

第 XX 部

Integrated Distributed Environment with Overlay Network

第 20 部

Integrated Distributed Environment with Overlay Network

第 1 章 はじめに

IDEON は、Integrated Distributed Environment with Overlay Network の略である。名前が示すとおり、オーバーレイネットワークによる自律分散環境の研究を行っている。

自律分散環境の研究には、我々が生活している世界の理解が必須である。地球環境やエネルギー、交通・運輸などといった、実体をともなった対象から、メディアコンテンツの取り扱いといった情報のみで成立する対象まで、様々な実体が存在する。

これらについて、IDEON では従来、「地産地消」を一つのキーワードとして、これを実現する 5 層のアーキテクチャを中心とした議論¹を行ってきた。図 1.1 にアーキテクチャの概要を示す。

ここで、IDEON が考えるアーキテクチャは、上位から「大規模な地産地消ネットワーク (Large-Scale LPLC Network)」「発見と選択 (Rendezvous)」「信頼 (Reputation)」「位置と経路 (Location and

Routing)」「識別 (Identity of Entities)」から構成される、情報と資源の地産地消システムである。IDEON-ワーキンググループでは、このアーキテクチャを中心に、音楽のような文化的財の交換、ストレージのような交換可能な資源のマッチング、i-WAT などによるインセンティブ設計、分散ハッシュテーブルによるスケラブルな位置や経路の発見などといった研究を行ってきた。

本年の議論では、IDEON が対象とする領域のうち、特に環境とエネルギーに着目する。まず、大きな粒度の議論として、地球環境の持続可能性 (サステナビリティ) を実現するために、エネルギー収支の現状を考える (2.1 節)。

一方、自然エネルギーの有効利用のためのスマートグリッド技術が注目を浴びている。スマートグリッド技術の中核は情報技術による広域最適化とされており、IDEON においても本技術に対する調査検討を行った (2.2 節)。

エネルギー収支の現状と、スマートグリッドにより可能になる自然エネルギーの導入水準を比較すると、現在の生活スタイルを変えずに今後の環境維持ないし改善を行うことは困難である。これに対し、環

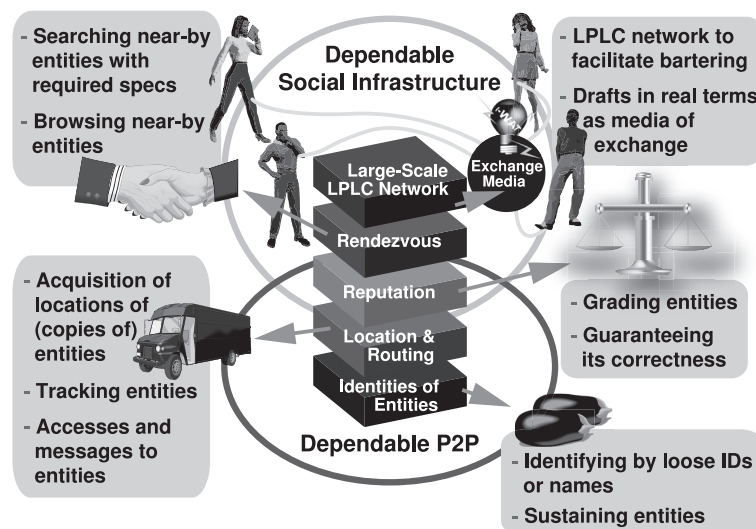


図 1.1. 地産地消を実現するアーキテクチャ (2006 年度報告書より再掲)

1 2006 年度 WIDE 報告書など

境サステナビリティの観点から情報科学が担うべき役割について、3章で述べる。地球規模の最適化を目指した試みを3.1節にて述べ、また、そのための第一歩として家庭規模の最適化の試みについて3.2節にて述べる。

第2章 地球環境が置かれている現状

2.1 地球規模のエネルギー試算

2.1.1 地球のエネルギー収支

図2.1は、地球のエネルギー収支[48]の中で人類の全活動を捉え、人類が地球上で活動し続けられる条件を描いたものである。この図は、また、現在の人間を取り巻く3つの重大な問題、すなわち、1) 資源・エネルギー問題、2) 経済問題、および3) 環境問題が、相互にどのように関係しているかを簡潔に表している。

地球の大気に入るエネルギーの総量は約174PW（ペタワット）で、そのほとんどが太陽からの放射である。他に地熱と潮汐力があるが、それぞれ23TW（テラワット）、3TWであり、無視できる範囲であ

る。また、化石燃料の燃焼で約13TWが消費されているというが、これは地球のエネルギー総量の約0.007%に当たる。

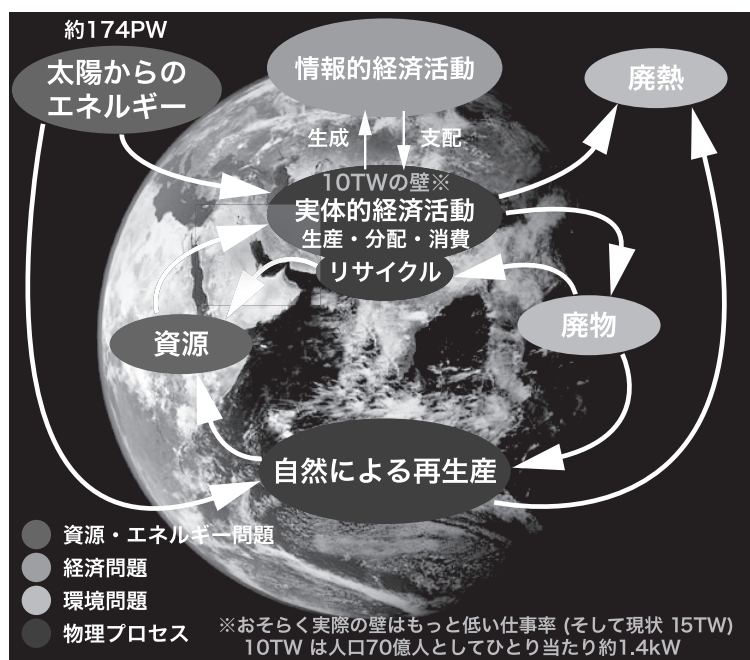
これらを含む約174PWのエネルギーは、最終的にはすべて地球外に放射されるが、約3割は即、反射され、7割が地表や大気に吸収された後、赤外線として放射される。

2.1.2 人類の活動条件

この、地球に留まる7割のエネルギーの一部を人類は利用する。その総量は、2004年の段階で平均約15TWと言われている[47]。うち、米国は2005年の段階で平均約3.34TWを消費しており、日本は、およそ700GW（ギガワット）程度を消費していると見積もられる。

21世紀初頭の現在、米国や日本をはじめとする、いわゆる先進諸国では、石油などの化石燃料を主なエネルギー源としている。化石燃料は、化石起源であることから、過去に地球に降り注いだ光を受けて植物が育ち、その植物を食べた動物の死骸が（石炭の場合は植物の死骸が）堆積して高い圧力のもとで生まれたエネルギー資源であり、いわば太陽エネルギーのストックと言える。

このストックは有限であり、また、地中にあるた



大問題：「情報的経済活動」を再設計して、持続可能な「実体的経済活動」を実現する術は？

図2.1. 地球のエネルギー収支と人類の活動条件

め採掘が必要である。そこから論理的に導かれるのは、化石燃料には、生産上のピークがあるということである。エネルギー源を掘り出すためにもエネルギーが必要であり、そのコストが増大することにより、当初は需要の高まりに応じて上昇を続けた生産量も、いつかの時点で、下降に転じる。石油の場合、この時点を「ピークオイル」と呼ぶが、2009年現在、大まかに考えて、どうやら我々人類は既にピークオイル期とも呼ぶべき時代を迎えていることが、さまざまな論証により明らかになりつつある。これが、現在の私たちが抱えるエネルギー問題である。

人間の経済活動は、巨視的に見れば、エネルギーを受け、それを別のかたちに変えることである。エネルギーを十分に得ることができなければ、生産・消費活動を拡大していくことができず、成長を前提とする貨幣システムに基づく私たちの経済は停滞せざるを得ない。これが、現在の私たちが抱える経済問題である。

人間の活動がエネルギーを別のかたちに変えるときには、必ずエントロピーが発生する。エントロピーは熱や（排水やCO₂排出を含む）ゴミとして現れるが、地球の物理環境には、赤外線放射により外部に熱を逃がし、また、太陽エネルギーと地熱を用いた物質循環により、物質を資源として再利用可能にする働きが備わっている。しかし、これらの働きは地質学的速度で進行するため、人間が加速的に生産・消費活動を進めると、人間の住環境に熱やゴミが溜まることになる。これが環境問題である。また、水などの、生存に必要な資源も、再生産が間に合わずに枯渇に向かうことになる。これが資源問題である。

これらの問題を解いていく上では、主に環境問題を解くための制約から、人類が地球上で活動を持続できるためのエネルギー消費の上限が定まる。それは約10TWと見積もられている[46]。これは、地球の人口を70億人として、ひとり当たり約1.4kWという値になる。ちなみに、前述のエネルギー消費量から計算すると、現状、アメリカ合衆国ではひとり当たり約10.6kW、日本ではひとり当たり約5.5kWを消費していることになる。

読者と共有したい重要な認識は、これらの問題の根本的な要因が、貨幣システムをはじめとする、人間の持つ情報システムにあるということである。

人間は、エネルギーの流れを変化させる（例えば、

電圧が高ければ1、電圧が低ければ0と決めて電圧を変化させる）ことで情報の流れを生み出す。そうして生まれる情報の流れは、人間の社会経済秩序を通して、人間の行動を決め、人間がエネルギーをどう使うかを逆に支配する。経済成長を前提とする貨幣システム、およびその維持のためのメディアが人々の欲望を組み上げ、過剰なエネルギー消費を呼び込み、かつ、環境問題を引き起こし、そして自ら破綻している。

そして、情報の基盤であるインターネットが、そのことにどう関与してきたか、我々は反省すべき地点に来ているのかも知れない。

2.2 スマートグリッド

自然エネルギーの有効活用の必要性が、エネルギー政策、あるいは配電網に対する技術的・経済的理由から高まっている。折しも米国では旧来の配電網および関係システムが老朽化し、大規模停電などの様々な問題が目につくようになっており、配電網の更新に向けて自然エネルギーの効率的な導入を行うための「スマートグリッド」と呼ばれる取り組みが行われることとなった。

米国においては2007年 the Energy Independence and Security Act(EISA)により、NIST(the National Institute of Standards and Technology) が米国におけるスマートグリッド機器およびシステムの相互運用性に関する調整を担うことが定められている。これを受けて、NIST は米国内の様々な調整活動の中心となっており、あるべき全体像やユースケースを記述する様々な文書を公開している。

中でも、“NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability” と呼ばれる文書（以下フレームワーク文書）は米国スマートグリッド構想の中核を紹介するものである。フレームワーク文書は、スマートグリッド構想の議論を行うための概念的参照モデルや、標準化を行うべき領域のユースケースなどが示されている。この文書により、米国のスマートグリッドにおいてどのような機能が期待されているかを知ることができる。

フレームワーク文書において紹介されている、スマートグリッドにおいて重視されている4つのユースケースは次の通りである。

広域状況認識：実時間に近い形での、広域の電力システムの監視機能

デマンドレスポンス：電力の信頼性が落ちているピーク時期に、電力消費を抑えることを促すインセンティブ設計

電力貯蔵：発電から消費に至るまでの各プロセスにおける同時同量制約を緩め、安定度を高めるための電力貯蔵技術とその運用

電気による輸送：主に、系統から電力を充電することによるプラグイン電気自動車（PEV）の、電力システムへの統合に関する問題

また、ユースケースに加えて、以下の4つの技術要素が重要であるとされている。

サイバーセキュリティ：エネルギー基盤であるスマートグリッドの秘匿性・完全性・可用性を保証するための技術

ネットワークコミュニケーション：複数の参加者やドメインが存在する状況下での、公共ネットワーク（すなわちインターネット）およびプライベートネットワークを利用した通信

先進的な検針基盤（AMI）：単純な検針に加えて、顧客による実時間での消費電力量の把握や負荷低減のための双方向通信機能を持つメータとその基盤システム

電力グリッド管理：電力網を構成する各要素（変電所や送電網など）を最大限に活用するための送配電網の情報ネットワークによる統合

以上の項目に加えて、既存の古い電力網やその構成機器からの円滑な移行も重要課題とされている。

このように、現在の米国のスマートグリッドの発想は、20世紀型の電力網をどのように情報化するか、である。一方、情報化の結果としての情報処理の方法、すなわち全米規模の電力システムを今後どのように運営していき、その運営に電力会社以外の存在がどのように関わっていくのか、についてはあまり深い議論がされていない。当然、NISTは政府機関であることから、スマートグリッドによって可能になる新しいビジネスやサービスのあり方については、民間の領域として敢えて言及していない部分があることも注意が必要である。

第3章 環境サステナビリティの観点から、情報科学が担うべき役割

3.1 情報科学としての定式化および地球規模OSによる解決

3.1.1 文明の来し方と行く末——デジタル・エネルギー化社会に向けて

図3.1は、我々の社会に起こった、そして起こりつつあるエネルギー革命の系譜と情報革命の系譜を並べて図示したものである。

最近のITないしICTの発展を受け、デジタル情報通信技術が、産業革命以来の社会的変化を生んでいるとする言説がよく聞かれる。しかし、産業革命（工業化）が、農耕社会から現在の産業社会への変化だったことを考えると、対応する更に遡った変化は、狩猟・採集・漁労社会から農耕社会への変化、すなわち農耕革命と考えられる。それらは、人間がどのように自然からエネルギーを引き出すかに関わる一連の変化だったと捉え直すことができる。

だとすれば、来るべき社会に向けた主たる変化は、情報通信よりもむしろ、エネルギーの取得方法に関わる変化ではないだろうか。

産業社会は、化石燃料を主たるエネルギー源とし、太陽エネルギーのストックを燃やして利用するタイプの文明だったと言える。それは必然的に短命であるし、実際に数世紀しかもたなかった。

そこからの変化としては、再び、農耕社会のように太陽からのエネルギーフローを文明の側に迂回させて利用する形態、すなわち、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを用いる形態が、現在の人類の技術レベルからは妥当であり、唯一の選択肢だと考える。原子力も、現状はその維持のために化石燃料に強く依存しているからである。

さて、農耕化や工業化などのエネルギー革命には、それに先んじて、対応する情報革命があったと考えることができる。すなわち、記号（絵画や文字）の発明と、活版印刷術の発明である。これらは、対応するエネルギー革命より以前の社会における人間の活動を効率化するべく現れた。例えば、活版印刷術の場合、それ以前の知識伝達手段である写本を効率化する目的でしか当初は使われていなかった。しか

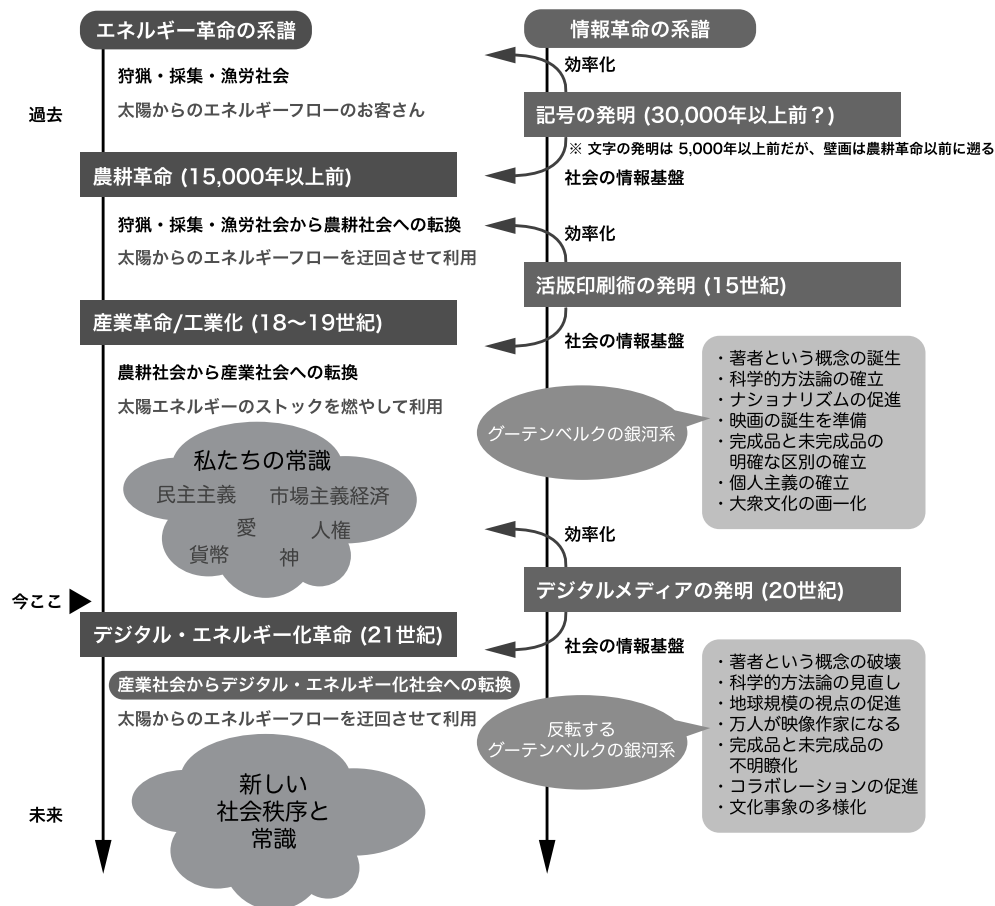


図 3.1. エネルギー革命と情報革命の系譜

し、ひとたびエネルギー革命が起きると、それがもたらす社会的変化を支えるための情報基盤として働き、活版印刷術の場合は、マクルーハンが「グーテンベルクの銀河系」で明らかにしたような、現代の私たちの社会の基礎をつくる社会的変化の潮流を生んだのである。

同様に、デジタル通信技術、デジタルメディアは、産業社会における人間の活動の効率化のために現れ、現在は主にその用途で用いられているように見える。しかし、図 3.1 の「反転するグーテンベルクの銀河系」で示したような、所有・独占よりも、共有・共用の精神に根ざしたかのような文化的変化は既に萌芽している。また、スマートグリッドや、energy scavenging/harvesting といった新しい研究開発テーマが示すように、電力の融通を細かな単位で制御したり、環境からエネルギーを取得し、共有・活用するためにデジタルコンピュータを利用する技術が既に注目を集めている。日常的な感覚としても、航空機や列車を使って出張に行くよりも、ビデオチャットにより遠隔会

議を行った方がエネルギーを節約できる、といった感覚が根付きつつある。

情報システム自体のエネルギー効率性の問題は解決されなければならないが、情報化によって、人々はあたかも利用可能なエネルギー源を手に入れたかのように振る舞うことが可能になってきている。

そうして出現する人間の新しい行動体系は、徐々に人間の考え方を変え、民主主義、市場主義経済、愛、人権、貨幣、神といった、産業社会における私たちの常識を、おそらく百年ほどをかけて組み直すことになるだろう。

それが、我々が「デジタル・エネルギー化社会」と呼んでいる社会形態である。

3.1.2 地球規模 OS とは

「地球規模オペレーティングシステム」は、「デジタル・エネルギー化社会」の実現のために基礎となる情報基盤である。

現在のオペレーティングシステム (OS) は、計算

機の持つリソースを抽象化し、その利用を調整することによりプログラムの動作を助けるが、同様に、地球の持つリソースを抽象化し、その利用を調整することにより、私たちの生活を助けるのが地球規模OSの役割である。

それは、従来のOSの設計を覆す、自律・分散・協調的で、自己組織化する、無数のインテリジェンスから成る操作環境であり、そこでは、CPU、メモリ、ディスクストレージ、ネットワーク帯域、キーボード、ディスプレイ、各種センサ/アクチュエータから、ソフトウェア、画像、音響、文書、ノウハウ、乗用車、その座席、燃料、電力、衣服、食料、水、その他の天然資源、そして人間およびその才能、能力、労力まで、ネットワーク上の抽象として扱えるありとあらゆるものがリソースとして捉えられ、必要なときに、必要な場所で、必要とするユーザに提供され、効率よく利用される、新しい情報環境が実現される。

このような情報環境は、私たちの生活をより豊かにするとともに、無駄なエネルギー消費を抑え、かつ災害や破壊的事象に強い、循環型で自律・分散・協調的な地産地消経済を形成し、私たちが21世紀の自然環境と調和的に生きる上での新しい基盤となると期待できる。

地球規模オペレーティングシステムは、それ自体が生物学、生態学、惑星物理学、熱力学、材料工学、歴史学、経済学、政策学などの複合領域である環境科学に加え、情報科学/計算機科学の中でも、ユビキタスシステム、分散システム、リアルタイムシステム、省電力設計、ネットワーク仮想化（オーバーレイネットワーク）、P2P、並行プログラミングとその言語、推論、ヒューマンインタフェースなど、人と社会と情報システムに関する知識を総動員して研究・開発していく必要がある。

3.2 自律分散的な環境サステナビリティを支える情報の事例：電力環境品質

本節では、環境サステナビリティに対するボトムアップアプローチのひとつとして、「電力環境品質」という考え方を導入する。電力環境品質とは、現在利用可能な電力がどの程度の環境負荷を与えるか、ということを示す指標である。指標としては、二酸化炭素排出係数（ $\text{t-CO}_2/\text{kWh}$ ）あるいは原油換算計数（ $1/\text{kWh}$ ）などが考えられる。ただし、従来利用さ

れている指標は、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの存在が考慮に入れられていない。制御できない自然エネルギーが、マイクログリッドのように小さい単位の電力システムに入ってくると、電力環境品質は短時間で変動する可能性がある。ここでは、このような短期間での電力環境品質の変動を電力を利用する機器群に伝え、これを利用し、さまざまな機器が個々に「良き市民」として自律的に振る舞うケースを検討する。

自然エネルギーの変動を考慮した電力環境品質のひとつの実現方法を以下に示す。ある時刻 t において、ある需要家が n 通りの電力源からの電力を受電していたとする。電力源 i （ i は 1 以上 n 以下の自然数）は、時刻 t における固有の電力環境品質指標 $Q_i(t)$ を持つものとする。需要家におけるエネルギーミックスの結果、受電点における電力環境品質指標を $Q_r(t)$ とすると、時刻 t における個々の電力源からの受電電力を $P_i(t)$ 、総受電電力を $P_r(t)$ として、以下のように求める。

$$Q_r(t) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i(t) \cdot P_i(t)}{P_r(t)}$$

現実的には、時刻 t における電力や電力環境品質指標を瞬時的に取得できるとは限らない。仮に瞬時値が取得できたとして、継続的な計算が可能であるとも限らない。一般的な環境では、積算電力量計による検針のネットワーク化が想定されるため、時刻 t_0 と時刻 $t_0 + \delta$ の間の積算電力量計の差分値により近似することになる。このとき、差分による電力環境品質指標を $Q_d(t_0, t_1)$ とし、 t_0 と t_1 の間の電力源 i の積算電力量計差分値を $Pd_i(t_0, t_1)$ 、需要家における受電電力量の積算電力量計差分値を $Pd_r(t_0, t_1)$ としたとき、以下のように求める。

$$Q_d(t_0, t_1) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i(t_0, t_1) \cdot Pd_i(t_0, t_1)}{Pd_r(t_0, t_1)}$$

近似的には、例えば 10 秒毎など、十分小さい時間間隔によって Q_d を計算し、ある時刻における Q を一つ前の時間間隔の Q_d で代表させることができる。

電力環境品質を利用するひとつの具体例として、間欠負荷である、空調を想定したモデルを検討する。ここでの架空の空調としては、その時刻での電力環境品質が家庭内ネットワークにより取得可能である、と仮定し、電力環境品質の高い（環境負荷の低い）場合に空調を強めにし、電力環境品質の低い（環境負

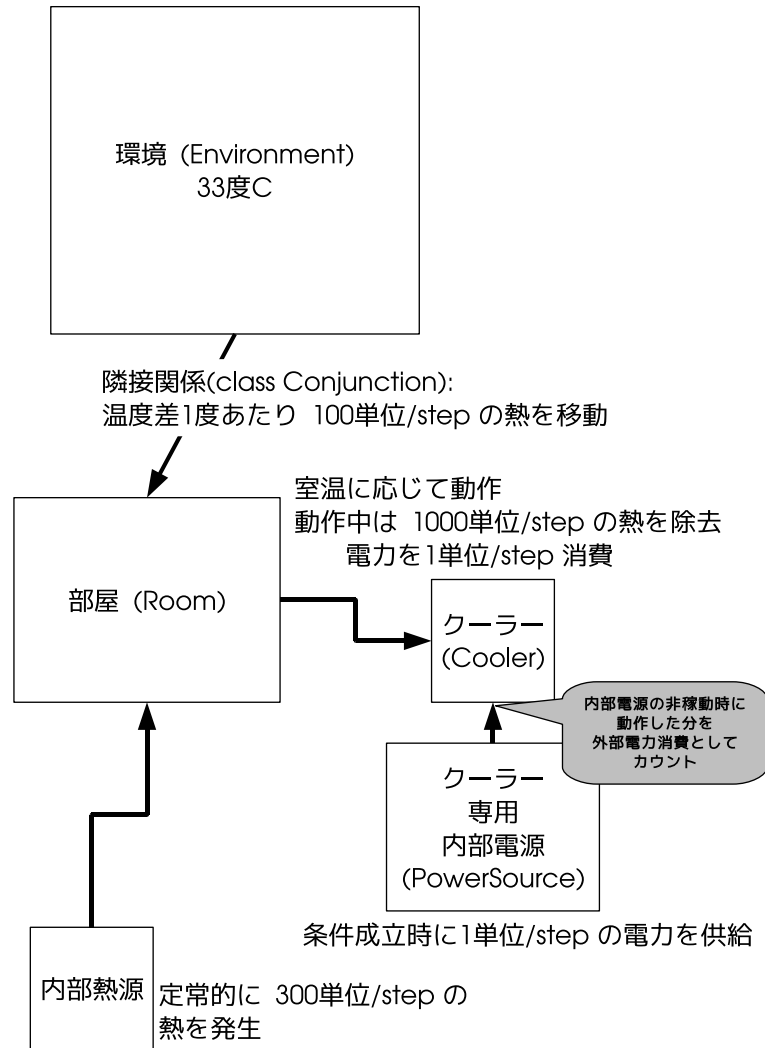


図 3.2. モデル構成

荷の高い) 場合に空調を弱めとする、という単純な制御を行うものを想定する。

図 3.2 は、電力環境品質指標連動型空調 (Smart A/C) の検討を行うシミュレータのモデル構成を示している。シミュレータは、対象となる「部屋」「クーラー」一定温度となる外部の熱源 (「環境」)、一定出力となる内部の熱源 (「内部熱源」) そして系全体への入力となる「太陽光」から成る。太陽光発電により電力環境品質が決定され、また、太陽光発電の余剰電力がクーラーに供給される。

検証においては、太陽光発電のように一見ランダムに見える電力源と、冷房の関係について検証した。電力源については単純に「余力あり」「余力なし」の2つの状態遷移により模擬し、図 3.3 に示すように、状態遷移において状態依存性がある、すなわち、晴

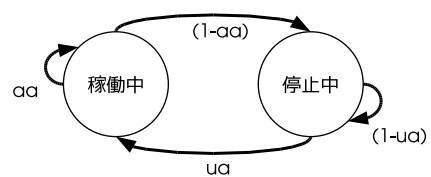


図 3.3. 模擬電力源 StickyPowerSource の状態遷移図

れ (発電量過剰) と曇り (発電量過少) がある程度の時間続く傾向がある場合について検証した。図中、aa は稼働中→稼働中の遷移確率であり、ua は停止中→稼働中の遷移確率である。本モデルでは、これを StickyPowerSource(aa, ua) と示す。

図 3.2 のモデルに基づく簡易なシミュレーションを行った。ここで、クーラーのアルゴリズムを二種

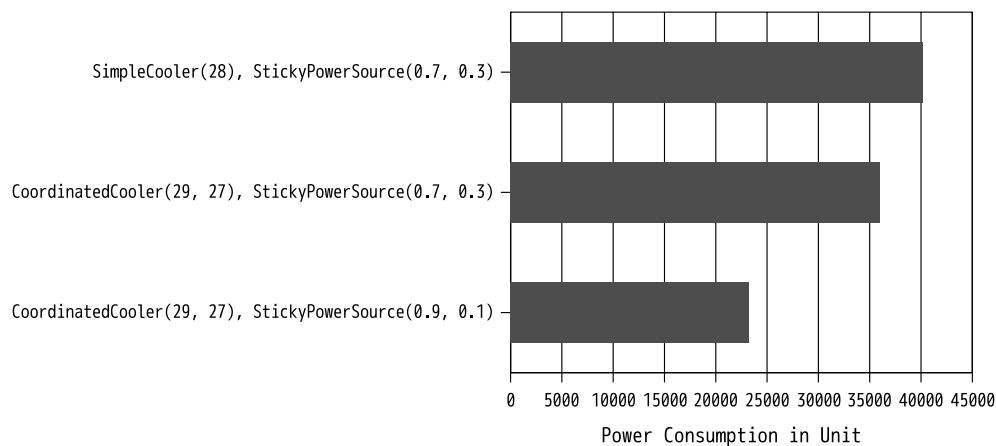


図 3.4. 電力消費量の比較

類用意した。ひとつは SimpleCooler() と呼ぶもので、設定温度を超えたら一定時間動作することで部屋の温度を設定値 t 以下にするものである。もうひとつは CoordinatedCooler(th , tl) と呼ぶもので、電力環境品質を見て、良い時は室温設定値を tl に、悪い時は室温設定値を th にするものである。いずれも、室温の初期値を 29°C 、環境温度を 33°C と設定し、シミュレーションを 100,000 ステップ実行した。

図 3.4 にその結果を示す。図 3.4 は、一番上は SimpleCooler を利用した場合の電力消費であり、下 2 つが CoordinatedCooler を利用した場合の電力消費である。また、CoordinatedCooler を利用した 2 つは、それぞれ電力源の状態遷移確率 (aa および ua) が異なっており、下の試行は 9 割の確率で直前のステップと同じ状態を維持するものである。

SimpleCooler に比べ、CoordinatedCooler は日照が利用できない期間の室温設定値が高くなるため、熱のロスが少なくなりエネルギーを節減できている、という見方もできる。しかし、電力の状態依存性が高いケース (StickyPowerSource(0.9, 0.1)) では、単純に 29 度に設定した SimpleCooler(29) (図示せず) と比べても、3 割ほど消費エネルギーが削減されている。太陽光発電にあわせた電力消費を実現したケースであると考えられる。

以上のように、本節で挙げた前提によれば、古典的方式と比べて同じ電力でより効率良く部屋を冷やしたり、あるいは外部から供給される電力消費量を低減させることが可能である。当然、実環境においてこの前提がそのまま適用できるとは限らないので、今後も検証を深めていく必要がある。

第 4 章 おわりに

以上、IDEON に関係する領域の問題を広く捉え、主にエネルギーに関係する領域についての調査報告を行った。情報科学による地球環境問題への取り組みについては、資源の最適配置・インセンティブ設計・ボトルネックの解消などといった、IDEON-ワーキンググループが本質的な問題として捉えている様々な技術要素が深く関係している。

今後は、報告者の一人がコペンハーゲンで開催された COP15 に参加したことを受けて、これらの問題意識をどのように現実の問題に帰着させて、IDEON-ワーキンググループで考えている「自律分散協調における現実世界の最適化」を実現していくか、を考える。