

ネット・ゼロ・エネルギー・ビルの持続的運用のための
性能評価指標および管理手法に関する研究

Study on performance evaluation index and management methods
for sustainable operation of net Zero Energy Building

田中 拓也

TANAKA Takuya

名古屋大学大学院環境学研究科 博士（工学）

2020 年

目次

1. 序章.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 ZEBに関する社会動向.....	1
1.1.2 ZEBの意義.....	4
1.1.3 ZEBの定義.....	4
1.1.4 ZEBの運用段階における課題と従来研究.....	7
1.2 本研究の目的と構成.....	10
1.2.1 本研究の目的.....	10
1.2.2 本研究の構成.....	12
2. 実証建物(ZEB)の運用段階におけるエネルギー性能評価.....	14
2.1 はじめに.....	14
2.2 実証建物の概要.....	14
2.2.1 実証建物の位置づけ.....	14
2.2.2 建築概要.....	15
2.2.3 設備概要.....	19
2.3 エネルギー性能評価.....	27
2.3.1 年間エネルギー収支による評価.....	30
2.3.2 月間エネルギー収支による評価.....	30
2.3.3 用途別エネルギー消費量の評価.....	31
2.3.4 ZEBとしてのエネルギー性能評価.....	32
2.3.5 ZEBのエネルギーフローの分析.....	33
2.4 運用段階におけるエネルギーマネジメントの課題.....	35
2.4.1 不具合診断・運用改善の成果報告.....	35
2.4.2 日常的なエネルギーマネジメントのための課題解決策.....	40
2.5 まとめ.....	41
3. ZEBのエネルギー自立性評価手法の提案.....	42
3.1 はじめに.....	42
3.2 エネルギー自立性評価指標「エネルギー自立率」の提案.....	43
3.3 エネルギー自立率による実績評価.....	45
3.3.1 検証概要.....	45

3.3.2 検証結果	45
3.4 エネルギー自立率の応用利用の検討	56
3.4.1 蓄電池を利用したエネルギー自立性の向上検討	56
3.5 まとめ.....	58
4. 日常的エネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築	59
4.1 はじめに.....	59
4.2 不具合診断に関する従来研究および機械学習による異常検知手法	62
4.2.1 従来研究	62
4.2.2 機械学習による異常検知手法の整理.....	62
4.3 不具合診断手法「パターン分析による不具合診断」の提案.....	64
4.3.1 不具合診断手法の選択	64
4.3.2 パターン分析による不具合診断の手法.....	64
4.3.2 分析プロセスの概要と想定される課題.....	69
4.4 実運用データ（照明エネルギーデータ）による検証	71
4.4.1 分析概要	71
4.4.2 学習データを用いたパターン分析結果.....	74
4.4.3 異常度評価による精度検証	76
4.5 実用化に向けた手法の改良	78
4.5.1 補助データの活用検討	78
4.5.2 学習データ作成時の異常データ除去の実用化手法の検討.....	84
4.6 実運用データ（空調エネルギー）に対する応用	91
4.6.1 分析概要	91
4.6.2 分析結果	93
4.7 エネルギー管理支援ツールとしての展開.....	104
4.8 まとめ.....	106
5. 総括.....	108
本論文に関する発表論文.....	113

1. 序章

1.1 研究の背景

1.1.1 ZEBに関する社会動向

日本において、ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル；以降、ZEB）という概念が議論されはじめて約10年が経過した。これまでのZEBに関する定義や評価、具体的な取組に関する議論はいまだなお収束することなく、その対象や範囲を広げながら、徐々に世の中に普及しはじめているのが現状である。本研究を論文としてまとめるにあたり、はじめに現在までのZEBに関する社会動向を時系列順に整理しておく。

日本においてZEBに関する議論が公になされはじめたのは、2008年の経済対策閣僚会議合同会議による「建築物のゼロ・エミッション化」に関する議題が発端のようである。それを受けて、2009年5月には経済産業省にて「ZEBの実現と展開に関する研究会（委員長：坂本雄三）」が発足し、ZEBという用語が認知されはじめ、国策としての建築物の低炭素化に向けた取組みが開始された。

上記研究会の報告書[1]の中でZEBのイメージとして図1.1-1が、そのためのプロセス例として図1.1-2が示された。また、定性的な定義として「建築物における一次エネルギー消費量を、建築物・設備の省エネ性能の向上、エネルギーの面的利用、オンサイトでの再生可能エネルギーの活用等により削減し、年間での一次エネルギー消費量が正味（ネット）でゼロ又は概ねゼロとなる建築物」とされた。

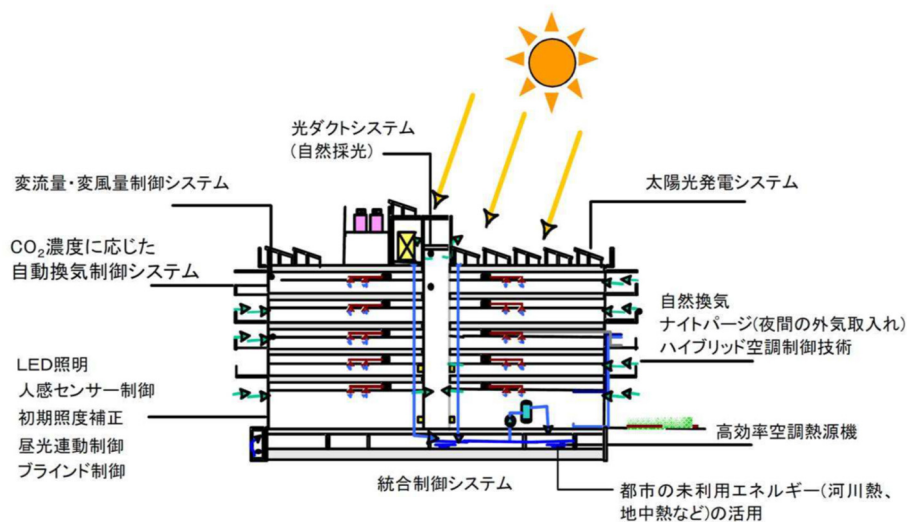


図 1.1-1 ZEB のイメージ [1]

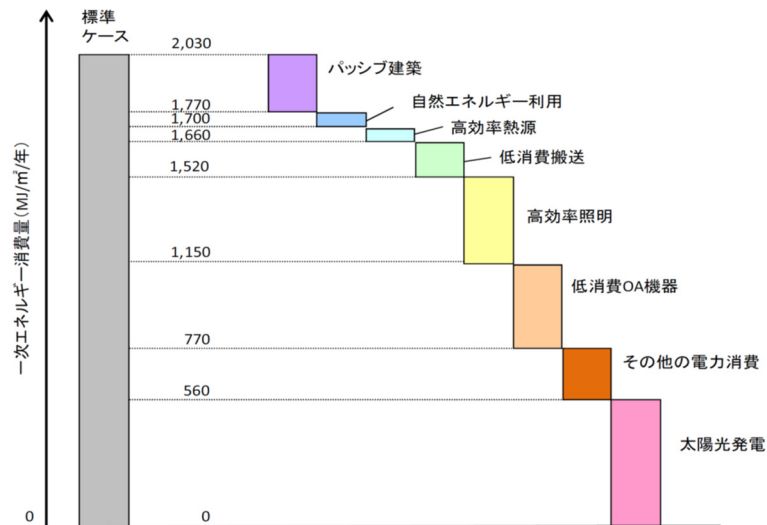


図 1.1-2 ZEB 実現に向けたプロセス例 [1]

続いて、2010年6月に閣議決定された「エネルギー基本計画 [2]」では、業務部門においてZEBの普及を推進することが明記され、「ビル等の建築物については、2020年までに新築公共建築物等でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）を実現し、2030年までに新築建築物の平均でZEBを実現することを目指す。」との目標が設定された。

この頃、定性的な定義、建物の具体的なイメージとそのために必要な技術・施策、そして、その実現目標期日が揃ったことで、ZEBに関する議論が関連業界において、具体的な形で活発化し始めたといえる。

また、その後、2011年に発生した東日本大震災は日本のエネルギー政策の転機でもあり、ZEBの推進においても少なからず影響を与えている。東日本大震災では、原子力発電所停止による電力供給力不安や計画停電、節電要請等が、日本のエネルギー供給インフラの仕組みそのものの課題を顕在化させ、化石燃料や原子力に依存した日本のエネルギー構造そのものの根本的な変革が求められることとなった。再生可能エネルギーの中でも、太陽光発電はその技術革新による発電効率の向上や製造コストの低減、買取制度などの推進施策と相まって、その価値が大幅に向上しており、ZEBにおいても導入しやすいエネルギー生成設備として、普及し始めている。

また、東日本大震災を契機に業務部門においては、エネルギーセキュリティやBCP（事業継続計画）の観点からZEBをエネルギー的に自立した建築物として評価する向きもある。また、エネルギーインフラのあり方に対する議論の中で、系統電源全体としてその需給バランスを最適化することを目的としたデマンドレスポンス（以降、DR）などのソフト的な仕組みも積極的に取り入れたインフラの再構築がなされようとしており、より積極的なエネルギー流通の仕組みが整備され始めている。

具体的には2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画 [3]」において上記背景を踏まえ、戦略に改善がなされ、ZEBに関する政策目標には変更はなかったものの、改めてZEBの必要性およびその推進に向けた取組を国が主導して行うことが認識された。

また、2015年6月に空気調和・衛生工学会 ZEB 定義検討小委員会より、「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法 [4]」と題して、学術的な見解が示されたこと、およびそれらを参照しながら、2015年12月に経済産業省より「ZEB ロードマップ委員会とりまとめ [5]」が発表され、その具体的な定義の規定もなされた。その後、ZEBの普及に向け、国の施策と連動する形で、段階的なZEBの普及に向け、設計計画値によってエネルギー性能を評価する仕組み(図 1.1-3)が推進されている。現時点では、推進段階であるため、完全なZEBでなくても、段階的な評価がなされる状況であり、設計計画段階における基準が合意された状況のみではあるが、今後はより一層の性能向上とその評価の仕組みや運用面の施策、機能が充実していくものと考えている。

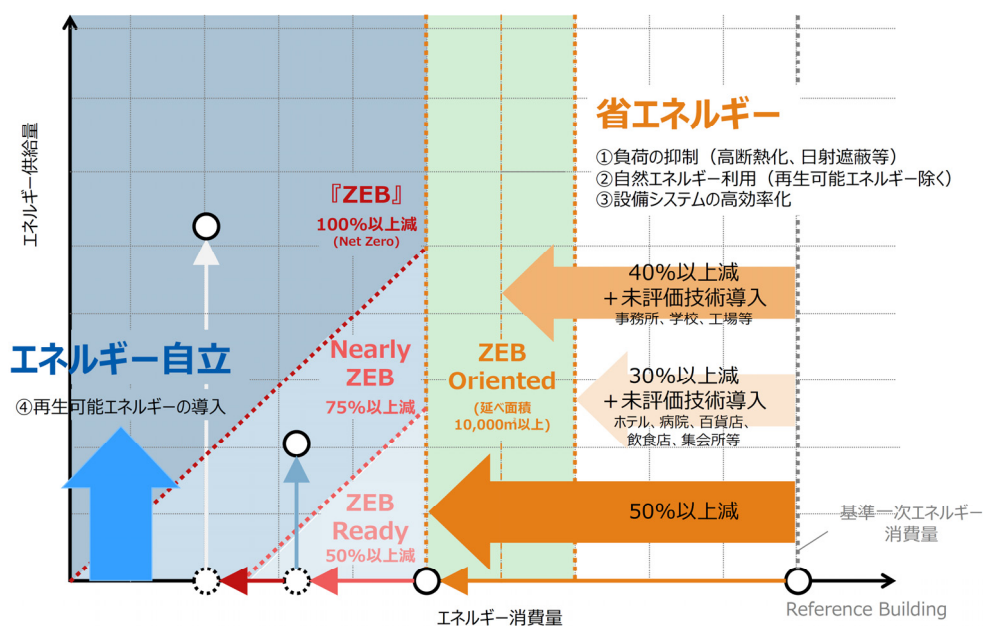


図 1.1-3 「平成 30 年度 ZEB ロードマップフォローアップ委員会とりまとめ」資料による ZEB の定義 [5]

なお、ZEBに関する動向としては、日本に先行する形で米国・欧州が先導的な取組を継続して行っている。米国では、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）が主導的な役割を担い、2006年にはZEBの定義に関する論文 [6]を発表している。欧州では、2006年のロシア・ウクライナガス紛争を転機としたエネルギー政策の中でZEBが位置

づけられ、欧州の空調・換気設備に関する学協会（REHVA）がその学術的先導をしている。これらの動向は当然先行事例として、日本の動向にも直接的・間接的に影響を与えており、ZEB に取組む背景は各国の事情で多少異なるものの、低炭素社会の実現に向けた取組みである点は共通である。

1.1.2 ZEB の意義

ZEB の意義を建物のエネルギー利用という観点から以下のように整理する。

- ① 自建物内のエネルギー消費量の削減による環境負荷の低減
- ② 自建物でのエネルギー生成量の増加による他建物の環境負荷の低減
- ③ 自建物のエネルギー自立性の向上によるエネルギーセキュリティの強化

また、ZEB 自体はそれ単体で仕組みとして成り立つものではなく、例えば、太陽光発電の逆潮流などエネルギーをより積極的に流通させる制度や各種個別分散電源や熱源、蓄電・蓄熱設備を備えるエネルギーセキュリティの仕組みや自然エネルギーを積極的に利用するライフスタイルやワークスタイルの醸成に至るまでを社会インフラとして同時並行で設計していくことが求められている。そのような全体の社会インフラの変革の中で、建築ストックを新築・改修により ZEB 化し、持続可能な体制にしていくことが、低炭素社会の実現に実効的に寄与すると考えている。

1.1.3 ZEB の定義

本研究で扱う ZEB は、2015 年 6 月に空気調和・衛生工学会より提言のなされた「ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の定義と評価方法 [4]」に則り、議論・評価を進めるものとする。以下に、その定義部分を引用して、記載しておく。なお、ZEB の定義には、先の「平成 30 年度 ZEB ロードマップフォローアップ委員会とりまとめ [5]」によるものもあり、実務としての設計業務の中ではこちらの定義・評価方法に基づき各プロジェクトが進められているのが現状であるが、学術的な議論を進める上では、より公平性が高く、論理的に矛盾のない空気調和・衛生工学会の定義に則り、評価を進めるものとする。また、日本に先行して ZEB の議論・施策が進められている米国および欧州においても、それぞれ NREL および REHVA によりその定義が定められており [7] [8] [9]、先の空気調和・衛生工学会より提言された定義にもその内容が参考にされている。

1) 定性的定義

室内及び室外の環境品質を低下させることなく、負荷抑制、自然エネルギー利用、設備システムの高効率化等により、大幅な省エネルギーを実現したうえで、再生可能

エネルギーを導入し、その結果、運用時におけるエネルギー（あるいはそれに係数を乗じた指標）の需要と供給の年間収支（消費と生成、又は外部との収支）が概ねゼロもしくはプラス（供給量＞需要量）となる建築物。

2) 定量的定義

設定した境界における需要と供給の収支により、(1) または (2) 式で定義する。
(1) は生成／消費の収支、(2) は配送／逆送の収支を表現している。(図 1.1-4)

$$G \doteq C \dots\dots\dots (1)$$

$$D \doteq E \dots\dots\dots (2)$$

供給量 G：生成エネルギー E：逆送（外部へ供給した）エネルギー

消費量 C：消費エネルギー D：配送（外部から供給された）エネルギー

3) 再生可能エネルギーの供給方法

原則として、敷地内（分類ⅠまたはⅡ）の再生可能エネルギーを対象とする。ただし、換算係数等を明示できれば、分類Ⅲ、分類Ⅳも含める。

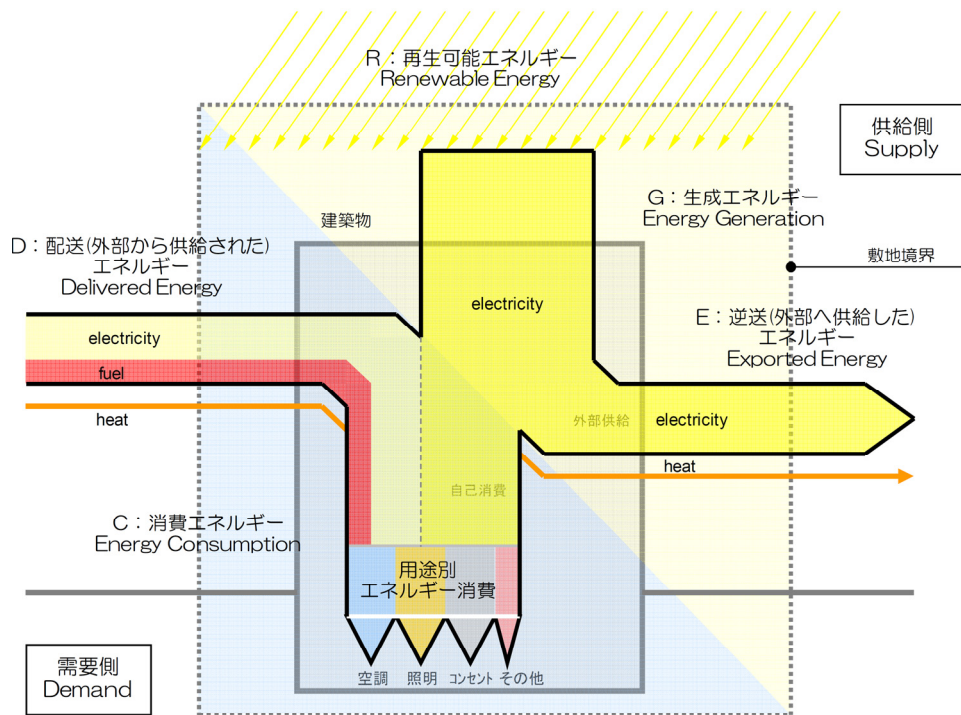
分類Ⅰ：建築物で生成される再生可能エネルギーを利用するもの。

分類Ⅱ：Ⅰに加え、敷地内で生成される再生可能エネルギーを利用するもの。

分類Ⅲ：Ⅰ、Ⅱに加え、敷地外で生成される再生可能エネルギーソースを電気や熱に変換して利用するもの。

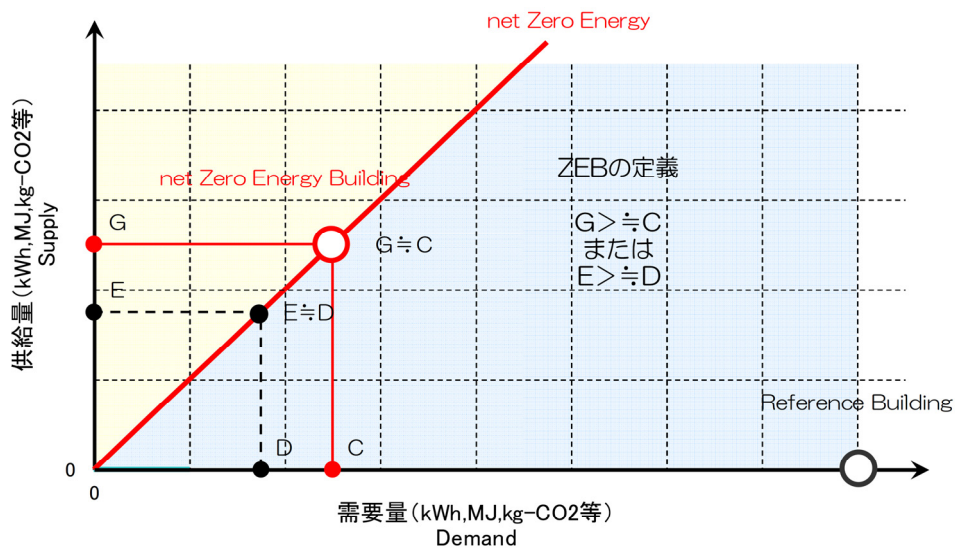
分類Ⅳ：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに加え、敷地外で生成される再生可能エネルギーをそのまま利用するもの。

なお、ここでいう再生可能エネルギーは、代替エネルギーとしての再生可能エネルギーであり、エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律（以下、エネルギー供給構造高度化法）による再生可能エネルギー源（太陽光、風力、水力、地熱、太陽熱、大気中の熱その他の自然界に存する熱、バイオマス等）を指す。



- ・敷地境界線を物理的な境界とする。
- ・G (生成エネルギー) / C (消費エネルギー) バランス、
D (配送(外部から供給された)エネルギー) / E (逆送(外部へ供給した)エネルギー) バランス
- ・原則として年間積算値で評価する。
- ・消費用途は、空調・照明・コンセント・その他(換気・衛生・EV等)とする。
- ・コンセントの消費電力については、設計者がコントロールできないこと等から、計量可能な場合、
対象消費用途から外してもよい。

図 1.1-4 ZEB の需要と供給のバランス [4]



- ・需要量と供給量は、原則として一次エネルギー消費量とする。
- ・係数を乗じれば、CO2排出量、エネルギーコストで考えることもできる。
- ・ZEBの物理的な定義 $G \geq C$ または $E \geq D$

図 1.1-5 ZEB の定義 [4]

1.1.4 ZEBの運用段階における課題と従来研究

現在までに、計画・設計段階のZEBに関しては、その定義・評価方法に関しても一定の基準が示され、また、法人に対するプランナーとしての認定制度や設計に関するガイドライン、オーナーに対しては啓蒙パンフレットや建設費の助成金等の普及施策が実施されている。一方、建設後の運用段階においては、継続的な建物管理や評価体制等その方策は未整備であり、各建物が各々の目的に沿った運用を個別に行っている状況と考えられるが、その実態も定かではない。しかし、ZEBがその目的である環境負荷を低減し、エネルギーセキュリティの強化に実効的に寄与するためには、運用段階においてこそ、その性能を適正に評価する必要がある、さらに、周辺建物や系統電源などとも積極的に連携することが重要である。現時点では、年間エネルギー収支が概ねゼロとなるZEBの事例がまだ少ない状況であるため、運用段階における課題は必ずしも顕在化していないが、筆者自身がZEBの日常的なエネルギーマネジメント業務を行っている経験も踏まえ、今後、ZEBを普及させていく上で、特に運用段階において重要な論点となると考える点を以下に挙げる。

【ZEBの運用段階における課題】

課題①：ZEBの運用実態とエネルギー性能の把握

- 1) 設計性能と運用性能の比較評価
- 2) 自然エネルギーや未利用エネルギー活用技術の効果試算と運用状況の把握
- 3) 空間の利用状況に応じた運用管理

課題②：エネルギーセキュリティや系統連系のためのエネルギー自立性の評価

- 1) 多様な再生可能エネルギーの活用につながる評価指標
- 2) 建物外へのエネルギーの供給（逆送）計画に役立つ運用手法

課題③：エネルギーマネジメント業務の高度化・効率化

- 1) 中小規模事務所建物のクラウドBEMS化によるデータ分析業務の集約
- 2) 管理技術者へのエネルギー管理・診断支援ツールの開発

上記課題は、必ずしもZEBに限った課題ではないものの、従来の建築物（ZEB ready等省エネルギー性能の高さによりZEBに類する建物と分類されるものを含む）と異なり、建物外へのエネルギーの配送（逆送）が前提となり建物単体でエネルギーの需給が完結しない点や、目標値が従来の省エネルギー建築物のように何割削減といった相対的な値ではなく、年間エネルギー収支ゼロという絶対値である点などにより、上記課題の重要性が増している。これら課題を解決することが、ZEBの持続的運用のためには不可欠である。

上記課題のうち、課題① 1)に関しては、ZEBの事例として文献 [10]により、実建物における設計計画値および運用実績値に関する比較評価がなされており、いずれも

概ね計画通りの実績が報告されている。一方、ZEBの事例件数で先行する米国カリフォルニア州において、設計計画値と運用実績値の乖離が問題となり始めているとの報告 [11]がある。したがって、日本においても今後 ZEB が普及していく中で同様の課題が発生すると考えられるため、先行するプロジェクトにおいては継続的な実績報告が望まれ、また、今後運用が開始されるプロジェクトにおいては、情報公開の仕組みが重要である。

課題① 2)に関しては、設計段階において実運用条件に即したエネルギーシミュレーションが可能なプログラムの開発が最優先であり、この点は、公的なエネルギーシミュレーションプログラムである「建築物のエネルギー消費量計算プログラム（非住宅版）(WEBPRO) [12]」や「建築物総合エネルギーシミュレーションツール (BEST) [13]」においても改良が進められている。

課題① 3)に関しては、運用実態把握（もしくは想定）が不十分な状態では、いくら高精度なシミュレーションプログラムを用いたとしてもその計画値は運用実態とかけ離れたものになってしまう。従来の設備容量を定めるための設計原単位に相当するような ZEB の計画を行う上での実運用を反映した設計原単位のようなものが有用であると考えられる。

課題② 1)、2)に関しては、太陽光発電により系統電源系統の余剰電力が調整余力を超えるなど、電源の品質に関わる課題は既に顕在化しており、総量としてのエネルギー収支の側面だけでなく、エネルギー自立性の高い自律分散型電源や熱源を備えた ZEB が望まれる。また、エネルギーの多様性や地産地消エネルギーに関する議論や検討を行う上でも、ZEB のエネルギー自立性を定量的に評価する指標が必要である。

課題③に関しては、1)に対しては、昨今、IoT や高度通信、AI 技術などを活用し複数の建物を遠隔で群管理するクラウド BEMS (Building Energy Management System : 以降、クラウド BMES) や CEMS (Community Energy Management System : 以降、CEMS) の開発が進められている (図 1.1-6)。ZEB から収集される建物のライフログとも呼べる膨大な運用データ (以降、建物ライフログ) は増加の一途をたどっており、またその制御も高度化している。一方、エネルギーマネジメントを行う技術者は人材が不足しており、建物ライフログから必要な情報を整理し、効率的にエネルギー管理・診断を行うためツールが不可欠である。

本研究においては、課題①に対しては、1つの ZEB の事例を分析・評価を行うことでその実態把握の一例とすること、課題②に対しては、ZEB のエネルギー自立性に関する評価指標を提案することで、課題③に対しては、機械学習を用いたエネルギー管理手法の提案を行うことで、各課題の解決に貢献する研究に取り組む。

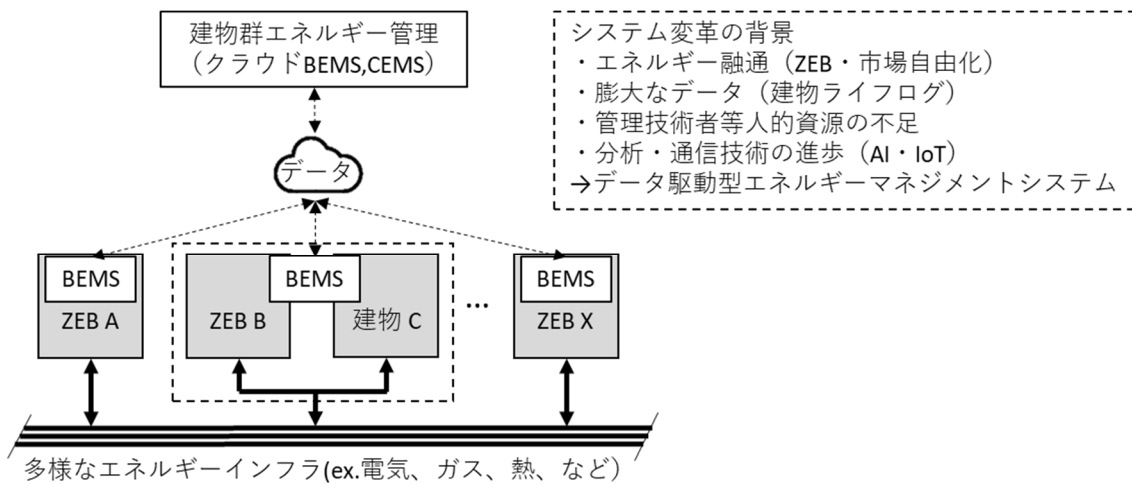


図 1.1-6 建物群のエネルギーマネジメントシステムのイメージ

1.2 本研究の目的と構成

1.2.1 本研究の目的

ZEB を普及し、持続的運用により価値を高めていくためには、建物のライフサイクル（計画・設計・施工・運用）の中で、特に運用段階における多くの課題があり、その課題解決のために本研究を行う。

前節にて、ZEB の運用段階における課題を以下の 3 つに整理した。

【ZEB の運用段階における課題】

課題①：ZEB の運用実態とエネルギー性能の把握

課題②：エネルギーセキュリティや系統連系のためのエネルギー自立性の評価

課題③：エネルギーマネジメント業務の高度化・効率化

上記課題解決のため、実建物として運用段階の ZEB を研究題材とし、その運用実態とエネルギー性能の分析を行うとともに、新たな評価・管理手法を考案する。各課題への対応は以下の通りである。

課題①に対しては、実建物として運用段階の ZEB のエネルギー性能を詳細に分析することで、今後普及していく ZEB の先行事例として、有益な情報を整理する。また、年間エネルギー収支 0 運用下でのエネルギー特性を整理し、今後の技術開発や制度設計に役立てる。

課題②に対しては、エネルギー自立性を評価するための新たな性能評価指標を提案し、その有用性を検証する。

課題③に対しては、日常的なエネルギーマネジメントを行う上で有用な不具合診断手法を目指す。クラウド BEMS 等の遠隔管理システムを利用したデータ駆動型エネルギーマネジメントの機能としての実装を目指し、機械学習を用いた汎用性の高い不具合診断手法を構築する。

以上により、ZEB の持続的運用のための仕組みづくりに貢献することが本研究の目的である。

なお、エネルギーマネジメントの役割は多様であるため、ZEB における日常的なエネルギーマネジメントの役割と其中で本研究で対象とする範囲（効果を期待する範囲）を整理して表 1.2-1 に示す。日常的なエネルギーマネジメントは設備機器の運転管理とエネルギー管理に大別できる。設備機器の運転管理は、設備機器の監視・計画・調整・分析などの項目から構成される。ZEB に限らず、全ての建物で重要な役割である。一方、エネルギー管理は、その主対象がエネルギーであるため、BEMS 等を活用したデータ分析業務が中心となり、本研究の成果もエネルギー性能検証や施設運用

の不具合診断への適用を期待している。本研究の成果は、図 1.1-6（既出）に示すような ZEB を対象とした建物のエネルギーマネジメントの中で、BEMS の建物ライフログからエネルギーマネジメントに必要な情報を効率的に抽出・分析を行うデータ駆動型のエネルギーマネジメントシステムの機能として実装する予定である。

表 1.2-1 ZEB における日常的エネルギーマネジメントの役割と本研究の対象範囲

	項目	対象
設備機器 運転管理	監視	室内環境（温湿度、照度、空気質、他） 設備機器状態（発停、設定、他）
	計画・調整	運転スケジュール（発停、出力、DR 対応、他） 設備機器の調整（エネルギー性能の維持・向上）
	分析	設備機器性能検証（COP、制御、他） 設備機器不具合診断（故障、制御、他）
エネルギー 管理	監視	エネルギー状況（エネルギー収支、他） 建物利用状況（開閉、室利用、在室率、他）
	計画・調整	エネルギー需要予測（気象、イベント、他） DR 等エネルギー需給調整（発電、蓄電・蓄熱、他）
	分析 【本研究の 対象】	エネルギー性能検証（用途別、自立性、他） 施設運用不具合診断（不在室設備運用、不適切運用、他）

1.2.2 本研究の構成

図 1.2-1 に本研究の構成を示す。

第 1 章では、研究の背景として、これまでの ZEB に関する取組を振り返り、その意義および定義を整理した。今後、ZEB を普及していく中で、建築物のライフサイクル（計画・設計・施工・運用）における運用段階の課題が多く残されており、以下に課題を整理した。

課題①：ZEB の運用実態とエネルギー性能の把握

課題②：エネルギーセキュリティや系統連系のためのエネルギー自立性の評価

課題③：エネルギーマネジメント業務の高度化・効率化

第 2 章は、課題①に対応する章であり、ZEB の運用実態の把握とエネルギー性能の把握を目的に、ZEB の事例研究として、ZEB 実証建物のエネルギー性能評価を行う。ZEB 実証建物の概要を紹介し、年間エネルギー収支 0 運用下における建物のエネルギー特性を分析する。また、運用段階における日常的なエネルギーマネジメントの成果として、実際に実施された不具合や運用改善の内容を分析する。その中から、運用段階におけるエネルギーマネジメントに対する課題を抽出する。

第 3 章は、課題②：エネルギーセキュリティや系統連系のためのエネルギー自立性の評価に対応する章であり、ZEB の新たな評価指標として「エネルギー自立率」を提案し、有用性を検証する。エネルギー自立率を用いることで、建物のエネルギー自立性の定量評価が可能となり、季節や日時ごとに異なる建物内のエネルギーフローの比較評価に有用であることを示す。さらに、エネルギー自立率の応用例として、蓄電池によるエネルギー自立性の向上検討を行い、エネルギーセキュリティや系統連系の検討を行う際に役立つ指標であることを示す。

第 4 章は、課題③：エネルギーマネジメント業務の高度化・効率化に対応する章であり、機械学習を用いたエネルギー管理手法の提案として「パターン分析による不具合診断手法」を構築する。今後、AI や IoT などの技術革新と人材不足を背景としてクラウド BEMS による建物管理が進む中で、自然エネルギー利用と高度な制御を組合せた複雑な ZEB のエネルギー管理に対して、有用な支援ツールの開発につなげる。具体的にはクラスタリングによるパターン分析を基本として、不具合診断手法を構築する。課題として、学習データ作成時の不具合データの除去方法、クラスタ数の決定、異常度閾値の設定、補助データの活用方法などがあるため、これらの課題に対する改良を加え、精度の向上を図った。最終的には、エネルギーマネジメントにおける初期不具合診断に用いる場合を想定し、実運用データとして空調消費エネルギーデータを対象に検証を行う。

第 5 章では、終章として本研究のまとめと今後の展開で総括する。

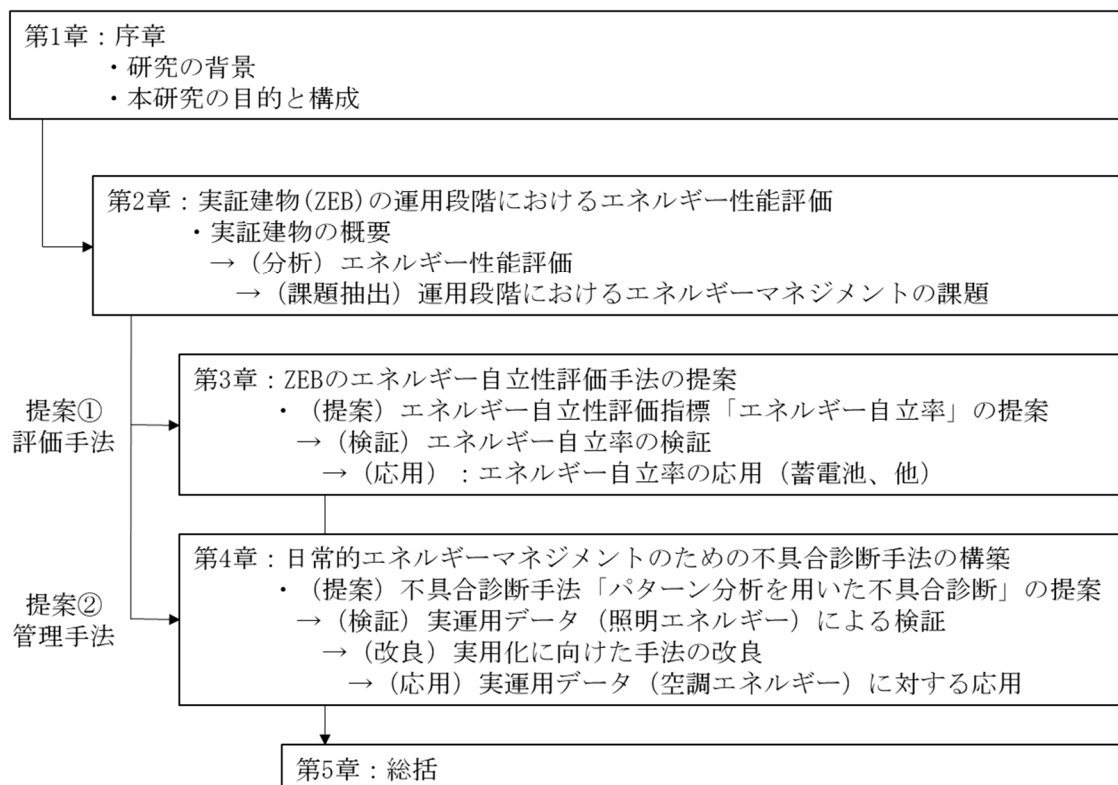


図 1.2-1 研究の構成

2. 実証建物 (ZEB) の運用段階におけるエネルギー性能評価

2.1 はじめに

本章では、本研究において ZEB の事例として研究対象とする実証建物の概要を説明し、そのエネルギー性能評価を行う。その評価結果および運用段階において実際に行われた運用改善の成果を考察しながら、今後の ZEB の持続的運用の実現に向けた課題を抽出する。

2.2 実証建物の概要

2.2.1 実証建物の位置づけ

日本におけるエネルギーの課題のひとつはエネルギー消費が都市に集中していることにある。首都圏、名古屋、関西、福岡の大都市において国土面積の約 5%の土地に人口の 49%と電力エネルギーの約 48%が消費されているのが実状である（図 2.2-1）。2030 年の目標である「新築建築物の平均で ZEB を実現」する為には、建物・人口・エネルギー密度の高い都市部における ZEB を実現しなければ達成することはできない。

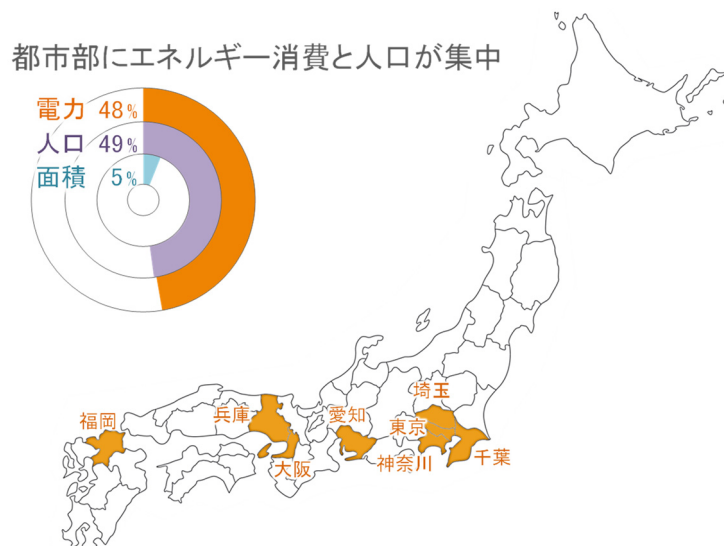


図 2.2-1 日本におけるエネルギー消費と人口比率

しかし都市部の建物は敷地面積が狭く、再生可能エネルギーとして最も現実的で有効な太陽光発電設備を建物周囲に設置する余裕がない。そこで、消費するエネルギーを極小化する技術（更なる省エネルギー）と生成するエネルギーを最大化する技術（効率的な創エネルギー）、更にそれらを効率的に組み合わせた建物を計画・運用する

ことが必要である。

上記の狙いに基づき計画された建物が本研究の題材とする実証建物である。したがって、その計画においては、消費エネルギーを削減するために高効率な設備機器に頼るだけでなく、自然エネルギーを最大限活用することを重点とし、また、限られた建物外表面において、最大限のエネルギー生成を行うため、外壁にも太陽電池を導入するなどの工夫をし、また、運用段階における年間エネルギー収支ゼロを実現することを最終目標として建設された。したがって、本研究において本実証建物は、最も適した研究対象であり、本研究の成果は今後 ZEB が普及していった際に生じる各課題に対して有用な解となると考えている。

本プロジェクトは、2011 年 12 月に企画立案し、2012 年 2 月より建物の設計を開始し、2013 年 8 月に施工開始、2014 年 5 月に竣工し、2014 年 6 月より運用を開始したものである。当時、国内に事例のなかった分類 I [4] の ZEB（建物単体でのオンサイト ZEB）を実建物の運用で達成した日本初の事例建物である。

実建物における ZEB の実現可能性の検証、課題抽出、新規開発技術の検証、市場に対してプロトタイプとしての問いかけなどの意義があり、また、次世代のオフィスビルの在り方を模索する意味でも、ZEB のパイロットプロジェクトとして計画・運用がなれられている建物である。

2.2.2 建築概要

実証建物は、某企業の研究所敷地内の事務所棟であり、周りを研究施設に囲まれた主方位南東向きの建物である。建物の稼働は、平日 8:00~20:00 を基本として、年間稼働日数は 245 日前後、定時執務時間(8:45~17:30)の在席率は 50~60%程度である。

建築的特徴として、逆梁構造によるフラットなスケルトン天井やバルコニーがあり、将来的な高層建築の ZEB 化を視野に各階の外壁で自然エネルギーを最大限活用することをコンセプトに多くの新規開発技術を採用している。

写真 2.2-1 に建物外観・内観を、表 2.2-1 には一般的な建物概要に加えて、ZEB を評価するにあたって重要と考えられる各種諸元を示す。諸元項目の選定には欧州の ZEB の事例がまとめられた文献 [14] を参考にした。本建物では、商用電力と都市ガスの供給を受けており、それぞれ 1 次エネルギー換算係数は 9.76[MJ/kWh]、45.0[MJ/m³] を使用するものとした。また、太陽光発電による電力は商用電力同等(9.76[MJ/kWh])として扱う。今後は、ZEB を指向する建物が増えていく中で、エネルギー源は多様化すると考えられ、1 次エネルギー換算係数の設定なども議論の対象となると考えている。

次に、太陽エネルギーのポテンシャルの指標として、敷地に対する年間日射量を記載した。数値は、NEDO 日射量データベース [15] から横浜の値を参照した。今後、都市部を対象とした ZEB が普及していく中では、さらにポテンシャルに対して影響を及

ばす周辺建物の状況や容積率、高さ制限等の制約なども諸元として考慮する必要が生じてくると考えられる。

建物利用者数に関しては、設計定員を記載するが、一時的な来館者や運用状況なども評価に加味すべきであると考えている。本建物の場合、運用実績で建物見学を目的として年間7,000人の来館者があり、そのエネルギーへの影響も無視はできないため、平日平均として29人と記載した。一人当たりの滞在時間は1時間程度である。

外皮面積や体積、またその比率などもZEBの性能の諸元になると考えている。その他、受電設備や太陽光発電設備などの規模も比較評価の目安として記載しておく。

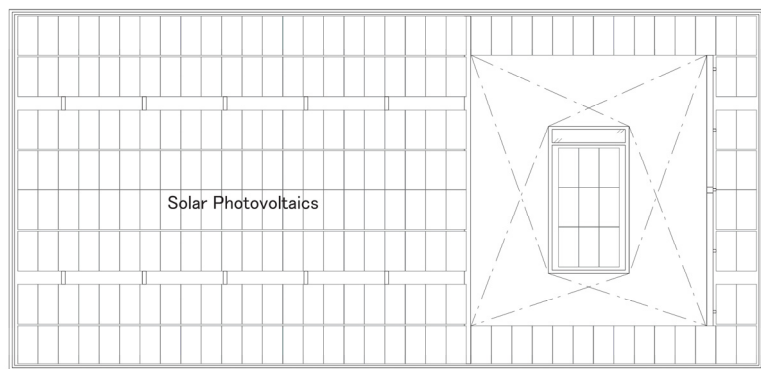
図2.2-3、4に平面図および断面図を示す。1階はエントランスホール兼展示スペースと会議室、2、3階は研究員の事務室として常時使用している。



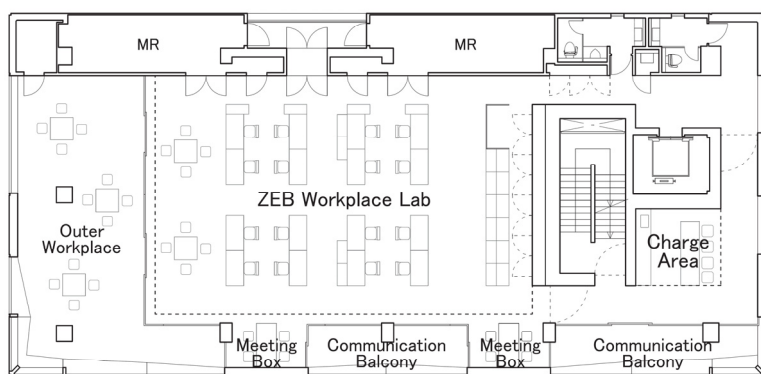
写真 2.2-1 建物外観・内観

一般概要		ZEB 関連概要		
所在地	神奈川県 横浜市	エネルギー供給	商用電力 都市ガス(13A)	
敷地面積	34822.92m ²	敷地への年間日射量	1,292kW・h/ m ² ・年	
		年間平均温度	16.2℃	
建築面積	427.52m ²	利用者数	執務室 36 人(定員) 会議室 57 人(定員) 来館者 29 人/日 (平均) ※	
延床面積	1277.32m ²		人員密度	執務室約 0.1 人/m ²
			外皮面積	約 1,900 m ²
構造	RC 造	体積	約 6,900 m ³	
階数	地上 3 階 塔屋 1 階	外皮	屋根 0.54W/ m ² ・K 外壁 0.96W/ m ² ・K 窓 2.08W/ m ² ・K	
方位	南東			
建物用途	事務所	計画受電力	50kW (40W/ m ²)	
		計画ガス消費	2.3m ³ /h(1.8*10 ⁻³ (m ³ /h) m ²)	
竣工	2014 年 5 月	PV モジュール面積	屋上 280 m ² 、壁面 350 m ²	
工期	9 ヶ月	PV 定格発電量	屋上 56kW、壁面 10kW	

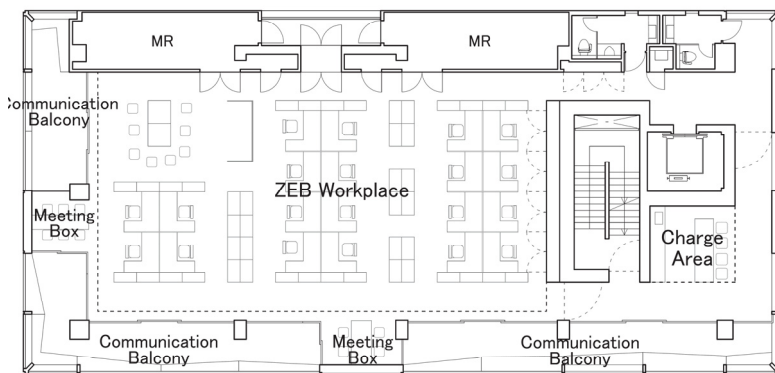
表 2.2-1 ZEB 指向建築設計諸元 ※来館者の平日平均値



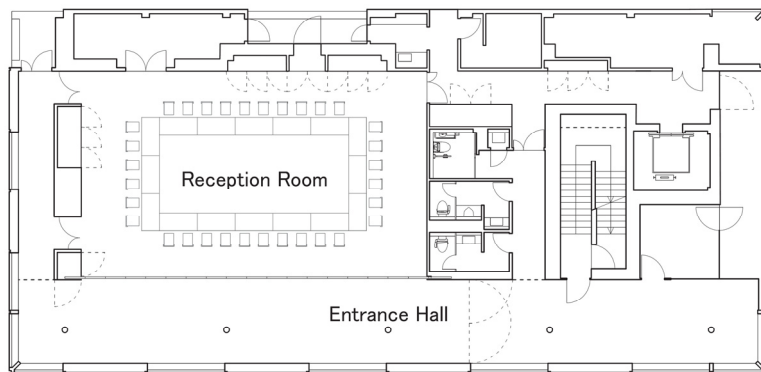
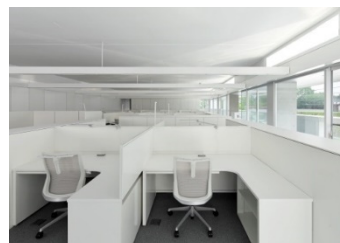
屋根伏



3階平面



2階平面



1階平面

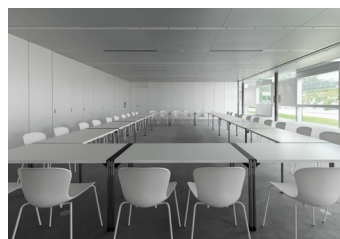


図 2.2-2 建物平面図と各階の様子

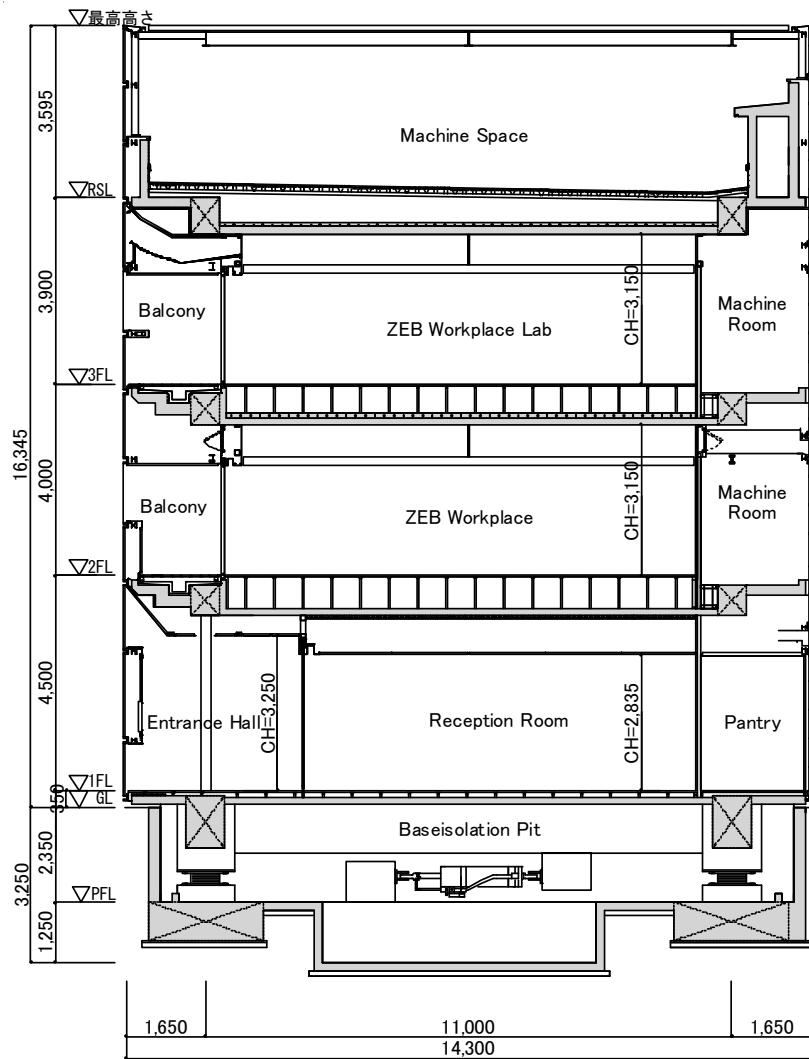


図 2.2-3 建物断面図

2.2.3 設備概要

実証建物の設備概要として、図 2.2-4 にエネルギーシステムフローを、表 2.2-2 に主な設備機器概要を示す。建物単体でのオンサイト ZEB を実現するため、空調、照明分野をはじめ、消費用途ごとに省エネルギー化を図っている。また、エネルギー供給側においては、建物に可能な限り太陽光発電を設置するとともに、燃料電池・ガスエンジン発電機によるコージェネレーションシステムとして、建物全体での一次エネルギーの利用効率を高める工夫をしている。燃料電池は、発電効率が 48% (LHV) と商用電源に比べて効率が高いためベース電源として常時稼働する運用である。ガスエンジン発電機は、熱主電従制御とし、冷房・暖房時に空調熱源としての温水が不足する場合に追い炊き運転をする運用である。蓄電池は非常用設備し、常時は充放電ロスによるエネルギー損失を最小とするため満蓄スタンバイ状態を基本として運用している。エネルギー消費用途は、割合の大きい「空調・換気」、「照明」、「コンセント」を個別計量し、昇降機や給湯設備、エネルギー損失や計量誤差等は「その他」に大別して表現する。なお、先の空気調和・衛生工学会の定義・評価 [4] においては、換気に関する消費エネルギーをその他に分類することが記されているが、本実証建物の場合は、空調設備と換気設備が一体で設計されており、計量による切り分けが難しいため、空調エネルギーに換気エネルギーを含んで評価する。

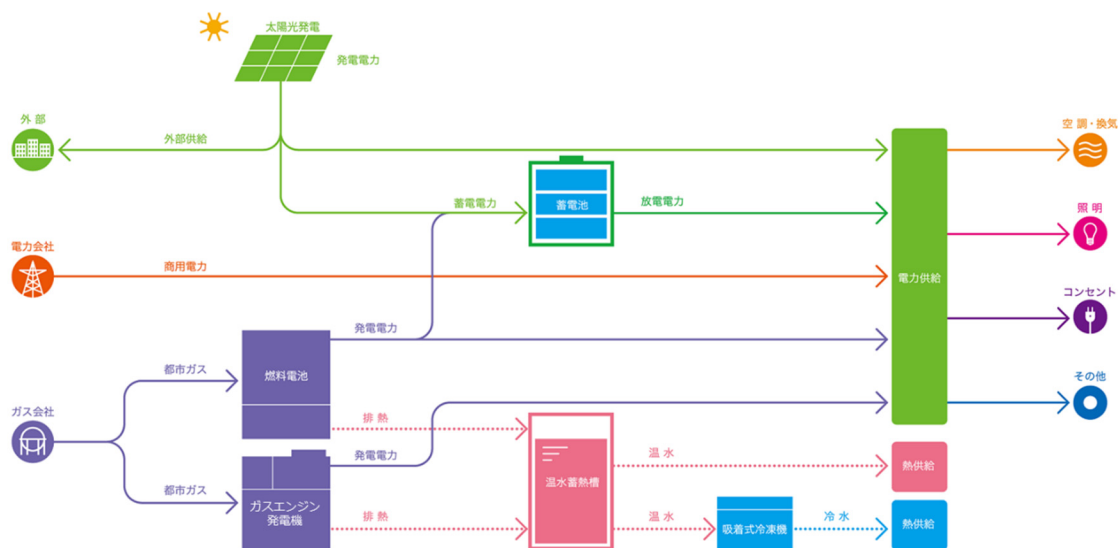


図 2.2-4 エネルギーシステムフロー

表 2.2-2 主な設備機器

	機器	容量、他
熱源・ 空調設備	吸着式冷凍機	冷凍能力:10.0kW
	温水蓄熱槽	水槽容量:6m ³ (有効)
	冷却塔 (密閉式)	冷却能力:27.3kW
	空気熱源 HP マルチエアコン (執務室外気系統)	冷房能力:45.0kW
	(執務室循環系統)	冷房能力:14.0kW
(会議室系統)	冷房能力:28.0kW	
(共用部系統)	冷房能力:33.5kW	
照明設備	高効率 LED 照明 (全館)	
電源設備	太陽光発電 (屋上)	単結晶型 発電容量:56.0kW
	(壁面)	有機薄膜型 発電容量:10.0kW
	ガス発電設備 固体酸化物形燃料電池	出力:発電 4.2kW、熱 3.7kW、消費:ガス 8.8kW
	ガスエンジン発電機	出力:発電 5.0kW、熱 9.6kW、消費:ガス 17.2kW
	蓄電池 (リチウムイオン型)	蓄電容量:22.0kW・h
給湯	局所式電気温水器	
昇降機	乗用 11 人乗 (45m/分)	

1) 空調システム

本建物ではタスク・アンビエント空調を採用しており、アンビエント空調「排熱利用躯体放射冷暖房」とタスク空調「パーソナル床吹き空調」で構成される (図 2.2-5)。また、中間期には、自動開閉換気窓と手動換気を組合わせた「自然換気システム」を併用し、更なる空調負荷の削減を図っている (写真 2.2-1)。アンビエント空調は、燃料電池等の排熱を利用するコージェネレーションに TABS (Thermal Active Building System) を組合せた高効率顕熱処理システムとし、タスク空調は、外気処理パッケージ空調機を利用した床吹き空調で、人検知センサの在席情報に基づき吹出口を開閉する潜熱処理兼用パーソナル空調システムである。

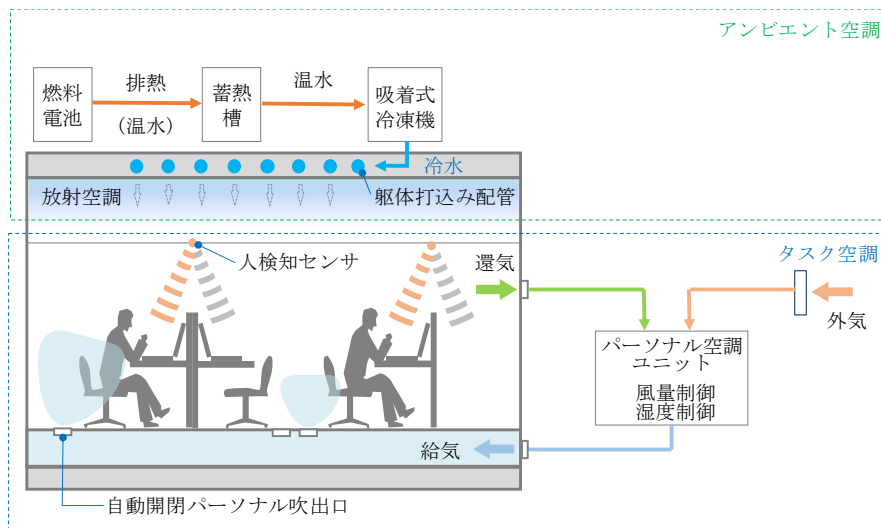


図 2.2-5 空調システム概要(冷房時)



写真 2.2-1 空調システム内観写真

アンビエント空調は、高効率発電設備として普及が期待される固体酸化物形燃料電池（発電効率 48%、総合効率 90%）からの排熱を主熱源としてコージェネレーション利用することで、効率を向上させるシステムである。また、排熱利用は暖房や給湯用途が主であり、熱需要が少ない事務所建物では利用しにくいという課題に対して、年間を通じて排熱を利用できる仕組みを採用している。温水を吸着材の再生熱源として利用し、冷水製造が可能な吸着式冷凍機と中温冷水で安定的に冷房が可能な TABS を組合せるシステムである(図 2.2-6)。

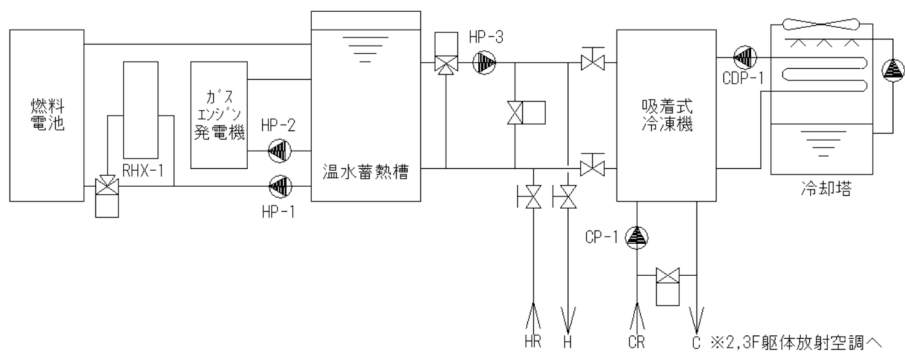


図 2. 2-6 吸着式冷凍機を用いた冷熱源システム

タスク空調は、潜熱処理と在室人員等による負荷変動への対応を目的として、外気処理パッケージ空調機を用いてパーソナル床吹出ユニットによる個別風量調節を可能とした(図 2. 2-7)。本空調システムは、汎用的な冷却除湿方式を採用しながら、顕熱負荷に影響されず、潜熱負荷の変動に応じた確実な除加湿による湿度制御機能とパーソナル空調としての風量制御機能を併せ持つシステムである。汎用機である定風量・吹出温度固定タイプの外気処理パッケージ空調機をベースとしつつ、変風量装置 (VAV) と INV ファンを組合せることで、風量及び吹出し温度制御を可能とした。人検知センサからの在席情報を用いて必要外気量制御と床吹出しユニットの ON/OFF は自動化しながら、執務者は、温冷感に不満を感じた時のみ、自席 PC から好みに応じて風量が 3 段階に調節が可能なシステムである。

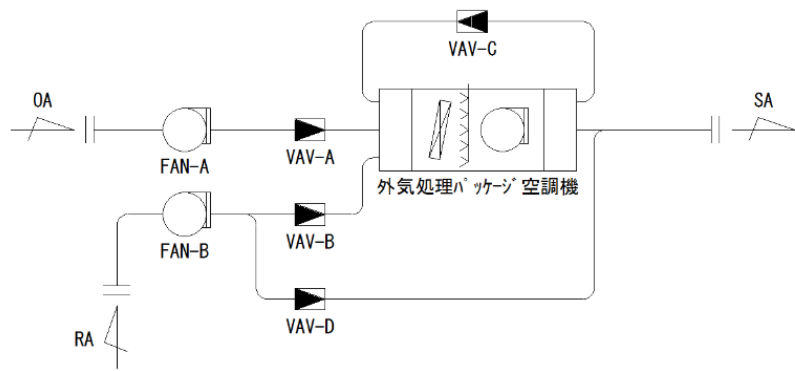


図 2. 2-7 パーソナル空調システム (タスク空調)

表 2. 2-3 パーソナル空調システムの風量制御

人検知センサ	在席情報及び風量選択情報により、必要外気量及び総要求風量を算出
VAV-A	必要外気量(A)を制御
VAV-B	設定室温に応じた比例制御により、還気処理風量(B)を制御
VAV-C	PAC空調機定格風量からの余剰分をバイパス風量(C)として制御
VAV-D	執務者からの総要求風量に応じて、追加すべき還気送風分(D)を制御

2) 照明システム

本建物では「低照度タスク・アンビエント」を採用しており、その仕組みは、4つの光源と制御により構成される（図 2.2-8、写真 2.2-2）。建物単体で ZEB を実現するため、各階での十分な採光を目的に、外壁から水平に導光する採光装置を導入している。また、従来の直接照明は下向きの明るさセンサにより机上面照度（作業用照度）を制御するのが一般的であるが、本建物の照明制御では、上向きの明るさセンサにより、上向き（間接）照明を制御し、天井面の輝度を確保して調光する仕組みとし、低照度と空間の明るさの両立を図っている。



図 2.2-8 照明システム概要



写真 2.2-2 照明システム内観写真

4つの光源はそれぞれの役割に即し、表 2.2-4 のように制御される。今回の方式では、明るさ感と省エネルギー性の両立のため、最小限の光で最大限の効果を得る照明システムを目指し、光の役割を、空間の明るさをもたらすもの(①・②)と、執務作業に必要な照度をもたらすもの(③・④)に分解した。①採光装置は、明るさ感の向上に

寄与し、天候により光の量が決定される。②高効率 LED 照明（上向き）は、採光装置による昼光と協調して、天井面を照らして間接光により室内の明るさ感を確保する。上向き明るさセンサの天井面輝度により、減光・消灯制御される。③高効率 LED 照明（下向き）は、在席エリアの PC 作業に十分な 300lx を確保するため、人検知センサによる人の在/不在に合わせて ON/OFF 制御される。④有機 EL タスクライトは、紙面作業の 700lx を確保するため、手動操作により利用可能である。以上のように、4つの光は個別の手法で調整され、制御上の相互の干渉や誤動作がなく、適切な光環境をもたらすことができる。

また、本照明システムは、窓面のグレア抑制、間接照明、有機 EL タスクライトの利用により、空間全体を相対的に暗く感じさせる原因となる過剰な輝度面を統合的に排除した。やわらかい光環境とすることで、低照度でありながらも明るく感じる空間を形成することができる。

表 2.2-4 4つの光源の制御

4つの光	役割	制御
①採光装置からの昼光	天井面を照らして明るさ感を向上	-
②高効率 LED 照明（上向き）	天井面を照らして明るさ感を確保、昼光と連動して減光/消灯	昼光連動制御
③高効率 LED 照明（下向き）	人の位置を検知し必要な場所を照射	人検知制御
④有機 EL タスクライト	個人の好みと作業に応じて点灯、低照度環境に適した柔らかい光	人の好みで操作

3) 太陽光発電設備

現時点で、再生可能エネルギーとして最も現実的で有効な太陽光発電設備を建物の屋上だけに頼らず、高層化に伴いその面積が増加する外壁面への設置を目的に有機薄膜太陽電池外壁ユニットを開発、採用している。屋上設置の高効率太陽光発電パネルとデザイン性にも配慮した太陽電池外壁ユニットで建物が消費するエネルギーを相殺するだけのエネルギー生成を行っている。



写真 2.2-3 建物外観と太陽光発電

a. 単結晶型太陽電池パネル

屋上には発電量を重視し、定格の発電効率が20%を超える高効率な単結晶型の太陽電池パネルを採用した。屋根面積当りの発電量を最大とするため設置角度を水平にし、影の影響なく隣接するパネル間の間隔を最小として定格容量で約56kWを確保した。

b. 有機薄膜太陽電池外壁ユニット

従来、外壁面に太陽電池パネルを設置する場合には、結晶型太陽電池のユニットを外壁面に取り付ける方法があった。しかし、建築外観デザインとの調和が難しく、メンテナンスの面でも課題が多かった。そこで、外壁と一体化することでデザイン性やメンテナンス性の課題を解消した新たな外壁発電ユニットを開発した（図2.2-9）。

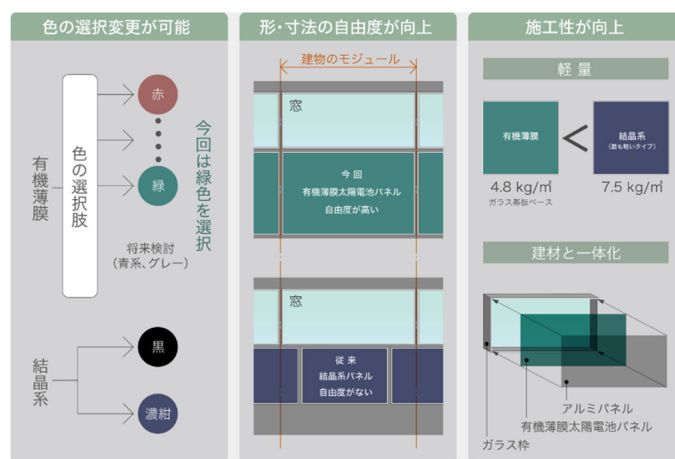


図 2.2-9 有機薄膜太陽電池外壁ユニットの特長

4) 電源設備

コージェネレーション電源として、燃料電池とガスエンジン発電機を採用した。燃料電池は高効率発電システムである特徴を活かし常時稼働のベース電源として、ガスエンジン発電機は冷暖房のピーク負荷対応として熱主電従の発停制御を行っている。また非常時対応設備として、リチウムイオン蓄電池を備えている。



<p>固体酸化物型燃料電池</p> <p>発電出力 4.2kW (発電効率 48%)</p> <p>熱出力 3.7kW (熱回収率 42%)</p> 	<p>ガスエンジン発電機</p> <p>発電出力 5.0kW (発電効率 29%)</p> <p>熱出力 9.6kW (熱回収率 56%)</p> 
--	---

図 2.2-10 発電設備

5) 計測システム

BEMS 設備は、エネルギー計量データに加え、状態監視や運転履歴等、その他詳細計測データに関しても 1 分間隔のデータ収集・保存をし、リアルタイムにエネルギー収支やバランスを検証可能であり、エネルギーの見える化画面などにも活用している。また、エネルギーの詳細な計量としてコンセントプラグ単位で電力計量が可能な装置（スマートコンセント）を設置し、無線データ収集により、詳細な使用用途分析や人検知センサによる在席情報との相関分析が可能であり、実証建物として、運用データの活用可能性の検証を目的として設計したものである。（表 2.2-5）建物全体の監視・計量点数として、約 2,000 点を記録している。

表 2.2-5 主な計測項目

項目		[単位]
気象	温湿度	[°C]、[%]
	風速、風向	[m/s]、[°]
	日射強度	[W/m ²]
	降雨量	[mm/min]
室内環境	温湿度	[°C]、[%]
	照度	[lx]
	CO ₂ 濃度	[ppm]
	躯体表面温度	[°C]
	人検知情報	[-]
空調	熱源廻り(温度、流量)	[°C]、[L/min]
	空調機廻り(温度、風量)	[°C]、[m ³ /h]
	操作状況(床吹出口、換気口)	[-]
衛生	使用水量	[m ³]
エネルギー	発電・蓄電量(PV、FC、GE、LIB)	[kWh]
	受電・送電量	[kWh]
	ガス消費量(FC、GE)	[m ³ /h]
	電力消費量(空調、照明、コンセント、他)	[kWh]
	熱量	[MJ]

※計測間隔は 1min

2.3 エネルギー性能評価

ZEBにおいて、建物のエネルギー性能として代表的な指標には年間エネルギー収支があり、建物敷地内におけるエネルギーの生成・消費、もしくは建物敷地境界におけるエネルギーの配送・逆送のいずれかを定量的に把握する必要がある。なお、複数のエネルギー源を利用する場合は、各々一次エネルギー換算などを行い、総合的なエネルギー収支として評価する。

また、ZEBのエネルギー性能としては、年間のエネルギー収支だけでなく、例えば消費用途等の内訳や時刻や季節等による変動などの特性を把握することが重要である。

ZEBのエネルギー性能を評価する上で必要と考えられる基本的な要素を計量値からの演算式とともに表2.3-1に定義する。基本的には、二次エネルギー単位で各用途別に計量を行い、一次エネルギー換算により、総合的な評価が可能となる。表中では、一般的なエネルギー源として、電力、燃料、熱を、消費用途として空調、照明、コンセント、その他を定義し、一次エネルギー換算係数を適宜定めたが、同様の規則に従えばより多様なエネルギー源や消費用途を分類した評価も可能である。例えば、病院建物で給湯用途の消費が多い場合は、同様に個別用途として給湯などを設定すればよい。

実証建物における計量点を図2.3-1に示す。なお、本論文では、実証建物のBEMSに記録された1分間隔の計量データを対象とし、各時間の演算の積算値としてまとめるものとした。運用段階においては、建物全体のエネルギー消費(C)は、全てを計量によって把握することはできず、 $C=D+G-E$ の演算に示す通り、配送(D)、生成(G)、逆送(E)から算出することとなる。

また、本建物のように敷地内に燃料電池やガスエンジン発電機（バイオマス発電設備なども同様）などのエネルギー変換設備を有する場合は、全体の消費(C)を消費用途に分類する際に配慮が必要である。計量した二次エネルギーの投入量に対して、その変換効率や出力の比率を考慮して、建物全体の消費電力量に対する一次エネルギー換算係数(f_{ce})や建物全体の消費熱量に対する一次エネルギー換算係数(f_{ch})を設定する必要がある。例えば、ガスエンジン発電機のコージェネレーションシステムを採用している建物であれば、入力である都市ガスの燃料量を計量し、エネルギー変換としての発電効率や熱回収率およびその出力比を考慮して、建物全体の電力や熱などエネルギー種別ごとにその換算係数を定める。エネルギー変換設備の稼働状況によって変動する値となるため、都度演算が必要である。

なお、用途別エネルギー消費量の算出においては、燃料電池は、ベース電源(電主熱従)として常時稼働しており、需要端発電効率が配送電力に比べ優れるため、用途別消費エネルギー算出時には、排熱の利用有無によらず、投入エネルギーの全量を電力として用途別消費エネルギー量に按分を行っている。ガスエンジン発電機は、空調ピー

ク負荷対応として熱主電従の発停制御であり、用途別消費エネルギー量算出時には投入エネルギーを電力と熱の出力比によるエネルギー按分を行い、熱は空調消費エネルギーに加算している。

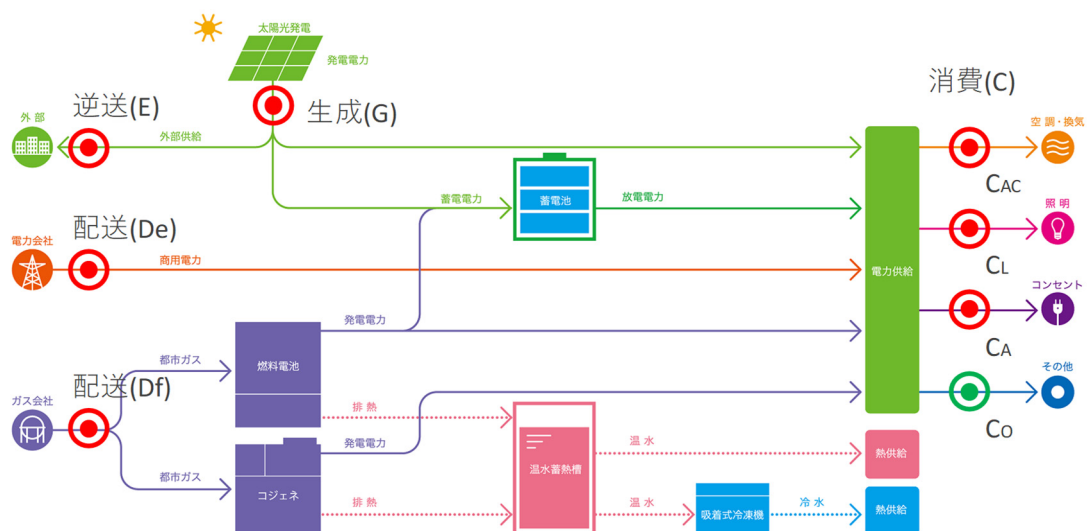


図 2.3-1 実証建物のエネルギーフローと評価のための計測項目

表 2.3-1 エネルギー性能評価のための要素項目と演算

	演算式[MJ]
D : 配送エネルギー	$D_e + D_f + D_h$
D_e : 配送エネルギー(電力)	$d_e \times f_{de}$
D_f : 配送エネルギー(燃料)	$d_f \times f_{df}$
D_h : 配送エネルギー(熱)	$d_h \times f_{dh}$
E : 逆送エネルギー	$E_e + E_h$
E_e : 逆送エネルギー(電力)	$e_e \times f_{ee}$
E_h : 逆送エネルギー(熱)	$e_h \times f_{eh}$
G : 生成エネルギー	$G_e + G_h$
G_e : 生成エネルギー(電力)	$g_e \times f_{ge}$
G_h : 生成エネルギー(熱)	$g_h \times f_{gh}$
C : 消費エネルギー	$D + G - E$
C_{AC} : 消費エネルギー(空調)	$C_{e(AC)} \times f_{ce} + C_{h(AC)} \times f_{ch}$
C_L : 消費エネルギー(照明)	$C_{e(L)} \times f_{ce}$
C_A : 消費エネルギー(コンセント)	$C_{e(A)} \times f_{ce}$
C₀ : 消費エネルギー(その他)	$C - (C_{AC} + C_L + C_A)$

記号

d_e	: 配送電力量	[kW・h]
d_f	: 配送燃料量	[m ³]
d_h	: 配送熱量	[MJ]
e_e	: 逆送電力量	[kW・h]
e_h	: 逆送熱量	[MJ]
g_e	: 生成電力量	[kW・h]
g_h	: 生成熱量	[MJ]
$C_{e(AC)}$: 空調関連機器消費電力量	[kW・h]
$C_{e(L)}$: 照明関連機器消費電力量	[kW・h]
$C_{e(A)}$: コンセント消費電力量	[kW・h]
$C_{h(AC)}$: 空調関連機器消費熱量	[MJ]
f_{de}	: 配送電力量一次エネルギー換算係数(9.76)	[MJ/kW・h]
f_{df}	: 配送燃料量一次エネルギー換算係数(45.0)	[MJ/m ³]
f_{dh}	: 配送熱量一次エネルギー換算係数(-)	[MJ/MJ]
f_{ee}	: 逆送電力量一次エネルギー換算係数(9.76)	[MJ/kW・h]
f_{eh}	: 逆送熱量一次エネルギー換算係数(-)	[MJ/MJ]
f_{ge}	: 生成電力量一次エネルギー換算係数(9.76)	[MJ/kW・h]
f_{gh}	: 生成熱量一次エネルギー換算係数(-)	[MJ/MJ]
f_{ce}	: 消費電力量一次エネルギー換算係数	[MJ/kW・h]
f_{ch}	: 消費熱量一次エネルギー換算係数	[MJ/MJ]
s_e	: 敷地内エネルギー変換設備出力電力量	[kW・h]
s_h	: 敷地内エネルギー変換設備出力熱量	[MJ]

※()内数値は本建物における設定値

2.3.1 年間エネルギー収支による評価

実証建物の運用データを用いて、一般的な ZEB 評価指標である年間エネルギー収支として生成エネルギーと消費エネルギーの収支を算出した。消費エネルギーは消費用途別に内訳の分類を行った。

運用 4 年間のエネルギー収支実績として、年間エネルギー収支実績の年度別比較を図 2.3-2 に示す。運用 1 年目の実績で消費エネルギー 463 [MJ/m²]、生成エネルギー 493 [MJ/m²] で年間エネルギー収支 0 以上を達成し、その後も継続的に ZEB としての運用がなされている。

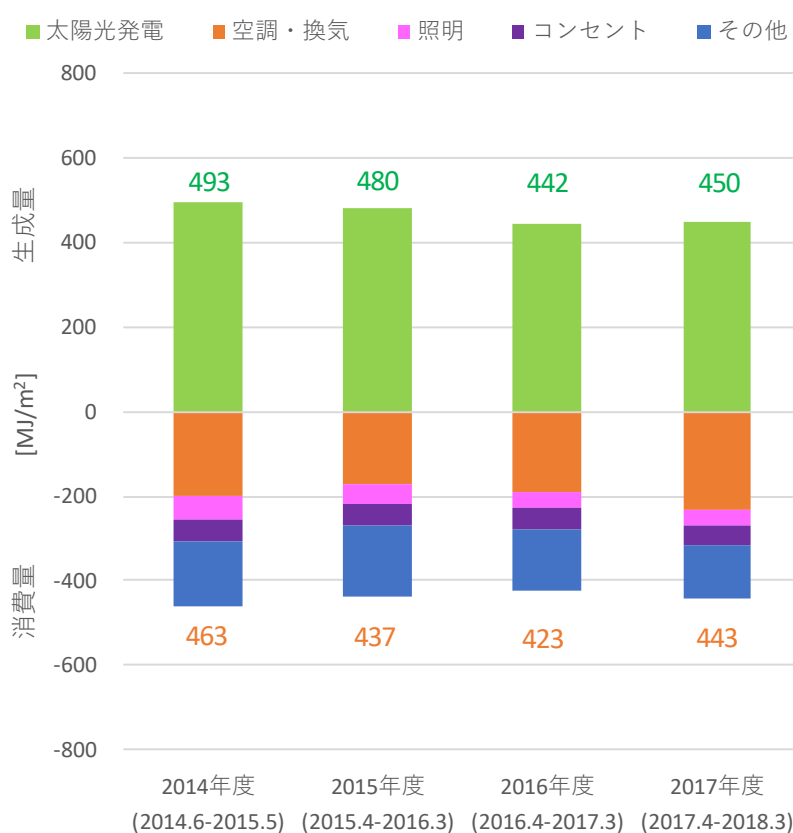


図 2.3-2 年間エネルギー収支実績の年度別比較

2.3.2 月間エネルギー収支による評価

月間エネルギー収支実績の比較を図 2.3-3 に示す。一般建物に比べ、自然エネルギーのパッシブ・アクティブ活用を積極的に行っていることが特徴であり、気象条件による生成・消費エネルギーへの影響が確認できる。例えば、太陽光発電によるエネルギー生成量は太陽高度との相関が強いが、年による日照時間等のばらつきの影響も受け、例えば、2016 年 9、10 月、2017 年 9 月、10 月は日照時間の少ない(長雨など悪天候)日が続いたため、太陽光発電量が低下した。また、中間期は自然換気を積極的に行っているが、年による外気温の影響等によりその実施期間が異なり、6 月や 9 月の空

調消費エネルギーに差が出ている。また、建物の利用者数による影響も大きく、常時利用者数の変動による傾向は本データでは確認出来ないが、竣工当初の2014年6、7、8月は見学をも目的とした来館者が多く、消費エネルギーが大きい。

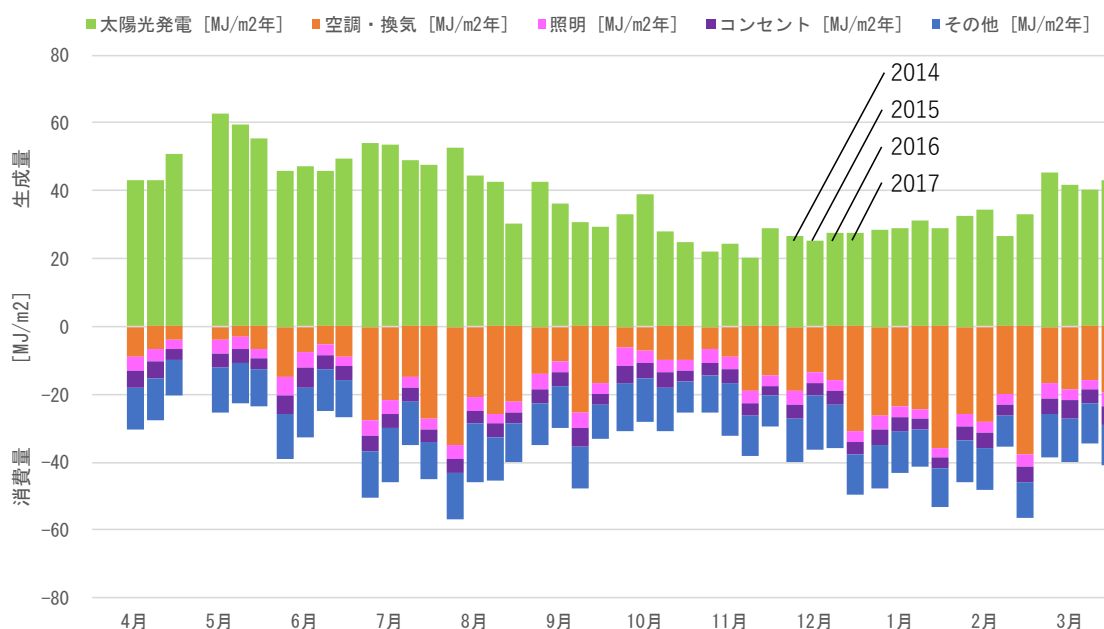


図 2.3-3 月間エネルギー収支実績の月別比較

2.3.3 用途別エネルギー消費量の評価

用途別エネルギー消費量の分析を行うため、先の ZEB 評価で基準として用いたオフィスビルの統計値 [16] と比較することでその特性を考察する。図 2.3-4 に示すのがオフィスビルの規模別エネルギー消費原単位であり、このうち延床面積が 20,000m² 以下のものを比較対象とする。

図 2.3-5 に比較結果を示す。消費用途別の削減率を図中に赤字で記載しているが、建物全体の削減率 0.75 に対して各消費用途とも概ね同程度の削減である。削減率が少ない項目としては、水熱搬送・空気熱搬送動力の 0.54、0.58 がある。本建物は放射空調とパーソナル空調を組合せた空調システムである。一般建物に比べ、放射空調による特徴として水熱搬送を主とするためポンプ動力が増加する傾向にある。また、パーソナル空調においては、気流感の積極的利用により室温緩和を行っているため、快適性の向上がファン動力の増加につながっている。その他、更なる省エネルギー化に向けては、その他エネルギーの削減が課題であり、次節でその分析結果を報告する。

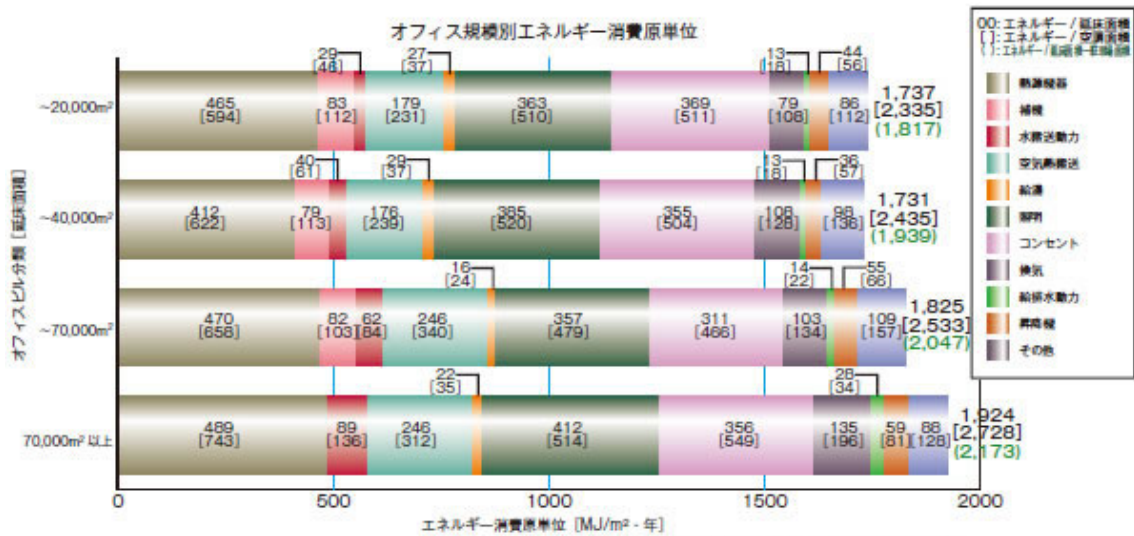


図 2.3-4 オフィスビルの規模別エネルギー消費原単位 [16]

■ 熱源機器	■ 補機	■ 水搬送動力	■ 空気熱搬送	■ 給湯	■ 照明
0.72	0.81	0.54	0.58	-	0.88
■ コンセント	■ 換気	■ 給排水動力	■ 昇降機	■ その他	
0.83	0.72	-	0.85	0.13	(赤字：削減率)

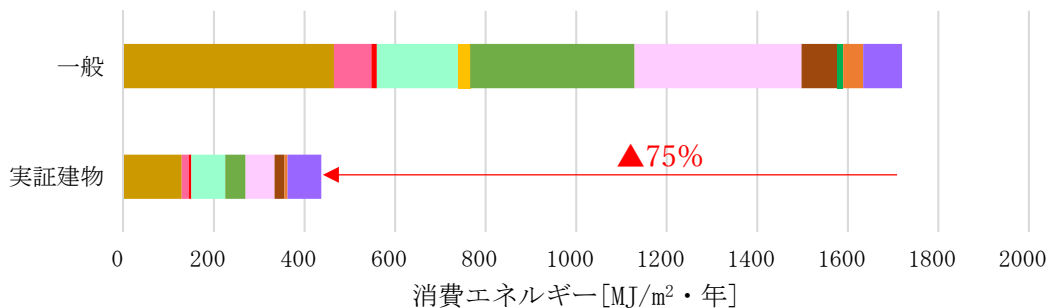


図 2.3-5 一般的なオフィスビルと実証建物実績（2015年度）の比較

2.3.4 ZEB としてのエネルギー性能評価

ZEB としてのエネルギー性能を把握するため、エネルギー消費量とエネルギー生成量を 2 軸で表現した ZEB 評価チャートを用いる。代表年として運用が安定した 2 年目の 2015 年度の実績を図 2.3-6 に示す。削減率算出の基準エネルギー消費量には、オフィスビルの実績値として用途別内訳までの集計がなされている統計値²¹⁾を参照し、1737[MJ/m²・年]の値を用いた。

消費エネルギーは基準ビル比で 75%削減、生成エネルギーは基準ビル比で 28%相当分を生成し、合計で 103%相当の化石燃料を削減した結果である。年間エネルギー収支では+43[MJ/m²・年]で評価は ZEB となる。

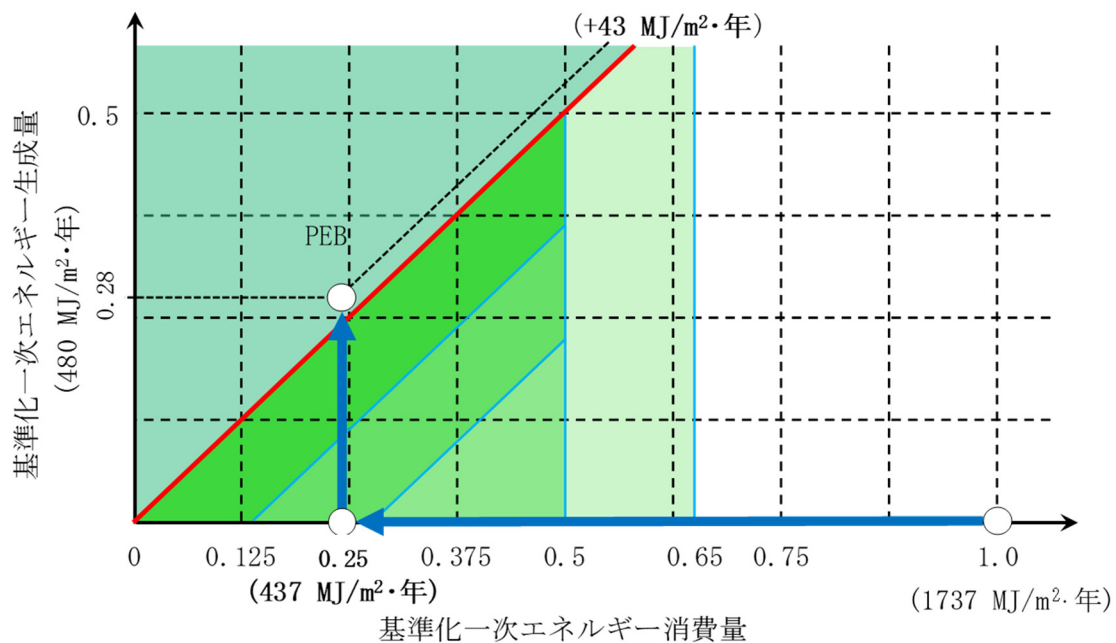


図 2.3-6 ZEB チャートによる評価

2.3.5 ZEB のエネルギーフローの分析

ZEB のエネルギー特性を把握する上で、年間エネルギー収支の観点だけでなく、時々刻々のエネルギー収支の変動や使用するエネルギー源の種別等に関する議論が重要になってくると考えている。ZEB の定義そのものでもあるが、正味の年間エネルギー収支ゼロ、英語表記でいう net の部分に関する議論は未だあまり行われていない。今後は、外部とのエネルギー授受の観点を加え、例えば、オフサイトの再生可能エネルギーの活用や周辺建物や系統電源とのエネルギー融通などを踏まえて、議論をしていく必要がある。そのため、まずは、ZEB として運用している実証建物のエネルギーフローを整理し、その特性把握を行う必要がある。

まずは図 2.3-7 に実証建物のエネルギーフローを示す。例えば、外部とのエネルギー授受を議論する上では、配送/逆送：286[MJ/m²・年]/329[MJ/m²・年]側に注目する必要がある。外部から供給されたエネルギーとして電力で 134[MJ/m²・年]、都市ガスで 152[MJ/m²・年]があり、逆送は生成エネルギーである電力のうち 329[MJ/m²・年]を外へ供給している。年間エネルギー収支としては、先の定義にもあるように配送/逆送の収支で評価しても、生成/消費の収支で評価しても同様の性能 (+43[MJ/m²・年]) であることに変わりはない。生成エネルギー480[MJ/m²・年]のうち、自家消費した分は 151[MJ/m²・年] (=480-329) であり、消費エネルギー需要の約 1/3 を生成エネルギーで賄っている。この部分が建物のエネルギー自立性に関する議論を進める上で基本となる部分である。現時点では、多くの ZEB 事例が存在するわけではないため、ZEB 同士のエネルギー自立性を比較評価する段階にはなく、本実証建物のエネルギー自立性

に対しても絶対的な評価は難しいが、そのための評価指標を用意しておくことは重要である。また、同一建物において、日時や季節によりエネルギー自立性は変動し、かつ運用側で蓄電・蓄熱等によりある程度制御が可能のため、DR や建物間のエネルギー融通を積極的に行う日々の ZEB 運用に役立つものとする。そのような目的を持った評価手法を次章にて考案する。

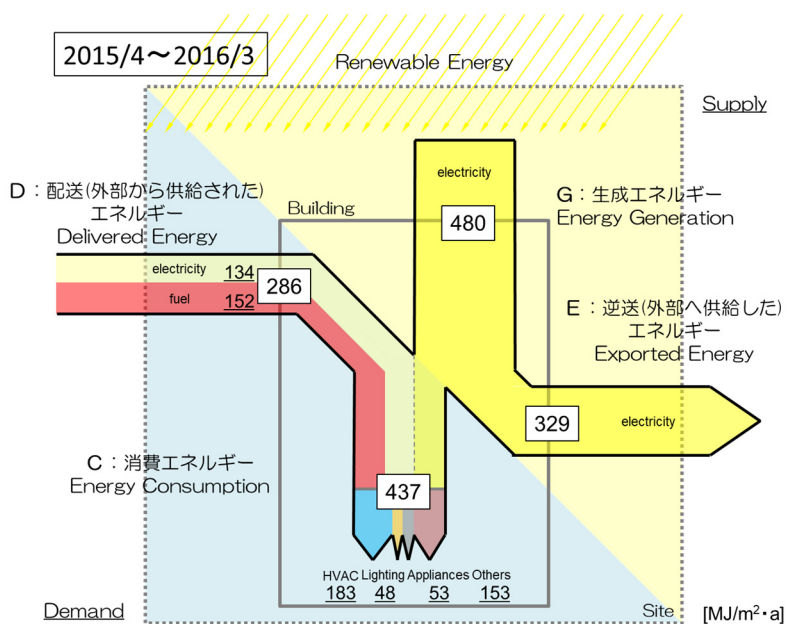


図 2.3-7 実証建物のエネルギーフロー (2015 年度)

2.4 運用段階におけるエネルギーマネジメントの課題

本節では、持続的なエネルギーマネジメントに向けて、運用段階に実際に行われた不具合診断・運用改善の成果報告を第一項（2.4.1）で記載するとともに、第二項（2.4.2）では日常的にエネルギーマネジメントを行っていくための課題を整理する。

2.4.1 不具合診断・運用改善の成果報告

年間エネルギー収支を目標とする ZEB においては 1 年目の運用は最も大切な期間であり、各設備機器やシステムが想定通りの性能を発揮しているか確認する性能検証の視点や、建物が想定通り利用されているのかという施設運用の視点でエネルギーマネジメントを実施する必要がある。

実証建物において、実際に竣工時から 1 年の間に実施された不具合診断・運用改善において、エネルギーマネジメントの視点から効果が大きいものおよび初歩的な不具合であるが見過ごされてしまった事項に着目して整理した。詳細は文献 [17]にて報告している。いずれも実際に運用段階で生じた不具合への対応や運用の改善例である。

以下に、竣工後 1 年間に対応した建築設備の性能に関わる改善事案 3 件と運用段階で問題が顕在化した建物全般の「その他」エネルギーの分析事案 1 件を記載する。

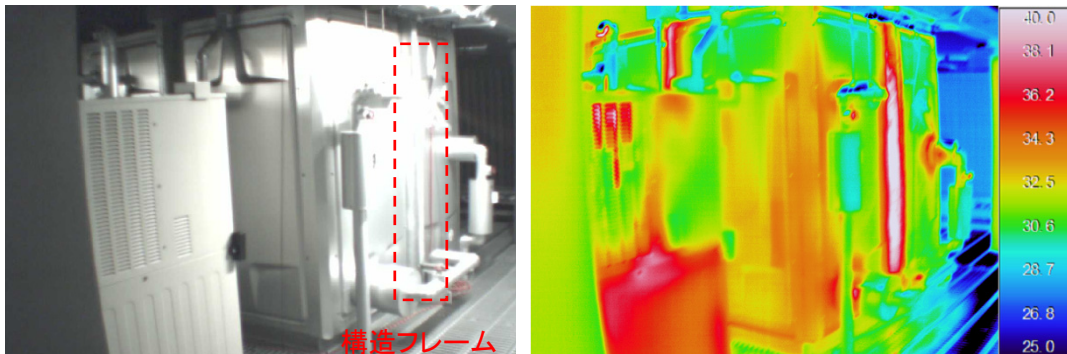
1) 温水蓄熱槽の断熱性能向上

竣工 1 年目の夏期試運転時に、温水蓄熱槽からの熱損失が想定を上回って大きいことが判明したため、断熱補強対策(全面をグラスウール(24k)50mm で補強)を実施した。温水蓄熱槽の断熱仕様は、主要パネル部にグラスウール 50mm という一般的な仕様であったが、本建物の燃料電池の発電排熱 (3.7kW) を最大 56h (2.5 日間) 蓄えるという運用においては、蓄熱槽容量に対して熱の投入が小さいため、熱損失が相対的に大きくなってしまい、十分な蓄熱がなされないという不具合が生じていた。具体的には、図 2.4-1 の熱画像の比較に示すようにパネル中央の金属製構造フレーム部分が熱橋となっており、蓄熱槽全体を断熱材で覆うことで性能向上を図った。異なる季節の比較ではあるが、改修前の状況と比較すると 30%程度の性能向上を確認した。

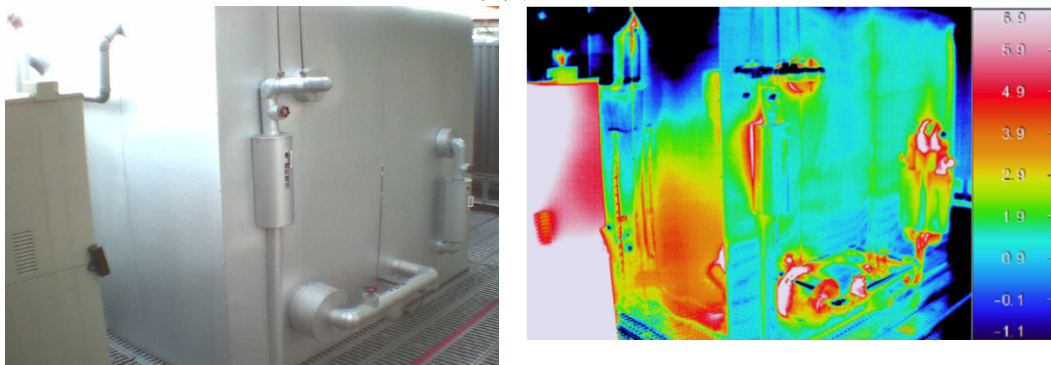
表 2.4-1 蓄熱槽改修前後での排熱量と供給熱量の比較

	排熱回収量[MJ]	排熱利用量[MJ]	排熱利用率[%]※
夏期(対策前 3 ヶ月)	37,343	19,544	52.3
冬期(対策後 3 ヶ月)	61,896	50,840	82.1

※回収した排熱量に対する利用した排熱量の比



対策前



対策後

図 2.4-1 蓄熱槽の断熱補強 (熱画像による対策前後の比較)

2) 吸着式冷凍機の抽気運転不具合の改善

竣工1年目の夏期試運転時に吸着式冷凍機の冷水製造運転に不具合が生じ、冷水温度が下がらないという事象が発生した。原因は、蒸発器側の真空度が保たれておらず、吸着工程が正常に動作しなかったことによる。真空度が保たれていなかった理由は、蒸発器内の真空度を保つための抽気運転が正常に動作していなかった制御上の不具合であり、抽気運用のスケジュールを再設定することで問題は解消した。(参考：図 2.4-2 吸着式冷凍機の動作原理図 (出典：三菱樹脂(株)製品カタログ資料))

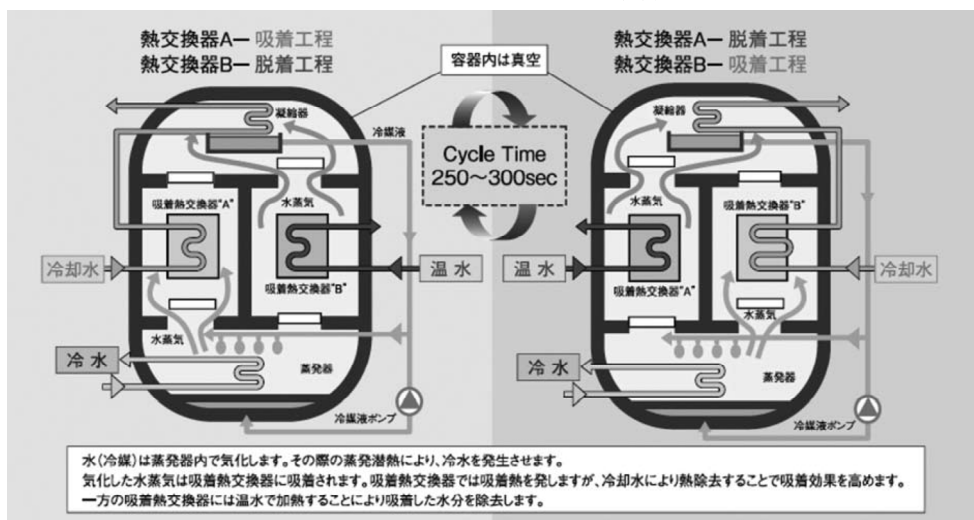


図 2.4-2 吸着式冷凍機の動作原理図

設備側の計測項目としては、機内の真空度は直接の管理項目ではないため、原因の究明に時間を要したが、正常動作していないことは、図 2.4-3 に示す通り吸着式冷凍機の冷熱出力や冷水出口温度を確認できており、不具合診断の観点からは定格出力や冷水出口温度等にベンチマークを設けることで不具合確認は容易であるが、原因の究明には技術者の知識や経験を要する事象であった。

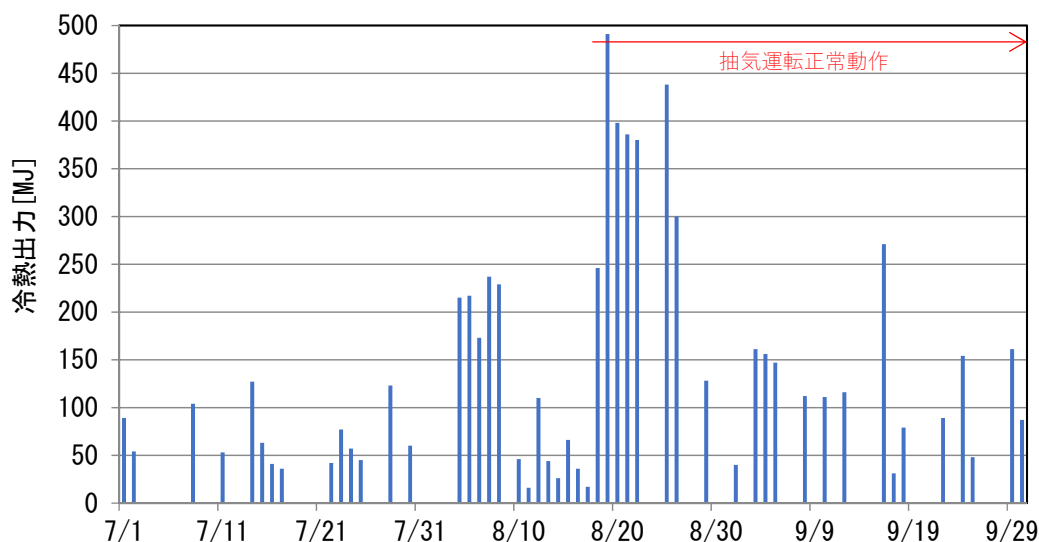


図 2.4-3 吸着式冷凍機の冷熱出力（日積算値）

3) 外気量制御不具合の改善

初期の性能検証における外気量制御不具合の事案を示す。本建物では、人検知情報による外気量制御（在室人数に応じた外気給気の変風量制御）を行っているが、竣工一年目の夏期には、外気量制御が機能しておらず、定格風量が供給されていた。夏期の外気導入量の推移を図 2.4-4 に示す。8/26 に調整を行い、人検知情報による外気量制御が働き、外気負荷削減および送風機動力の削減が適正に行われるようになった。

本事象は、不具合診断の観点からは外調機は正常に能力を発揮しており、定格能力をベンチマークとする管理だけでは検知が難しく、制御ロジックを理解した上でその動作確認をする必要がある。実際には、運用初期には管理技術者が十分に仕組みを理解しておらず、見落とされていた不具合であり、夏期の運用に対する空調システム全体のエネルギー性能を検証する段階で発見された事象である。一般的に、容量制御や風量制御に関連する不具合は、他の要素との相関で不具合と診断されることが多いため、複数の要素を重ねて確認する必要があるが、本実証建物のように、自然エネルギーの利用や人検知制御を導入している場合には、より制御に関連するパラメータが多くなり、定常状態での運用時間はほとんど存在せず、常に何らかの制御が働いている。竣工時に、設計思想や制御ロジックを明文化して、かつ設計者から管理技術者への伝達が適正になされることがまず第一ではあるが、管理技術者が手探りで過去の知

識や経験に基づきエネルギー管理を始める事象も多い。そのような際にも、日々蓄積される運用データをリアルタイムに分析するような自動化の仕組み、データ駆動型のエネルギーマネジメントが不可欠である。

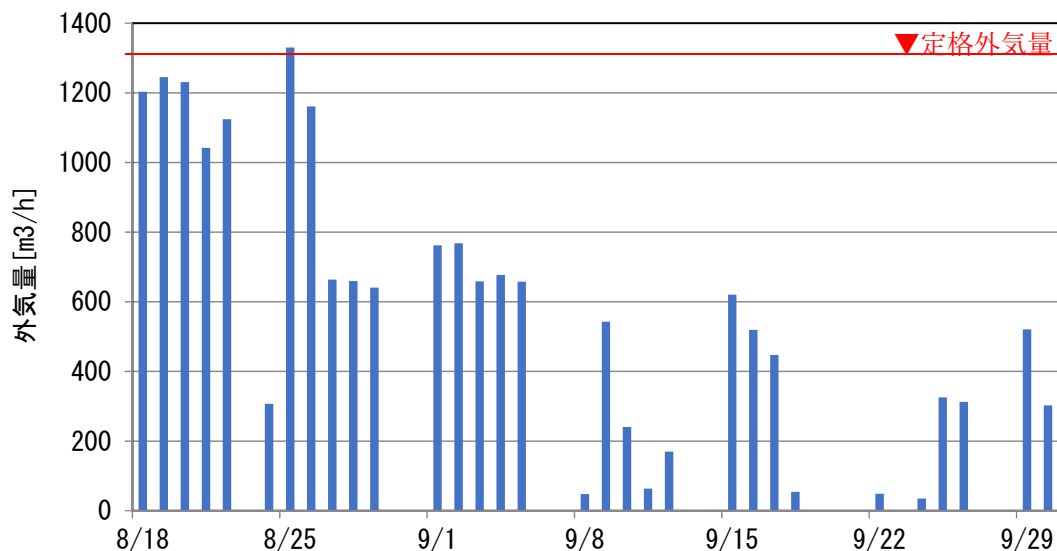


図 2.4-4 外気導入量の平均値 (外調機稼働時間帯のみ)

4) 「その他」エネルギーの内訳分析と運用改善

用途別消費エネルギーの「その他」エネルギーの比率が主消費用途として定義した空調、照明、コンセントと比較して大きな割合を占めていたため、その内訳分析を行った。「その他」エネルギーは、主用途の消費エネルギーの削減がなされたことから相対的にその割合が大きくなったことで、運用段階で顕在化した課題である。本実証建物における「その他」エネルギーとは、昇降機、給湯等具体消費用途が定まっているが相対的にその消費量が少ないと考えられるものに加えて、消費用途の分類が難しい制御系電源や電氣的損失、計量上の誤差等を含む総量として表現したものである。ZEBに限って特別に存在する消費エネルギーではなく、一般建物においても消費されているエネルギーではあるが、各種消費用途に対して省エネルギー化を進めたことで、相対的に目立ってきた項目である。一般ビルにおいては、相対的に小さなエネルギー量であるため、その実態把握が進んでおらず、計画段階のエネルギーシミュレーション等において、その予測も難しい。そこで、本実証建物において、「その他」エネルギーの内訳分析を行った。通常のBEMSの計測点だけでは、内訳の把握が不十分であるため、2014/9/9 20:00-9/10:17:00において、可能な限りバッチ計測にて細分化して、電力計量を行った。結果を図2.4-5に示す。大半は常時消費されている待機電力であり、機器メーカーによる製品の省電力化努力に委ねざるを得ないが、制御系電源など夜間・休日の運用方法を工夫することで改善の可能性もある。また、太陽光発電のパワコンの効率化や蓄電池の充放電ロスに配慮した運用手法、トランス等の損失を少な

くする設計や製品の導入など、今後検討すべき課題は多い。いずれにしても、消費エネルギー全体に占める割合が、結果として3割を超えている現状では、無視することができない存在であり、各機器の省エネルギー化の改良はもちろんのこと、設計手法そのものの見直しや運用段階において建物性能を維持しながら待機電力を削減する工夫を検討していかなければならず、そのためには本結果のような実運用データの分析による実態把握が重要となる。

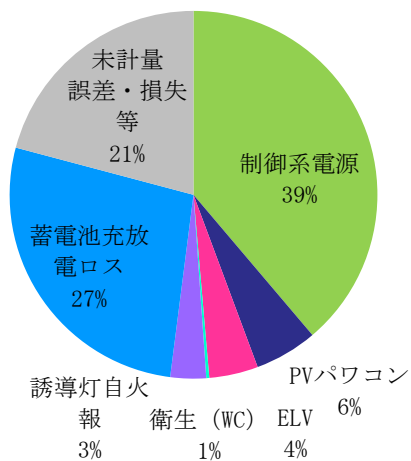


図 2.4-5 その他エネルギーの内訳

2.4.2 日常的なエネルギーマネジメントのための課題解決策

ZEB の運用段階においては、本実証建物同様、運用開始後、1、2 年目には、機器やシステムごとの性能検証によって不具合対応・運用改善を実施しながら、建物全体の年間エネルギー収支を目標値とした ZEB のエネルギーマネジメントがなされると考えられる。

しかし、ZEB を低炭素社会の主要素として価値を高めた運用を行っていくためには、単なる年間の光熱費がゼロの建物というだけでは不十分であり、例えば、DR や BCP などの社会的要請にも全面的に応える運用が望ましく、より動的で持続的なエネルギーマネジメントが必要である。そのための課題として、ZEB の日常的なエネルギーマネジメントに重要な要素として以下の 2 つに絞り、本研究において、その解決策を提案する。

提案①：ZEB のエネルギー自立性を評価する指標の提案

エネルギー性能評価においては、年間のエネルギー収支だけでなく、今後の ZEB の普及を見据え、外部からのエネルギー供給にできるだけ依存せず、自立性を高めることが求められる。また、系統電源への逆潮による電源品質やデマンドレスポンス対応など将来的なエネルギー市場を見据え、そのための評価指標が必要である。

提案②：ZEB の日常的なエネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築

日々の運用管理においては、基準値や目標値を定めた運用がなされるが、事前に行うエネルギーシミュレーションや過去のデータを統計的に処理しただけの静的な値であっては、特に自然エネルギーを積極的に利用し、気象や建物の利用状況に応じて柔軟な運用がなされる ZEB においては、うまく機能せず、エネルギー管理のための有効な手法とはならない。例えば、機械学習を用いたデータ分析などにより、常に最適な基準値や目標値に基づき、エネルギー消費状況を監視し、必要に応じて不具合診断がなされるような仕組みを構築する必要がある。日々蓄積される建物ライフログとしての膨大な運用データを効率的に活用し、常に最新の運用状況に合わせた不具合診断手法が必要である。

2.5 まとめ

本章では、実証建物のエネルギー性能評価および実運用下における当初コミッションの事例を踏まえ、ZEB に対して持続的エネルギーマネジメントを実施していくための課題に対して、以下の 2 つの提案を行うことをまとめた。

提案①：ZEB のエネルギー自立性を評価する指標の提案

提案②：ZEB の日常的なエネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築

次章以降において、上記 2 つの提案に対する具体手法の検証を行う。

3. ZEB のエネルギー自立性評価手法の提案

3.1 はじめに

本章では、第 2.5 節を受け、提案①：ZEB のエネルギー自立性を評価する指標の提案とその有用性の検証を行う。

建物を ZEB 化する目的として、光熱費削減や低炭素化に加え、エネルギー自立性を高めることでエネルギーセキュリティリスクの軽減や地産地消のエネルギー利用による系全体のエネルギー効率の最適化などがある。現在は、ZEB の普及促進段階であり、汎用的な省エネルギー技術と太陽光発電の採用を中心に、経済合理性の高い ZEB が普及しはじめている。しかし、既に顕在化している課題として太陽光発電の系統電源への負荷の時間的偏りや急激な電圧低下などがあり、ZEB による低炭素社会への圧倒的寄与を目指すにおいては、本実証建物のように年間エネルギー収支ゼロを実現することだけでなく、エネルギーの自立性を高めるということが重要となる。それが、再生可能エネルギーの選択肢の多様化や複数の建物間の連携による調整余力の確保などのニーズに応え、地域や社会、国全体としてのエネルギーセキュリティの向上につながる。

しかし、現時点ではそのための有効な指標が定められておらず、そのための施策に関しても具体的な議論が進められていない状況である。一般的に、エネルギーに関する自立性を議論する際に用いられる概念としては、社会を対象とした「エネルギー自立社会 [18]」や建物として「エネルギー自立型建築 [19]」、設備システムとして「自立分散型エネルギーシステム」などがあり、定量的な評価指標としては、国単位の「エネルギー自給率」や建物単位の「再生可能エネルギーの自家消費率」、再生可能エネルギーに着目した「RER (Renewable Energy Ratio ; 再生可能エネルギー利用率) [4] [20]」などがある。「再生可能エネルギーの自家消費率」や「RER」は再生可能エネルギーの普及に寄与する指標ではあるが、いずれも割合が大きいかからと言って必ずしも建物のエネルギー自立性が高いとは限らない。例えば、自家消費率 100%ではあるが消費エネルギーに対して太陽光発電設備の容量が小さい場合や、RER の値は大きいが大部分を敷地外に逆送している場合などはエネルギー自立性が高いとは言えず、ZEB の建物としてのエネルギーの自立性を比較評価する指標が必要である。

そこで、本研究において、ZEB に関してエネルギー自立性を評価する指標を定め、その評価手法を提案するとともに実証建物において、その有用性を検証する。

次節以降で、その定量的定義および実証建物の評価結果、また応用事例をもって、評価手法の検証とする。

3.2 エネルギー自立性評価指標「エネルギー自立率」の提案

ZEB のエネルギー自立性を評価する指標として、エネルギー消費量に占める生成エネルギーの自家消費量の割合を、「エネルギー自立率(SER : Self-reliance Energy Ratio)」として、式(1)～(3)で定義する。エネルギー評価において汎用的な一次エネルギー換算値による建物全体のエネルギー自立性を総合的に評価する指標 (式(1) : SER_p) および二次エネルギーとして電力を対象とした自立性を評価する指標 (式(2) : SER_e)、熱を対象とした自立性を評価する指標 (式(3) : SER_h) をそれぞれ定義した。

それぞれの指標の意義および有用性を以下にまとめる。

$$SER_p = (G - E)/(C) \quad \dots\dots(1)$$

$$SER_e = (g_e - e_e)/(d_e + s_e + (g_e - e_e)) \quad \dots\dots(2)$$

$$SER_h = (g_h - e_h)/(d_h + s_h + (g_h - e_h)) \quad \dots\dots(3)$$

記号

SER_p	エネルギー自立率 (総合)	[-]
SER_e	エネルギー自立率 (電力)	[-]
SER_h	エネルギー自立率 (熱)	[-]
G	生成エネルギー	[MJ]
E	逆走エネルギー	[MJ]
C	消費エネルギー	[MJ]
d_e	: 配送電力量	[kW・h]
d_f	: 配送燃料量	[m ³]
d_h	: 配送熱量	[MJ]
e_e	: 逆送電力量	[kW・h]
e_h	: 逆送熱量	[MJ]
g_e	: 生成電力量	[kW・h]
g_h	: 生成熱量	[MJ]
s_e	: 敷地内エネルギー変換設備出力電力量	[kW・h]
s_h	: 敷地内エネルギー変換設備出力熱量	[MJ]

1) SER_p : エネルギー自立率 (総合)

建物が総合的にどれだけエネルギー自立しているかを定量的に表す指標。一次エネルギー換算による評価指標であり、建物毎または同一建物における季節や日時ごとに異なるエネルギー源構成比の影響を考慮し、複数の建物や季節、日時によるエネルギー自立性の違いの比較評価が可能である。

2) SER_e : エネルギー自立率 (電力)

建物が系統電源等外部の電力インフラからどれだけエネルギー自立しているかを定量的に表す指標。電力による評価指標であり、例えば、災害による停電時のBCP性能やDRに対応する能力を評価する際のひとつの指標となる。

3) SER_h : エネルギー自立率 (熱)

建物が系統電源以外の外部からのエネルギー供給インフラをどれだけ利用しているかを定量的に表す指標。熱による評価指標であり、太陽集熱設備や燃料電池やガスエンジン発電機、バイオマス発電設備、ボイラなど、敷地外から配送された燃料を敷地内でエネルギー変換する設備の導入や運用方法を検討する際、省エネルギーの観点だけでなく、エネルギー自立性の観点を加えた評価が可能である。今後、ZEBにおける熱エネルギーの取り扱いを議論していく上で、有用な指標になると考えられる。

3.3 エネルギー自立率による実績評価

3.3.1 検証概要

実証建物の運用データを対象にエネルギー自立率の実績評価を行う。対象は、2015年度の運用データとし、年間評価に加え、月別および季節代表日の時刻別に分析を行い、変動の傾向を把握する。

3.3.2 検証結果

1) エネルギー自立率の年間評価

実証建物の年間エネルギー実績に対して、エネルギー自立率を算出した結果は以下の通りである。また、参考までに太陽光発電の自家消費率および RER も算出した。

$$\begin{aligned} SER_p &= (480 \text{ [MJ/m}^2\text{]} - 329 \text{ [MJ/m}^2\text{]}) / 437 \text{ [MJ/m}^2\text{]} = 0.35 \text{ [-]} \\ SER_e &= (49.2 \text{ [kWh/m}^2\text{]} - 33.7 \text{ [kWh/m}^2\text{]}) / 49.2 \text{ [kWh/m}^2\text{]} = 0.37 \text{ [-]} \\ \text{自家消費率} &= (480 \text{ [MJ/m}^2\text{]} - 329 \text{ [MJ/m}^2\text{]}) / 480 \text{ [MJ/m}^2\text{]} = 0.31 \text{ [-]} \\ RER &= 480 \text{ [MJ/m}^2\text{]} / (480 \text{ [MJ/m}^2\text{]} + 286 \text{ [MJ/m}^2\text{]}) = 0.62 \text{ [-]} \end{aligned}$$

※なお、本実証建物には敷地内熱生成設備がない（燃料電池は、コージェネレーション設備であるが、発電効率が系統電源電力よりも高いため、演算上はモノジェネレーションによる電力生成設備とし、発生した熱は排熱扱いとし、生成/消費エネルギーとしては加算されない）ため、具体事例としての検証は行わないが、将来的には、例えば、太陽集熱器を新設する計画を検討する場合などに活用できると考えている。

上記結果より、エネルギー自立率（総合）は0.35であり、年間の集計ではエネルギー消費量全体の約1/3を生成エネルギーの自家消費で賄っている。エネルギー自立率（電力）においても、同様の結果であり、本建物においては、敷地内熱生成設備がバックアップ用のガスエンジン発電機のみであるため供給熱量が少ないため大差がなくなった。

太陽光発電電力の自家消費率は、例えば ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の評価などに用いられており、ZEH の運用実績をまとめた論文 [21] [22] によると、ZEH のボリュームゾーンである 4~5kW 程度の場合で自家消費率は 40~50% との推計値があり、事務用途である本実証建物はそれに比べ小さい値と言える。ZEH と ZEB を比較した場合に平日の消費特性を考えれば、ZEB の方が需要と供給が一致し、自家消費率は高いと考えられるが、蓄電池の運用や休日の利用状況などが異なるため一概には比較が難しい。RER に関しては 0.62 との値であるが、こちらも比較事例が乏しく、値の大小を考察するだけの事例が存在しないのが現状である。

以上より、本研究においては、エネルギー自立性を他建物と比較するのではなく、自建物のエネルギーフローを考えることに利用するものとし、季節別や時刻別の分析を行うことでその実態が把握できるとともに、エネルギーマネジメントにおいても重要な指標になると考えている。

2) 月別エネルギー性能分析とエネルギー自立率の評価

図 3.3-1 に 2015 年度の月別のエネルギー収支とエネルギー自立率(総合)、ピーク電力の推移を示す。月別のエネルギー収支では、5月を中心とした春季中間期のエネルギー収支が最大となり、秋季中間期よりもエネルギー収支が大幅にプラスである。これは、同じ中間期であるため消費エネルギー量に大差はないが、太陽光発電による生成エネルギー量の差である。夏期には消費エネルギーは増加するが、生成エネルギー量も多く、月積算のエネルギー収支は概ねゼロでバランスしている。一方、1月を中心とした冬期には生成エネルギーが消費エネルギーを下回る。これは内部発熱の減少による暖房負荷の増加が消費エネルギーを押し上げる一方、日照時間が短く、太陽高度が低いため、パネルに入射する太陽光が減り、発電量が少なくなるためである。月別のピーク電力の推移では、一般的に事務所ビルでは夏期に発生することの多い受電ピークが、冬期に発生しているのが太陽光発電を備えた ZEB の特徴のひとつである。

エネルギー自立率に関しては、エネルギー自立率(総合)の値を考察する。本建物の場合、5月、6月のエネルギー自立率が0.5を超えて高く、12月、1月が0.2程度と低い傾向が分かる。空調負荷が少なく、生成エネルギーが多い、春季中間期にエネルギー自立率が高く、空調負荷が多く、かつ生成エネルギーが少ない、かつその需給にギャップがある冬期にエネルギー自立率が低くなるのは、太陽光発電によるエネルギー生成を行っていることによる特徴である。エネルギー自立率は、エネルギー収支がプラスの月に高くなる傾向がみられるが、本実証建物の場合、例えば、10月はエネルギー収支の値がプラスであるのに対して、エネルギー自立率が低い傾向にあり、中間期には燃料電池で発電された電力を中心に消費エネルギーが賄われているという特徴が確認できる。なお、2015年5、6月は燃料電池がメンテナンスのため停止しており、10月と同様の傾向は確認されない。本分析により、年間エネルギー収支だけでは把握しきれない建物のエネルギー自立性という特性がエネルギー自立率という指標を用いることで分析できることを示した。

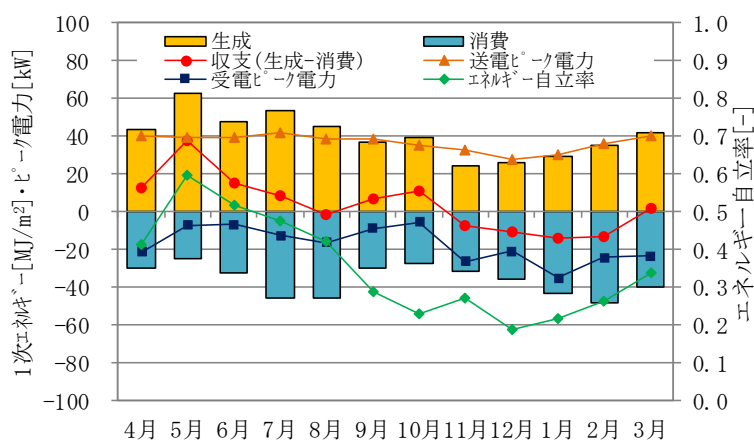


図 3.3-1 月別エネルギー特性とエネルギー自立率(総合)(2015年度)

3) 日時別エネルギーフローとエネルギー自立率によるエネルギー特性の分析

年間や月間積算値では把握できない日時別のエネルギー需給バランスやエネルギー自立性に着目することで、ZEB と一般建物のエネルギー特性の違いを明らかにし、より主体的な運用を行うための重点を把握する。そのため、本来は年積算値に対して適用されるエネルギー需給バランス図を、日時積算値に利用することでその挙動を確認する。各代表日は、週中日から晴天日の典型的ピーク負荷パターンの日を選んでいく。

① 夏期代表日の分析

図 3.3-2、図 3.3-3 に夏期晴天日の代表的な挙動をまとめた。太陽光発電(PV)電力は概ね日射量に比例し、6 時頃から 17 時台まで、逆送は 7 時台から 14 時台まで確認できる。空調は 3 時から予冷運転を開始し 19 時まで運転されている。

それ以外の夜間の空調消費は燃料電池の排熱回収ポンプで予熱運転を開始し 19 時まで運転されている。照明は、8 時台から点灯し、14 時頃から 19 時までの消費量が多い。コンセントは、7 時台から使用し、18 時頃までの消費量が多い。夏期に比べると執務時間が少し短めの傾向がある。一方、配送エネルギーの挙動としては、ベース電源として運転する燃料電池の発電量の不足分を補う形で商用電力が供給されている。また、この運転にともない燃料電池は定常的にガスを消費する。図 3.3-2 (下図) より、この日の需給バランスは、夏期晴天日の傾向として、一日を通じて生成エネルギーと消費エネルギーが比較的バランスしており、生成/消費エネルギーの量に対して、配送/逆送エネルギーの量が小さく、エネルギー自立率(総合)は 0.59 と高い。また、晴天時の受電ピークは 17 時台に発生していることが特徴である。

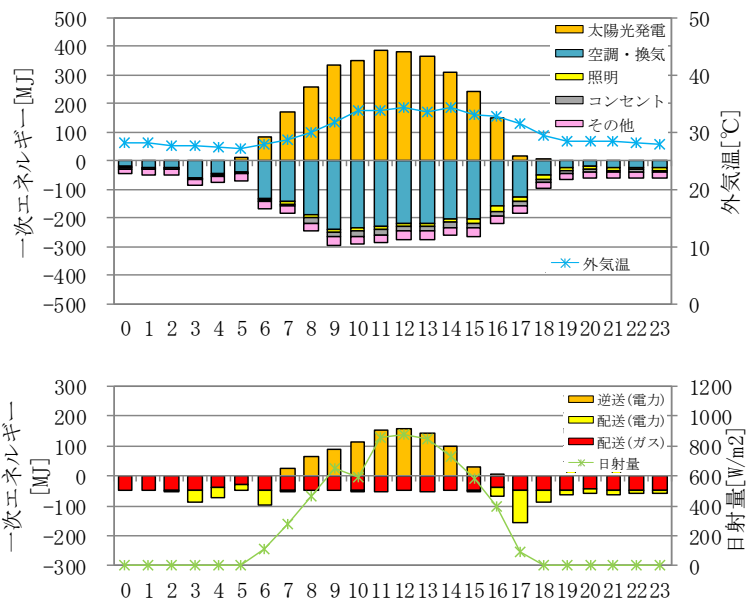


図 3. 3-2 夏期代表日エネルギー推移(2015/8/4(火))

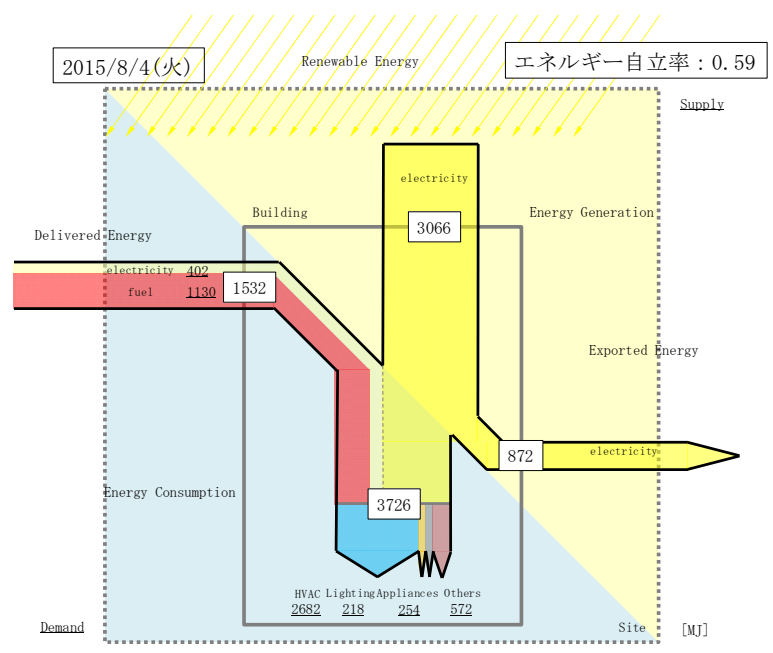


図 3. 3-3 夏期代表日のエネルギー需給バランス

② 冬期代表日の分析

図 3.3-4、図 3.3-5 に冬期晴天日の代表的な挙動をまとめた。PV 電力は 8 時台から 15 時台までと夏期に比べると短く、逆送は 9 時台から 14 時まで確認できる。空調は 6 時から予熱運転を開始し 19 時まで運転されている。照明は、8 時台から点灯し、14 時頃から 19 時までの消費量が多い。コンセントは、7 時台から使用し、18 時頃までの消費量が多い。夏期に比べると執務時間が少し短めの傾向がある。一方、配送エネルギーの挙動としては夏期同様燃料電池のガス消費に加え、商用電力が供給されているが受電ピークは明け方 6 時台となっている。夏期に比べて日中の逆送量が多い点や朝夕の商用電力使用量が多い点が特徴であり、エネルギー自立率(総合)は 0.33 である。

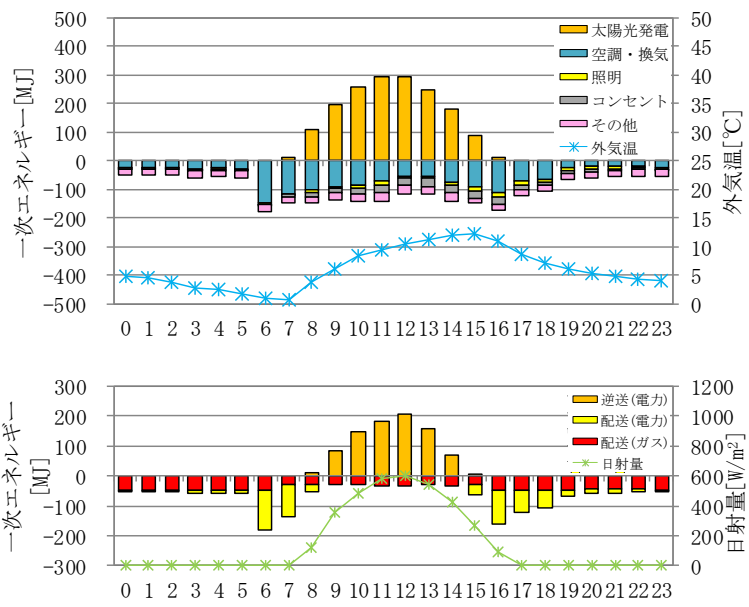


図 3.3-4 冬期代表日エネルギー推移 (2016/1/20(水))

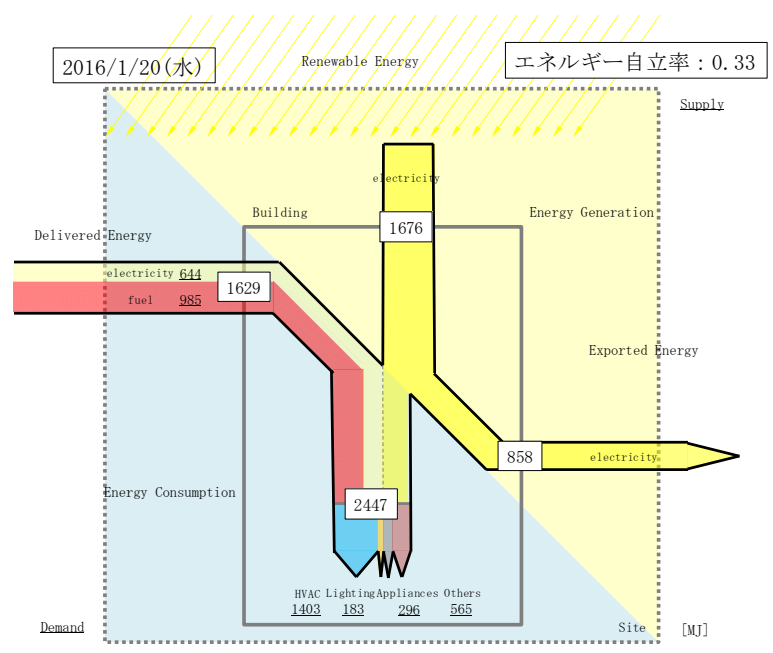
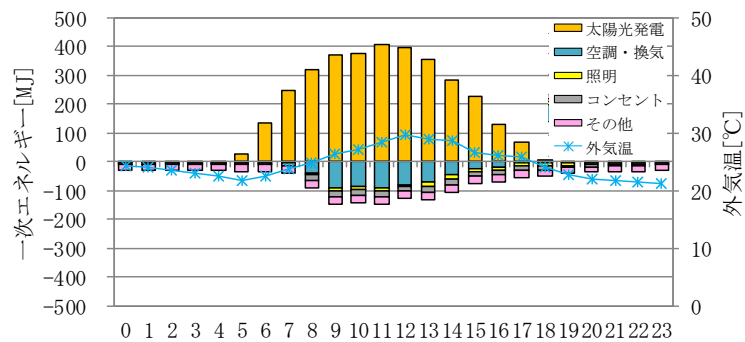
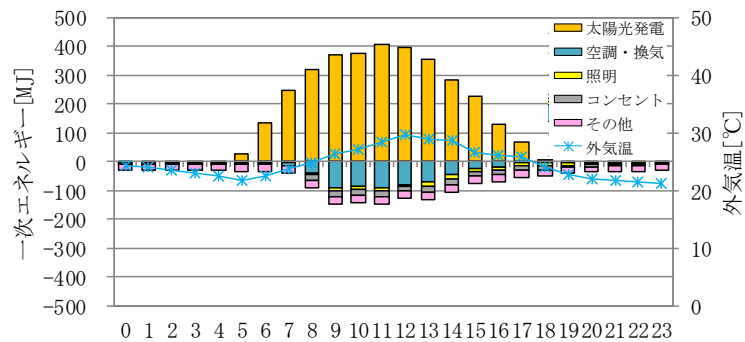


図 3.3-5 冬期代表日のエネルギー需給バランス

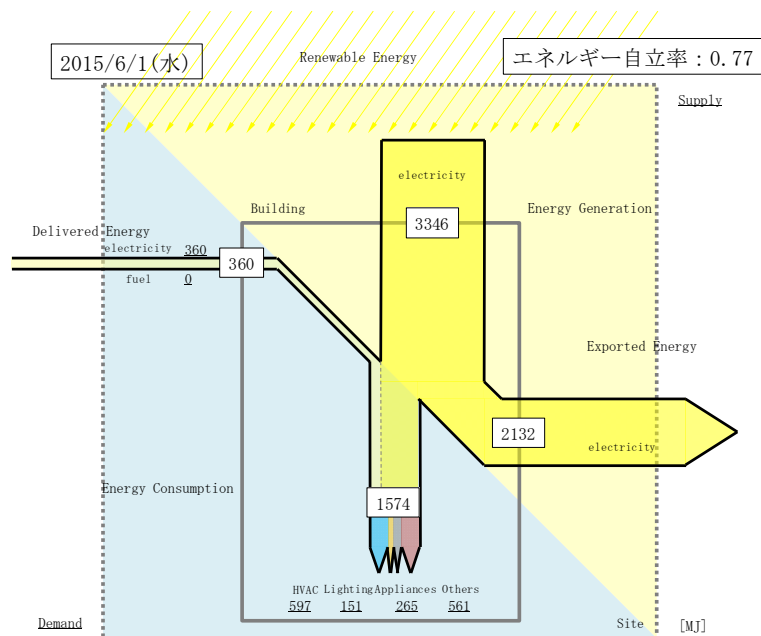
③ 中間期代表日の分析

図 3.3-6、図 3.3-7 に中間期晴天日の代表的な挙動をまとめた。夏至に近いので PV 電力は 5 時台から 18 時頃まで、逆送は 5 時台から 17 時台まで確認できる。空調は 8 時過ぎから 17 時まで自然換気で処理しきれない冷房負荷処理に使用されている。照明は、8 時台から点灯が確認でき、20 時までの消費量が多い。コンセントは、8 時台から使用が見られ 19 時頃までの消費量が多い。一方、配送エネルギーは燃料電池がメンテナンスで停止中のため商用電力により夜間の待機電力を賄っている。空調負荷が少なく特段の受電ピークはない。エネルギー自立率(総合)は 0.77 と非常に高い。



注 燃料電池はメンテナンスのため停止

図 3.3-6 中間期代表日エネルギー推移(2015/6/1(水))



注 燃料電池はメンテナンスのため停止

図 3.3-7 中間期代表日のエネルギー需給バランス

3) 月別エネルギーフローとエネルギー自立率によるエネルギー特性の分析

図 3.3-8、3.3-9 に月別のエネルギー需給バランスおよびエネルギー自立率（総合）を示す。本分析で年間積算や月別のエネルギー収支だけでは把握しきれない、細かなエネルギー源や消費用途の挙動把握が可能である。なお、2015 年は 3～6 月および 11 月において、燃料電池をメンテナンスのため停止している。

夏期の 7、8、9 月の傾向として、消費エネルギーに占める空調の割合が多い。また、そのエネルギー源は、空調負荷の大きい晴天日には PV 電力量も増えるため、主に都市ガス（発電排熱利用）および PV 電力により供給されていることが分かる。一方、冬期の 1、2、12 月は、消費エネルギーに占める空調の割合は夏期同様に多いが、そのエネルギー源は商用電力の割合が多くなっている。これは、空調負荷が大きい時間帯は明け方及び夜間であり、PV によりエネルギー生成が行われる時間帯とずれが生じ、PV 電力の供給割合が小さくなる傾向がある。逆に、冬期の晴天日昼間は空調負荷が小さいため電力消費が抑えられることで、逆潮量が増加し、エネルギー自立率が夏期に比べて小さくなる。中間期の 4 月、5 月、11 月は日照時間の長い 5 月は PV 電力の利用量が多く、比較して日照時間が短くなる 4 月、11 月は商用電力の割合が増える。

以上の結果より、本建物では燃料電池によるエネルギー供給をベースに、夏期は PV 電力の供給が増え、冬期は商用電力の供給が増える傾向があることが分かった。冬期の外気処理系統に燃料電池排熱を積極利用したり、蓄電池を活用して、建物内において需給バランスを整えることで自立性が高まると考えられる。

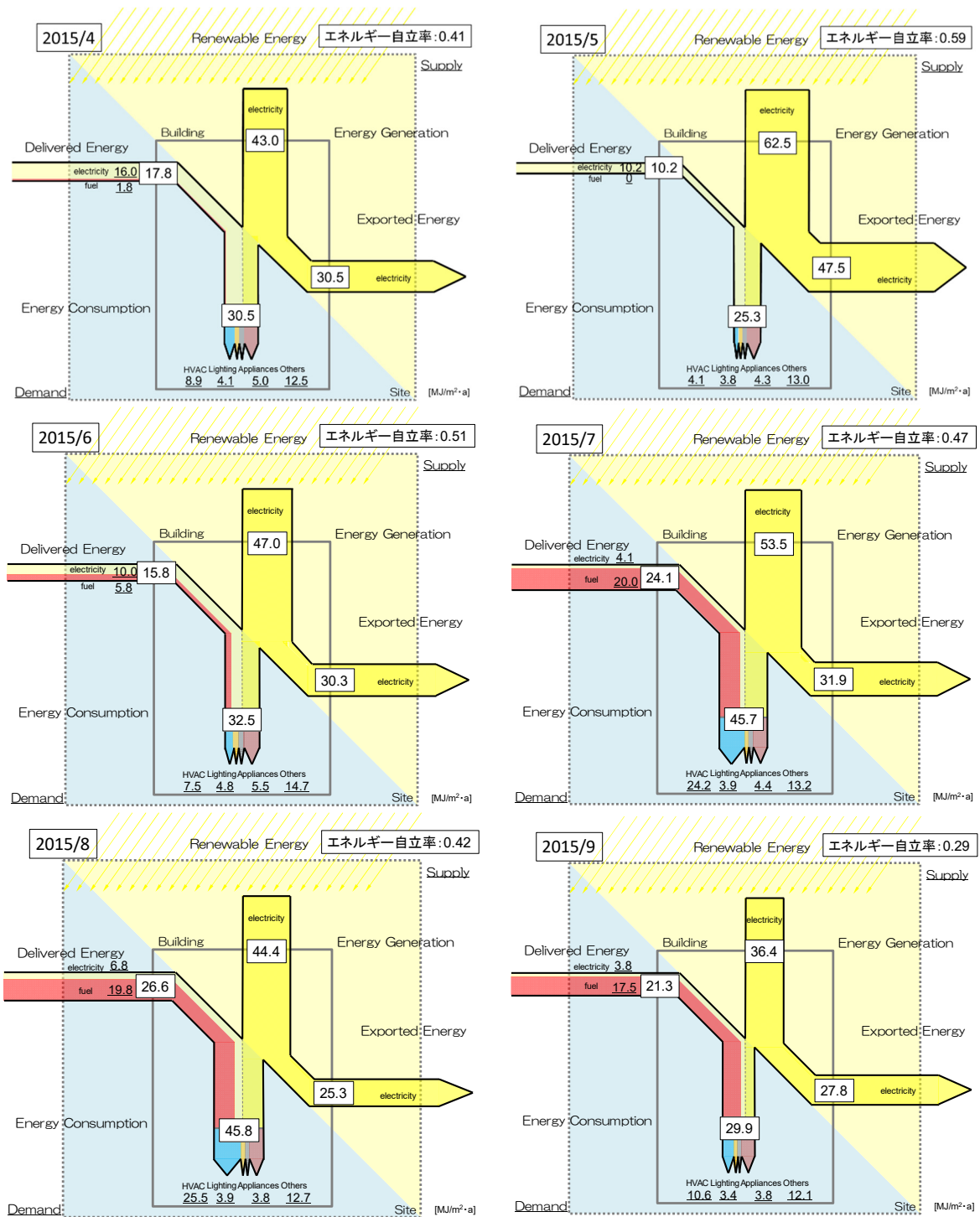
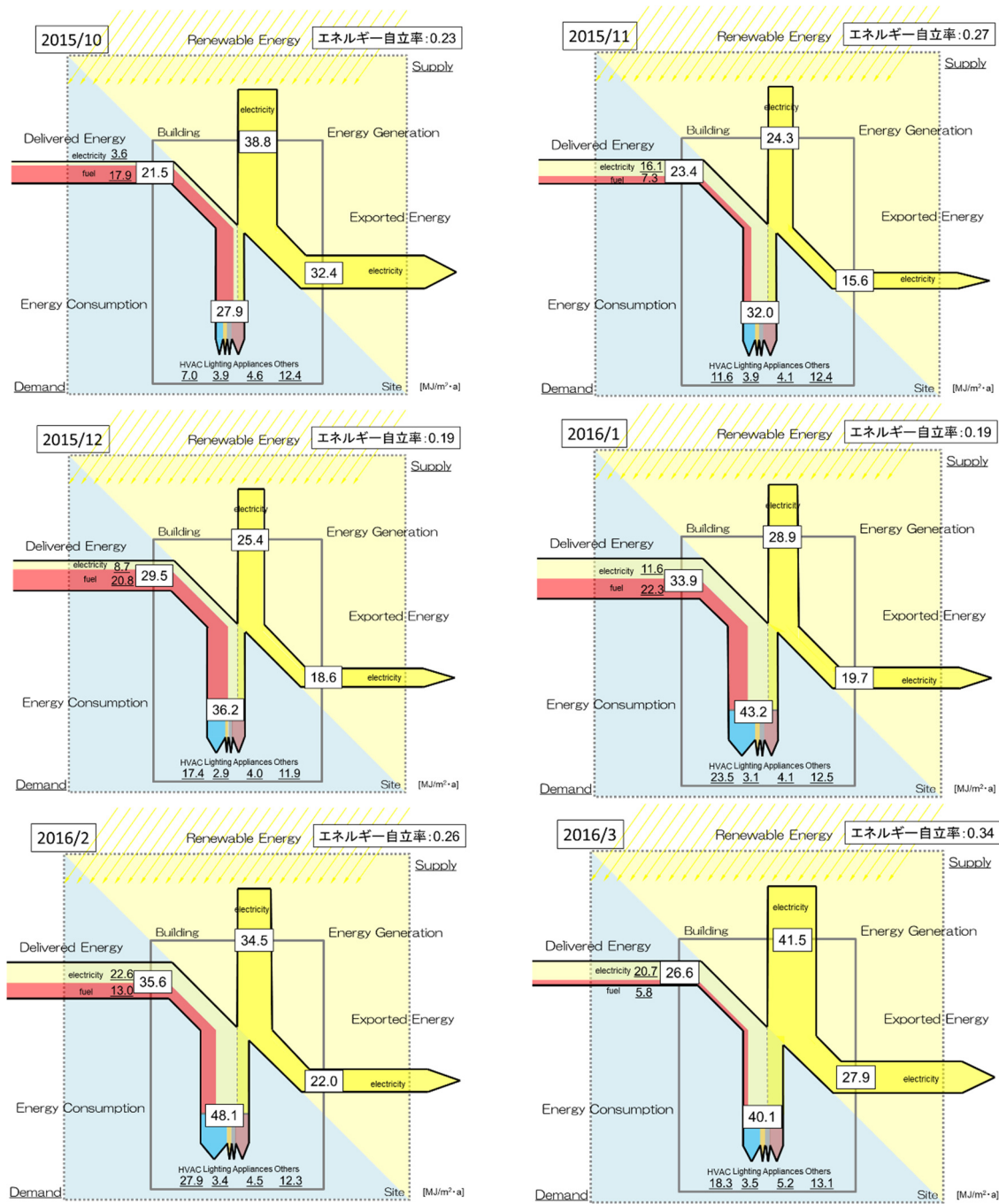


図 3.3-8 月別エネルギー需給バランス (2015/4~2015/9)



※2015/3～6、11は燃料電池はメンテナンスのため停止

図 3.3-9 月別エネルギー需給バランス (2015/10～2016/3)

3.4 エネルギー自立率の応用利用の検討

前節では、実証建物のエネルギー性能をエネルギー自立率による分析を加えながら、用途別、時刻別に詳細なエネルギーフローを把握した。この分析をもとに、実証建物に代表される ZEB がどのようなエネルギー特性を持つのかを把握するのにエネルギーフロー図を用いることの有効性を示した。一方、エネルギーフロー図を作成することは見える化による理解促進の効果がある。

また、定量的評価においては、エネルギー自立率が評価指標として有効であることも示した。

本節では、さらにエネルギーマネジメントの視点でエネルギー自立率の応用的利用を検討する。具体的には、蓄電池を利用したエネルギー自立性の向上を検討することで、エネルギー自立率を基に評価することの有用性を検証する。

3.4.1 蓄電池を利用したエネルギー自立性の向上検討

実証建物は非常時のバックアップ電源として蓄電設備を保有しているが、現状では、年間エネルギー収支を向上させることを目標として建物を運用しているため、充放電ロスを最小化することを優先し、常時は積極的な充放電は行わない運用(満蓄待機状態)としている。しかし、エネルギーセキュリティ強化の観点からエネルギー自立率を向上させることが優先される場合、その手段として、蓄電池を利用する運用が考えられる。余剰発電電力を蓄電し、不足時間帯に利用する需給調整運用である。蓄電設備によるエネルギー自立性の調整性能を検証するため、実運用データを用いた試算として、蓄電池容量別にエネルギー自立率への影響を試算した。蓄電池による需給調整機能として、1時間ごとの受電・送電電力量データに基づき、前時刻の余剰電力を次時刻の不足電力分にシフトする運用(蓄電池の充放電ロスは各5%を想定)とし負荷予測制御は考慮しないものとする。

図 3.4-1 に、実運用データ(蓄電池運用無し)を基準として、蓄電容量別の試算結果を示す。エネルギー収支、受電ピーク電力、送電ピーク電力を併記して示す。本建物のエネルギー特性を前提とした場合、蓄電容量としては、100kW・h 程度までエネルギー自立率の調整効果が期待でき、エネルギー自立率は、0.35 から 0.57 まで向上する。蓄電容量を大きくすることで、受電・送電ともピーク電力はほとんど変わらない結果であるが、これは今回試算した制御がピークカット制御(ピーク発生時間帯に蓄電池を空にしてスタンバイしておき、蓄電を行う制御)ではないためである。

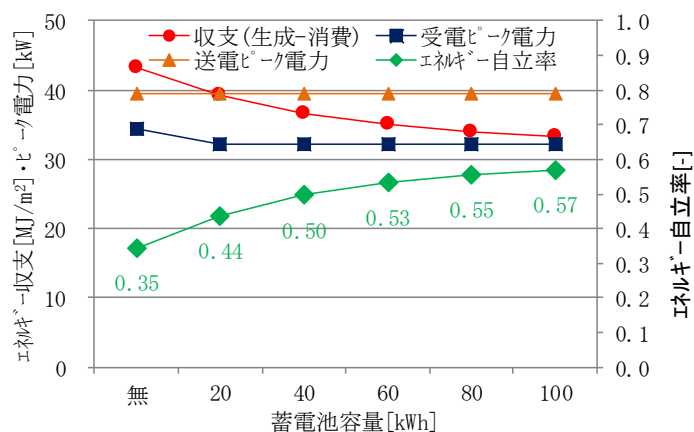


図 3.4-1 蓄電池容量別年間エネルギー収支とエネルギー自立率

一方、エネルギー自立率は向上する反面、充放電のロスにより、年間エネルギー収支は、蓄電容量 100kWh の場合で、約 10[MJ/m²年]減少しており、年間エネルギー消費量が 437[MJ/m²年]であるのに対して、約 2%の充放電ロスが発生する結果となった。

蓄電池を利用したエネルギー自立率の向上と正味でのエネルギー消費量（エネルギー収支）はトレードオフの関係にあるが、本試算のようにエネルギー自立率を用いてエネルギー自立性の観点を加えることで、目的に応じた蓄電池の容量選定の定量的評価が可能になる。エネルギー自立性に対して、蓄電池の動的な運用の効果が確認されたことで、蓄電池運用の最適化という課題に対して、正味のエネルギー消費量、ピーク電力、エネルギー自立性の 3つの観点を考慮した負荷予測制御等に発展が期待できる。

また、同様な目的のために、蓄熱によるエネルギー自立性向上や未利用エネルギーである各種熱エネルギーやバイオマス発電・ボイラ設備の導入検討をするにおいてもエネルギー自立率による性能評価手法は有効である。

3.5 まとめ

本章では、ZEB のエネルギー自立性評価手法として「エネルギー自立率」を利用した性能分析手法を提案し、実証建物の運用データを評価した。

年間積算でのエネルギー収支だけでなく、時刻別や季節別のエネルギーフローに着目した評価が可能になり、日常的なエネルギーマネジメントへの活用に加え、DR 対応やエリア内エネルギー融通等を想定したより積極的なエネルギーマネジメントを行う際に有効な指標である。具体応用例としては、蓄電設備や蓄熱設備、太陽光発電の容量検討やその他、多様な再生可能エネルギー源の活用を検討する際に、従来の年間エネルギー収支向上やピーク電力のシフト・カットだけでなく、エネルギー自立性を観点に加え、設備の設計や運用計画の定量評価を行う際に役立つ。

今後の課題は、本手法を活用し、各種エネルギー生成・貯蓄設備の導入検討事例を増やすこと、および ZEB 計画段階においてエネルギー自立率を算出するためのエネルギーシミュレーションプログラムを開発することである。

4. 日常的エネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築

4.1 はじめに

本章では、第2.5節を受け、提案②ZEBの日常的なエネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築を行う。

BEMSの普及に伴い、エネルギーマネジメントに対して最低限必要なデータの計測は常識化しつつある。ZEBに代表されるようなエネルギー性能の高い建物においては、建物の運用管理に役立てることを目的に、気象データから室内環境、各設備機器の設定や状態、人検知や室利用情報等まで幅広く詳細計測が浸透しており、エネルギーの計量データと併せて建物のライフログとも呼べる膨大なデータ（以降、建物ライフログ）が蓄積されている。また、AI・IoT分野の技術の進歩・汎用化に伴い、機械学習等を用いたデータ分析手法をBEMSデータに適用し、不具合診断やエネルギーマネジメントに役立てることが可能になってきている。

一方、現状の既存建物に対するエネルギーマネジメントは、大規模で複雑な建物や複数の建物群では先進的な技術や高度な技術者等が投入されているが、個別の中小規模建物に対しては技術や人材の不足やこの分野への投資の必要性の観点から導入が進んでおらず、将来的に、ZEBが普及した場合に、それらを持続的に改善運用するための仕組みが構築されていない。また、特に自然エネルギーを積極的に利用し、気象や建物の利用状況に応じて柔軟な運用がなされるZEBにおいては、エネルギー管理はより高度化させる必要がある。

この解決のために、個別の中小規模建物に対して、クラウドBEMS等の遠隔管理システムを利用したデータ駆動型エネルギーマネジメントの仕組みづくりが必要である。

そこで、本研究では、日常的なエネルギーマネジメントのためのデータ駆動型のエネルギー性能の把握と不具合診断手法を構築し、その有用性を検証する。

図4.1-1にエネルギーマネジメントプロセスにおけるエネルギー管理業務における本研究の対象範囲を示す。本プロセスの整理においては、コミッシングプロセス[23]や従来からエネルギーマネジメントを行う際に指針とされてきたPDCAサイクルに対して、近年、変化が多様で試行錯誤が必要な事象に対してその有効性から導入が進むOODA（ウーダ）ループ[24]に基づき、プロセスの特性を定義した。OODAループが求められる背景には、マネジメントにおいて、高速化や変化が前提であること、対象が多様化していることなどが根底にあり、ZEBを中心としたエネルギーマネジメントにおいても、同様の視点が必要である。今回の研究で対象とするのは、Observe（観察）およびOrient（状況把握・判断）のプロセスに該当し、膨大な建物ライフログからエネルギーマネジメントに必要なデータを効率よく抽出し、まず、対象とするZEBのエネルギー特性を把握すること（第3章のようなエネルギー分析）、および建物全体を俯瞰した視点で日常的なエネルギーマネジメントとして初期不具合診断を行う、状

況把握までのプロセスを対象とする。エネルギーマネジメント全体で言えば、前半部分の仕組みづくりに注力することで、その後の具体的で高度な本不具合診断へのプロセスを効率化し、人的資源や機械がより有効活用できると考える。

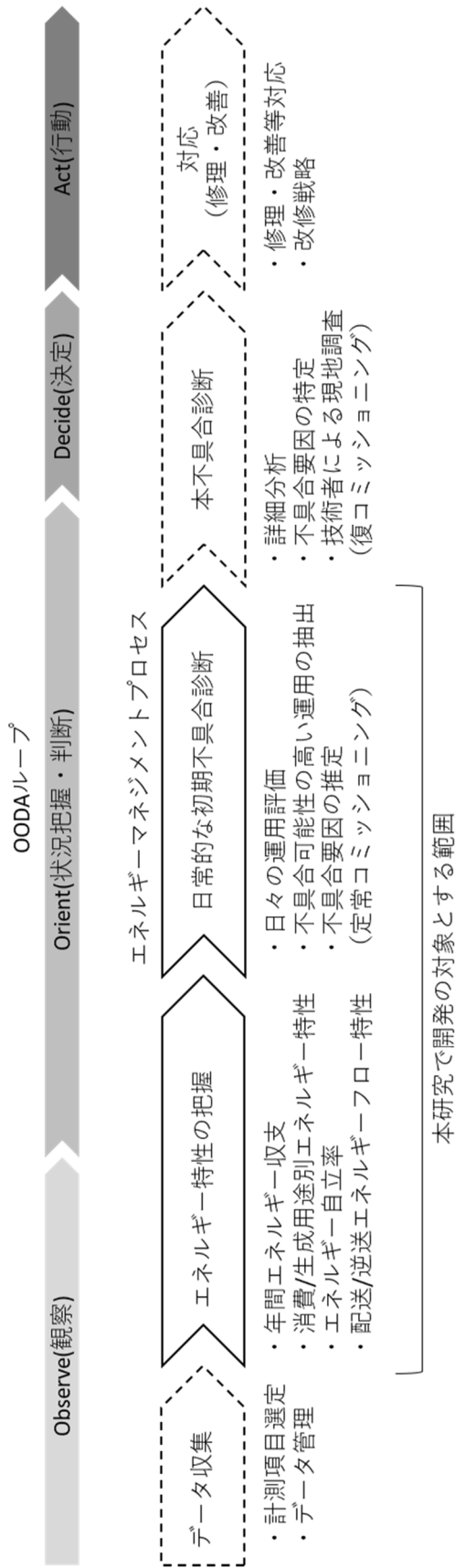


図 4.1-1 OODAループに基づくエネルギー管理プロセスの整理と本研究の対象範囲

4.2 不具合診断に関する従来研究および機械学習による異常検知手法

本研究では、技術進歩により工学分野での実装が進んでいる機械学習に着目し、本研究においても、その利用を試みた。具体的には、異常検知手法を用いて、建物全体のエネルギーを対象にその分析と初期不具合診断手法の構築を目指す。機械学習を用いることによって、従来の例えば空調設備等の専門分野における高度な分析以外に幅広い分野に初期段階で適用可能な分析が重要であると考えており、膨大なデータの中から、例えば不具合の可能性が高いデータを一次処理（ある程度の精度で注目すべきデータを提示してくれる）することで、専門知識を持った管理技術者等が本来分析が必要なデータに効率的にたどり着くことができるような不具合診断手法を構築するのが狙いである。

4.2.1 従来研究

建物のエネルギーマネジメントに関する既往研究としては、空調システムの不具合診断を目的とした研究 [25] [26] [27] [28] や多棟管理のために各建物のエネルギー特性の把握を目的とした研究 [29] がある。前者は、本研究で、本不具合診断と位置付けた診断手法であり、エネルギーシミュレーションを利用した高精度な診断を目的としている。実運用段階における実行に対しての課題は、シミュレーションモデルの構築が前提となること、および建物管理者が日常的に操作するには構築されたモデルの専門性が高い点がある。後者は、建物ごとの特徴把握や建物間の相对比较が目的であり、日々の建物運用や設備機器における不具合にまで言及することは困難である。この両者のプロセスを繋ぐための仕組みづくりが本研究の目的となる。

また、従来研究では建物のエネルギーマネジメントを行う際に、全体のエネルギーに占めるエネルギー消費割合の大きい空調設備を中心に不具合診断のための各種手法が考案されてきた。一方、ZEB を運用する際には、空調設備だけでなく建物全体のエネルギーマネジメントが第一であること、およびそのためには設備機器の運用や不具合に関する視点だけでなく、例えば、人の在室状況や室の利用状況などを考慮し、対象とする空間の目的に応じたエネルギーマネジメントと、そのための不具合診断手法が求められる。

また、先に述べたようにクラウド BEMS に代表されるような遠隔管理を前提とする場合、必ずしもその建物の運用状況や設備仕様に関して熟知した管理技術者が対応するわけではないため、建物ライフログとして膨大に記録された情報の中からそれらを効率的に処理して、建物のエネルギー特性を把握するデータ駆動型の分析手法が求められる。俯瞰的な視点で、建物のエネルギー全体の特性を把握し、建物の多様な使われ方や自然エネルギーの利用状況などの理解と併せて、エネルギーマネジメント戦略や不具合診断に繋げていくことが求められる。

4.2.2 機械学習による異常検知手法の整理

表 4.2-1 に、一般的な機械学習を用いた異常検知手法を整理する。異常検知手法の分類として、「ルール学習」、「分類」、「回帰」、「クラスタリング」に大別し、欠く手法

の概要と代表的な手法を例示した。基本的には、学習用のデータ群から何らかの手法で「正常」を定義し、未知のデータに対して「正常」の定義との合致具合により「異常」を判定するものである。学習用のデータ群の各データに予め正常・異常のラベルが貼られている状態であれば、教師あり学習と呼び、各データに対する正常・異常がわからない状態であれば、教師なし学習となる。現実のデータに関しては、そのようなラベルが予め貼られているケースは珍しく、基本的には教師なし学習（もしくは学習用のデータ群は概ね正常であるという前提）において分析を進めることになる。

表 4.2-1 機械学習を用いた異常検知手法の分類 [30]

	概要	主な手法
ルール学習	正常データ（or 異常データ）のルールを学習し、未知のデータがルールから外れるかで判定	RIPPER [31]
分類	予め正常・異常が識別されたデータを学習し、未知のデータを正常・異常に分類して判定	SVM [32] [33] RF [34]
回帰	正常データから回帰モデルを構築し、未知のデータがそのモデルから外れるかで判定	線形回帰モデル
クラスタリング	教師なし学習で、データの集合を似たデータごとのクラスタに分け、未知のデータが既存のクラスタから外れるかで判定	ウォード法 k-means 法 [35]

4.3 不具合診断手法「パターン分析による不具合診断」の提案

4.3.1 不具合診断手法の選択

本研究では、日常的なエネルギーマネジメント業務における「エネルギー特性の把握」および「初期不具合診断」を対象に、クラスタリングを用いたパターン分析による不具合診断手法を提案する。

今回、クラスタリングを異常検知手法として採用する理由は、教師無し学習であるため、データの特性があまり把握できていない状況であってもその特性を把握することが可能である（データの要約性 [36]）点が、クラウドBEMS化が進んでいく中で、エネルギー管理者が建物のエネルギー特性を把握する上で有用であると考えた。建物のエネルギー特性が十分に把握できていない状況においても、クラスタリングを行うことで、その消費パターンが分析でき、管理技術者等がエネルギーマネジメントを行う際に、その理解を助ける。

一方、探索的手法であるが故の課題として、分析結果が最初にランダムに選んだ初期値の影響を受けること（初期値依存性）やクラスタ数の設定（いくつのクラスタに分けることが適切なのか）には、試行錯誤的な検討が必要であり、データの特性や量に応じて適切なクラスタ数を定める必要がある（機械的な完全自動化はできない）。

本課題に対して、実運用データによる検証でどのような工夫でどの程度までの対応が可能なのかを探り、汎用性を維持しながら初期不具合診断に必要な精度や機能を併せ持つ診断手法として提案する。

本手法の具体的な利用シーン（エネルギーマネジメント業務における位置づけ）は、日常的なエネルギーマネジメントの中で、日々の不具合診断であり、まずは膨大な建物のライフログの中から、不具合の可能性のあるデータをどう絞り込んでいくかの初期不具合診断に役立つと考えており、中小規模建物で管理者が日報データを目視確認するような運用管理が行われている建物に対して、一日の業務開始時に前日のエネルギー状況を自動的に分析し、その要約としての報告と不具合可能性の高い運用があった場合には初期診断結果として通知するという運用を想定している。

4.3.2 パターン分析による不具合診断の手法

本研究におけるパターン分析から不具合診断までの流れを図 4.3-1、図 4.3-2 に示す。クラスタリングの手法としては、一般的な k-means 法に対して、初期値依存性に対する改良がなされた k-means++法 [37]を使用する。分析に用いるエネルギー消費の実績データに対して、事前準備として欠測等処理や不具合データ定義（精度検証のために予め不具合データを抽出し異常ラベルを貼っておく）を行った上で、モデル学習段階とモデル検証段階に分けて、分析を行う。

なお、エネルギーマネジメントにおいて主対象となるのは例えば照明の消費電力のようなエネルギーの時系列データであり、基本的には時刻ごとの値は 0 から定格出力まで任意の値を取り得るが、前後の運用の状況や日・週・季節的な周期性を持つため、周期性を考慮できる分析手法を選ぶことが望ましい。また、時系列データを取り

扱う場合には、データの時刻的な前後の連続性が重要な意味を持っており、動的な異常検知（例えば、時系列データに対して、異常となる変化点を検知するなど）の手法が用いられることも多い。しかし、本目的においては、できるだけ簡易な手法で分析を行いたいこと、およびその分析結果がエネルギー管理者等の技術者に理解しやすい形で提示されることが大切であると考え、データを1日単位(0:00~23:59)で区切り、1時間平均とした24次元のデータとすることで静的な異常検知（外れ値検知）として取り扱う。

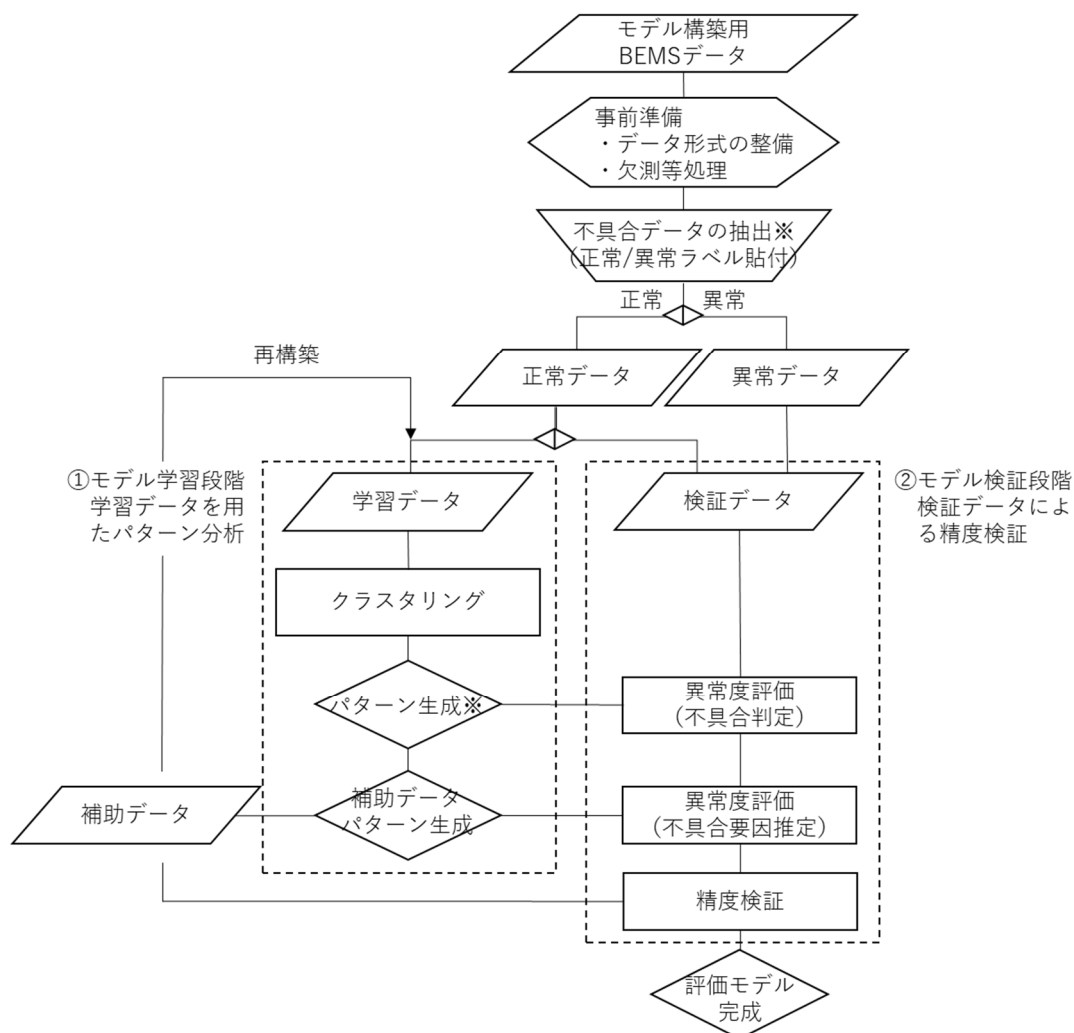
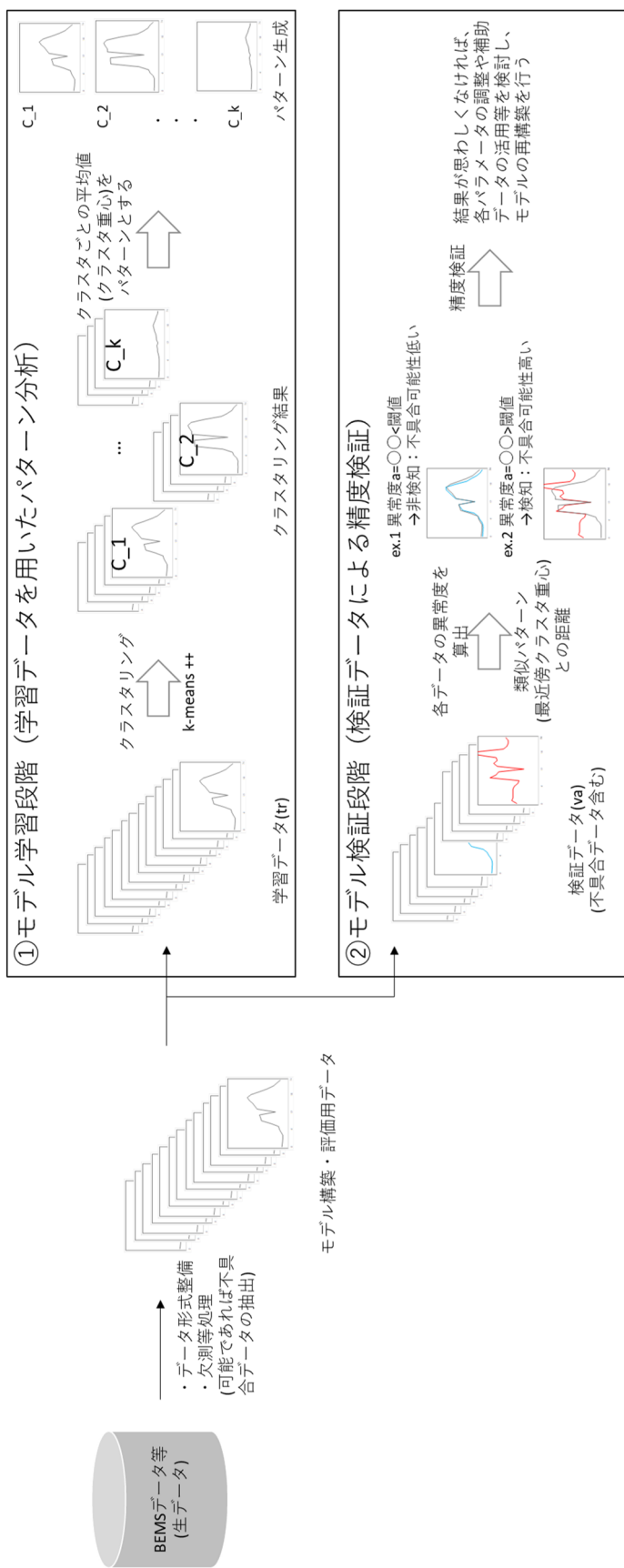


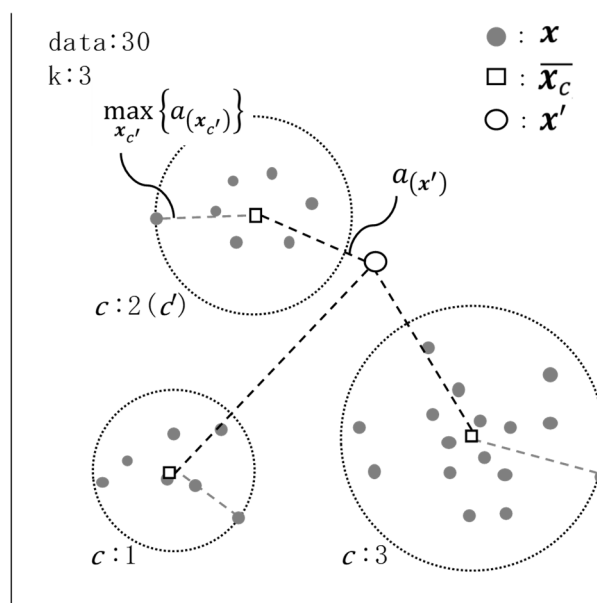
図 4.3-1 不具合診断モデル構築フロー



※本研究では、上記診断モデルの構築・評価までを対象とするが、実装段階においては「モデル運用段階」が本番であり、日々の運用データに対して本モデルを使用した不具合診断を日常的なエネルギーマネジメントとして継続的に実施 (分析手順は②と同様であり、運用データが蓄積されたら適宜診断モデルを要再学習)

図 4.3-2 パターン分析および不具合診断・精度検証の流れ

図 4.3-3 にクラスタリングのイメージ（データ数：30、次元数：2、クラスタ数（ k ）：3 の場合）と、その結果の異常判定のために用いる異常度の定義を示す。複数のデータ群に対して、データ間の距離に基づき、クラスタが自動生成し、未知のデータ（例： x' ：検証データ）に対して、クラスタ重心との距離により、異常度を採点し、その大小による異常判定により不具合診断を行うといった流れである。



記号 a : 異常度、 x : 学習データ、 x_c : クラスタ重心、 x' : 検証データ
 c : クラスタ番号、 c' : 最近傍クラスタ番号

図 4.3-3 クラスタリングのイメージ異常度の定義 ($k=3$)

なお、本研究において不具合診断の対象とする不具合とは、従来の設備機器やシステム制御の異常や故障などの設備的不具合だけでなく、照明や空調の消し忘れから制御設定値の過度な調節など利用者の不適切と考えられる運用も不具合検知の対象として取り扱う。

本手法では、不具合診断モデルを学習段階と評価段階に分けて構築する。

1) 診断モデルの学習段階

学習段階は、既存データに基づき不具合診断の基準を生成する段階であり、評価段階は生成した基準と判定閾値の精度を検証する段階であり、それぞれに専用のデータ群を用意してモデル構築を行う。本研究では、エネルギーマネジメントにおける不具合診断を目的とするため、1日周期のエネルギーの消費パターンをクラスタリングによって生成し（以降、パターン分析と呼ぶ）、未知のデータをそれらのパターンと比較することで、似ていれば正常（不具合可能性が低い）、違っていれば異常（不具合可能性が高い）と判定するものとした。学習段階では、学習データ群をクラスタリングにより、任意の k 個のクラスタに分類し、各クラスタの重心（＝平均値）を算出するこ

とで不具合診断の基準となる消費パターンを生成する。本研究では、このプロセス全般をパターン分析と呼ぶ。

2) 診断モデルの検証段階

検証段階では、各検証データの最近傍クラスタ重心（類似パターン）を求め、その距離を異常度と定義する(式(1))。

異常度は、予め閾値を設定しておき、その閾値を超えた場合に異常として検知する（不具合の可能性のあるデータとして、診断対象とする）。本研究では、検証データの異常度の閾値を、式(1)で求めた最近傍クラスタ内におけるクラスタ重心と各学習データとの距離の最大値として設定し、その値を上回る場合に異常として検知する(式(2))。したがって、本式により定義される異常とは、正常と思われるデータ群と比較して、その逸脱度合い（距離）が大きいものとなる。

$$a_{(x')} = \min_c \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^{24} (\bar{x}_{c,i} - x'_i)^2} \right\} \quad \dots\dots(1)$$

$$a_{(x')} > \max_{x_{c'}} \{a_{(x_{c'})}\} \quad \dots\dots(2)$$

記号 a : 異常度、 x : 学習データ、 \bar{x}_c : クラスタ重心、 x' : 検証データ
 c : クラスタ番号、 c' : 最近傍クラスタ番号

4.3.2 分析プロセスの概要と想定される課題

図 4.3-3 に不具合診断モデルの構築フローに事前に想定される課題を整理して示す。クラスタリングによる異常検知手法において一般的に課題とされる項目を、BEMSデータを用いて不具合診断を行う本構築手法に重ねて表記し、プロセスの各所で解決手段を検討する。課題は、事前準備段階のデータ形式の選定から、最後は本手法の汎用性確認まで各所にあるが、実運用データに対する実証検証を行うことで、運用段階のエネルギーマネジメントに適した解決策や対応方法を選定していく。なお、分析プロセスの各所(※)に、管理技術者や分析技術者の結果確認やパラメータ設定を要する段階を設定しているが、これは技術的に自動化が難しい点や管理技術者が確認を行った方が良くと考えられるプロセスである。

【想定される課題】

- 4-①：学習データ作成時に不具合データを除く方法
- 4-②：クラスタ数の決定方法
- 4-③：異常度閾値の設定
- 4-④：補助データの活用方法
- 4-⑤：精度（正解率）による構築モデルの採否判断基準
- 4-⑥：不具合診断手法としての汎用性検証

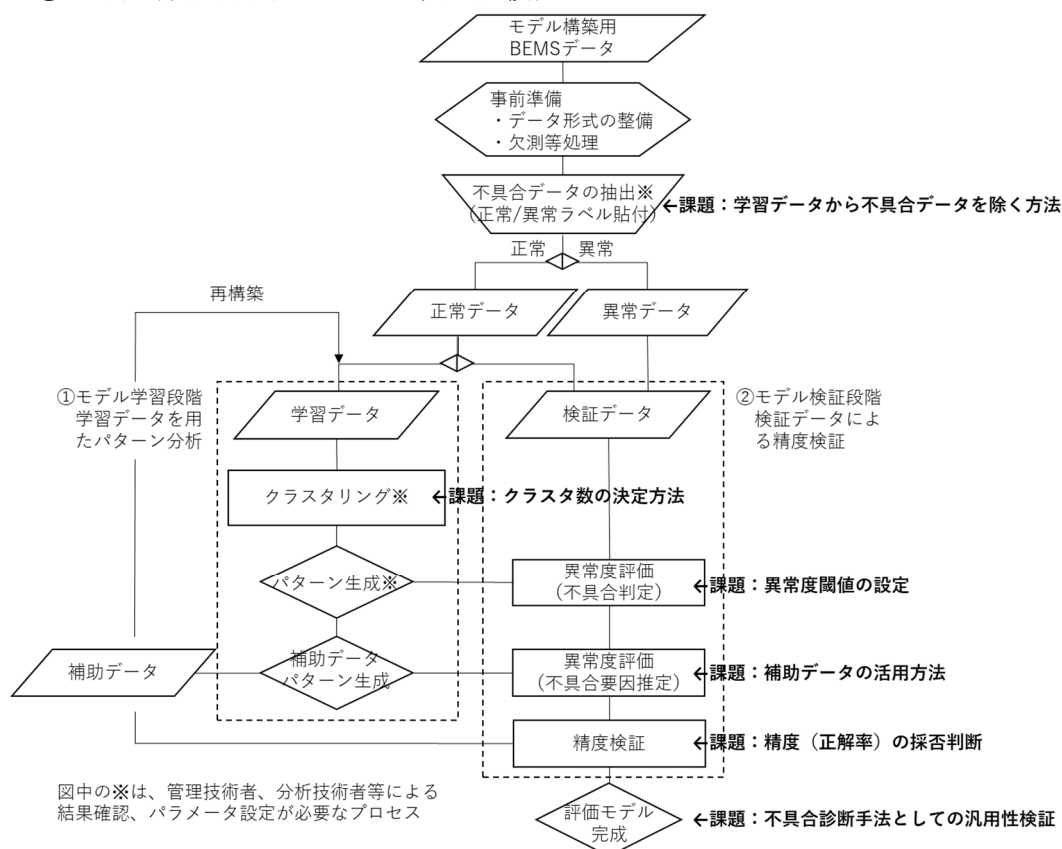


図 4.3-4 不具合診断モデルの構築フローの各工程において想定される課題

本研究においては、まずは、基本性能を確認するため、実証建物の照明消費電力データに対して、パターン分析による不具合診断手法を適用する。照明データを用いるのは、建物管理者にて予め不具合の大部分を把握しており、精度検証を行う際の各データが不具合であるかの識別（正常/異常ラベルの貼付）が行いやすかったためである。さらに、精度向上のため電力データ以外の補助データの活用や、実用化に向けた学習データの作成手法を検討し、その有効性について検証を行う。

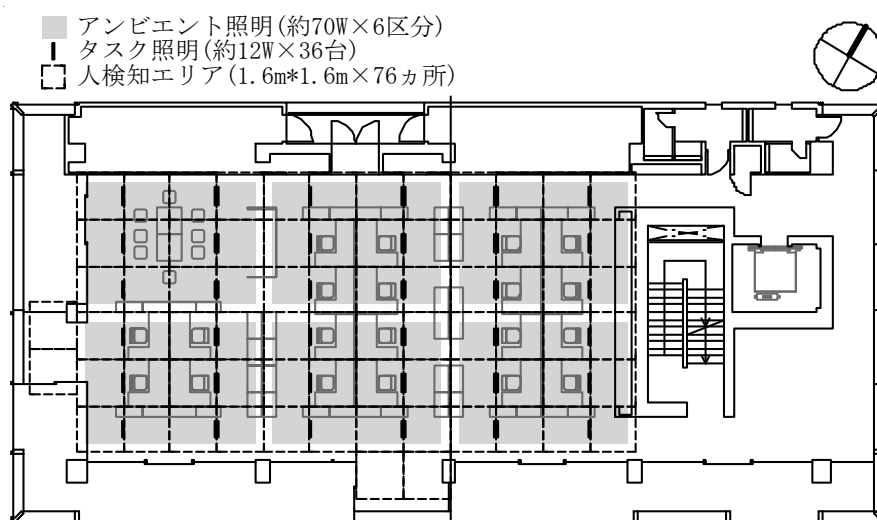
また、照明消費電力データに対する検証で、有効性が確認できた手法を「パターン分析による不具合検知診断」として構築し、予め不具合が特定されていない空調消費電力データに適用することで、実運用段階における性能の検証と効用を試験する。

4.4 実運用データ（照明エネルギーデータ）による検証

4.4.1 分析概要

本手法の基本性能を確認するため、実運用データのうち、予め不具合データの抽出がしやすく、かつ消費パターンが複数存在すると考えられるデータ群である実証建物2階の執務室(執務エリア (約 200m²) および共用部含む)の照明消費電力データを選定した。図 4.4-1 に2階平面図および執務エリアの照明区分、器具配置、人検知エリアを示す。照明設備としては、低照度タスク・アンビエント照明システムを開発・採用しており、アンビエント照明は照度センサによる調光制御、タスク照明は人検知センサによる発停制御を行っている。主採光面は南東であり、晴天時午前中には昼光利用による大幅な照明電力の削減がなされる。また、人検知制御により、在所状況に応じて照明電力の削減がされる点も特徴である。執務室全体を低照度化していることもあり、照明消費電力に対する調光制御、人検知制御の影響が大きく、一般事務所建物の照明消費電力データと比較すると、日照や在所状況に応じた照明消費電力の時刻変動、季節変動が大きい(ただし、消費電力は小さく、執務エリア平均で2W/m²以下である)。

分析対象期間は、不具合の発生頻度が多かった運用1年目(2014年6月~2015年5月)の365日分とした。



※消費電力はアンビエント 200lx+タスク 100lx の場合

図 4.4-1 2階平面図および照明区分、器具配置、人検知エリア

分析対象データは、本研究の目的であるエネルギーマネジメントにおける初期不具合診断の目的に照らし合わせ、設備機器の不具合を対象とした場合のリアルタイム性を追求した不具合診断ではないことを考慮し、また既往研究 [38]などを参考に1日単位で区分することとした。BEMS から取得した1分間隔のデータから、正時ごと(0時、1時、2時・・・)の1時間平均値とし(0:00~0:59の平均値を0時の値とする)、1日分のデータを1セット24次元のデータとして取り扱うものとした。

基本検討の分析フローを図 4.4-2 に示す。分析の事前作業として、対象データ 365 日分を不具合でないデータ、不具合データ、欠測データに分類した。本プロセスは、不具合診断手法における不具合の定義および評価モデルの精度検証を行う重要なプロセスであるため、本基本検討段階においては、管理技術者の知識や経験、意見などを踏まえながら、365 日分のデータ全てを確認し、正確性を重視して、不具合日の抽出およびその要因を整理した（表 4.4-1）。本研究における不具合診断では、機器故障や制御異常などの設備的不具合だけでなく、例えば、照明のつけ忘れや消し忘れ、室温や照度の過剰な設定など不適切な運用もその対象として取り扱うこととした。具体的には、建物管理記録やエネルギーの消費推移の目視確認等により不具合日を抽出し、a_1、a_2、a_3 の要因別に不具合ラベルを持ったデータとして整理した。また、事前に、対象データの中に大清掃・実験準備等による早朝作業日データが含まれていることが確認されたので、このデータは事象としては不具合ではないが異常データとして検知される可能性が高いため、特異日（a_4）として不具合データに含めた。

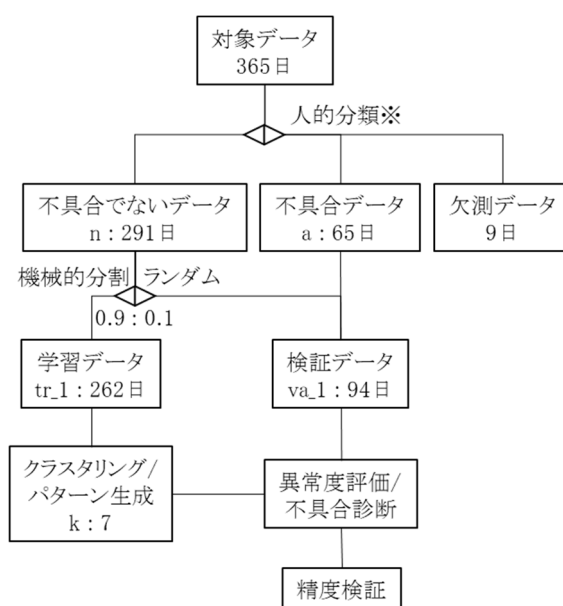


図 4.4-2 分析フロー（基本検討）

表 4.4-1 不具合日（特異日含む）の抽出と要因の分類

No.	不具合日・特異日の要因	[日]
a_1	調光制御不具合(照度/人検知制御異常)	14
a_2	スケジュール制御不具合(昼休消灯、他)	11
a_3	つけ忘れ(在室者の元電源操作忘れ)※	31
a_4	早朝作業(大清掃・実験準備等)	9

※照明システムの発停は、元電源の手動操作を要する

まず、実データから各不具合日の代表データを用いて、一日の消費エネルギーがどのように推移しているかを確認しておく。図 4.4-3 に各不具合の代表日を不具合でない日 (normal_140919) の照明消費電力の推移と比較して示す。比較対象とした不具合でない日 (normal_140919) は、晴天日であり、本実証建物の特徴である午前中の昼光利用によるアンビエント照明の調光制御や在所状況に応じたタスク照明の点灯により、照明消費電力が時刻変動している。これに対し、a_1 は調光制御の不具合を示した日の推移であり、照度センサによる調光制御が適正に機能せず、照明消費電力が増加してしまった不具合である。a_2 は、スケジュール制御の不具合であり、本来、昼休み (12:00~13:00) は自動消灯される制御が、自動消灯がされなかった日である。a_3 は、在室者が照明をつけ忘れた日であり、照明システムの起動には第一入室者等が元電源を手動で ON にする操作を要するが、それを行わないまま執務室が利用されるという運用であり、晴天日に多くみられる。昼光利用により、十分に照度が確保している時間帯もあるため、エネルギーマネジメントの観点からは積極的に是正すべきかは検討が必要であるが、本手法によりこのような運用があることを把握できることが重要である。a_4 は、大清掃・実験準備等の理由で早朝に照明を使用する作業があった特異日である。以上の通り、各不具合において、照明消費電力の推移に現れる特徴も様々である。a_3 については不在で照明が使用されていない日の推移との区別は照明消費電力データだけでは、難しいということを事前に想定しているが、この事象に対し、どの程度の不具合診断が可能なのかということを検証することが目的である。

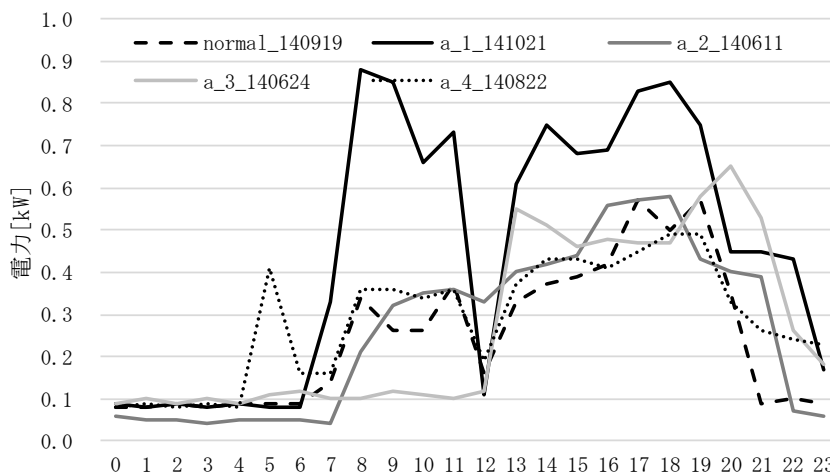


図 4.4-3 各不具合の代表日 (特異日含む) の照明消費電力の推移

4.4.2 学習データを用いたパターン分析結果

診断モデル構築のために、学習データを用いてパターン分析を行い、その有用性を確認した。学習データ (tr_1) は、前節で整理した不具合でないデータ (n : 291 日) を機械的にランダムに分割した 9 割の 262 日分を使用した。照明電力データに対するパターン分析結果をクラスタ数別の比較として図 4.4-4 に示す。学習データから自動的にクラスタを構成し、消費パターンが生成されている。クラスタ数(k)は任意のパラメータであり、本報ではk=2~9 まで変化させた結果を示す。クラスタ数を増やすことで、一日を通じた全体の特徴 (例えば、休日と平日、高負荷日と低負荷日) から、時

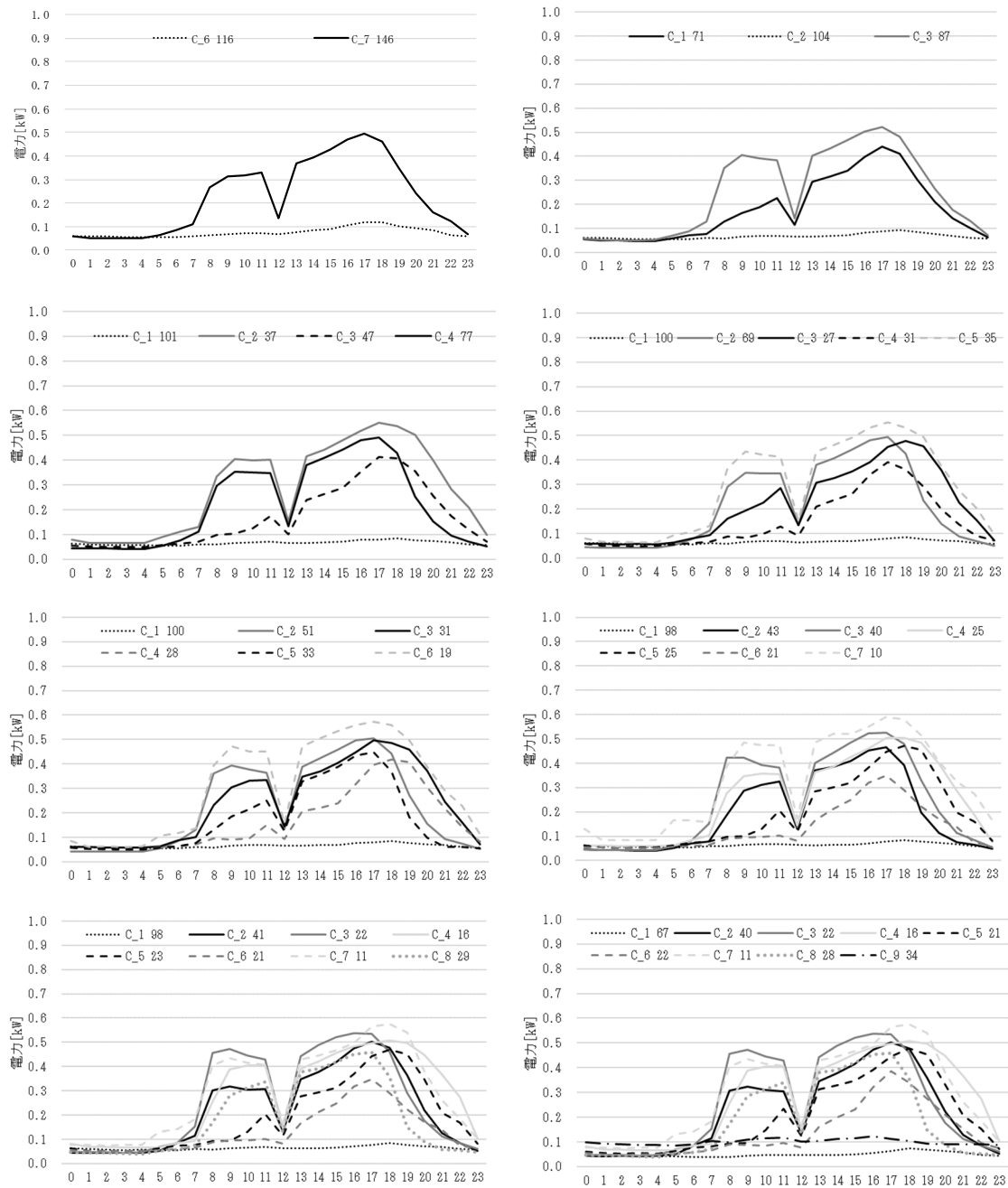
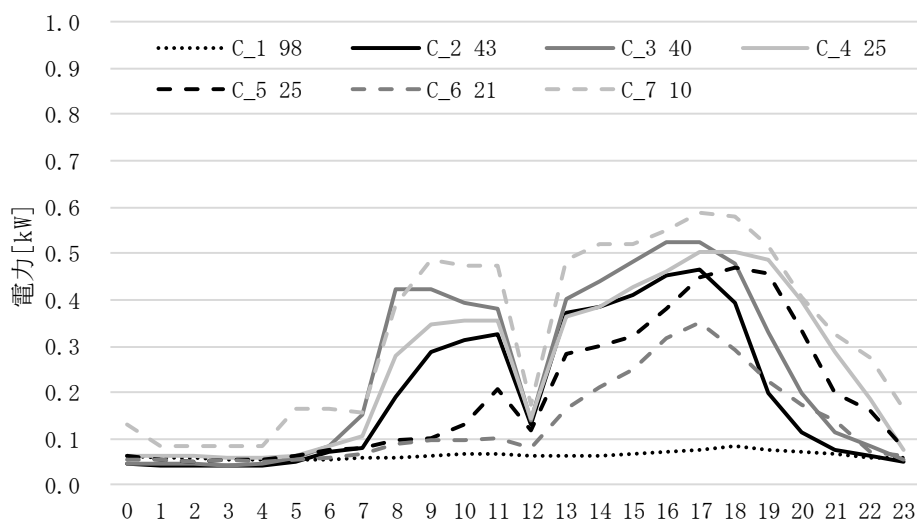


図 4.4-4 照明消費電力のパターン分析結果のクラスタ数比較 (tr_1、k=2~9)

間帯ごとの特徴の差異によりクラスタが構成されている。

基本検討では、主観的ではあるが建物管理者の意見を参考に各消費パターンの特徴が理解しやすく、かつできるだけ多くのクラスタに分類された $k=7$ を採用することとした。クラスタ数 $k=7$ のパターン分析結果を、図 4.4-5 に示す。日中の電力の大小や夕方から夜間にかけての電力の減少傾向の差により、分類がなされたと解釈できる。C_1 は 98 日分のデータで構成されるパターンで、休日で照明の使用がない日の消費パターンであると考えられる。C_2 は午前・午後とも在室者により照明が使用されているが比較的少ない電力に抑えられており、昼光利用や人検知制御により調光による出力抑制がなされている日の消費パターンであると考えられる。また、夕方から夜間にかけて消費電力が比較的早い時間に低下しており、残業執務者が少ない日であるとも考えられる。C_3、C_4 は C_2 に比べると消費電力が高めに推移しており、昼光が少なく、執務者が多い日のパターンと言える。C_5、C_6 は C_2 に比べ午前・午後ともに消費電力が低めに推移しており、在室者が少ない（もしくは大きな会議等で不在の日も含む）パターンと言える。C_7 は終日を通じて高負荷の日のパターンである。

従来は、このようなエネルギー特性を理解するための作業およびプロセスは、建物の運用状況を理解している者が日時や気象、運用条件に基づき、データを分類した上で消費パターンを作成し把握していたが、パターン分析により自動化することが可能である。クラスタ数の設定を自動化することは技術的に難しい課題であるが、本検討のように任意パラメータの設定に管理技術者等の確認を入れることで、より建物のエネルギー特性への理解が進む効果も期待できるため、必ずしも自動化は不要であると考えた。なお、分析結果に関しては、念のため同一条件による分析を複数回行い、結果に大きなばらつきがないことを確認し、初期値依存性がないことを確認している。



注 クラスタ番号右の数値は所属データ数を示す
図 4.4-5 照明消費電力のパターン分析結果(tr_1、 $k=7$)

4.4.3 異常度評価による精度検証

前項で求めたパターン分析結果に基づき、検証データ (va_1) に対して、異常度評価を行い、不具合診断としての精度検証を行った。図 4.4-6 に各日の異常度の比較を示す。なお、比較のため、異常度は、異常度閾値を 1.0 として正規化している。不具合の要因別により異常度の傾向に差がある。例えば、a_1:調光制御不具合は、異常度が高く、a_2:昼休み時間帯のスケジュール不具合は異常度が低い傾向の評価となっている。

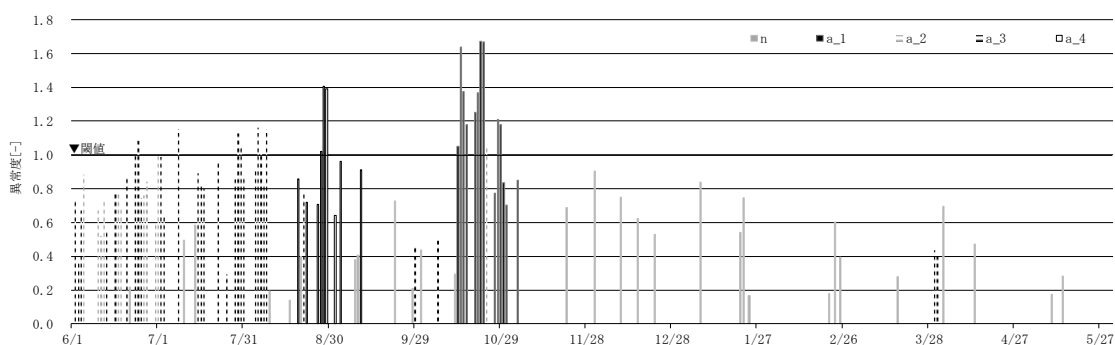


図 4.4-6 検証データの異常度評価結果

表 4.4-2 に分析精度の定量評価のため、検証データの正解率（検証データ全数に対して、不具合日を異常として検知した数と不具合でない日を異常として検知しなかった（非検知）数の和の比率）および不具合要因別に分析結果を示す。

検証データ全体の正解率は 0.57 であり、基本検討だけでは、良好であるとはいえない（表 4.4-2）。不具合要因別には、a_1 の検知率は 14/14 と高く、a_2、3、4 の検知率がそれぞれ、1/11、7/31、3/9 と低い結果である。

表 4.4-2 検証データによる精度検証結果

	a) 基本検討
正解率[-] 〈(不具合検知数+不具合でない非検知数)/全データ数〉	0.57 〈(25+29)/(65+29)〉
不具合日の検知率[日/日]	25/65
a_1: 調光制御不具合(照度/人検知制御異常)	14/14
a_2: スケジュール制御不具合(昼休消灯,他)	1/11
a_3: つけ忘れ(在室者の元電源操作忘れ)	7/31
a_4: 早朝作業(清掃等)	3/9
不具合でない日の非検知率[日/日]	29/29

不具合診断の結果を具体的に考察するため、各不具合代表日の例を図 4.4-4 に示す。a_1 は調光制御不具合であり、その影響が点灯時間帯全般に渡って消費電力の増大といった形が出るため検知しやすい不具合である（図 4.4-4(1)）。一方、a_2、4 は特定の時間帯にのみその特徴が表れるため（図 4.4-4(2), (4)）、消費パターン全体の比較では検知が難しい。a_3 は照明のつけ忘れであり、電力データだけでは午前中に人がいなくて照明が利用されていないのか人がいるが付け忘れていないのかの判別は難しく（図 4.4-4(3)）、これを判別するには在席情報等の補助データが不可欠である。また、不具合でない日のデータは、類似の消費パターンと比較して、異常度が低いということで全て非検知（29/29）となっており、誤検知はされない良好な結果であった。

本結果から、調光制御不具合等の比較的判別がしやすい不具合に関しては、結果良く診断されることが確認できた。また、誤検知も発生しなかった。一方、不具合の状況が一日の特定の時間のみに発生する場合や、他のデータとの相関で不具合と判別すべき事象については、本手法だけでは診断が難しいことが明らかとなった。

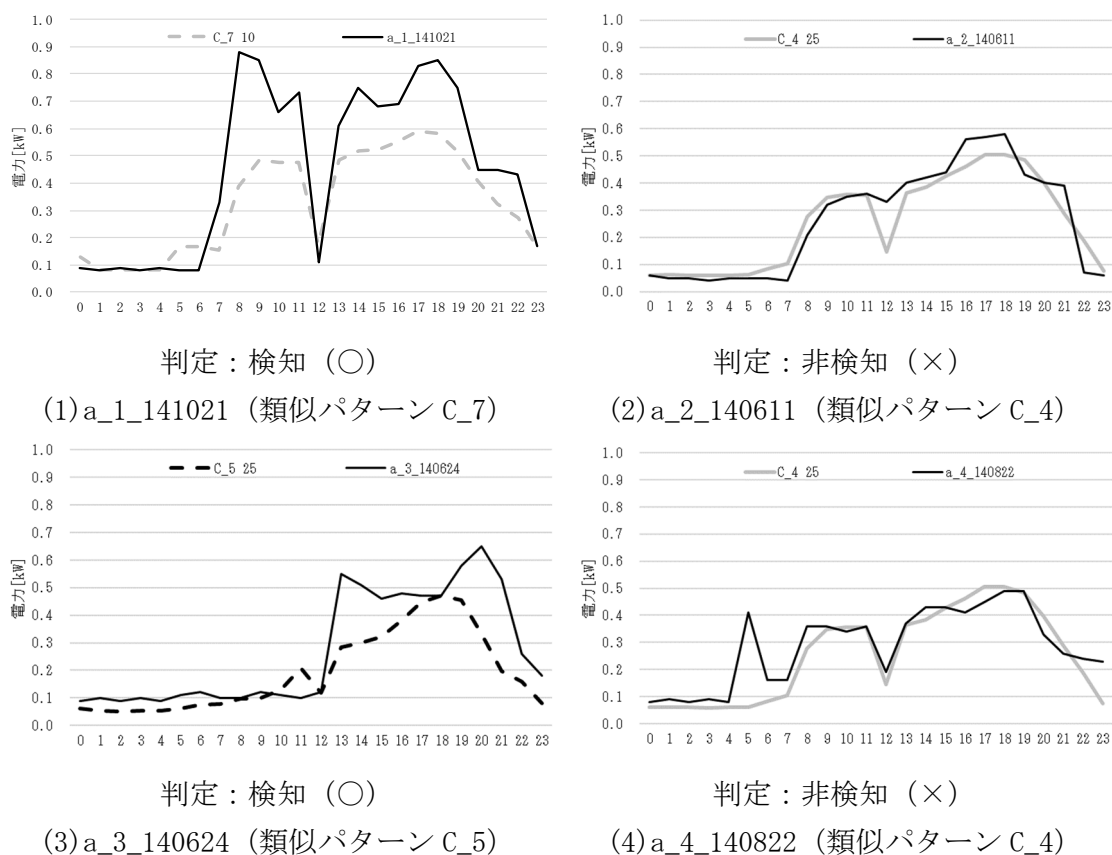
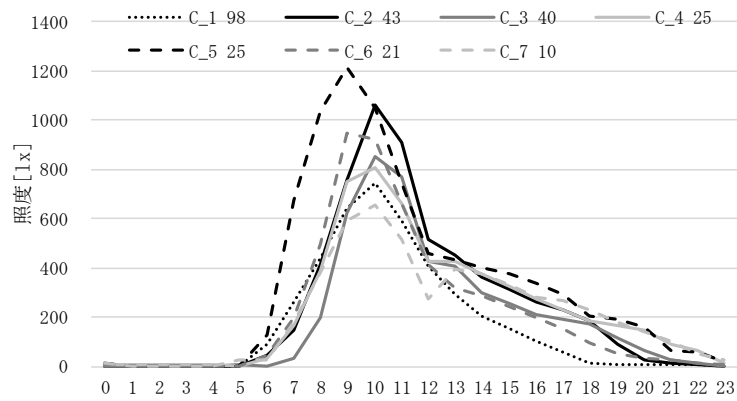


図 4.4-4 各不具合代表日と診断結果例

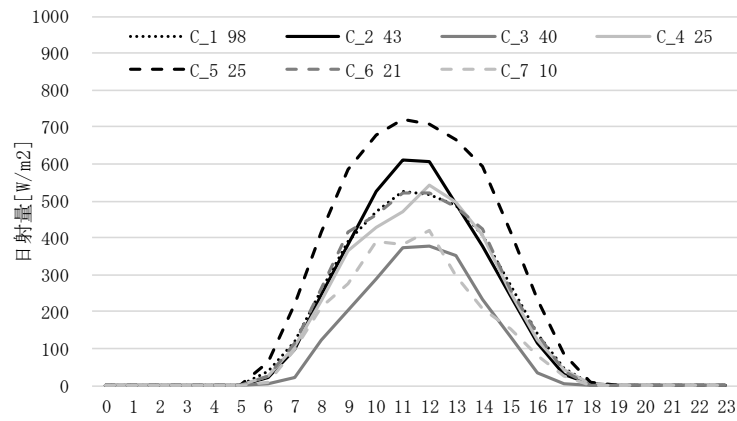
4.5 実用化に向けた手法の改良

4.5.1 補助データの活用検討

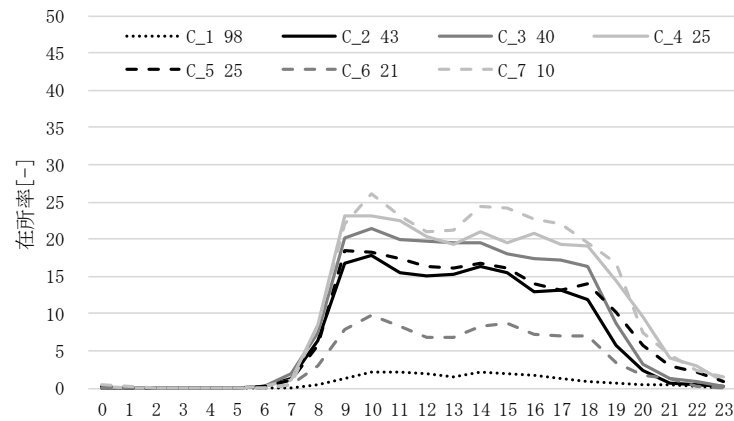
BEMS データは消費電力以外に、気象情報や室内環境情報、さらには在室情報なども含めた建物ライフログが記録されるようになってきている。これらを分析の補助データとして活用することで、電力データだけでは、検知されない不具合の検知率の向上及び電力データで検知された不具合の要因推定として役立つと考えられる。本検討においては、照明消費電力との相関が大きいと考えられる室内照度、屋外日射、在室情報（執務室内の人検知エリア数(図 4.4-1 (既出))に対する在所エリア数=在所率)、前節で検知が難しいとされた a_2 の不具合に対して時刻別照明消費電力：12 時を補助データ候補として選定した。これらを照明消費電力のパターン分析結果（図 4.4-5(既出))に基づき、補助データのパターンを作成した（図 4.5-1）。例えば、C_5 は、日射量が多く、照明電力が小さいパターンであり調光制御が良く働いていると考えられる。C_3 は、日射量が少なく、照明電力が大きいパターンである。また、夕方から夜間にかけての電力消費が多い C_7 は在所率が高い傾向があり、人検知制御が行われているなどの特徴が表れている。



(1) 室内照度



(2) 日射量



(3) 在所率

注 クラスタ番号右の数値は所属データ数を示す

図 4.5-1 照明消費電力パターンに基づく補助データのパターン

一方、先に述べたように BEMS 等で記録されるデータは建物ライフログとして膨大化しており、全てのデータを補助データとして扱うことは、計算負荷が増大する点や多様なデータを扱うことで判定基準の複雑化および機械学習プロセスの中での過学習などを招く可能性があり、必ずしも検知精度が向上するわけではない。また、不具合の要因推定という観点からも、相関の低いデータは異常度の大小に関わらず除外することが望ましい。本研究では、まずは人的作業により補助データとして有効と考えられる項目をある程度絞った上で、各クラスタ内のデータのばらつき具合に着目し、ばらつきが少ない補助データはそのパターンの特徴をよく表しており、有効な補助データであると仮定する。

このばらつきの判定は、各クラスタ内のデータの標準偏差および変動係数を算出し、次の基準で補助データの有効判定を行った。表 4.5-1 のパターン別の補助データの分析結果を示す。①制御項目（調光照明であれば室内照度、空調であれば室内温度など）、②各クラスタ間でばらつき（標準偏差）が小さい項目、③各クラスタ内でばらつき（変動係数）が小さい項目、④管理技術者が個別に確認を希望する項目である。例えば、C_1 の場合、①は制御項目である室内照度、②は標準偏差がクラスタ間比較で 45.7 と最も小さい在在率、③は変動係数がクラスタ内比較で最も小さい日射、④時刻別消費電力（12 時）が、有効な補助データと判定される。なお、②、③の観点で相対的比較となるためどこまで有効と判断するかは任意となるが、本モデルにおいては図 4.5-1(既出)の結果も確認しながら、上位 2 項目を有効とした。

表 4.5-1 パターン別補助データの有効判定結果

	有効補助データ				判定②：標準偏差 (クラスタ間で比較)			判定③：変動係数※ (クラスタ内で比較)		
	①	②	③	④	照度	日射	在在率	照度	日射	在在率
C_1	照度	在在率	日射	12時電力	4275	2290	46	63	19	80
C_2	照度	在在率	日射	12時電力	4088	2085	79	32	21	43
C_3	照度	日射	在在率	12時電力	3197	1592	82	39	25	19
C_4	照度	—	日射	12時電力	3660	2170	98	19	13	33
C_5	照度	—	日射	12時電力	4582	2228	102	23	9	22
C_6	照度	—	日射	12時電力	4378	2423	90	26	14	44
C_7	照度	日射	在在率	12時電力	3136	1976	88	20	12	10

※標準偏差/平均値

これらの補助データおよび a_2 の不具合検知のために時刻別 12:00 の照明電力を不具合診断に利用した場合の、精度検証結果を表 4.5-2 に示す。なお、補助データの異常度は、照明消費電力のパターンと同様の日のデータ群による日推移平均との距離と

した。電力データのみでの不具合診断に比べて、補助データを活用することで正解率がわずかではあるが0.57→0.59に向上、不具合の検知率が25/65→53/65に向上した。ただし、初期検討ではみられなかった不具合でない日の非検知数が29/29から12/29に減少（誤検知数が増加）しており、本結果だけでは、一概に検知精度が向上したとは言いがたい。そこで、表4.5-3に検証データに対する異常度を補助データを含め一覧で示す。

補助データが有効に活用される例として、a_2の不具合に関して、6/10では、日単位の電力消費の異常度が低いながら12時の電力消費の異常度が突出して高いなどの場合に有効である。一方、補助データを用いることで誤検知が増えた例として6/21、7/10、8/9、8/16、9/8、9/9、9/28、10/1、1/24、2/21、2/23、2/25、4/2の17日分のデータが該当し、12時の照明電力においてのみ、かつa_2の不具合データに比べて比較的低い異常度(3以下)で検知されており、異常の度合いを考慮せず一律1.0で評価したためである。以上より、補助データも含め異常度を評価することで、異常判定だけでなく、その要因として異常度が高い要素を特定することができ、不具合の要因推定に有効であるといえるが、その活用については例えば消費パターンごとに相関分析等による補助データの優先順位づけなど、更なる工夫が必要である。

表 4.5-2 検証データによる精度検証結果

	a) 基本検討	b) 補助データ活用
正解率[-] 〈(不具合検知数+不具合でない非検知数)/全データ数〉	0.57 〈(25+29)/(65+29)〉	0.59 〈(53+12)/(65+29)〉
不具合日の検知率[日/日]	25/65	53/65
a_1: 調光制御不具合(照度/人検知制御異常)	14/14	14/14
a_2: スケジュール制御不具合(昼休消灯,他)	1/11	11/11
a_3: つけ忘れ(在室者の元電源操作忘れ)	7/31	21/31
a_4: 早朝作業(清掃等)	3/9	7/9
不具合でない日の非検知率[日/日]	29/29	12/29

表 4.5-3 検証データの異常度一覧(■は異常判定された項目)

	不具合 分類	類似 パタン	照明 電力	室内 照度	屋外 日射	在所率	時刻	補助データなし		補助データあり		不具合 要因推定
							12	検知	非検知	検知	非検知	
6/2	a_3	C_6	0.74	0.69	0.55	2.02	1.33	×	-	○	-	×
6/3	a_3	C_6	0.36	0.40	0.50	0.75	0.10	×	-	×	-	×
6/4	a_3	C_6	0.67	0.53	1.98	0.69	3.47	×	-	○	-	×
6/5	a_2	C_3	0.88	0.38	2.38	0.61	10.9	×	-	○	-	○
6/10	a_2	C_4	0.67	0.46	0.64	0.45	19.6	×	-	○	-	○
6/11	a_2	C_4	0.52	0.35	0.52	0.55	13.2	×	-	○	-	○
6/12	a_2	C_4	0.74	0.38	0.36	0.52	18.2	×	-	○	-	○
6/13	a_3	C_5	0.54	0.85	1.05	0.94	3.43	×	-	○	-	×
6/16	a_3	C_6	0.77	0.52	0.60	1.10	0.82	×	-	-	-	×
6/17	a_2	C_7	0.78	0.73	0.55	1.04	22.6	×	-	○	-	○
6/18	a_2	C_7	0.69	0.74	0.87	0.69	22.6	×	-	○	-	○
6/20	a_3	C_5	0.87	0.54	0.82	0.41	1.57	×	-	○	-	×
6/21	n	C_1	0.22	0.37	0.46	0.12	1.84	-	○	-	×	-
6/23	a_3	C_5	1.00	0.63	0.82	0.81	0.57	×	-	×	-	×
6/24	a_3	C_5	1.08	0.66	0.82	0.93	0.14	○	-	○	-	×
6/25	a_3	C_6	0.74	0.60	0.87	0.86	1.33	×	-	○	-	×
6/26	a_2	C_7	0.76	0.59	0.66	0.75	29.0	×	-	○	-	○
6/27	a_2	C_7	0.84	0.63	0.53	0.49	26.9	×	-	○	-	○
6/30	a_2	C_4	0.59	0.36	0.65	0.46	15.3	×	-	○	-	○
7/1	a_2	C_4	0.99	0.46	0.60	0.60	16.1	×	-	○	-	○
7/2	a_3	C_5	0.99	0.53	0.89	0.86	0.14	×	-	×	-	×
7/3	a_3	C_5	0.64	0.39	0.41	0.42	0.57	×	-	×	-	×
7/8	a_3	C_5	1.15	0.54	0.78	0.63	0.14	○	-	○	-	×
7/10	n	C_4	0.50	0.38	0.37	0.24	1.06	-	○	-	×	-
7/14	n	C_4	0.58	0.57	1.10	0.44	2.49	-	○	-	×	-
7/15	a_3	C_6	0.89	0.47	0.58	1.24	2.04	×	-	○	-	×
7/16	a_3	C_5	0.82	0.48	0.72	0.55	1.29	×	-	○	-	×
7/17	a_3	C_5	0.80	0.23	0.47	0.41	0.57	×	-	×	-	×
7/22	a_3	C_5	0.95	0.62	0.70	0.82	0.57	×	-	×	-	×
7/25	a_3	C_1	0.29	0.34	0.46	0.60	1.84	×	-	○	-	×
7/28	a_3	C_5	0.86	0.55	0.77	0.90	0.14	×	-	×	-	×
7/29	a_3	C_5	1.12	0.49	0.80	0.56	0.57	○	-	○	-	×
7/30	a_3	C_6	1.04	0.31	0.55	1.10	2.76	○	-	○	-	×
7/31	a_3	C_6	0.88	0.68	0.73	1.01	2.04	×	-	○	-	×
8/4	a_3	C_5	0.91	0.64	0.77	0.68	3.00	×	-	○	-	×
8/5	a_3	C_5	1.16	0.70	0.75	0.65	0.57	○	-	○	-	×
8/6	a_3	C_6	1.00	0.75	0.68	0.80	1.33	○	-	○	-	×
8/7	a_3	C_6	0.83	0.66	0.66	1.20	2.04	×	-	○	-	×
8/8	a_3	C_5	1.15	0.43	0.57	0.61	0.14	○	-	○	-	×
8/9	n	C_1	0.19	0.64	0.26	0.12	2.56	-	○	-	×	-
8/16	n	C_1	0.14	0.58	0.55	0.15	1.13	-	○	-	×	-
8/19	a_4	C_4	0.86	0.72	0.54	0.36	4.63	×	-	○	-	×
8/20	n	C_4	0.40	0.37	0.45	0.55	3.20	-	○	-	×	-
8/21	a_3	C_5	0.77	0.37	0.51	0.45	1.57	×	-	○	-	×
8/22	a_4	C_4	0.72	0.52	0.61	0.53	3.20	×	-	○	-	×
8/26	a_4	C_7	0.71	0.83	0.86	0.85	1.14	×	-	○	-	×
8/27	a_4	C_7	1.02	0.61	0.55	0.66	0.43	○	-	○	-	×
8/28	a_4	C_3	1.40	0.36	0.46	0.67	3.71	○	-	○	-	×
8/29	a_4	C_3	1.39	0.33	0.43	0.47	3.71	○	-	○	-	×

9/1	a_4	C_7	0.64	0.63	0.76	0.56	0.43	×	—	×	—	×
9/3	a_4	C_3	0.96	0.26	0.70	0.76	3.00	×	—	○	—	×
9/8	n	C_7	0.38	0.60	0.74	0.66	1.14	—	○	—	×	—
9/9	n	C_7	0.41	0.31	0.78	0.66	2.57	—	○	—	×	—
9/10	a_4	C_7	0.91	0.54	0.63	0.50	0.29	×	—	×	—	×
9/22	n	C_4	0.73	0.28	0.34	1.01	0.37	—	○	—	○	—
9/28	n	C_1	0.21	0.57	0.26	0.29	2.56	—	○	—	×	—
9/29	a_3	C_5	0.46	0.66	0.22	0.40	1.29	×	—	○	—	×
10/1	n	C_3	0.44	0.51	0.69	0.68	1.57	—	○	—	×	—
10/7	a_3	C_5	0.49	0.65	0.54	0.80	0.86	×	—	×	—	×
10/13	n	C_6	0.30	0.78	0.62	0.25	0.10	—	○	—	○	—
10/14	a_1	C_7	1.05	1.60	0.34	0.97	1.00	○	—	○	—	○
10/15	a_1	C_7	1.64	0.73	1.02	0.40	1.71	○	—	○	—	×
10/16	a_1	C_7	1.38	1.27	0.41	0.46	1.00	○	—	○	—	○
10/17	a_1	C_7	1.18	1.59	0.42	0.99	1.00	○	—	○	—	○
10/20	a_1	C_7	1.25	1.56	0.64	0.64	1.71	○	—	○	—	○
10/21	a_1	C_7	1.37	0.89	0.97	0.49	4.57	○	—	○	—	×
10/22	a_1	C_7	1.67	0.84	1.12	0.38	4.57	○	—	○	—	×
10/23	a_1	C_7	1.67	1.04	0.79	0.60	4.57	○	—	○	—	○
10/24	a_2	C_7	1.04	1.59	0.33	0.39	5.29	○	—	○	—	○
10/27	a_1	C_7	0.77	1.51	0.52	0.78	5.29	○	—	○	—	○
10/28	a_1	C_7	1.21	1.61	0.53	1.37	7.43	○	—	○	—	○
10/29	a_1	C_7	1.18	2.04	0.36	1.21	5.29	○	—	○	—	○
10/30	a_1	C_7	0.83	1.17	0.21	0.68	6.00	○	—	○	—	○
10/31	a_1	C_7	0.70	0.74	0.55	0.47	4.57	○	—	○	—	○
11/4	a_1	C_4	0.85	0.99	0.24	0.27	1.80	○	—	○	—	○
11/21	n	C_2	0.69	0.95	0.20	1.20	0.02	—	○	—	×	—
12/1	n	C_3	0.90	0.43	0.75	0.66	0.14	—	○	—	○	—
12/10	n	C_3	0.75	0.19	0.36	0.66	0.14	—	○	—	○	—
12/16	n	C_3	0.62	0.41	0.83	0.39	0.57	—	○	—	○	—
12/22	n	C_3	0.53	0.78	0.25	0.48	0.14	—	○	—	○	—
1/7	n	C_2	0.84	0.72	0.37	0.72	0.70	—	○	—	○	—
1/21	n	C_3	0.54	0.42	0.97	0.40	0.14	—	○	—	○	—
1/22	n	C_3	0.75	0.40	1.01	0.52	1.29	—	○	—	×	—
1/24	n	C_1	0.17	0.54	0.28	0.11	1.01	—	○	—	×	—
2/21	n	C_1	0.18	0.43	0.51	0.15	2.44	—	○	—	×	—
2/23	n	C_2	0.60	0.47	0.22	0.75	1.45	—	○	—	×	—
2/25	n	C_4	0.40	0.29	0.42	0.40	1.80	—	○	—	×	—
3/17	n	C_6	0.28	0.35	0.24	0.53	0.10	—	○	—	○	—
3/30	a_3	C_6	0.44	0.39	0.37	0.79	1.33	×	—	○	—	×
3/31	a_3	C_5	0.40	0.60	0.56	0.44	0.57	×	—	—	—	×
4/2	n	C_4	0.70	0.66	0.50	0.31	1.06	—	○	—	×	—
4/13	n	C_3	0.47	0.37	0.74	0.65	0.14	—	○	—	○	—
5/10	n	C_1	0.17	0.60	0.64	0.09	1.00	—	○	—	○	—
5/14	n	C_5	0.38	0.66	0.75	0.44	0.01	—	○	—	○	—

正解数	25	29	53	12	22
全数	65	29	65	29	65

4.5.2 学習データ作成時の異常データ除去の実用化手法の検討

本来、学習データには、不具合日や特異日などの異常データが含まれないことが望ましい。しかし、必ずしも事前にその抽出ができるとは限らず、実データにおいては、一定数の不具合データが含まれている。これを事前に除去することは、表 4.4-1（既出）に示したように、建物の管理技術者等の専門知識と経験が必要であったが、その段階において貴重な人的資源を利用することは合理的ではないため、本分析手法の実用化においては、学習データ作成時の異常データ除去の機械化が不可欠である。

そこで、本研究では、そのための手法として、クラスタリングによって生成されるクラスタの大小（属するデータ数）に着目し、データ数の多いクラスタ（大クラスタ）に属するデータは不具合でないデータである可能性が高く、データ数の少ないクラスタ（小クラスタ）に属するデータは不具合である可能性が高いと仮定して、事前にクラスタ数を増やしたクラスタリング（プレクラスタリング）を行い、小クラスタデータを除いて学習データを作成する分析フローを考案する（図 4.5-2）。学習データ作成後は、前節で行った分析フローと同じである。

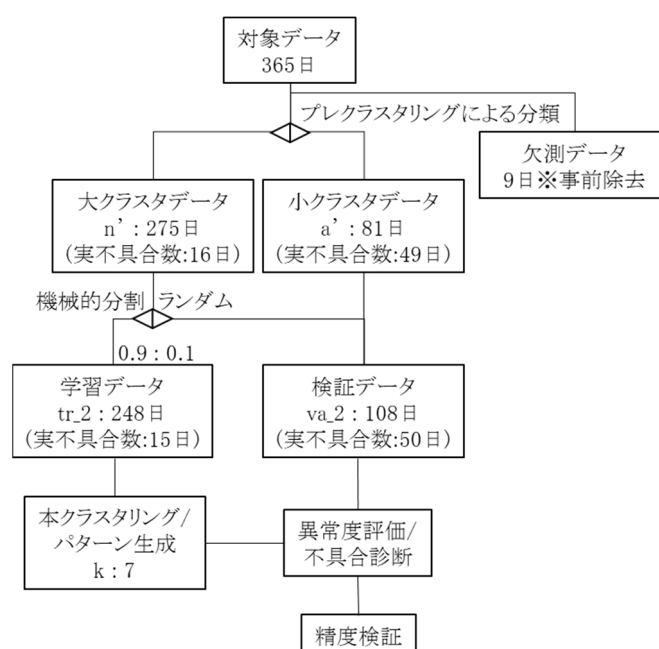
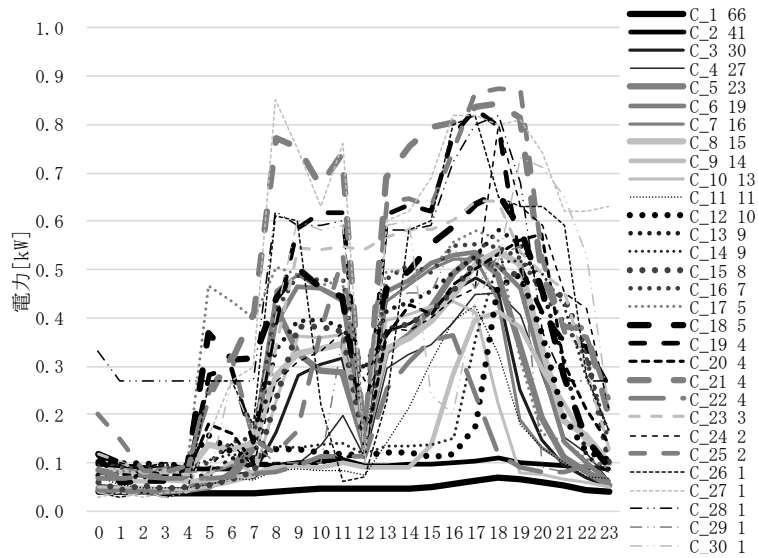


図 4.5-2 分析フロー（プレクラスタリングによる学習データ作成を追加）

図 4.5-4 に学習データ作成のためのプレクラスタリングの結果(k=30)、表 4.5-3 にプレクラスタ別の不具合数を示す。今回は、1回/月程度以上の発生頻度を目安に、データが 11 以上のクラスタ（上位 11 番目までのクラスタ）を対象とすることで、65 日存在する不具合日のうち 49 日を除くことができた。a_3 の不具合が大クラスタ内に多く含まれているが、本不具合は先の分析でも電力データのみでは識別が困難なため、以降の分析では本結果をそのまま用いる。



注 クラスタ番号右の数値は所属データ数を示す

図 4.5-3 照明消費電力のプレクラスタリング結果(k=30)

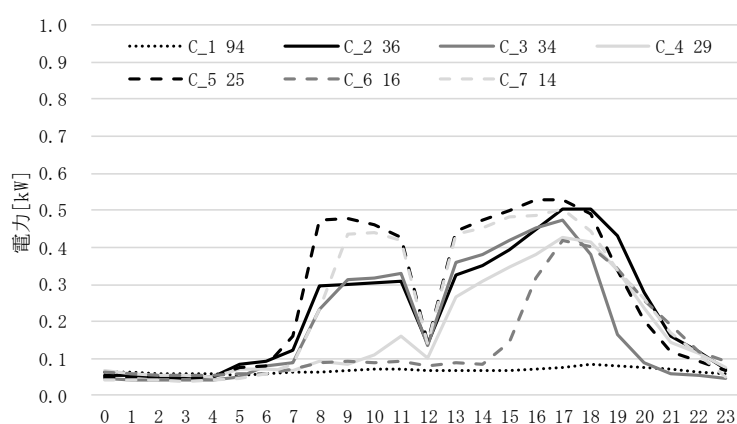
表 4.5-4 プレクラスタ別データ数・不具合数

	データ数	不具合数	内訳			
			a_1	a_2	a_3	a_4
C_1	66	0	0	0	0	0
C_2	41	1	0	0	1	0
C_3	30	0	0	0	0	0
C_4	27	5	0	0	5	0
C_5	23	1	0	1	0	0
C_6	19	0	0	0	0	0
C_7	16	0	0	0	0	0
C_8	15	3	1	0	0	2
C_9	14	4	0	0	4	0
C_10	13	0	0	0	0	0
C_11	11	2	0	0	2	0
合計	275	16	1	1	12	2
C_12	10	10	0	0	10	0
C_13	9	5	0	5	0	0
C_14	9	7	0	0	7	0
C_15	8	0	0	0	0	0
C_16	7	0	0	0	0	0
C_17	5	4	0	0	0	4
C_18	5	4	1	0	0	3
C_19	4	3	3	0	0	0
C_20	4	2	0	0	2	0
C_21	4	4	4	0	0	0
C_22	4	0	0	0	0	0
C_23	3	3	0	3	0	0
C_24	2	1	0	1	0	0
C_25	2	2	2	0	0	0
C_26	1	1	1	0	0	0
C_27	1	1	1	0	0	0
C_28	1	1	0	1	0	0
C_29	1	0	0	0	0	0
C_30	1	1	1	0	0	0

大クラスタ
(不具合可能性：低)

小クラスタ
(不具合可能性：高)

大クラスタに分類されたデータ群のみを使用した学習データ(tr_2)に対して、再度クラスタリング（以降、本クラスタリング）を行った。この結果、生成された電力消費パターンを示す（図 4.5-4）。クラスタ数は初期検討同様に k=7 とした。人的に不具合日データを排除し作成した電力パターン（図 4.4-4(既出)）と比較して、日中の電力の大小は同様の傾向を持っており、夕方から夜間にかけての電力の減少傾向は C_3 を除くと 0.1kW 程度とばらつきが小さくなっている。本手法により、大クラスタに属するデータのみを使用することで発生頻度の多いより典型的な消費パターンが生成されたことがわかる。



注 クラスタ番号右の数値は所属データ数

図 4.5-4 照明消費電力のパターン分析結果(tr_2、k=7)

次に、本パターン分析結果より、検証データ(va_2)を用いて不具合診断の精度検証を行った。表 4.5-6 の c) に電力データのみの場合、d) に補助データを加えた場合の結果を示す。c) の電力データのみの結果では a) と比較して正解率が 0.53→0.63 に、不具合検知率が 21/65→32/50 にといずれも精度が向上している。これは、各消費パターンが不具合データを含みながらも、実運用データのばらつきを抑制したより典型的なパターンとなったと考える先の考察と一致する結果であり、異常度の閾値が厳しくなる結果と言える。また、a) では、検知されなかった a_2、4 といった一定時刻においてのみ特徴が表れる不具合に対しても、異常度が高く、検知されている。一方、補助情報を活用した d) においては、c) と比較して不具合の検知率は 32/50→35/50 と向上しているが、不具合でない日の非検知率が 36/58→35/58 と低下しており、正解率は 0.62→0.64 である。これは、異常判定項目を増やすことは、検知数を上昇させるおよびその要因を推定するための参考になる一方、誤検知が増えるためである。補助データの活用には b) の結果同様相関分析等による優先順位付けが必要である。

以上より、学習データ作成時における本手法は、事前にどのような不具合が含まれ

るかわからないデータ群に対して有効であり、不具合や実運用におけるデータのばらつきを自動的に除去することが可能で、典型的な消費パターンの生成に役立つとともに異常検知の閾値設定に対しても有効な手法であることを確認した。

表 4.5-6 検証データによる精度検証結果

	a) 基本検討	b) 補助データ活用	c) 実用化	d) 実用化+補助データ
正解率[-] 〈(不具合検知数+不具合でない非検知数)/全データ数〉	0.57 〈(25+29)/(65+29)〉	0.59 〈(53+12)/(65+29)〉	0.62 〈(32+36)/(51+58)〉	0.64 〈(35+35)/(51+58)〉
不具合日の検知率[日/日]	25/65	53/65	32/51	35/51
a_1: 調光制御不具合(照度/人検知制御異常)	14/14	14/14	13/13	13/13
a_2: スケジュール制御不具合(昼休消灯,他)	1/11	11/11	6/10	9/10
a_3: つけ忘れ(在室者の元電源操作忘れ)	7/31	21/31	6/20	10/20
a_4: 早朝作業(清掃等)	3/9	7/9	7/7	7/7
不具合でない日の非検知率[日/日]	29/29	12/29	36/58	35/58

表 4.5-7 異常度評価結果(■は異常判定された項目)

	不具合 分類	類似 パターン	照明 電力	室内 照度	屋外 日射	在所率	時刻	補助データなし		補助データあり		不具合 要因推定
							12	検知	非検知	検知	非検知	
6/2	a_3	C_3	0.65	1.00	0.57	1.00	0.17	×	—	×	—	×
6/7	n	C_1	0.71	0.34	0.76	0.51	0.15	—	○	—	○	—
6/8	n	C_1	0.11	0.95	0.59	0.52	0.15	—	○	—	○	—
6/10	a_2	C_7	1.32	1.00	0.61	0.85	2.69	○	—	○	—	○
6/11	a_2	C_2	0.75	0.17	0.35	0.74	1.82	×	—	○	—	○
6/12	a_2	C_2	0.99	0.68	0.19	0.66	2.49	×	—	○	—	○
6/14	n	C_1	0.14	0.27	0.90	0.60	0.15	—	○	—	○	—
6/17	a_2	C_7	2.79	0.19	0.38	1.00	3.36	○	—	○	—	○
6/18	a_2	C_7	2.10	0.15	0.72	0.59	3.36	○	—	○	—	○
6/20	a_3	C_3	0.88	0.15	0.79	0.32	0.56	×	—	×	—	×
6/22	n	C_1	0.40	0.32	0.42	0.48	0.71	—	○	—	○	—
6/23	a_3	C_3	0.98	0.12	0.63	0.71	0.27	×	—	×	—	×
6/24	a_3	C_2	1.41	0.24	0.42	0.76	0.20	○	—	○	—	×
6/26	a_2	C_4	1.51	0.28	0.42	0.94	4.18	○	—	○	—	○
6/27	a_2	C_7	2.94	0.20	0.36	0.72	3.94	○	—	○	—	○
6/28	n	C_6	1.14	0.36	0.71	0.54	0.01	—	×	—	×	—
6/29	n	C_1	0.69	0.35	0.95	0.48	1.57	—	○	—	×	—
6/30	a_2	C_2	0.71	0.20	0.32	0.55	2.10	×	—	○	—	○
7/1	a_2	C_2	1.30	0.10	0.33	0.79	2.20	○	—	○	—	○
7/2	a_3	C_3	0.94	0.09	0.78	0.71	0.37	×	—	×	—	×
7/4	n	C_7	2.06	0.20	0.57	0.42	0.39	—	×	—	×	—
7/7	n	C_4	1.38	0.19	0.59	0.88	0.25	—	×	—	×	—
7/8	a_3	C_3	1.25	0.15	0.72	0.68	0.37	○	—	○	—	×
7/9	n	C_7	1.85	0.25	0.79	0.65	0.39	—	×	—	×	—
7/10	n	C_2	0.87	0.15	0.19	0.44	0.19	—	○	—	○	—
7/11	n	C_2	1.42	0.15	0.37	0.72	0.28	—	×	—	×	—
7/13	n	C_1	0.20	0.37	0.30	0.55	0.33	—	○	—	○	—
7/14	n	C_2	0.99	0.17	0.49	0.60	0.38	—	○	—	○	—
7/15	a_3	C_3	0.91	0.12	0.56	0.79	0.27	×	—	×	—	×
7/16	a_3	C_3	0.75	0.15	0.73	0.63	0.17	×	—	×	—	×
7/17	a_3	C_3	0.92	0.16	0.46	0.56	0.27	×	—	×	—	×
7/18	n	C_2	1.04	0.17	0.35	0.37	0.01	—	×	—	×	—

7/22	a_3	C_3	0.98	0.23	0.61	0.77	0.27	×	—	×	—	×
7/28	a_3	C_3	0.93	0.24	0.65	0.88	0.37	×	—	×	—	×
7/29	a_3	C_3	1.13	0.26	0.80	0.50	0.27	○	—	○	—	×
7/30	a_3	C_3	0.94	0.27	0.59	0.42	0.37	×	—	×	—	×
7/31	a_3	C_3	0.78	0.34	0.66	0.52	0.27	×	—	×	—	×
8/1	n	C_3	1.21	0.30	0.65	0.88	0.37	—	×	—	×	—
8/3	n	C_1	0.15	0.49	0.67	0.56	0.14	—	○	—	○	—
8/4	a_3	C_3	0.94	0.27	0.63	0.71	0.75	×	—	×	—	×
8/5	a_3	C_3	1.17	0.28	0.76	0.59	0.27	○	—	○	—	×
8/6	a_3	C_3	0.89	0.29	0.75	0.21	0.17	×	—	×	—	×
8/7	a_3	C_3	0.66	0.26	0.74	0.61	0.27	×	—	×	—	×
8/8	a_3	C_6	1.71	0.44	0.45	0.99	0.18	○	—	○	—	×
8/14	n	C_5	0.92	0.55	0.62	0.41	0.26	—	○	—	○	—
8/25	n	C_4	1.38	0.31	0.33	0.96	0.35	—	×	—	×	—
8/26	a_4	C_7	2.49	0.27	0.73	0.73	0.49	○	—	○	—	×
8/27	a_4	C_4	1.63	0.28	0.55	0.78	0.35	○	—	○	—	×
8/28	a_4	C_4	1.69	0.19	0.55	0.66	0.44	○	—	○	—	×
8/29	a_4	C_4	1.68	0.24	0.52	0.57	0.44	○	—	○	—	×
9/1	a_4	C_4	1.64	0.41	0.68	0.66	0.35	○	—	○	—	×
9/2	n	C_4	1.43	0.33	0.65	1.15	0.35	—	×	—	×	—
9/3	a_4	C_4	1.18	0.35	0.55	0.76	0.35	○	—	○	—	×
9/8	n	C_4	1.05	0.26	0.66	0.76	0.44	—	×	—	×	—
9/9	n	C_4	1.08	0.68	0.57	0.90	0.64	—	×	—	×	—
9/10	a_4	C_4	1.77	0.29	0.46	0.79	0.25	○	—	○	—	×
9/20	n	C_2	0.88	0.14	0.34	0.27	0.19	—	○	—	○	—
9/21	n	C_5	0.87	0.98	0.45	0.43	0.45	—	○	—	○	—
9/24	n	C_2	0.67	0.35	0.23	0.69	0.19	—	○	—	○	—
9/27	n	C_3	0.54	0.22	0.49	0.31	0.17	—	○	—	○	—
9/29	a_3	C_6	0.48	0.75	0.39	0.79	0.01	×	—	×	—	×
10/2	n	C_2	0.74	0.21	0.22	0.55	0.09	—	○	—	○	—
10/3	n	C_2	0.73	0.33	0.20	0.87	0.47	—	○	—	○	—
10/8	n	C_2	1.04	0.23	0.29	0.41	0.28	—	×	—	×	—
10/9	n	C_7	2.37	0.33	0.48	0.77	0.39	—	×	—	×	—
10/10	n	C_4	2.14	0.74	0.19	0.60	0.16	—	×	—	×	—
10/14	a_1	C_7	3.68	0.38	0.34	0.99	0.20	○	—	○	—	×
10/15	a_1	C_4	3.32	0.46	0.86	0.60	0.06	○	—	○	—	×
10/16	a_1	C_2	2.19	0.34	0.19	0.47	0.19	○	—	○	—	×
10/17	a_1	C_7	3.71	0.54	0.34	0.86	0.20	○	—	○	—	×
10/20	a_1	C_4	2.61	0.51	0.46	0.91	0.06	○	—	○	—	×
10/21	a_1	C_4	2.67	0.49	0.84	0.53	0.32	○	—	○	—	×
10/22	a_1	C_4	3.05	0.55	0.94	0.35	0.32	○	—	○	—	×
10/23	a_1	C_4	3.39	0.50	0.73	0.82	0.32	○	—	○	—	×
10/24	a_2	C_4	2.25	1.13	0.28	0.38	0.42	○	—	○	—	×
10/26	n	C_1	0.45	0.75	0.45	0.50	0.15	—	○	—	○	—
10/27	a_1	C_4	1.90	0.79	0.43	1.09	0.42	○	—	○	—	×
10/28	a_1	C_2	1.93	0.46	0.23	0.80	0.68	○	—	○	—	×
10/29	a_1	C_7	3.66	0.66	0.32	0.76	0.38	○	—	○	—	×
10/30	a_1	C_4	1.68	1.07	0.18	0.98	0.51	○	—	○	—	○
10/31	a_1	C_4	1.47	0.18	0.59	0.39	0.32	○	—	○	—	×
11/6	n	C_2	0.92	0.16	0.24	0.40	0.10	—	○	—	○	—
11/7	n	C_7	1.74	0.24	0.51	0.82	0.01	—	×	—	×	—
11/16	n	C_1	0.23	0.41	0.18	0.50	0.15	—	○	—	○	—
11/20	n	C_4	0.86	0.48	0.65	0.53	0.13	—	○	—	○	—
11/27	n	C_2	0.52	0.26	0.09	0.34	0.20	—	○	—	○	—
11/29	n	C_1	0.17	0.60	0.94	0.54	0.15	—	○	—	○	—

12/8	n	C_5	0.49	0.56	0.18	0.56	0.03	—	○	—	○	—
12/17	n	C_2	0.50	0.32	0.09	0.43	0.01	—	○	—	○	—
1/6	n	C_4	1.23	0.43	0.47	0.51	0.03	—	×	—	×	—
2/15	n	C_1	0.16	0.55	0.38	0.40	0.15	—	○	—	○	—
2/28	n	C_1	0.17	0.40	0.38	0.51	0.15	—	○	—	○	—
3/6	n	C_7	1.70	0.17	0.55	0.44	0.09	—	×	—	×	—
3/12	n	C_6	0.64	0.41	0.55	0.40	0.18	—	○	—	○	—
3/26	n	C_6	0.86	0.84	0.61	0.37	0.30	—	○	—	○	—
4/2	n	C_2	1.08	0.42	0.26	0.29	0.19	—	×	—	×	—
4/3	n	C_7	1.27	0.22	0.67	0.51	0.29	—	×	—	×	—
4/6	n	C_2	0.57	0.25	0.32	0.55	0.01	—	○	—	○	—
4/10	n	C_7	1.10	0.13	0.51	0.30	0.09	—	×	—	×	—
4/13	n	C_7	0.82	0.20	0.80	0.37	0.01	—	○	—	○	—
4/17	n	C_6	0.68	0.93	0.60	0.53	0.18	—	○	—	○	—
4/20	n	C_7	1.76	0.30	0.73	0.41	0.18	—	×	—	×	—
4/21	n	C_7	1.72	0.38	0.78	0.62	0.09	—	×	—	×	—
4/23	n	C_6	0.91	0.93	0.70	0.75	0.49	—	○	—	○	—
5/2	n	C_1	0.17	0.77	0.71	0.50	0.05	—	○	—	○	—
5/3	n	C_1	0.22	0.55	0.74	0.56	0.25	—	○	—	○	—
5/4	n	C_1	0.17	0.77	0.83	0.56	0.28	—	○	—	○	—
5/28	n	C_2	0.77	0.16	0.27	0.40	0.15	—	○	—	○	—
5/30	a_2	C_4	0.82	0.40	0.52	0.47	0.08	×	—	×	—	×

正解数 32 36 35 35 10
全数 51 58 51 58 51

4.6 実運用データ（空調エネルギー）に対する応用

4.6.1 分析概要

本節では、実運用データに対する適用検討として、実証建物の空調消費電力データに対して、パターン分析による不具合診断手法を適用し、その結果を評価する。また、この不具合診断手法の検知精度の向上を目的として、電力データ以外の補助データの活用や、前節で提案した学習データの作成手法を適用し、その有効性について検証を行う。

空調設備としては、タスク・アンビエント空調システムを採用しており、アンビエント空調は躯体放射冷暖房による室温制御、タスク空調は外気供給を兼ねた床吹出し空調で人検知センサによる在室人員の外気量制御と執務者の好みに応じて風量選択が可能な仕組みとなっている。このうち、2階の空調消費電力とは、タスク空調側の消費電力であり、外気処理および高負荷時の室温変動を抑制するための空調消費電力である（アンビエント空調側の電力消費は含まない）（図 2.2-5, 6, 7（既出））。空調消費電力の特徴としては、在室状況や日射・気温による外皮・外気負荷の変動が大きく、制御はパーソナル化されているため、消費電力の変動が大きいと考えられる。

図 4.6-1 に夏期の分析フローを、図 4.6-2 に冬期の分析フローを示す。対象データに対して、欠測データを事前除去した後、プレクラスタリングを行い、大クラスタと小クラスタに分類することで不具合の可能性が高いデータを学習データから除く。また、大クラスタである消費パターンの中に、不具合の可能性が高いデータが含まれているため、人的な分類により大クラスタであるが不具合可能性が高いデータを学習データから除き、検証データに加えるプロセスを追加した。その後、学習データに対してクラスタリングによりパターン生成を行い、不具合判定および補助データを活用し、要因推定を行うというプロセスで分析を進めた。

分析対象データは、事務所建物の2階の空調消費電力とし、分析対象期間は運用開始の2014年6月から2015年5月までの一年間のうち、夏期冷房期間（2014年6月～9月）、冬期暖房期間（2014年12月～2015年3月）である。

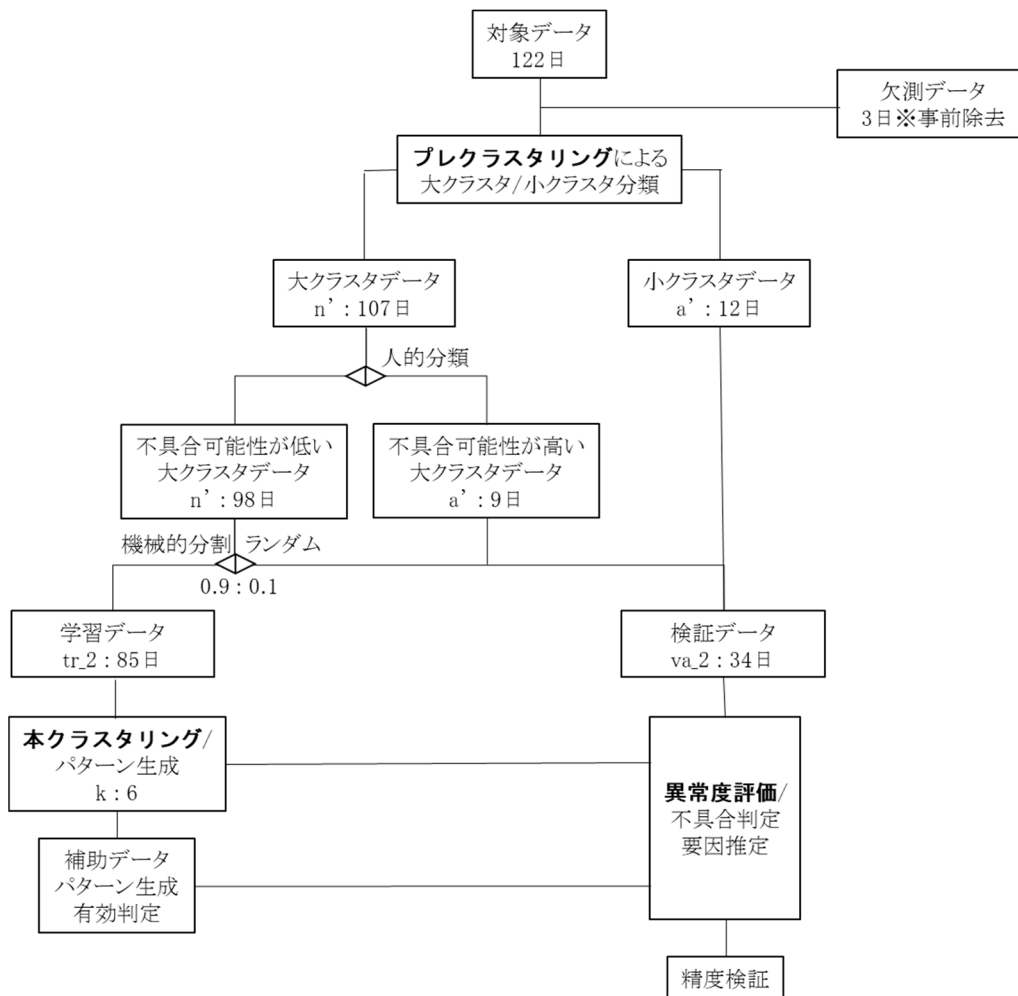


図 4.6-1 分析フロー（夏期）

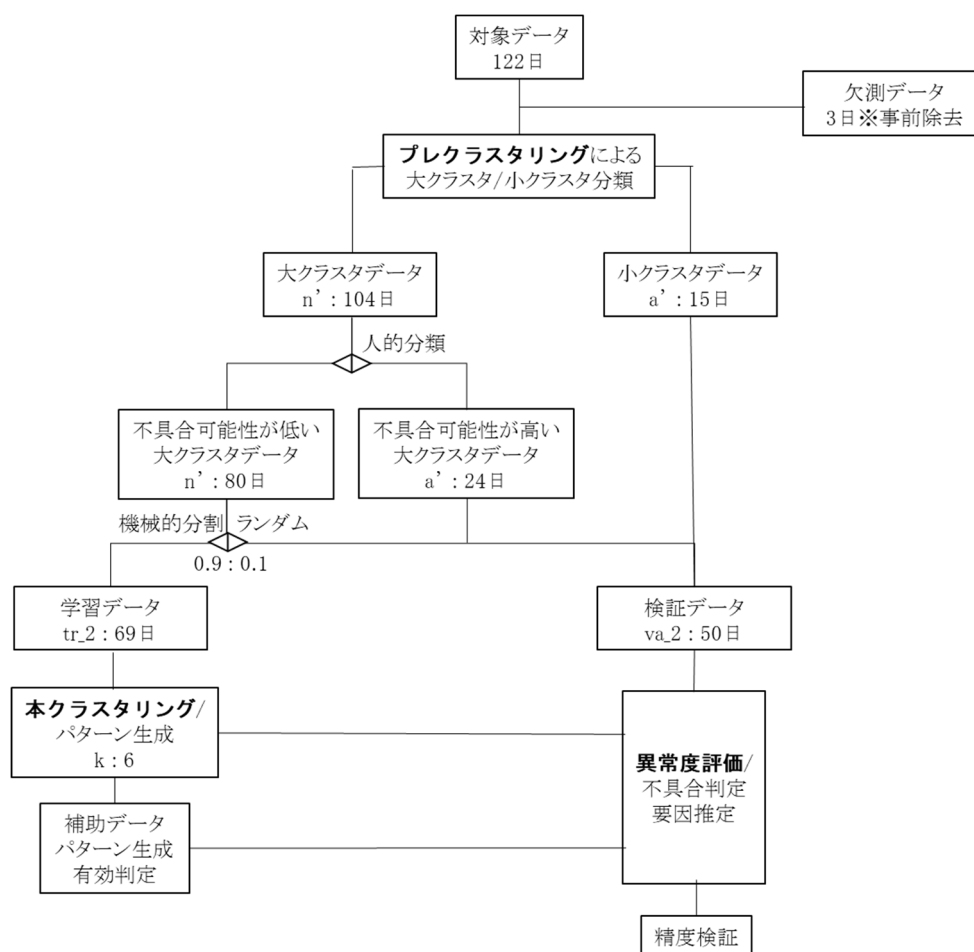


図 4.6-2 分析フロー（冬期）

4.6.2 分析結果

1) プレクラスタリング

学習データから不具合の可能性が高いデータを除くことを目的にプレクラスタリングを行った。対象は、夏期データ（119日分）および冬期データ（119日分）である。図 4.6-3 にプレクラスタリング結果（ $k=10$ ）を示す。クラスタ数の設定は、照明データに対するクラスタリング同様、試行錯誤的に適正なクラスタ数を探索し、 $k=10$ が適当なプレクラスタ数だと判断した。データの特性にもよるが、上記結果および前節の照明消費電力データのプレクラスタリングの結果から、経験則的に概ね対象データ数の $1/10$ 程度のクラスタ数を目安にプレクラスタリングを行うのがよいと考えられる。ただし、例えば、ON/OFF のスケジュール制御のような設備の消費電力データに対しては、消費電力のパターン数は限られるため、管理技術者等の協議によりクラスタ数は設定するのがよい。なお、事前に、夏期冷房期と冬期暖房期が混在するデータの場合は、パターン分析の結果の電力消費パターンに冷房期と暖房機の特徴が混在してしまい、分析がうまくいかないことを確認している。

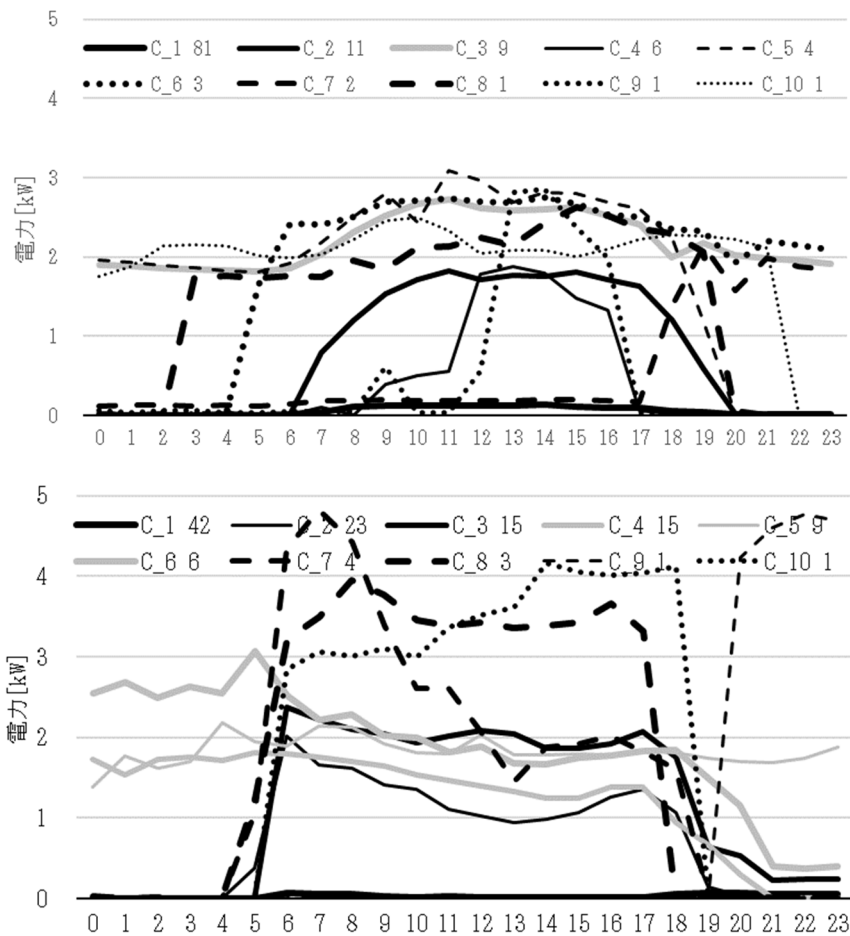


図 4.6-3 空調消費電力のプレクラスタリング結果(k=10) (上：夏期、下：冬期)

続いて、プレクラスタリング結果の生成パターンに対して、不具合可能性を判定する。今回も照明消費電力データ同様に、1回/月程度以上の発生頻度 (>4日) を目安に、大クラスタを不具合可能性が低いデータ群として自動的に判定した。ただし、今回照明電力データの場合と異なり、プレクラスタリング結果の大クラスタの消費パターンの中に、不具合・特異日と考えられる消費パターンが含まれていたため、人的な判定を加え、大クラスタ（自動判定では不具合可能性が低い）が、人的判定により不具合可能性が高いデータ群を除くプロセスを追加した。夏期のC_3、冬期のC_4、C_5、C_6が該当し、いずれも夜間に空調が行われている消費パターンであり、連休明け前の予冷・予熱および空調の消し忘れ（スケジュールの誤設定）、実験的運用日など理由は様々と考えられる。これらは、定期的に行われる特異日もしくは定常化してしまっただけの不具合日の運用データであり、学習データに含めるのは望ましくない。よって、人為的に不具合の可能性が高い大クラスタデータとして除いた。その結果を表4.6-1に示す。夏期は3つの大クラスタ98日分のデータ、冬期は3つの大クラスタ80日分のデータを不具合の可能性が低い大クラスタデータとすることにした。

表 4.6-1 プレクラスタリング結果に対する不具合可能性の判定(夏期)

クラスタ番号	データ数[日]	不具合可能性の 自動判定 (大クラスタ(>4):低)	不具合可能性の 人的判定
C_1	81	低 (大クラスタ)	低
C_2	11	低 (大クラスタ)	低
C_3	9	低 (大クラスタ)	高
C_4	6	低 (大クラスタ)	低
C_5	4	高 (小クラスタ)	—
C_6	3	高 (小クラスタ)	—
C_7	2	高 (小クラスタ)	—
C_8	1	高 (小クラスタ)	—
C_9	1	高 (小クラスタ)	—
C_10	1	高 (小クラスタ)	—

表 4.6-2 プレクラスタリング結果に対する不具合可能性の判定(冬期)

クラスタ番号	データ数[日]	不具合可能性の 自動判定 (大クラスタ(>4):低)	不具合可能性の 人的判定
C_1	42	低 (大クラスタ)	低
C_2	23	低 (大クラスタ)	低
C_3	15	低 (大クラスタ)	低
C_4	15	低 (大クラスタ)	高
C_5	9	低 (大クラスタ)	高
C_6	6	低 (大クラスタ)	高
C_7	4	高 (小クラスタ)	—
C_8	3	高 (小クラスタ)	—
C_9	1	高 (小クラスタ)	—
C_10	1	高 (小クラスタ)	—

2) 本クラスタリング

不具合可能性が低いと判定されたデータ群から学習データ(tr_2)を作成し、本クラスタリングを行ったパターン分析結果を図 4.6-3 に示す。今回も照明データ同様 k=2~9 まで変化させた結果を考察し、それぞれのパターンが識別しやすかつできるだけ多くのクラスタになるようなクラスタ数として、k=6 に決定した。

夏期の消費パターンとしては、C_1、C_2 が休日である。C_4 は 6 時~20 時ごろまで空調が稼働しており、2kW 程度の電力消費がある。C_3、C_5、C_6 は、空調の発停時刻や負荷の状況に応じて各クラスタにデータが分類されたと考えられる。

冬期の消費パターンとしては、C_1が休日である。平日は、C_2、C_3、C_4のように5時から空調稼働し、20時ごろまで使用されるのが基本の消費パターンである。日によっては、C_5のように日中に空調を停止する運用が行われている。

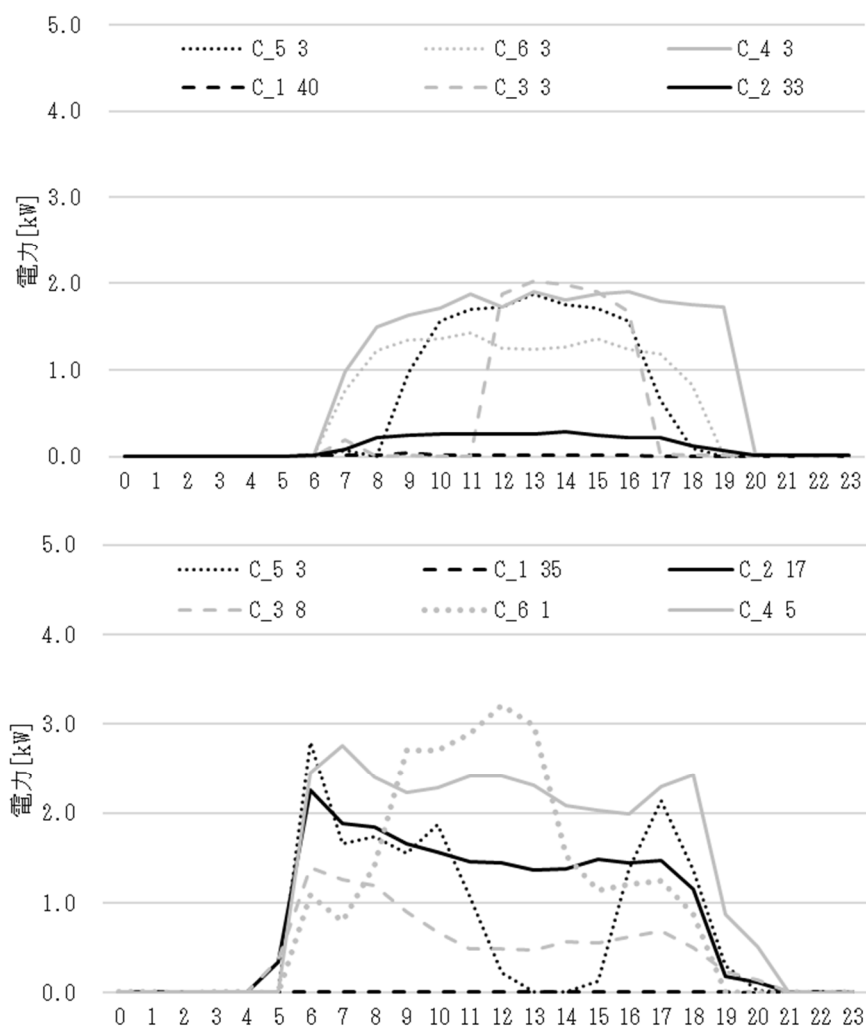


図 4.6-3 パターン分析結果（上：夏期、下：冬期）

3) 補助データの活用

建物ライフログデータを補助情報として、不具合診断の要因推定に活用するため、空調データの分析においては、空調消費電力との相関が大きいと考えられる室内温度、屋外温度、屋外日射、在室情報に関して、空調消費電力のパターン分析結果に基づき補助データのパターンを生成した(図 4.6-4)。補助データが消費パターンの特徴を説明できている例として、冬期 C_5 を考察する。冬期 C_5 は、消費パターンから、日中に空調を停止している運用日のデータ群であるが、他の補助データと比較して、日射量のデータに特徴がみられる。図 4.6-4 の冬期日射量のパターンを確認すると日射量が他のパターンに比べて多い傾向がある。したがって、ダイレクトゲインにより

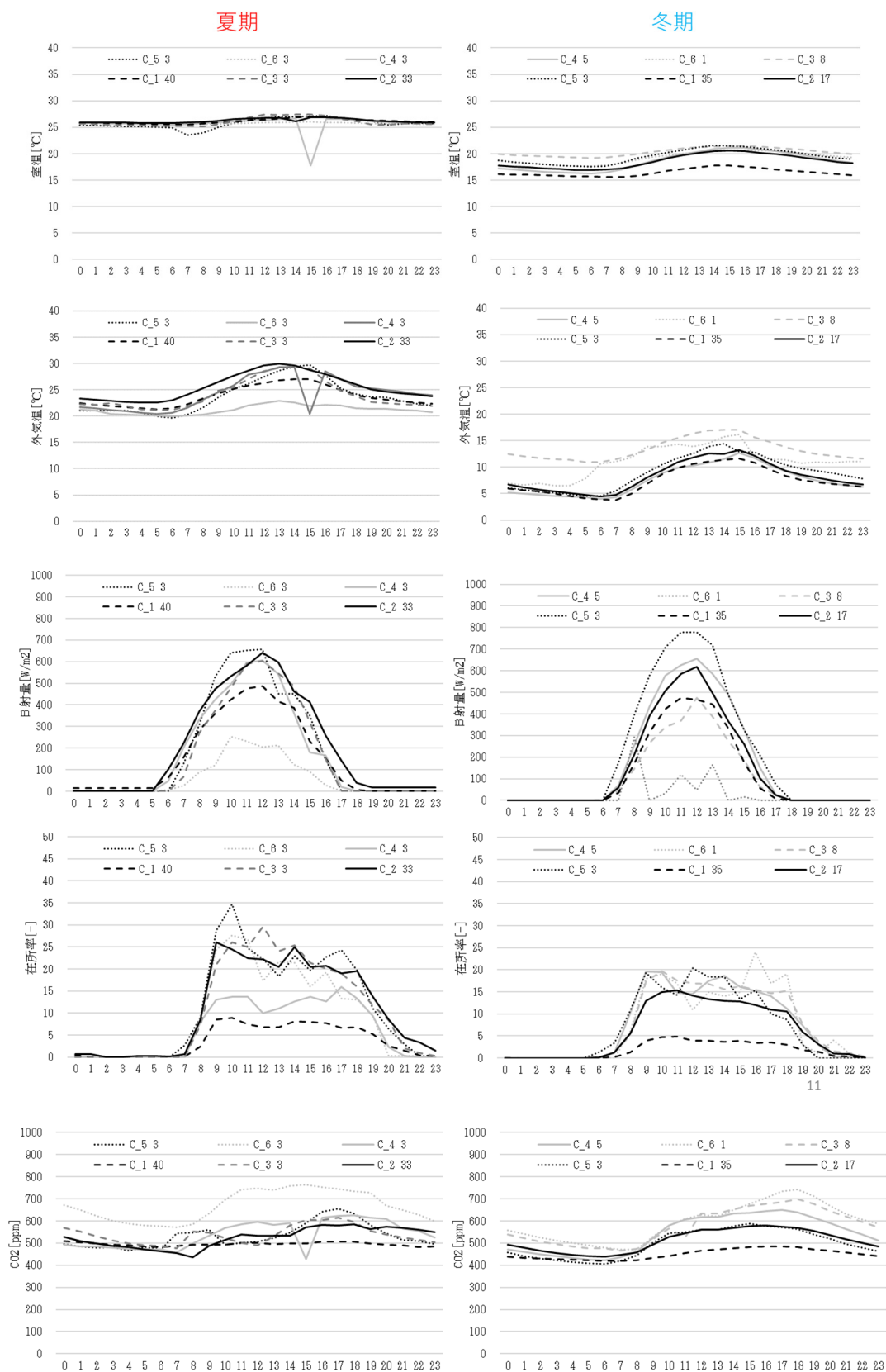


図 4.6-4 補助データのパターン生成結果

暖房負荷が減少し、空調が停止された運用であると推察される。このように空調においても、補助データが有効に活用できそうである。表 4.6-3 にパターン別補助データの有効判定結果をまとめる。

表 4.6-3 パターン別補助データの有効判定結果（上：夏期、下：冬期）

	有効補助データ			判定②：標準偏差 (クラスタ間で比較)				判定③：変動係数※ (クラスタ内で比較)			
	①	②	③	室温	外気温	日射	在所率	室温	外気温	日射	在所率
C_1	室温	—	在所率	45	76	2904	134	1.7	3.2	49	49
C_2	室温	—	外気温	34	65	3147	123	1.3	2.5	42	38
C_3	室温	外気温	外気温	13	25	1560	81	0.5	1.0	4	8
C_4	室温	—	外気温	23	48	2204	151	1.1	2.1	8	15
C_5	室温	在所率	外気温	13	26	1615	58	0.5	1.1	4	9
C_6	室温	日射・在所率・C02	外気温	6	34	488	45	0.2	1.6	7	8

	有効補助データ			判定②：標準偏差 (クラスタ間で比較)				判定③：変動係数※ (クラスタ内で比較)			
	①	②	③	室温	外気温	日射	在所率	室温	外気温	日射	在所率
C_1	室温	日射・在所率	C02	54	80	1602	33	3.3	13.4	17	30
C_2	室温	C02	外気温	30	67	1972	83	1.6	8.9	9	15
C_3	室温	—	C02	16	65	2321	102	0.8	4.7	11	26
C_4	室温	外気温・在所率	C02	29	52	2009	53	1.6	9.4	7	9
C_5	室温	外気温・日射・C02	C02	8	20	1407	57	0.4	2.7	5	9
C_6	室温	—	—	0	0	0	0	0.0	0.0	0	0

※標準偏差/平均値

4) 異常度評価

異常度評価の結果として、表 4.6-4、表 4.6-5 に夏期・冬期それぞれの検証データの異常度一覧を示す。分析全体の評価として、本検証の場合、不具合日のデータを事前に特定し学習データから除外する作業を行っていないため、本来行いたい不具合診断の精度検証を行うことはできないが、プレクラスタリングの結果である不具合の可能性が低い大クラスタデータ (va_n') を不具合でない日のデータ、不具合の可能性が高い大クラスタデータおよび小クラスタデータ (va_a') を不具合日のデータと仮定して精度検証を行うことで診断モデルの検証を行った。結果、夏期（補助データなし）に対して正解率：32/34、夏期（補助データあり）に対して正解率：31/34、冬期（補助データなし）に対して正解率：44/50、冬期（補助データあり）に対して正解率：45/50 となり、診断モデルとして 90%程度の正解率で診断することができる。補助データを含めることで正解率にほとんど影響がない点については、検証用の各日の不具合/不具合でないのラベルを空調消費電力データのプレクラスタリング結果に基づいて仮定しているため行っているためである。

表 4.6-4 異常度評価結果（夏期）

	不具合 分類	類似 パタン	空調 電力	室内 温度	外気 温度	屋外 日射	在所率	CO2	補助データなし		補助データあり	
									検知	非検知	検知	非検知
6/2	va_n'	C_1	0.22	0.27	0.56	0.35	0.94	0.29	-	○	-	○
6/15	va_n'	C_1	0.08	0.13	0.52	0.76	0.42	0.53	-	○	-	○
6/17	va_n'	C_2	0.35	0.21	0.34	0.20	0.89	0.66	-	○	-	○
6/18	va_n'	C_1	0.26	0.36	0.44	0.27	0.42	0.46	-	○	-	○
6/22	va_n'	C_1	0.08	0.36	0.52	0.29	0.43	0.25	-	○	-	○
7/23	va_n'	C_2	0.30	0.27	0.65	0.25	0.56	1.02	-	○	-	○
7/26	va_n'	C_1	0.08	0.85	1.42	0.62	0.50	0.43	-	○	-	○
7/29	va_a'	C_2	3.38	0.37	0.31	0.54	0.58	0.68	○	-	○	-
7/30	va_a'	C_4	5.61	0.69	0.85	1.54	0.92	0.80	○	-	○	-
7/31	va_a'	C_4	5.89	0.67	1.09	1.57	0.62	1.23	○	-	○	-
8/1	va_a'	C_4	5.35	0.69	1.23	1.59	1.27	1.85	○	-	○	-
8/4	va_a'	C_4	5.79	1.06	1.15	1.25	0.81	1.05	○	-	○	-
8/5	va_a'	C_4	6.78	0.88	1.28	1.81	0.92	1.12	○	-	○	-
8/6	va_a'	C_4	6.66	0.82	1.29	1.80	0.48	0.93	○	-	○	-
8/7	va_a'	C_4	6.06	0.74	1.16	1.76	0.74	1.21	○	-	○	-
8/8	va_a'	C_4	4.86	0.64	1.08	0.94	0.82	0.99	○	-	○	-
8/13	va_n'	C_1	0.09	0.58	0.61	0.34	0.50	0.78	-	○	-	○
8/15	va_a'	C_4	5.59	0.99	1.10	1.66	0.74	1.15	○	-	○	-
8/16	va_a'	C_4	6.64	0.85	1.14	1.30	0.80	1.05	○	-	○	-
8/17	va_a'	C_4	5.72	0.73	0.95	1.33	0.80	0.88	○	-	○	-
8/18	va_a'	C_4	6.83	0.77	1.20	1.62	1.53	1.57	○	-	○	-
8/19	va_a'	C_4	6.72	0.68	1.22	1.61	0.59	1.40	○	-	○	-
8/20	va_a'	C_4	6.42	0.71	1.49	1.47	0.79	1.76	○	-	○	-
8/21	va_a'	C_4	5.63	0.83	1.47	1.43	0.64	1.56	○	-	○	-
8/22	va_a'	C_4	6.12	0.75	1.26	1.51	0.78	1.99	○	-	○	-
8/24	va_a'	C_2	3.90	0.49	0.42	0.34	0.60	0.29	○	-	○	-
8/25	va_a'	C_4	5.88	0.70	0.86	1.09	0.90	1.67	○	-	○	-
8/26	va_a'	C_4	3.60	0.57	0.70	1.80	0.99	2.48	○	-	○	-
9/1	va_n'	C_6	0.85	0.52	1.06	1.36	1.36	2.36	-	○	-	-
9/3	va_n'	C_4	0.84	0.51	0.56	1.11	0.56	0.69	-	○	-	○
9/5	va_n'	C_4	1.39	0.52	0.83	1.06	0.73	0.39	-	×	-	×
9/12	va_n'	C_2	0.97	0.17	0.48	0.33	0.44	0.38	-	○	-	○
9/16	va_n'	C_5	0.78	0.62	1.24	1.08	2.09	1.10	-	○	-	×
9/25	va_a'	C_3	0.09	0.14	0.26	0.17	0.27	3.22	×	-	×	○

正解数 20 12 20 11
全数 21 13 21 13

※va_n' : 不具合の可能性が低い日、va_a' : 不具合の可能性が高い日

表 4.6-5 異常度評価結果（冬期）

	不具合 分類	類似 パターン	空調 電力	室内 温度	外気 温度	屋外 日射	在所率	CO2	補助データなし		補助データあり	
									検知	非検知	検知	非検知
12/10	va_n'	C_4	1.80	0.30	0.43	0.54	1.26	0.88	-	×	-	×
12/14	va_n'	C_1	0.28	0.08	0.45	0.66	0.41	0.31	-	○	-	○
12/15	va_a'	C_4	2.08	0.52	0.88	0.30	1.24	1.18	○	-	○	-
12/16	va_a'	C_4	1.85	0.62	1.65	0.58	0.74	0.76	○	-	○	-
12/17	va_a'	C_4	2.61	0.36	1.27	0.51	1.51	0.74	○	-	○	-
12/18	va_a'	C_4	1.96	0.40	1.20	0.56	1.15	1.07	○	-	○	-
12/19	va_a'	C_4	2.10	0.31	1.04	0.67	1.58	1.01	○	-	○	-
12/22	va_a'	C_4	2.14	0.85	0.45	0.59	0.79	0.54	○	-	○	-
12/24	va_a'	C_4	1.47	0.72	0.75	1.06	1.87	1.75	○	-	○	-
12/25	va_n'	C_2	1.02	0.40	0.49	0.66	0.69	1.18	-	×	-	×
12/28	va_n'	C_1	0.28	0.27	0.46	0.29	0.23	0.62	-	○	-	○
1/4	va_a'	C_1	97.18	0.99	0.65	0.31	0.22	0.50	○	-	○	-
1/5	va_a'	C_4	4.74	1.19	0.97	0.26	1.04	2.31	○	-	○	-
1/6	va_a'	C_2	1.84	0.76	1.03	0.76	0.33	1.68	○	-	○	-
1/14	va_a'	C_4	0.95	2.19	1.00	1.09	0.77	2.91	×	-	○	-
1/15	va_n'	C_2	0.63	0.71	1.09	0.47	0.43	0.69	-	○	-	○
1/20	va_n'	C_2	0.32	0.38	0.38	0.17	0.35	0.49	-	○	-	○
1/21	va_n'	C_4	1.30	0.72	1.92	0.60	0.81	1.06	-	×	-	×
1/22	va_a'	C_2	1.95	0.55	1.30	1.57	0.34	1.41	○	-	○	-
1/23	va_a'	C_2	1.52	0.40	0.49	0.46	0.36	1.25	○	-	○	-
1/26	va_a'	C_2	1.84	0.49	0.61	0.47	0.45	0.53	○	-	○	-
1/27	va_a'	C_2	1.45	0.52	0.53	0.37	0.43	0.98	○	-	○	-
1/28	va_n'	C_2	1.39	0.33	0.71	0.37	0.50	0.71	-	×	-	×
1/29	va_a'	C_2	2.10	0.23	1.23	0.21	0.28	0.41	○	-	○	-
1/30	va_a'	C_2	1.66	0.92	2.01	1.43	0.34	0.65	○	-	○	-
2/3	va_a'	C_4	2.08	0.23	0.72	0.46	1.12	0.47	○	-	○	-
2/4	va_a'	C_4	2.24	0.44	0.48	0.23	1.14	0.93	○	-	○	-
2/5	va_a'	C_4	2.14	0.93	2.12	2.43	1.00	0.77	○	-	○	-
2/6	va_a'	C_2	1.98	0.16	1.13	0.44	0.54	0.99	○	-	○	-
2/8	va_n'	C_1	49.79	0.28	0.62	0.63	0.12	0.67	-	×	-	×
2/9	va_a'	C_4	2.60	1.24	1.64	1.46	0.78	0.63	○	-	○	-
2/10	va_a'	C_2	2.27	0.56	0.93	0.21	0.37	0.32	○	-	○	-
2/11	va_n'	C_1	0.25	0.09	0.43	0.18	0.13	0.57	-	○	-	○
2/12	va_a'	C_2	2.46	0.61	0.58	0.37	0.30	0.68	○	-	○	-
2/13	va_a'	C_2	1.82	0.42	0.98	0.86	0.28	0.31	○	-	○	-
2/14	va_n'	C_1	0.29	0.13	0.59	0.30	0.16	0.24	-	○	-	○
2/16	va_a'	C_4	2.49	0.55	0.86	0.33	0.50	0.64	○	-	○	-
2/17	va_a'	C_4	2.57	0.69	1.34	2.16	1.47	1.38	○	-	○	-
2/18	va_a'	C_2	1.94	0.63	1.18	0.48	0.45	1.34	○	-	○	-
2/19	va_a'	C_2	2.03	0.25	0.45	0.42	0.52	0.56	○	-	○	-
2/20	va_a'	C_2	1.77	0.44	0.55	0.70	0.34	0.71	○	-	○	-
2/23	va_a'	C_3	1.71	2.29	1.10	0.38	0.55	0.44	○	-	○	-
2/24	va_a'	C_3	1.90	0.67	1.01	0.75	0.45	0.22	○	-	○	-
2/25	va_a'	C_2	1.29	1.06	0.67	0.42	0.45	0.74	○	-	○	-
3/2	va_a'	C_2	1.63	0.36	0.34	0.70	0.20	0.49	○	-	○	-
3/3	va_a'	C_4	1.96	0.23	0.60	0.68	0.89	0.73	○	-	○	-
3/4	va_a'	C_2	2.00	0.67	1.07	0.68	0.27	0.65	○	-	○	-
3/5	va_a'	C_2	1.83	0.92	0.50	0.69	0.28	0.40	○	-	○	-
3/9	va_a'	C_2	1.58	0.42	0.67	0.90	0.53	0.78	○	-	○	-
3/16	va_a'	C_2	1.72	0.28	0.78	0.66	0.40	0.80	○	-	○	-

正解数 38 6 39 6
全数 39 11 39 11

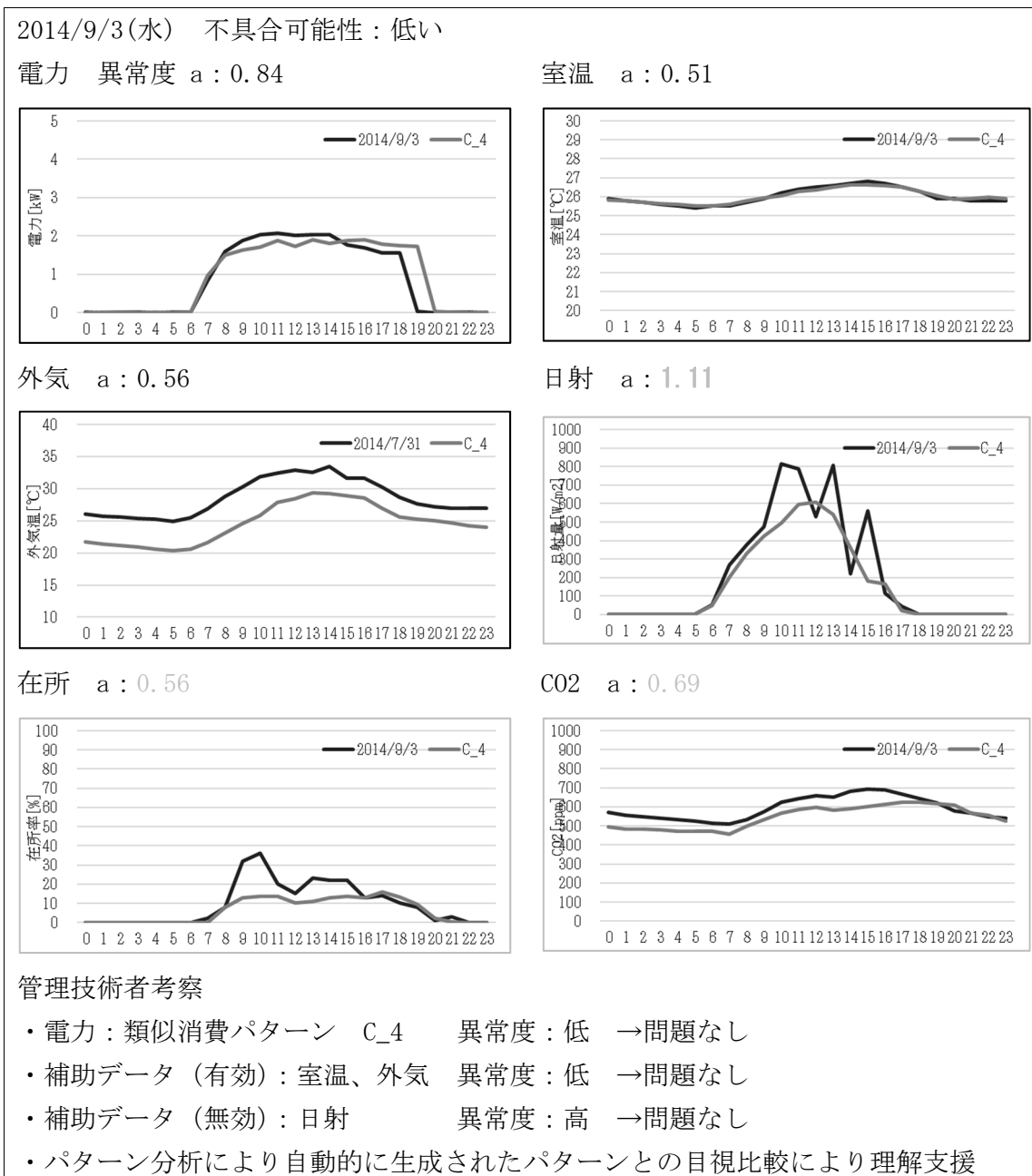
5) 構築した診断モデルによる初期不具合診断

本節では構築した診断モデルを使用して、実運用を想定した初期不具合診断として試用してみることでその有効性を確認する。

実運用段階を想定し、日常のエネルギーマネジメント業務における初期不具合診断の状況と同じく、前日の運用データに対する初期不具合診断結果が翌朝に掲示される形式で、診断結果に対して建物の管理技術者目線での考察を行う。不具合日に気づくことができるか、また補助データの確認が不具合の要因推定に役立つかが重要で、初期不具合診断として、本不具合診断に繋げるために管理技術者等が注目すべきデータの絞り込みが効率的に行われることを確認する。不具合診断の代表日の結果を表 4.6-6 に示す。不具合でない日と不具合日の診断結果を、管理技術者視点の考察を加えて記載した。パターン分析により自動的に生成されたパターンとの目視比較が可能で、従来過去の経験に基づき行ってきた管理技術者によるエネルギー管理業務を効率化するための支援ツールとして機能することを確認した。

表 4.6-6 不具合診断の代表日の結果と管理技術者目線での考察

(1) 不具合でない日の診断結果の例

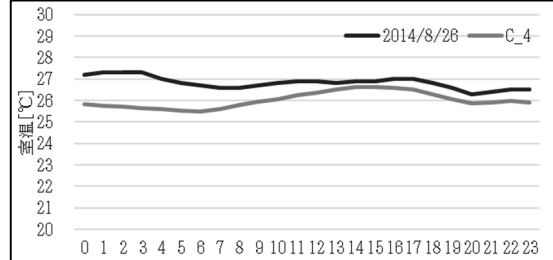
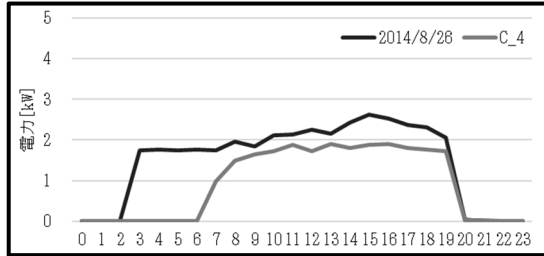


(2) 不具合日の例

2014/8/26(火) 不具合可能性：高い

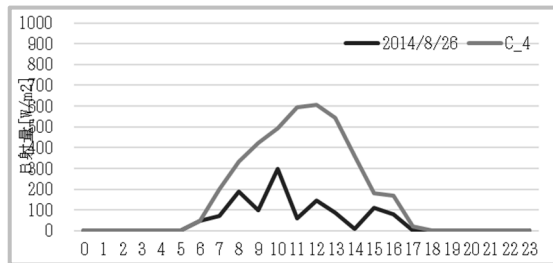
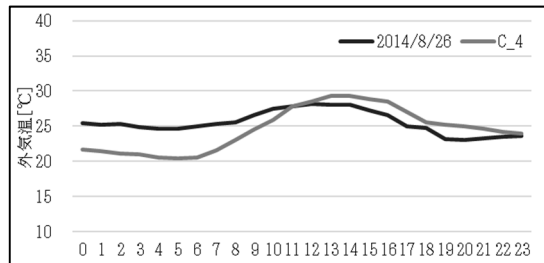
電力 異常度 a : 3.60

室温 a : 0.57



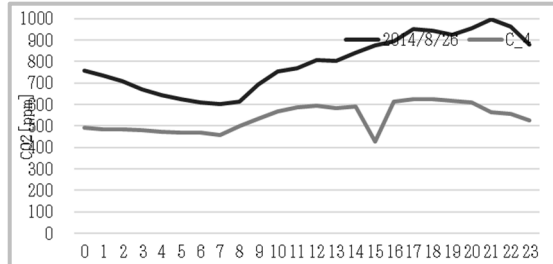
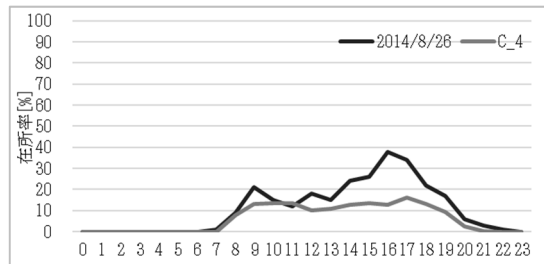
外気 a : 0.70

日射 a : 1.80



在所 a : 0.99

CO2 a : 2.48



管理技術者考察

- ・電力：類似消費パターン C_4 異常度：高 →不具合可能性あり
朝の空調立ち上げが早いため
運転スケジュール確認
- ・補助データ (有効)：室温、外気 異常度：低 →問題なし
- ・補助データ (無効)：日射、CO2 異常度：高 →問題なし
在室情報も異常なし

4.7 エネルギー管理支援ツールとしての展開

本研究にて構築した不具合診断手法の利点を改めて整理し、今後の展開としてエネルギー管理業務の支援ツールとしての運用フローとしてまとめる。先の検証に加え、エネルギー管理手法としての有用性を確認する意味で、管理技術者へのヒアリングもを行い、その意見も踏まえて利点をまとめた。

【不具合診断手法としての利点】

- ・各日の消費エネルギー推移だけでなく、比較対象としてパターン分析結果の類似パターンを示すことができ、視覚的に運用状況やエネルギー特性を把握しやすい。
- ・異常度評価により、視覚情報だけでなく、定量的に不具合可能性が把握できるため、本格的な不具合診断への意思決定がしやすい。
- ・本実証建物のように、自然エネルギーのパッシブ利用や細やかなタスク・アンビエント制御など ZEB に代表される建物においては、消費パターンが複雑であり、そのエネルギー特性の把握作業を半自動化できることは作業効率向上につながる。また、建物の使用状況が変更されるなどの状況にも、本手法であれば、定期的な再学習による対応が可能である。
- ・補助情報を活用した不具合要因の絞り込みは、精度向上が課題ではあるが、不具合診断の効率化に有用である。
- ・全てのプロセスを自動化することが望ましいと考えたが、結果的には、分析プロセスの中に管理技術者等が確認・調整可能な仕組みを入れ込むことがエネルギー特性の把握に繋がり、不具合診断としての信頼度が高まる。

今後の展開として、本章の研究成果を、エネルギー管理手法としての業務プロセスとしてまとめたものを表 4.7-1 に示す。本提案による不具合診断手法を BEMS の機能として実装し、日常的なエネルギーマネジメント業務の中で、エネルギー特性を把握し、不具合診断の初期プロセスに組み込むことで、管理技術者のエネルギーマネジメント業務を効率化し、エネルギー性能の向上に寄与する。今後は、本研究にて構築した仕組みをクラウド BEMS の分析機能として実装し、実運用における有用性を検証していく。

表 4.7-1 本研究成果をエネルギー管理ツールとしての利用した業務フロー

		管理ツール提供側 (例 BEMSベンダー)	管理ツール使用側 (例 エネルギー管理技術者)
データ収集	事前準備	BEMSの機能として「パターン分析による不具合診断」実装 ↓ データ収集 (対象データ、補助データ) ↓ 欠損データ等の処理 ↓ <プレクラスタリング>による不具合可能性の高いデータの除去	←データ提供 ←不具合可能性の高いデータの確認 ※必要に応じて不具合と診断したい (大クラスタであるが不具合としたい) データ群の追加
評価モデル構築 (エネルギー特性把握)	モデル構築段階	学習データを準備 ↓ <本クラスタリング>による消費パターンの生成 ↓ 補助データパターンの生成 ↓ 消費パターンごとに各補助データの有効判定 (ばらつき評価)	←クラスタ数の調整 消費パターン分析結果の確認 ←補助データパターンの確認 ※必要に応じて有効としたい補助データの追加
	モデル検証段階	検証データを準備 ↓ 異常度評価 ↓ 不具合診断としての精度検証 ↓ 診断モデル完成 (結果が望ましくなければ、クラスタ数の調整や補助データの工夫により再構築)	←結果確認・妥当性判断 ←診断モデルの決定
本運用 (初期不具合診断)		日常運用データの診断 (1回/日) ↓ 診断結果の通知 ↓ 経年蓄積運用データによる診断モデルの再学習	←診断結果の確認・考察 不具合要因の確認・推定 ↓ ↓
本不具合診断		(他の管理ツールの利用)	不具合の詳細分析・原因特定 ↓ 修理・改善・改修

※□：本研究において構築した不具合診断手法の対象部分

4.8 まとめ

本章では、日常的なエネルギーマネジメントのための「パターン分析による不具合診断手法」を提案し、実運用データにおける分析を通じて、手法の改良を図り、実用性を高めた。以下に、事前に想定した課題に対する対応結果を示す。

【想定した課題に対する対応】

4-①：学習データ作成時に不具合データを除く方法

対象データに対してクラスタ数を多めに設定したプレクラスタリングを行い、データ数の少ないクラスタ（小クラスタ）は、不具合データを含む可能性が高いと仮定することで、除外する。また、データ数の多いクラスタ（大クラスタ）においては、定期的に行われる特異運用もしくは定常化してしまった不具合運用データを含む可能性があるため、管理技術者等の確認により、人為的に除く操作を加える。

4-②：クラスタ数の決定方法

クラスタ数の決定の自動化は技術的に難しい課題であり、クラスタ数を増減させた分析結果を確認するプロセスを用意する。本行為は、管理技術者等がエネルギー特性を理解することに繋がることから、管理者等が日頃の運用感覚等も踏まえ、最終的にはクラスタ数を設定することとする。

4-③：異常度閾値の設定

学習データから不具合が適切に除かれている場合には、学習データ内の最大異常度を閾値と定めることで、未知のデータに対して高い精度で不具合診断が行えることを確認した。ただし、診断すべき不具合データの内容や評価モデルによっても精度は変わるため、日々の診断結果の推移を見ながら、実運用の中で評価モデルの再学習等も含め適宜チューニングが必要である。

4-④：補助データの活用方法

補助データが多すぎると誤検知率が高くなるため、適切な補助データを採用し、不具合の要因推定を行う必要がある。各クラスタ内のデータのばらつきの程度（変動係数）に着目し、ばらつきが少ない補助データはそのパターンの特徴をよく表しており、有効な補助データであるとする。

4-⑤：精度（正解率）による評価モデルの採否判断基準

本研究だけでは、多様な不具合に対して十分な精度が発揮できているとはいえない結果であるが、パタメータの調整や再学習が容易な点が本手法の特徴の一つであり、実運用の中で建物のエネルギー特性や診断したい不具合に応じたチューニングが大切である。

4-⑥：不具合診断手法としての汎用性検証

空調消費電力データに対する検証では、実務に近い形を想定し、不具合が予

め認識されていないデータ群に対して分析を行った。パターン分析の特徴であるデータの要約性により、不案内なデータに対しても容易にその特性を把握することができた。また、初期不具合診断として、膨大な建物ライフログ)ら管理技術者が注力すべきエネルギー管理のポイントや具体不具合日の絞り込みと要因推定につながる手法であることが確認した。

5. 総括

本研究では、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）の持続的運用のために、ZEBの性能評価指標「エネルギー自立率」および管理手法「パターン分析による不具合診断」を提案し、実証建物の運用データに対する検証を通じてその有用性を示した。

第1章では、研究の背景として、現在までのZEBに関する社会動向、意義、定義を整理した。その上で、ZEBの普及を見据え、運用段階における課題を提起した。その中で、本研究の目的と成果の展開先を示した。

第2章では、ZEBの運用実態の把握とエネルギー性能の把握を目的に、ZEBの事例研究として、ZEB実証建物のエネルギー性能評価を行った。年間エネルギー収支0運用下における建物のエネルギー特性を分析し、整理した。また、運用段階において実際に実施された不具合や運用改善の内容を分析し、運用段階におけるエネルギーマネジメントに対する課題を抽出した。

第3章では、ZEBのエネルギーセキュリティや系統連系のためのエネルギー自立性の評価のために、新たな評価指標として「エネルギー自立率」を提案し、有用性を検証した。建物のエネルギー自立性の定量評価が可能となり、季節や日時ごとに異なる建物内のエネルギーフローの比較評価が可能になった。さらに、エネルギー自立率の応用として、蓄電池によるエネルギー自立性の向上検討を行い、エネルギーセキュリティや系統連系の検討を行う際に役立つことを示した。

第4章では、エネルギーマネジメント業務の高度化・効率化のため、ZEBの日常的なエネルギーマネジメントのための不具合診断手法の構築を目的とし、「パターン分析による不具合診断」を提案した。実運用データとして照明エネルギーデータを用いて基本ロジックを確立し、補助データの活用方法や実運用を想定した学習データの作成方法を検討した。続いて、空調エネルギーデータに対して本手法を適用し、実際の運用を想定した分析プロセスと業務フローを確立し、その中で分析システムにより自動化する部分と管理技術者等が介在して判断・調整すべき部分を整理した。

以上が本研究のまとめである。本研究の成果は、年間エネルギー収支がゼロとなるZEB実証建物のエネルギー特性を定量的にまとめたこと、および、今後ZEBを持続的に運用していくための課題に対する提案として、性能評価指標「エネルギー自立率」および管理手法「パターン分析による不具合診断手法」を実証建物の運用データに適

用して、その有用性を検証したことである。

未だ、ZEBは普及促進段階にあり、年間エネルギー収支ゼロとなるZEBの事例は少ないが、本論で挙げた課題は、各所で発生し始めており、本研究成果がその解決に役立てば幸いである。

参考文献

- [1] ZEBの実現と展開に関する研究会, ZEBの実現と展開に関する研究会報告書, 経済産業省, 2009.
- [2] 経済産業省, エネルギー基本計画, 経済産業省, 2010.
- [3] 経済産業省, エネルギー基本計画, 経済産業省, 2014.
- [4] 空気調和・衛生工学会 ZEB 定義検討小委員会, ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の定義と評価方法, 空気調和・衛生工学会, 2015.
- [5] 経済産業省資源エネルギー庁, ZEB ロードマップ委員会とりまとめ, 経済産業省, 2015.
- [6] NREL, "Zero Energy Buildings : A Critical Look at the Definition," 2006.6.
- [7] P. Torcellini, S. Pless, M. Deru and D. Crawley, "Zero Energy Buildings : A Critical Look at the," *NREL Conference Paper*, 2006.06.
- [8] S. Pless and P. Torcellini, "Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply Options," *NREL Technical Report*, 2010.06.
- [9] Jarek Kurnitski, "REHVA nZEB technical definition and system boundaries for nearly zero energy buildings," *REHVA Report No.4*, 2013.
- [10] 空気調和・衛生工学会, ZEB のデザインメソッド, 技報堂出版, 2019.9.
- [11] 小柳秀光・Alan Mayer, "Case Study on the Validity of Energy Simulations and Energy Measuring in the Office ZEB in California, U.S.," 日本建築学会技術報告集 Vol.23, p. 557~561, 2017.
- [12] 建築研究所, "建築物のエネルギー消費量計算プログラム," [オンライン]. Available: <https://building.app.lowenergy.jp/>. [アクセス日: 1 12 2019].
- [13] (一財) 建築環境・省エネルギー機構, "the BEST Program," [オンライン]. Available: <http://www.ibec.or.jp/best/index.html>. [アクセス日: 1 12 2019].
- [14] Karsten Voss and Eike Musall, NET ZERO ENERGY BUILDINGS, EnOB, 2012.11.
- [15] NEDO, "日射量データベース," [オンライン]. Available: <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>. [アクセス日: 1 12 2019].
- [16] 省エネルギーセンター, オフィスビルの省エネルギー, 省エネルギーセンター,

2009.

- [17] 大成建設(株), 平成 26 年度 CO2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業, 都市部における中小規模建物の超低炭素化(ZEB 化)に関する実証 委託業務 成果報告書, 2015.3.
- [18] 経済同友会, エネルギー自立社会と低炭素社会の構築—課題の整理と提言—, 経済同友会, 2014.4.
- [19] 丹羽英治, エネルギー自立型建築: 持続可能な低炭素都市を支える, NSRI, 2013.10.
- [20] NREL, "Net-Zero Energy Buildings: A Classification System Based on Renewable Energy Supply," 2010.6.
- [21] 省エネ基準部会住宅・建築物判断基準小委員会, "太陽光発電設備の一次エネルギー消費量削減効果," 2012.
- [22] 松永知大・渋谷彩音・田辺新一, "ゼロ・エネルギーハウスに関する実践的研究 (その 6) 太陽光発電・蓄電池導入住宅における自家消費率の評価," 日本建築学会, pp. 1159-1160, 2016.
- [23] 中原信生, "コミッシングプロセスによる高性能ビルの実現、総論," 電気設備学会誌, pp. 723(3)-731(11), 2010.9.
- [24] チェットリチャーズ・(翻訳)原田勉, OODA ループ, 東洋経済新報社, 2019.2.
- [25] 吉川貴雄・相良和伸・山中俊夫・甲谷寿史・丹羽英治・嶋田宣広, "統計的手法による空調システムの不具合検知に関する研究(その 2)マハラノビスの汎距離を用いた不具合検知手法の感度に関する検討," 日本建築学会学術講演梗概集, 2006.7.
- [26] 宮田翔平・赤司泰義・林鎮行・呉楊駿・田中勝彦・田中覚・桑原康浩, "機械学習を用いた空調熱源システムの不具合検知・診断(第 1 報)シミュレーションによる不具合データベース作成と畳み込みニューラルネットワークによる不具合検知・診断," 空気調和・衛生工学会論文集 No.257, pp. 11-20, 2018.8.
- [27] K. Verbert, R. Babuka, B. De Schutter, "Combining knowledge and historical data for system-level fault diagnosis of HVAC systems," *Engineering Applications of Artificial Intelligence Vol. 59*, pp. 260-273, 2017.3.
- [28] 鄭明傑・潘嵩・中原信生, "パターン認識による空調システムの異常検知・診断に関する研究," 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 1693-1696, 1999.

- [29] Bishnu Nepal · 山羽基 · 河村貢 · 横江彩 · 佐橋寛也, “多棟の既存建物の低炭素化に向けたエネルギーマネージメントに関する研究(第3報)クラスタリング手法を用いた要因別エネルギー消費の分析とエネルギーマネージメント,” 空気調和・衛生工学会論文集 No.258, pp. 21-28, 2018.9.
- [30] 吉澤亜耶 · 橋本洋, “異常検知技術の概要と応用動向について”.
- [31] Cohen, “Fast effective rule induction,” *Machine Learning*, 1995.
- [32] V. Vapnik and A. Lerner, “Pattern recognition using generalized portrait method,” *Automation and Remote Control*, 1963.
- [33] I. Tsochantaridis · T. Joachims · T. Hofmann · Y. Altun, “Large Margin Methods for Structured and Interdependent Output Variables,” *The Journal of Machine Learning Research*, pp. 1453-1484, 2005.
- [34] Breiman Leo, “Random Forests,” *Machine Learning*, p. 5-32.
- [35] E.W. Forgy, “Cluster analysis of multivariate data: efficiency versus interpretability of classifications,” *Biometrics*, p. 768-769, 1965.
- [36] 神鷹敏弘, “データマイニング分野のクラスタリング手法(1)クラスタリングを使ってみよう!,” 人工知能学会誌 vol.18 no.1, pp. 59-65, 2003.
- [37] David Arthur and Sergei Vassilvitskii, “k-means++: The Advantages of Careful Seeding,” *Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia*, pp. 1027-1035, 2007.
- [38] 後藤勲, “事例紹介：24時間周期データに対する教師無し学習の適用,” 人工知能学会全国大会論文集, 2018.

本論文に関する発表論文

【査読付き論文】

- 1) 田中拓也、梶山隆史、横井睦己、熊谷智夫、川瀬貴晴、奥宮正哉、田中英紀：ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の運用段階におけるエネルギー性能評価に関する研究 第1報—エネルギー性能分析と新たな評価指標の提案、空気調和・衛生工学会論文集、2018.10
- 2) 田中拓也、奥宮正哉、田中英紀、鵜飼真貴子：建物のデータ駆動型エネルギーマネジメントにおけるパターン分析による不具合検知に関する研究 第1報—照明消費エネルギーに対する不具合検知の検討、空気調和・衛生工学会論文集、2019.11

【口頭発表（国内）】

- 1) 田中拓也、梶山隆史、他：都市部における ZEB の実現に向けた実証研究 その 16、日本建築学会学術講演梗概集、2017.9
- 2) 田中拓也、梶山隆史、熊谷智夫、横井睦己：ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の先進的取り組み その 9 大成建設における先進的取り組み —ZEB 実証棟の計画と運用実績—、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2017.9
- 3) 田中拓也、梶山隆史、他：都市部における ZEB の実現に向けた実証研究 その 17、日本建築学会学術講演梗概集、2018.9
- 4) 田中拓也、奥宮正哉、田中英紀、鵜飼真貴子：建物のエネルギーマネジメントのための汎用的な不具合検知手法の開発 その 1 クラスタ分析によるエネルギー消費パターンの分類と不具合検知への適用検討、日本建築学会学術講演梗概集、2019.9
- 5) 田中拓也、奥宮正哉、田中英紀、鵜飼真貴子：建物のエネルギーマネジメントにおける不具合検知に関する研究（第1報）クラスタ分析を用いた異常検知手法の適用検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2019.9

【口頭発表（海外）】

- 1) TANAKA Takuya, et. : EXPERIMENTAL STUDY TOWARDS URBAN ZEB REALIZATION, World Engineering Conference & Convention(WECC2015), 2015.12
- 2) TANAKA Takuya: Targeting Urban ZEB in JAPAN, ASHRAE Winter Conference, 2018.1
- 3) TANAKA Takuya: , EMPIRICAL STUDY TOWARD REALIZATION OF ZEB IN URBAN AREA, Grand Renewable Energy(GRE2018), 2018.6
- 4) TANAKA Takuya: A study toward the realization of net zero energy building in urban areas, Sustainable Built Environment Conference(SBE19tokyo), 2019.8, Best Paper Award