

# INTRODUCTION

最近、電力の需給バランスを取るための新たな手段として、デマンドレスポンス(以下DR)と呼ばれる組織的・協調的な電力需要削減の枠組みが注目されている。DRは、当初電力会社と大口需要家の相対取引的な需要削減制度から始まったが、この対象を中小規模の産業・業務用需要家や、一般家庭にまで広げたいと言う社会的な要請もあり、DRアグリゲータ(以下DRA)と呼ばれる新しいビジネスモデルが北米を中心に発生して来ている。DRAとは、DRプログラムに参加する需要家を募集し、電力会社や系統運用機関にDR サービスを集約して提供する仲介事業者のことである。

本発表では、DRAがDRの実施を計画する際に発生する、一種のポートフォリオ選択問題について述べる。DRには様々なプログラムが存在するが、ここではこのうちDLC(Direct Load Control: 需要家側機器の直接制御による需要抑制)と呼ばれる方式に注目する。具体的には、広域的に多数配置されたオフィスビルの空調機器を想定し、これらを対象とする協調的な節電計画の最適化問題を考える。計画立案のための電力需要予測には、外気温予報データが利用可能であり、各オフィスビルは予報エリアに分散配置されている状況を想定する (Fig. 1 参照)。

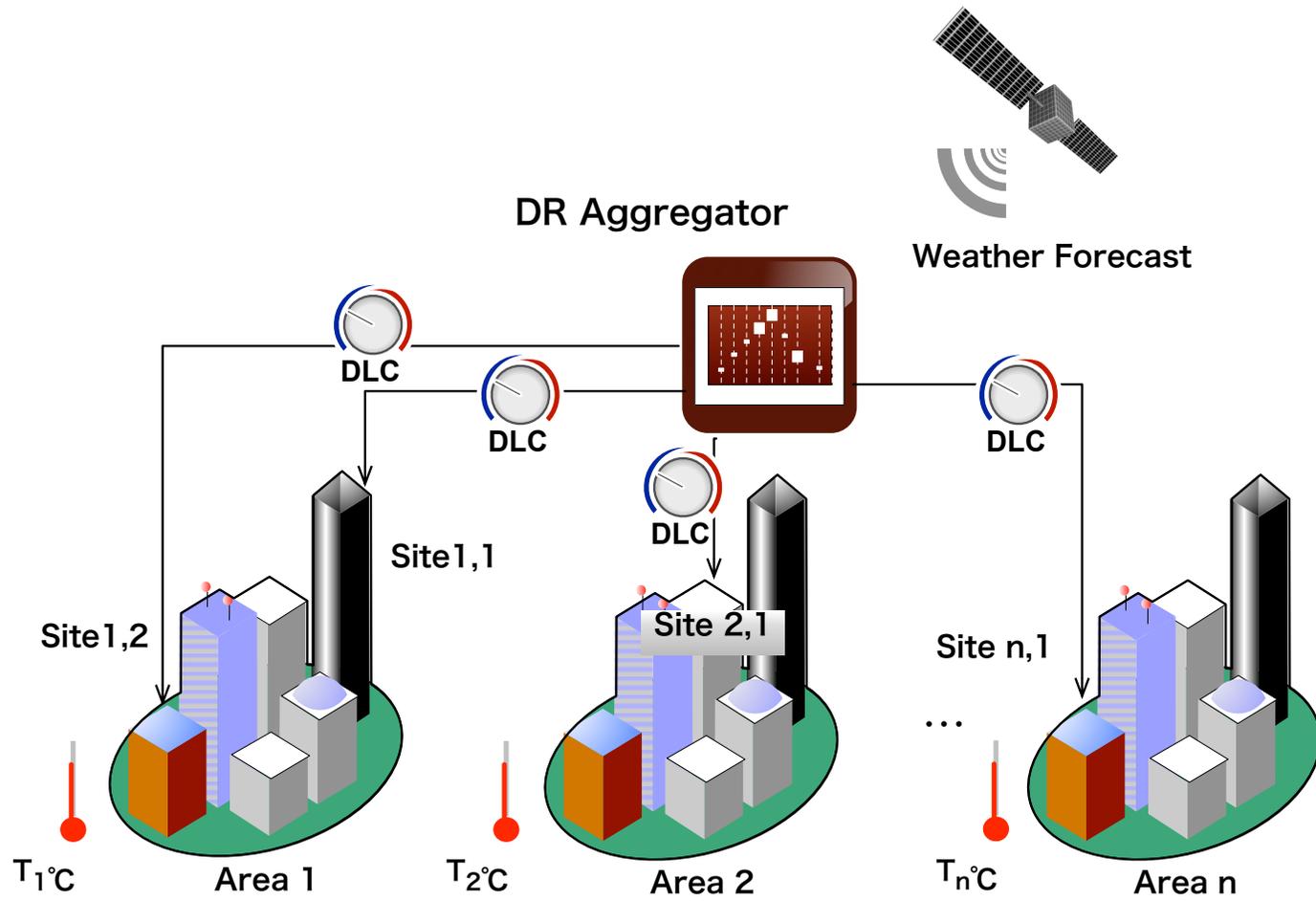


Figure 1. DLC on multiple weather-forecast areas

# METHOD

## 最適化手法

現代投資理論におけるMarkowitzモデル<sup>[1][2]</sup>を基盤とした、スケーラブルな二段階最適化手法を提案する。本方式の初段は凸二次計画であり、第二段は小規模な混合整数計画であるため、大規模な計画問題にも対応することが可能である。初段では、需要削減の分散を最小化するような削減量の各エリアへの割当て(ポートフォリオ)が決定され、第二段ではすべてのオフィスの空調温度の設定値を出力する。

これら二段階の定式化を以下に示す。

## 1<sup>st</sup> Stage (Convex QP)

$$\min : \mathbf{y}^T \mathbf{Q} \mathbf{y}$$

s.t.

$$R^{AC} \geq \mathbf{y}^T \bar{\mathbf{r}}$$

$$0 \leq \mathbf{y} \leq 1,$$

where

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} B_1 B_1 \sigma_{11} & \cdots & B_1 B_n \sigma_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_n B_1 \sigma_{n1} & \cdots & B_n B_n \sigma_{nn} \end{pmatrix}$$

$$\delta p_{ij} = a_{ij} \Delta t_{ij} + b_{ij} \delta T_i$$

$$r_i = \sum_j a_{ij} \Delta t^{\max} + \sum_j b_{ij} \delta T_i = A_i \Delta t^{\max} + B_i \delta T_i$$

$$r_i \sim N(\bar{r}_i, \sigma_{Bi}^2), \bar{r}_i = A_i \Delta t^{\max} + B_i \mu_i, \sigma_{Bi}^2 = B_i^2 \sigma_i^2, \delta T_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2).$$

$\mathbf{Q}$ : 空調需要削減量の共分散行列

$\mathbf{y}$ : 需要削減容量の使用率ベクトル

$R^{AC} (< 0)$ : 空調需要の削減目標量

$\delta p_{ij}$ : 第iエリア, 第jサイトの削減量

$r_i$ : 第iエリアの削減総量

$\Delta t_{ij}$ : 空調設定温度の増分

$\Delta t^{\max}$ : 空調設定温度増分の上限值

$\delta T_i$ : 外気温予報の誤差

$a_{ij}, b_{ij}$ : 空調需要の線型モデルの係数

$\sigma_{ij}$ :  $\delta T_i, \delta T_j$ の共分散

## 2<sup>nd</sup> Stage (MIP)

$$\min : \sigma_i^2 \left( \sum_j z_j b_j \right)^2 \leftrightarrow \min : \sum_j z_j b_j$$

s.t.

$$R_i^{AC} \geq \sum_j a_j \Delta t_j + b_j \mu_i$$

$$z_j = \begin{cases} 1 & (\Delta t_j > 0) \\ 0 & (\Delta t_j = 0) \end{cases}$$

$$0 \leq \Delta t_j \leq \Delta t^{\max} \quad (j = 1, \dots, m)$$

where

$$\delta T_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$$

$R_i^{AC} (< 0)$ : 第iエリアの空調需要削減目標量

$\Delta t_j$ : 第jサイトの空調設定温度の増分

$\Delta t^{\max}$ : 空調設定温度増分の上限值

$\delta T_i$ : 第iエリアの外気温予報の誤差

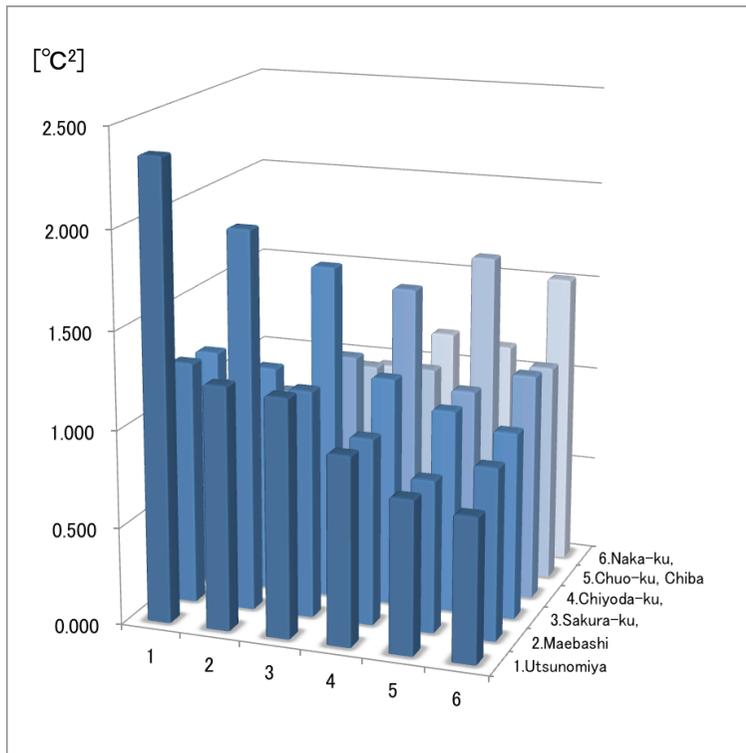
$a_j, b_j$ : 空調需要の線型モデルの係数

# NUMERICAL EXPERIMENT

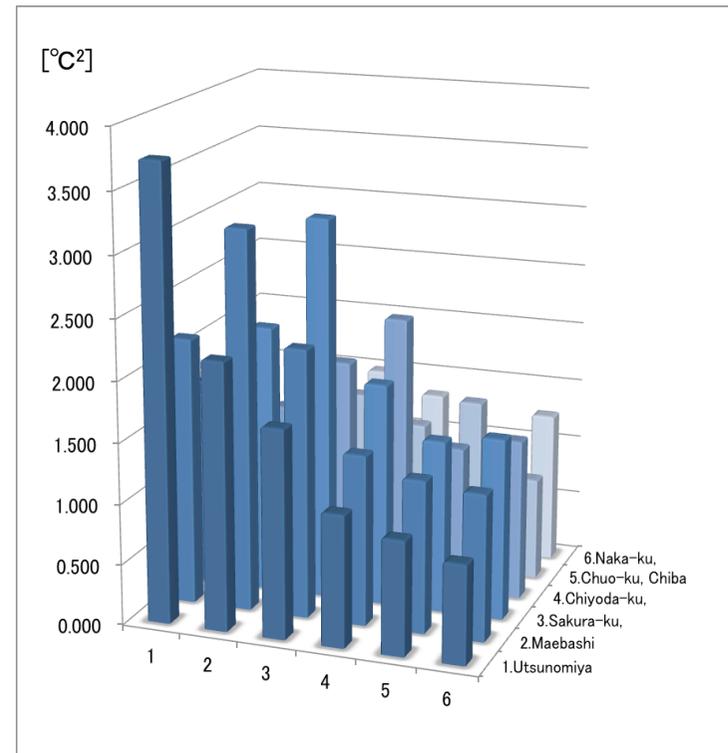
## 数値実験方法

提案した空調機器のDLCポートフォリオ最適化手法の効果を見るため、計算機による数値実験を実施した。実験では関東圏の6都市に関する、外気温予報の誤差データを使用した。誤差の算出には、実際の外気温予報データと、観測データを利用している。下図に、これら6都市の外気温予測誤差の、分散共分散行列の例を示す。

また、需要削減の様々な目標値に対して、削減量の標準偏差を最小化した結果をDLCの効率的フロンティアとしてプロットした(Fig. 3参照)。



(2012/07/01-15)



(2012/07/16-31)

Figure 2. Variance-covariance matrix of outdoor temp. prediction error

## 評価結果

- 最適選択(共分散型)における標準偏差の改善率は、ワースト選択を基準にして **38.9%**、均分選択を基準にして **6.35%** と見積もられる。
- 均分選択と最適選択(分散型)の結果は同等であり、共分散まで考慮することには意味がある。

Table 1. Effect of DLC portfolio optimization

| ポートフォリオ<br>選択方式 | 需要削減量の標準偏差<br>(相対値) | 備考                      |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| ワースト選択          | <b>1.93</b>         | 外気温予測誤差分散が最大の都市のみを選択。   |
| 均分選択            | <b>1.26</b>         | 6都市に削減量を等分。             |
| 最適選択(分散型)       | <b>1.24</b>         | 前期情報を用いて当期を最適化(分散のみ考慮)  |
| 最適選択(共分散型)      | <b>1.18</b>         | 前期情報を用いて当期を最適化(共分散まで考慮) |

## DLCの効率的フロンティア

- 需要削減の期待値を走査した場合の、最小標準偏差をプロット.
- 予測誤差分散が最大の都市(宇都宮市)の削減容量比率を20-80%の間で変化させている.
- 追加情報(ex. DRAのリスク選好性, DRプログラムの詳細)があれば, さらにフロンティア線上の点まで選択可能.

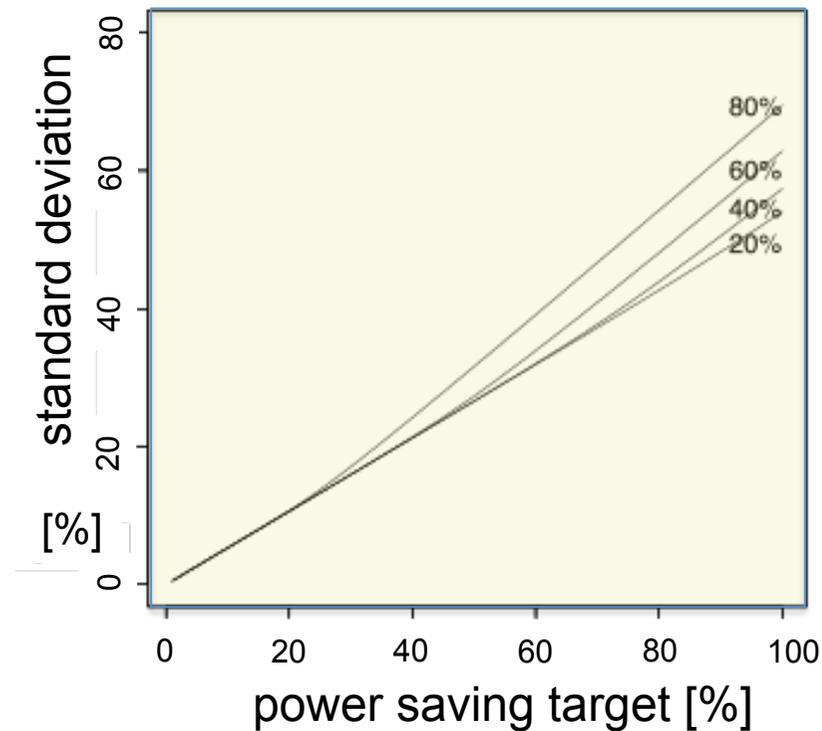


Figure 3. Efficient frontier of DLC

# CONCLUSIONS

- ビル空調機器を対象とするDLCにおける需給バランス上の主要なリスク要因は、外気温予測の誤差である。
- DLCポートフォリオ最適化の手法を提案し、需要削減の信頼性向上に一定の効果があることを数値実験により確認した。
- 効率的フロンティアによる分析は、需要削減目標に対するリスク最適化手段として利用可能である。

# REFERENCES

- [1] Markowitz, H.M. : “Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments”, John Wiley & Sons, Inc., New York Chapman & Hall, Limited, London (1959)
- [2] Hult, H., Lindskog, F., Hammarlid, O., Rehn, C. J. : “Risk and Portfolio Analysis: Principles and Methods”, Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, Springer 2012