

エネルギー効率から見たデータセンターアーキテクチャの特性評価

Characterization of Data Center Architecture for Energy Efficiency

● David F. Snelling ● C. Sven van den Berghe

あらまし

本稿では、データセンターのエネルギー効率を表す、二つのパラメータで構成される直感的な指標を紹介する。この指標は、データセンターの稼働開始からフル稼働までのエネルギーパフォーマンスを正確に示し、将来のパフォーマンスの予測およびプロビジョニング方針の根拠として使うことも可能である。この指標は同時に、データセンターの理論上の理想的なパフォーマンスを表現できるため、異なる規模のデータセンター間、プロビジョニングの各ステージ間、または設計および開発の各フェーズ間の比較に使うことができる。本稿では、この指標を2箇所の富士通データセンター(IT機器の消費電力ベースで600 kW ~ 3 MWの範囲)に適用し、詳細なシミュレーションと測定の両方に照らして実証した精度の高さを紹介する。

Abstract

This paper presents an intuitive, two-parameter metric for fully describing the energy efficiency of data centers (DCs). The metric accurately characterizes the energy performance of a DC from when it is first commissioned through to full capacity. Thus, the metric can be used to predict future performance and to form the basis of deployment policy. The metric also describes the theoretical ideal performance of DCs. It can therefore be used to compare DCs of different sizes, at different stages of deployment, or in different phases of design and development. The paper then verifies this metric by applying it to two Fujitsu DCs, ranging in size from 600 kW to 3 MW (IT power) and demonstrating it to be accurate against both detailed simulation and measurement.

まえがき

データセンターのエネルギー効率化に向けて、米国、EU、および日本の中で2010年2月2日に交わされた国際的合意の中で、評価指標協調の戦略基盤として、電力効率指数（PUE：Power Usage Effectiveness）が採択された。全体的な戦略は以下のコンセプトに基づいて構築されている（グリーンIT推進協議会の仮訳⁽¹⁾を引用）。

「以下のような効果的なエネルギー効率指標：

1. 実際のエネルギー消費量と比較した、実際のデータセンターのIT機器の仕事量を測定すること。IT機器の仕事量を定義する際、以下の中間測定方法が定義され、かつ/または有効である。

a. IT機器について：IT機器の定格エネルギー消費量に対する仕事能力を測定する。また、IT機器利用率を測定する。

b. データセンターの設備（facility）とインフラについて：データセンターのインフラの効率（PUE）を測定する。

2. CO₂排出量削減のため、再生可能エネルギーと再利用エネルギーの量を測定する。」

国際的な議論や比較のため、データセンター効率としては、PUEが選択された。PUEの詳細な計算方法は、グリーン・グリッド（TGG）⁽²⁾の提唱するガイドラインに詳述されている。⁽³⁾具体的には、データセンターへのエネルギー入力（kWh_{IN}）と配電ユニット（PDU：Power Distribution Unit）からIT機器へのエネルギー出力（kWh_{IT}）の年間の測定値を取得し、kWh_{IN}/kWh_{IT}としてPUEを算出する。以降、PUEの逆数であるデータセンターインフラ効率（DCiE：Data Center infrastructure Efficiency）を使用することとする。

DCiEの弱点

データセンター効率の測定において、DCiE単独の測定および利用には既知の弱点が多数ある。弱点を議論する前に、DCiEの定義の基本的な理解を図ることで議論が深まるはずである。

DCiEは、IT機器のエネルギー消費量とデータセンター施設全体のエネルギー消費量の比率であり、年間を通じて測定するのが理想的である。データセンター設備の効率性が高まるほど、DCiEの値は

1.0に近くなる。IT機器の測定から除外される機械電気（M&E）機器には、トランス、UPSシステム、電源浄化・配電装置、空調、チラー、冷水ポンプ、および影響の小さい照明、防火装置などがある。

(1) 測定ポイント

IT機器の消費電力を測定する場合、現実にはIT機器のエネルギー消費量を測定するポイントが多様に存在する。例えば、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power Supply）から出力されるエネルギーはすべてIT機器に割り当てられると仮定することは可能である。その仮定は正しいかもしれないが、ここではPDUで失われる非ITエネルギーが考慮されていない。

本稿で紹介する、二つの要素で構成される指標では、上記の仮定には依存せず、IT測定ポイントとしてPDUからの出力を採用する。

(2) 集計の問題

DCiEの指標は、どのような期間（例えば、1日、1週間、1箇月、1年間）を連続的に計測しても、複数の計測結果を合計しても、算出できるが、データセンターの実際の能力を反映するのは長期間の集計のみである。どのようなデータセンターでも、冬の寒い真夜中に1時間測定した場合は、夏の正午に1時間測定した場合より効率が高いという結果になる。DCiEの測定は、年間で集計して利用することが推奨されている。このようにして、大部分の気候変化は指標に組み込まれている。

本稿で紹介する指標もこのガイドラインに従っているが、任意の時間スケールにも適用可能である。

(3) ライフサイクルの問題

DCiEは単位の付かない比率であるため、データセンターで消費される実際の総エネルギーを評価する目的にはほとんど役立たない。ライフサイクルに応じてデータセンターの効率にも、規模の経済性が大きな影響を及ぼす。例えば、最新鋭のデータセンターが、まだ新しく稼働率が低いときは、DCiEによれば通常非効率と評価される。これはM&E機器に起因するベース負荷が原因である。一方で、フル稼働のデータセンターのベース負荷は総負荷に対する比率が格段に小さくなり、DCiEの値は稼働率に比例する負荷部分が反映されたものになる。

このライフサイクルの問題が及ぼす商業的および

び制度的な影響は、データセンタービジネスにとって重要な問題となっている。顧客はデータセンターを含むサービスプロバイダのエネルギー効率に関する情報を求めている。DCiEを使ってデータセンターの効率性を偽ることは容易である。逆に、新しいデータセンターは、まだ稼働率が低いという理由だけで顧客から過小評価されやすい。

本稿で紹介する指標の目的は、このライフサイクルの問題に対処し、ライフサイクルに影響されないデータセンターの評価指標を提供することである。

(4) そのほかの弊害と問題

データセンターの効率性評価に向けた従来のDCiEによるアプローチの結果として、全体的に多くの弊害や問題が発生している。

・QoSの問題

高度なデータセンター⁽⁴⁾ほどM&E関連システムの冗長性レベルを高めているため、DCiE評価が低くなる傾向がある。

・見かけ上の悪化

データセンター内のIT機器を(例えばエネルギーコストやCO₂排出の削減を目的として)刷新する大規模プログラムを実行すると、DCiEが悪化する可能性がある。これは単純に、DCiEの要素となるIT機器の比率が固定のM&E負荷に対して低下するからである。

・誤った予測

DCiEを使用して動きを予測したり、プロビジョニング(データセンターにIT機器とM&E機器を順次実装していくこと)を計画したりすることには危険を伴う。例えば、データセンターのプロビジョニングレベルに対してDCiEが向上する割合の予測が不正確だと、光熱費が予想以上にかかってしまう可能性がある。

・仮説的データセンター

DCiEは、データセンターに具体的な稼働負荷がある場合だけ意味があるため、仮説的なデータセンターについて有意義な議論をすることはほぼ不可能である。しかし、長期的な戦略計画立案においては、データセンター事業者は仮説的な設定でデータセンター技術者を評価する必要がある。

・データの入手性

あるデータセンターの測定データを入手するこ

とは、多くの場合、不可能に近い。大多数のデータセンターは静的な構成で運用されており、入手可能なデータからは、時系列の傾向や構成変更による変化に関する知見は得られない。

・複雑なほかの選択肢

グリーンIT推進協議会⁽⁵⁾が提唱するDPPE⁽⁶⁾などのDCiEの代替指標の場合、得られる情報量は増えるが、複雑になる。例えばDPPEは、四つの独立した条件を任意の重み付け方法で組み合わせた複合指標である。

次章以降では、二つの要素で構成される指標を紹介する。この指標により上記のすべての問題を解決することを目的とするが、主眼はライフサイクルからの独立性を持つことに置かれる。データセンターのエネルギー効率をプロビジョニングレベルから独立して表現することを目標とする。データセンターは長年にわたって運用されるため、効率性の瞬時値が求められる一方で、データセンターの潜在能力を把握することが重要となるケースも存在する。例えば、モジュール化が進んだデータセンターでは、プロビジョニングのライフサイクルの早い時期に効率性が高まるのであるが、その事象を理解し定量化した上でプロビジョニングの意思決定を行う必要がある。大規模データセンターは一般的に高い効率性を持つが、それは全負荷に達した場合に限られるため、大規模データセンターが持つ最大の価値はライフサイクル全体を通して初めて発揮される。

モデルの表現

ここでの議論では、データセンター効率の特性評価に重要な役割を果たす次の二つの問題に焦点を当てる。

- (1) データセンターはフル稼働状態で最も効率性が高い。
- (2) プロビジョニングレベルに対して効率性が向上する割合は、データセンターの全ライフサイクルでの効率に大きな影響を及ぼす。

上記の二つの仮説的なデータセンターでのプロビジョニングレベルの上昇に伴うDCiEの推移を図-1に示す。DC'A'は、稼働率が100%のときにDC'B'よりもわずかに効率が良くなっているが、DC'B'は、DC'A'よりも早い時点でますますのレベルの効

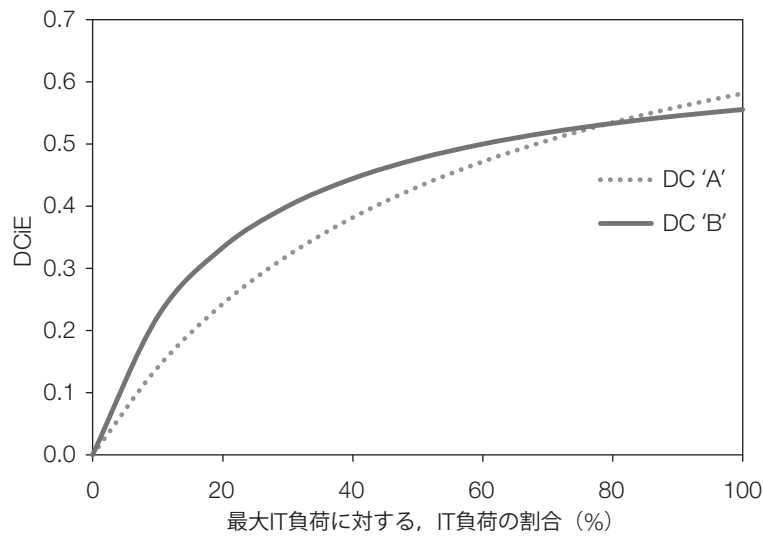


図-1 二つの仮説的なデータセンターにおけるDCiE曲線の例
Fig.1-Example DCiE plot for two hypothetical data centers.

率に達している。この二つのデータセンターを全負荷時のDCiEを基準に比較した場合には、'A'のほうが効率性に優れるという結論になる。一方で、部分稼働の状態と比較した場合には、データセンターの相対的なプロビジョニングレベルに依存する評価となる。この単純な比較によって、上記の二つの問題の重要性が浮き彫りにされる。

本稿では、上記の両問題を解決することを目的とする、二つのパラメータで構成されるモデルを紹介する。これらのパラメータは次のように定義される。^(注1)

・DCiE_∞

理論上漸近する、データセンターの最大効率。

・P_{1/2}

データセンターが理論上の最大効率（すなわちDCiE_∞）の2分の1で稼働するときのIT負荷。P_{1/2}はkWで表されるが、データセンターのIT負荷の設計最大値に対する割合で表すこともできる。

パラメータの定式化を議論するために、富士通

(注1) このアプローチは、1980年代のRoger Hockney教授の業績から着想を得たものである。Hockneyは、同様のアプローチを適用してベクトル型スーパーコンピュータの性能を表現した。Hockneyが定義したパラメータは、'r-infinity' (r_∞) -1秒あたりの浮動小数点演算回数で表すマシンの理論上のピーク性能、および'n-half' (n_{1/2}) - その性能の半分に達するために必要な計算ベクトルの長さであった。⁽⁷⁾

データセンター（以下、DC1, DC2）の測定値を例として取り上げる。^(注2) 図-2は、総施設負荷に対するIT負荷をいずれもkW単位でプロットしたものである。

M&E負荷がIT負荷に対して線形的に依存することが明らかである。非線形に推移するデータセンターは、高負荷のときに効率が悪化する傾向があるため、データセンターの設計上の収容能力が線形部分に収まる仕様にする場合が多い。その効果は、図-2の最も高負荷となるポイントでようやく検出できる程度である。したがって、上述の線形関係が一般に成立すると仮定し、年間平均IT負荷(L_{IT})を年間平均施設負荷(L_{DC})で表すことができる。

$$L_{IT} = \alpha + \beta * L_{DC} \quad (1)$$

つぎに、M&E負荷をL_{ME}とすると、L_{DC}=L_{IT}+L_{ME}であるから、DCiEを次のように定義することができる。

$$DCiE = L_{IT}/L_{DC} = L_{IT}/(L_{IT} + L_{ME}) = \beta * (L_{IT}/(L_{IT} - \alpha)) \quad (2)$$

あるデータセンターの理論上のDCiEの最大値は、L_{IT}が無限大になるため次のようになる。

$$DCiE_{\infty} = \beta \quad (3)$$

(注2) 本稿では、二つのデータセンターの実際の値を使用した。セキュリティおよび機密保持の観点から、これらを単にDC1およびDC2と呼ぶ。

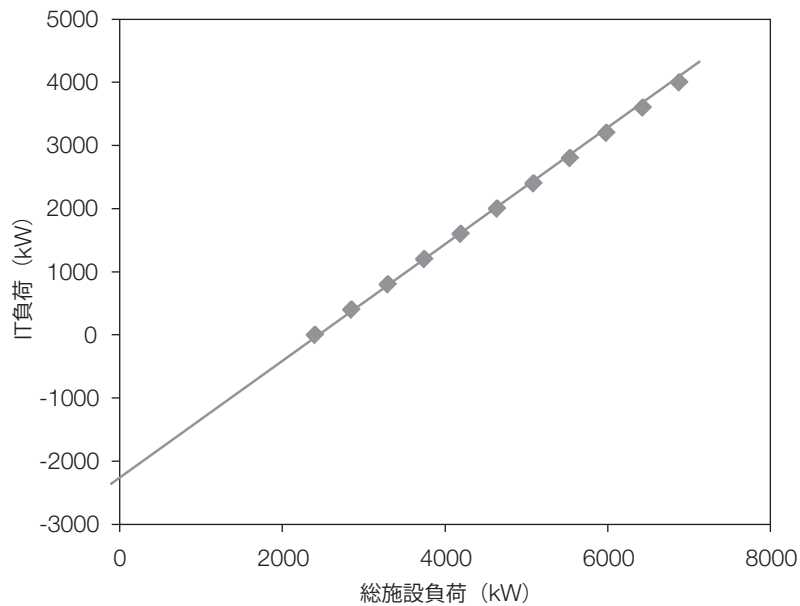


図-2 年間平均総施設負荷に対する年間平均IT負荷の推移
Fig.2-Plot of average annual IT energy load against average annual total site load.

データセンターがこの効率の2分の1 ($\beta/2$) に達するのは、式 (1) を式 (2) に代入すると、IT 負荷が $-\alpha$ のときである。ここで以下の定義をする。

$$P_{1/2} = -\alpha \quad (4)$$

したがって、 α および β は、データセンターの特性を表現する値であり、図-2のとおり、総データセンター負荷に対してIT負荷をプロットしたときの勾配と切片である。これにより、DCiEをIT負荷の関数とするモデルの基礎が次のとおり成立する。

$$DCiE(L_{IT}) = DCiE_{\infty} * (L_{IT} / (L_{IT} + P_{1/2})) \quad (5)$$

モデルの解釈

一般的にデータセンターは負荷が高くなるほど効率が高まるため、DCiE_∞パラメータは、データセンターの負荷が無限に高い状態のデータセンターの効率を表す。すなわち、DCiE_∞はあるデータセンターの理想的な実装を表す数値である。大半のデータセンターでは、IT負荷が設計上の最大IT容量 (IT_{max}) に近付くにつれて、DCiEはDCiE_∞ に近づく。

$P_{1/2}$ 指標は、データセンターにおけるプロビジョニングのライフサイクルにおいて、データセンターが理想的な最大効率の2分の1に到達したポイントを表す。 $P_{1/2}$ を設計上の最大IT容量に対する比率に正規化することにより、データセンターを比較す

ることができる。一般的には、 $P_{1/2}$ が小さいデータセンターほどモジュール化されており、プロビジョニングのライフサイクルの中で早期に高い効率性を実現できる。

注意すべきは、DCiE_∞値が低いデータセンターでも、 $P_{1/2}$ 値が小さい場合、ライフサイクルを通じた評価ではエネルギー効率が高くなることである。ただし、優れた設計でモジュール化されたデータセンターは、全負荷時に効率が高くなるので、 $P_{1/2}$ が小さい場合は、DCiE_∞が大きくなる傾向にある。

● 測定方法

これらの指標を使用する際には、グリーン・グリッドが策定したPUE測定時のガイドラインに従うことを推奨する。⁽³⁾ ガイドラインの概要は次のとおりである。

1年を通じたエネルギー消費量をITおよび施設について測定し、年間平均のIT負荷および施設負荷(単位kW)を算出する。

施設のエネルギー消費量は、エネルギー供給事業者とデータセンターとの境界点で測定する。また、データセンターのオフィスなどのサポート機能をすべて測定対象とする。^(注3)

(注3) 共用施設および電気以外のエネルギー(天然ガス、冷水など)の取扱いの詳細については参考文献(3)を参照のこと。

ITのエネルギー消費量は、PDUからIT機器への出力（場合によってはITラックでの出力）で測定する。これは、IT負荷から非IT関連の負荷をできるだけ除外することを意図するものである。

現実には、上記のガイドラインに従って精度良く測定することは一般的に困難である。それは主に、データセンターのIT負荷が1年を通じて変化することによる。

また、 α と β は、データセンターのある範囲のIT負荷から得られる多数のデータポイントの最小二乗法に基づいて算出されるのが理想である。しかし現実にはデータポイントの取得は難しいため、

当該データセンターに適合するように調整したシミュレータを使って、様々な負荷のもとでITおよび施設のエネルギー消費量の年間の値を取得することが推奨される。そのようなシミュレーションツールが、BCSのデータセンタースペシャリストのグループ⁽⁸⁾に提供されている。欧州富士通研究所では、同様のツールを開発し富士通グループ各社に提供している。

● ユースケース

著者らは、シミュレーションを用いて多数のデータセンターにこのモデルを適用した。図-3, 図-4は、2箇所の富士通データセンターのDCiE曲線を示す。

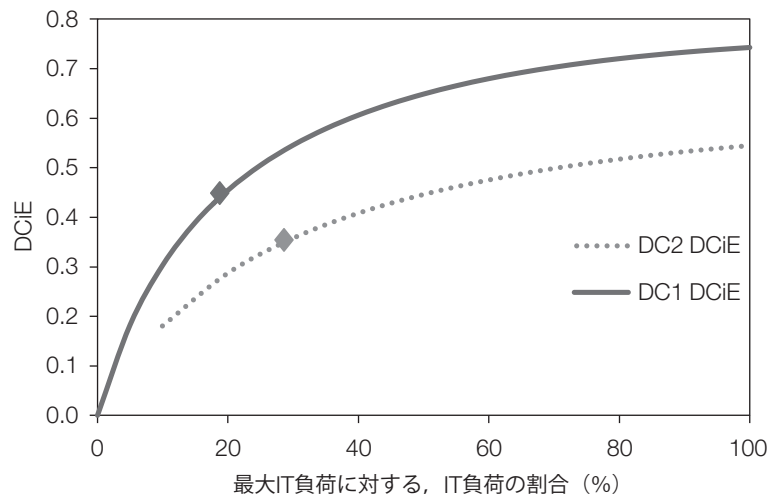


図-3 2箇所の富士通DCにおけるIT負荷率に対するDCiEの推移
Fig.3-DCiE plotted against fraction of maximum IT capacity of two Fujitsu data centers.

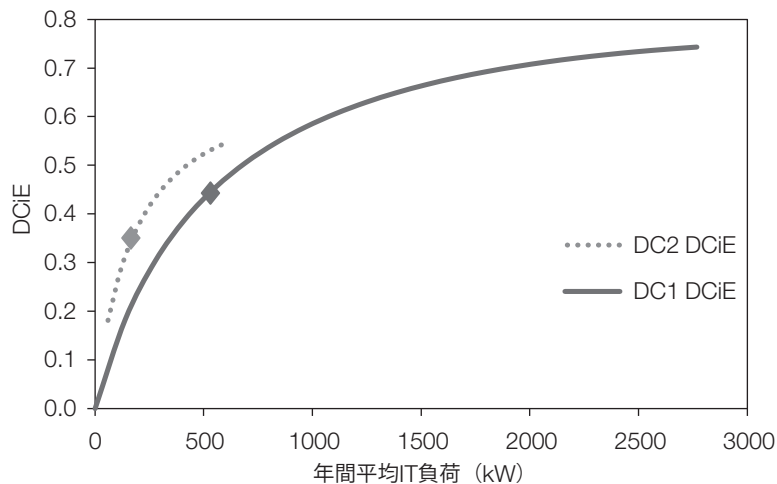


図-4 2箇所の富士通DCにおけるIT負荷の実測値(単位kW)に対するDCiEの推移
Fig.4-DCiE plotted against actual IT load (in kW) of two Fujitsu data centers.

このデータから、DC1がDC2よりも大幅に効率が高く、ライフサイクルのかなり早い段階で理想効率の2分の1に到達することがはっきりと見て取れる（DC1は最大負荷の19%、DC2は29%で到達）。ところが、負荷の絶対値で比較すると、IT負荷が低い場合にDC2がDC1よりも効率が高いことは興味深い。これは、DC1が非常に大きな収容能力を

持つように設計されており、DC2よりも大きなベース負荷を持つことが原因である。DC1の価値を最大限引き出すには、早期にITサービスをインストールすることが重要であり、そうすることでDC1のライフサイクルを通した高い効率性という強みを生かすことができる。

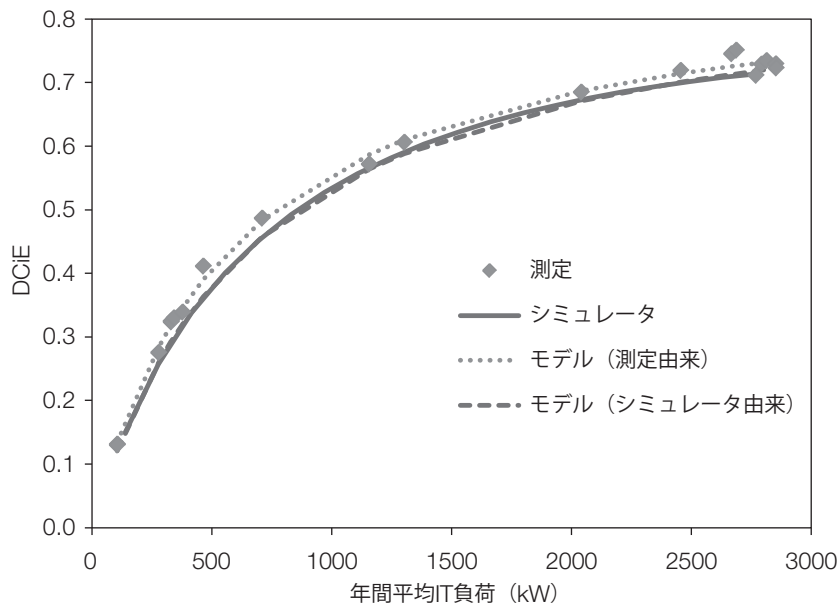


図-5 DCiEの比較(DC1の測定データに基づくDCiE, シミュレータデータに基づくDCiE, 測定およびシミュレータデータに基づくモデルのDCiE)
 Fig.5-Comparison DCiE based on measured data for DC1 with simulated data and models based on both measured and simulated data.

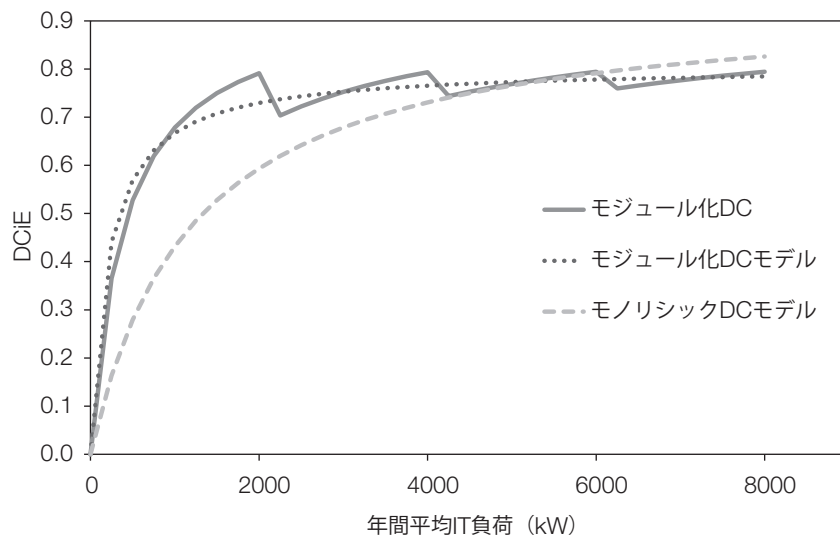


図-6 モジュール化されたDCとモノリシックなDCのDCiEの比較
 Fig.6-Comparison DCiE data for modular and monolithic DCs.

● 検証

DC1の試運転の一環として、富士通では全負荷試験を実施した。試験では、100 kWから3 MWの間で20段階の擬似的なIT負荷をかけた（電気ストーブを使用）。各段階でデータセンターが安定化するのを待ち、IT負荷および総施設負荷の両方を記録した。ここから、各プロビジョニングレベルでのDCiEの瞬時値を算出する基礎データが得られた。^(注4) 図-5では、このデータを、シミュレータおよびDCiE_∞とP₁₂に基づく二つのデータセンターモデルと比較している。一方のモデルは測定データから、他方のモデルはシミュレータのデータから作成した。このグラフは、シミュレータ、2モデル、および測定データが高い信頼度で一致することを示している。測定データと測定データに基づくモデルとのピアソン相関係数は0.999、測定データとシミュレータに基づくモデルの間では0.998であった。

また、モジュール化設計でエネルギー効率が高まる可能性が示唆された。図-6では、モジュール化設計のデータセンターを（プロビジョニングレベルと、このモデルを示しながら）モノリシックなデータセンターと比較している。両タイプのデータセンターは、フル稼働時には類似のパフォーマンスを発揮するが、ライフサイクルの初期にはモジュール化されたデータセンターのほうが効率が高い。このことは、小規模のモジュールに設計の焦点を当てて個々のDCiE_∞を最大化し、これらのモジュールを必要に応じて組み合わせるべきであることを示唆する。

む す び

本稿では、シンプルな指標の提案を目的として、プロビジョニングレベルに影響を受けずにデータセンターの特性評価ができる、二つのパラメータで構成されるモデルを紹介した。データセンターにおけるPUEの年間の直接測定の重要性は変わらないが、データセンターのパフォーマンスをライフサイクルを通じて予測できるモデルは、データ

(注4) 測定は1日だけ実施され、季節的な影響を考慮していないため、このデータはDC1の1年を通じたパフォーマンス予測には利用できない。

センター事業者にとって貴重なツールである。

最後に、このモデルを適用可能な方法はほかにも多い。このモデルをIT負荷の変化特性に組み込み、特性に応じたデータセンター全体のエネルギー消費量予測の指針を得ることもできる。これによって、キャパシティプランニングや予算管理において極めて有効なガイダンスが得られる。また、2種類の主要な負荷(ITおよびM&E)の様々なコンポーネントをサブコンポーネントに細分化することも考えられる。例えば、ITはサーバ、ストレージ、ネットワークなどに、M&Eは冷却、電気、非常用の各コンポーネントに細分化できる。これにより、データセンターの負荷の要因をより深く理解することが可能となる。

参考文献

- (1) Green IT推進協議会：データセンターのエネルギー効率に関する世界指標の協調について（合意文書）。
http://www.greenit-pc.jp/topics/release/pdf/dppe_j_20100416.pdf
- (2) The Green Grid.
<http://thegreengrid.org>
- (3) The Green Grid : Recommendations For Measuring and Reporting Overall Data Center Efficiency Version 2 - Measuring PUE for Data Centers (May 2011).
- (4) The Uptime Institute.
<http://www.uptimeinstitute.org>
- (5) Green IT Promotion Council.
<http://www.greenit-pc.jp/e>
- (6) Green IT Promotion Council : Concept of New Metrics for Data Center Energy Efficiency, February 2010.
http://www.greenit-pc.jp/topics/release/pdf/dppe_e_20100315.pdf
- (7) R. W. Hockney : Characterization of parallel computers and algorithms. *Computer Physics Communications*, Vol.26, Issues 3-4, p.285-291 (1982).
- (8) BCS : Data Centre Specialist's Group.
<http://dcsg.bcs.org>

著者紹介



David F. Snelling

欧州富士通研究所 所属
現在, 大規模, 複雑な分散システムの
設計, 管理, および環境影響の研究に
従事。



C. Sven van den Berghe

欧州富士通研究所 所属
現在, 主にデータセンターのエネルギー
フローのシミュレータの開発に従事。