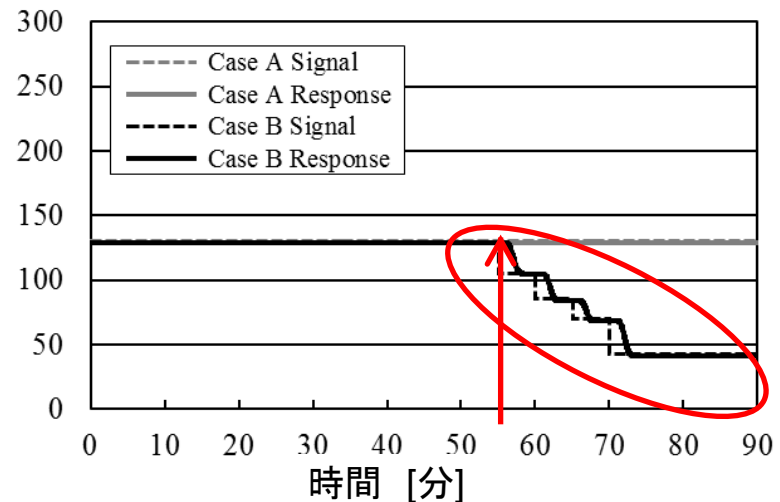
- EDC制御として5分毎約20MWずつ加速応動性をAGC30のGTCCと比較した。ビルマルチ空調FastADRアグリゲーションの広域通信による応動は1~2分位かかると思われる。
- ただし、今回は居住者Opt-Outを考慮しておらず、大きな問題が残っている。短時間FastADRをローテーションする等、Opt-Outをさける工夫が現実問題としては大きい。



対応火力発電機出力 [MW]



仮想発電所FastADR [MW]



(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)

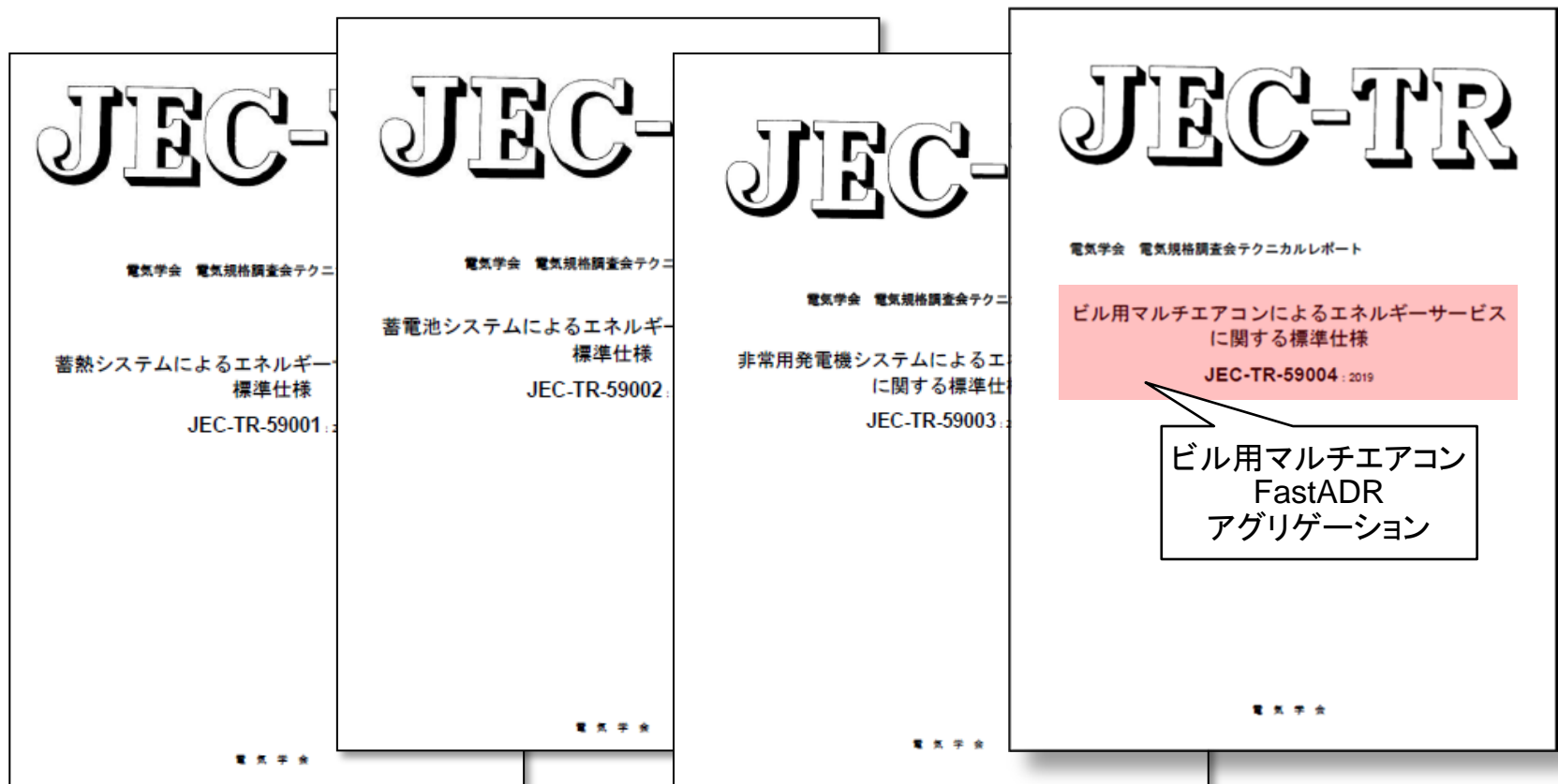
電気学会スマートグリッド需給調整規格

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)

- **ビル用マルチエアコンも取入れられた**(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。



バーチャルパワープラントのビル需要家リソース

- 実証プロジェクトなどで目途がきつ々ある需要家の分散型需給調整リソースではなく、さらに難易度が高いリソースも使えるのか、大学の研究としてチャレンジ。
- 電気学会産業応用部門SGTEC委員会が検討対象としたリソースは以下の4種類。

電気学会SGTEC委員会が選定した需要家リソースの比較(私見)

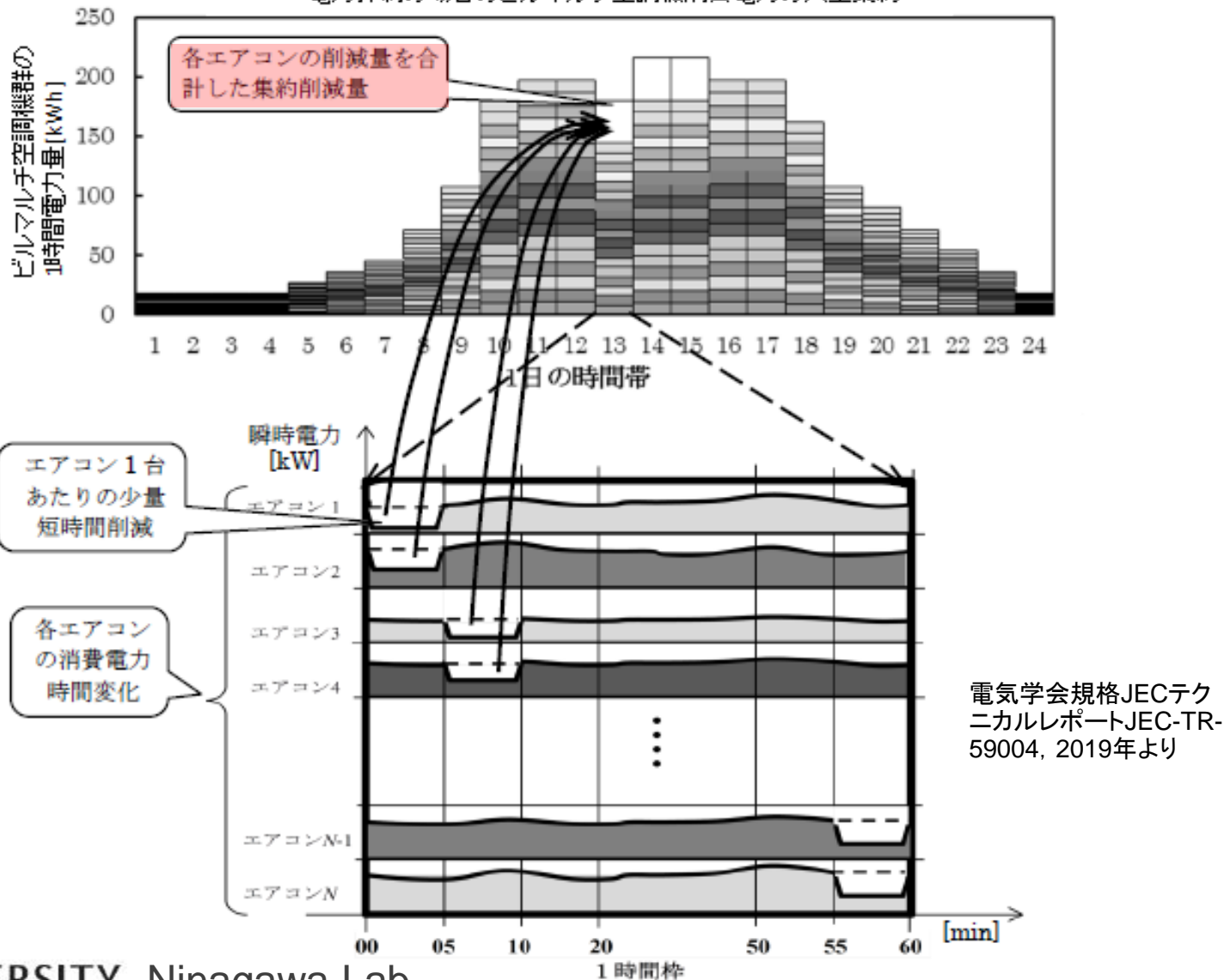
	CO2フリー	設備投資	応動性	確実性	実用化	電気学会規格資料※
ビル用蓄熱システム	○	△	△	○	○	JEC-TR-59001
ビル用蓄電池システム	○	△	◎	△	○	JEC-TR-59002
非常用発電機	× ディーゼル	△	△	○	◎	JEC-TR-59003
ビル用マルチエアコン群	◎ 電力抑制 するだけ	◎ 既存設備	○ 数分程度 可能	×→○ 超大量集約 すれば	×→△ 大学研究	JEC-TR-59004

※ 電気学会産業応用部門SGTEC委員会が2018年～19年に作成したJEC-TR規格化資料。
電力エネルギーサービスとして需給調整に資する需要家設備の制御方法について提案するもの。

ビル用マルチエアコンの短時間デマンドレスポンス・アグリゲーション

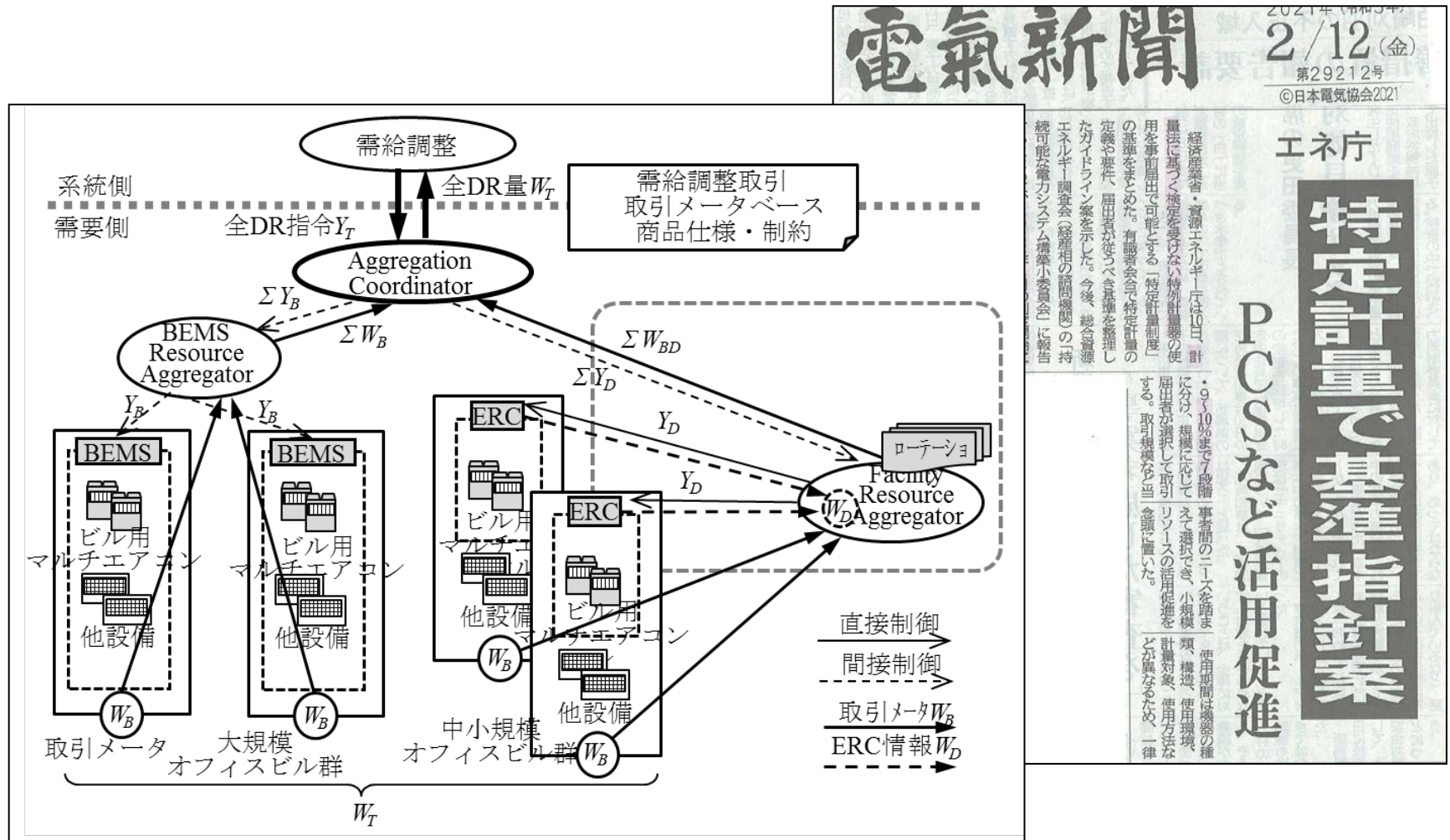
- 多くの空調機でローテーションすることで、1台あたりに換算するとわずか数kWとなる。

電力抑制の場合のビルマルチ空調機消費電力の大量集約



ビル用マルチエアコン群のデマンドレスポンス報酬分配イメージ

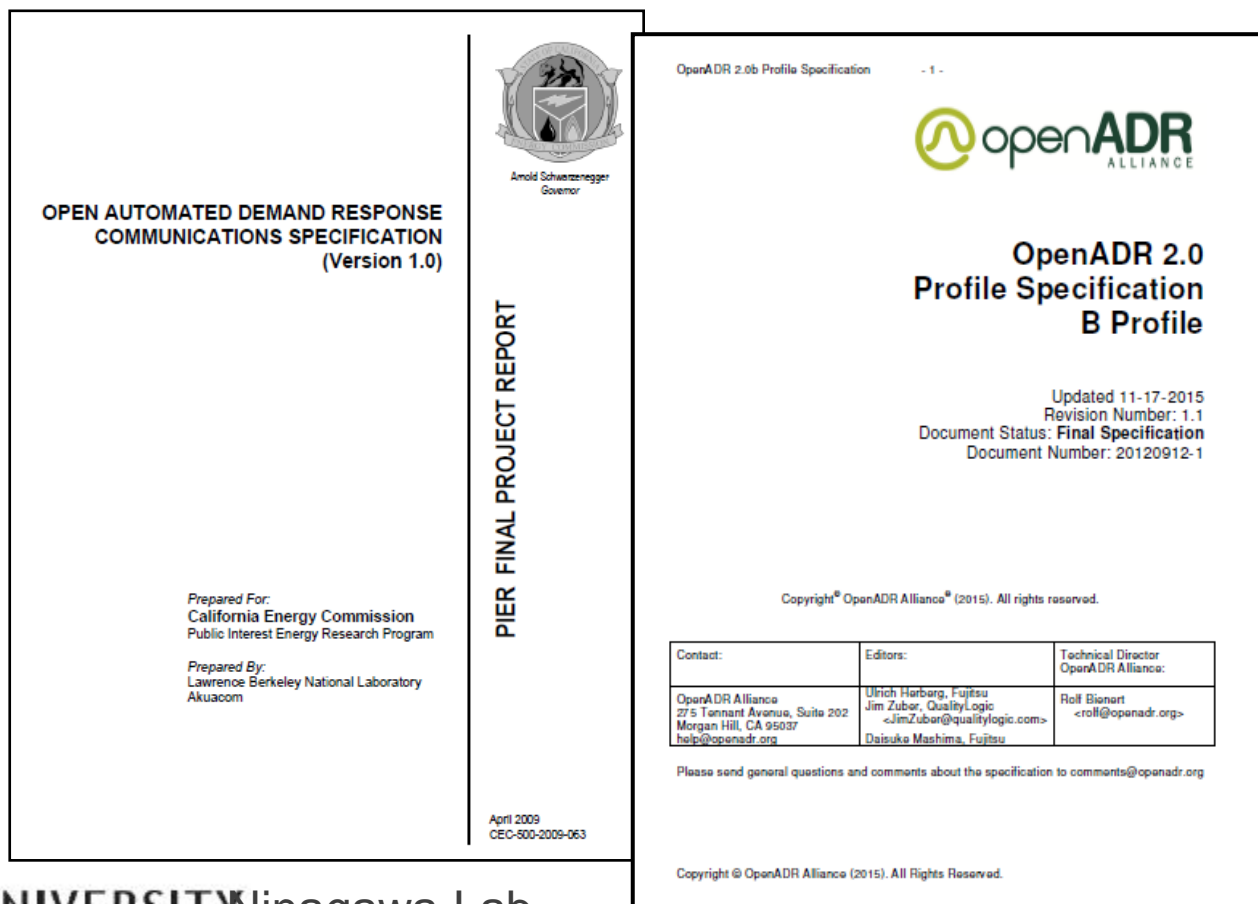
- 電力抑制値情報 W_D は取引電力計とは異なり, ビル用マルチエアコンの室外機の圧縮機インバータの制御のために1分ごとに計量された室外機の消費電力(瞬間値)である。



参考文献: 蜷川忠三著:「仮想発電所システムの構築技術」, オーム社, 2019年

OpenADR通信規格とは

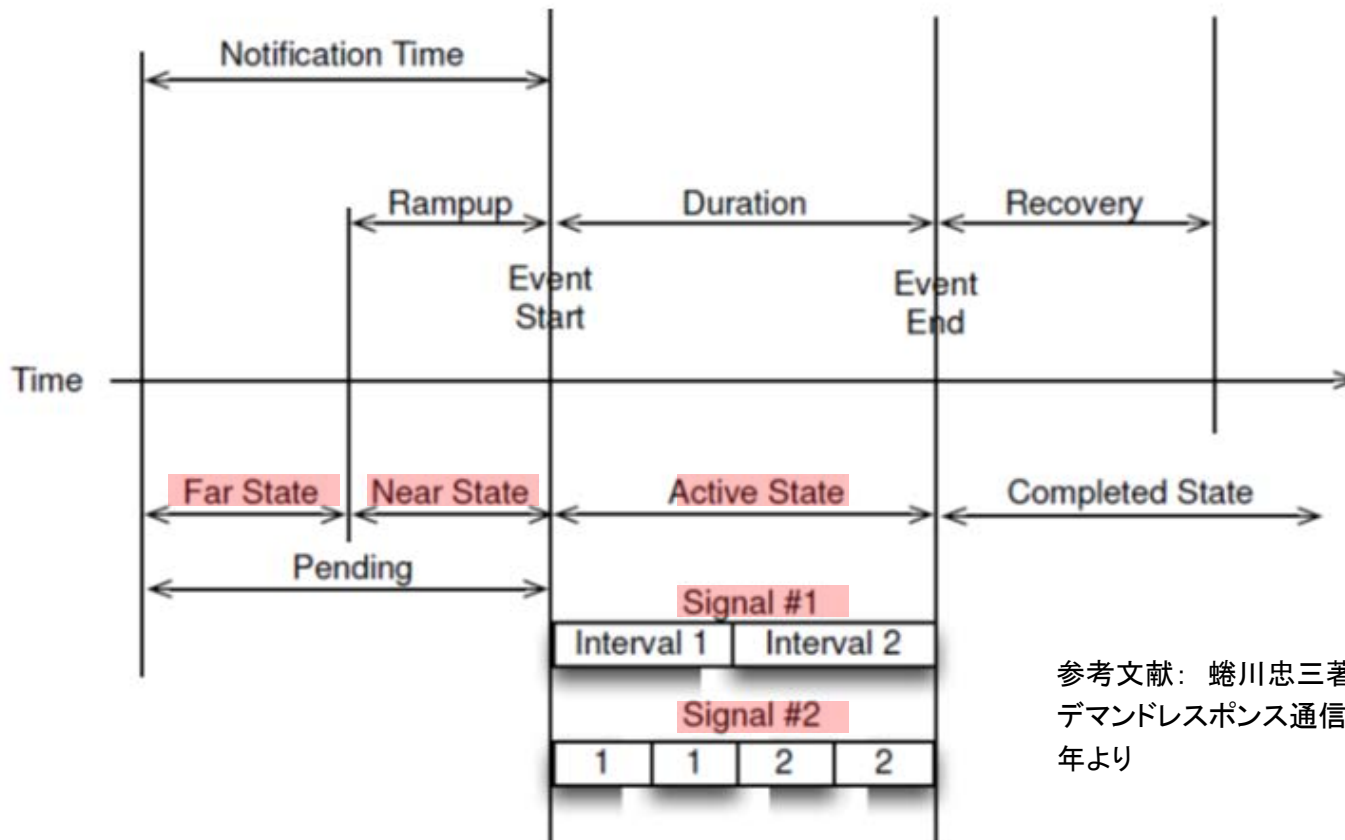
- OpenADR通信規格とは、公開された(Open)規格であり、自動的(Automated)に需要家電力(Demand)を、電力系統側要求に応答(Response)制御するシステム通信の標準規格。
- 2000年初頭のカリフォルニア電力危機を契機に、国立Lawrence Berkeley研究所、Akuacom社が共同開発した。その後、国際規格としてデファクトスタンダードとなった。
- 本セミナーでは、現行OpenADR 2.0 Profile Specification B (通称OpenADR 2.0b)を扱う。



文献： 蜷川忠三
著：「OpenADRに
よるデマンドレスポ
ンス通信」, 森北出
版, 2020年より

EiEventサービスにおけるデマンドレスポンスの流れ

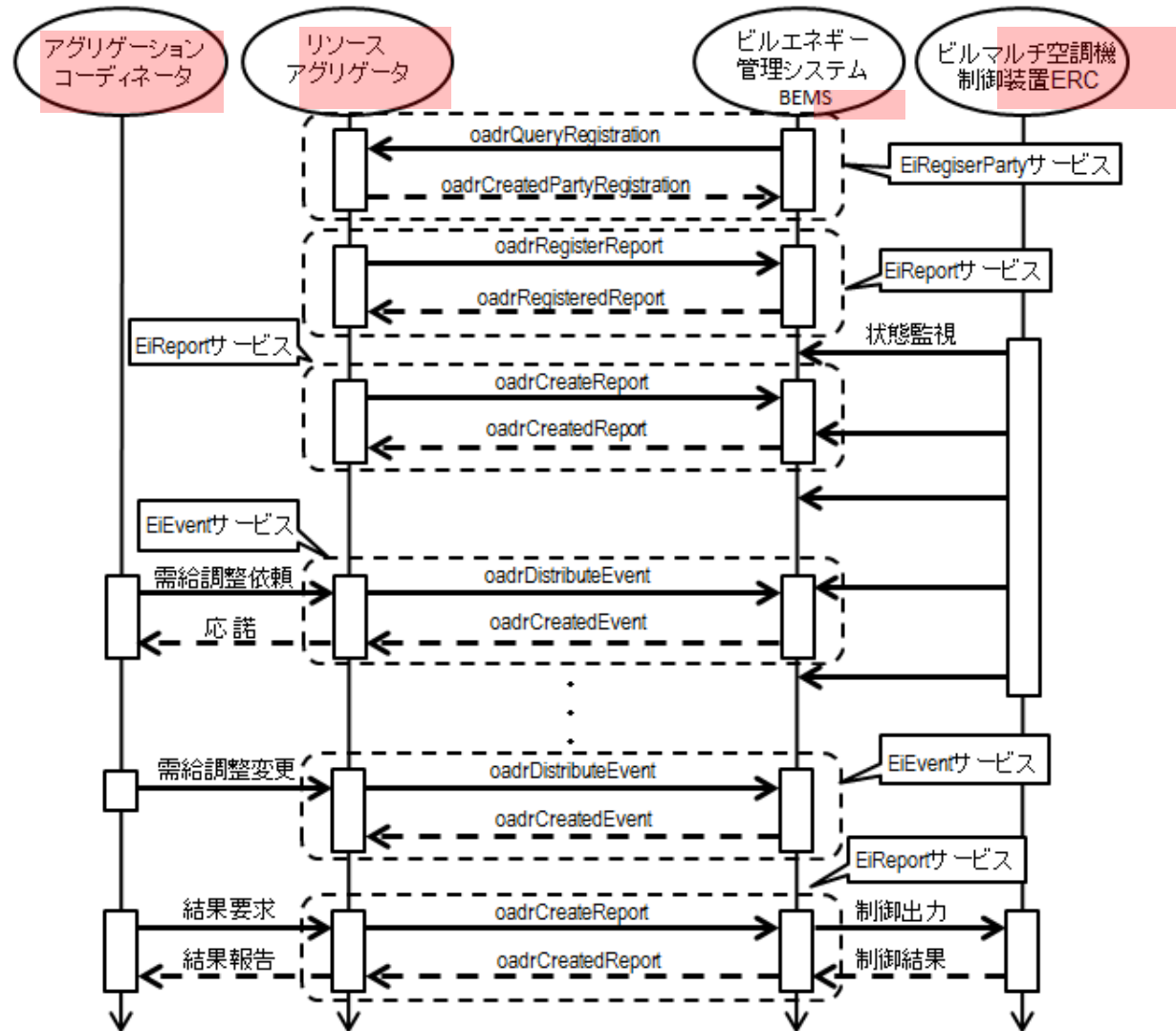
- デマンドレスポンスの流れは、実施期間NotificationTime, 立上り期間Ramp Up, 継続時間Duration, 復帰期間Recoveryに分けられ、各期間事前Far, 近傍Near, 実行Active, 完了Completeの段階がある。
- 実施時間内は区間Intervalに分け、デマンドレスポンス指令単位であるSignalにより各区間の調整目標電力量, インセンティブ価格などを伝える。



参考文献: 蛭川忠三著:「OpenADRによるデマンドレスポンス通信」, 森北出版, 2020年より

間接制御デマンドレスポンスのOpenADRサービス順列

- 電気学会標準JEC-TR-59004の図8.20より。
- エネルギーサービス事業者がVTN, ビルエネルギー管理システム(BEMS)がVENになる。
- 各サービスにはそれぞれペイロードが決められており, 目的はサービス, 手段はペイロードで指定してメッセージを作成する。
- VTNとVEN間のメッセージ授受により, デマンドレスポンスを行う。



参考文献: 蛭川忠三著:「OpenADRによるデマンドレスポンス通信」, 森北出版, 2020年より

EiEventサービスのoadrDistributeEventリクエスト

- oadrDistributeEventリクエストでは、指令識別ID、デマンドレスポンス指令、実施時間中フレーム毎の制御用信号(制御値や電力消費量, 価格等)を設定する。

```
<oadrPayload>
<oadrSignedObject>
<oadrDistributeEvent ei:schemaVersion="2.0b">
<pyld:requestID>43d5557398af436d71a</pyld:requestID>
<ei:vtnID>EPRI_VTN</ei:vtnID>
<oadrEvent>
<ei:eiEvent>
<ei:eventDescriptor>
<ei:eventID>060382372d397a28a11c</ei:eventID>
<ei:modificationNumber>0</ei:modificationNumber>
<ei:modificationReason/>
:
<ei:createdDateTime>2019-08-29T07:54:01Z</ei:createdDateTime>
<ei:eventStatus>active</ei:eventStatus>
<ei:testEvent>>false</ei:testEvent>
<ei:vtnComment/>
</ei:eventDescriptor>
<ei:eiActivePeriod>
<xcal:properties>
<xcal:dtstart>
<xcal:date-time>2019-08-29T07:46:00Z</xcal:date-time>
</xcal:dtstart>
<xcal:duration>
<xcal:duration>PT60M</xcal:duration>
</xcal:duration>
:
</xcal:properties>
<xcal:components xsi:nil="true"/>
</ei:eiActivePeriod>
<ei:eiEventSignals>
<ei:eiEventSignal>
<strm:intervals>
<ei:interval>
<xcal:duration>
<xcal:duration>PT60M</xcal:duration>
```

DR指令のIDや修正回数を記述

開始時刻や実施時間を記述

信号の実施時間, 順序, 値を記述

```
</xcal:duration>
<xcal:uid><xcal:text>0</xcal:text></xcal:uid>
<ei:signalPayload>
<ei:payloadFloat><ei:value>5000</ei:value></ei:payloadFloat>
</ei:signalPayload>
</ei:interval>
</strm:intervals>
<ei:signalName>LOAD_DISPATCH</ei:signalName>
<ei:signalType>setpoint</ei:signalType>
<ei:signalID>6dabe4e7c33b155a42e2</ei:signalID>
<power:powerReal>
<power:itemDescription>RealPower</power:itemDescription>
<power:itemUnits>W</power:itemUnits>
<scale:siScaleCode>k</scale:siScaleCode>

<power:powerAttributes>
<power:hertz>60</power:hertz>
<power:voltage>100</power:voltage>
<power:ac>>true</power:ac>
</power:powerAttributes>
</power:powerReal>
</ei:eiEventSignal>
</ei:eiEventSignals>
<ei:eiTarget>
<ei:venID>5cfe93f85986b2c5091f</ei:venID>
</ei:eiTarget>
</ei:eiEvent>
<oadrResponseRequired>always</oadrResponseRequired>
</oadrEvent>
</oadrDistributeEvent>
</oadrSignedObject>
</oadrPayload>
```

信号値の名称や制御単位を記述

制御対象を記述

レスポンス要求の有無を記述



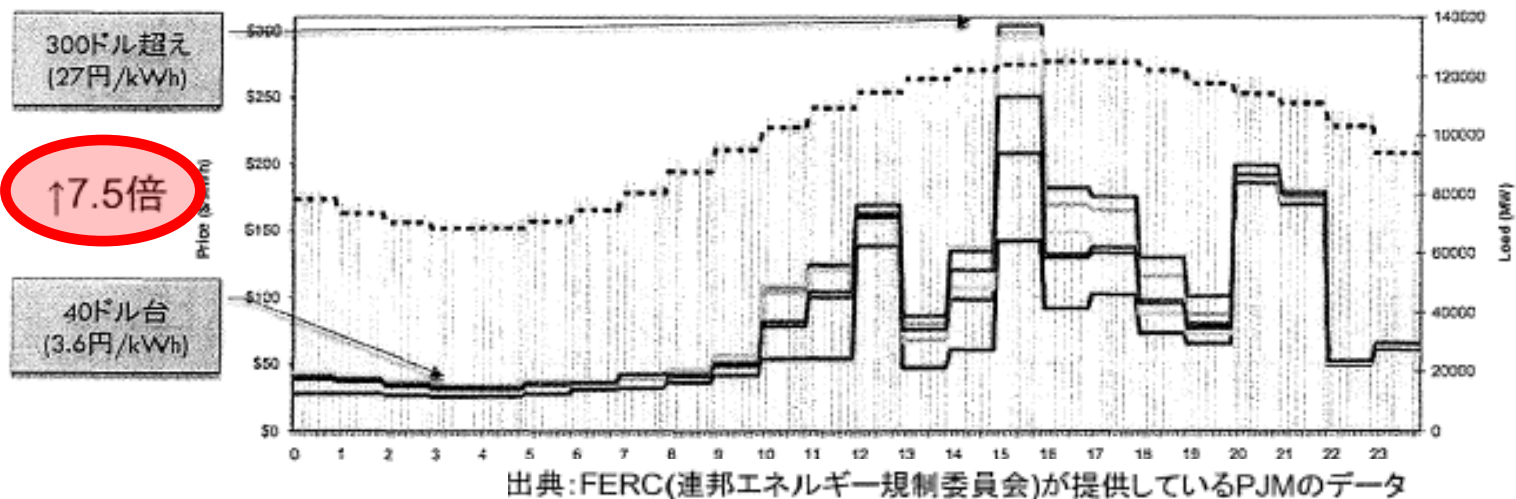
参考文献: 蜷川忠三著:「OpenADRによるデマンドレスポンス通信」, 森北出版, 2020年より

リアルタイム料金に適応する最適探索制御

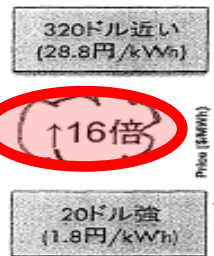
リアルタイム料金 (RTP) によるネガワット

- 米国PJMでは、すでに何年も前から1時間単位のリアルタイム電力料金制度 (RTP: Real Time Pricing) を実施している。
- 将来に電力システムでは、10分程度の時間枠でRTPが実施される可能性が大きい。

PJMリアルタイム市場2010年8月10日月曜日



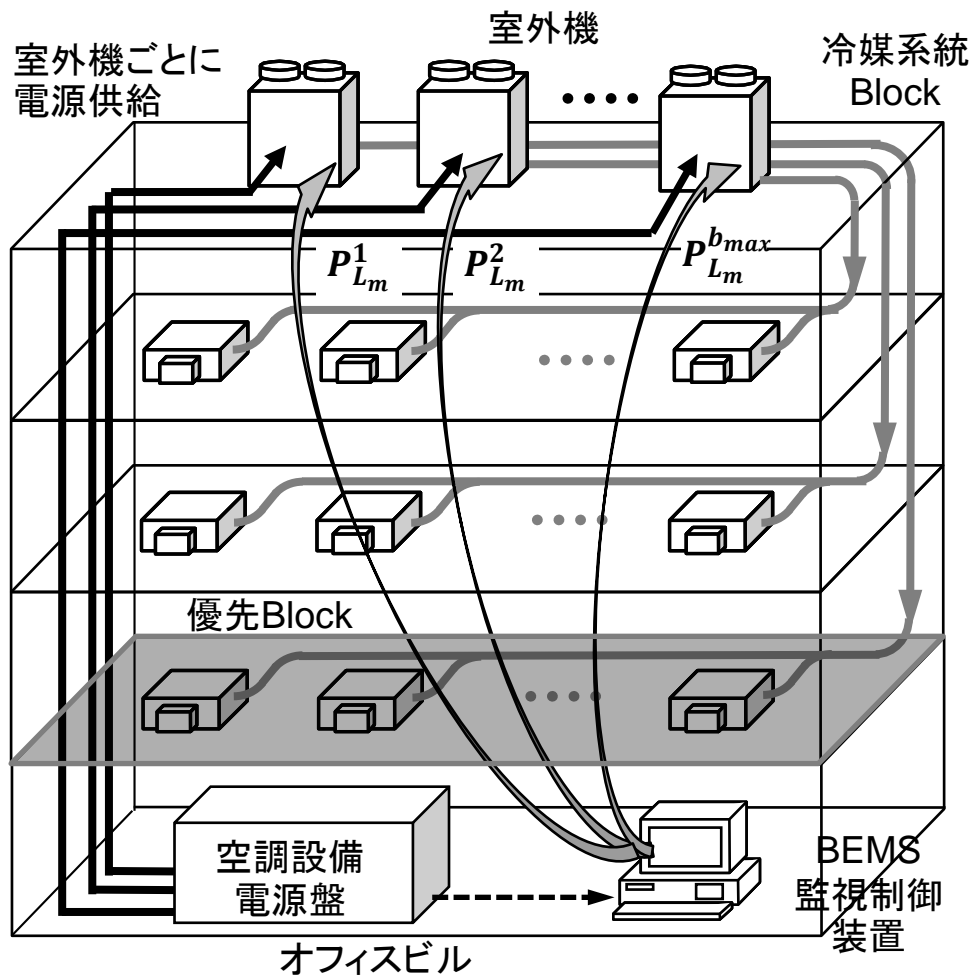
もっとすごいピークでは？
PJMリアルタイム市場2011年8月24日



出典: FERC (連邦エネルギー規制委員会) が提供する PJM のデータ

ビル用マルチエアコンのRTP最適制御システムの概念図

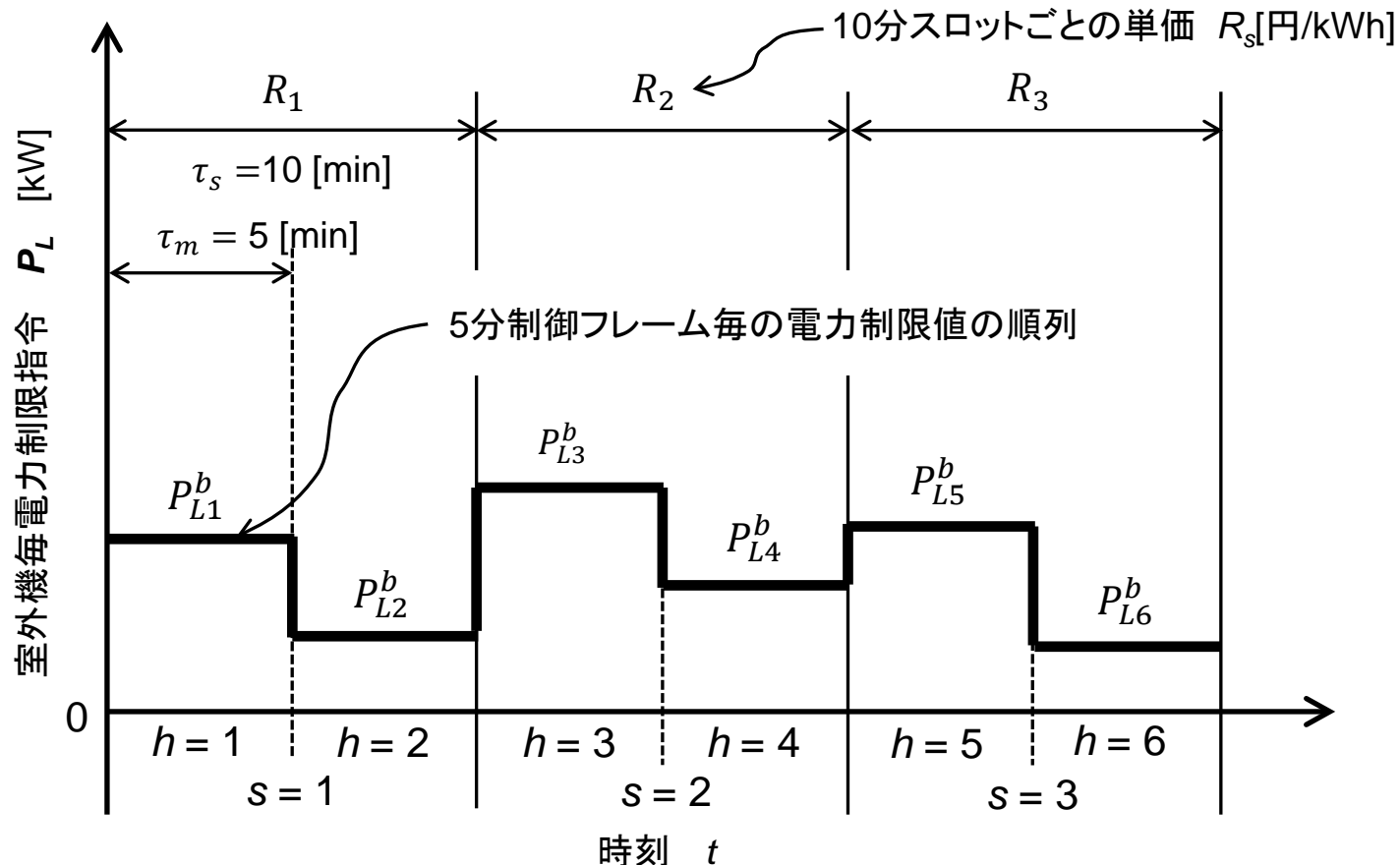
- 10分枠 ($m=1, 2, \dots$) のRTP電力料金単価に応じて、監視制御装置から、室外機Blockごと ($b=1, 2, \dots, b_{max}$) に電力制限指令 P_{Lm}^b を出すシステムを想定する。



電力制限指令制御フレーム

- 探索アルゴリズムは N_b 台の空調設備について、 N_h 予測ホライゾン先までの電力制限指令値のベストエフォート順列を探索する。

$$\left\{ \left\{ P_L^b \right\}_{h=1}^{N_h} \right\}_{b=1}^{N_b} = \left\{ \left\{ P_{L1}^{b1}, P_{L2}^{b1}, \dots, P_{LN_h}^{b1} \right\}, \dots, \left\{ P_{L1}^{bN_b}, P_{L2}^{bN_b}, \dots, P_{LN_h}^{bN_b} \right\} \right\}$$



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, No.10, pp.777-786, 2018年

AI最適探索の評価関数

- 電力料金, 室温快適性および電力量超過ペナルティから構成される。
- 電力制限指令に対する将来の電力量 \tilde{W}_s^b と室温 $\tilde{T}_{SA_s}^a$ の応答はニューラルネット(NN)により予測する。

$$J_C = \alpha \sum_{s=1}^{s_{max}} \sum_{b=1}^{N_b} R_s \tilde{W}_{5s}^b + (1 - \alpha) \sum_{s=1}^{s_{max}} \sum_{a=1}^{N_a} [(1 + \beta^a) \tilde{T}_{SA_s}^a]^2 + \sum_{s=1}^{s_{max}} X_s^{all}$$

電力料金ペナルティ 室温ペナルティ 電力量超過ペナルティ

$$\sum_{a=1}^{a_{max}} \beta^a = 0 \quad \text{および} \quad X_s^{all} = \begin{cases} \gamma \left[\sum_{b=1}^{N_b} \tilde{W}_{5s}^b - W_{5max}^{all} \right]^2 & \dots \text{ (if } \sum_{b=1}^{b_{max}} \tilde{W}_{5s}^b > W_{5max}^{all} \text{)} \\ 0 & \dots \text{ (otherwise)} \end{cases}$$

α : Trade-off coefficient
 β : Area priority coefficient
 γ : Excess power penalty gain
 s_{max} : Charge slot length
 N_b : Number of outdoor unit
 N_a : Number of management area

R_s : Unit price [JPY/kWh]
 \tilde{W}_s^b : 5min power consumption[kWh]
 $\tilde{T}_{SA_s}^a$: Average room temperature deviation[deg]
 \tilde{W}_s^b : 5min power consumption[kWh]
 W_{5max}^{all} : 5min maximum power[kWh]

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, No.10, pp.777-786, 2018年

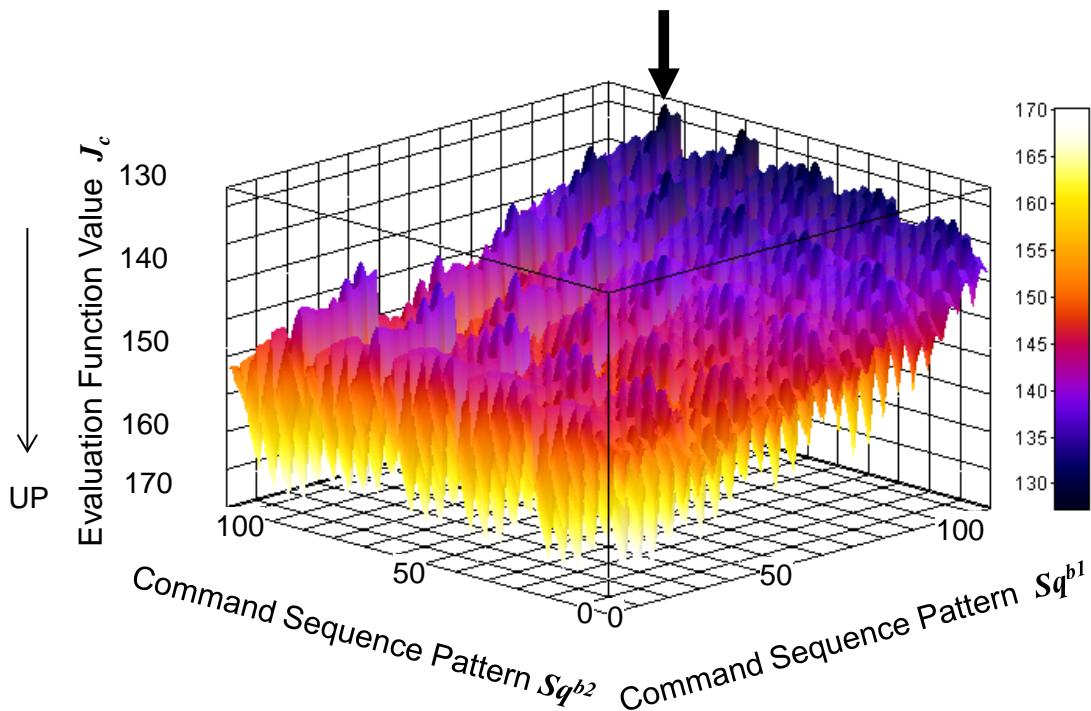
探索空間の分布(3D表示)

- $N_L=5, N_b=2, N_h=3$ における評価関数値を次式により電力制限指令値のパターン順に並べた。

$$Sq^b = \sum_{h=1}^{N_h} (n_{PLh}^b \times (N_L)^{N_h-h}) \quad J_C = f(Sq^{b1}, Sq^{b2})$$

Sq^b : P_L sequence pattern no. of the air-conditioner b .
 n_{PLh}^b : P_L step number (0,1,..., $N_L - 1$) of the air-conditioner b , prediction horizon h .

Global minimum $J_C^*_{min} = 128$



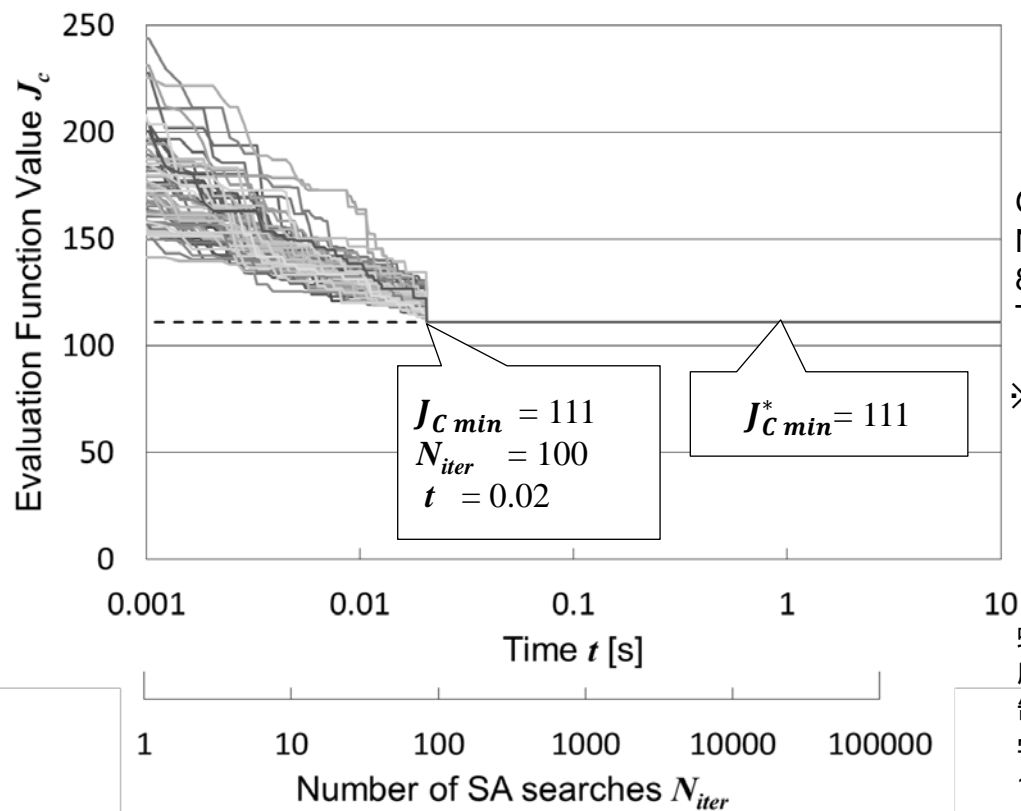
Arrangement Table

Sq^b	n_{PL1}^b	n_{PL2}^b	n_{PL3}^b
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	0	2
3	0	0	3
4	0	0	4
5	0	1	0
6	0	1	1
7	0	1	2
...
123	1	1	0
124	1	1	1

蛭川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調機優先エリア複合制御の大規模化群」, 空気調和衛生工学会論文集, No.269, Vol. 136, pp.11-17, 2019年)

並列SAアルゴリズムの試行

- $N_L=5$, $N_b=10$, $N_h=2$ ($N_{ALL} = 5^{20}$)として評価関数の探索を試行した。
- 並列SAアルゴリズムは0.02秒経過時 ($N_{iter}=100$)において1回目の同期を行い, この時点で全探索による厳密最小解 J_{Cmin}^* を発見している。
- 厳密最小解の全探索による検証は, 名古屋大学スーパーコンピュータFX100の864ノード (合計27648スレッド)使用して計算したところ, 約2時間を要した。



GPU:
NVIDIA GeForceGTX 1080Ti × 4
8192 threads × 4
Total 32768 threads

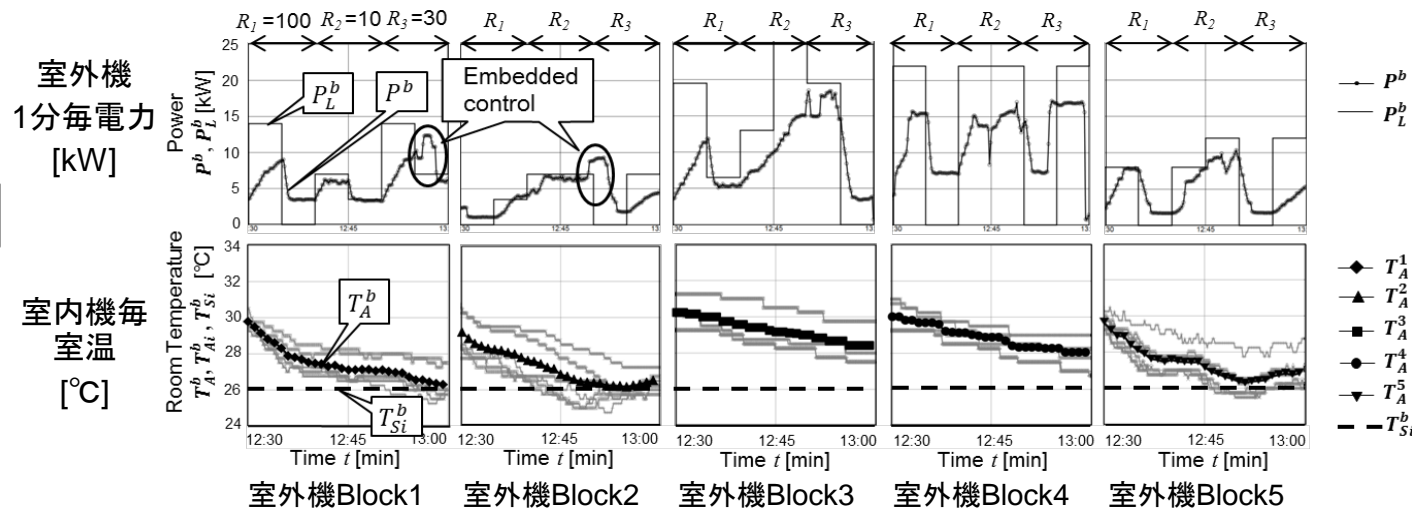
※64スレッドのみ抽出して図示した。

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機優先エリア複合制御の大規模化群」, 空気調和衛生工学会論文集, No.269, Vol. 136, pp.11-17, 2019年)

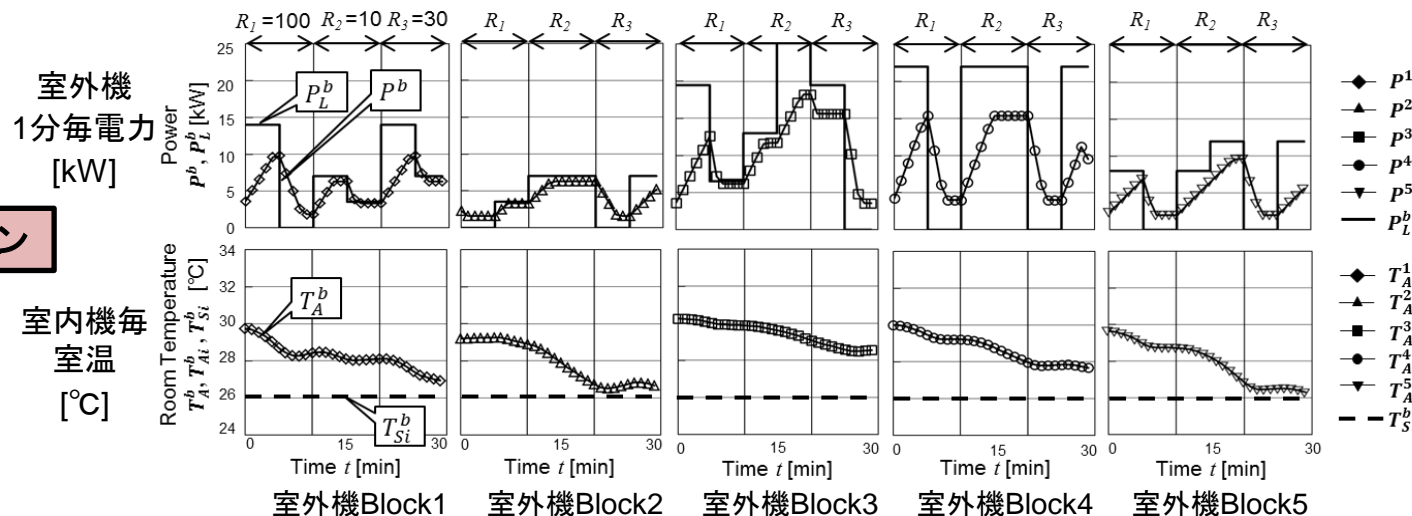
アルゴリズム開発のためのシミュレーションモデル

■ ビル用マルチエアコンの室温制御と電力消費シミュレーションモデルを実機と比較した例。

実機



シミュレーション



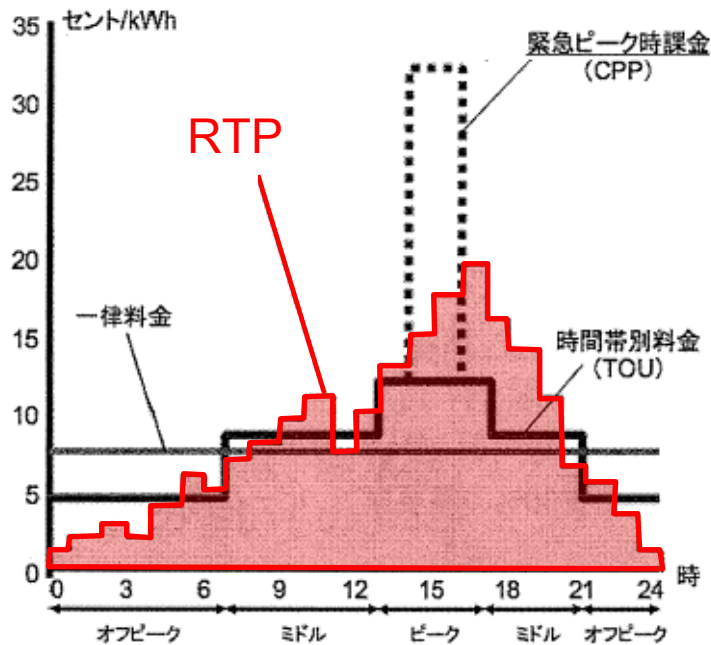
蜷川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調の全館電力制限と優先部分室温の複合調整制御」, 電気学会論文誌D, Vol.138, No.10, pp.777-786, 2018年

AI強化学習による省エネ空調運転

リアルタイム電力料金制度 (RTP: Real-Time Pricing)

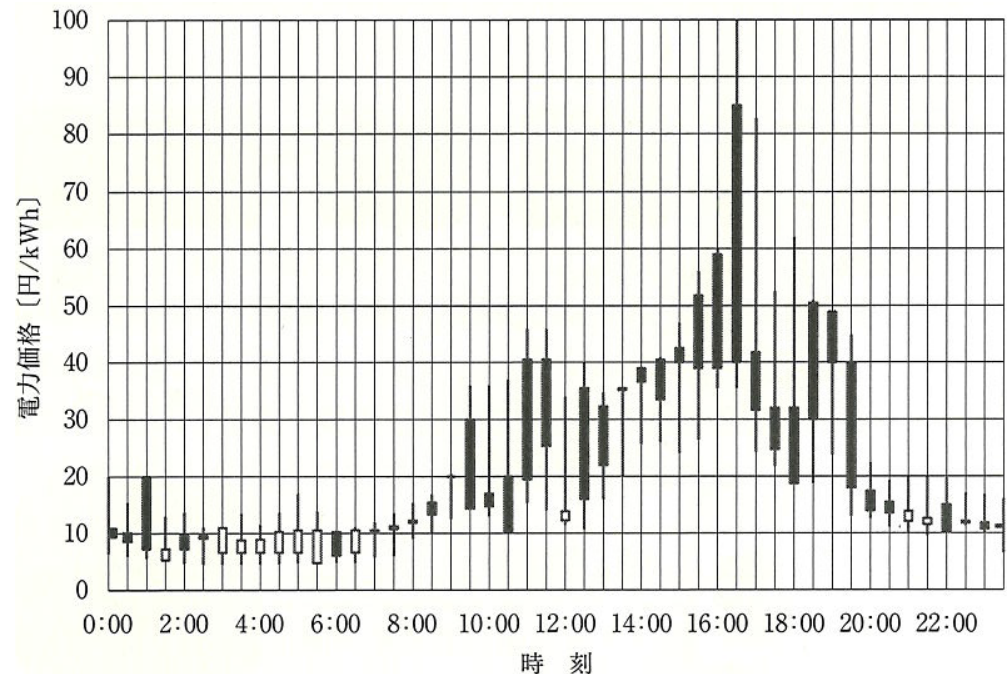
- デマンドレスポンスには、インセンティブ型と、価格型があり、RTPは価格型の最先端。
- FastADRであれば、リアルタイム電力料金制度に対応した省エネ制御の可能性がある。

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

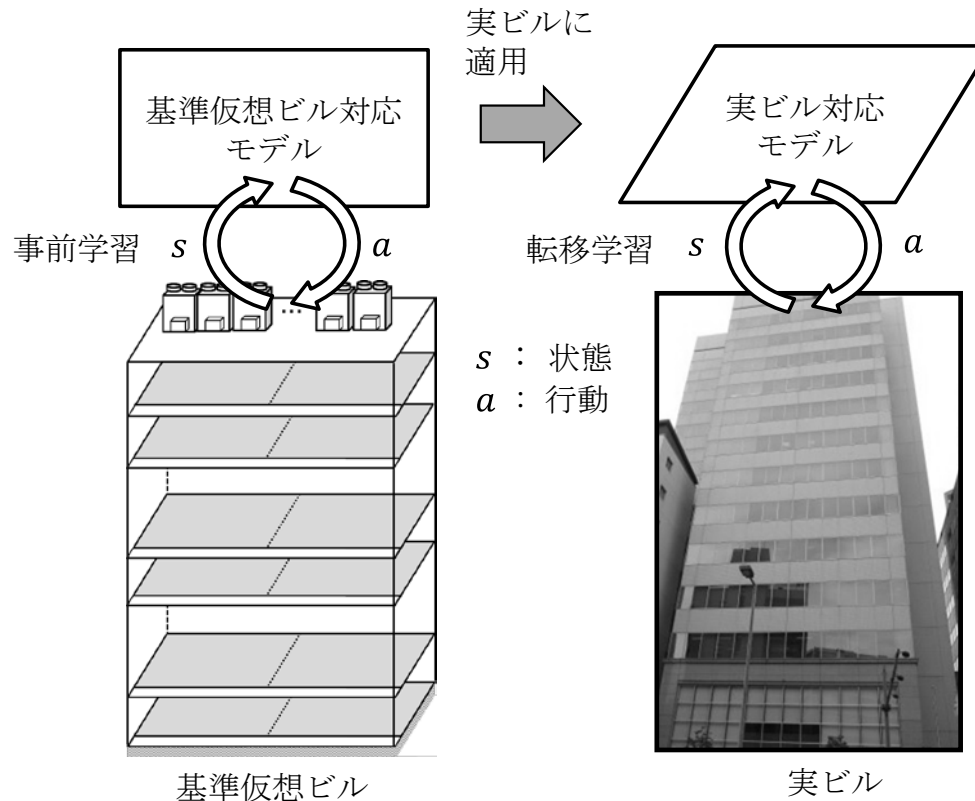
RTPではないが、卸電力市場価格の例



JEPXの1時間前市場の実際の取引(2018年8月6日)

ビル用マルチエアコンRTP適応制御の問題点

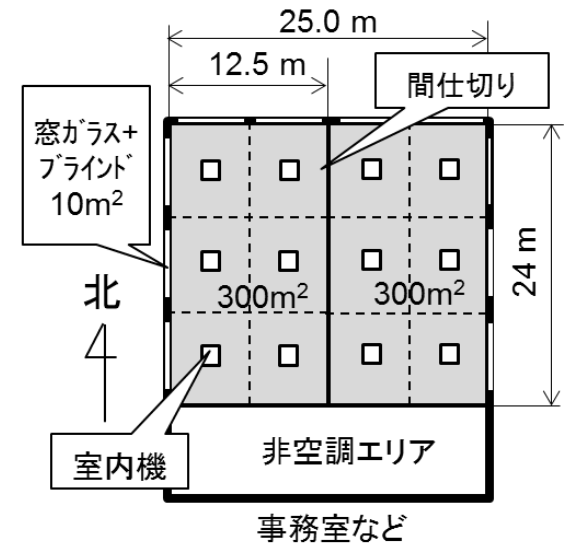
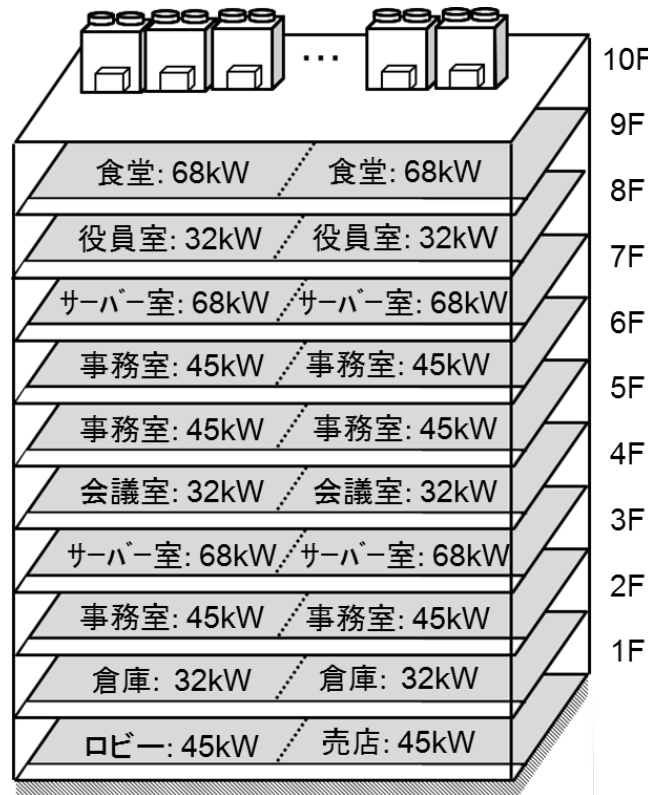
- RTP (Real Time Pricing) 単価の予告に対して、最適な運転計画を探索する際、取りうる各電力制限値に対する電力削減量と室温副作用の動特性予測モデルが必要だった。
- 実用化には、電力・室温モデル構築は現実的ではなく、**モデルフリーなAI手法である強化学習で学習して運用しながら**、RTP最適運転に近づけていく手法が望まれていた。
- 打ち手として、**仮想ビルシミュレータによる事前学習を行ってから、実ビルにて転移学習**。



蟻川ほか:「リアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調機群の優先エリア複合制御の転移強化学習」, 空気調和衛生工学会論文集, No.285, 2020年

仮想ビル用マルチエアコン群のエミュレータ「BEM」

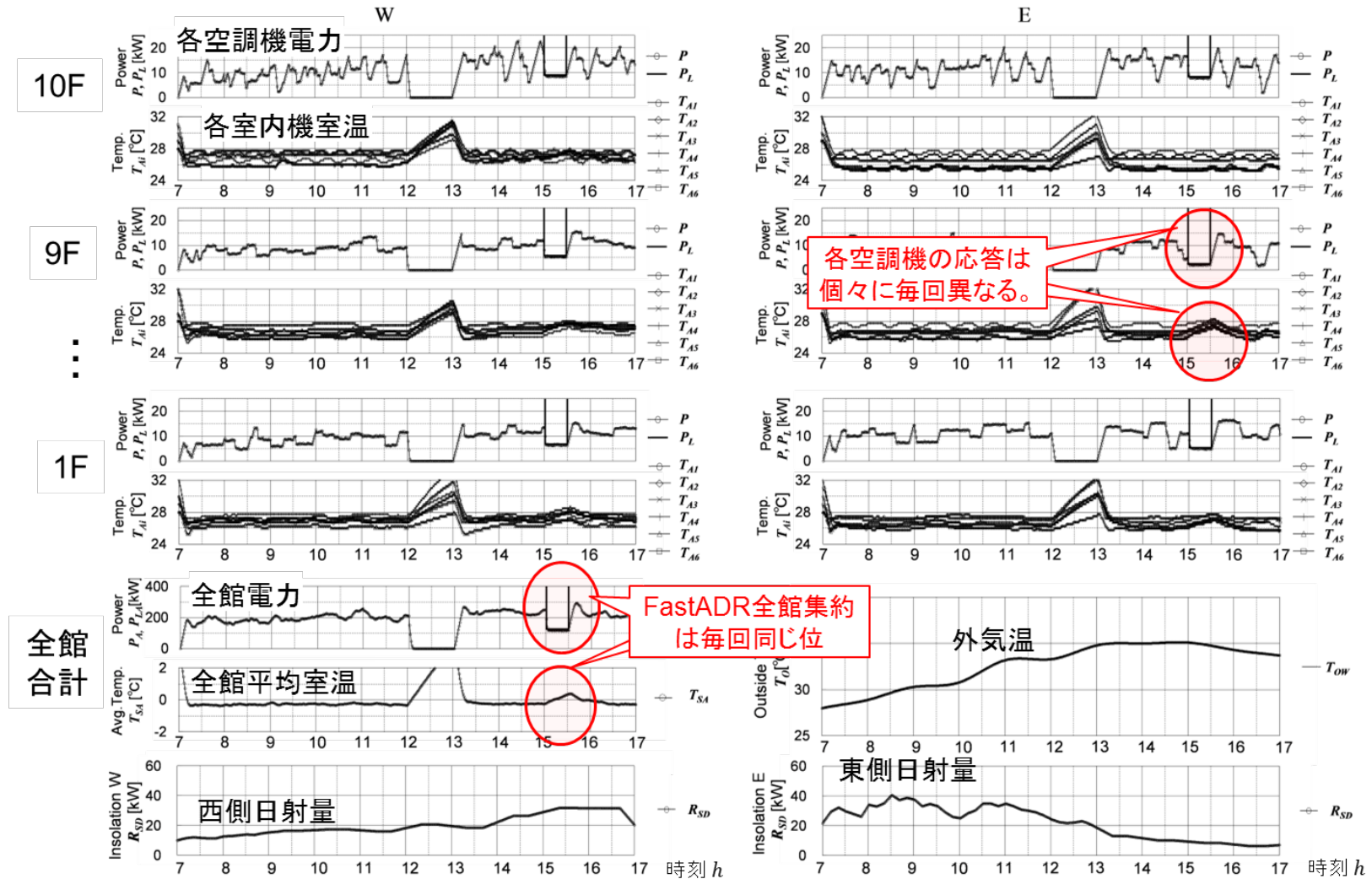
- ビル用マルチエアコン設置のベースとして、仮想ビルモデルBEM1 (Building Emulator 1) を構築し、それをベースに異なるビルのバリエーションをBEM1, BEM2, ...と作ることができる。
- 現状では、機器組込み制御、通信遅れ、室温許容限界などの不確実性はモデル化したが、**居住者の不確実な行動由来の不確実性はモデルに含めていない。ここが課題。**



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)

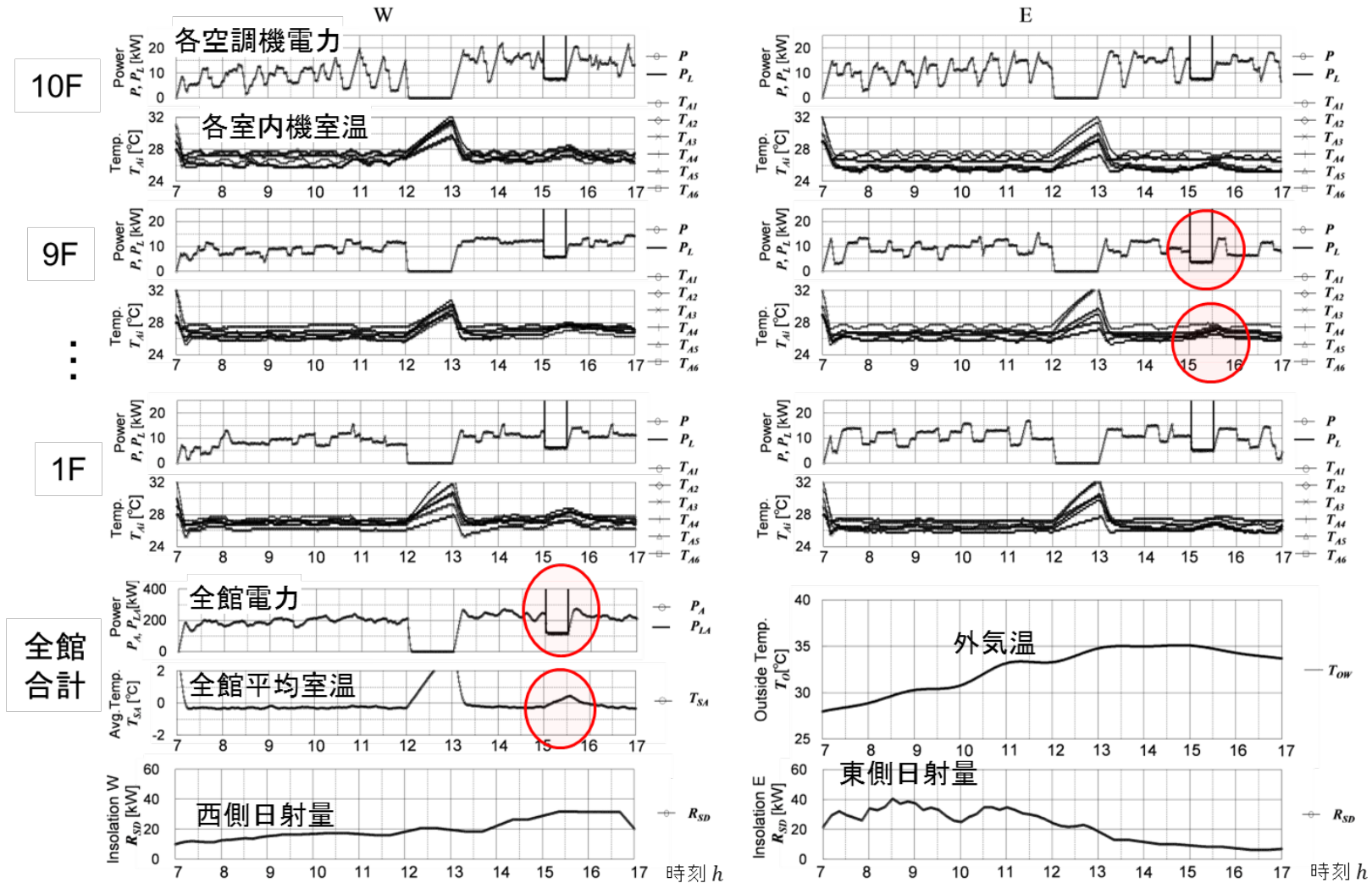
- BEM1に16時にDRをかけて全日シミュレーションを繰返し試行。不確実性とばらつきをみた。



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機群の優先エリア複合制御の轉移強化学習」, 空気調和衛生工学会論文集, No.285, 2020年

仮想ビルBEMのシミュレーション繰返し試行(2回目)

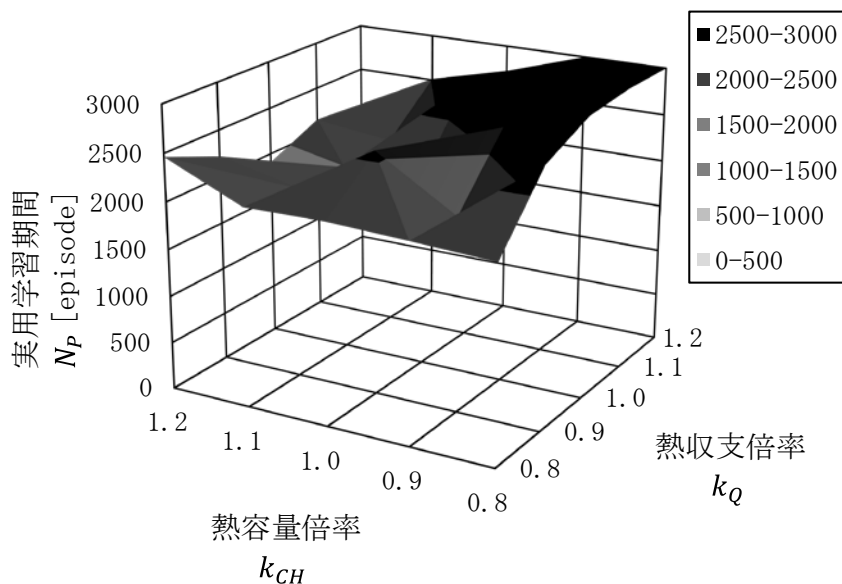
■ BEM1に16時にDRをかけて全日シミュレーションを繰返し試行。不確実性とばらつきをみた。



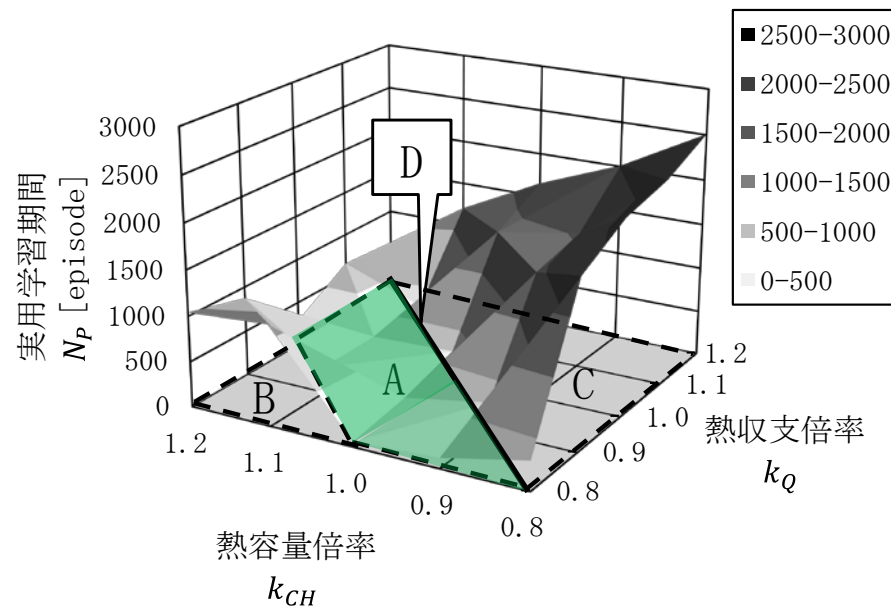
蜷川ほか:「リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機群の優先エリア複合制御の転移強化学習」, 空気調和衛生工学会論文集, No.285, 2020年

対象ビルとの熱特性の違いと事前学習の効果

- 本Q-Learningは学習期間(Episode)が1時間であり, 十分学習には1000時間程度必要。
- 実用化には, シミュレータによる事前学習後に, 実ビルにて転移学習させることが必要。
- **事前学習のシミュレータが熱容量と熱負荷の違いに対して, 許容範囲(下図A)にあれば, 500回(500時間)以下で転移学習できるという一例が得られた。**



事前学習なし(賠償ビルで学習開始)



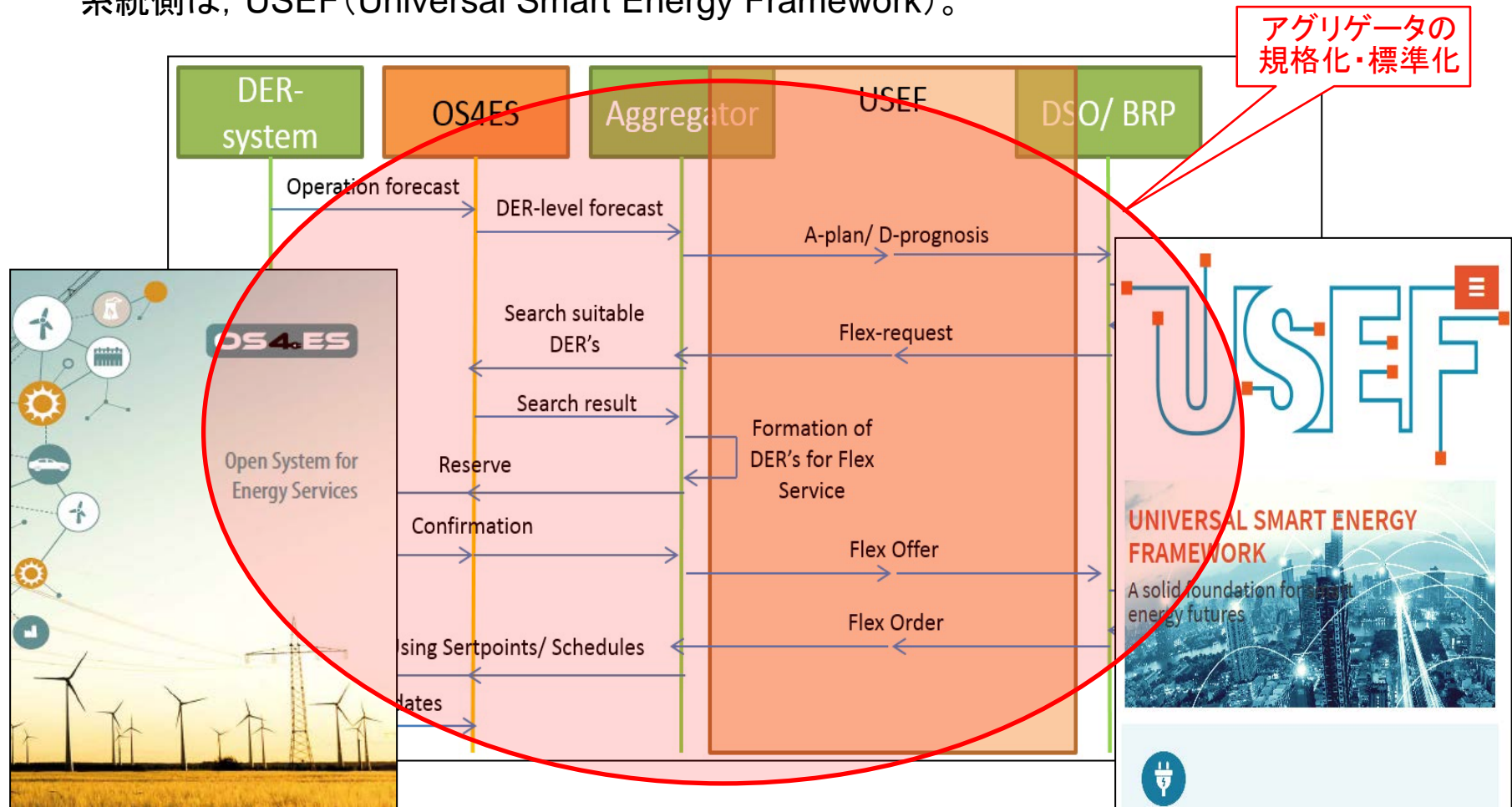
事前学習あり(転移学習)

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機群の優先エリア複合制御の転移強化学習」, 空気調和衛生工学会論文集, No.285, 2020年

エネルギーサービス規格の調査

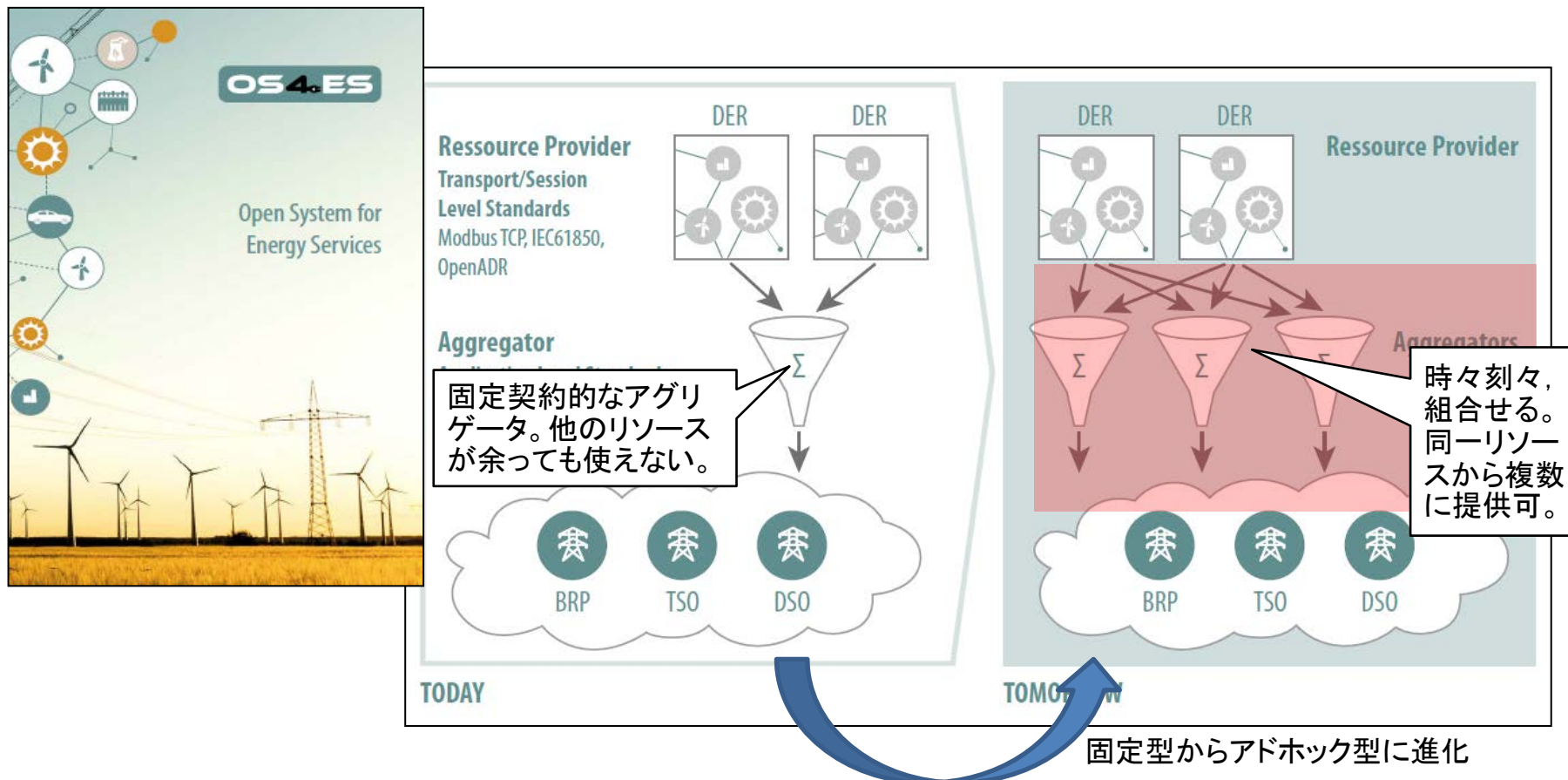
欧州のOS4ES・USEF協調によるFlexibilityという概念

- 超分散型集約の仕組みで、需要家リソースを柔軟にアグリゲーションする" Flexibility "という概念を実現しようとしているようである。
- 需要家側は、OS4ES(Open System for Energy Services)。系統側は、USEF(Universal Smart Energy Framework)。



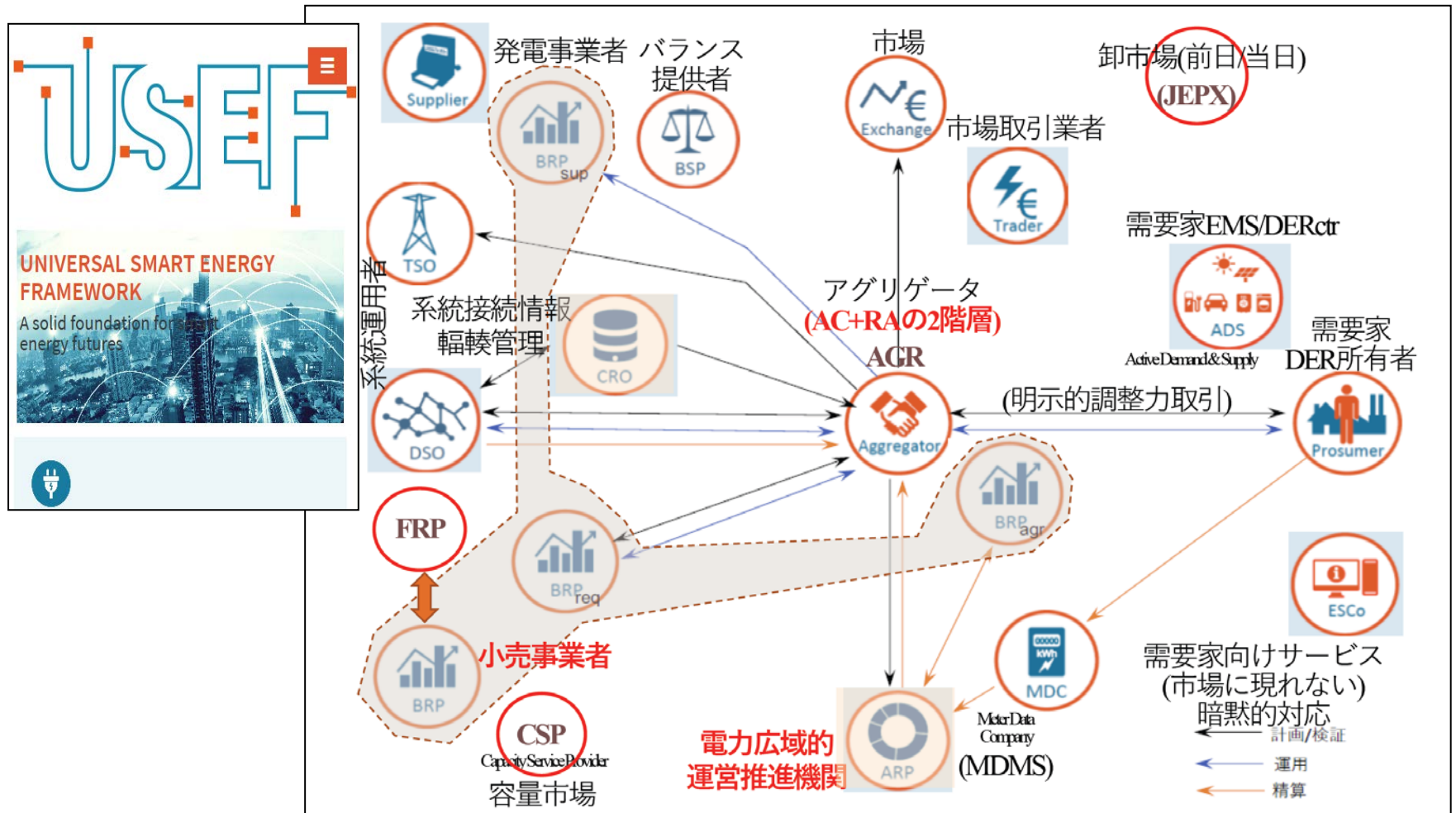
欧州の需要家側アグリゲーションの検討: OS4ES

- 膨大な数の多様な分散電源を時々刻々アドホック的に組み合わせるための、**リアルタイム情報**を管理する分散型レジストリーデータベース。
- Open System for Energy Services (OS4ES) は自動で動的な標準化を標ぼうしている。パンフレットには、「**数百万の**分散電源を統合を目指す」と記されている。**数百万!!!**



欧州における系統側手続き標準化の検討: USEF

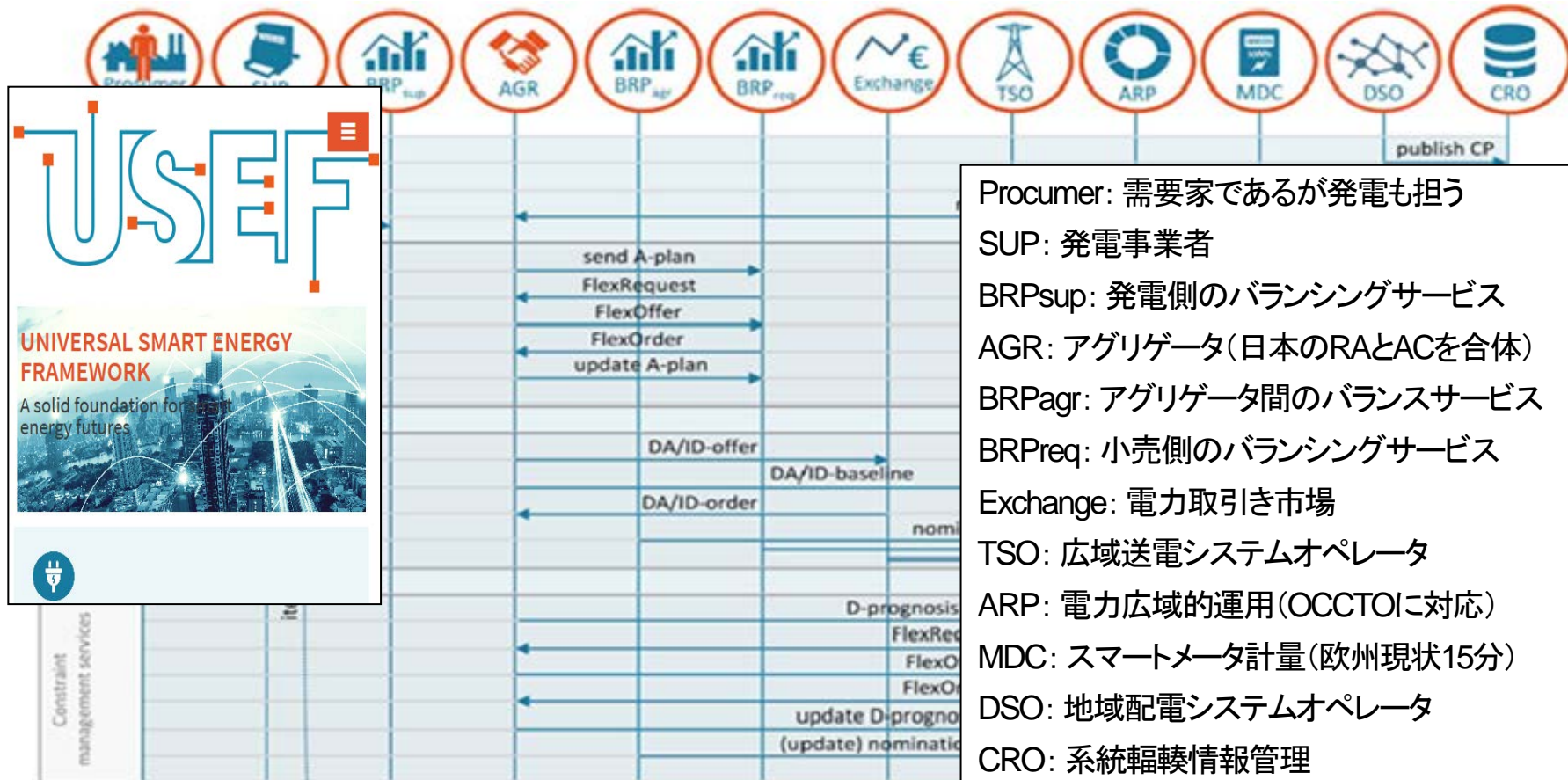
- Universal Smart Energy Foundation (ABB, IBMなど7団体のNon Profit 活動)
- 系統側における, 電力市場, 系統運用者, 需要家等との連携・調整・取引の標準化。



USEFの系統側調整・取引通信の標準化

- 系統側は多くの機関の調整が必要なので、USEFではFlexibility Stacking, および, Value Chainingという観点から全体アグリゲーションシステム設計推進しているようだ。

Procumer SUP BRPsup AGR BRPagr BRPreq Exchange TSO ARP MDC DSO CRO
 需要家 発電 発電 アグリゲータ アグリ 小売り 電力市場 送電 広域運用 スマートメータ 配電 輻輳
 (発電も) 事業者 バランシング バランシング バランシング 機関 機関 機関 管理



Procumer: 需要家であるが発電も担う
 SUP: 発電事業者
 BRPsup: 発電側のバランシングサービス
 AGR: アグリゲータ(日本のRAとACを合体)
 BRPagr: アグリゲータ間のバランスサービス
 BRPreq: 小売側のバランシングサービス
 Exchange: 電力取引市場
 TSO: 広域送電システムオペレータ
 ARP: 電力広域的運用(OCCTOに対応)
 MDC: スマートメータ計量(欧州現状15分)
 DSO: 地域配電システムオペレータ
 CRO: 系統輻輳情報管理

将来の配電系統の問題へ

米国では目前の配電系統レベルDER管理へ集中？

- カリフォルニア州ではEV充電ステーション群, 太陽光などDER群の集中連系問題が急浮上。急ピッチでDER遠隔管理制御の標準規格を整備しようとしているとのこと。

The image displays three overlapping documents related to DER management standards:

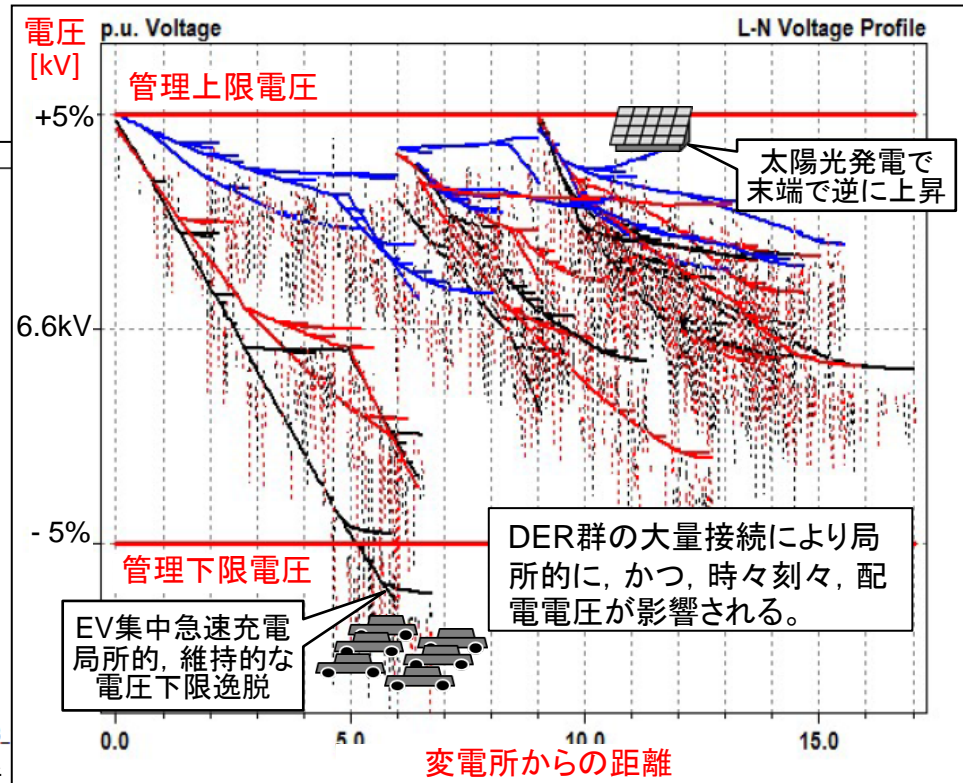
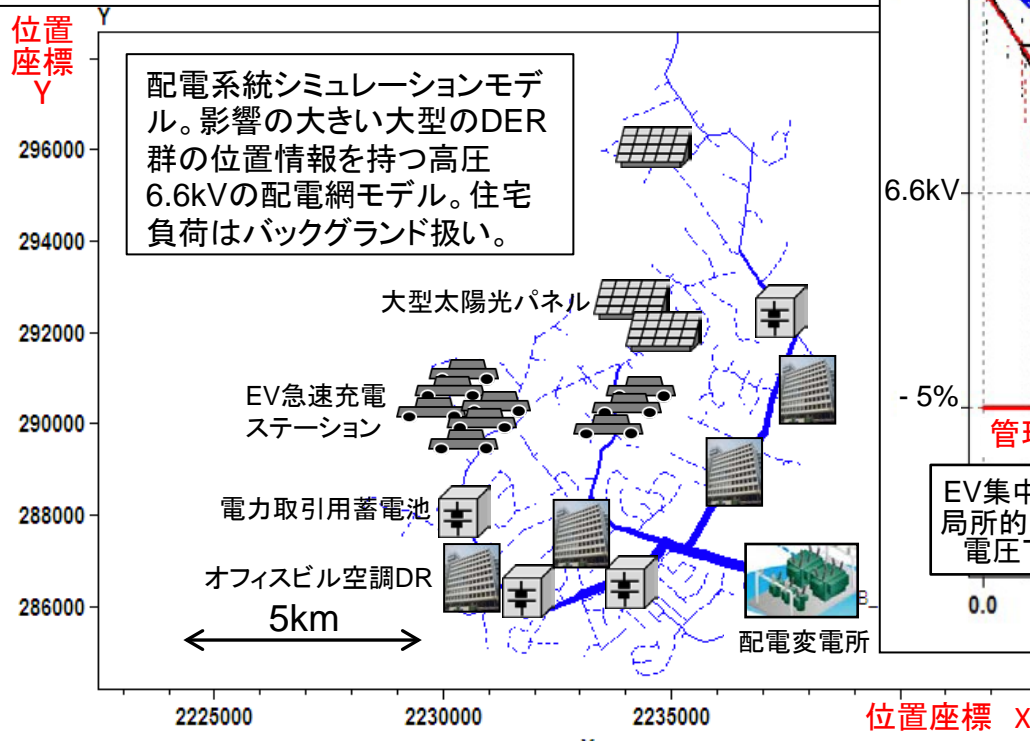
- IEEE Standard for Smart Energy Profile Application Protocol (IEEE 2030.5):** Issued by the IEEE Standards Association and IEEE Communications Society. It is sponsored by the Power Line Communications Committee. A callout box notes: "Smart Inverter 制御通信の IEEE2030.5規格".
- Common Functions for DER Group Management, Third Edition (EPR1 3002008215):** Issued by the Electric Power Research Institute (EPRI). A callout box notes: "EPRIの Smart Inverter 共通機能定義". The document features a central diagram of a smart grid with various DER units connected to a central hub.
- OpenADR Alliance 2.0b Profile Specification for Energy Resources (DER):** A draft document (Document Number: 20190201-2) for DER control. A callout box notes: "OpenADRの DER制御への 拡張版ドラフト".

Additional details from the OpenADR document include contact information for the Technical Director, Rolf Blenert, and a link to comments@openadr.org.

将来の配電系統とビルマルチ空調機群

- 将来, EV急速充電機や電力蓄電池といった大型で負荷にも電源にもなる設備, 即ち, **DER (Distributed Energy Resources)** が大量導入されると, 配電系統の電力逆流や電圧変動が懸念される。
- 都市部では, 広く普及しているビルマルチ空調機群を, **随時短時間, 局所的にビル群を選んで, 無効電力制御**することで, 問題個所を緩和するというアイデアを研究開始した。

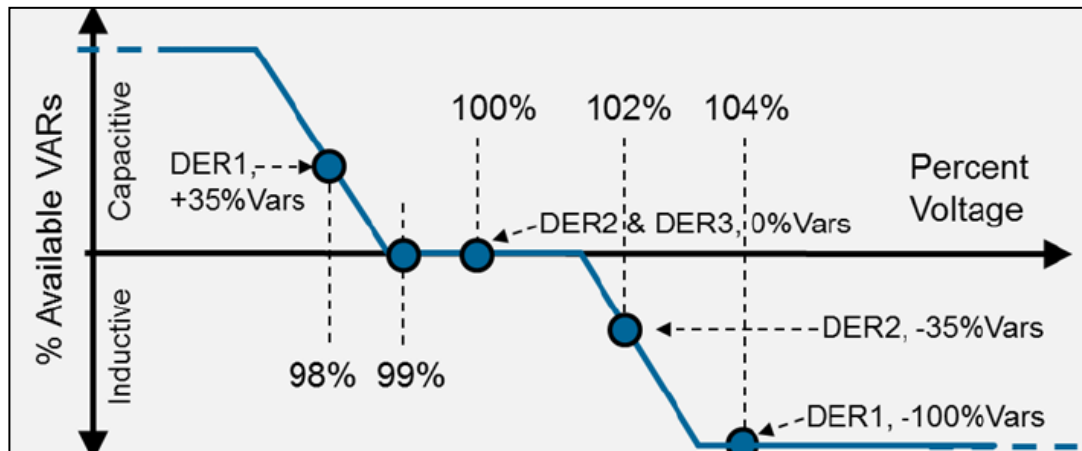
配電網への大型DERの分布



配電網の6.6kV電圧プロフィール

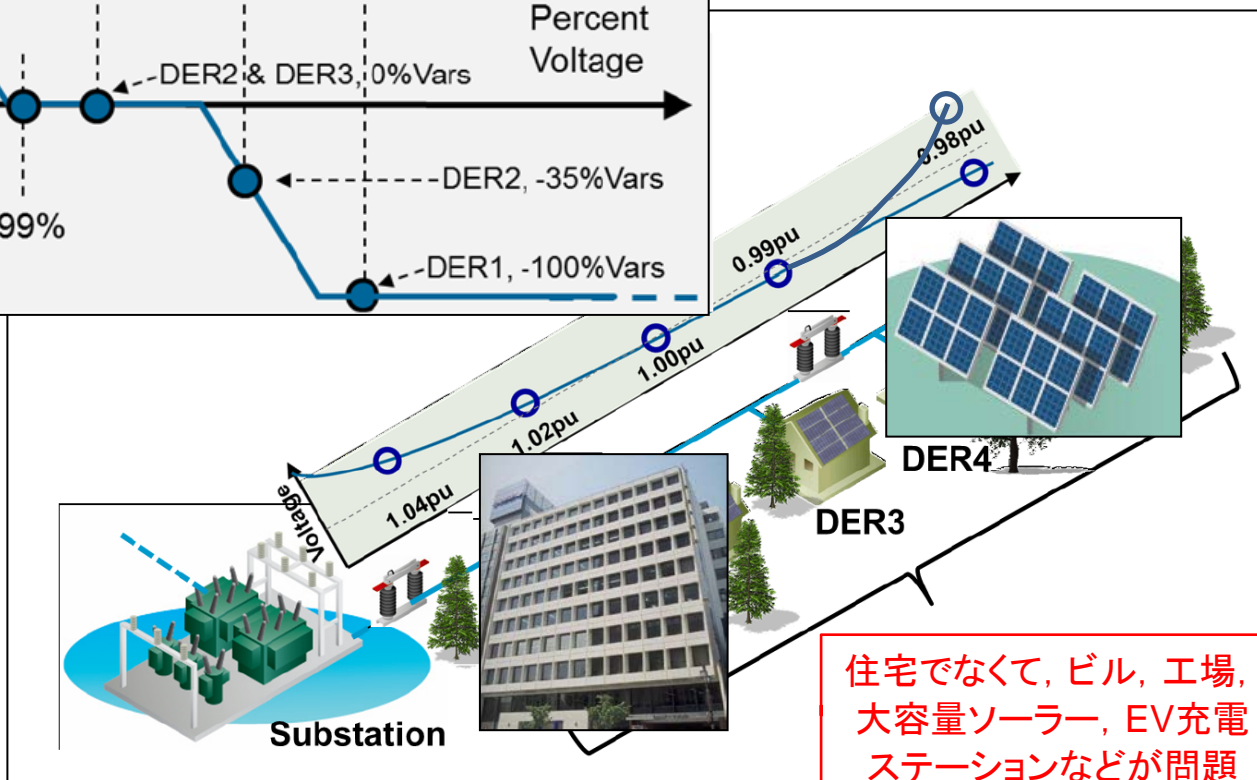
分散DER系統連系の無効電力制御で電圧制御を助ける

- 系統連系において、需要家DER群の無効電力を、つまり、有効電力と力率を、リアルタイム制御することで、配電系統の電圧維持を助ける、という考え。
- 各DERの系統連系インバータが、Droopカーブを参照して無効電力を精密に制御する。



Droopカーブ: 配電電圧 $V[V]$ に応じて、各DERが自分の無効電力 $Q[VAR]$ を制御する特性カーブ。

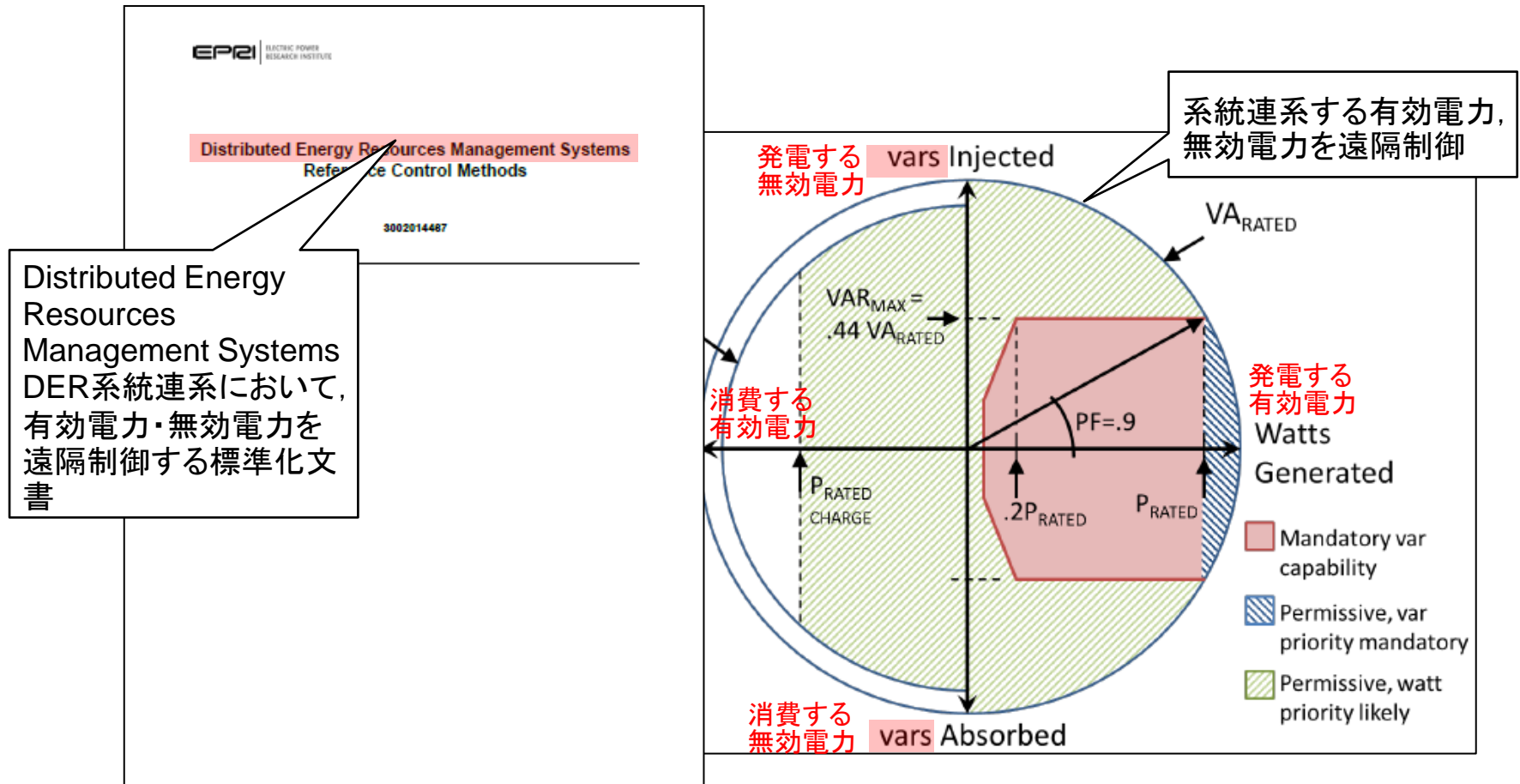
無効電力の正負は発電側から見て。需要家負荷の場合は、正負逆になる。



住宅でなくて、ビル、工場、大容量ソーラー、EV充電ステーションなどが問題

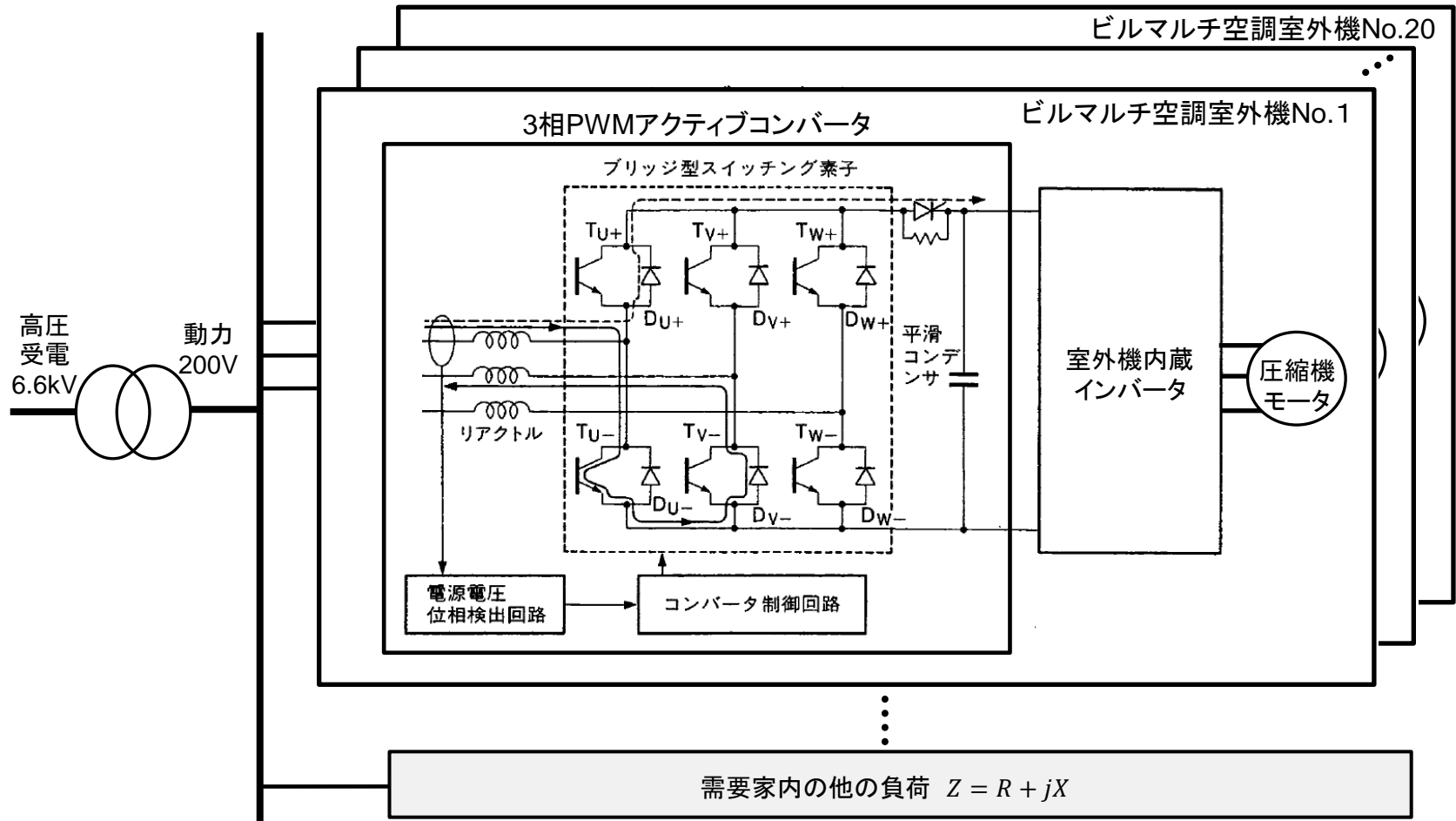
ビル用マルチエアコンの無効電力DRを研究中

- EPRI(米国電力中央研究所)のDER管理システム(DERMS: Distributed Energy Management Systems)制御方法が提案されている。
- 自分の今後研究: ビル用マルチエアコンFastADRにおいて, 無効電力制御を含めるとどうなるか。研究者の興味?役にたつ?需要家メリット?



ビル内のビルマルチ空調VarDRの環境

- 10階建て高圧受電オフィスビルのビルマルチ空調機室外機20台。メーカーオプションを設計変更した3相PWMアクティブコンバータ 接続。
- 今後、ビル内部の等価回路モデル化が必要。



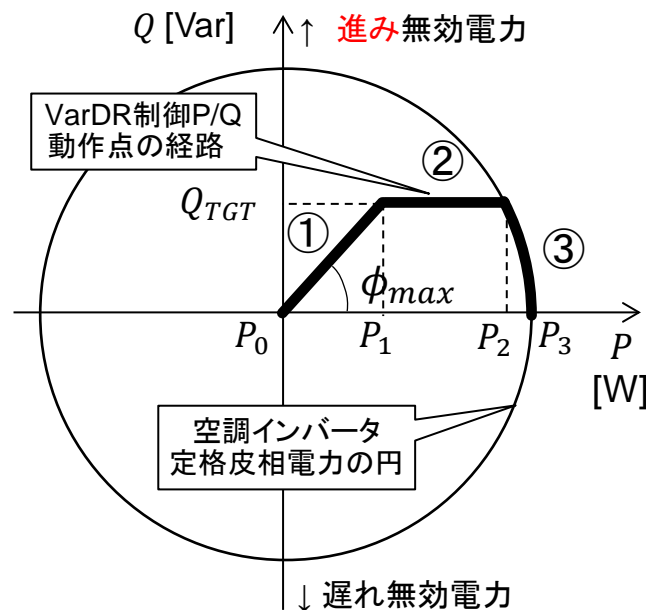
ビルマルチ空調機の無効電力VarDR

- 蛭川研では、これまでビルマルチ空調機電力の抑制制御である、デマンドレスポンス(DR)を研究してきた。それをベースに、DERMS対応すべく、無効電力(Var)をデマンドレスポンスを世界で初めて研究している。
蛭川造語で、VarDR(Var Demand Response)と呼ぶ。DR上げ/下げは力率の進み/遅れに相当する。
- 系統からの目標Var Q_{TGT} に近づくよう、最低力率および定格VA容量制限のもと、アクティブコンバータ・インバータを下表①～③で動作モードを移動させて、ひいては需要家受電点のVarを間接的に制御する。

番号	有効電力の範囲	無効電力の範囲	ビルマルチ空調機の動作
①	$P_0 < P \leq P_1$	$Q \leq P \tan \phi_{max}$	有効電力消費のためサーモオフさせない。 ただし設定温度-2℃を超えたらopt-out。
②	$P_1 < P \leq P_2$	$Q \leq Q_{TGT}$	平常運転。
③	$P_2 < P \leq P_3$	$Q \leq \sqrt{S_{max}^2 - P^2}$	$P < P_2$ となるまでインバータ消費有効電力を減速させる。

$$\begin{cases} P_0 = 0 \\ P_1 = \frac{Q_{TGT}}{\tan \phi_{max}}, \tan \phi_{max} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi_{max}} - 1} \\ P_2 = \sqrt{S_{max}^2 - Q_{TGT}^2} \\ P_3 = S_{max} \end{cases}$$

P : 有効電力Watt S_{max} : インバータ定格容量 [VA]
 Q : 無効電力Var ϕ_{max} : 最大力率角 [rad]



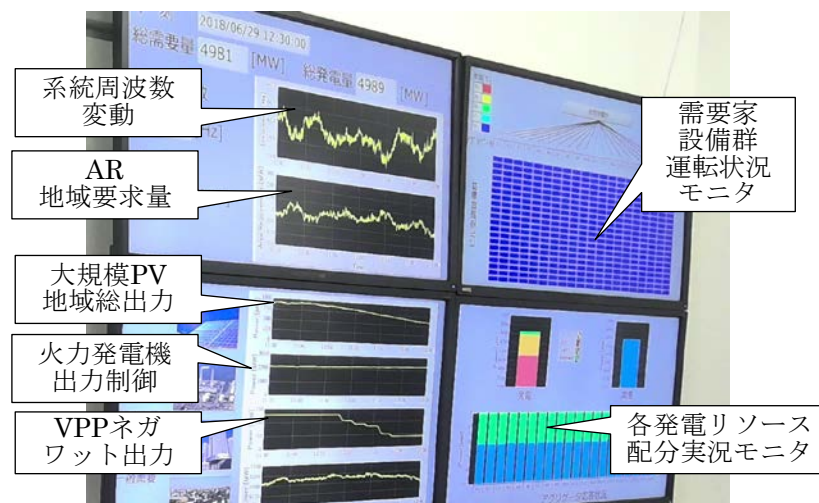
最後に蜷川研究室のご紹介

岐阜大学スマートグリッド電力制御工学共同研究講座

- 2018年4月，岐阜大学初の産学連携共同研究講座として設立。
- 研究テーマ：
 - ①電力需要プロファイル予測のAIディープラーニング
 - ②VPPのFast DR割付け強化学習シミュレーション
 - ③ビル空調設備の強化学習運転による需要制御
 - ④無効電力を制御するFast DRのシミュレーション
 - ⑤電気学会規格JEC-TR-59004のDR性能予測評価
 - ⑥LSTM時系列Deep Learningによるベースライン推定



ビル用マルチエアコンのFastADRリアルタイムシミュレータ。
本当の通信プロトコルを稼働させて広域通信遅延を模擬。



VPPシステムによるLFC監視制御画面(火力発電機群が出力加速できない状況で需要を精密制御する。)

参考文献： 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 蜷川 忠三

メール: ninagawa@gifu-u.ac.jp,

HP: <http://www1.gifu-u.ac.jp/~ninalab/index.html>