

戦略的システムデザインによる最適化設計法の提案

— 排熱の再利用によるデータセンターと農業のCO₂排出量の削減 —

福田 次郎^{1*}、日比谷 孟俊²

データセンターはICT (Information and Communication Technology) の重要なインフラであるが、地球環境問題の観点から電力消費の削減およびCO₂排出量の削減が重要な課題となっている。しかし、データセンター単独の効率化だけでは大幅なCO₂の削減は難しい。そこで、異なるステークホルダー間における「物理システム」と「価値システム」の二層の概念空間と、その中で最適化をはかる「戦略的システムデザイン」の思考を提案し、事例としてデータセンターの排熱をハウス栽培農家で再利用するシステムについて物理面および価値面の両方から考察した。こうした戦略的システムデザイン思考による複合システムの設計は単独のシステムと比較して、CO₂排出量削減に効果があり、価値的にも優れたシステムとなることを明らかにした。

キーワード: データセンター、地球環境、システムデザイン、排熱再利用、農業

An optimum design method utilizing a strategic system design concept

– Reduction of CO₂ emission at a data center by reusing emitted heat for agriculture –

Jiro Fukuda^{1*} and Taketoshi Hibiya²

Data centers are important infrastructure of information and communication technology (ICT). Reducing electric-power consumption and the CO₂ emissions at the centers are urgent issues from the viewpoint of global environmental concerns. Improvement of efficiency within a single data center, however, cannot assure significant reduction of CO₂ emissions. Hence we propose the concept of “strategic system design”, which optimizes system design by combining different stake-holders not only from the viewpoint of the “physical system” but also from that of the “value system”. As an example, a system in which greenhouse cultivation farms reuse emitted heat at data centers was considered from both the physical side and the value side. The complex system designed by such a strategic system design idea was found to be effective in reducing CO₂ emissions compared with a single isolated system, and was clarified to be an excellent value system.

Keywords: Datacenter, global environment, system design, emitted heat, greenhouse business

1 はじめに

ICT (Information and communication technology) は経済活動の無駄を省き、輸送の効率化もしくは代替を実現し、エネルギーの有効利用や節減によるCO₂排出量削減に大きな貢献をしている。しかし、ICTの普及により、オフィスや家庭での電力消費は逆に増えており、結果として、日本全体のCO₂排出量を増加させる要因の一つとなっている。このまま増加が続くと、2025年にはICTによる電力消費が2006年現在の5.2倍、すなわち、国内総発電量の25%を占めるようになると^{注1}予想されており、ICT分野における消費電力の削減は重要な課題となっている。

特に、大量のサーバーを保有するデータセンターは、多大な電力を消費し、なおかつ消費量が年々増加しており、地球温暖化防止の観点から、そのエネルギー消費およびCO₂排出量の削減が大きな課題となっている。このため、

日本のデータセンター事業者各社は、より効率の良いサーバー、空調設備、電源設備の導入などの努力をしているが、データセンター単独でのエネルギー利用の効率化は限界に近づいており、より本質的な視点からのデザインアプローチが期待されている。

そこで、新たなデザインアプローチとして、複数の事業者のシステムを組み合わせる「戦略的システムデザイン」を提案する。戦略的システムデザインの例として、データセンター事業者の低温排熱をハウス栽培で再利用する複合システムがエネルギーの有効利用に効果的であることを示し、かつ経済的にも有益であることを述べる。

2 データセンター単独での効率化の限界

一般的な、データセンターのエネルギーフローおよびエネルギー消費構成を図1および表1に示す。モデルとして、

1 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 / 株式会社三菱総合研究所 〒100-8141 千代田区大手町 2-3-6、2 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科 〒223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1

1. Graduate School of System Design and Management, Keio University / Mitsubishi Research institute, Inc. 2-3-6 Otemachi, Chiyoda-ku 100-8141, Japan * E-mail: mr-fukuda@mri.co.jp, 2. Graduate School of System Design and Management, Keio University 4-1-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8256, Japan

最大収容数 1,000 ラック（実稼働率 85 %）、1 ラックあたりの最大供給電力 6 kW（平均 4.2 kW/rack）のデータセンターを想定する。データセンター全体の消費電力のシミュレーションを行い、公表された電気事業者の排出係数^{注2}をかけると CO₂ の排出量は表 2 のようになる。

データセンターにおける空調機器の電力消費を考慮し、エネルギー効率向上に資する有効な手段の一つとして、寒冷地にデータセンターを建設して、空調効率を向上させることが挙げられる。例えば、データセンターが集中している東京と札幌とを比較すると、年間 5 ~ 10 °C 程度の気温差があり^{注3}、札幌などの寒冷地にデータセンターを設けることにより、空調機器の消費電力を約 8 % 削減することが可能と予想できる（表 2）。逆に温暖な那覇では、8 % 程度、空調機器の消費電力が増加する。しかし、データセンター全体の消費電力から見ると空調機器の消費電力は 3 割程度であるため、東京と札幌を比べても、およそ 2 % 前後の削減効果しか期待できない（表 2）。

さらに空調効率向上の方策として、ラックをパネルで囲ってサーバーの排出熱と空調機器の冷気を混合させない「キャッピング」という空調方式がある（図 2）^{注4}。これにより、空調機器の消費電力を約 20 % 削減することができるが、データセンター全体の消費電力から見ると、約 5 % 程度の削減効果に留まるとみられる（表 2）。

このように、データセンター単独でのエネルギー消費の効率化には限界があり、大幅な CO₂ 削減を図るには、より画期的な技術革新か、新たなデザインアプローチによる効率化が必要である。

3 戦略的システムデザインの提案

3.1 物理システムと価値システム

そこで、単独のシステムによる最適化の概念の枠を越えて、「戦略的システムデザイン」の発想による新たなデザインアプローチを提案する。

戦略的システムデザインの概念について図 3 に示す。従来のシステムデザインでは、単一のシステムについて、主に物理的性能の観点から評価と最適化がなされてきた。しかし、システムにはその保有者であるステークホルダーがあ

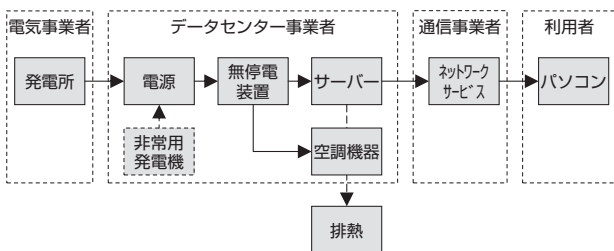


図1 データセンターのエネルギーフロー

表1 データセンターのエネルギー消費構成

サーバーの消費電力	58 %
空調機器の消費電力	27 %
電源設備、無停電電源	13 %
照明、その他	2 %

表2 データセンターの立地とCO₂の排出量

	東京	札幌	那覇	東京 7月 キャッピング	札幌 7月 キャッピング
空調機器消費電力 (MWh/年)	15,599 100.0 %	14,393 92.3 %	16,810 107.8 %	12,479 80.0 %	11,514 73.8 %
データセンター全体の消費電力(MWh/年)	57,817 100.0 %	56,611 97.9 %	59,029 102.1 %	54,697 94.6 %	53,733 92.9 %
PUE ^{※1}	1.72	1.69	1.76	1.63	1.60
電力コスト (百万円/年)	694 100.0 %	679 97.8 %	708 102.0 %	656 94.5 %	644 92.8 %
CO ₂ の排出係数 ^{※2} kg-CO ₂ /kWh	0.339	0.479	0.934	0.339	0.479
CO ₂ の排出量 (t/年)	19,600 100.0 %	27,117 138.4 %	55,133 281.3 %	18,542 94.6 %	25,738 131.3 %

※1 PUE：電力使用効率 PUE=データセンター全体の消費電力/サーバーの消費電力
 ※2 環境省資料による平成18年度数値（那覇は平成19年度数値）
 点線下段は東京を100%とした場合の比較

り、システムの評価はそのステークホルダーにとっての価値で決まる。価値はステークホルダーの心理的な価値観に依存し、貨幣尺度に必ずしも限定されないが、貨幣尺度を用いることで定量化と一般化が可能となる。

したがってシステムは、物理的空間に存在する物理システムと、ステークホルダーの心理的空間に存在する価値システムとの二つの空間に存在していると言える。

データセンターの場合、建物、電源、空調機器、ラックなどで構成される「物理システム」と、それらが生み出す売上という事業者にとっての「価値システム」からなる。

このとき、物理システムの最適化と、価値システムの最適化とは必ずしも一致しない。データセンターの場合、物理システムの最適化とは消費電力を最小にすることであるが、価値システムの最適化とはコストを最小にして利益を最大化することである。消費電力の最小化と、コストの最小化は同じ傾向にあるが、必ずしも一致しない場合がある。例えば、高効率な設備導入は消費電力を削減するが、それが高額だと設備費用の増加によりコストは増大する。価値が減少すると、たとえ高効率であっても事業者は設備

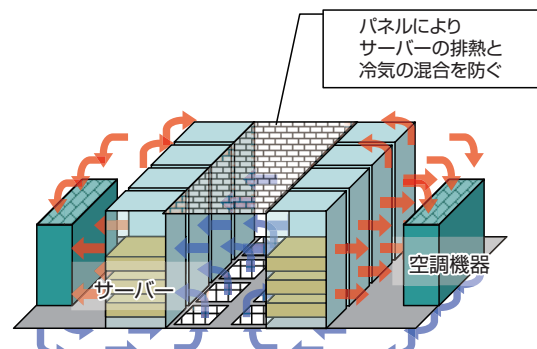


図2 キャッピングによる空調機器の効率化の一例

を導入することはない。

このように、物理的にいかに優れたシステムであっても、価値空間における優れたシステムでなければ実現は困難である。システムの実現のためには、価値を生み出すシステムすなわち価値システムについても設計しなければならない。

3.2 他のステークホルダーによるシステムとスーパーシステム

さらに、実際のシステムは、物理システムおよび価値システムの両面において、他のステークホルダーが所有するシステムと相互に影響を受けている（図4）。

また、より多数の物理的存在やステークホルダーで構成される「スーパーシステム」の中に組み込まれている。スーパーシステムとは、例えば、地球環境や、社会システムなど、システムの存在・機能・価値に影響を与えるより大きな物理システム・価値システムである。スーパーシステムは、個々のシステムに対しさまざまな影響を与え、要求を行う。システムは他のシステムおよびスーパーシステムに対して変化し、最適化が求められる。

データセンターの場合、地球環境の温暖化防止を目的とした社会システムの規制や世論・環境税の賦課により、排出するCO₂を最小にすることが求められている。

こうした要求に対し、従来のシステムデザインでは、システムを所有する単一のステークホルダーの範囲内で最適化してきた。単一のステークホルダーの価値が最大になるようシステムを設計し、他のステークホルダーの価値や、資源の配分は考慮されていない場合が多かった。

例えば、データセンターの場合、サーバーを冷却する空調機器の効率化など、データセンター内だけの機器の効率化によってCO₂の排出を削減しようとしていた。

しかし、データセンター単独の設備改善だけではCO₂の排出をこれ以上大幅に削減することは物理的に難しい。さらに、価値空間においても、多額の設備投資が利益を圧迫し、環境税などが課せられる中で、単一の事業者が価値

（収益）を高めていくのは困難である。

環境問題など、スーパーシステムが要求する、より大きな課題に対しては、単一のステークホルダーの範囲内でシステムの最適化をはかることには限界がある。

3.3 戦略的システムデザインによる最適化設計

一方で、こうしたスーパーシステムからの要求課題は、他のステークホルダーにも要求されている。そこで、個々のステークホルダーの枠を越え、そのシステムを組み合わせることでスーパーシステムからの要求の最適化をはかり、かつ双方のステークホルダーの価値をも高めようとするのが「戦略的システムデザイン」による最適化設計である。

各ステークホルダーの物理システムは共通の物理空間に存在している。このため、共通の物理法則により等しく影響を受け、物質的交換等によりそれらを取りまとめて一つのシステムとして、最適化をはかることができる。それが、「総合物理システムデザイン」(Total Physical System Design)である（図3）。データセンターを例に挙げると、データセンターの排熱を再利用して、農業ハウスにおける暖房に利用することが考えられる。

しかし、物理システムの最適化の結果は、各システムのステークホルダーにとって、必ずしも最適な価値とは限らない。例えば、データセンターの排熱利用は、農業にとってはコスト削減となるが、データセンター事業者にとっては追加設備のコスト増になる。排熱再利用システムの実現のためには、データセンター事業者と農家という異なるステークホルダー間において、価値が向上するような価値システムの設計を行う必要がある。それが、「総合価値システムデザイン」(Total Value System Design)である（図3）。

例えば、栽培農家が利用したデータセンターの排熱の費用（調整金）をデータセンター事業者を支払う契約システムなど、価値を調整する仕組みが必要になる。

「戦略的システムデザイン」とは、「異なるステークホルダーのシステム間」において、「総合物理システム」と「総合価

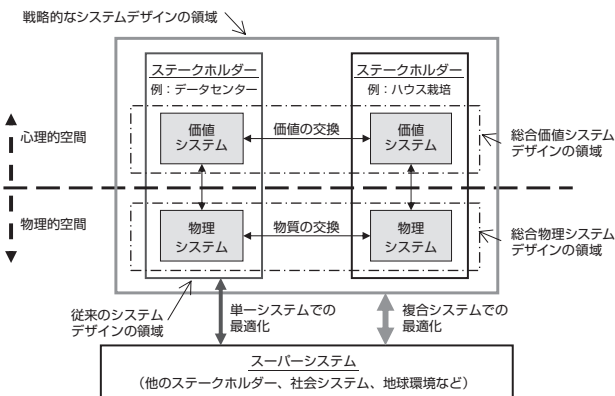


図3 戦略的システムデザインの概念

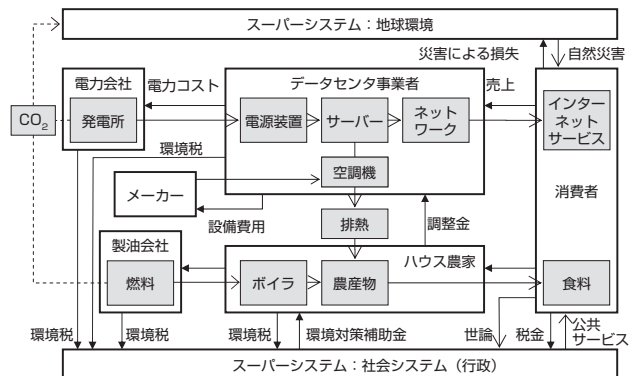


図4 データセンターを取り巻く他のステークホルダーのシステムとスーパーシステム

値システム] についてデザインを行い最適化することと定義できる。

4 戦略的システムデザインによる複合データセンターの提案

4.1 戦略的システムデザインによる複合データセンターの総合物理システムデザイン

戦略的システムデザインのコンセプトに基づき、CO₂の排出削減という社会要求に対する最適化をはかるため、データセンターと農業を組み合わせた複合データセンターについてデザインし、その効果を定量的に検討する。

まず、物理面からみたデータセンターを考察する。図1のデータセンターのエネルギーフローを見ると、そのほとんどは熱としてデータセンターの外に排出されている。ちなみに、最終的にCPUが計算のために消費している電力は、全体のエネルギーの1%未満にすぎない。

そこで、このデータセンターの排熱を再利用する事業/システムを組み合わせることで、より効率的なシステムを提案できる(図5)。排熱を再利用する事業としては、オフィス、住居、病院などの冷暖房や温給水、浴場や温水プール、工場などでの温水利用、農業におけるハウス栽培の暖房などが想定される。このうち、ハウス栽培の暖房は、要求される温度が比較的低温、また熱需要の時間変化も比較的安定しており、低温の熱源であるデータセンターの排熱が温風として直接利用しやすいなど、データセンターの排熱の活用先として有望な分野と考えられる。一方、農業事業者にとっても、冬期のハウス栽培におけるコストの多くを暖房のための燃料費が占めており、大きなメリットが得られると考えられる(図6)。

そこで、電力事業者としてCO₂排出係数が最も小さい東京電力の供給域で、比較的寒冷である宇都宮地域においてデータセンターの排熱を利用したハウス暖房を想定し、燃料費の削減効果とCO₂の排出削減効果について概算を行った。

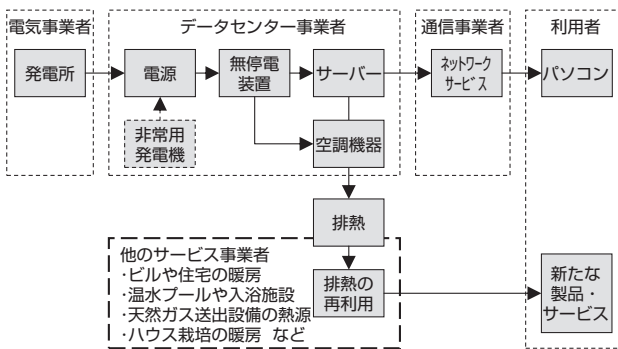


図5 複合データセンターのエネルギーフロー

表3 複合データセンターによるCO₂の削減量

データセンター全体の排熱量(宇都宮)	MJ/日	566,308
ハウス面積	m ²	88,100
暖房用燃料削減量(灯油)	kL/年	1,709
暖房用燃料費削減金額	千円	189,734
暖房用燃料削減によるCO ₂ 削減量	t-CO ₂	4,256
データセンターのCO ₂ 排出量	t-CO ₂	19,464
データセンターからみたCO ₂ 削減率	%	-21.9%
データセンター+ハウスのCO ₂ 削減率	%	-17.9%

モデルとして同じく、最大収容数1000ラック(実稼働率85%)、1ラックあたりの最大供給電力6kW(平均4.2kW/rack)のデータセンターを想定した。データセンターからの空調機排熱をハウス内の暖房に使用すると想定し、10月1日~5月31日までの冬期に15℃以上に暖房するのに必要な熱量を計算した。試算の結果、データセンターの1日あたりの発熱量は566,300MJ/日に達し、灯油12.6kL/日の燃焼に相当する。これは、暖房効率による減少を考慮しても、厳冬期に88,100m²のハウスを暖房することができる熱量である(表3)^{注5}。

これにより、ハウス暖房に必要な燃料費を年間約1億9千万円削減することができ、年間4,256tのCO₂の削減効果がある。これは、データセンターが排出するCO₂の21.9%に相当し、データセンターおよびハウス栽培両方を合わせた全体で17.9%のCO₂削減効果がある(表3)。このように、データセンターとハウスの複合化で、CO₂の排出は大幅に削減できると期待できる。

4.2 戦略的システムデザインによる複合データセンターの総合価値システムデザイン

データセンター事業者と農家という二つのステークホルダーにおいて、双方の価値(利害)が受け入れられるシステムでなければ、物理的なシステムを実現して、効率化を実現することができない。そこで、データセンターとハウスが複合したシステムの価値設計について検討を試みる。

4.2.1 データセンターが単独で環境対策に投資する場合の条件

データセンター事業者の利益をP₀、サービスの売上をS、エネルギーコストをECとする。これに対し、エネルギー消

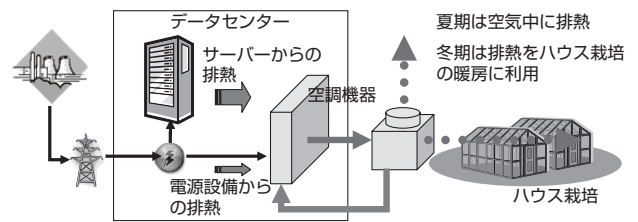


図6 農業でのデータセンター排熱の利用イメージ

費によるCO₂排出量を抑制しようとする社会システムにより、環境税TCが導入されるとする。事業者は、利益減を最小にするため、効率的な空調機器の導入など環境対策投資ICを行い、エネルギーコストおよび環境税の削減をはかる。このとき環境対策投資ICを行う条件は、エネルギーコストの削減金額 ΔEC_2 と環境税の削減金額 ΔTC_2 の合計が投資ICを上回る以下の時である（図7）。

$$P_2 \geq P_1 \quad \Delta EC_2 + \Delta TC_2 \geq IC \quad (1)$$

さらに、コスト削減金額 $\Delta EC_2 + \Delta TC_2$ が環境対策投資ICおよび環境税TCの合計を上回る時、対策後の利益 P_2 は環境税課税前の利益 P_0 を上回り、事業者は、より積極的に環境対策投資を行うことになる（図7）。

$$P_2 \geq P_0 \quad \Delta EC_2 + \Delta TC_2 \geq TC + IC \quad (2)$$

しかし、実際には、技術的な限界から、データセンター事業者単独の範囲で、(1) および (2) の条件を満たすことはとても困難である。

4.2.2 複数事業者全体における二つの条件

つぎに、データセンター事業者Xが、その排出する熱エネルギーを回収して、これを再利用するハウス栽培事業者Yを想定した場合の価値設計を行う。

この場合、両事業者のコスト削減金額の合計 $\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y}$ が環境対策投資の合計 $IC_x + IC_y$ の投資を上回る場合、環境対策投資を行い設備の改善を行うことになる。

$$\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} \geq IC_x + IC_y \quad (3)$$

X、Yは異なる事業者であり、Xから排出された熱をYが再利用して大幅なコスト削減メリットを得ており、そのメリットをX、Yで再配分するための金額の補正ADを行う

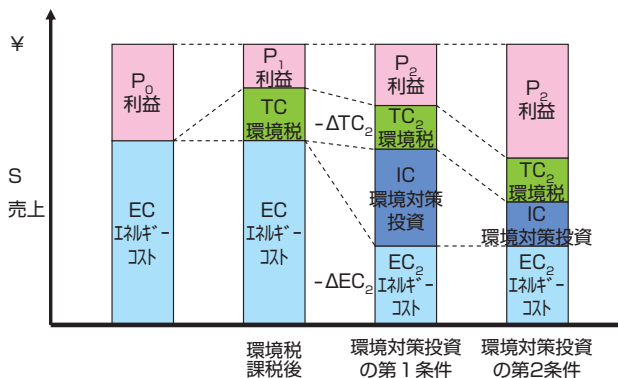


図7 単独データセンターでの収益イメージ

必要がある。ここでは、ハウス栽培農家がデータセンター事業者に対し、利用した排熱に対する費用として調整金ADをデータセンター事業者に支払うモデルを考える。

$$\begin{aligned} \Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + AD &\geq IC_x \\ \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} - AD &\geq IC_y \end{aligned} \quad (4)$$

(4) の条件が満たされる場合、X、Yそれぞれの事業者は、外部対策コストの付加による利益の減少を投資： IC_x 、 IC_y によって小さくすることができ、両事業者が手を組んで対策を講ずることが可能になる（図8）。

さらに、下記の(5)の条件の場合、両事業者のコスト削減金額の合計 $\Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y}$ は環境税および環境対策投資の合計 $TC_x + TC_y + IC_x + IC_y$ を上回り、両事業者は環境税の課税以前よりも利益を拡大することができる（図8）。

$$\begin{aligned} \Delta EC_{2x} + \Delta TC_{2x} + AD &\geq TC_x + IC_x \\ \Delta EC_{2y} + \Delta TC_{2y} - AD &\geq TC_y + IC_y \end{aligned} \quad (5)$$

データセンターの排熱エネルギーを利用したハウス栽培という複合システムを実現するためには、(4) もしくは (5) の条件を満たした設備コスト IC_x 、 IC_y の設備、および調整金ADを導入しなければならない。

4.2.3 環境税を導入した場合の複合データセンターの価値評価

排出量を抑制しようとする社会システムにより、実際に環境税が導入された場合を想定し、環境省が2005年10月に想定した環境税率2,400円/t-CO₂（電気0.25円/kWh、灯油0.82円/L）^{注6}をモデルに、単独のデータセンターと、データセンターの排熱をハウス栽培で再利用する複合データセンターの試算をした。東京における、1,000ラック、6kW/rackの単独のデータセンターを想定した場合、現状の年間消費電力量は57,817MWhであり、

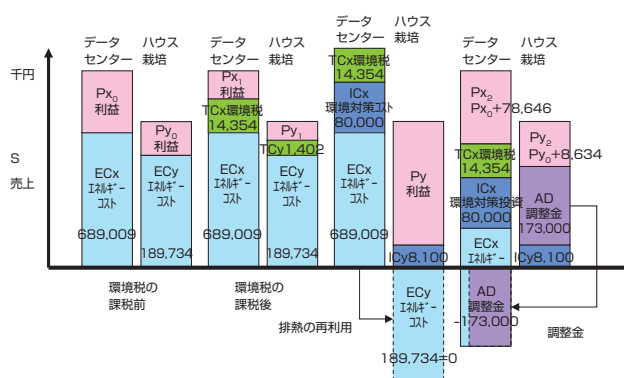


図8 複合データセンターでの収益イメージ

年間の電力コスト EC=693,807 千円のほか、年間の環境税 TC=14,454 千円が新たにコストとなる。

最も効果的な、キャッピングによる対策を行った場合、年間消費電力量は 54,697 MWh となり、年間 37,437 千円の電力コスト削減 (ΔEC_2)、環境税で年間 780 千円の削減 (ΔTC_2) が得られる (表 4)。しかし、CO₂ の削減のための設備投資金額 IC の許容上限は年間 38,217 千円未満でなければならない。1 ラックあたりの投資金額は 224 千円 (償却期間 5 年) 以下となり、キャッピングに必要な一般的費用と比較すると、かなり困難な数字である。仮に 1 ラックあたり 200 千円でキャッピングが実現したとしても、データセンター全体のコスト削減金額は年間 4,217 千円に過ぎない。また、課税以前よりも利益を拡大できる (2) の条件を達成することは、ほぼ不可能とみられる。

次に、複合データセンターとして、同じ 1,000 ラック、6 kW/rack のデータセンターを宇都宮に設け、その排熱を利用する 88,100 m² のハウスを想定する。

データセンターの年間消費電力量は 57,417 MWh となり、年間の電力コスト EC_x=689,006 千円、年間の環境税 TC_x=14,354 千円がデータセンター事業者の負担となる。一方、排熱の再利用で、ハウス暖房の年間燃料消費量 1,709 kL および、年間燃料コスト EC_y=241,390 千円が 0 となり、年間 4,256 t の CO₂ 排出と環境税 TC_y=1,402 千円が削減可能である。この削減効果に見合う年間の設備投資金額 IC_x+IC_y の上限は 191,135 千円 (1 ラックあたり 1,124 千円) 未満であり、データセンター単独の場合と比較してコスト的に約 5 倍の余裕がある。年間の設備投資を 88,100 千円 (1 ラックあたり 1,032 千円) と仮定すると、環境税課税前と比較して、データセンター事業者は年間 78,646 千円、ハウス栽培農家は年間 8,634 千円の利益増となる。このように、複合データセンターでは、環境面でも高い CO₂ 削減効果を得つつ、事業者にとっても収益効果の高いシステムを設計できることが分かった。

5 まとめ

戦略的システムデザインは、異なるステークホルダーのシステムを物理空間および心理空間 (価値) のそれぞれにおいて統合的にデザインすることである。

その例として、CO₂ の削減を目的としたデータセンターの設計を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 従来のデザインアプローチによるデータセンター単独の効率化設計では、物理的な CO₂ の排出削減効果は限定的であり、価値面でも環境改善のために投資可能な上限金額が小さく、設備投資が困難である。また、環境税の課税前と同等の利益確保はほぼ不可能である。

表 4 環境対策投資と収益改善効果

		iDC キャッピング	iDC+ ハウス栽培
データセンターの立地		東京	宇都宮
データセンターのエネルギーコスト	千円/年	656,370	689,009
データセンターの環境税	千円/年	13,674	14,354
ハウス栽培のエネルギーコスト (排熱利用前)	千円/年	-	189,734
ハウス栽培の環境税 (排熱利用前)	千円/年	-	1,402
設備投資によるエネルギーコスト削減	千円/年	37,437	189,734
設備投資による環境税の削減	千円/年	780	1,402
CO ₂ の削減量	t-CO ₂	1,058	4,256
CO ₂ の削減効果	%	-5.4 %	-17.9 %
許容可能な設備投資の上限額	千円/年	38,217	191,135
1 ラックあたり	千円/rack	224	1,124
利益増となる設備投資の上限額	千円/年	23,763	175,379
1 ラックあたり	千円/rack	140	1,032
モデルケースでの試算			
データセンターの設備投資金額	千円/年	34,000	80,000
ハウス栽培農家の設備投資金額	千円/年	-	8,100
環境税課税後のデータセンターコスト削減	千円/年	4,217	93,000
環境税課税後のハウス栽培コスト削減	千円/年	-	10,036
課税前との利益増減 (データセンター)	千円/年	-10,237	78,646
課税前との利益増減 (ハウス栽培)	千円/年	-	8,634
データセンターとハウス栽培との調整金額	千円	-	173,000

(2) 総合物理システムデザイン (Total Physical System Design) の考えを採用し、ハウス栽培においてデータセンターの排熱を利用する複合システムの場合には、全体の CO₂ 排出削減効果が 17.9 % となり、より大きな環境改善効果ができる可能性を示した。

(3) さらに、総合価値システムデザイン (Total Value System Design) による価値システムとして、ハウス栽培農家からデータセンター事業者に対し排熱利用の調整金を支払う契約システムを導入することで、環境税の課税後も十分な金額の設備投資を確保することができ、双方とも環境税の課税以前よりも利益を拡大し価値を高めることができる可能性を示した。

(4) データセンターを例に、単独のステークホルダーを対象とした従来の戦術的なシステムデザインに対し、複数のステークホルダーを対象とする戦略的システムデザインによって、物理的性能および費用対効果においてより効率的なシステムをデザインできる可能性を示した。

こうした、物理システムと価値の全体バランスを取りつつ、双方のステークホルダーを満足させて全体の最適化をはかるといった戦略的システムデザインの基本的な考え方は、データセンターと農業の関係に限らず、工場や発電所の排熱を再利用する地域冷暖房の検討にも適用できる。また、例えば各家庭に駐車した電気自動車の電池を、社会全体の電力網の蓄電池として利用するスマートグリッドのような、今後の社会におけるさまざまな異なる目的を有するステークホルダー間での新しい複合システムの実現の検討に適用できるものと考えられる。

今後は、データセンターと農業という二つのステークホル

ダーのシステムだけでなく、さらに太陽光発電を加えた三つ以上のステークホルダーによる複合システムなど、より複雑なシステムでの戦略的システムデザインによる最適化について検討していきたい。

謝辞

この研究は、慶應義塾大学グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」の一環として実施された。排熱の利用に関してディスカッションを頂戴した慶應義塾大学大学院佐藤春樹教授に謝意を表す。

脚注

- 注1) 国内総発電量の25%：IT機器によるエネルギー消費量の見直し、IT政策ロードマップ、31P、2008.6.11（高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）
 注2) 電気事業者の排出係数：平成18年度の電気事業者別排出係数の公表について、2008.9.27（環境省）
 注3) 東京と札幌比較の気温差：気象統計情報、2008（気象庁）
 注4) キャッピング：ラック空調システム、特許公開、2009-257730、2009.11.5（株式会社NTTファシリティーズ）
 注5) ハウスの暖房熱量：温室暖房燃料消費試算ツール（試用版Ver.0.90）、2008.2.25（独）農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 高収益施設野菜研究チーム）
 注6) 環境税率：環境税の具体案、2005.10.25（環境省）

執筆者略歴

福田 次郎（ふくだ じろう）

三菱総合研究所戦略コンサルティング室主任研究員。早稲田大学理工学研究科機械工学修士課程修了。慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科博士課程在籍。1989年、三菱総合研究所入所後、課税制度、技術開発計画、交通システム、医療情報システムなど、政府官公庁を対象とした社会システムのコンサルティングを行う。近年では、インターネットビジネスおよびインターネット・データセンターのコンサルティングを行い、日本データセンター協会の活動を支援している。本論文における、戦略的システムデザインの考え方を提唱し、シミュレーションによる試算を行った。



日比谷 孟俊（ひびや たけとし）

NEC基礎研究所首席研究員、東京工業大学客員教授、首都大学東京教授を経て、現在、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科教授。工学博士。エレクトロニクス材料の開発、結晶成長、高温融体の熱物性測定、ロケットや航空機を利用した無重力下での材料プロセス研究に従事。本論文では、データセンターとハウス栽培との複合化を、システムデザイン・マネジメント学の観点から考察を行った。



査読者との議論

議論1 システムの階層性

質問（内藤 耕：産業技術総合研究所サービス工学研究センター）

単一システム、スーパーシステム、社会システム、ステークホルダーといった用語が使われていますが、それぞれのシステムがどのように

関係しているのか説明をお願いします。

回答（福田 次郎）

システムが個人レベル、組織レベル、社会レベル、地球レベルといったさまざまな大きさを持ち、階層的な重層構造を持ち、相互に影響しあっています。本論文ではまず単一のシステムの外に、さまざまなステークホルダーの存在を指摘することを意図しています。ステークホルダーの規模や属性およびその構造が、システムに与える影響およびその環境下での最適解については、より深く追求すべきテーマとして、今後の研究としています。本論文では、最も単純な組み合わせである二つのステークホルダーおよび外部環境としての環境税賦課の環境下での最適化について述べることにします。

議論2 データセンターの事例

質問（矢部 彰：産業技術総合研究所）

戦略的システムデザインという概念を提唱し、物理システムと価値システムという観点で複数システムの組み合わせを議論している点は、大変独創的な観点であり、例えば、焼酎製造工程での焼酎絞りかすの肥料応用と廃棄物処理の両立など、バイオマス利用と廃棄物処理の組み合わせなどのこの概念に相当する多くの事例が思い浮かびますが、この概念をデータセンターの排熱の再利用に適用することは現実的でないと判断されます。なぜならば、低温排熱の有効利用は、発電所排熱の有効利用の問題として長年議論してきており、多くの物理システムと価値システムの組み合わせを想定した議論を行ってきましたが、未だに経済性の成り立つ応用例を提案する段階に至っていないからです。とても独創的な有用な概念を提唱されているので、できることならば、実現している応用例の分析という観点で、この考え方を提唱されるのがより説得力を持つと思われませんが、どのようにお考えでしょうか。

回答（福田 次郎）

近年のデータセンターでは、外気を直接取り込んでサーバーを冷却し、排気として熱を建物外に排出する外気冷房を、ヒートポンプによる冷却と併用する事例が出ております。こうした方法で、データセンターの排熱から温室栽培に必要な温度を確保することは可能と考えられます。既に、物理システムとして、国内のデータセンターで、排熱による温室の栽培成功の事例も出てきています（IDC フロンティア：プレスリリース IDC フロンティアのアジアン・フロンティア 実証実験で外気空調の効果を確認 空調消費電力削減効果は最大4割弱、廃熱の農業活用の有効性も確認、2010.3.29）。また、夏場の排熱についてはすべて未利用の前提で試算を行っていますが、冬場のエネルギーの再利用だけでも経済的に十分な価値があるという結果になりました。これは、今後導入が予想される環境税を考慮に入れたことも、排熱利用の価値を高める結果となった要因の一つと考えられます。

本論文では、物理システムと価値システムの二層の捉え方以外に、データセンター事業者と農家という異なるステークホルダーも含めた戦略的視点に立つことで、単一のステークホルダーでは最適化できないものが、物理的にも価値的（経済的）にも成立することを目的としており、そうした観点から、従来の単一の工場事業主内のエネルギーの再利用事例ではなく、データセンターを対象に取り上げました。

コメント（内藤 耕）

データセンターを事例に、システムの相互関係から最適化するモデルを提案していますが、今回の論文ではデータセンターの排熱利用が一つの事例であることを明確にし、この論文で提案している内容の汎用性を強調することが望ましいと思います。

回答（福田 次郎）

「戦略的システムデザイン」の基本的な見方は、ご指摘のような排熱の再利用だけでなく、スマートグリッドのように、異なる目的を有するステークホルダー間でのエネルギーマネジメント一般に適用できるモデルに拡大できると考え、そのように修正します。