

# 環境配慮型データセンタ向け空調連係 IT 負荷配置最適化方式

## IT Workload Allocation Cooperative with Air Conditioning System for Environment-Conscious Data Center

沖津 潤<sup>†</sup> 平島陽子<sup>‡</sup> 朝康博<sup>†</sup> 加藤 猛<sup>†</sup> 齊藤 達也<sup>†</sup>  
Jun Okitsu Yoko Hirashima Yasuhiro Asa Takeshi Kato Tatsuya Saito

### 1. まえがき

近年のクラウドコンピューティングの発展に伴いデータセンタ市場が拡大し、その総消費電力量は 2007 年から 2012 年にかけて倍増すると予想されている[1]。このため、地球温暖化防止に向けた環境対策として、データセンタの消費電力削減が緊急の課題となっている。

一般的なデータセンタにおける消費電力の内訳は、IT 機器が約 50%、空調設備が約 30%、給電設備その他が残りの約 20%を占めている。データセンタの消費電力を削減するには、IT 機器、空調設備、給電設備、それぞれの省電力化が必要である[2]。加えて我々は、更なる省電力化を実現すべく IT 設備連係管理システムの開発を進めてきた[3][4][5]。本システムは、IT 機器の稼働履歴から統計時系列解析により予測した IT 機器の作業負荷および消費電力と、三次元熱流体解析により算出した空調電力感度に基づいて、IT 負荷配置制御および空調運転制御を連係させることによりデータセンタ電力を削減する。

従来のデータセンタ省電力化の研究には、荒井ら[6]や中村ら[7]の研究がある。荒井らは、IT 機器と空調設備双方を考慮したデータセンタ電力のモデル化とそれに基づく運用管理方法を提案しているが、IT 負荷配置の最適化方法は議論していない。中村らは、大規模仮想マシンを対象とした回帰分析による IT 負荷配置の最適化方法を提案しているが、空調電力の考慮や IT 負荷の配置制約は議論していない。我々は、IT 機器の負荷分布すなわち電力分布に応じて空調電力が変動することに着目し、IT 負荷予測と空調電力感度を考慮して IT 負荷配置を最適化することにより、IT および空調双方を合わせたデータセンタ全体の省電力化を実現する。さらに、IT 負荷配置の決定では、IT 負荷の配置制約を考慮することで、データセンタの運用ポリシーに沿った IT 負荷配置最適化を実現する。

本報告では、IT 設備連係管理システムの IT 最適化システムについて述べる。先ず IT 負荷と空調電力を考慮したデータセンタ電力のモデル化と、IT 負荷予測に加えて配置制約や時間制約も考慮した IT 負荷配置の最適化アルゴリズムについて述べ、実際の IT システムの稼働履歴に基づく評価実験の結果と考察を述べる。なお、空調最適化システムについては、文献[8]を参照されたい。

### 2. IT 設備連係管理システム

IT 設備連係管理システムは、図 1 に示すように IT 最適化システムと空調最適化システムから構成される。IT 最適化システムでは、データセンタの IT 機器の稼働情報や監視情報を収集し、IT 負荷予測モジュールにより IT 機器の作業負荷を予測し、IT 負荷配置最適化モジュールにより IT 負荷配置を制御する。もう一方の空調最適化システムでは、IT 負荷予測モジュールから得られる IT 予測電力に基づいて空調最適化モジュールにより空調運転を制御すると共に、空調電力感度を IT 負荷配置最適化モジュールに引き渡す。

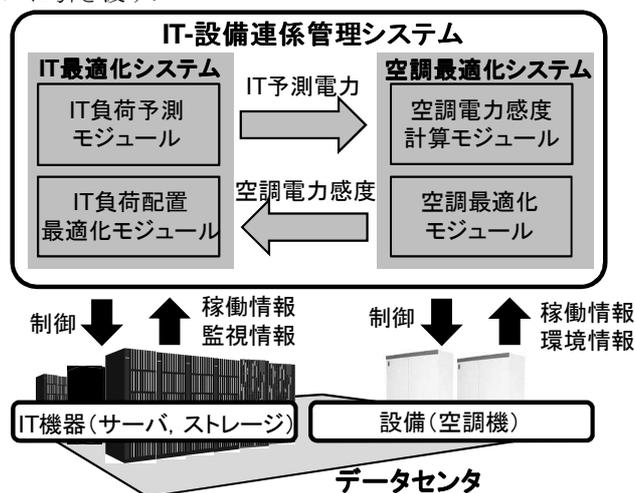


図1 IT-設備連係管理システム

IT 最適化システムについてさらに詳しく述べると、図 2 に示すように、稼働情報収集モジュール、IT 負荷予測モジュール、IT 負荷配置決定モジュール、IT 制御モジュールから構成される。IT 負荷予測モジュールは、IT 負荷の履歴から統計時系列解析により将来の負荷推移を予測する。IT 負荷配置決定モジュールは、予測した負荷推移と空調電力感度に加えて、配置制約や時間制約も考慮して IT 負荷配置を決定する。IT 機器制御モジュールは、決定された IT 負荷配置に基づいて、IT 機器間での負荷の移動や IT 機器の電源を制御する。

将来的に IT 機器の総作業負荷が小さくなると予測される場合には、特定の IT 機器に負荷を集約し、負荷の無い IT 機器の電源を遮断することにより、IT 機器の電力を削減する。負荷を集約する際には空調電力感度が小さい、すなわち空調設備への負荷が小さい IT 機器を選択することにより、空調電力も削減する。また、IT システムの構成や業務アプリケーションに対応する配置制約を考慮することにより信頼性や冗長性を確保し、業務変動や運用管理イベントに対応する時間制約を考慮することにより

<sup>†</sup> (株)日立製作所 中央研究所  
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

<sup>‡</sup> (株)日立製作所 システム開発研究所  
System Development Laboratory, Hitachi, Ltd.



ここでは表 1 に示す配置制約を考慮する。リソース上限は、これを超えないように IT 負荷を配置することにより、業務サービス性能の低下を抑止するためである。属性は、例えば、ユーザ別に IT 負荷配置最適化を行なう場合、仕様が異なる IT システム間で負荷移動を禁止する場合、特定業務を最適化の対象外とする場合などに用いる。属性は、IT 負荷や IT 機器毎に複数設定可能である。排他関係は、例えば業務の冗長化により信頼性を確保する場合、IT システムのスケラビリティを確保する場合、特定業務間の干渉を回避する場合などに用いる。

表1 配置制約

項目	制約条件
リソース上限	IT 負荷が IT 装置のリソース上限を超えない。
属性	IT 負荷と配置先 IT 機器の属性は一致する。
排他関係	排他関係にある IT 負荷同士を、同じ IT 機器に配置しない。

時間に関する制約条件としては、例えば IT システムの増設、業務サービスの周期変動、運用管理のイベントなどに応じて負荷最適化を行なう時刻や期間を設定する必要がある。時刻  $t_1$  から  $t_2$  までのデータセンタの電力量を  $E_{DC}$  とおくと、式(4)の目的関数を式(5)のように書き直せる。

$$E_{DC} = \int_{t_1}^{t_2} \sum_i \{(1 + S_i) \cdot P_{ITi}(L_k(t))\} \cdot dt \quad \dots(5)$$

IT 負荷配置最適化では、IT 負荷同士の時間的な凹凸を組み合わせることで平準化するように、すなわち最適化期間における時間積分値を最大化するように IT 負荷を IT 機器へ集約する。これにより、IT 機器への負荷集約率が高まり、IT 機器の稼働台数が削減され、データセンタ電力を最小化できる。

4.3 最適化アルゴリズム

IT 負荷配置の組合せ最適化問題を解くにあたって、全探索を行なうことは組合せ爆発により困難である。一般的な局所探索法や焼きなまし法はランダムな初期解から探索を開始するため、局所解に陥る可能性があり、制約条件が複雑な場合に効率が良くない。そこで、IT 負荷配置最適化では、図 3 に示すように先ず IT 機器の優先順位を設定し、優先順位に従い IT 機器へ IT 負荷を配置することにより、探索空間を狭めて効率化を図る。

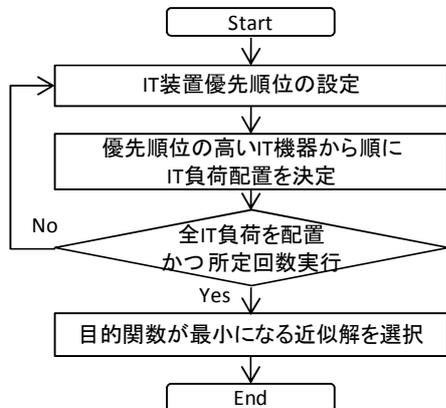


図 3 IT 負荷配置最適化アルゴリズム

(1) IT 機器優先順位の設定

IT 負荷として一つのリソース使用量のみで最適化する場合、例えばサーバにおいて CPU 使用率のみを考慮する場合には、負荷集約時に目標とする CPU 使用率を  $L_0$  として、式(6)に示すように IT 機器  $i$  の電力当たりの CPU 負荷許容量を表す指標  $\eta_i$  を求め、この指標が高い IT 装置を優先的に利用すればよい。これにより、負荷集約率が上がり、データセンタ電力を削減できる。

$$\eta_i = \frac{L_0}{(1 + S_i) \cdot P_{ITi}(L_0)} \quad \dots(6)$$

複数のリソース使用量に対して最適化する場合、例えばサーバにおいて CPU 使用率とメモリ使用量を考慮する場合は指標  $\eta_i$  が高く搭載メモリ量なるべく大きい IT 機器を利用する方が IT 負荷を集約しやすい。また、属性や排他関係の制約条件なるべく緩い IT 機器を利用する方が制約条件の間で矛盾が起きにくい。そこで、指標  $\eta_i$  が高く配置制約が緩い IT 機器の優先順位を高め、両者の間で一意的に順位が決まらない場合はランダムに設定し、図 3 に示すように所定の回数まで優先順位設定と近似解の探索を繰り返す。

(2) IT 機器へ配置する IT 負荷集合の決定

IT 機器優先順位が決まったら、順位の高い IT 機器から順に IT 負荷集合をノードとする探索木を生成し、配置制約に基づく下記指針により探索木の枝刈りを行なう。

- 属性：IT 機器と異なる属性を持つ IT 負荷を探索木に含めない。
- 排他関係：排他関係にある負荷同士は同じノードに含めない。
- リソース上限：IT 負荷集合のリソース使用量の合計を概算し、上限を超える場合はノードに含めない。

図 4 に、一例として 4 種類の IT 負荷を配置する場合の探索木、表 2 に IT 負荷仕様、表 3 に IT 機器仕様を示す。IT 負荷の平均リソース使用量は、最適化期間の平均値である。IT 負荷 A と B は排他関係のため、ノード AB は探索木に含めない(排他関係)。また、IT 負荷 D は IT 機器 X と属性が一致しないため、IT 負荷 D を含むノードを探索木に含めない(属性不一致)。さらに、IT 負荷 B と C の CPU 平均リソース使用量の合計 118 は IT 機器 X の CPU リソース上限 100 を超えるため、ノード BC は探索木に含めない(リソース上限)。このように探索木を生成することにより、配置制約の考慮と探索空間の削減を実現する。

表 2 IT 負荷仕様

IT 負荷	平均リソース使用量		属性	排他関係
	CPU	メモリ		
A	12	23	ユーザ A	B
B	54	24	ユーザ A	A
C	64	33	ユーザ A	—
D	38	45	ユーザ B	—

表 3 IT 機器仕様

IT 機器	リソース上限		属性
	CPU	メモリ	
X	100	100	ユーザ A

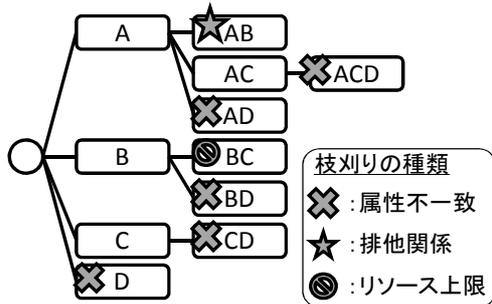


図4 IT 機器 X に対する IT 負荷集合の探索木

次に、枝刈りにより残ったノードに対して、全ての最適化期間において IT 負荷集合のリソース使用量の合計がリソース上限を超えないことを検査し、その結果残ったノードを候補として抽出する。候補ノードの中から、総リソース使用量が最大となる IT 負荷集合を近似解とする。なお、IT 負荷の数もしくはリソースの種類が増加すると、全ての候補ノードを抽出するのが困難になるため、探索時間または候補ノード数に閾値を設けて探索を途中で打ち切り、その時点での近似解を求める。

こうして或る優先順位の下で各 IT 機器に対する IT 負荷集合の近似解が求まる。図 3 に示す処理ループのように優先順位を変えながら所定回数繰り返すことにより複数の近似解が得られ、これらのうち式(5)に示す目的関数が最小になる近似解を最終的な最適解とする。

表5 ベンチマーク条件

項目	属性無効	属性有効
最適化期間	2 時間	
IT 負荷数	46~460 個	
IT 機器台数	46 台	
属性	無効	有効

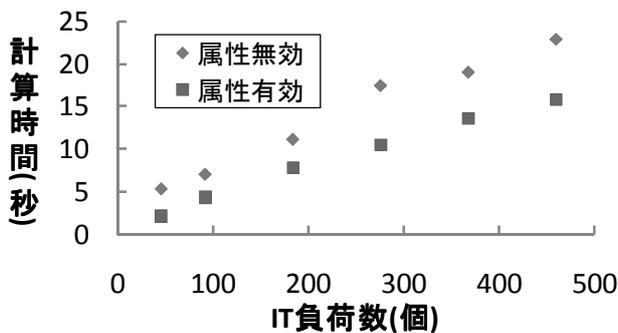


図5 ベンチマーク結果

表 5 および図 5 にアルゴリズムのベンチマークを示す。5 章に示す評価環境を用いて、配置制約として属性を考慮することの計算時間への影響を評価した。96~460 個の IT 負荷は、既存の 46 個の IT 負荷を分割して生成した。

同一 IT 負荷数で比較した場合、属性有効の計算時間は、属性無効の計算時間より短い。これは、属性を有効にすることで、組合せ最適化問題をグループ A,B,C,D の 4 つの小さな組合せ最適化問題 (A : IT 負荷数 6 個, B : 同 2 個, C : 同 29 個, D : 同 9 個, IT 負荷数 46 個の場合) に分割できるためである。このように属性を考慮することで、探索空間を狭め、計算時間を削減することができる。

## 5. システム評価

### 5.1 評価環境

データセンターの一区画に配置された IT システムのサーバ稼働履歴を用いて、IT 負荷配置最適化の効果をシミュレーションにて評価した。表 6 に評価環境、表 7 に IT システムを構成する IT 機器の仕様、表 8 に評価項目を示す。この IT システムは設計シミュレーションを行っており、46 台のサーバを 4 つのグループに分けて運用している。

今回の評価では、1 台の物理サーバの作業負荷を 1 つの仮想マシン (IT 負荷) と見なし、リソース使用量として CPU 使用率とメモリ使用率を用いた。稼働履歴には 3 週間分の 1 時間毎の時系列データを用い、評価対象期間は 1 週間とした。過去 2 週間の履歴から、設定した最適化間隔で定期的に負荷を順次予測しながら最適化を行なった。配置制約としてグループを区別する属性を設定した。ここでは、IT 負荷最適化の評価を主眼とし、空調電力感度は固定値 0 としたが、空調電力感度の影響に関しては文献[3][8]を参照されたい。

表6 評価環境

項目	説明
IT 機器	物理サーバ 46 台。4 つのグループに分かれて運用。
IT 負荷	合計 46 個。物理サーバの作業負荷を仮想マシンと見なす。CPU 使用率とメモリ使用量を考慮。
稼働履歴	3 週間分の 1 時間毎の時系列データ。過去 2 週間の履歴から負荷を予測。

表7 IT 機器仕様

IT 機器	リソース上限		電力		属性
	CPU	メモリ	$a_j$	$b_j$	
IT1~IT6	100%	8GB	10	1000	グループ A
IT7~IT8	100%	16GB	10	1000	グループ B
IT9~IT17	100%	16GB	10	1000	グループ C
IT18~IT37	100%	32GB	10	1000	グループ C
IT38~IT46	100%	128GB	10	1000	グループ D

表8 評価項目

項目	説明
IT 平均電力(kW)	IT 機器電力の合計の期間平均。式(2)に平均 CPU 使用率を適用して求めた IT 機器電力に平均稼働台数を乗算した値。
省電力効果(%)	最適化期間における IT 平均電力 (IT 電力量) の削減比率。
性能維持率(%)	IT 機器の CPU 使用率が 100%未満である期間の比率。
平均稼働台数(台)	IT 機器の稼働台数の期間平均。
平均 CPU 使用率(%)	稼働 IT 機器の CPU 使用率の期間平均。
平均メモリ使用率(%)	稼働 IT 機器のメモリ使用率の期間平均。

### 5.2 省電力効果

IT 負荷配置最適化の省電力効果を、最適化間隔とグループ属性を変えた 2 つのシナリオで評価した。表 9 に各シナリオの最適化パラメータを示す。シナリオ 1 は、1 時間毎に IT 負荷配置最適化を行ない、配置制約を設定せずに省電力効果を重視した。シナリオ 2 は、1 日 1 回しか最適化を行わず、属性による配置制約を設定して業務の信頼性や継続性を重視した。両シナリオとも予測外れによる性能への影響を抑えるため、予測補正值のマー

として3σ（信頼度99.7%）をとった。

表9 各シナリオの最適化パラメータ

項目	シナリオ1	シナリオ2
最適化間隔	1時間	24時間
IT 負荷	最適化期間の予測値	
マージン	3σ	
属性	無効	有効

表10に評価結果、図6に評価対象期間におけるサーバ稼働台数の推移を示す。理論上の必要台数とは、CPU使用率の合計から必要なサーバ台数を逆算した値であり、負荷集約の理想的な限界値を表す。

最適化前の平均CPU使用率が13.4%と低かったため、シナリオ1では66.8%（平均稼働台数11.2台）、シナリオ2では40.5%（25.0台）という高い省電力効果が得られた。一方、性能維持率はそれぞれ96.1%と99.3%であり、業務性能すなわち処理時間に与える影響は殆どない。したがって、今回提案したIT負荷配置最適化により、省電力化と性能維持を両立できる見込みを得た。シナリオ1と2を比べると、予想通り、前者が省電力化、後者が性能維持に有利であることが分かる。

表10 評価結果

項目	最適化前	シナリオ1	シナリオ2
IT 平均電力(kW)	52.2	17.3	31.1
省電力効果(%)	0	66.8	40.5
性能維持率(%)	100	96.1	99.3
平均稼働台数(台)	46	11.2	25.0
平均CPU使用率(%)	13.4	55.4	24.2
平均メモリ使用率(%)	16.7	28.9	25.8

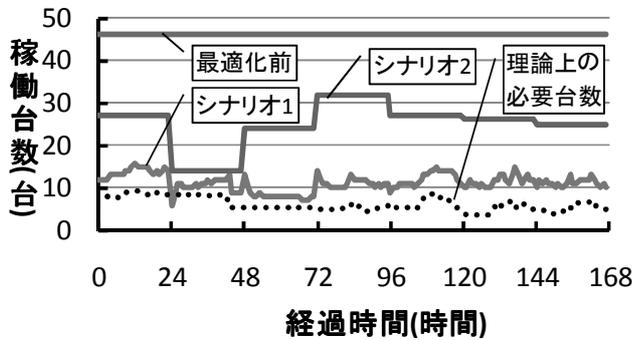


図6 サーバ稼働台数の推移

### 5.3 最適化パラメータの影響

IT負荷配置最適化における最適化パラメータの影響を評価した。省電力化と性能維持がトレードオフであること、統計時系列解析に基づく予測値ベースの最適化が直近値ベースに比べて省電力効果が高いこと、配置制約の無い最適化の方が省電力効果が高いことを検証した。以下に解析結果の概要を述べる。

#### (1) 最適化間隔と予測値マージン

表11に示すように、最適化間隔を1~24時間、予測値マージンを0~3σの間で変えて最適化を行なった。図7から図9に評価結果を示す。最適化間隔と予測値マージンが小さいほど省電力効果が向上し、逆に大きいほど性能維持率が向上し、省電力化と性能維持がトレードオフの相関関係にあることが分かる。両者のうちどちらを優

先するかを、業務の運用ポリシーに応じて調整できることを示している。

表11 最適化パラメータ

項目	値
最適化間隔	1~24時間(8点)
IT 負荷	最適化期間の予測値
マージン	0~3σ(4点)
属性	有効

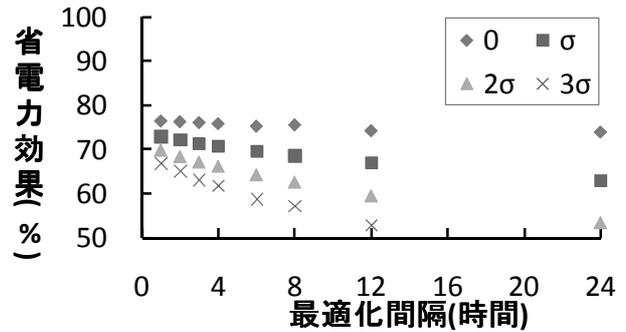


図7 省電力効果に対する影響

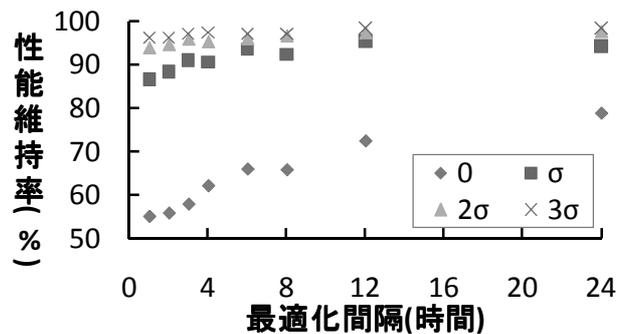


図8 性能維持率に対する影響

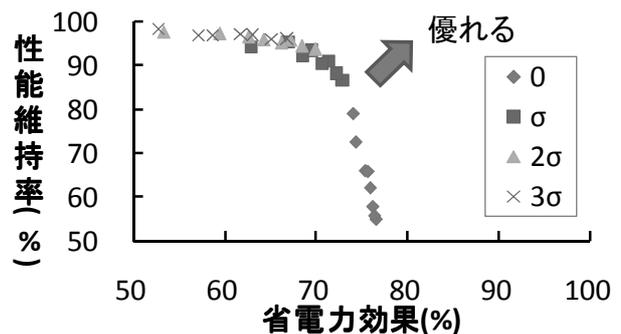


図9 省電力効果と性能維持率の関係

#### (2) 予測値と直近値に基づく最適化

予測値に基づく最適化と1時間前の直近値に基づく最適化について、省電力効果と性能維持率の相関を評価した。表12に両者の最適化パラメータ、図10に評価結果を示す。予測最適化は、直近最適化と比べて省電力効果と性能維持率の双方で優れている。また、予測最適化の方が直近最適化に比べて両者の相関関係が明らかでないため、運用ポリシーに応じて制御を行ないやすいと言える。直近最適化の性能維持率にばらつきが生じる理由は、負荷の直近値のみに依存して時間変化を考慮していないため

に、IT 機器のリソース使用量が 100%を超える場合が頻発するからと考えられる。

表 12 最適化パラメータ

項目	予測最適化	直近最適化
最適化間隔	1~24 時間(8 点)	
IT 負荷	最適化期間の予測値	1 時間前の直近値
マージン	0 (考慮せず)	
属性	無効	

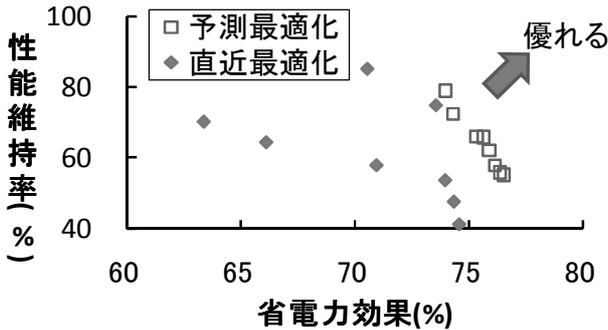


図 10 予測最適化と直近最適化の比較

(3) 配置制約

配置制約の 1 つである属性を有効にした場合と無効にした場合について、省電力効果と性能維持率を評価した。表 13 に両者の最適化パラメータ、図 11 に比較結果を示す。なお、図 11 の属性無効は図 9 と同一のデータである。図 11 では、属性の有無による違いを分かりやすくするために、異なるマージン  $0 \sim 3\sigma$  を同一マークでプロットした。

属性無効は、属性有効に比べて同じ性能維持率では省電力効果に優れている。配置制約が緩いほど真の最適解に近い近似解が得られていることを示しており、リソースプールのような配置自由度が高い運用管理が省電力化に有効であることが分かる。

表 13 最適化パラメータ

項目	属性無効	属性有効
最適化間隔	1~24 時間(8 点)	
IT 負荷	最適化期間の予測値	
マージン	$0 \sim 3\sigma$ (4 点)	
属性	無効	有効

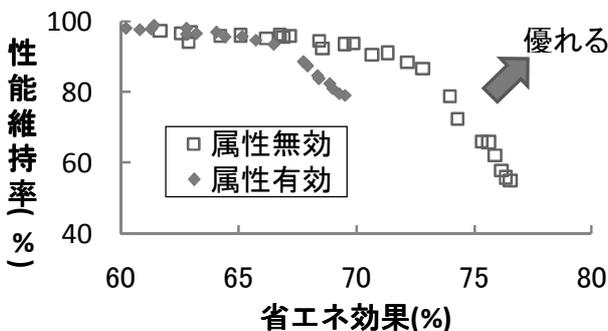


図 11 配置制約の影響

6. まとめ

環境配慮型データセンタに向けた IT 設備連係管理システムにおいて、空調電力感度を考慮したデータセンタ電力モデルを提案し、このデータセンタ電力を目的関数として IT 機器へ IT 予測負荷を配置する組合せ最適化問題に対する近似解法アルゴリズムを検討した。実際のデータセンタにおける IT システムのサーバ稼働履歴を用いて IT 負荷配置最適化の効果を評価した結果、以下の結論を得た。

- IT システムの業務性能を維持しつつ IT 電力を 40.5% から 66.8%削減できる見込みを得た。
- 最適化の時間間隔と予測補正值のマージンを小さくするほど省電力効果が高まる。
- 省電力効果と性能維持率はトレードオフ関係にあり、運用ポリシーに応じて調整できる。
- 統計予測に基づく最適化は、直近値に基づく最適化に比べて省電力化と性能維持双方に有効である。
- 配置自由度が高いほど省電力効果が大きいいため、リソースプールのような運用管理が望ましい。

今後の課題は、実際のデータセンタにおいて空調電力感度を算出し、これを考慮した IT 負荷配置最適化のシステム実証実験を行なうことである。文献[3][8]と今回の評価結果を踏まえると、IT 機器と設備を合わせたデータセンタ総電力を半減できる見込みである。

参考文献

[1](株)ミック経済研究所, “データセンタの消費電力とグリーン IT 化の実態調査 2009 年度版” (2009)

[2]The Green Grid, “Guidelines for Energy-Efficient Datacenters”, Feb. 2007.

[3]沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 平島陽子, 中島忠克, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(1)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-4 (2009)

[4]平島陽子, 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 中島忠克, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(2)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-5 (2009)

[5]中島忠克, 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 平島陽子, 頭島康博, “次世代データセンタ向け環境配慮運用管理方式(3)”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-14-6 (2009)

[6]荒井大輔, 吉原貴仁, “空調機の電力消費量を考慮したサーバ仮想化とネットワーク動的構成変更によるデータセンタ省電力運用管理手順の提案”, 第 8 回情報科学技術フォーラム, L-023 (2009)

[7]中村暢達, 喜田弘司, 竹村俊徳, 藤山健一郎, “大規模 VM 負荷予測・配置制御技術によるシンクライアント・データセンタのグリーン化”, NEC 技報, Vol.62, No.3 (2009)

[8]朝康博, 中島忠克, 沖津潤, 加藤猛, 齊藤達也, 頭島康博, “環境配慮型データセンタ向け IT 連係空調最適化制御方式”, 第 9 回情報科学技術フォーラム(予定)

[9]SPSS Inc., “SPSS Statistics 17.0 Algorithms”, Aug. 2008.