

信州大学審査学位論文

業務用途建築物における空調設備の省エネルギー・
負荷平準化に寄与する設計・運用手法に関する実践的研究

2017年3月

天野 雄一郎

目 次

第1章 序論

1. 1	本研究の背景	1
1. 2	関連する既往の研究	4
1. 3	本研究の目的	5
1. 4	本論文の構成	6

第2章 空調設備の効率的な運転に向けた屋外温熱環境改善手法の検討

2. 1	はじめに	11
2. 2	本章に関連する既往の研究	11
2. 3	研究フロー	12
2. 4	解析準備	14
2. 4. 1	データ概要	14
2. 4. 2	解析対象地域	15
2. 4. 3	幾何補正	15
2. 4. 4	輝度補正	16
2. 5	QuickBird データによる緑被の抽出と植生分類	17
2. 5. 1	解析の流れ	17
2. 5. 2	最尤法による土地被覆分類	18
2. 5. 3	小考察	19
2. 6	AVIRIS データによる緑被の抽出と植生分類	20
2. 6. 1	解析の流れ	20
2. 6. 2	データの異常値の抽出・補正	20
2. 6. 3	最尤法による緑被の抽出	21
2. 6. 4	スペクトルの分光特性と SAM 分類	23
2. 6. 5	小考察	25
2. 7	AVIRIS データによる材質分類	28
2. 7. 1	解析の流れ	28
2. 7. 2	分光放射計によるスペクトル分析	29
2. 7. 3	大気補正	30
2. 7. 4	分光放射計スペクトルを教師データとした材質分類	30
2. 7. 5	小考察	31
2. 8	まとめと今後の課題	32

第3章 小規模事務所建物における空調設備の稼働状況検証と設計手法の合理化

3. 1	はじめに	35
3. 2	本章に関連する既往の研究	35
3. 3	研究フロー	36
3. 4	調査概要	37
3. 4. 1	対象施設概要	37
3. 4. 2	計測期間	40
3. 4. 3	室内温熱環境の測定	40
3. 4. 4	外気温湿度の測定	41
3. 4. 5	空調処理熱量の測定	42

3. 5	室内温熱環境の分析	44
3. 5. 1	室内温湿度	44
3. 5. 2	代表日の室内温湿度	45
3. 5. 3	室内の CO ₂ 濃度	46
3. 6	暖房期のエネルギー分析	47
3. 6. 1	COP および負荷率の関連性	47
3. 6. 2	空調負荷率の最大値	49
3. 6. 3	空調負荷計算と入力条件	50
3. 6. 4	最大空調処理熱量に関する検討	51
3. 7	冷房期のエネルギー分析	52
3. 7. 1	空調機稼働状況	52
3. 7. 2	COP および負荷率の関連性	53
3. 7. 3	空調負荷率の最大値	54
3. 7. 4	最大空調処理熱量に関する検討	55
3. 7. 5	電灯電力量の設計値と実績値	56
3. 8	まとめと今後の課題	57
第4章	電力供給に供する重要機器室における空調計画・運用手法の合理化	
4. 1	はじめに	60
4. 2	本章に関連する既往の研究	60
4. 3	研究フロー	61
4. 4	重要機器室の定義と分類	62
4. 4. 1	重要機器室の定義	62
4. 4. 2	重要機器室の分類	62
4. 5	機器発熱量の簡易推定手法の提案	63
4. 5. 1	簡易推定手法の検討	63
4. 5. 2	簡易推定手法の検討に向けた実測概要	64
4. 5. 3	機器発熱量の推定精度の検証方法	65
4. 5. 4	機器発熱量の精度検証	65
4. 6	空調負荷の構成に関する考察と実測値と空調機容量の比較	67
4. 6. 1	空調負荷（潜熱）の考察	67
4. 6. 2	内外壁の通過熱負荷（顕熱）の考察	68
4. 6. 3	空調負荷の構成に関する考察	69
4. 6. 4	空調負荷の実測値等と空調機容量の比較	70
4. 7	多様な重要機器室における実測調査	71
4. 7. 1	実測対象室と実測項目	71
4. 7. 2	室用途ごとの室数および延床面積の推定	72
4. 7. 3	機器発熱量の推定	82
4. 7. 4	全対象室における空調機負荷の最大値に関する検討	84
4. 7. 5	室用途と機器発熱量の関係	88
4. 8	重要機器室における省エネポテンシャルの評価	89
4. 8. 1	目的とポテンシャルの推定手法	89
4. 8. 2	室用途ごとの省エネ効果の原単位の算出	90
4. 8. 3	室用途ごとの総延床面積の推定	92
4. 8. 4	省エネ効果の計算結果	93
4. 9	合理的な設計フローの提案	94
4. 10	まとめと今後の課題	97

第5章 環境共生型事務所建物における継続的なコミッショニングに関する実践研究	
5. 1 はじめに	100
5. 2 本章に関連する既往の研究	100
5. 3 研究フロー	101
5. 4 対象建物の概要	102
5. 4. 1 建物概要	102
5. 4. 2 建築設備概要	104
5. 4. 3 土壌蓄熱空調システムの概要	108
5. 4. 4 水蓄熱空調システムの概要	110
5. 4. 5 丸の内地域冷暖房施設の概要	111
5. 4. 6 空調システムの運転制御方法	112
5. 5 コミッショニングを活用した運用改善	117
5. 5. 1 コミッショニング体制	117
5. 5. 2 コミッショニングフェーズについて	118
5. 6 土壌蓄熱空調システムにおける継続的なコミッショニング	119
5. 6. 1 当初・最適化コミッショニングの運転条件の検討	119
5. 6. 2 当初・最適化コミッショニングの運転実績	121
5. 6. 3 継続・運用コミッショニングの運転実績	129
5. 6. 4 再コミッショニングの運転検討	131
5. 6. 5 コミッショニングによる運用改善結果	137
5. 7 水蓄熱空調システムにおける継続的なコミッショニング	138
5. 7. 1 水蓄熱空調システムの分析	138
5. 7. 2 水蓄熱空調システムの蓄熱効率の検証	140
5. 7. 3 シミュレーションによる運用改善手法の検討	141
5. 7. 4 運用改善の実施	142
5. 8 省エネルギーに向けたその他の取り組み	143
5. 8. 1 建物使用状況の変化と対応	143
5. 8. 2 継続的な省エネ施策の検討と実施	144
5. 9 省エネルギー・負荷平準化効果の検証	146
5. 10 まとめと今後の課題	148
第6章 総括	153
本研究に関する既往発表論文リスト	157
謝辞	162

第 1 章

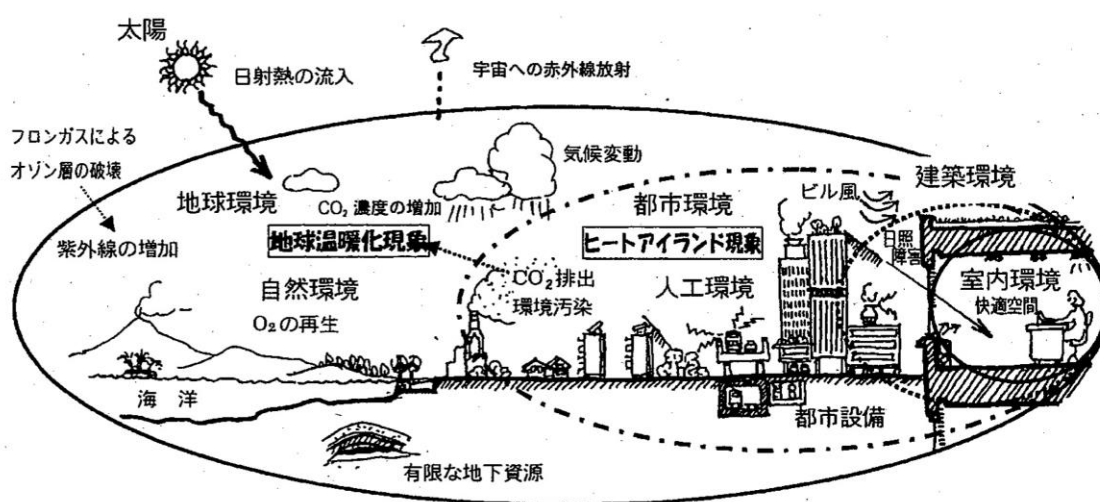
序 論

第1章 序論

1.1 本研究の背景

昨今、地球温暖化現象の抑制に向けあらゆる分野の省エネルギー対策が喫緊の課題として取り上げられており、建築設備面においても抜本的な省エネルギー対策・継続的な環境負荷低減が必要不可欠となっている。空調設備においては、室外機からの排熱が都市ヒートアイランド化の一因とされていることや過剰設計による非効率な運転による増エネルギー、強制的な設定温度の変更に代表される無理な省エネルギー施策の実施による生産性の低下などの様々な問題が起こっている（図 1-1）。一般的な事務所建物においては、全使用エネルギーのうち、空調設備が使用するエネルギーが約 40%を占めている¹⁻¹⁾ことが知られており、空調設備におけるエネルギー低減が建物全体の省エネルギーに大きな影響を与えることが分かっている。また、新築の建築物は改正省エネ法などにより、設計時における性能がある程度担保されることとなったため、既設の建築物に対する省エネルギー施策の実施が更に重要となってくると推測される。

空調設備の省エネルギー対策を検討するうえで様々な観点からのアプローチがあるが、まず、都市温熱環境のマクロな観点から考えると、ヒートアイランド化に代表されるような都市温暖化が冷房負荷を増大させ、空調機の非効率な運転の要因の一つとなっていることは既知の事実である。また、逆に空調熱源機器の排熱が屋外温熱環境を悪化させている原因の一つでもあり、連鎖的な悪循環となっている。ここで、解決策として外気温度を低下させ空調設備を効率よく運転させるためには、都市内に緑被等を計画的に配置し緑量を増やすことで、合理的に都市温熱環境を改善することが重要である。しかし、植生の把握手法に目を向けると、人による現地調査やリモートセンシングを利用した緑被の把握が実施されてきたが、人力による調査では時間がかかるうえ同時期に面的に把握できないことや、近年高分解能をもつ汎用衛星データが利用でき細かな緑被までも抽出することができるが、緑量の判定に重要な樹種の判別までは困難であることが多く、「面的に」「詳細に」「樹種を判別」できるリモートセンシング技術の確立が望まれている。



最新建築環境工学[改訂 4 版]より引用

図 1-1 地球環境問題と建築環境の関係図

次に、建築設備のミクロな観点から考えると、設計時において室内発熱負荷や機器の負荷率等を実情に沿うように考慮し、適切な空調設備構成とすることが更なる省エネルギーにつながる事が明確である。しかし、現状を鑑みると空調設備の設計時においては、必要換気量や発熱負荷等の諸条件をもとに、最大負荷計算法等の空調負荷計算を実施し、必要な空調能力を算出した上で空調機を選定するが、実運用時に必ず適正な容量の空調機が選定されているとはいえず、空調処理熱量と設置している空調機容量に乖離が見られ、非効率な稼働状況となっている場合がある。建物規模別における延床面積の割合に目を向けると、省エネルギー基準で第一種特定建築物の対象となる 2000 m²以上の大規模な建物よりも第二種特定建築物の対象となる 2000 m²以下の小規模建物の延床面積が占める割合が全体の半分以上であることや、その中でも事務用途の建物が多いことが分かっており¹⁾²⁾、小規模事務所建物における空調設備の合理的な設計の実施は有効であることが示唆される。しかし、2017 年度から施行される建築物省エネ法では、2000 m²以上の建物についてエネルギー消費性能適合性判定の義務を課しているが、2000 m²以下の建築に対する省エネルギー施策にはまだ十分な配慮が払われているとはいえず。このため、小規模事務所建物の実運用時における空調負荷の性状を明らかにし、実状を反映した最適な空調計画を策定する必要がある。

また、サーバ室や計算機室など代表されるような電子機器を設置している機械室においては、各機器で消費される電力量とそれに比例した発生熱量の処理に使用される空調設備のエネルギーがほとんどを占めていると推測される。昨今、高密度化が進んでいるデータセンターなどでは単位面積当たりの消費電力量の多さから、PUE（データセンターエネルギー効率）などの指標に表わされるように、空調設備に係るエネルギーを低減することは運用上の必須の課題であり、様々なエネルギー低減に向けた検討がなされている。しかし、データセンター以外で電子機器を設置している一般的な機械室においては、まだそのような検討がなされているとはいえず。しかし、インフラ設備を維持管理している企業においては、サーバ以外に通信系、電力供給系、計算系等の機器室を相当の面積規模で設置していると考えられており、これらの施設で消費されているエネルギーはある程度の量があると推測される。

例えば、電力会社においては、電力供給を安定して行うために必要な各種の機器を設置した室を重要機器室と呼んでおり、給電網上の重要拠点として位置付けている。これには通信機械室や配電盤室、計算機室等が含まれるが、施設数自体が非常に多いうえ無人で運用されている施設も多いという実情がある。事業継続性の観点から、重要機器室の空調設備については安全性と冗長性（障害発生時後にシステム全体の機能を維持し続けられるようにバックアップ機器を備えること）を十分に確保した計画・運用がなされている。しかし、空調能力に余裕のある機器を複数台のバックアップ機器とともに設置する場合、熱負荷が小さい時期などにおいて負荷率が低い不安定で非効率な運転を行っている場合などが見受けられるため、重要機器室における空調設備においても、重要拠点としての事業継続性上の安全性を確保した上で、省エネ、省コストに向けた設計手法の確立や日常的な設備運用手法の合理化が求められている。

また、設計時点での空調負荷と空調設備容量の関係はエネルギー低減やコストの観点および昨今の ZEB 化の観点より重要であることに加え、運用の観点からみた場合には、設計時に設計者が計画していたパフォーマンスが運用時において必ずしも発揮できているとは限らない事例が散見されており、設計時から運用時までにおけるコミショニング（性能検証）による運用の適正化が求められている。東京都環境確保条例（総量削減義務と排出量取引制度）においては、都が指定する CO₂排出量の大きい大規模事業所のうち、削減対

策レベルが特に優れたトップレベル事業所に認定されると、CO₂排出量削減義務率が軽減される事例や新築・増築や空調設備改修時の竣工直後から開始し、1年以上に渡って実施したコミッショニングを評価対象とし、運用時のエネルギー削減にコミッショニングの効果が非常に高いと考え、トップレベル事業所認定の評価項目に、コミッショニングを位置付けている。また、CASBEEにおいてコミッショニングは、エネルギー関係の項目の中で、運用管理体制の項目において評価されており、CASBEE・新築では、エネルギー管理が実施できる組織化された運用管理体制がある上で運用時のコミッショニングが計画されている場合は、5段階中の最高ランクとなり、非常に高く評価されている。

このようにコミッショニングの考え方は日本ではまだ十分に浸透しているとはいえないが、個々の建物に対して先進的なコミッショニングによるエネルギー低減、要求性能の検証が行われている。新築時に適用することで始まったコミッショニングであるが、既存建物の改修や調整にもコミッショニングを適用することによって大きな省エネルギーが図れるという研究成果が示されはじめ、圧倒的にストック量の多い既存建築の省エネでも導入が必須と考えられるようになってきた。

しかし、長期間の運用時には、建物使用用途の変更や機器類の老朽劣化などに起因する能力低下等が発生することは既知の事実であり、初期コミッショニング→最適化コミッショニング→継続コミッショニング→再コミッショニングとこれらを段階的・継続的に検証した事例はほとんどなく、空調設備を含む、建物全体のエネルギー低減に寄与できるライフサイクルでのコミッショニング手法の実証が必要である。

以上のことから、これらのような業務用建物の省エネルギー・負荷平準化に寄与する空調設備の設計・運用手法に関して研究が進められているが、十分な調査、検証が実施されているとはいえず、省エネルギー及び省コストに寄与するインパクトは施設数、規模を勘案すると非常に大きいと予想され、これらの技術を確立することは非常に有効であると考えられる。

1.2 関連する既往の研究

都市のヒートアイランド化の抑制に関する研究では、福田、高木¹⁻³⁾の調査・研究によって外気温度と植生の相関を明らかにされ。梅干野、浅輪ら¹⁻⁴⁾はヒートアイランドポテンシャルなどの指標を用い、空調設備などの人工発生熱と緑化に関するシミュレーションを実施している。また、小松、梅干野¹⁻⁵⁾は、高分解能航空機センサーを使用した里山、都市域の植生分類を行っているが、都市域においては樹木と草地の2種類の分類であり詳細な植生分類は行っていない。近い将来、日本においても高空間分解能、高波長分解能のハイパースペクトルデータが利用可能になると考えられ、都市の緑化計画に反映できるような解析・利用方法の確立が望まれている。

また、空調設備の稼働状況を実測により評価した研究については、大中規模の事務所建物においては松下ら¹⁻⁶⁾が熱源の発生熱量について実測を行い熱源容量との乖離状況を明らかにしており、藤木ら¹⁻⁷⁾¹⁻⁸⁾はガス式熱源空調を採用した事務所建物の設計時において、使用時間帯や人員負荷、機器発熱負荷の実負荷を厳密に想定し必要空調能力を負荷計算により算出した事例や浦山ら¹⁻⁹⁾が業務用建築物の内部発熱に関して機器の使用電力量をもとに明らかにした事例、一瀬ら¹⁻¹⁰⁾が寒冷地の事務所ビルにおける暖房負荷の実態と空調用熱源機の容量設計に関して検討した事例はあるが、小規模の事務所建物において個々の部屋の空調処理熱量を一定期間計測し、設計時における負荷計算結果と比較し空調機容量との乖離状況について検討した研究は多くない。小規模事務所建物においては、大中規模事務所に採用される冷温水を熱媒体とした中央式の空調設備と違い、冷媒を利用したビル用マルチパッケージ空調機を採用している事例がほとんどであるため、計測に多くの手間がかかり空調室内機の各処理熱量を分析することが困難であることから計測事例も少ない。その他、山田ら¹⁻¹¹⁾が室外機エンタルピー法を応用したプローブ挿入法により空調室外機の長期的な性能調査により複数ビルにおいて熱源側での空調負荷率やCOP等の評価を行っている。また、宮田ら¹⁻¹²⁾¹⁻¹³⁾は業務用建築物のためのエネルギー消費量評価手法に関する基礎的調査において複数の部屋に採用された個別分散型ビル用マルチパッケージ空調機において室内エンタルピー法等の複数の測定手法の比較を行い各手法による計測誤差や系統ごとの実働特性について分析を行っているが、実稼働状態の小規模事務所建物において個々の空調室内機における空調処理熱量を計測評価した事例は多くはない。

エネルギー低減の観点におけるサーバ室や計算機室の空調稼働状況に関する既往の研究では、羽山ら¹⁻¹⁴⁾¹⁻¹⁵⁾がデータセンターにおいて空調設備の省エネ施策に関する計測、検討を行った事例や、吉井ら¹⁻¹⁶⁾がサーバールームにおいて空調設備の運用改善を実施した事例、西田ら¹⁻¹⁷⁾がICT機器と空調設備の連動制御に取り組んだ事例などがあり、ある程度空調設計・運用の合理化に関する指摘がなされている。しかし、これに対し重要機器室の空調設備においては、運転中の重要機器に計測器を設置するリスクの回避や機器構成が多種多様であることや、事業継続性上の関係よりセキュリティ対策が施されていることなどから、機器発熱量や空調稼働状況について十分な調査や検討されているとは言い難い。

コミッショニングによる運用改善に関する既往の研究は、中原、吉田ら^{1-18)~1-25)}がある研究施設を対象に設計、施工、運用における各コミッショニングフェーズの性能検証手法の概念や実施事項を取りまとめた事例や一瀬^{1-26)~1-28)}らが事務所ビルにおける改修工事を対象とした復性能検証を実践した事例、吉田ら^{1-29)~1-33)}が京都駅ビルにおいて大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修工事のコミッショニングを実施した事例について示されている。また、空気調和・衛生工学会による指針等¹⁻³⁴⁾に基づき、新築の建物に関して設計段階から10年を超える長期運用段階までを通して、継続的な性能検証に取り組んだ事例は少ない。

1.3 本研究の目的

前節で示したように、空調設備の設計・運用手法において、都市温熱環境との関係、空調稼働状況、空調システムや建物の全体のエネルギー消費、建物外の温熱環境との関係、有効な運用改善手法等については、まだ明らかにされていない様々な点が存在することがわかっている。このため本研究では、網羅的な使用エネルギー削減を念頭に比較的エネルギー削減の余地があると推測される小規模から中大規模の業務用途建築物を対象とする。

まず、都市温熱環境のマクロな視野から空調設備における省エネルギーを検討する観点より植生計画による都市域のヒートアイランド化抑制手法の一助として高空間分解能、高波長分解能のハイパースペクトルデータを利用した都市域の詳細な植生分類手法を確立することを目的とする。しかし、日本において利用できるハイパースペクトルデータはバンド数が少なくエリアも限られているため、解析に使用するデータは米国コロラド州立大学から提供を受けたハイパースペクトル AVIRIS のデータを使用し、現地実測調査を踏まえた解析・検討を行う。これらを基に植生や屋根材などに関する精度の高い解析手法を確立し、都市における温暖化抑制を目的とした植生の把握手法を提案する。

次に、建物単位での検討の観点より、個別分散型ビル用マルチパッケージ空調機を採用している小規模事務所建物において、各空調室内機の処理熱量を詳細に計測することで、用途別の部屋ごとの空調処理熱量の変動やピーク時における建物全体の空調負荷の実状を把握し、これらを設計条件と比較することにより、熱源や空調室内機の実稼働時の必要容量と設計時の設備容量についての差異を明らかにする。これにより、空調計画時においてより実状に近い空調設備構成となるような設計手法を検討する。対象建物として、電気式個別分散型ビル用マルチパッケージ空調機を空調設備として採用した小規模建物のうち、高知県に所在する鉄骨造の事務所用途の建物を計測対象とする。

そして、重要機器室の空調計画においては、最も厳しい気象条件かつ機器発熱量の最大値に基づき空調負荷計算を実施し、空調設備能力を決定していることが多いため、通常の運転時には空調能力が過大となり、非効率な運転となることにより空調エネルギーが増大することが懸念されていることから、計画時において実状に即した機器発熱の性状を把握する必要がある。しかし、その裏付けとなる実施設における機器発熱量や空調設備の運転状況、空調処理熱量等についての詳細な計測事例はほとんどなく、設計手法として確立しているとは言い難い。このため、これまで明らかにされていなかった重要機器室の空調稼働状況等について空調室内機の処理熱量から機器発熱量を算出する簡易推定方法を提案し、計測による実態把握を行い、設計・運用の合理化に資する機器発熱量等に関する情報として整備する。対象施設は、四国管内に立地する給電に関わる複数の重要機器室とし、実測調査により空調の稼働状況等を明らかにしたうえで、設定値の変更などを実施した場合における省コストや省エネルギーへの寄与度に関してシミュレーション等を用いて定量的に推定する。

最後に、運用改善による省エネ手法の実践的事例として、新蓄熱技術として開発した自然エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱空調システムと水蓄熱空調システム等を複合化した空調システムを採用している環境共生型の事務所ビルを対象に、初期コミッショニング、最適化コミッショニング、継続（運用）コミッショニング、再コミッショニングの各段階におけるシミュレーションを用いた継続的な性能検証手法を検討・適用し、その有用な維持改善手法について実践的に検証する。

本論文では、実態調査やシミュレーションにより上記の項目に関わる設計・運用上解決すべき問題点を明らかにして、適切な空調計画手法や運用手法の合理化について検討する。

1.4 本論文の構成

本論文では以上に述べた背景と目的に基づき、空調設備の計画・運用手法の合理化に向け総合的な研究として取りまとめるものである。図 1-2 に本論文の構成を示し、以下の各章の概要を述べる。

第1章は序論であり、まず、省エネルギーを検討する上で都市計画上重要なヒートアイランド化抑制手法として、リモートセンシングを利用した詳細な土地被覆分類手法による植生計画が必要とされていること、また、建物の空調設備において過大な空調機が設置され適切な運転がなされていない場合が散見されるが、実測によりその性状を詳細に把握した事例は少ないこと、コミッショニングの概念のもと各フェーズにおいて長期間継続的に性能検証を実施した事例がほとんどないことなどを示した。また、既往の研究を整理し、設計・運用手法の課題と現状とともに本研究の目的を述べた。

第2章では、空調設備の省エネルギーに寄与できる都市域におけるヒートアイランド化抑制に効果的な植生の配置計画等に利用することを目的とし、詳細な緑被や緑量、屋根材などの土地被覆情報を把握するためハイパースペクトルデータを用いて実施した解析手法の検討と解析精度の検証等について示す。これまで利用されてきたマルチスペクトルデータとの精度の比較を行い、今後の都市における植生計画の策定手法として利用できる手法として検討する。

第3章では、小規模事務所建物における空調機稼働状況を把握するために、ビル用マルチパッケージ空調機を採用した鉄骨造建物で実施した夏期および冬における実測結果について示す。この結果をもとに設計条件と実稼働条件下における空調運転状況の乖離について把握した上で、小規模事務所建物における設計手法の課題を明らかにし、過大な余裕率を考慮せずに実状に近い空調設備設計が可能となるような改善提案について検討する。

第4章では、電力供給に供ずる重要機器室における機器発熱状況と温熱環境を把握するために、空調設備としてパッケージ空調機を採用した重要機器室で利用可能な機器発熱の簡易推定手法について提案する。次に、それらの手法を用いて重要機器の用途をもとに類型化した複数の重要機器室で実施した計測結果について示す。これらをもとに、重要機器の発熱量の傾向を把握し、設計手法について検討する。また、運用面での改善について設定温度の変更によるエネルギーの低減効果やコスト低減効果について試算する。

第5章では、運用改善による省エネ手法の実践的事例として、新築時から長期間継続的に性能検証に取り組んでいる土壌蓄熱空調システムと水蓄熱空調システムとを複合化した空調システムを採用している環境共生型の事務所ビルであるヨンデンビル新館を対象に、初期コミッショニング、最適化コミッショニング、継続コミッショニング、再コミッショニングの各フェーズにおいて複合化蓄熱システムに対してシミュレーションを用いた継続的な性能検証手法について検討し、建物全体の使用エネルギーなどについて実践・検証した上で、有用な維持管理手法として提案する。

第6章は、総括であり本研究で得られた成果をまとめ今後の課題を述べる。

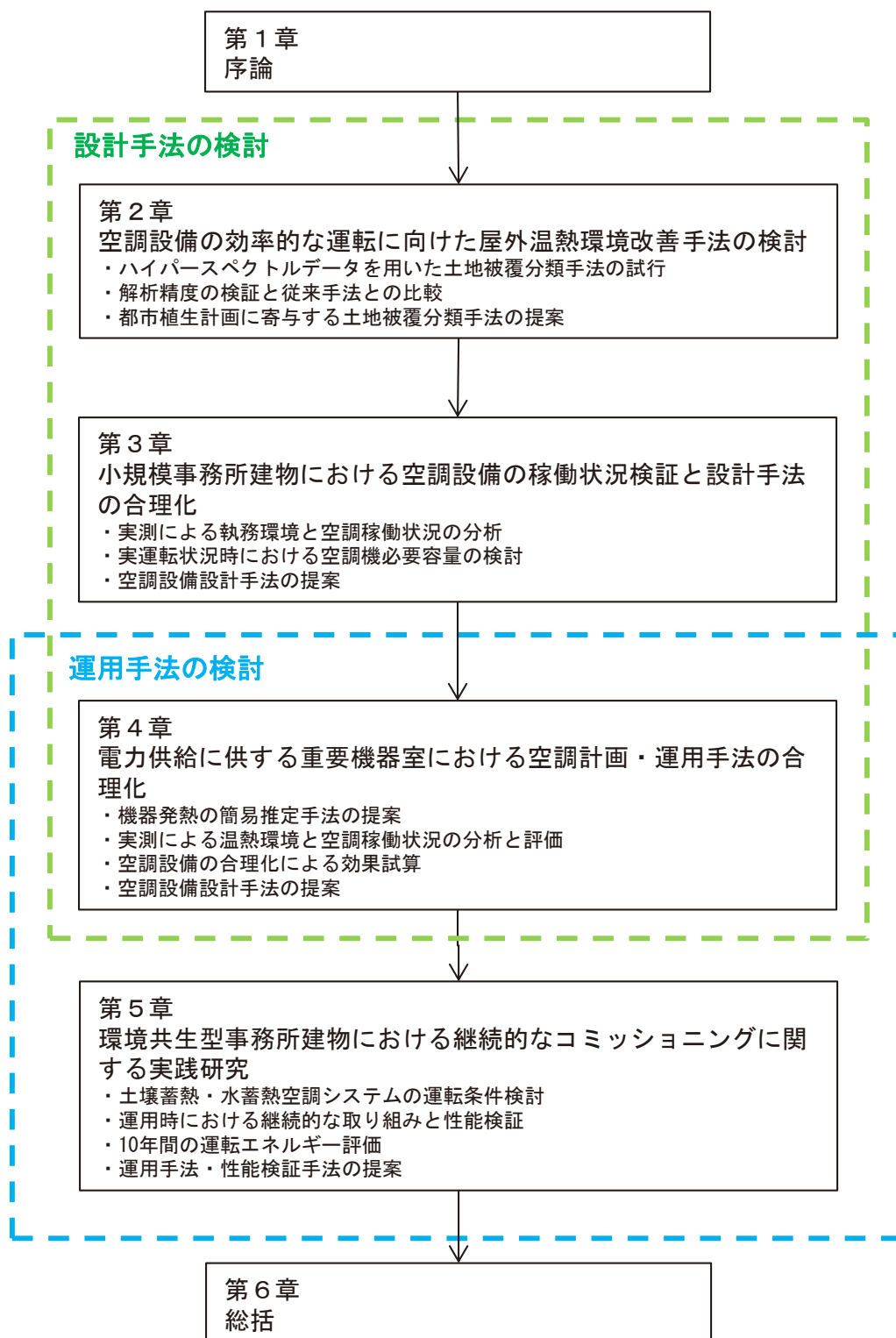


図 1-2 本論文の構成

参考文献

- 1-1) エネルギー経済統計要覧, 日本エネルギー経済研究所, 2012
- 1-2) 国土交通省: 土地情報総合ライブラリー 土地基本調査
[http:// tochi.mlit.go.jp/shoyuu-riyou/kihon-chousa](http://tochi.mlit.go.jp/shoyuu-riyou/kihon-chousa), 2014.12.10 参照
- 1-3) 福田雄高, 高木直樹, 岩井一博, 山下恭弘: 土地被覆の変化が気温変動に及ぼす影響の解析, 日本建築学会環境系論文集, No.566, pp.81-85, 2003.4
- 1-4) 梅干野晃, 浅輪貴史, 高田真人, 円井基史: 土地利用と熱環境対策からみた都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴, 日本建築学会環境系論文集, No.559, pp.63-70, 2002.9
- 1-5) 小松義典, 梅干野晃他: GIS とリモートセンシングを利用した都市環境計画支援(その4 住宅地の緑被分布詳細図の作成), 日本建築学会学術講演梗概集 D-1, pp.567-2002.8
- 1-6) 松下直幹, 李霽憲, 吉田健一, 赤司泰義他: 空調用熱源システムの部分負荷運転制御法の開発と導入効果の検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No.164, 2010.11
- 1-7) 藤木洋徳, 岡克己, 植田浩文, 後藤祥仁: 中小規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践 Y ビルにおける事例, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, H-66, 2009.9
- 1-8) 中嶋俊介, 植田浩文, 岡克己, 後藤祥仁: 中小規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践 (第2報) Y ビルにおける省エネルギー効果の検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-55, 2010.9
- 1-9) 浦山真一, 赤司泰義, 姜信愛, 小塩真奈美他: 業務用建築物のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究(その11) 事務所建物(九州地区)における内部発熱に関する調査結果, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, OS-25, 2010.9
- 1-10) 一瀬茂弘, 奥宮正哉, 早川昭仁, 児玉奈緒子, 野本智子, 羽津本好弘: 寒冷地の事務所ビルにおける暖房負荷の実態と空調用熱源機の容量設計に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.137, 2008.8
- 1-11) 山田恭輔, 清水拓, 野部達夫: プローブ挿入法によるマルチパッケージ型空調機の運用実態調査, 空気調和・衛生工学会論文集, No.193, 2013.4
- 1-12) 宮田征門, 吉田治典, 辻忠男, 湯川求他: 業務用建築物のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究(その5) 個別分散型空調システムの実稼働状態における入出力特性計測手法に関する検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, OS-19, 2010.9
- 1-13) 上野嘉夫, 吉田治典, 宮田征門, 辻忠男他: 業務用建築物のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究(その6) 個別分散型空調システムの実働特性分析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, OS-20, 2010.9
- 1-14) 羽山広文, 降旗由紀, 森太郎, 絵内正道, 木下学: データセンターの機器冷却特性と空調効率に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第74巻 第640号, pp.721-728, 2009
- 1-15) 二渡直樹, 羽山広文, 森太郎, 菊田弘輝: データセンターにおける省エネルギー対策と再循環の影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-12, 2011
- 1-16) 吉井存, 宇田川陽介, 柳正秀, 藁谷至誠他: サーバルームにおける空調運用改善施策の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-3, 2011
- 1-17) 西田龍一, 吉井存, 柳正秀, 藁谷至誠: データセンター用空調機と ICT 装置の連

- 係制御に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-6, 2011
- 1-18) 廣岡正, 玉置進, 末岡直彦, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第一報) 性能検証実施の目的・実施体制, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-10, 2001
- 1-19) 湯澤秀樹, 笠置徹, 村山俊尚, 近本智行, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第二報) 空調設備の概要と企画・設計段階の事後性能検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-11, 2001
- 1-20) 笠置徹, 小野島一, 濱田和康, 佐々木繁, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第三報) 施工段階性能検証と保守性能検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-12, 2001
- 1-21) 小野島一, 堀内文章, 笠岡徹, 濱田和康, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第四報) 試験調整作業 (TAB) の確認と受渡し前性能検証プロセス, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-13, 2001
- 1-22) 村山俊尚, 伊藤嘉奈子, 関口史, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第五報) 受渡し段階性能検証プロセスと検証結果の概要, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-14, 2001
- 1-23) 伊藤嘉奈子, 村山俊尚, 関口史, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第六報) 受け渡し後段階性能の検証における解析事項と BEMS 援用ツールの評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-15, 2001
- 1-24) 松岡一平, 吉田治典, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (第七報) 検証データとシミュレーションに基づく FDD の試み, E-16, 2001
- 1-25) 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (第八報) 性能検証 (コミッショニング) の総括と提言, E-17, 2001
- 1-26) 一瀬茂弘, 河路友也, 羽津本好弘, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 1 報) 復性能検証過程の枠組みと各フェーズにおける実行概要, 空気調和・衛生工学会論文集, No.153, 2009.12
- 1-27) 一瀬茂弘, 河路友也, 桐山大蔵, 羽津本好弘, 山羽基, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 2 報) 機能性能試験の枠組みと夏期における試行概要, 空気調和・衛生工学会論文集, No.160, 2010.7
- 1-28) 一瀬茂弘, 河路友也, 桐山大蔵, 羽津本好弘, 山羽基, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 3 報) 機能性能試験の実行結果と実用化に向けての課題と考察, 空気調和・衛生工学会論文集, No.174, 2011.9
- 1-29) 吉田治典, 高浦敬之, 柳原隆司, 松下直幹, 岡敦郎, 牛尾智秋, 山口淳志: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 1 報) コミッショニングの概要と種熱源機器の最適運転, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-1, 2016
- 1-30) 松下直幹, 吉田治典, 柳原隆司, 岡敦郎, 山口淳志, 牛尾智秋, 高浦敬之: 大規模

- 複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング，(第2報)
熱回収ヒートポンプ熱源の最適運転制御と制御プログラムの実装法，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，H-2，2016
- 1-31) 青山博昌，吉田治典，松下直幹，山口淳志，牛尾智秋，高浦敬之：大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング（第3報）コミッショニングのための BEMS 構築と計測データポイントの管理・確認方法，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，H-3，2016
- 1-32) 山口淳志，吉田治典，松下直幹，矢部克明，牛尾智秋，高浦敬之：大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング（第4報）種々の搬送動力削減とポンプ選定，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，H-4，2016
- 1-33) 西山満，吉田治典，山本雄二，矢部克明，山口淳志，牛尾智秋，福島正成，高浦敬之：大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング（第5報）連結型冷却塔の性能確保と運用方法，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，H-5，2016
- 1-34) 空気調和・衛生工学会：建築設備の性能検証過程指針，2005.11
- 1-35) 田中俊六，武田仁，岩田利枝，土橋喬雄，寺尾道仁，秋元孝之：最新建築環境工学[改訂4版]，2014.10
- 1-36) 建築設備コミッショニングマニュアル（全訂第3版），特定非営利活動法人建築設備コミッショニング協会，2016

第 2 章

空調設備の効率的な運転に向けた屋外温熱環境改善手法の検討

第2章 空調設備の効率的な運転に向けた屋外温熱環境改善手法の検討

2.1 はじめに

空調機を効率的に運転し省エネルギーに寄与するためには、冷房時期において空調機の熱交換部分である室外機が設置されている屋外温度（外気温度）を下げることは非常に効果的であり、これらにより空調設備で使用される総エネルギーが低減できることはヒートポンプの原理から既知の事実である。昨今、地球温暖化や都市温暖化（ヒートアイランド化）を緩和するためにあらゆる分野での環境負荷低減・省エネルギー施策が実施されている。その中でも都市の温暖化に目を向けると、ヒートアイランド化には様々な熱的要因が関係されているとされ、地球温暖化が温室効果ガスなどに起因していることに比べ、排熱源として建物からの人工排熱が支配的であることが、尹や梅干野によって指摘されており、HIP（ヒートアイランドポテンシャル）などの指標で評価されている。

人工排熱源の1つである空調熱源設備からの排熱を減少させるためには、前述のように空調機を効率よく運転できる屋外環境を整えることが必要であり、また、冬期の冷熱を土壌に溜め夏期の空調に利用する土壌蓄熱空調システムや地中熱ヒートポンプなどの空気中に熱を出さないようなヒートアイランド対策に有効な空調システムを積極的に開発・導入し、適正な運転をすることが肝要であると考えられる。

ここで、都市の温熱環境に目を向けると都市における外気温度と緑量とは相関関係があることが、福田、高木ら^{2,3)}の調査・研究によって明らかにされており、関西地域の気象台の所在地点近傍における1985年から2000年の15年間の緑被率の変化に関して、LANDSAT衛星データをもとにリモートセンシング技術を利用した解析により把握し年平均温度の変化と比較した結果では、高松地域においては緑被が55%から24%に半減したことによる気温上昇効果が0.084[°C/年]と非常に顕著であり、15年間で1°C以上上昇したことがわかっている。

このような結果をふまえ、ヒートアイランド化を抑制し外気温度を低下させ空調設備を効率よく運転させるためには、都市内に植生を計画的に配置し緑量を増やすことにより、合理的に都市温熱環境を改善することが重要であることがわかる。しかし、緑量の把握手法に目を向けると、人による現地調査やリモートセンシングによる緑被率把握が実施されてきたが、人力による調査では時間がかかるうえ同時期に面的に把握できないことや、近年高分解能をもつ汎用衛星データが利用でき、細かな緑被まで抽出することができるが、緑量の判定に重要な樹種の判別までは困難であることが多く、「面的に」「詳細に」「樹種を判別」できるリモートセンシング技術の確立が望まれている。

2.2 本章に関連する既往の研究

既往の研究では、高分解能衛星 IKONOS などのデータからリモートセンシング技術を用い都市内の細かな緑被を抽出することには成功している。しかし、都市熱環境を解析する際には緑被率などの情報のほかに植生の分類や状態把握などのより詳細な情報が必要となってくる。高分解能衛星データでは、バンド数の少なさから都市域についての詳細な植生分類を行うのは困難である。小松、梅干野ら²⁻⁷⁾²⁻⁸⁾は、高分解能航空機センサーを使用した里山、都市域の植生分類を行っている。この研究では里山において植生を群落ごとに細かく 8 種類に分類している。都市域においては樹木と草地の 2 種類の分類を行っているが、詳細な植生分類は行っていない。

昨今、日本においても高空間分解能、高波長分解能のハイパースペクトルデータが利用可能になりつつあるが、その解析・利用方法が確立されているとはまだ言い難く、早期の解析手法の確立が望まれる。

2.3 研究フロー

本章では、都市域の温熱環境の把握と改善手法の一助として高空間分解能、高波長分解能のハイパースペクトルデータを利用した都市域の詳細な植生図を試作し、精度の検証を行うことを目的とする。また、併せて緑被配置の計画上重要となる建物の外形を把握することを目的とし、屋根材の分類を試みることにする。

しかし、日本において利用できるハイパースペクトルデータはバンド数が少なくエリアも限られているため、本章で解析に使用するデータは米国コロラド州立大学の CSES(Center for the Study of Earth from the Space)からハイパースペクトル AVIRIS のデータ提供を受けた。データの撮影地域は筆者が同時期に直接実測を実施した Boulder エリアのデータとした。このデータを用い、実測調査を踏まえて解析・検討を行った。なお同時期・同地域の Quick Bird 衛星データを解析して、両データの相違についても検討を加えた。これらを基に、都市温暖化防止策の一手法として精度の高い緑量や屋根材の把握手法を提案する。図 2-1 に研究フローを示す。

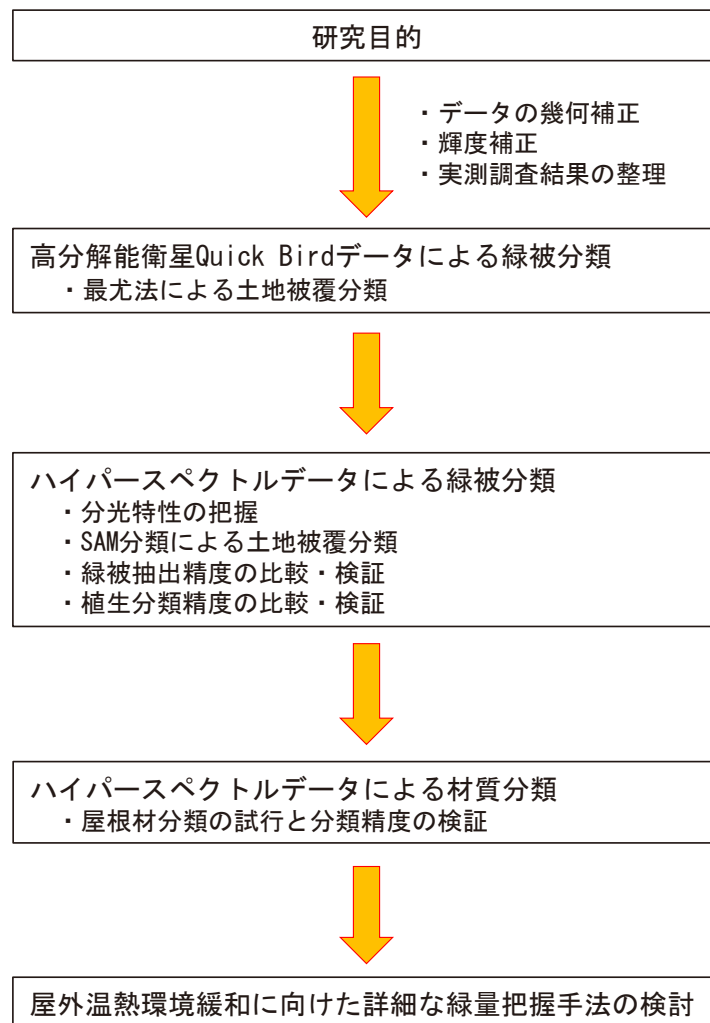


図 2-1 研究フロー

2.4 解析準備

2.4.1 データ概要

AVIRIS とは Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer の略で NASA が 1992 年から運用を始めた航空機搭載型のハイパースペクトルセンサーである。波長帯は 400～2500nm であり約 10nm 間隔に 224 バンドの周波数分解能を持つ。放射輝度は 0～32767 (15bit) の Digital Number(以下 DN)で表される。空間分解能は航空機の飛行高度により決定され、約 3～17m である。本解析に使用したデータは 3.6mの分解能であった。データは観測後にセンサー補正と幾何補正がされたのちに配布される。データの形状は南北方向に帯状であり、Boulder 市内を東西方向に 3 枚に渡って撮影している(図 2-2、表 2-1)。

高分解能衛星 Quick Bird は、バンド数がマルチスペクトル 4 バンドにパナクロマチック 1 バンドの計 5 バンドである。放射輝度は 0～4095 (11bit) の DN で表される。本章では、画像中央座標が北緯 40.004 度, 西経 105.2731 度の Boulder のデータを使用する(図 2-3)。

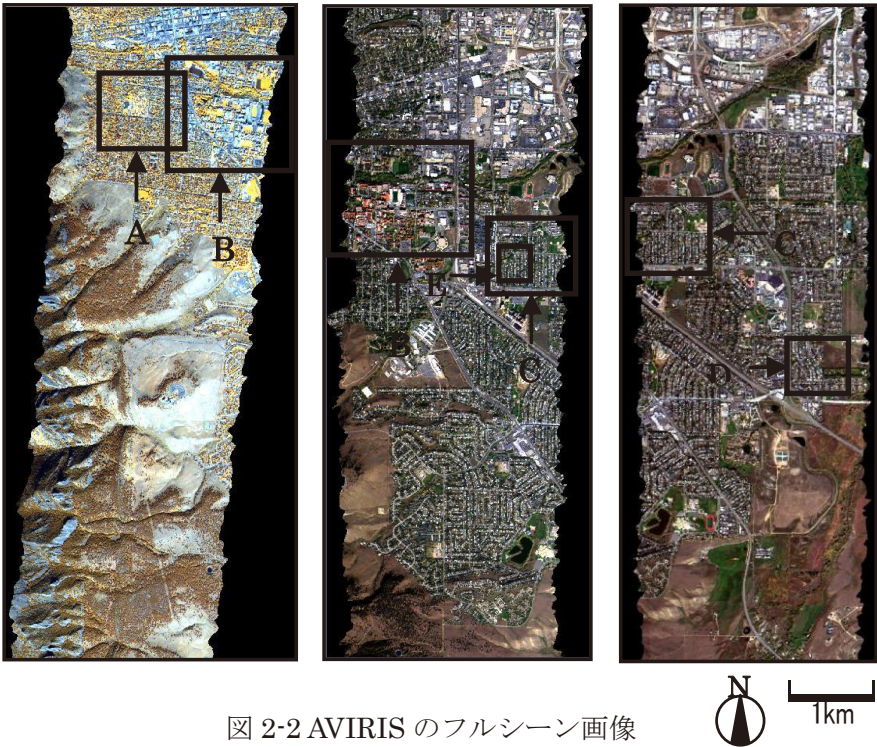


図 2-2 AVIRIS のフルシーン画像
(左より Boulder1,2,3 RGB : Band 31,21,11)

表 2-1 観測詳細データ

	Quick Bird	AVIRIS
撮影日	10月5日	10月11,12,14日
観測時刻	10:00	11:30
空間分解能	2.56m(0.64m)	3.6m
観測高度	450Km	5Km
観測角度	14°	0°
観測画素数	13200×13200	805×2048
天候	晴天	晴天

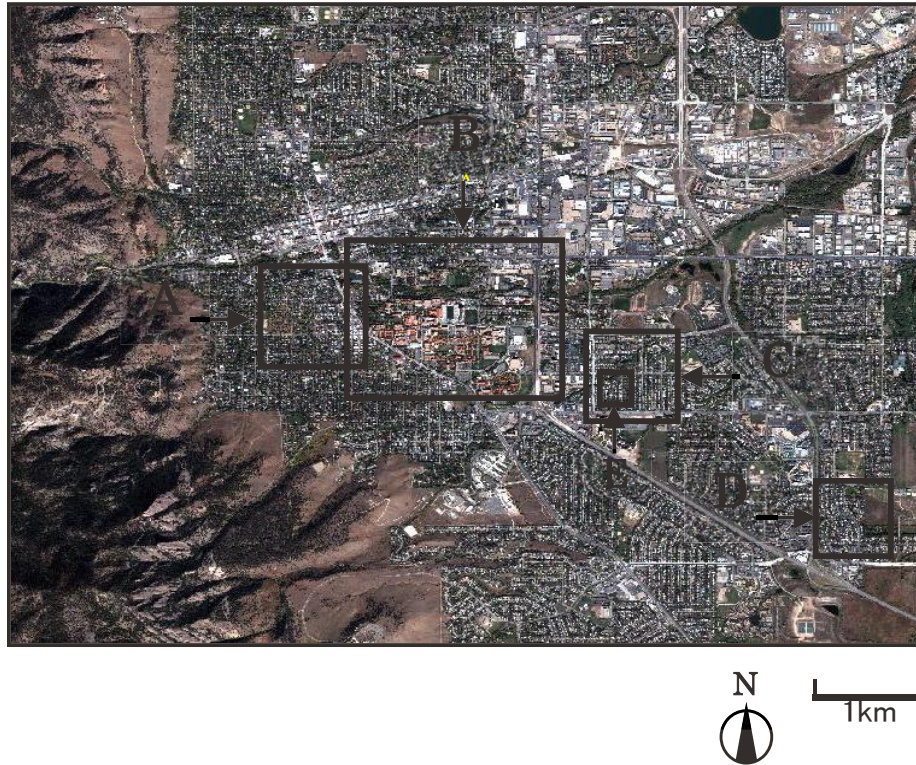


図 2-3 QuickBird の解析対象画像
(RGB: Band 3,2,1)

2.4.2 解析対象地域

実測・解析対象地域は商業地兼住宅地として Boulder The Hill 周辺 (図 2-2,2-3(A)), 緑地としてコロラド大学キャンパス周辺 (図 2-2,2-3(B)), 低層住宅地として Baseline 住宅地 (図 2-2,2-3(C)), Manhattan 住宅地 (図 2-2,2-3(D)) の合計 4 地域とした。データ観測日前 1 週間は降水がなかったため、降雨の影響はないものとする。グラウンドトゥルースは現地で行った植生調査により作成した実測植生図を参考にする。

2.4.3 幾何補正

今回使用する AVIRIS データは前述のように配布時に幾何補正がなされているが、比較対象データである Quick Bird データとの相互の位置あわせを行う必要がある。今回は配布時に既に座標データが付属している Quick Bird データをベースに Image to Image の幾何補正を行うこととした。航空機データは配布時の幾何補正では画像のひずみが大きいため、Ground Control Point(G.C.P)を 130 ポイント利用した 3 次多項式関数変換により幾何補正を行った。内挿法は Nearest Neighbor 法とし、使用したデータ間の平均許容誤差(RMSE)は 1 ピクセル以内とした。また解析の際に双方のデータのサイズを合わせるため、幾何補正する際に Quick Bird の空間分解能 2.6m に合わせて AVIRIS のデータを分割しリサイズした。

2.4.4 輝度補正

AVIRIS データは 3 日間にわたり撮影されたため、天候、大気の影響を考慮にいれ、各画像間で輝度補正を行った。まず初めに、隣接する画像間で同じ場所 (Boulder1,2 の間ではコロラド大学キャンパス周辺, Boulder2,3 の間では Baseline 住宅地周辺) を 200×180 ピクセルで切り出しそこに含まれる平均 DN を算出した (図 2-4)。そして Boulder2 を基準とし、各スペクトルの DN の差を補正值として輝度補正を行った (表 2-2)。この際、各データは同時時間帯に撮影されているため陰影の影響は考慮しないこととする。輝度補正を行った後、各データから裸地、芝生、コンクリートをランダムに各 10 ピクセルずつ抽出し、バンド毎に平均 DN を算出し比較した。3 つのカテゴリーとも各バンドの平均 DN の差が 20 以内に収まった。例として補正後の各カテゴリーにおける芝生とアスファルトの平均スペクトルについて図 2-5 に表す。

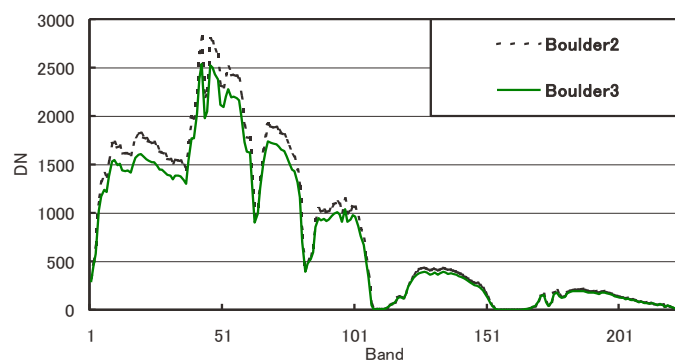


図 2-4 補正前の Baseline 住宅地の平均スペクトル

表 2-2 Boulder2 を基準とした各画像の輝度補正值

	Band1	Band51	Band101	Band151	Band201
Boulder1	-11	-148	-58	-51	-10
Boulder2	0	0	0	0	0
Boulder3	48	208	100	11	13

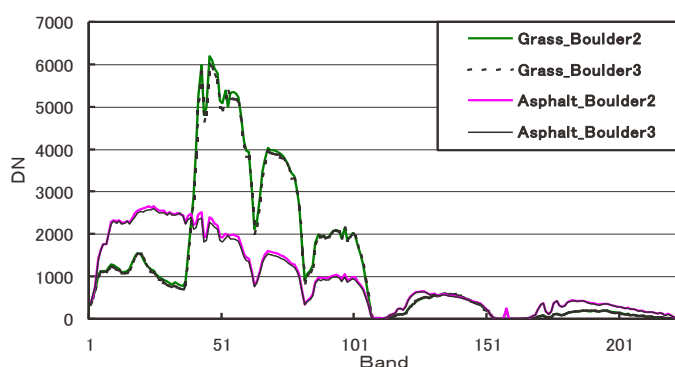


図 2-5 輝度補正後の芝生とアスファルトの平均スペクトル

2.5 Quick Bird データによる緑被の抽出と植生分類

2.5.1 解析の流れ

衛星データ撮影時と同時期に現地調査を実施した上、Quick Bird データに対して土地被覆分類を行い、緑被を抽出する解析フローを図 2-6 に示す。

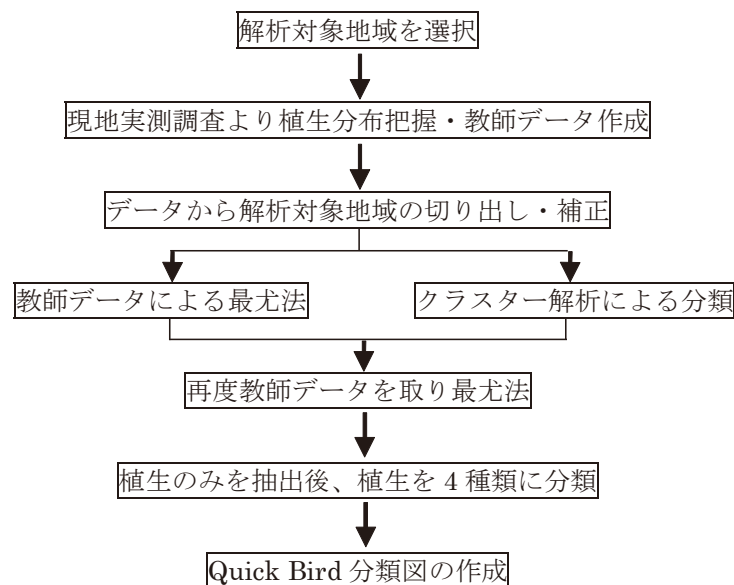


図 2-6 Quick Bird の解析フロー

今回、分類カテゴリーをアスファルト、コンクリート、水域、芝生、樹木、住宅、建物（金属の屋根）、大学の建物（瓦）、土壌、岩石の 10 種類とした。解析に使用するバンドはバンド 1 から 4 および NDVI の 5 バンドとした。NDVI は市街地の建物や里山の起伏等による日射環境の差異を簡易に補正し、緑被とそれ以外の差を強調できるように考えられた指標である。バンド 3(可視域赤:600～690nm)とバンド 4(近赤外域:760～900nm)から作成し、DN が 0 から 2047 の間に収まるように算出した値を整数化した（式 2-1）。

$$NDVI = \left\{ \left(\frac{X_{b4} - X_{b3}}{X_{b4} + X_{b3}} \right) + 1 \right\} \times 1024 \quad \dots (2-1)$$

(X_{b3}:バンド 3 における DN X_{b4}:バンド 4 における DN)

2.5.2 最尤法による土地被覆分類

実測調査から教師データを作成し、最尤法により分類した。分類結果とクラスター解析の結果を比較して、同じカテゴリーに分類されたピクセルを抽出し、再度教師データを選定しなおした。

既往の研究⁷⁾より、「分類精度向上のために対象以外のカテゴリーを除去し、再分類をかけると誤分類が減少する」ということが実証されているため、解析結果から緑被（芝生、樹木）のみを抽出し、マスクをかけて抽出された緑被を Needle(針葉樹)、Grass(芝生)

Broad(広葉樹)、Autumnal(紅葉している樹木)に分類する。分類結果から Baseline 住宅地 (C) を 100×100 ピクセルで切り出し (図 2-3 中(E)) AVIRIS との比較対象とする。今回 Baseline 住宅地を比較対象地域としたのは、街路樹や庭木、芝生などの植生が細かく分布し、建物の屋根の材質、形状が異なっているからである。Quick Bird による植生分類図を図 2-7 に示す。図 2-8 には、現地における実測調査に換えて、住宅の裏庭など囲いがあるために目視による調査が不可能であるエリアを Quick Bird のパンクロマチック画像 (PAN 画像) から航空写真と同様の手法で植生を読み取り補足した実測植生図を示す。解析結果を表 2-3 に示す。

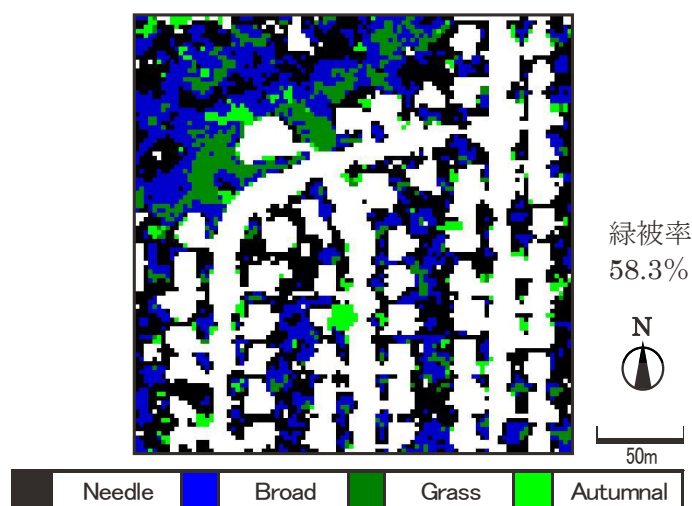


図 2-7 Quick Bird による Baseline 住宅地植生分類図

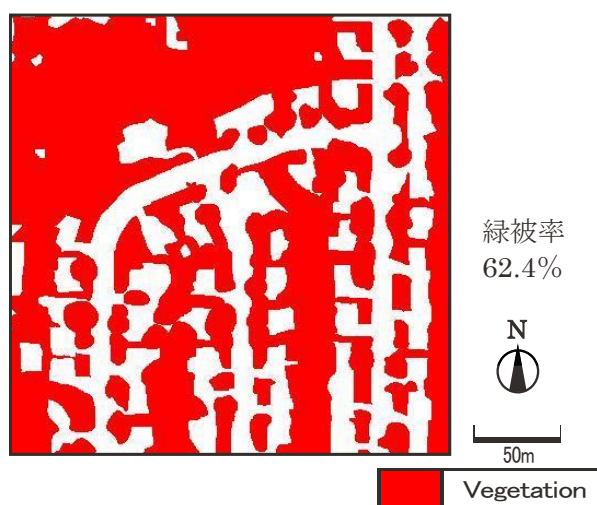


図 2-8 実測植生図

表 2-3 各カテゴリー別分類精度の比較
(左：カテゴリー4種類 右：カテゴリー6種類)

	実測面積(m ²)	一致面積(m ²)	一致率(%)		一致率(%)
Needle	4516	1675	37.1	Needle	34.7
Broad	31216	19822	63.5	Cotton	15.6
				Maple	25.9
				Willow	26.1
				Grass	60.2
Grass	2517	1829	72.7	Autumnal	35.7
Autumnal	3953	1115	32.8		

2.5.3 小考察

Quick Bird を利用した土地被覆分類では緑被率から細かな緑被の抽出が可能であることが分かる。しかし、植生分類図の緑被率が実測植生図に比べて 4.1%低い。これは軒付近の植生が抽出しにくいことや芝や低木などの植生に樹木や建物による陰影がある場合は、植生が植生以外のカテゴリーに誤分類されたことに起因することが確認された。植生分類数を 4 種から 6 種に増やして同様の分類を試行したところ Broad の誤分類が多くなった(表 2-3)。バンド数が少ないために細かな植生分類は困難だと考えられる。4 種類の分類では Broad と Grass が高い一致率を示した。しかし Needle と Autumnal が 40%を下回っている。これは 10 月の時点では Broad と Autumnal の植生の状態が一部類似していることや陰影の影響が上げられる。

2.6 AVIRIS データによる緑被の抽出と植生分類

2.6.1 解析の流れ

AVIRIS データを利用した詳細植生把握までのハイパースペクトルデータ解析フローを図 2-9 に示す。

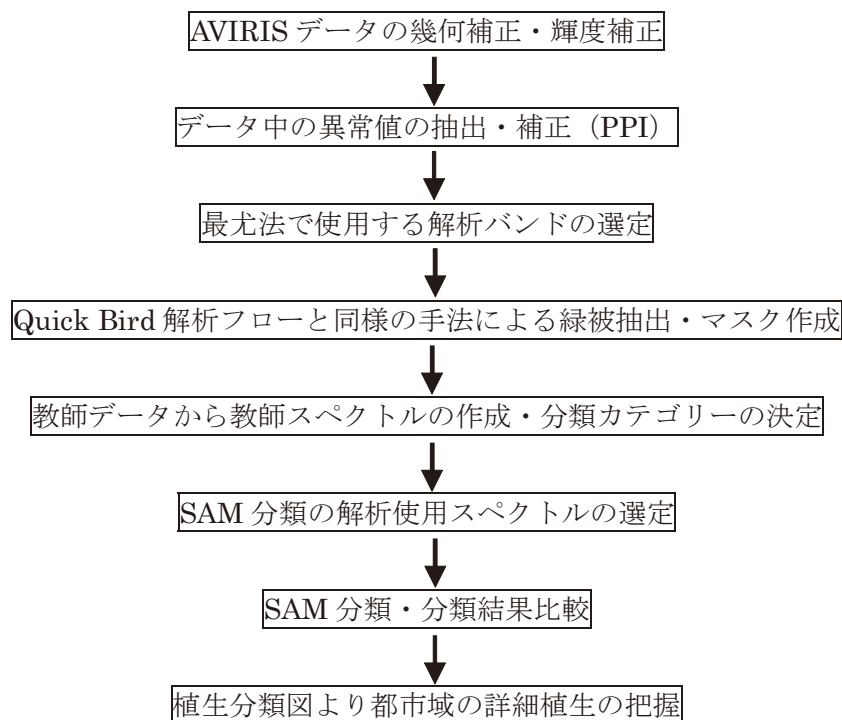


図 2-9 AVIRIS の解析フロー

2.6.2 データの異常値の抽出・補正

AVIRIS のデータの中には、地上建築物の反射などにより DN が最高値の 32767 に達するピクセルが含まれていることがある。また、天候やエアロゾルにより吸収帯が発生し、バンド自体が異常値となることもある。そこで今回使用したリモートセンシング解析ソフトの PPI (Pixel Purity Index) 機能を使用して、DN が極端に高いピクセルを抽出し、このピクセルの DN が 0 になるようにマスクをかけていく。これによりバンドごとの DN のばらつきを小さくすることができる。

そして Boulder1 (A,B を含む)、Boulder2(B,C を含む)、Boulder3(C,D を含む)の切り出し、補正後の各シーン(1200×800)を縦に並べ 1 つのシーン(1200×2400)として後の解析に使用する (図 2-10)。

2.6.3 最尤法による緑被の抽出

最尤法による緑被マスクの作成を試みる。分類カテゴリーは 2.5 節の解析と同じ、アスファルト、コンクリート、水域、芝生、樹木、住宅、建物（金属の屋根）、大学の建物（瓦）、土壌、岩石の 10 種類とした。解析に使用するバンドは Quick Bird のバンド 1～4 に対応する AVIRIS のバンド 1～70 と水蒸気の吸収帯 1100 nm 付近の影響を考慮したバンド 71～99 の合計 100 バンドとした。教師データを実測調査から各カテゴリー 150 ピクセルずつとり、最尤法により分類した。Quick Bird の解析手法と同じように教師データを選定しなおし、再度最尤法で分類した。そして AVIRIS の NDVI 算定式を Quick Bird のバンド 3 と 4 に対応する AVIRIS のバンド 29 と 51（中心波長：645.38nm, 826.67nm）から作成した。NDVI の DN が各カテゴリーのスペクトルの平均 DN(2000 前後)に近い値に収まるよう算出した値を整数化した（式 2-2）。

$$NDVI = \left\{ \left(\frac{X_{b51} - X_{b29}}{X_{b51} + X_{b29}} \right) + 1 \right\} \times 2048 \quad \dots (2-2)$$

(X_{b51} : バンド 51 における DN X_{b29} : バンド 29 における DN)

分類結果と作成した NDVI を比較し、NDVI の DN が 2048 以上になる部分、かつ緑被に分類されたピクセルを植生として抽出した。なおこの解析では、枯れた草原、土壌、芝生がどのように分類されるかを調べるために土壌のカテゴリーであっても NDVI が 2048 以上のときは緑被にこのピクセルを加え、緑被マスクを作成した（図 2-11）。そして 2.5.2 節の解析と同様に緑被マスクから Baseline 住宅地（図 2-10 中(E)）を 100×100 ピクセルで切り出し実測植生図と比較した（図 2-12）。緑被率は詳細緑被マスクのほうが 4.8% 大きい。これは緑被の抽出の際に樹木の陰になっているアスファルトなどが植生に誤分類された結果と考えられる（図 2-12）。また、民家前の数 m 四方の小さな庭なども抽出可能である（図 2-13）。このことから AVIRIS も Quick Bird と同様に小さな植生を抽出できることが分かった。



図 2-10 解析用 AVIRIS 画像
(RGB:Band31, 21, 11)



図 2-11 緑被マスク
(黒：緑被)



図 2-12 Baseline 住宅地における実測植生図と詳細緑被マスク
(左：実測植生図 右：詳細緑被マスク)

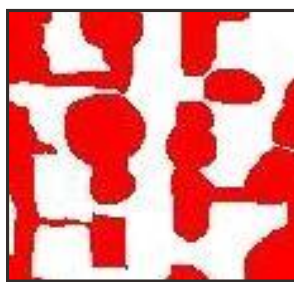


図 2-13 緑被詳細比較図
(左：PAN 画像 中央：実測植生図 右：詳細緑被マスク)

2.6.4 スペクトルの分光特性と SAM 分類

物質は固有のスペクトルを持っているが、AVIRIS データはそのバンドの多さから物質の連続したスペクトルを把握することができる。しかし、最尤法では植生を細かく分類するのは難しい。そこで今回は SAM 分類 (Spectral Angle Mapper Classification) で植生を分類した。SAM 分類はデータの DN を分光放射計で測定した反射率と比較し、両者のスペクトル角を計算することで類似度を判定し分類する方法である。今回は AVIRIS データの中から実測調査した地域を抽出し、教師スペクトルを算出した。この解析手法では AVIRIS データに対しての水蒸気や CO₂ などの吸収帯による大気補正は不要になる。

植生調査から占有面積の大きい植生を調べて分類のカテゴリーを Grass(芝生), Needle-Leaf(針葉樹), Ash(トネリコ), Willow(ヤナギ), Maple(カエデ), Cotton tree(カポック), Elm(ニレ), Soil with Grass(芝生と裸地の混合), Soil without Grass(裸地とまばらな芝生)の9種とした。ボウルダーでは針葉樹は Pine(マツ), Tsuga(ツガ), Spruce(スギ)が生育しているがスペクトル形状が似ているために同じカテゴリーとした。実測調査の結果をふまえ、明らかにそのカテゴリーと考えられるピクセルを AVIRIS のデータから抽出して教師スペクトルを作成した(図 2-14)。そして、個々のスペクトル特性を把握する。

SAM 分類を行う際には閾値の設定が重要である。閾値を小さく設定すると教師データとほぼ同一のスペクトルのものしか分類されなくなり、未分類ピクセルが多くなる。大きく設定すると未分類は少なくなるが誤分類が多くなる。そこで検証のために閾値を 0~0.5 まで 0.025 ごとに変化させ Baseline 住宅地に対して SAM 分類を試行した。実測結果と比較すると 0 から閾値を増加させると未分類ピクセルは少なくなり、分類結果は実測結果に合うようになる。しかし、0.2 を超えると未分類が多くなり芳しい結果が得られなくなるために、本研究では 0.2 を閾値として使用することとした。図 2-14 のスペクトルを教師スペクトルとして、抽出した緑被に対して閾値 0.2 を使用し SAM 分類を行った。水蒸気や CO₂ による吸収帯域は解析に使用せず、Band1~99, 127~145, 171~224 の合計 171 バンドを解析バンドとした。次に、作成した土地被覆分類図から Baseline 住宅地を 100×100 ピクセルで切り出し(図 2-3 および図 2-10(E))各カテゴリー別の詳細分類図を作成した。結果を図 2-15, 2-17, 2-19 に示す。

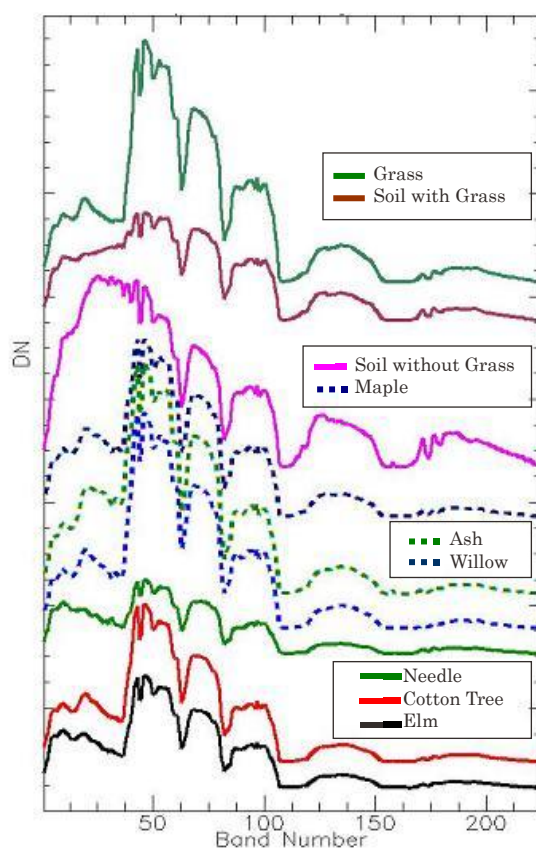


図 2-14 教師スペクトルの形状

2.6.5 小考察

図 2-15 は Grass, Soil with Grass, Soil without Grass の 3 種類の分類図である。実測植生図と比較すると, AVIRIS, Quick Bird とともに住宅前の芝生などの細かな植生を抽出することが可能であった。実測植生図と AVIRIS の分類図を比較すると Soil with Grass と Soil without Grass に分類の相違がある。これは植生の活性度の違いによるものだと考えられる。可視域以外の波長帯が関係してくる他のカテゴリーのピクセルはすべて DN が 0 になるように処理した。(以下この過程のことを「マスクをかける」と記述する) ため植物の状態を実測の際に目視判別するのは難しい。Quick Bird では近赤外より波長の長いバンド (AVIRIS のバンド 59 以降) がないために, 活性度が低い芝生が Soil with Grass に分類される。一方, AVIRIS データからは分類だけでなく緑被率変化に伴う反射特性や芝生の活性度を把握することができる(図 2-16)。植生の実測調査時は, 枯れ芝を少量含む地表面は裸地と判別したが, AVIRIS による分類では, この地表面は植生として分類されている。このように目視による実測では把握できない植生の状態もスペクトルから定量的に判別できる。

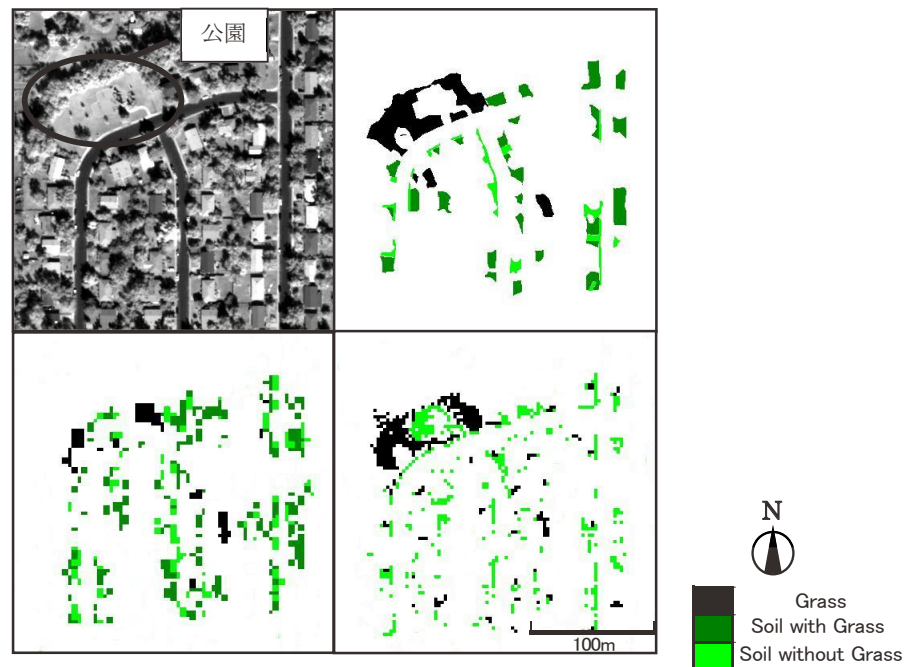


図 2-15 Grass, Soil with Grass, Soil without Grass の分類図

(左上) PAN 画像 (右上) 実測植生図
(左下) AVIRIS の分類図 (右下) Quick Bird の分類図

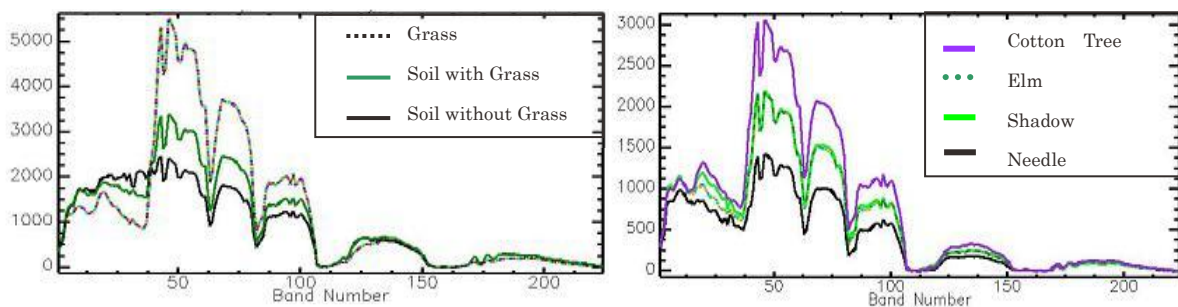


図 2-16 スペクトル比較

図 2-17 は Maple, Ash, Willow の 3 種類の分類図である。データが撮影された 10 月は初秋であり Maple, Ash は紅葉を始めている個体も確認された。Ash と Willow は公園北側の大きな群落を抽出できた。AVIRIS の分類図から 2×2 ピクセル(約 27 m²)以上の集合を各植生の 1 個体として抽出した。ここで、図 2-17 から G のエリアを切り出し、詳細図を作成した(図 2-18)。この 3 種は樹冠が比較的大きいため個体の抽出が可能であった(図 2-18①)。また、実測植生図の中に同じカテゴリーの AVIRIS の解析結果が含まれる割合を一致率として算出した(表 2-4)。実測結果と解析結果の本数はともに近い値を示したが、一致率は Maple が 48.4%と低い。この原因として幾何補正とリサイズの際にピクセルを内挿する過程で樹冠辺縁部のスペクトルが変化したこと(図 2-18②)が考えられる。そのため解析結果の樹冠の面積は実測結果よりも減少した。詳細植生図を作成する段階で樹冠辺縁部の補正が必要となることが分かった。

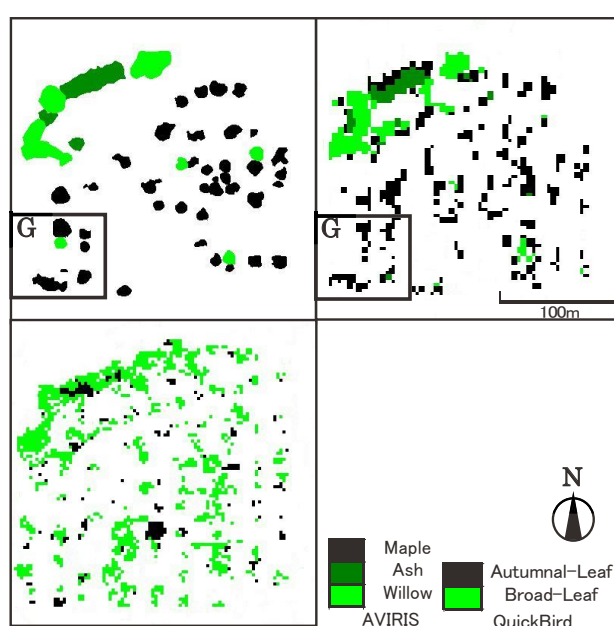


図 2-17 広葉樹林分類図

(左上) 実測植生図 (右上) AVIRIS の分類図 (左下) Quick Bird の分類図

表 2-4 実測結果と解析結果との比較

	実測本数	解析本数	実測面積(m ²)	一致面積(m ²)	一致率(%)
Maple	39	43	17740	10075	48.4
Ash	5	4	3953	3888	83.8
Willow	13	18	7838	6382	69.4
Needle	19	37	4516	1892	35.7
Cotton	6	26	2286	1113	41.5
Elm	7	31	3352	1028	26.2

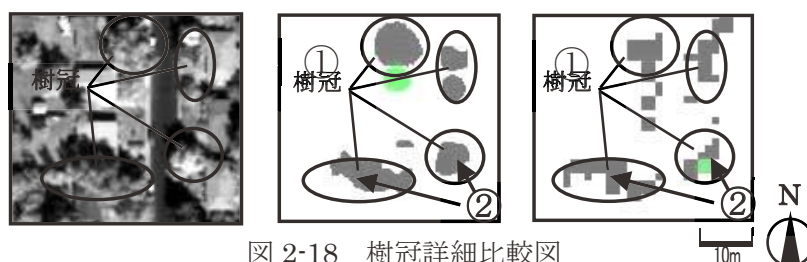


図 2-18 樹冠詳細比較図

(左: PAN 画像 中央: 実測植生図 右: AVIRIS の分類図)

図 2-19 は Needle-Leaf, Cotton Tree, Elm の 3 種の分類図である。実測植生図に植生と陰影の影響を明らかにするため、陰影のカテゴリー (Shadow) を追加した。Cotton Tree も Elm も葉の色が濃く、前述の広葉樹よりも針葉樹に近い色をしている。図 2-16 より植生の陰影の部分はバンド 40 以降のスペクトルの形状が Elm と酷似している。そのため、陰影を示す部分に Elm が多く分類されている。Quick Bird では Needle-Leaf が多く分類されており、陰影と重なる部分が多いため、陰影部分の植生が Needle-Leaf と誤分類されていると考えられる。公園東側の Cotton Tree は樹冠が大きく、陰影の影響を受けにくいために AVIRIS の分類図では抽出が可能であった。陰影の部分は他の植生よりも低い分類精度を示した。

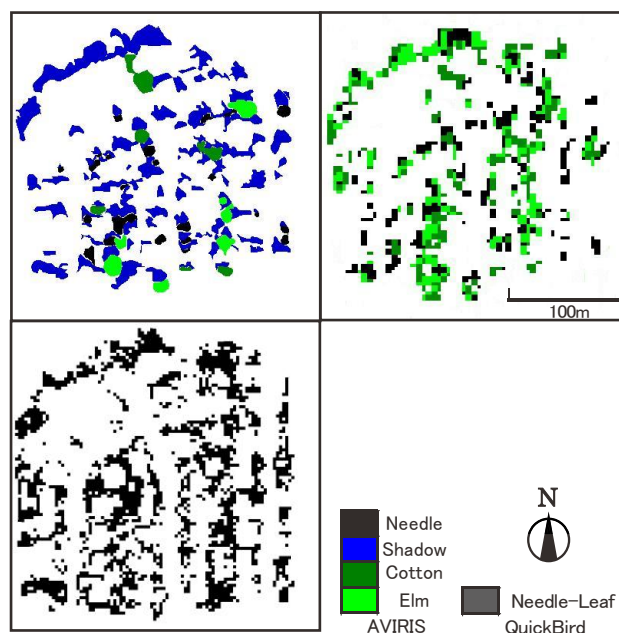


図 2-19 針葉・広葉樹林分類図
(左上) 実測植生図 (右上) AVIRIS の分類図 (左下) Quick Bird の分類図

2.7 AVIRIS データによる材質分類

2.7.1 解析の流れ

本節では、屋根材などの材質分類を試みる。各実測調査地において、占有面積の多いものは、植生、アスファルト（道路の舗装）、屋根である。屋根材进行分类するのは他の物質分类を行うよりも、実測が正確にでき、解析もスムーズに行えるからである。

建築の分野において、屋根面の材質を把握することは熱環境工学的にも重要である。よって、従来のマルチスペクトルデータでは把握できなかった屋根面の材質把握がハイパースペクトルデータを利用することにより、可能であるかどうかを検証することは重要である。敷地面積に対する屋根面の割合は 4 割に近く、住宅地においては多くの面積が含まれる。また、日本ではトタン、瓦（茶、黒、青など）様々な屋根材が存在しているが、ボウルダーにおいては日本ほど屋根材の種類は多くない。代表的な屋根材はアスファルト系や樹脂系の屋根材である。屋根材などの植生以外の物質は状態変化によるスペクトルの変化は少ない。実測したところ、材質と色により分類すると、全調査地において 10 種類程度しか存在していないため、屋根材を本章における分類対象とした。解析フローを図 2-20 に示す。

今後、ハイパースペクトルデータが容易に利用可能になるにつれ、スペクトルライブラリーの有用性が注目されると考えられる。本節では解析後の屋根材の分類精度を検証することにより、材質分類の今後につながる利用を模索していくこととする。本節では、分光放射計「Field Spec Pro」(ASD 社製)を使用したスペクトルの実測調査を行い、その実測スペクトルを教師データとする解析を試行する。

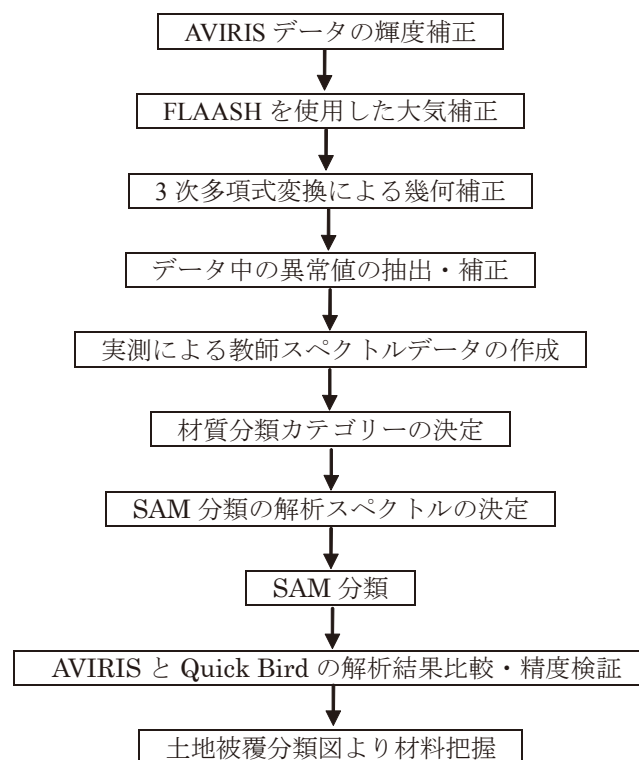


図 2-20 AVIRIS データによる材質分類の解析フロー

2.7.2 分光放射計によるスペクトル測定

分光放射計とは、測定対象物からの光（電磁波）の分光放射エネルギーを測定するための計測器である。例えば、天空から降り注ぐ太陽放射を測定するための日射計は、日射による波長域における全ての放射エネルギーを測定するセンサーであるが、分光放射計を使用すると太陽放射の波長毎の放射エネルギーを測定することができる。リモートセンシングではこの原理を利用して、波長ごとの放射エネルギーを放射輝度に変換している。分光放射計を利用することにより物質ごとの反射特性を把握することができる。これを物質のスペクトルという。

ハイパースペクトルデータを利用した解析において教師データを分光放射計で測定することにより、土地被覆分類だけでなく、物質特定も可能であると考えられる。本節では米国コロラド大学 CSES が所有している分光放射計 ASD 社製「Field Spec Pro」を使用した。この分光放射計は AVIRIS の測定範囲である 400nm～2500nm の範囲を測定することができる。「Field Spec Pro」の詳細仕様を表 2-5 に示す。また、測定した屋根材料のスペクトルの一例を図 2-21 に示す。

表 2-5 Field Spec Pro の詳細仕様

機種	Field Spec Pro
測定波長範囲	350-2500nm
スペクトル分解能	3nm@700nm 10nm@1400&2100nm
サンプリング間隔	1.4nm@350-1050nm 2nm@1000-2500nm
スキャンング・タイム	100milliseconds
検波器	One 512 element Si photodiode array 350-1000nm Two separate,TE cooled,graded index InGaAs photodiodes 1000-2500nm
インプット (2～10mに延長可能)	1.4m fiber optic (25° field of view) Optional foreoptics available
キャリブレーション	Wavelength,reflectance,radiance,irradiance.
重量	7.2Kg

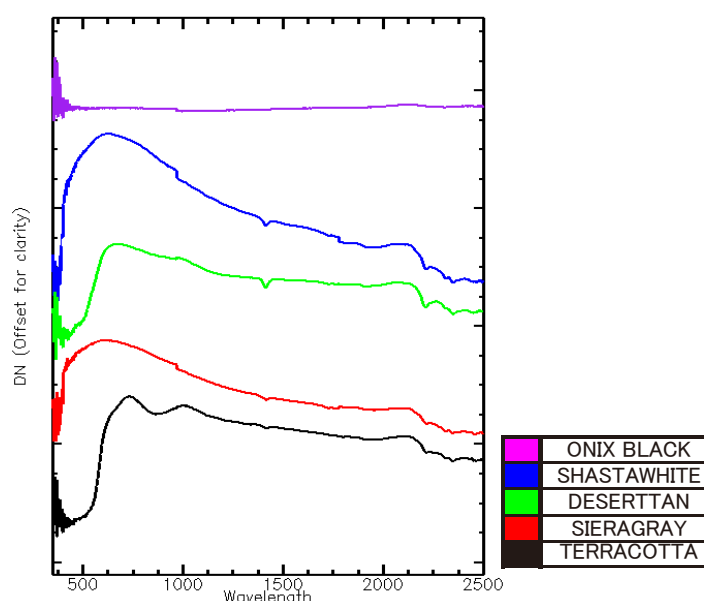


図 2-21 屋根材のスペクトル

2.7.3 大気補正

ハイパースペクトルデータ AVIRIS の波長域は 400~2500nm であり, この範囲には CO₂, H₂O, O₃, O₂ など多くの大気による吸収帯が存在する。今回使用する大気補正プログラム FLAASH は, コロラド大学が開発した ATREM(Atmospheric REMoval Program)をアルゴリズムとしている。ATREM は地表の特性があらかじめ分かっている場合でも, AVIRIS データからスケーリングされた地表反射率を求めるための放射伝達モデルをベースにした補正手法である。AVIRIS データ, 大気上の太陽放射度曲線, 大気に含まれる CO₂, H₂O, O₃, O₂, N₂O, CO, CH₄ のそれぞれの透過率スペクトルから, 940nm と 1100nm の水蒸気バンドを使用してピクセルごとの水蒸気を計算する。これにより放射輝度を反射係数に変換する (図 2-22)。FLAASH による大気補正をかけることにより, 各吸収帯での谷間が補正されている。また可視域において放射輝度から反射係数に変換されることにより平準化されている。このスペクトルでは Output Scale を 10000 にしてある。今後解析に使用する際には, 係数 10000 で割り 0~1 に収めたものを使用する。補正後は右図のように水蒸気の吸収帯である 1400nm, 1900nm 付近はカットされる。

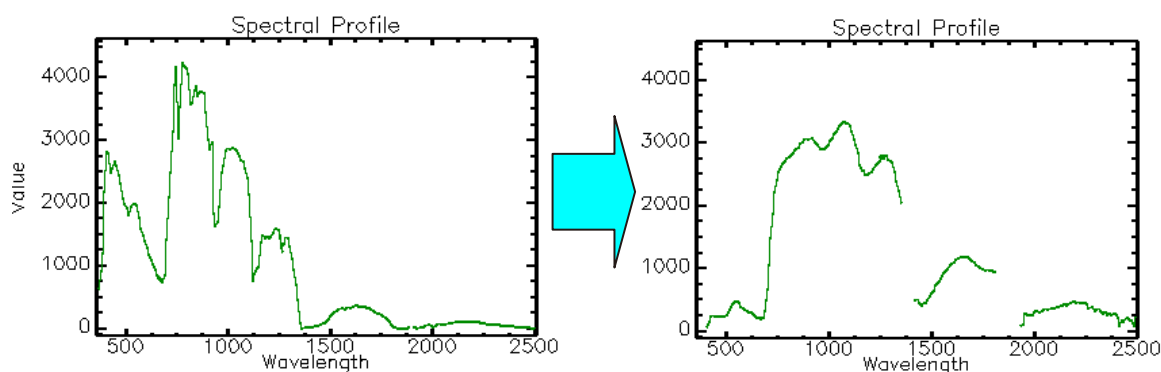


図 2-22 放射輝度から反射係数への変換(左図: 大気補正前, 右図: 大気補正後)

2.7.4 分光放射計スペクトルを教師データとした材質分類

各実測調査地において, 占有面積の多いものは, 植生, アスファルト (道路の舗装), 屋根である。材質分類をする対象物を屋根材とした。屋根材分類は他の物質分類を行うより, 実測が正確にでき解析もスムーズに行えると考えたからである。また, Boulder の住宅地の屋根材はほとんどがアスベスト系であり一部瓦, 板葺があったが, 種類は多くない。

これらを考慮に入れ, 分類カテゴリーを ONIXBLACK (黒・こげ茶), SHASTAWHITE (白・明灰色), DESERTTAN(薄茶), SIERAGRAY(濃灰・濃茶), TERRACOTTA(灰色・茶色), 瓦(赤茶), コンクリート, アスファルト, 土壌の 9 種類とした。また, 植生解析では閾値を 0.2 に設定したが, 材質分類を試みる際に 0.2, 0.225, 0.25, 0.275, 0.3 と推移させたところ 0.275 が最も良い結果であったため, 本解析では閾値を 0.275 とした。解析バンドは水蒸気の吸収帯のみを考慮した, Band6~31, Band35~106, Band113~153, Band166~224 の合計 203 バンドとする。次に, 作成した土地被覆分類図から Baseline 住宅地を 100×100 ピクセルで切り出し (図 2-2(E)および図 2-3(E)) 各カテゴリー別の詳細分類図を作成した。解析結果を図 2-23, 表 2-7 に示す。

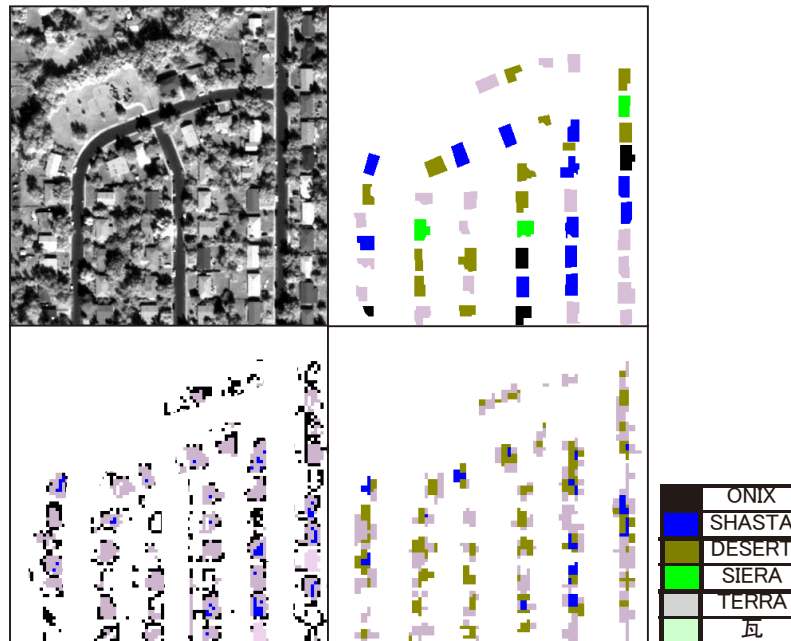


図 2-23 Baseline 住宅地材質分類図

表 2-7 Baseline 住宅地屋根材一致率

カテゴリー	実測軒数(軒)	AVIRIS分類軒数(軒)	QB分類軒数(軒)	AVIRIS一致率(%)	QB一致率(%)
ONIX BLACK	4	0	3	0	25
SHASTA WHITE	12	9	4	58.3	16.7
DESERT TAN	13	17	0	76.9	0
SIERA GRAY	3	0	0	0	0
TERRA COTTA	17	17	21	88.2	23.5
瓦	0	0	2	—	0
その他	0	2	0	—	0
合計	49	45	30	—	—

一致率とは実測結果に対し同じカテゴリーのAVIRIS分類結果が含まれる軒数の割合

2.7.5 小考察

実測結果より Baseline 住宅地では SHASTA WHITE, DESERT TAN, TERRA COTTA の 3 種類の屋根材が多く存在している。図 2-23 より一軒に含まれるカテゴリーで最大数のものをその住宅のカテゴリーとし各軒数と一致率を算出した。アスファルトは削除してある。Quick Bird 分類図ではほとんどが TERRA COTTA(灰色・茶色)として分類されているが、一致率は全体が 25%以下と低い(表 2-7)。Quick Bird では細かな分類は難しいことが示唆される。AVIRIS 分類図において、先述の 3 種類の屋根材分類図一致率を見ると 58%, 77%, 88%と高い一致率であった。住宅数の抽出においても高い精度を示した。しかし ONIX BLACK と SIERA GRAY は分類されなかった。これは ONIX BLACK はアスファルトとして、SIERA GRAY は TERRA COTTA とコンクリートとして誤分類されたためである。また、他の解析対象地について考察すると、コロラド大学キャンパス周辺の大学の建物は一部を除き瓦屋根で統一されている。このエリアの瓦屋根の一致率は Quick Bird が 70%で、AVIRIS が 57%であった。AVIRIS の一致率が低い原因として、屋根が陸屋根ではないために、日射の角度などの条件により可視域のスペクトルが屋根面の方向に対して変化しやすいことが考えられる。

2.8 まとめと今後の課題

本章では都市域の植生計画等に利用可能なリモートセンシング技術として高空間分解能・高波長分解能ハイパースペクトルセンサーAVIRISのデータを使い、ハイパースペクトルデータのSAM分類という解析手法による詳細な植生分類および材質分類を試みた。そして、高空間分解能衛星Quick Birdによる分類結果と比較を行った。これにより以下の知見を得た。

- 1) 植生抽出精度に関してはAVIRISでは都市域の数m四方の小さな植生を抽出することができる。またQuick Birdに比べ若干多く緑被が抽出されたが、これは陰影による影響であると考えられる。
- 2) Quick Birdでは植生を4種類に分類した場合の精度が良好だった。これ以上の種類で分類を行うと、分類精度が低くなることが確認された。AVIRISでは9種類の分類を試みた。その結果、NeedleとElmの2種類において一致率が40%を下回ったが、それら以外は比較的高い一致率を得ることができた。また、ハイパースペクトルデータを利用することにより、マルチスペクトルデータでは詳細を把握できなかった植物の状態についても把握できることを確認した。
- 3) スペクトル角から類似度を判定し分類するSAM分類による植生分類を試行した。この結果、ハイパースペクトルデータを利用した分類においてSAM分類は有効であることを確認した。また、樹冠の抽出は可能であったが、幾何補正の際にリサイズしデータを内挿する過程でスペクトルの変化があり、樹冠辺縁部での誤判別が多くなった。データ補正の際にこれを減らす手法の確立が求められる。
- 4) 屋根材を含めた9種類の材質分類を試みた。Quick Birdの分類では瓦においては高い精度で抽出することができたが、他のカテゴリーでは正確に抽出することは困難であった。AVIRISによる材質分類では瓦以外においても高い精度で抽出が可能であった。
- 5) 分光放射計で実測したスペクトルを教師データとした材質のSAM分類を試行した。この結果、分光放射計を用いた解析手法はハイパースペクトルデータを解析する上で有効であることを確認した。大気補正、センサー補正などの各種補正の技術面は向上中であるため、これからますます精度の向上が期待される。

以上の結果より、都市域の温熱環境緩和およびヒートアイランド化の抑制施策を図る上で、ハイパースペクトルデータを利用した土地被覆分類により、さらに細かな緑被の抽出や樹種の判定、材質の判定が可能となることで緑量を面的、効率的に把握できる可能性が示唆された。

これらの解析をヒートアイランド化抑制による屋外温熱環境の緩和を目的とした都市計画における植生計画の一手法として利用することで、空気調和設備の更なる効率的な運転や中間期における外気冷房など換気装置による更なる省エネルギー施策の検討に寄与することが望まれる。

本章に関する既往発表文献

審査付き論文

- 2-a) 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトルデータ AVIRIS を利用した都市域植生分類精度に関する研究 コロラド州ボウルダーにおける詳細な植生把握, 日本建築学会環境系論文集, 第 590 号, 2005.4

審査付き国際会議論文 (第一筆者)

- 2-b) Yuichiro AMANO, Naoki TAKAGI, Alexander. F. H. Goetz : A Study on the Classification of Urban Region Using Hyper-spectrum Data at AVIRIS, Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008), IV (pp.687-690), 2008.9 ISBN: 978-1-4244-2808-3

口頭発表

- 2-c) 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトル AVIRIS データを利用した都市域土地被覆分類精度に関する研究, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 2005
2-d) 高木直樹, 小松義典, 天野雄一郎, 梅干野晃: 建築分野におけるリモートセンシング技術の応用と統計処理, 日本リモートセンシング学会学術講演会梗概集, 2006
2-e) 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトルデータを利用した都市域土地被覆分類に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 2007

参考文献

- 2-1) 長野市：「長野市緑を豊かにする計画」算定の基礎調査，1996.2
- 2-2) 小泉千絵子他：高分解能衛星画像を用いた都市の緑被率推定，日本リモートセンシング学会第31回学術講演会論文集，pp.9-10,2001.12
- 2-3) 福田雄高，高木直樹，岩井一博，山下恭弘：土地被覆の変化が気温変動に及ぼす影響の解析，日本建築学会環境系論文集，No.566,pp.81-85,2003.4
- 2-4) 尹敦奎，梅干野晃：熱収支数値シミュレーションによる都市緑化の評価，日本建築学会計画系論文集，No.520,pp.69-75,1999.6
- 2-5) 梅干野晃，浅輪貴史，高田真人，円井基史：土地利用と熱環境対策からみた都市街区におけるヒートアイランドポテンシャルの特徴，日本建築学会環境系論文集，No.559,pp.63-70,2002.9
- 2-6) 小泉圭吾，高木直樹：リモートセンシング技術を用いた都市内緑被の把握，日本建築学会計画系論文集，No.552,pp.77-84,2002.2
- 2-7) 小松義典，梅干野晃他：GIS とリモートセンシングを利用した都市環境計画支援（その4 住宅地の緑被分布詳細図の作成），日本建築学会学術講演梗概集D-1,pp.567-2002.8
- 2-8) 小松義典，梅干野晃他：GIS とリモートセンシングを利用した都市環境計画支援（その5 里山の樹種分類アルゴリズム，その6 緻密植生図の作成），日本建築学会学術講演梗概集D-1,pp.583-586,2003.9
- 2-9) 梅干野晃，水田敏也：航空機MSSデータによる都市の緑被分布抽出その3（マルチテンポラリデータによる緑の実態把握），日本リモートセンシング学会第13回学術講演会論文集，pp.141-144，1992
- 2-10) 田口芳樹，高木直樹他：高分解能衛星を用いた市街地アルベドの解析，日本リモートセンシング学会誌，Vol.23, No.2, pp.147-156,2003.6
- 2-11) D. A. Roberts etc.:1993,Green Vegetation, Non Photosynthetic Vegetation and Soils in AVIRIS Data, : Remote Sensing of Environment, v.44,pp255-269
- 2-12) Robert O. Green etc.: Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS),REMOTE SENS.ENVIRON,No.65, pp227-248, 1993
- 2-13) George, F. Hepner etc.: Investigation of the Integration of AVIRIS and IFSAR for Urban Analysis, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.64, No.8, 1998.8
- 2-14) Kruse ,F.A., Goetz, A.F.H. etc.,1993,The Spectral Image Processing System (SIPS)-Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data: Remote Sensing of Environment, v.44, pp145-163
- 2-15) 吉村晴佳：葉齢による樹葉の近赤外域分光特性と重なり効果，日本リモートセンシング学会誌,Vol.18, No.1, pp.42-56, 1998
- 2-16) 尹敦奎，梅干野晃：都市域における画素内緑被抽出のための指標，日本リモートセンシング学会誌，Vol.18, No.3, pp.4-16 1998
- 2-17) 沖一雄他：ハイパースペクトルデータによる画素内特定被覆率推定に関する研究，日本リモートセンシング学会誌，Vol.20, No.3, pp.17-33 2002
- 2-18) CSES, Atmospheric REMoval Program,ver1.1,Colorado Univ,1992

第 3 章

小規模事務所建物における空調設備の稼働状況検証と設計手法の合理化

第3章

小規模事務所建物における空調設備の稼働状況検証と設計手法の合理化

3.1 はじめに

設計時において室内発熱負荷や機器の負荷率等を実情に沿うように考慮し、適切な空調設備構成とすることが更なる省エネルギーにつながる事が明確である。しかし、現状を鑑みると空調設備の設計時においては、必要換気量や発熱負荷等の諸条件をもとに、最大負荷計算法等の空調負荷計算を実施し、必要な空調能力を算出した上で空調機を選定するが、実運用時に必ず適正な容量の空調機が選定されているとは言い難く、空調処理熱量と設置している空調機容量に乖離が見られ、非効率な稼働状況となっている場合がある。

また、建物規模別における延床面積の割合に目を向けると、省エネルギー基準で第一種特定建築物の対象となる2000㎡以上の中規模な建物よりも第二種特定建築物の対象となる2000㎡以下の小規模建物の延床面積が占める割合が全体の半分以上であることや、その中でも事務用途の建物が多いことが分かっており、小規模事務所建物における空調設備の合理的な設計の実施は有効であることが示唆される。しかし、2017年度から施行される建築物省エネ法では、2000㎡以上の建物についてエネルギー消費性能適合性判定の義務を課しているが、2000㎡以下の建築に対する省エネルギー施策にはまだ十分な配慮が払われているとは言い難い。このため、小規模事務所建物の実運用時における空調負荷の性状を明らかにし、実状を反映した最適な空調計画を策定する必要がある。

3.2 本章に関連する既往の研究

空調設備の稼働状況を実測により評価した研究について、中規模の事務所建物においては、松下らが熱源の発生熱量について実測を行い熱源容量との乖離状況を明らかにしており、藤木らはガス式熱源空調を採用した事務所建物の設計時において、使用時間帯や人員負荷、機器発熱負荷の実負荷を厳密に想定し必要空調能力を負荷計算により算出した事例や浦山らが業務用建築物の内部発熱に関して機器の使用電力量をもとに明らかにした事例、一瀬らが寒冷地の事務所ビルにおける暖房負荷の実態と空調用熱源機の容量設計に関して検討した事例はあるが、小規模の事務所建物において個々の部屋の空調処理熱量を一定期間計測し、設計時における負荷計算結果と比較し空調機容量との乖離状況について検討した研究は多くない。

小規模事務所建物においては、中規模事務所採用される冷温水を熱媒体とした中央式の空調設備と違い、冷媒を利用したビル用マルチパッケージ空調機を採用している事例がほとんどであるため、計測に多くの手間がかかり空調室内機の各処理熱量を分析することが困難であることから計測事例も少ない。その他、山田らが室外機エンタルピー法を応用したプローブ挿入法により空調室外機の長期的な性能調査により複数ビルにおいて熱源側での空調負荷率やCOP等の評価を行っている。また、宮田らは業務用建築物のためのエネルギー消費量評価手法に関する基礎的調査において複数の部屋に採用された個別分散型ビル用マルチパッケージ空調機において室内エンタルピー法等の複数の測定手法の比較を行い各手法による計測誤差や系統ごとの実働特性について分析を行っているが、実稼働状

態の小規模事務所建物において個々の空調室内機における空調処理熱量を計測評価した事例は多くはない。

3.3 研究フロー

本章では、高知県に位置するビル用マルチパッケージ空調機を採用した小規模事務所建物を対象として実測を実施する。空調系統ごとに各空調室内機の運転状況および処理熱量等を把握し、空調機全体の COP（成績効率）や熱源の負荷率等について検証する。

これらの検証結果をもとに小規模事務所建物における合理的な空調設備設計手法の確立を目的とした提案を実施する。図 3-1 に研究フローを示す。

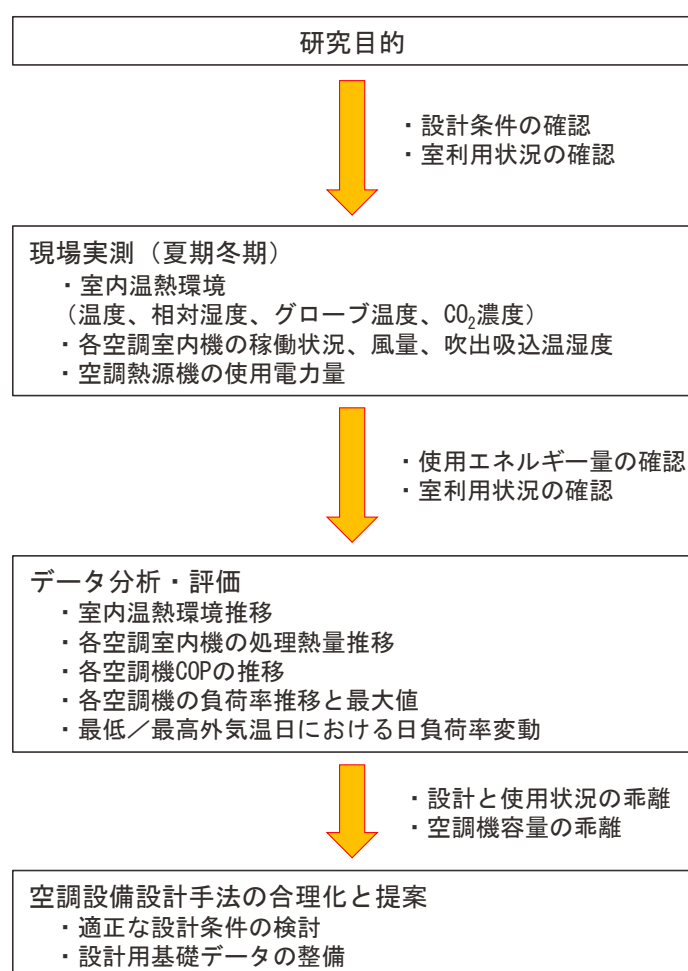


図 3-1 研究フロー

3.4 調査概要

3.4.1 対象施設概要

調査対象の建物は、高知県土佐山田町に位置する 2009 年 3 月に竣工した延床面積約 1370m² の鉄骨造 2 階建の事務所建物である（写真 3-1）。

空調設備として、ビル用マルチパッケージ空調機（以下、ビルマル PAC 空調）を導入しており、室外機は 2 台、室内機は 26 台である。室外機の系統は氷蓄熱系統（以降 ACP-1 系）と非蓄熱系統（以降 ACP-2 系）の 2 系統あり、ACP-1 系には室内機が 9 台、ACP-2 系には 17 台設置されている。なお、ACP-1 系の蓄熱は夏期のみとし、冬期は ACP-2 系と同様に非蓄熱運転をする。

本建物は、災害復旧拠点として運用されており災害時等に夜間空調が必要な場合があるため、執務室に 2 系統の空調室内機を設置している。なお、この夏期の計測期間は蓄熱運転を行っていなかった。本建物の空調設備の概要と空調機仕様を表 3-1、表 3-2 に、各階の平面図と室内機番号を図 3-2 に示す。



写真 3-1 対象建物外観

表 3-1 対象建物の空調設備概要

空調機系統	室外機 冷房能力	室外機 暖房能力	室内機
蓄熱系統(ACP-1)*	40.5 kW (56.0 kW)**	50.0 kW	9 台
非蓄熱系統(ACP-2)	96.0 kW	108.0 kW	17 台

* 冬期は非蓄熱運転となる。夏期は氷蓄熱運転を実施

** () 内は蓄熱利用時の能力

表 3-2 対象建物の空調設備概要

室名	空調機 番号	機器 名称	形式	冷房能力 [kW]	暖房能力 [kW]	定格風量		測定風量		風量(質量流量)			
						冷房運転 [m³/h]	暖房運転 [m³/h]	冷房運転 [m³/h]	暖房運転 [m³/h]	冷房運転 [kg/h]	暖房運転 [kg/h]		
屋外		ACP-1		40.5 (56.0)*	50.0								
1階執務室	01	ACP-1-1	天カセ 4方向	7.1	8.0	810	1140	581	999	643	1180		
	02	ACP-1-2		5.6	6.3	660	960	479	776	533	921		
	03					660	960	471	776	523	921		
	04					660	960	465	776	518	921		
	05					660	960	465	776	518	921		
応接室	06					660	960	469	776	522	921		
2階執務室	07	ACP-1-1		7.1	8.0	810	1140	584	999	645	1180		
	08		810			1140	584	999	645	1180			
相談室	09	ACP-1-3		3.6	4.0	600	780	449	658	497	779		
屋外		ACP-2		96.0	108.0								
1階執務室	10	ACP-2-1	天カセ 4方向	7.1	8.0	810	1140	583	1007	607	1189		
	11	ACP-2-2		5.6	6.3	660	960	450	810	531	950		
	12					660	960	450	810	522	950		
	13					660	960	450	810	513	950		
	14					660	960	450	810	513	950		
1階リフレッシュ	15	ACP-2-5	天カセ 2方向	7.1	8.0	780	990	555	845	615	995		
女子ロッカー	16	ACP-2-6		2.2	2.5	300	420	214	359	237	423		
男子ロッカー	17	ACP-2-1	天カセ 4方向	7.1	8.0	810	1140	583	1007	642	1179		
2階執務室	18					810	1140	583	1007	642	1179		
	19					810	1140	583	1007	642	1179		
2階リフレッシュ	20	ACP-2-5	天カセ 2方向			780	990	562	845	615	995		
会議室(3)	21	ACP-2-1	天カセ 4方向			810	1140	571	1019	635	1210		
会議室(3)	22					810	1140	571	1019	635	1210		
会議室(2)	23	ACP-2-2				5.6	6.3	660	960	450	810	497	950
会議室(1)	24					660	960	450	810	497	950		
休養室	25	ACP-2-3		4.5	5.0	660	900	429	752	476	881		
健康管理室	26	ACP-2-4		3.6	4.0	600	780	468	658	514	769		

* () 内は冷房期の蓄熱利用時の能力

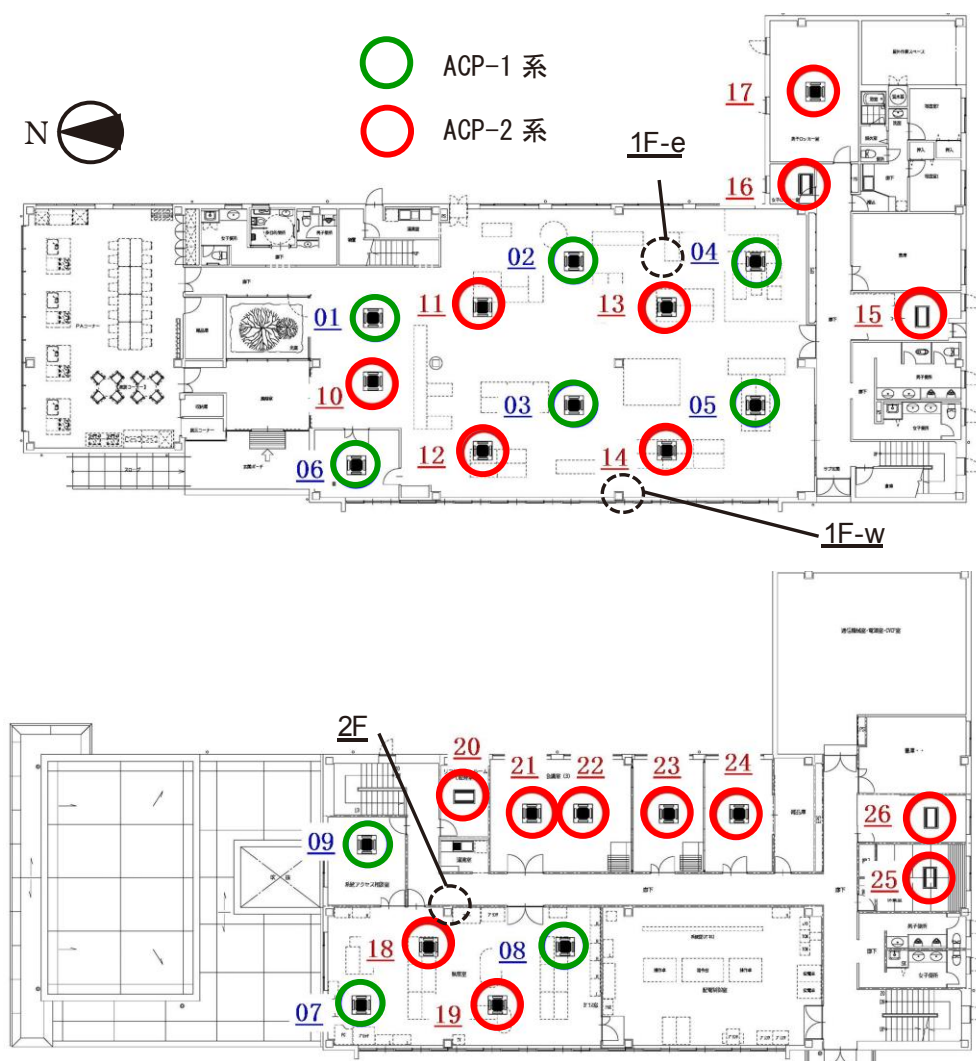


図 3-2 各階平面図と室内記番号（上図：1 階 下図：2 階）

3.4.2 計測期間

冬期（以下、暖房期）・夏期（以下、冷房期）の室内温熱環境や空調処理熱量について、それぞれ評価するため、暖房期は2013年1月15日（火）～27日（日）の約2週間、冷房期は2013年8月4日（日）～31日（土）の約1ヵ月間、通常運用状態においてそれぞれ測定を実施した。

3.4.3 室内温熱環境の測定

室内温熱環境の測定項目を表3-3に示す。各部屋の温湿度13点、グローブ温度、鉛直方向の温度分布測定（FL+100mm, 600mm, 1100mm, 1600mm, 2100mm）は1階、2階の執務室中央付近でそれぞれ1ヶ所ずつ測定した。また、CO₂濃度は冷房期に1階執務室と2階執務室の2カ所で測定を行った。

暖房期はCO₂濃度の測定は、別途1階に設置していた常設のCO₂濃度計の値を参考値として取り扱った。測定インターバルは空調機熱量の測定に合わせ5分間隔とした。室内測定機器の諸元を図3-3に、設置状況を写真3-2に示す。

表 3-3 室内環境測定項目

測定項目	測定箇所
温湿度[℃]	13点(各部屋ごと)
相対湿度[%RH]	13点(各部屋ごと)
鉛直方向温度[℃]	1,2階：各1カ所(FL+100mm-2100mm,500mm間隔)
グローブ温度[℃]	1,2階：各1カ所(鉛直方向温度と同じ位置)
CO ₂ 濃度[ppm]	1階執務室：2カ所，2階執務室：1カ所



型番	T/AND/D TR-72U
測定要素	温度・湿度
チャンネル数	温度・湿度各1チャンネル（温度内蔵1ch）
測定範囲	0～50℃、10～95%RH（付属センサ） -10～60℃（内蔵センサ）
測定精度	平均±0.3℃、±5%RH
分解能	0.1℃、1%RH
記録容量	8000データ×2チャンネル
通信方式	USB通信・シリアル通信（RS-232C）
動作環境	周囲温度：-10～60℃ 周囲湿度：90%RH以下（結露しないこと）



型番	T/AND/D TR-76Ui
測定要素	CO ₂ 濃度
チャンネル数	CO ₂ 濃度 1チャンネル
測定範囲	0～9,999 ppm
測定精度	±50ppm+読み値の±5% [5,000ppm]
分解能	最小 1ppm
記録容量	8000 データ×1チャンネル
通信方式	USB 通信・シリアル通信(RS-232C) ・赤外線通信 (IrPHY 1.2 小電力方式)
動作環境	周囲温度: 0～45℃ 周囲湿度: 90 %RH 以下（結露しないこと）

図 3-3 室内計測機器諸元



写真 3-2 室内測定機器設置状況

3.4.4 外気温湿度の測定

AMeDAS による対象建築物から最も近い観測地点（高知後免）の 2013 年 1 月および 8 月の日平均外気温度と過去 30 年間（1981～2010）の気温データの平均（以降、平年値とする）と対象建物で測定した外気温度のデータとの比較を図 3-4 に示す。

2013 年 1 月の日平均外気温度は平均すると 5.2°C であり平年値と比べて 0.4°C ほど低く、2013 年 8 月の日平均外気温度は 28.3°C で平年値と比べ 1.5°C ほど高く、猛暑日も記録した。また、冷房期に対象建物で計測した値は AMeDAS 観測地点での値に対してさらに 2°C 前後高くなった。通常業務が行われた平日を対象とすると、測定期間中、暖房期は 1 月 18 日に最低外気温度（ -1.7°C ）を観測し、冷房期では 8 月 7 日に最高外気温度（ 35.6°C ）を観測している。

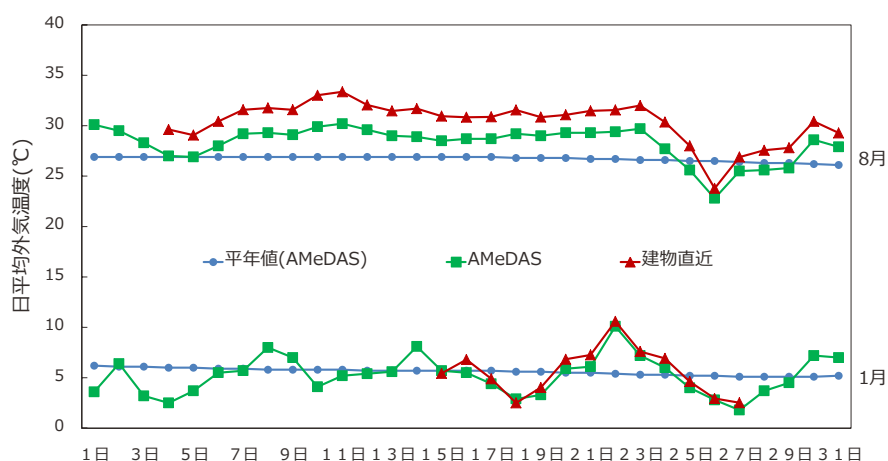


図 3-4 2013 年 1 月および 8 月の日平均外気温度

3.4.5 空調処理熱量の測定

空調処理熱量の測定に関しては、室内エンタルピー法により算出する。既往の研究では、室内エンタルピー法は室外エンタルピー法や冷媒推定法に比べ冷媒配管等からの熱損失の影響で処理熱量が若干小さくなる傾向が分かっているが、本章では各室内機の挙動や処理熱量を把握することが目的のため室内エンタルピー法を使用することとした。空調室内機の吹出口と吸込口に温湿度計（TR-72U：T&D 社製）を設置し、連続測定を行った（写真 3-3、計測位置は図 3-2 参照）。

吹出口の測定点は既往の研究³⁻¹⁰⁾による天井カセット式の吹出口の温度分布を参考にし、誘引等の外乱の影響を比較的受けにくい吹出口ルーバー中央部分とし、測定前の複数点のスポット計測により安定して吹出口の平均的な値を概ね示していることを確認した。

また、室内機の風量は、フード付き風量計（SWF-2000：コーナー札幌社製、最大測定風量 2000m³/h で精度は表示値の±5%）を使用し天井カセットの還り空気の吸い込み部において測定を行った。測定では、測定器に取り付け可能な最も大型のフードを採用し、可能な限り測定による風量低下が生じないように配慮した。什器等のレイアウトの関係で計測が不可能なもの以外は全台計測を実施したところ、測定風量は定格風量に対して 10%～20%程度少ない結果となった。これは機器の経年や使用状況に起因するものと考えられる。なお、測定期間中は、室内機の風量は常時一定の設定とした。本建物における空調室内機は什器等の配置上、風量計測が可能な機器について測定を実施した。測定が不可能であった機器に対しては同型の測定風量を、同型のものが無ければ定格風量に他機器の風量比率（測定風量／定格風量）を乗じて測定風量とした。測定風量は、質量流量に換算し空調処理熱量の演算に使用した。

設定温度は全台基本設定を暖房期 21℃、冷房期 28℃としたが、執務者の運用で空調機毎に変更可能な状態で運転した。また、空調室外機および室内機の消費電力量は電力量計（CW240：横河社製）により系統ごとに積算電力量の計測を行った（写真 3-4）。なお、冷房期の計測では、空調機の運転状況をより詳細に把握するため、ダイキン社製がメンテナンス用に開発したデータ収集装置（製品名：チェッカー）を設置し、室内機の発停状況や冷媒の循環状態（以後、循環状態をサーモ ON、循環停止で送風状態をサーモ OFF と示す）および吸込み温度等に関して運転データを収集した。風量計および電力量計の諸元を図 3-5 に示す。



写真 3-3 空調室内機測定機器設置状況

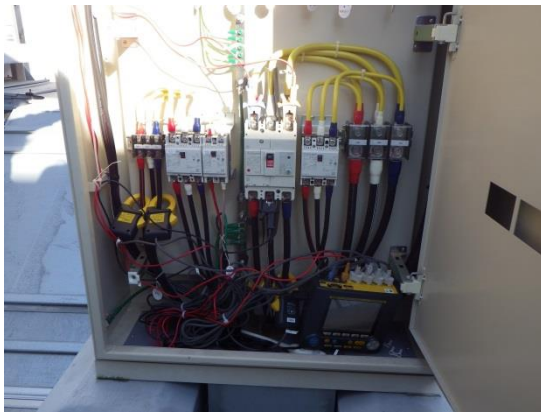


写真 3-4 電力量計設置状況およびリモコンでの温度設定状況



型番	SWF-2000
重量	4.4[kg]
測定要素	風量
推奨測定条件（温度）	0[°C]~50[°C]
推奨測定条件（風量）	200~2000[m ³ /h]
測定表示器	Swema 3000

型 番	CW240
入力形式	電圧：拵抗分圧方式 電流：クランプ検出方式
測定レンジ	電圧：150/300/600/1000V 電流：96033(50A) 5/10/20/50A 96030(200A) 20/50/100/200A 96031(500A) 50/100/200/500A
測定相線	単相2線,単相3線,三相3線,三相4線,スコット結線
測定系統数	単相2線：4系統,単相3線：2系統,三相3線：2系統
測定方式	デジタルサンプリング方式
周波数範囲	45~65Hz
クレストファクタ	定格入力時 3（但し、100Vレンジは1.8）
温度系数	電圧：±0.03% mg/°C 電流：±0.05% mg/°C

図 3-5 風量計，電力量計機器諸元

3.5 室内温熱環境の分析

本節では、後述する空調処理熱量や COP の分析、設計条件との比較において必要となる室内空気環境について測定結果を示す。

3.5.1 室内温湿度

温度と相対湿度は 1 階執務室西側 (1F-w) と東側 (1F-e)、2 階執務室 (2F) の 3 カ所で測定を行い、取得データ (以降実測値) のうち、業務時間 (8:00~18:00) のデータを抽出して整理した。測定箇所は図 3-2 に併せて示す。

暖房期・冷房期の温度、相対湿度の測定結果を箱ひげ図にしたものを図 3-6、図 3-7 に示す。括弧内の数値はデータの中央値を示している。空調機の熱源容量設計のための空調負荷計算において本建物では、暖房期は室内温度 22℃、相対湿度 40%RH、冷房期は室内温度 26℃、相対湿度 50%RH として計算されている。以降、これら値を設計値とする。また、ウォームビズ、クールビズ活動の影響により暖房期は、室内温度設定を 21℃、冷房期は室内温度設定を 28℃として運用している。以降、これら値を設定値とする。

暖房期の温度について比較すると、実測値の平均値は測定点によって異なるが概ね 19℃~21℃前後の範囲にあり、設計値より 2~3℃程度低く、設定値に対してはほぼ同等であることがわかる。また、計測時には執務者がドラフトを感じ近傍の空調機を一時停止する場合もあった。冷房期は設計値に対して、実測値の平均は各測点とも約 28℃となり、設計値より 2℃程度高く、暖房期と同様に設定値程度となる結果となった。相対湿度においては、暖房期は 2F の実測値は設計値付近の値となっているが、1F-w、1F-e では 10%RH ほど低く、冷房期では各測定点でいずれも設計値より 6~7%RH ほど高い結果となった。これは設定温度の変更による除湿効果低減の影響と考えられるが、概ね設計値を満足する結果となった。

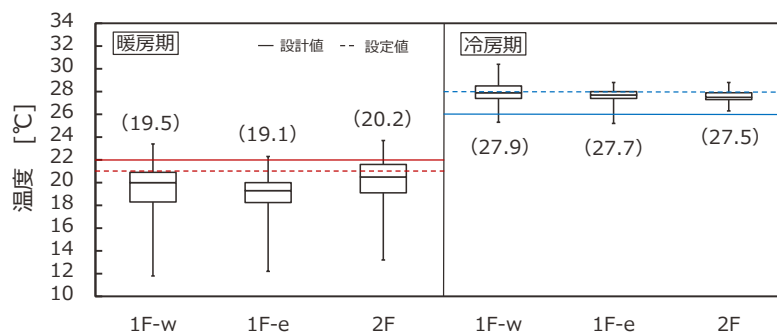


図 3-6 業務時間の室内温度

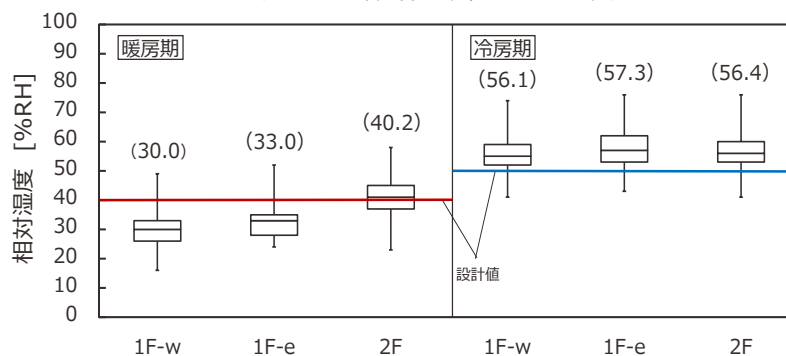


図 3-7 業務時間の室内相対湿度

3.5.2 代表日の室内温湿度

3.4.4 項で示したとおり，最低および最高外気温を観測した 1 月 18 日，8 月 7 日を暖房期，冷房期の代表日とし，各測定箇所での 1 日の室内の温度および相対湿度の推移を図 3-8，図 3-9 に示す。

温度について暖房期・冷房期で共に正午を境に 1 階執務室の西側の温度が東側に比べて高くなっており，西日の影響が示唆される結果となった。また，暖房期では業務時間内の 2 階執務室の温度が 1 階執務室に比べて，約 2℃前後高くなっていた。湿度についても暖房期・冷房期で共に正午を境に 1 階執務室の西側の湿度が東側に比べて低くなる傾向が見られた。1 階執務室と 2 階執務室の間では，業務時間内の相対湿度に大きな差は見られなかった。代表日において各測定箇所間で差異はみられたが，業務時間内に限るとそれぞれの箇所では温度で±約 2℃，相対湿度で±10%RH 程度の幅で推移していた。

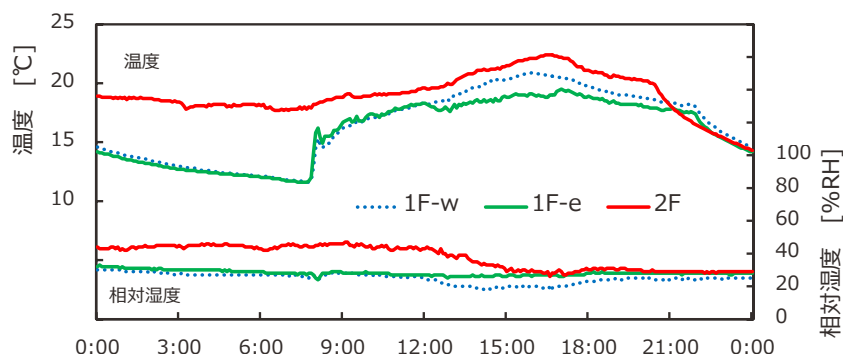


図 3-8 暖房期の代表点温度と相対湿度（最低気温観測日：1 月 18 日）

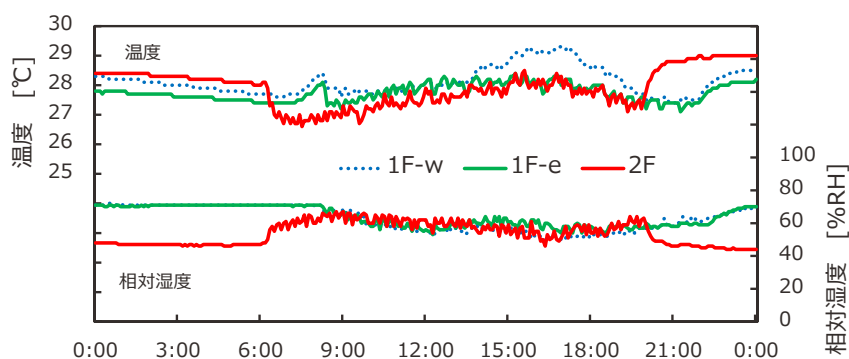


図 3-9 冷房期の代表点温度と相対湿度（最高気温観測日：8 月 7 日）

3.5.3 室内のCO₂濃度

業務時間のデータを抽出して、暖房期・冷房期の代表日のCO₂濃度の推移を図3-10に、CO₂濃度の実測値を箱ひげ図でまとめたものを図3-11に示す。括弧内の数値はデータの中央値を示し、網掛け部分は建築物衛生管理基準値の範囲を表している。

冷房期の業務時間内のCO₂濃度は1階執務室に比べ2階執務室は平均して100ppmほど高く、2階執務室の方がCO₂濃度は高い傾向にある事が分かる。参考値として示した暖房期の値は冷房期より低い値であった。代表日のCO₂濃度は1階執務室では暖房期位・冷房期共に業務時間内においても1000ppmを下回っていた。2階執務室の冷房期の値も、概ね衛生管理基準内であった。

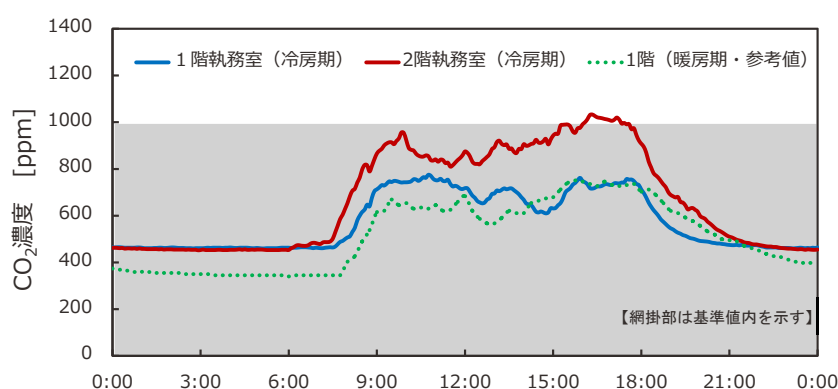


図 3-10 最低および最高外気温度観測日のCO₂濃度推移

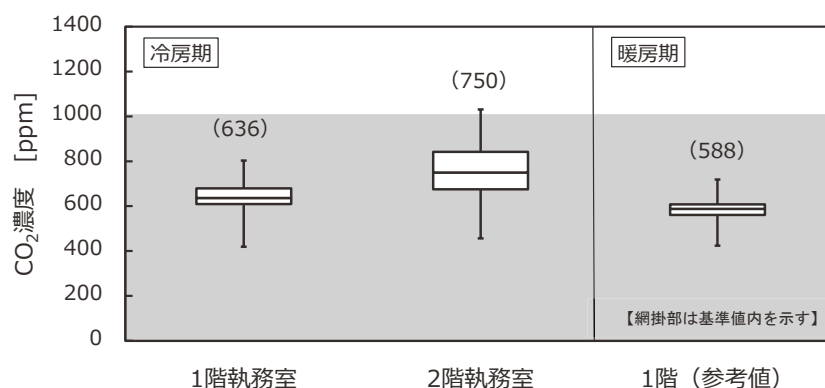


図 3-11 業務時間のCO₂濃度

3.6 暖房期のエネルギー分析

3.6.1 COP および負荷率の関連性

2013 年 1 月 15 日（火）～26 日（土）における ACP-1 および ACP-2 の各時刻の COP（積算空調処理熱量/積算空調使用電力量）の値を図 3-12 に示す。COP は式(3-1)に式(3-2)～(3-4) に 5 分間隔で測定した室内機の処理熱量 q_j および消費電力 P_i を代入し、12 サンプルの平均値とすることで 1 時間の値を算定した。

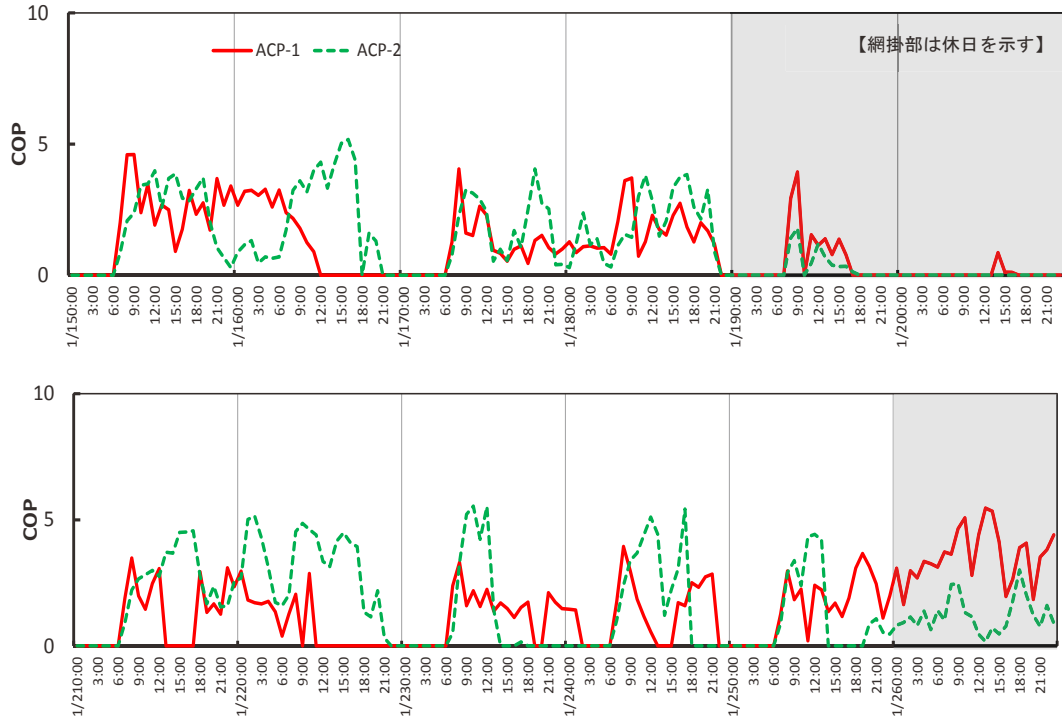


図 3-12 ACP-1 と ACP-2 の COP 推移

$$COP_i = \frac{\sum_{j=1}^n 3.6q_j}{\sum_{j=1}^n P_i} \quad \dots (3-1)$$

j : 室内機の番号
 n : 室内機の数
 P_i : 系統 i の消費電力
 (5 分値をもとに 1 時間の値を算出) [W]
 q_j : 室内機 j の処理熱量[kJ/h]

$$q_j = -\frac{1}{12} \sum_t (h_{Sj,t} - h_{Rj,t}) \times G_i \quad \dots (3-2)$$

$$h_j = 1.006\theta + (1.86\theta + 2501)x \quad \dots (3-3)$$

$$P_i = \frac{1}{12} \sum_t P_{i,t} \quad \dots (3-4)$$

P_i : 系統 i の消費電力の測定値[W]
 h_S : 給気の比エンタルピー[kJ/kg]
 h_R : 還気の比エンタルピー[kJ/kg]
 G_i : 還気の質量流量[kg/h]
 θ : 湿り空気の温度[°C]
 x : 湿り空気の絶対湿度[kg/kg]
 t : 時間

また、COP と負荷率（定格能力に対する室内機の総処理熱量の比）の関係を図 3-13、図 3-14 に示す。図中では業務時間内（8：00～18：00）とそれ以外の業務時間外に分けて示しており、COP および COP 暖房定格値を示した。それぞれの期間の COP 暖房定格値は、ACP-1 が 4.2、ACP-2 が 3.7 であり ACP-1、2 共に負荷率が 50～60%付近で最大となる機器特性となっている。ACP-1 は執務室系統の空調であり、朝の空調立ち上がり時の負荷率がほぼ 30%以上と他の時間帯よりも大きく COP が高い値を示している。また、ACP-2 は会議室等の附室系統が使用される日中に負荷率が大きくなり比較的高い COP を示している。両系統の業務時間における負荷率の出現時間を図 3-15 に示す。

ACP-1 は多くの時間において負荷率が 20%を下回り、10%以下が過半であった。ACP-2 は負荷率 30%以下が多く、15～25%にピークがある結果となった。業務時間内の COP の平均値は ACP-1 で 2.6、ACP-2 で 3.5 となり、計測期間を通して負荷率がほぼ 30%以下であることから、両系統の空調機は定格 COP よりも低く稼働している結果となった。

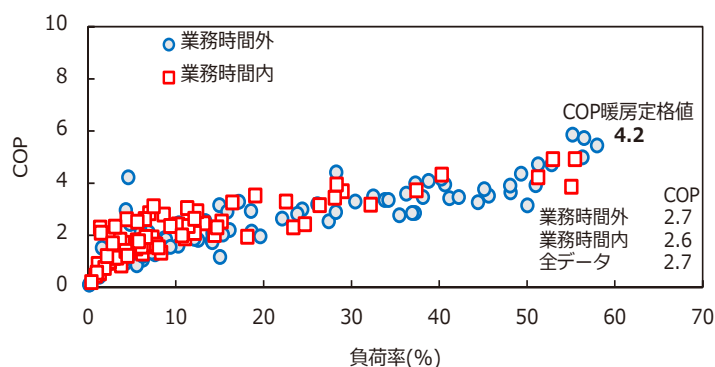


図 3-13 COP と負荷率の関係（ACP-1）

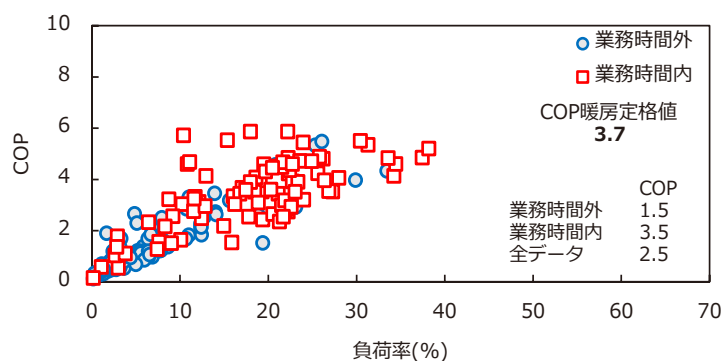


図 3-14 COP と負荷率の関係（ACP-2）

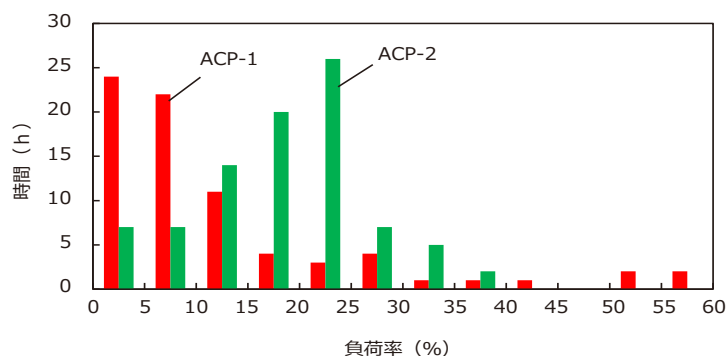


図 3-15 暖房期における負荷率の出現時間

3.6.2 空調負荷率の最大値

ACP-1 と ACP-2 の負荷率に関して、執務室および附室（会議室等）で計測された最大値を積算した値を図 3-16 に示す。

最大負荷率は ACP-1 が 64.2%，ACP-2 が 40.4%であった。ACP-2 では空調機暖房定格能力の半分以下となった。また、平日の測定期間中の平日において、最低外気温を記録した 1 月 18 日の各系統の時刻別の負荷率を図 3-17 に示す。系統毎の最大負荷率は ACP-1 で 55.1%（8:00 時点）、ACP-2 で 28.0%（11:00 時点）であった。

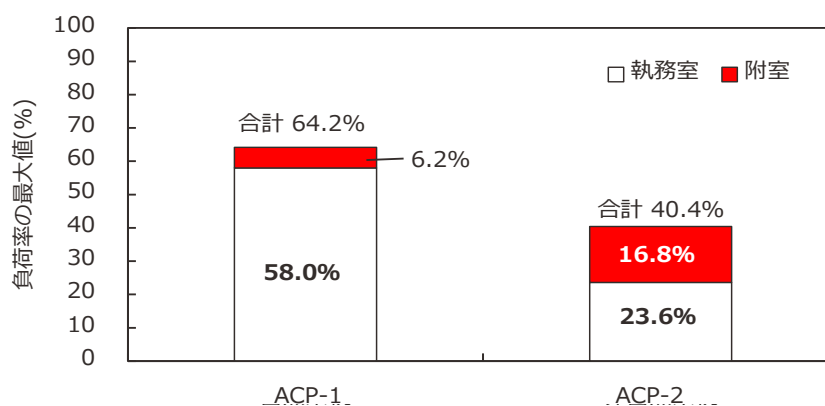


図 3-16 暖房期における負荷率の最大値

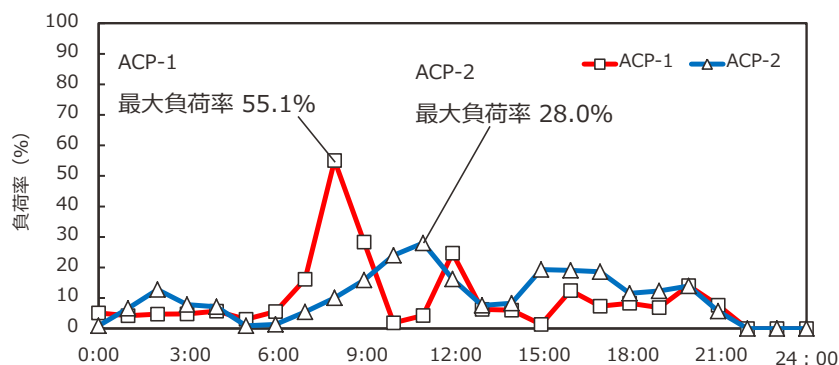


図 3-17 最低外気温日における日負荷変動

3.6.3 空調負荷計算と入力条件

本建物は設計時において、設計容量算定用空調負荷計算プログラム（MicroPeak）にて空調負荷計算を実施し、その結果を満足する空調機を選定している。設計容量算定用空調負荷計算プログラムとは、日周変動周期定常計算により最大空調負荷を算出するプログラムである。また、設計用外気温度の超過危険率として TAC5%を設定している。

計算時の与条件である換気量や機器発熱量の入力条件を表 3-4 に示す。この条件は、設計時において使用者に対するヒアリングや移設する機器などを調査し設定している。本節以降の空調負荷計算においては、この入力条件を使用し、設定温度等を変更することにより計算結果を算出した。

表 3-4 空調負荷計算時の入力条件

室名	室面積 (m ²)	想定人員 (人)	換気量 (m ³ /時)	機器発熱量 (kW)
1階執務室	349.9	34	1020	19.0
応接室	16.5	4	145.8	0.5
2階執務室	102.9	15	450	7.1
相談室	19.3	3	115.9	3.5
1階リフレッシュ	13.6	4	128.9	4.3
女子ロッカー	4.9	2	71	0.15
男子ロッカー	34.8	10	470	1.1
2階リフレッシュ (旧喫煙室)	10.5	3	430	0.2
会議室(3)	43.5	21	630	0.9
会議室(2)	21.9	6	180	0.5
会議室(1)	21	6	180	0.5
休養室	18.4	4	119.7	0.4
健康管理室	14.3	4	85.5	0.3

3.6.4 最大空調処理熱量に関する検討

空調機が処理した熱量について、下記の 5 条件で比較したものを図 3-18 に示す。

- ①空調機の暖房定格能力
- ②設計条件負荷計算結果（22℃，40%RH）
- ③実設定条件負荷計算結果（温度と相対湿度は実測値の平均値：20℃，30%RH，その他の条件は②と同等）
- ④各対象室の日最大処理熱量の合計値
- ⑤最大空調処理熱量の実測値（各対象室の処理熱量合計値の日最大値）

また、②および③においては冷媒配管の熱損失などの安全率は考慮していない。なお、④において、執務室と附室という連続的もしくは間欠的に利用される使用形態の異なる室それぞれの最大負荷を合計する安全側の設計方法があることから、実測負荷の最大値についても合計することで、設計方法がどの程度大きい値となるかを確認する観点から検討した。

②設計条件の最大処理熱量は 86.6kW，①空調機の暖房定格能力は 158.0kW となっており、約 2 倍となっている。一般的に高知県のような蒸暑地域においては、空調機の必要能力は冷房能力で決定される傾向があるため、暖房期においては定格能力に比べて処理熱量が小さい結果となっている。

②設計条件と③実設定条件を比較した場合、最大処理熱量は 72.7kW となり④合計値の方が（図 3-17 の両系統の合計値の和）75.8kW と若干高い値となった。計測期間中はウォームビズを推進し設定温度が低い運用を行なっていたが、間欠的に使用されている附室の処理熱量が比較的多く、図 3-16 の ACP-2 系統では、連続的に使用されている執務室と同程度の値（それぞれ負荷率が 16.8%と 23.6%）となった。しかし、計測期間中において、⑤最大空調負荷の実測値 45.9kW は図中で最も小さい値であり、会議室のように常時空調を使用しなくとも、設計時にはこの負荷を加えていたためこのような乖離が生じたと考えられる。

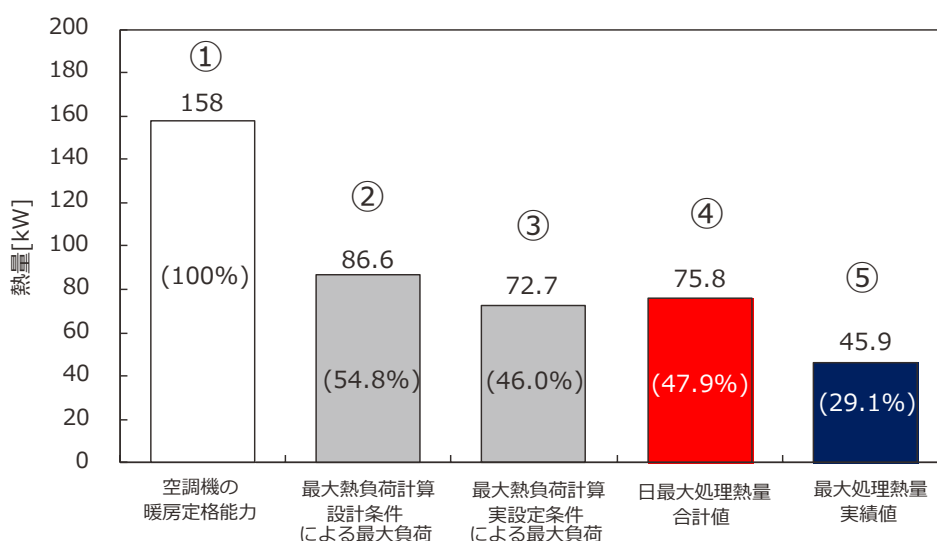


図 3-18 空調定格暖房能力と実測・負荷計算結果の比較

3.7 冷房期のエネルギー分析

3.7.1 空調機稼働状況

2013年8月4日（日）～10日（土）におけるACP-1およびACP-2の1, 2階執務室における室内機稼働状況を図3-19に示す。各室ともに業務時間である8:00～18:00に主に稼働しており、最大負荷となる昼間には執務室を中心に附室以外のほぼ全台数が稼働している。

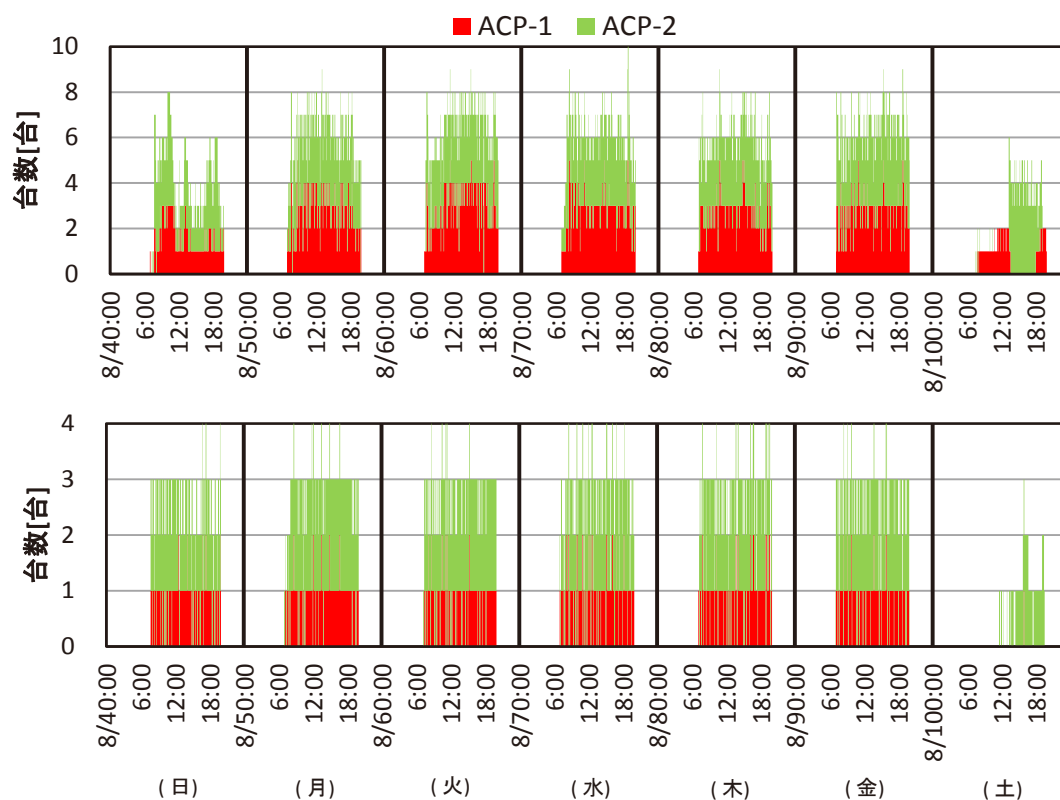


図 3-19 空調機稼働状況（上図：1階，下図：2階）

3.7.2 COP および負荷率の関連性

空調機の COP および負荷率の関係を図 3-20, 図 3-21 に示す。COP は暖房期と同様の手法で評価し、業務時間は平日の 8:00～18:00、それ以外を業務時間外とした。定格 COP は ACP-1 が 4.4, ACP-2 が 3.6 となっており、業務時間内平均の COP は ACP-1 が 3.6, ACP-2 が 3.1 であった。ACP-2 は負荷率の上昇に伴い COP は下降する傾向があり、高負荷率となる午後は外気温も上昇しているため、これらが COP 低下の原因と類推される。

また、両系統の業務時間における負荷率の出現時間を図 3-22 に示す。両系統とも定格能力に対する負荷率は数%～40%程度と低負荷での運転であった。ACP-1 では負荷率 10～25%での稼働時間が多く、ACP-2 では負荷率 20～30%での稼働時間が最も多かった。これは基本的に常時稼働している ACP-1 に比べ、ACP-2 は附室系統を空調範囲に含むため、一時的な高負荷処理によるものと考えられる。

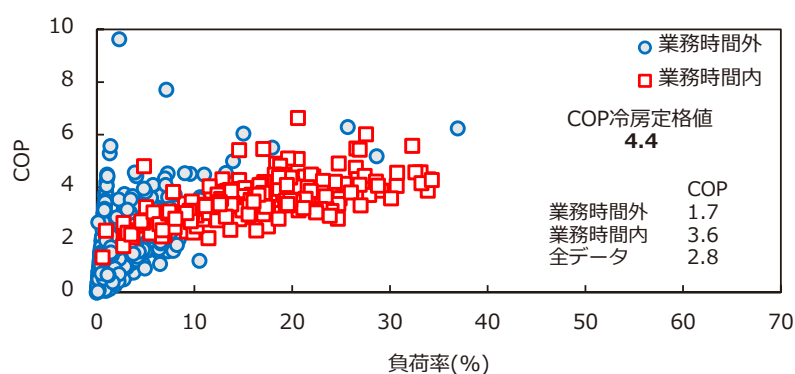


図 3-20 COP と負荷率の関係 (ACP-1)

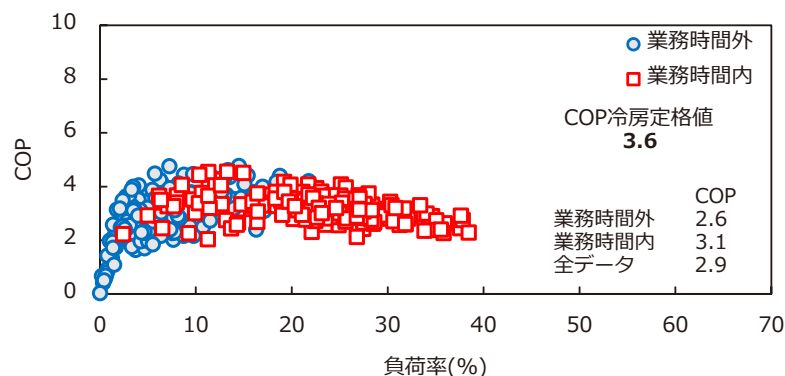


図 3-21 COP と負荷率の関係 (ACP-2)

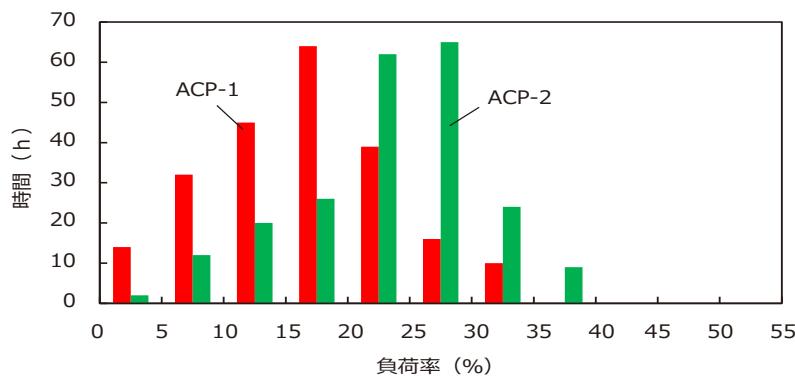


図 3-22 冷房期における負荷率出現時間

3.7.3 空調負荷率の最大値

業務時間内の各系統の負荷率の最大値を図 3-23 に示す。これらは 3.6.2 節と同じく各部屋の最大値を積算しており、ACP-1 では 41.6%，ACP-2 では 48.6% となり、いずれも現状の空調機冷房定格能力の半分以下となった。また、測定期間内で最高外気温 35.2℃を記録した 8 月 7 日における各系統の負荷率の日変動を図 3-24 に示す。

ACP-1 は最大負荷率が 34.0%，ACP-2 は 31.9% であった。なお、気温は空気調和衛生工学会の TAC 法の日最高気温 33.2℃を 2℃ほど上回っていた。

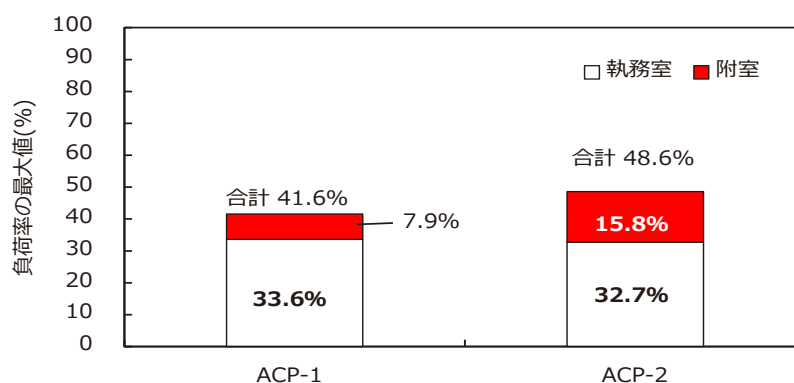


図 3-23 冷房期における負荷率の最大値

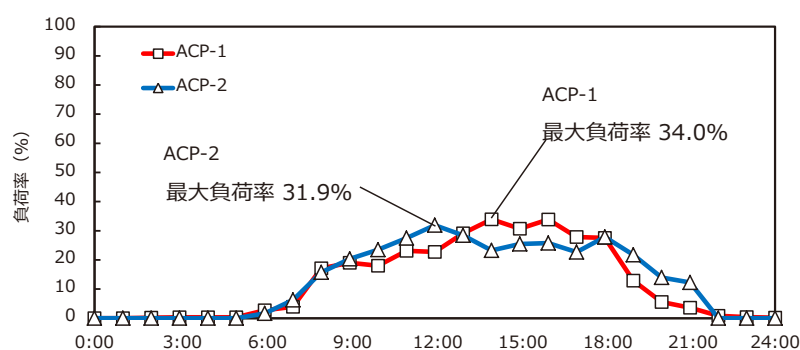


図 3-24 最高外気温日における日負荷率変動

3.7.4 最大空調処理熱量に関する検討

空調処理熱量について、下記の 5 パターンを比較したものを図 3-25 に示す。

- ①空調機の冷房定格能力
- ②設計条件負荷計算結果（26℃，50%RH）
- ③実設定条件負荷計算結果（温度と相対湿度を実測値の平均値：28℃，60%RH，その他の条件は②と同等）
- ④各対象室の日最大処理熱量の合計値
- ⑤最大処理熱量の実測値（各対象室の処理熱量合計値の日最大値）

②設計時の空調負荷計算結果は 138.1kW であることから、空調機選定時には ACP-1，2 の合計で②の能力を満たす最小の空調機容量となる①冷房定格能力 152kW を有する機器が選定されている。しかしながら④最大処理熱量の合計値は 69.9kW であり、①と④を比較すると半分以下の 46.0%となった。この乖離の原因として、節電要請からクールビズが徹底され、室内温度設定値の緩和により設計時の設定温度よりも空調設定温度が高くなっていることや、各執務室に設置してある全熱交換器のうち半数（1 階 2 台，2 階 1 台）を停止し換気量を絞って運用をするように指示されていたという使用条件による原因があげられる。

加えて空調機の選定時における型番の選択や設計時に想定している機器発熱の定格発熱量と稼働時の実発熱量との差異などの設計時の安全率があることも理由の一つと考えられる。そのため設計用の最大熱負荷計算において、測定時の温度・湿度を計算条件とした③実設定条件で計算を実施すると、118.8kW となる。しかしながら、各部屋の最大値の和である④と比較しても大きな値となっている。⑤における単位面積当たりの空調処理熱量は、76.3W/m²であり、設計時に参照される簡易計算法の単位熱量と比較してもまだ小さい値となる。

これらの結果から、設計時の温度および湿度の設定値のみならず、人員数、機器発熱、電灯の使用状況などについても実態を反映することで、最大熱負荷計算の結果を実測による最大処理熱量に近い値にできる可能性が示唆された。

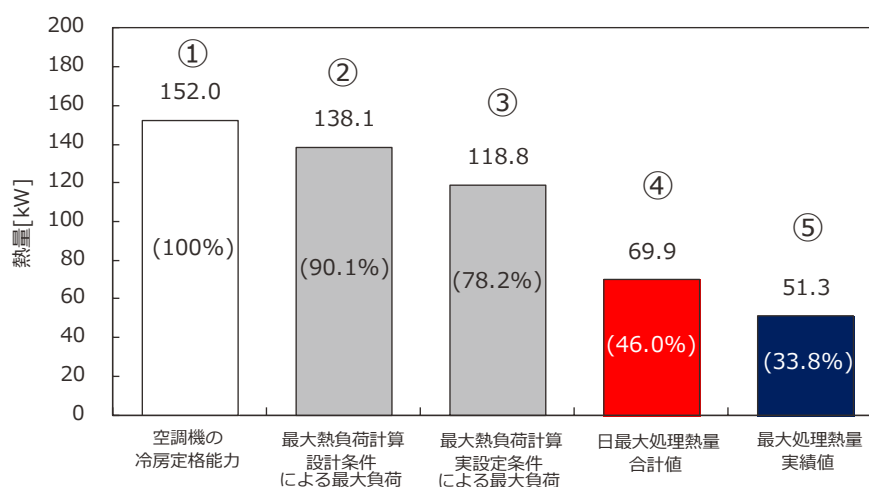


図 3-25 空調定格冷房能力と実測・負荷計算結果の比較

3.7.5 電灯電力量の設計値と実績値

機器発熱負荷の乖離の原因を確認するために、一例として空調設計時の電灯点灯条件と電灯電力量の実測結果を図 3-26 に示す。

ここで示す電灯電力量は、照明とコンセント負荷の和を表しており、図中の最も細く多数ある線は平日の電灯電力量を表している。夜間は消灯しているためベースとして発生している電力量は照明以外の 24 時間系のサーバや保守関連の OA 機器等の電力量と考えられる。業務時間中の電灯電力量はこれらのベース電力量を差し引いても、与条件の半分程度であることが分かる。これらの要因として、設計時点では OA 機器を定格消費電力で付与していたことによる、実運転状況での消費電力との乖離が考えられる。

また、与条件である昼休み時間帯の電灯電力量の減少も実績では明確には表れておらず、実状との乖離が示唆された。

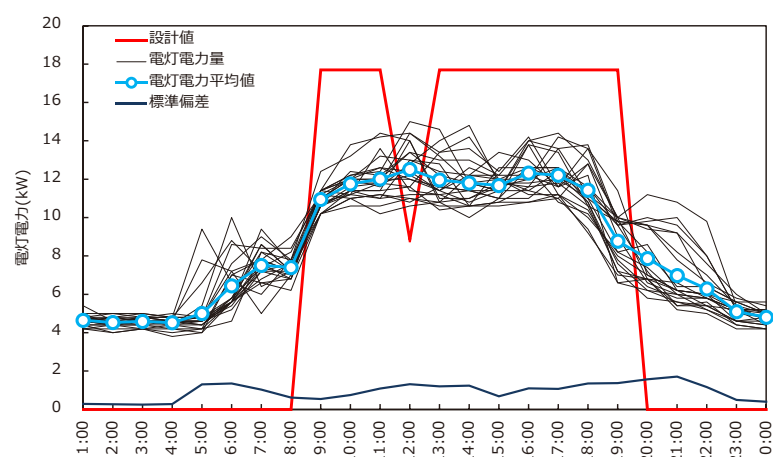


図 3-26 電灯電力量の設計条件と実績

3.8 まとめと今後の課題

本章では、ビル用マルチパッケージ空調機を採用した小規模事務所建物において室内機台数等の観点から計測が困難とされる空調処理熱量を室内エンタルピー法で計測し、暖房期および冷房期における各対象室の空調処理熱量や負荷率、ピーク時の最大処理熱量等から空調負荷の性状を明らかにし、以下の知見を得た。

- 1) 実測結果から、室内温度の実測値は、設計値と比較して暖房期には低く、冷房期には高い値となっており設計条件の温度設定ではなく、節電施策等による温度設定の変更状態で運用が継続されていることが確認された。このような条件下で、暖房期においては、空調処理熱量は空調機の暖房定格能力 158.0kW に対して、最大処理熱量の実測値は 45.9kW となり既設の空調機熱源容量と比べ大きな乖離があることを確認した。
- 2) 冷房期においても空調処理熱量は空調機の冷房定格能力 152.0kW に対して、最大処理熱量の実測値は 51.3kW となり、空調機の冷房定格能力が過大であることを示した。併せて、計測期間中の最暑日において熱源が 30%程度の低負荷率で稼働していることを明らかにした。
- 3) CO₂ 濃度については、暖房期・冷房期共に概ね衛生管理基準内にあり、環境維持に必要な外気導入が確保されていることを確認した。
- 4) 既設の空調機熱源容量と最大処理熱量の実測値における乖離の原因は、設計時の空調負荷の与条件の差異や空調負荷計算時における安全率等によることが示唆され、本章で対象とした建物においては空調機熱源容量が半分以下でよいという結果になった。原因としては、業務時間中において人員が出入りすることが多く人員数が与条件の半分にも満たないこと、人員数に比例する換気量が過大であること、OA 機器などの発熱量が稼働状況や定格消費電力量を採用していることなどが挙げられ、想定よりも負荷が少ない状況であったことが考えられる。

以上の結果より、実稼働状態での必要空調能力の乖離状況を踏まえ、エネルギー低減に向け合理的な設計をする必要があると考えられ、本章では下記の提案を実施する。

- 1) 設計時における合理化
 - ・使用条件は最大値ではなく実稼働状況に近い条件を考慮する。(使用する人員などは最大値ではなく、適正な低減率を加味する。)
 - ・OA 機器の発熱量については、技術革新により低減される傾向にあるため、最新の運用状態の機器発熱量を与条件として与える。
- 2) 機器選定時における合理化
 - ・各部屋の同時使用率を加味し熱源容量の低減を考慮する。
 - ・省エネに向け空調機の効率と負荷率とを考慮した設計とする。

今後はこれらと同様の計測を行うことで設計データを整備し、規模や用途、冷暖房のバランスに応じた合理的な設計が行えるように継続的な調査等を実施することとしたい。

本章に関する既往発表文献

審査付き論文

- 3-a) 天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，田島昌樹：小規模事務所建物における空調設備の稼働実態に関する基礎的研究 ビル用マルチパッケージ空調機を採用した事例検討，日本建築学会環境系論文集，第 729 号,2016.11

口頭発表

- 3-b) 天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，河田浩太郎，堅田大貴，橋田智和，田島昌樹，南部佑輔：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その 1）測定時の温熱環境，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
- 3-c) 河田浩太郎，天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，橋田智和，田島昌樹：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その 2）測定時の温熱環境，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
- 3-d) 堅田大貴，天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，橋田智和，田島昌樹：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その 3）暖房期の実測に基づくエネルギー評価，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
- 3-e) 南部佑輔，天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，橋田智和，田島昌樹：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その 4）冷房期の実測に基づくエネルギー評価，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
- 3-f) 天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，田島昌樹：節電要請下における中小規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（第 1 報）計測概要と室内温熱環境分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2014
- 3-g) 堀岡建吾，天野雄一郎，安岡稔弘，田島昌樹：節電要請下における中小規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（第 2 報）暖房期および冷房期の実測にもとづくエネルギー評価，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2014
- 3-h) 堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，橋田智和：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その 1）計測概要と冬期実測結果，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
- 3-i) 堅田大貴，永田竜弥，堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，橋田智和：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その 2）夏期の実測に基づく検討，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
- 3-j) 南部佑輔，堀岡建吾，天野雄一郎，田島昌樹，安岡稔弘，堅田大貴：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その 3）空調時における空気室の評価，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 3-k) 堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，南部佑輔，堅田大貴：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その 4）冷房時における評価，日本建築学会四国支部研究報告集，2015

参考文献

- 3-1) エネルギー経済統計要覧，日本エネルギー経済研究所，2012
- 3-2) 国土交通省：土地情報総合ライブラリー 土地基本調査
[http:// tochi.mlit.go.jp/shoyuu-riyou/kihon-chousa](http://tochi.mlit.go.jp/shoyuu-riyou/kihon-chousa),2014.12.10 参照
- 3-3) 松下直幹，李霽憲，吉田健一，赤司泰義他：空調用熱源システムの部分負荷運転制御法の開発と導入効果の検証，空気調和・衛生工学会論文集，No.164,2010.11
- 3-4) 藤木洋徳，岡克己，植田浩文，後藤祥仁：中小規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践 Y ビルにおける事例，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2009.9
- 3-5) 中嶋俊介，植田浩文，岡克己，後藤祥仁：中小規模オフィスビルに適した省エネルギー設計の実践（第2報）Y ビルにおける省エネルギー効果の検証，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 3-6) 天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（第1報）通信機械室の空調環境と機器発熱の実態把握，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2012.9
- 3-7) 宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿，天野雄一郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（第2報）通信機械室の空調省エネポテンシャルの試算，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2012.9
- 3-8) 浦山真一，赤司泰義，姜信愛，小塩真奈美他：業務用建築のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究（その11）事務所建物（九州地区）における内部発熱に関する調査結果，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 3-9) 山田恭輔，清水拓，野部達夫：プローブ挿入法によるマルチパッケージ型空調機の運用実態調査，空気調和・衛生工学会論文集，No.193,2013.4
- 3-10) 宮田征門，吉田治典，辻忠男，湯川求他：業務用建築のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究（その5）個別分散型空調システムの実稼働状態における入出力特性計測手法に関する検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 3-11) 上野嘉夫，吉田治典，宮田征門，辻忠男他：業務用建築のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究（その6）個別分散型空調システムの実働特性分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 3-12) 気象庁：過去の気象データ検索
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>,2014.10.10 参照
- 3-13) 厚生労働省：建築環境衛生管理基準
<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10>,2014.12.10 参照
- 3-14) 建築設備技術者協会:MICRO-PEAK/2000
- 3-15) 空気調和・衛生工学会（第13版）空気調和・衛生工学会,2001.11 和・衛生工学便覧3 空気調和設備編，（社）
- 3-16) 業務用建築のためのエネルギー消費実態に関する評価研究
http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h23/pdf/bri20120309_txt13.pdf,2015.7.6 参照
- 3-17) 赤井仁志，草刈洋行，奥野敏彦，山田俊郎，大子田誠也，瀬川和幸，二宮秀與，西山尚弘，長野克則，葛隆生：内部発熱の減少が熱負荷とヒートポンプ消費電力量に与える影響，電気設備学会全国大会講演論文集，pp154-157，2016.9

第 4 章

電力供給に供する重要機器室における空調計画・運用手法の合理化

第4章

電力供給に供する重要機器室における空調計画・運用手法の合理化

4.1 はじめに

サーバ室や計算機室など代表されるような電子機器を設置している機械室においては、各機器で消費される電力量とそれに比例した発生熱量の処理に使用される空調設備のエネルギーがほとんどを占めていることが分かっている。昨今、高密度化が進んでいるデータセンターなどでは単位面積当たりの消費電力量の多さから、PUE（データセンターエネルギー効率）などの指標に表わされるように、空調設備に係るエネルギーを低減することは運用上の必須の課題であり、様々なエネルギー低減に向けた検討がなされている。しかし、データセンター以外の電子機器を設置している機械室においては、まだそのような検討がなされているとは言い難い。しかし、インフラ設備を維持管理している企業においては、サーバ以外に通信系、電力供給系、計算系等の機器室を設置していると考えられており、これらの施設で消費されているエネルギーはその規模面よりある程度の量があると推測される。

例えば、電力会社においては、電力供給を安定して行うために必要な各種の機器を設置した室を重要機器室と呼んでおり、給電網上の重要拠点として位置付けている。これには通信機械室や配電盤室、計算機室等が含まれるが、施設数自体が非常に多いうえ無人で運用されている施設も多いという実情がある。事業継続性の観点から、重要機器室の空調設備については安全性と冗長性（障害発生時後にシステム全体の機能を維持し続けられるようにバックアップ機器を備えること）を十分に確保した計画・運用がなされている。しかし、空調能力に余裕のある機器を複数台のバックアップ機器とともに設置する場合、熱負荷が小さい時期などにおいて負荷率が低い不安定で非効率な運転を行っている場合などが見受けられるため、重要機器室における空調設備においても、重要拠点としての事業継続性上の安全性を確保した上で、省エネ、省コストに向けた設計手法の確立や日常的な設備運用の合理化が求められている。

4.2 本章に関連する既往の研究

サーバ室や計算機室の空調稼働状況に関する既往の研究では、羽山らがデータセンターにおいて空調設備の省エネ施策に関する計測、検討を行った事例や、吉井らがサーバルームにおいて空調設備の運用改善を実施した事例、西田らが ICT 機器と空調設備の連動制御に取り組んだ事例などがあり、ある程度の空調設計・運用の合理化に関する指摘がなされている。

しかし、これに対して重要機器室の空調設備においては、運転中の重要機器に継続的に計測器を設置するリスクの回避や機器構成が多種多様であるため、また、事業継続性上の関係よりセキュリティ対策が施されていることなどから、機器発熱量や空調稼働状況について十分な調査や検討されているとは言い難い。

4.3 研究のフロー

重要機器室の空調計画においては、最も厳しい気象条件かつ機器発熱量の最大値に基づき空調負荷計算を実施し、空調設備能力を決定していることが多い。この結果、通常の運転時には空調能力が過大となり、仮にインバータ機を採用した場合でも能力を絞りきることができずに発停を繰り返し非効率な運転となることで空調エネルギーが増大することが懸念されている。このため、計画時において実状に即した機器発熱の性状を把握する必要があるが、その裏付けとなる実施設における機器発熱量や空調設備の運転状況、空調処理熱量等についての詳細な計測事例はほとんどない。

本章では、空調室内機の処理熱量から機器発熱量を算出する簡易推定方法を提案し、実測に基づき手法の精度を検証する。そして、これまで明らかにされていなかった重要機器室の空調稼働状況等について計測による実態把握を行い、設計・運用の合理化に資する機器発熱量等に関する情報を整備する。さらに、手法を様々な四国電力管内の重要機器室に適用し空調負荷特性を分析したうえで、その低減効果の一事例として四国電力管内における試算を行う。

図 4-1 に研究フローを示す。

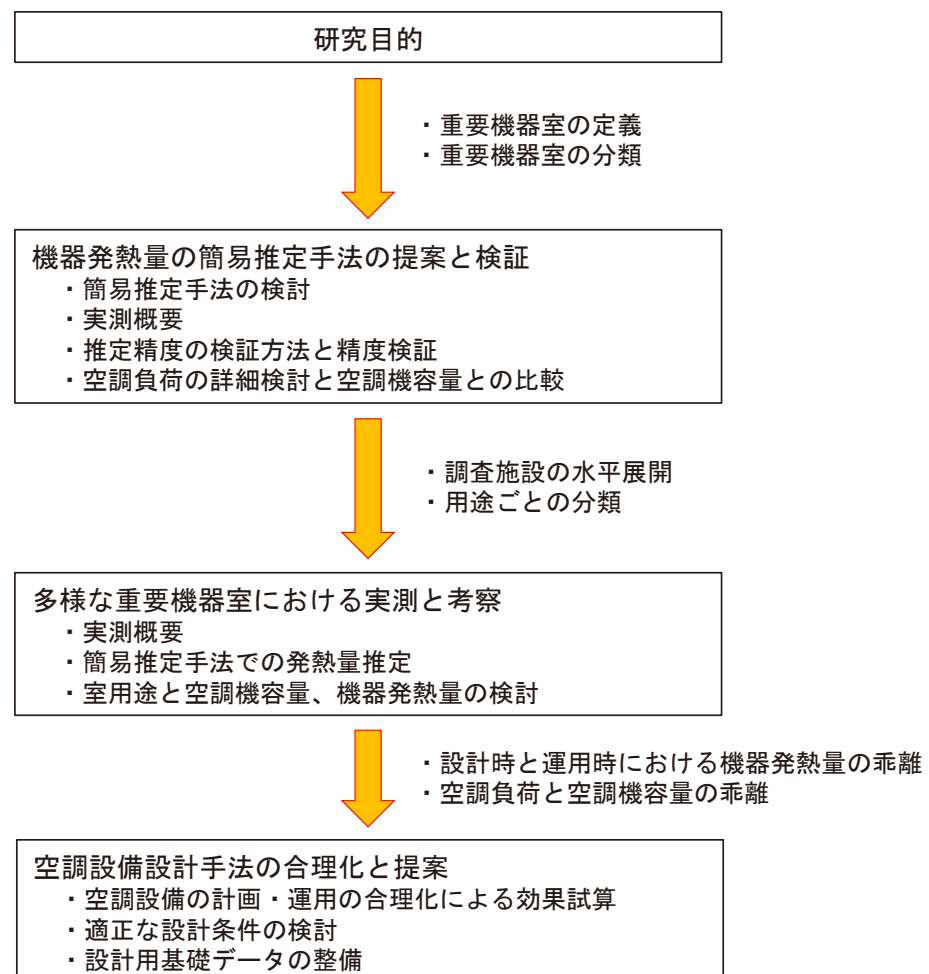


図 4-1 研究フロー

4.4 重要機器室の定義と分類

4.4.1 重要機器室の定義

重要機器室とは、電力会社の事業継続性上重要な拠点として位置づけられている重要機器を設置している部屋のことを指し、通信機械室、整流器室、CVCF 室、計算機室、サーバ室、配電盤室、制御室等のことを重要機器室として定義する。また、聞き取り調査により、メンテナンスや保安上の理由により用途の違う機器類が同じ室に設置されることはごく稀であることや、規模的な違いがある場合でも設置される重要機器の種別は同様であることを確認している。

4.4.2 重要機器室の分類

解析を始めるにあたって、実施設の中から重要機器を設置している室を抽出し、電力供給網上における室用途や機器性状等から、「通信機械室」、「電源室」、「計算機室」、「配電盤室」の4つに用途分類を行ったうえで、調査、分析対象を選定する（写真 4-1）。

通信機械室は主に給電網における通信関係の機器（LAN 設備、マイクロ無線設備等）を設置している室。電源室は、変電設備や通信設備に関わる重要機器に非常時でも電源供給が可能な蓄電設備を抱えた整流器や CVCF（定電圧定周波数装置）が設置された室。計算機室は、指令室や系統制御所における給電に関わるサーバや電算機などが主として設置された室。配電盤室は、変電所のトランスなどを制御する機器が設置された室。この他、重要機器が設置されているが有人の給電指令室などは、対重要機器のみの空調設備ではないため、解析の対象からは除外することとした。

なお、空調設備は安全性の観点から、最大負荷計算法にて十分に余裕をみた与条件のもと算出された能力を満たし、かつバックアップを考慮した分散型の空調機を設置している。空調機は近年設置されたものは可変出力型のインバータ機が多く、それ以前の設備は出力一定の定速機とローテーション制御を組合せた空調機構成となっている。このため、低負荷時はインバータ機の下限を切る状態となり室外機が発停を繰り返す運転が散見される。



写真 4-1 重要機器の外観

4.5 機器発熱量の簡易推定手法の提案

4.5.1 簡易推定手法の検討

本章で対象とする重要機器室は「十分な日射遮蔽」、「常時無人、消灯」、「外気導入無し」、「建物断熱有り」という条件で運用されており、室内は年間冷房されている。以上の事から、熱負荷の構成要素は熱平衡の関係より式（4-1）のように表すことができる。

$$\begin{aligned} q &= q_s + q_L \\ &= q_{Ms} + q_{K1} + q_{K2} + q_L \end{aligned} \quad \cdots (4-1)$$

q : 空調負荷（全熱）[kW]

q_{Ms} : 機器発熱量（顕熱）[kW]

q_s : 空調負荷（顕熱）[kW]

q_{K1} : 外壁*1からの通過熱負荷（顕熱）[kW]

q_L : 空調負荷（潜熱）[kW]

q_{K2} : 内壁*1からの通過熱負荷（顕熱）[kW]

*1外壁は外気に接する部位、内壁は他の室内空間に接する部位を示す

機器発熱量の推定には直接電流を計測し消費電力量から推定する手法（以下手法①）がある。しかし、重要機器は常時稼働しており、重要機器の電気系統が多岐にわたり複雑であること、安全性の確保など測定時の制約が大きいことなどから、手法①は困難であることが多く、本研究では空調機の処理熱量から機器発熱量を簡易推定する方法（以下手法②）を提案する。

式（4-1）において、外壁、内壁ともに温度差が 0K の場合には、 $q_{K1}=0$ 、 $q_{K2}=0$ および「外気導入が無い」条件より $q_L=0$ と仮定できるため、式（4-1）は $q=q_s=q_{Ms}$ となる（図 4-2）。しかし、室内エンタルピー法による熱量推定は測定誤差が懸念されることや、実測が長期にわたることから室内外の諸条件が変動する可能性があるが、本章では機器発熱量のデータの蓄積を目的としているため、手法②による検討を進めることとした。

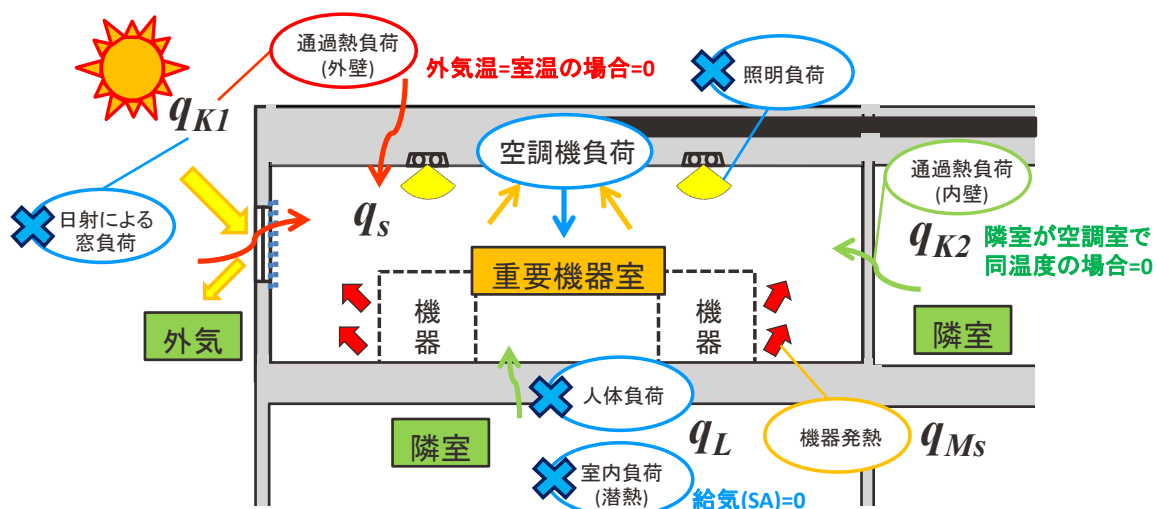


図 4-2 重要機器室における熱平衡式のイメージ

4.5.2 簡易推定手法の検討に向けた実測概要

簡易推定手法の推定精度を検証するため、香川県に位置する建物 A の計算機室において詳細な分析を実施した。対象室概要を表 4-1 に示す。実測項目は、室内温湿度、室内機温湿度（還気および給気）、排熱温湿度、外気温湿度、隣室温湿度、空調機電力量とした。温湿度の測定にはおんどとり（T&D 社製：RTR-53A）、電力消費量の測定には電力量計（HIOKI 社製：3169）を用いた。計測間隔は 10 分とした。測定項目を表 4-2 に示す。

また、測定期間中は、設定温度および室内機の風量は常時一定の設定とした。平面図と測定位置図を図 4-3 に示す。

表 4-1 計算機室の概要

建物	地域	対象室	実測期間	床面積[m ²]	機器面積[m ²]	設定温度[℃]	空調機容量×台数
A	滝宮	計算機室	8/1～8/26	56.3	19.6	23	11.2kW×3台 (常時1台停止)
			1/20～2/1				

表 4-2 計算機室の計測項目

測定項目	測定箇所
室内温湿度[℃・%RH]	16点
排熱温湿度[℃・%RH]	3点
隣室温湿度[℃・%RH]	2点
外気温湿度[℃・%RH]	1点
空調機吹出吸込温湿度[℃・%RH]	3か所

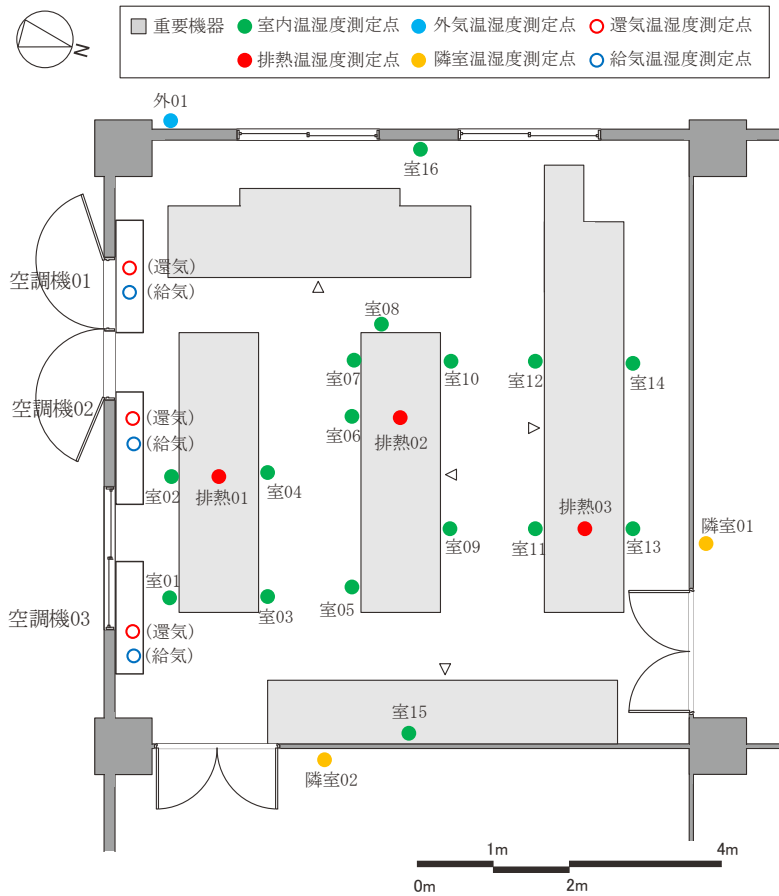


図 4-3 計算機室の平面図と測定位置図

4.5.3 機器発熱量の推定精度の検証方法

実測データから、前節の式（4-1）の構成要素毎に空調機の処理熱量や室内外温度差について精査し、空調負荷の特性を分析した。本章では各要素についての実測結果をもとに、周期的な定常式と仮定し、分析には1日の平均値を用いた。室内外温度差 $\Delta\theta_o$ は下記に示す式（4-2）より実測に基づき、各条件における空調負荷への影響度を確認するため、 $\Delta\theta_o = 0\text{K}$ の条件以外に、 $\Delta\theta_o$ が夏期実測時の平均室内外温度差 $\Delta\theta_{o\text{ave}}$ 、 $\Delta\theta_o$ が夏期実測時の最大負荷発生時の実測値 $\Delta\theta_{o\text{max}}$ の3条件を設定した。

$$\Delta\theta_o = \theta_o - \theta_{RA} \quad \cdots (4-2)$$

θ_o : 外気温度[K] θ_{RA} : 空調機の還気温度[K]

条件1 : $\Delta\theta_o$ が0 K（壁面の通過熱負荷が無い条件）

条件2 : $\Delta\theta_o$ が夏期実測時の平均室内外温度差 $\Delta\theta_{o\text{ave}}$

条件3 : $\Delta\theta_o$ が夏期実測時の最大負荷発生時の実測値 $\Delta\theta_{o\text{max}}$

4.5.4 機器発熱量の精度検証

手法②の条件下において、 $q = q_s = q_{Ms}$ となるため、式（4-3）の空調機の顕熱処理熱量 q_s から機器発熱量 q_{Ms} を推定する。

$$q_s = G \times (h_{RA} - h_{SA}) / 3600 \quad \cdots (4-3)$$

q_s : 顕熱処理熱量[kW] RA : 還気

G : 質量流量[kg/h] SA : 給気

h : 比エンタルピー（顕熱のみ）[kJ/kg]

実測期間における顕熱処理量と室内外温度差の関係を図4-4に示す。また設定した室内外温度差 $\Delta\theta_o$ のそれぞれの条件における顕熱処理熱量 q_s の計算結果を表4-3に示す。なお、空調室内機の風量測定は困難であり更新後の経年が比較的少ないため風量を定格風量とし、質量流量に換算し処理熱量の演算に使用した。

(1) 消費電力量による機器発熱量の推定（手法①）

既往の研究^{4b)}では重要機器の消費電力量は時間変動がほぼ無く一定であることが分かっている。手法①から算出した機器発熱量 q_{Ms} は9.57 kWであった。

(2) 顕熱処理熱量からの機器発熱量の推定（手法②）

手法②において、機器発熱量 q_{Ms} を式（4-4）より算出した。

$$q_{Ms} = q_s - (q_{K1} + q_{K2}) \quad \cdots (4-4)$$

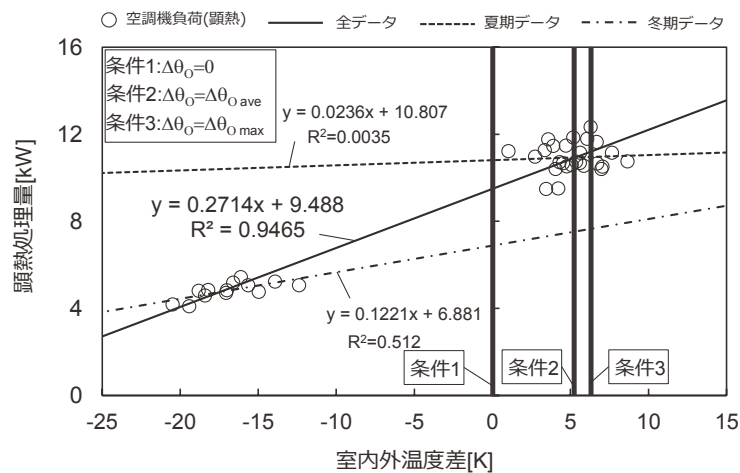


図 4-4 室内外温度差と顕熱処理量（日平均値）

表 4-3 室内外温度差における空調負荷（顕熱）

室内外温度差	顕熱処理熱量 q_s [kW]
$\Delta\theta_0$	9.49
$\Delta\theta_{0\text{ ave}}$	10.93
$\Delta\theta_{0\text{ max}}$	12.33

手法①と手法②より算定した機器発熱量を図 4-5 に示す。手法②より算定された機器発熱量のうち、手法①による機器発熱量と最も近い値となったものは室内外温度差 $\Delta\theta_0$ が 0 K の条件 1 における機器発熱量 q_{Ms0} であった。

なお、分析条件間の機器発熱量の最大差は 3.5% であった。また、図 4-4 に示すように夏期および冬期の両データで推定する方が、 θ_0 が 0 K の条件において機器発熱量をより正確に推定できることが示唆された。しかし、実設備においては長期間の計測が設計期間や保安上困難である場合が多いと考えられる。

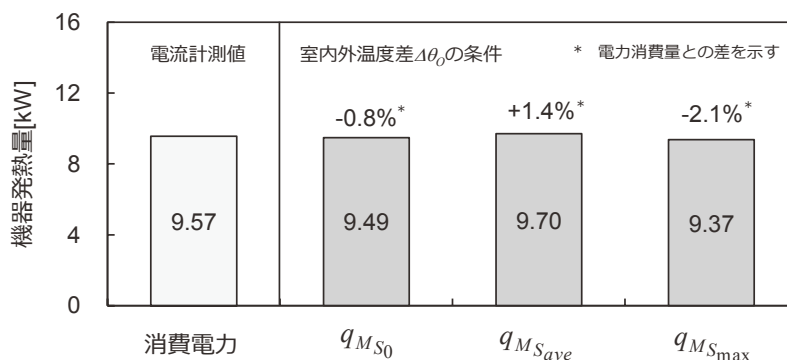


図 4-5 分析条件における機器発熱量の比較

4.6 空調負荷の構成に関する考察と実測値と空調機容量の比較

4.6.1 空調負荷（潜熱）の考察

重要機器における発熱は顕熱のみであるが，実測期間中の作業者の立入りやすきま風負荷などを原因とする潜熱負荷が生じていたことも考えられるため，空調負荷（潜熱） q_L について検討を行った。算出式は，式（4-5）～式（4-7）とし，顕熱比を図 4-6 から求めた。なお，冷媒が動いていない（冷却コイルが動いていない）と考えられる条件（湿度が変化せず，温度が 2℃近く上昇している条件）と立ち上がりのような処理熱量の計算値が異常と考えられる条件を除いて顕熱比を算出した。

この結果，実測期間における建物 A の計算機室の空調機の処理熱量の顕熱比は 90.8%であった。つまり，空調負荷においては潜熱がおおよそ 9%含まれるという結果となったが，顕熱の方が支配的であるため，簡易推定手法上では，手法②において $q_L=0$ とすることとした。

$$q : h = 1.006 \cdot \theta + x \times (2501 + 1.86 \times \theta) \quad \cdots (4-5)$$

$$q_S : h = 1.006 \times \theta + 1.86 \times \theta \times x \quad \cdots (4-6)$$

$$q_L : h = 2501 \times x \quad \cdots (4-7)$$

h : 比エンタルピー [kJ/kg]

θ : 湿り空気の温度 [K]

x : 湿り空気の絶対湿度 [kg/kg]

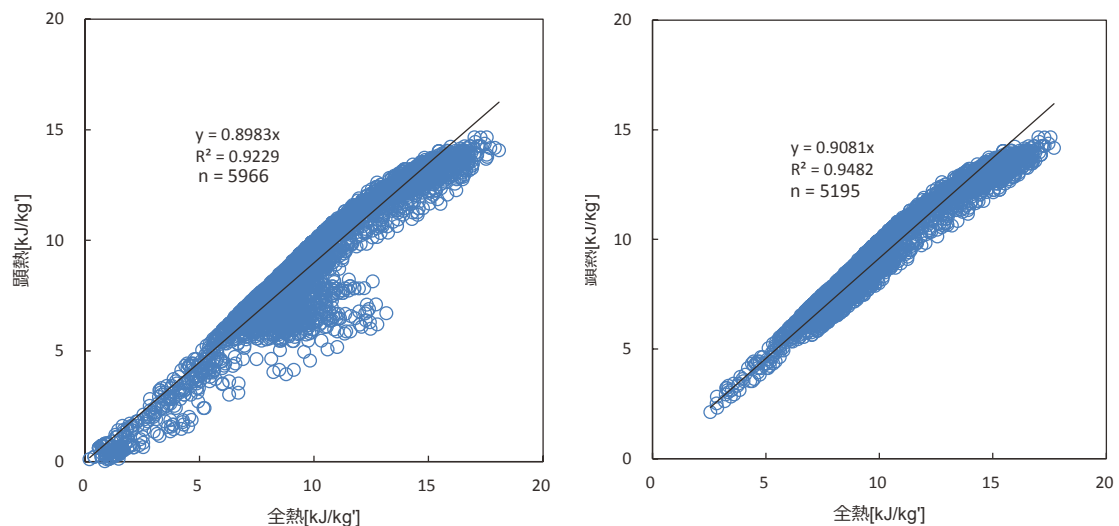


図 4-6 計算機室における空調機処理熱量の顕熱比
(左：データ処理前 右：データ処理後)

4.6.2 内外壁の通過熱負荷（顕熱）の考察

外壁からの通過熱負荷 q_{K1} は式 (4-8) を用いて算出した。

$$q_{K1} = \Sigma U \cdot A \cdot H \cdot \Delta\theta \quad \cdots (4-8)$$

A : 壁体の面積[m²] $\Delta\theta$: 室内外温度差[K]
 U : 壁体の熱通過率[W/(m²・K)] H : 温度差係数 (H=1.0)

なお、設計図書より $\Sigma U \cdot A \cdot H = 0.156$ kW/K であった。各条件における外壁からの通過熱負荷を算出した結果を表 4-4 に示す。

表 4-4 室内外温度差における外壁からの通過熱負荷

室内外温度差	外壁からの通過熱負荷 q_{K1} [kW]
$\Delta\theta_o$	0
$\Delta\theta_{o\ ave}$	0.804
$\Delta\theta_{o\ max}$	1.928

また、式 (4-9) より内壁からの通過熱負荷 q_{K2} を算出した。

$$q_{K2} = \Sigma U \cdot A \cdot H \cdot \Delta\theta_N \quad \cdots (4-9)$$

なお、設計図書より $\Sigma U \cdot A = 0.278$ kW/K であった。表 4-5 に室内外温度差 $\Delta\theta_N$ を $\Delta\theta_o$ 、温度差係数 H を空調機が連続運転であることを考慮し 0.3 と設定した場合における内壁からの通過熱負荷を算出した結果を示す。また冬期の実測結果では $\Delta\theta_{N\ ave}$ は -3.2 K となり q_{K2} は -0.890 kW となった。どの条件下においても、内壁および外壁から流入する熱量に比べ機器発熱量が支配的であることを確認した。

表 4-5 室内外温度差における内壁からの通過熱負荷

室内外温度差	内壁からの通過熱負荷 q_{K2} [kW]
$\Delta\theta_o$	0
$\Delta\theta_{o\ ave}$	0.428
$\Delta\theta_{o\ max}$	1.028

4.6.3 空調負荷の構成に関する考察

空調負荷の各構成に関して分析結果を図 4-7 に示す。外部からの通過熱負荷における熱授受は内壁側の表面温度と外壁の差で決まるが，手法②では，空調負荷から機器発熱量を算定する手法を取っているため， θ_{RA} を用いて外壁からの通過熱負荷を算出した。

その結果，室内外温度差を $\Delta\theta_o$ とした条件における空調負荷 q_{max} においてもその割合は約 14%となり，機器発熱量（顕熱）が過半以上を占める結果となった。また，室内外温度差における外気温度 θ_o の代わりに相当外気温度 SAT を用いて同様に検討を行ったが，外壁からの通過熱負荷の割合はほぼ同じであった。しかし，室内発熱のスポット的な影響等で内壁側の表面温度が均一でない場合は，サーモカメラなどを使い面的な分布を考慮するなどの詳細な分析が必要であると考えられる。

温度差係数 H を 0.3 と設定した場合の通過熱負荷の割合は約 8%となった。機器発熱量 q_{Ms} の割合は室内外温度差の各条件において空調負荷の過半を占めていた。また，方法②による機器発熱量の推定には，可能な限り夏期と冬期を含むような実測が望ましいと考えられる。

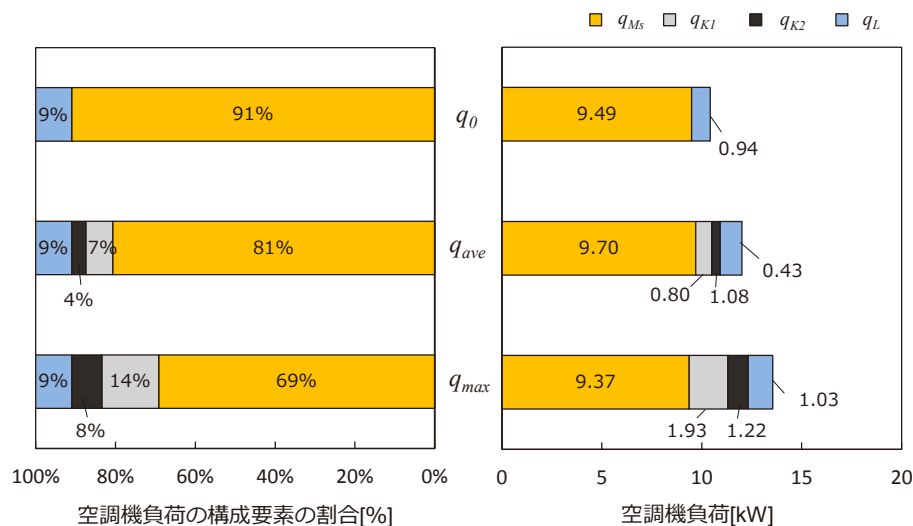


図 4-7 空調負荷と構成要素の割合（室内外温度差= $\Delta\theta_o$ ）

4.6.4 空調負荷の実測値等と空調機容量の比較

重要機器室において機器発熱量は空調負荷の過半を占めることから、前節で述べたように空調設備の設計時においては正確な機器発熱量を把握することが重要となる。そのため、空調負荷の実測値、シミュレーション値、設計値、および空調機容量の比較を行った。

計算機室について「実測における機器発熱量 q_{Ms0} と空調負荷の最大値（以下、実測値）」、「実測値による機器発熱量 q_{Ms0} を設計容量算定用空調負荷計算プログラム」(MicroPeak)へ（以下、プログラム）入力し算出した最大空調負荷（以下、シミュレーション値）」、「空調設計の際に想定された機器発熱量とその値をプログラムに入力することにより算出された最大負荷（以下、設計値）」および空調機容量の和の比較結果を図 4-8 に示す。

この結果より、空調機容量と実測値には大きな差異がみられる。また、実測値とシミュレーション値においても最大負荷時に差が見られ、プログラムには安全率等の配慮がなされているためこれらが差異の原因となっている可能性が示唆された。

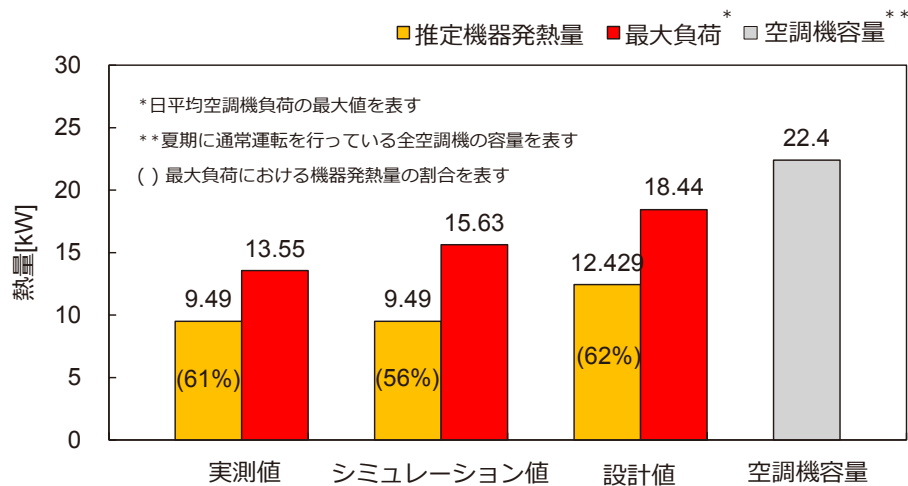


図 4-8 建物 A 計算機室における実測値、シミュレーション値、設計値、空調機容量の比較

4.7 多様な重要機器室における実測調査

4.7.1 実測対象室と実測項目

室の利用用途から 4.4 節と同様に「計算機室」、「通信機械室」、「配電盤室」、「電源室」の 4 種類として用途別に類型化し、実測対象室の選定を行う。2014 年当時、四国電力管内には、763 室の重要機器室が存在しており、この中から室の規模等を勘案し、A～E の 5 建物 10 室を計測対象として選定した。実測対象室の概要を表 4-6 に示す。

表 4-6 実測対象室の概要

建物	地域*	対象室	実測期間	床面積[m ²]	機器面積[m ²]	空調機容量×台数
A	滝宮	計算機室	8/1～8/26	56.3	19.6	11.2kW×3台
			1/20～2/1			
B	多度津	通信機械室	7/30～8/17	106.9	20.5	7.1kW×4台
C	西条	通信機械室	9/17～10/7	73.6	8.9	7.1kW×3台
		電源室		46.5	2.4	4.0kW×3台
D	松山	配電盤室	10/15～11/3	462.7	88.4	8.0kW×9台
		通信機械室		115.2	28.7	11.2kW×2台
		電源室		59.9	7.1	5.0kW×2台
E	徳島	配電盤室	9/11～10/2	169.7	31.3	7.3kW×2台
						4.7kW×1台
		電源室		71.6	12.6	23.6kW×5台
		計算機室		106.5	18	16.0kW×5台

4.7.2 室用途ごとの室数および延床面積の推定

四国電力管内の多数ある重要機器室については、空調機器の取り換え時期等を迅速に把握するために、予め各室に設置された空調機器の型番・製造年・冷房容量等が記録されたリスト（以下、空調機器管理リストと呼ぶ）を作成し管理している。

本節では、空調機器管理リストに記載されている全 763 室について、それぞれ、室の用途の分類と、延床面積の推定を行う。まず、用途区別については、室の利用用途から、4.4.2 節にて述べた「計算機室」、「通信機械室」、「配電盤室」、「電源室」に分類した。重要機器室の各種類別の割合を図 4-9 に示す。

空調機器管理リストには、設置されている空調機器の容量（空調能力）は記載されているが、必ずしも当該設置室の面積は記載されていない。しかし、空調設計時には当該室の床面積や室内発熱から最大熱負荷を算出し、それを元に空調機的能力を決定しているため、既存室の空調機容量と床面積に相関があることは容易に想像できる。

そこで、各室用途に対して数室ずつではあるが、室面積と、室に設置されている空調機器の関係を表 4-7 に整理した。本整理結果は、現状の重要機器室を分類し、その特徴を把握するために行った空調設備に関する事前調査の結果である（以下、詳細分析リスト）。

図 4-10 に、詳細分析リストの各室に対して、室の冷房容量と床面積の関係を示す。ばらつきは大きいですが、計算機室、電源室は床面積あたりの冷房容量が大きく、配電盤室、通信機械室では小さくなっており、室の特性によって冷房容量が異なっていることが分かる。

ここでは、冷房容量と床面積の関係を表 4-7 における比例式で表し、冷房容量が既知の際の室面積を求める。

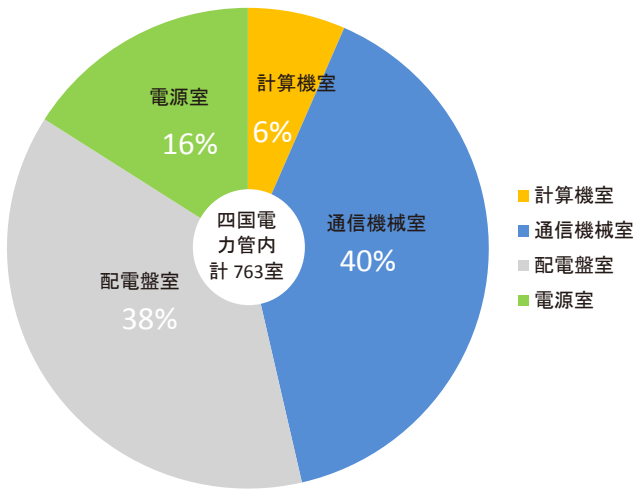


図 4-9 四国電力管内における重要機器室の室種別割合

表 4-7 詳細分析リストの室数と比例係数

室分類	室数	比例係数a (冷房容量[kW]=a×室面積[室])
計算機室	6	0.908
通信機械室	10	0.219
配電盤室	17	0.245
電源室	12	0.649
計	45	—

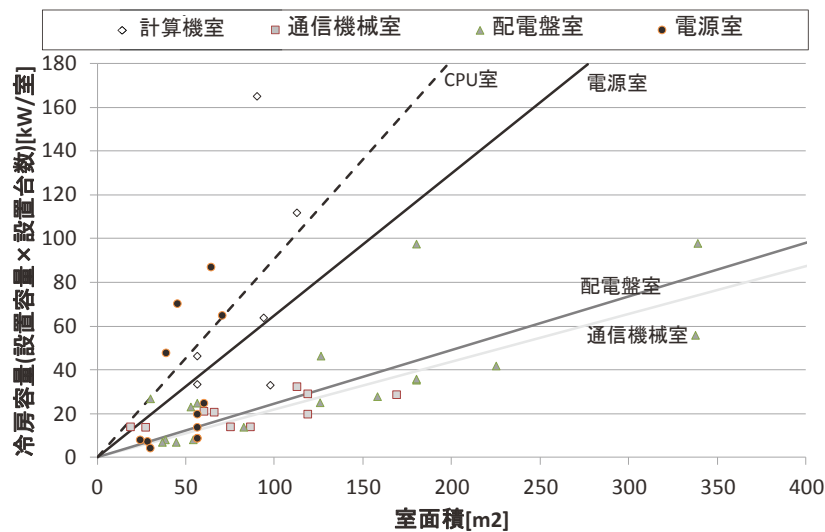


図 4-10 室の冷房容量と床面積の関係

上記の関係式を用いて、空調機器リスト記載の各室に対して、床面積を算出した。ただし、763 室中 82 室については、空調設備能力などの情報が不足しており、室面積が算出できなかった。室用途については分類できるため、それらの室については、各室種類の平均延床面積を当該室の延床面積としてカウントしている。

図 4-11 に室用途別の室ごとの延床面積の分布を示す。ばらつきはあるものの、室面積の平均値は通信機械室が約 60 m²、その他の室が 81-84 m²であり、妥当な推定結果であるものと判断した。

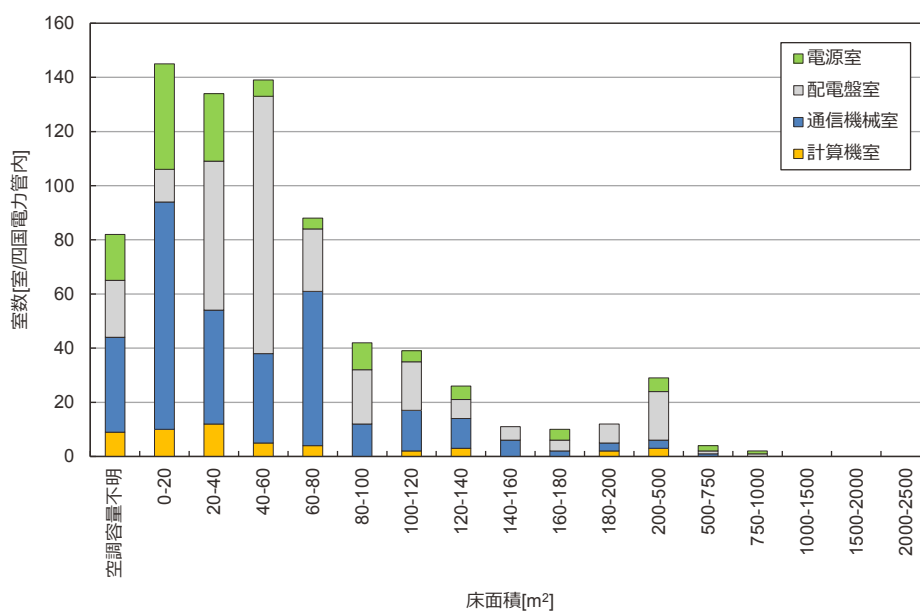


図 4-11 各室用途別の床面積の分布

室用途別内での A～E 建物の対象室 10 室の面積的な位置付けを図 4-12～図 4-16、面積詳細を表 4-8 に示す。

床面積について四国管内の平均値と比較すると配電盤室は多数の標準変電所の影響により低い値となっている。また、床面積に対する重要機器専有率は更新用のスペースが大きい場合低く算出されている。

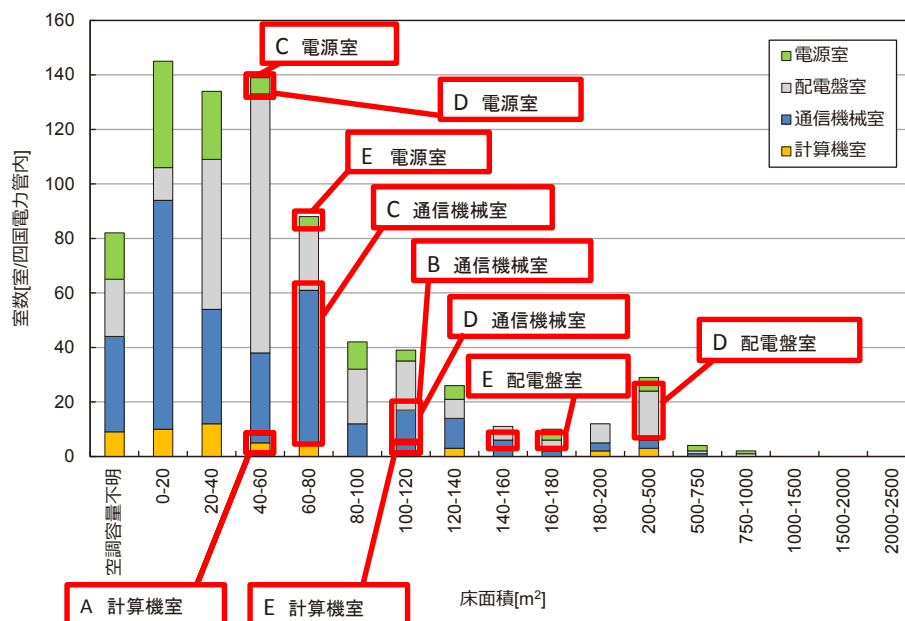


図 4-12 四国管内における重要機器室の室用途別床面積の分布

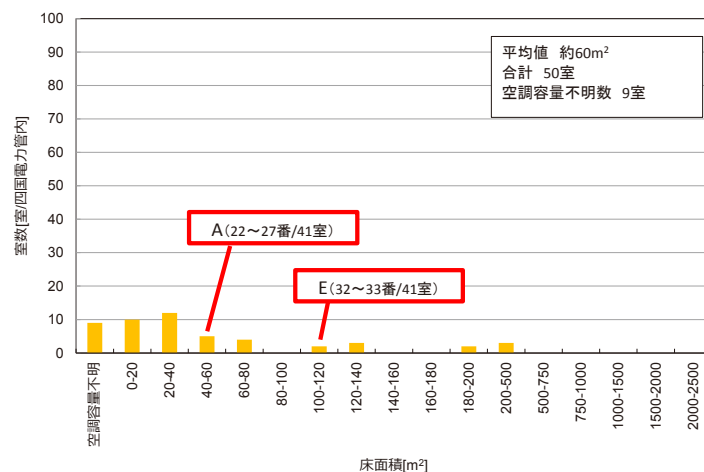


図 4-13 計算機室の床面積の分布

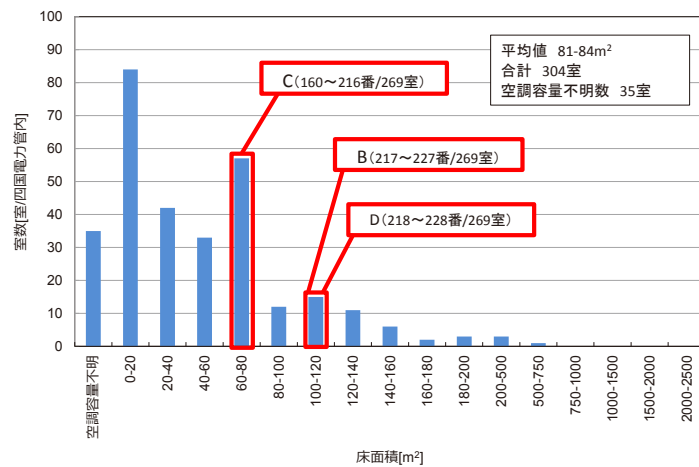


図 4-14 通信機械室の床面積の分布

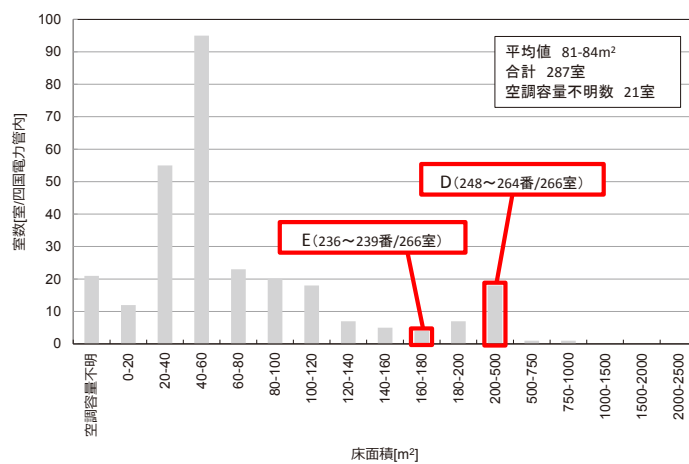


図 4-15 配電盤室の床面積の分布

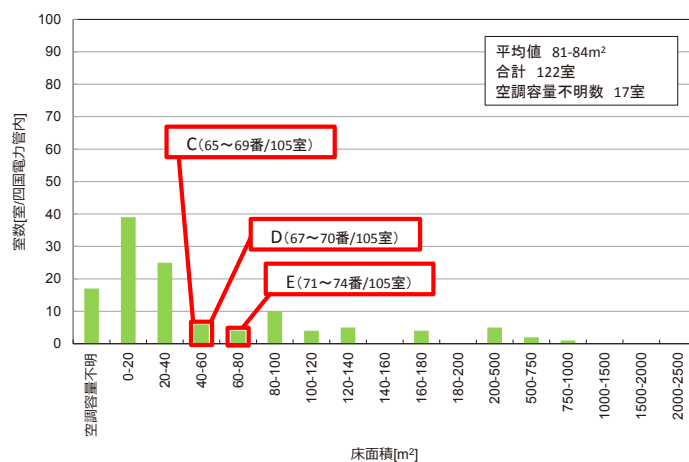


図 4-16 電源室の床面積の分布

表 4-8 実測対象室の面積詳細

室名	建物	①床面積 [m ²]	②平均床面積 [m ²]	③機器専有面積 [m ²]	④機器容積 [m ³]	⑤機器専有率[%] (③/①*100)
通信機械室	B	106.9	60	20.5	45.7	19.2
	C	73.6		8.9	19.2	12.0
	D	115.2		28.7	74.0	24.9
計算機室	A	56.3	82	19.6	25.8	34.8
	E	106.5		18.0	29.3	16.9
配電盤室	D	462.7	82	88.4	216.5	19.1
	E	169.7		31.3	78.3	18.5
電源室	D	59.9	82	7.1	14.8	11.9
	E	71.6		12.6	25.3	17.7
	C	46.5		2.4	4.5	5.3

B～E 建物の重要機器室の平面図と計測器設置位置を図 4-17～図 4-25 に示す。なお、建物 A に関しては前節の図 4-3 に示した。

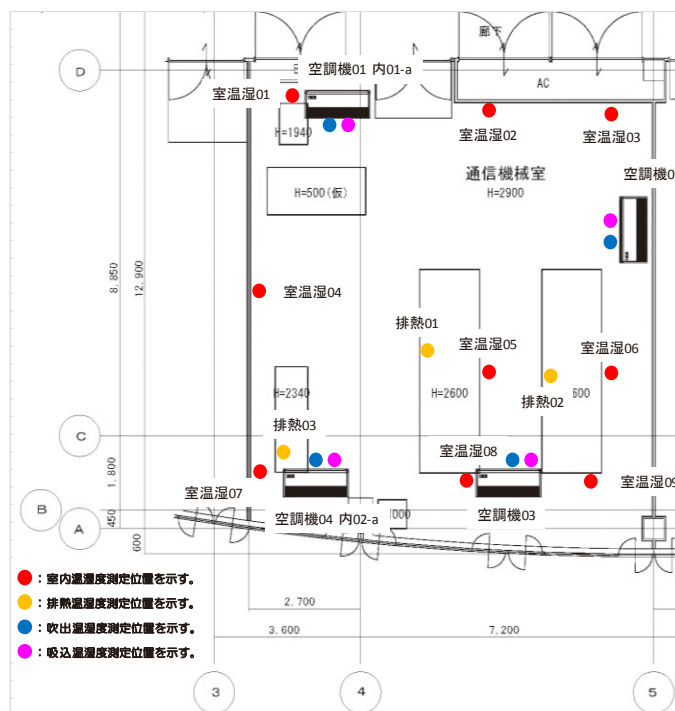


図 4-17 B 建物の通信機械室の平面図と計測器設置位置

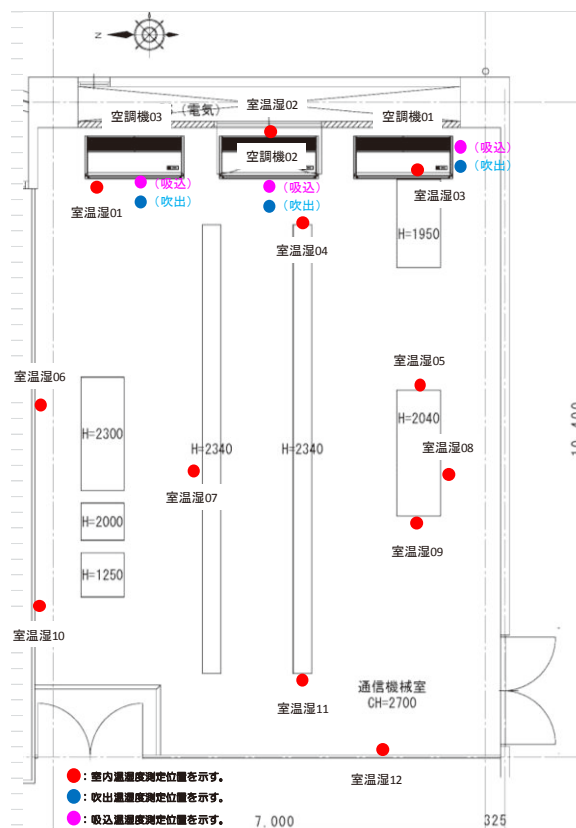


図 4-18 C 建物の通信機械室の平面図と計測器設置位置

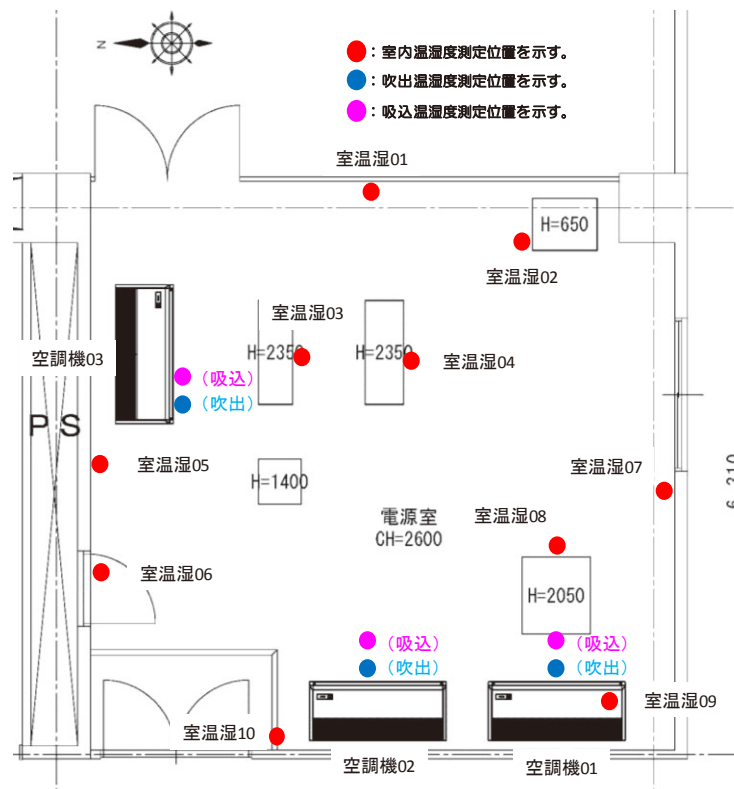


図 4-19 C 建物の電源室の平面図と計測器設置位置

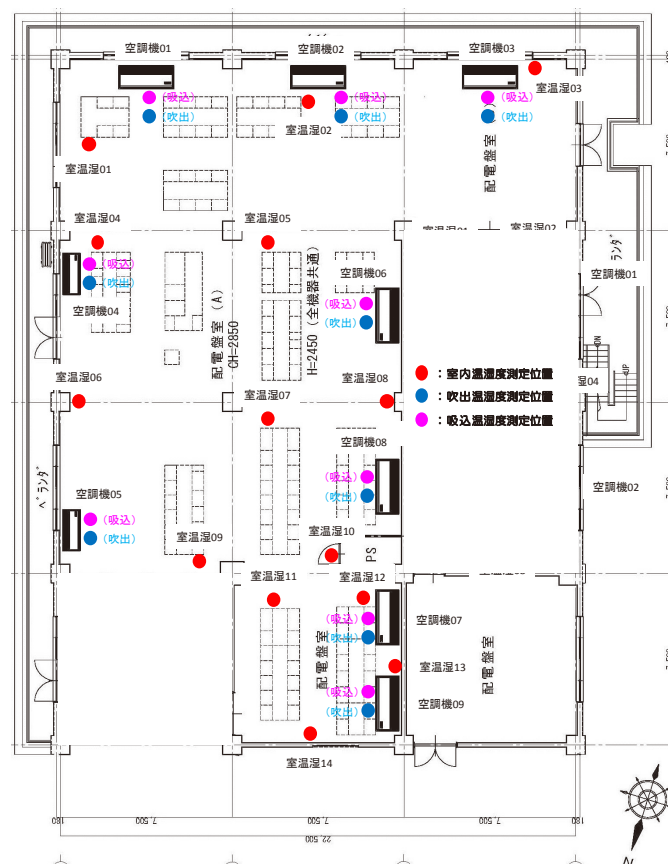


図 4-20 D 建物の配電盤室の平面図と計測器設置位置

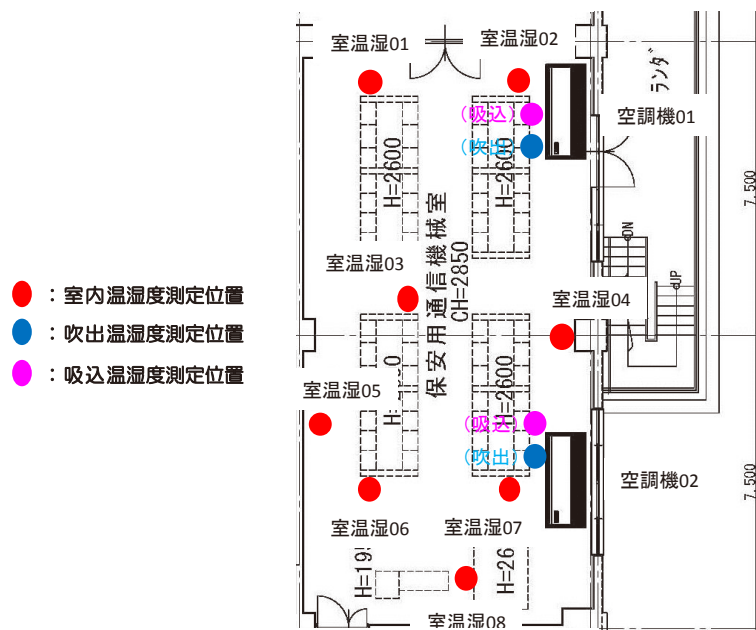


図 4-21 D 建物の通信機械室の平面図と計測器設置位置

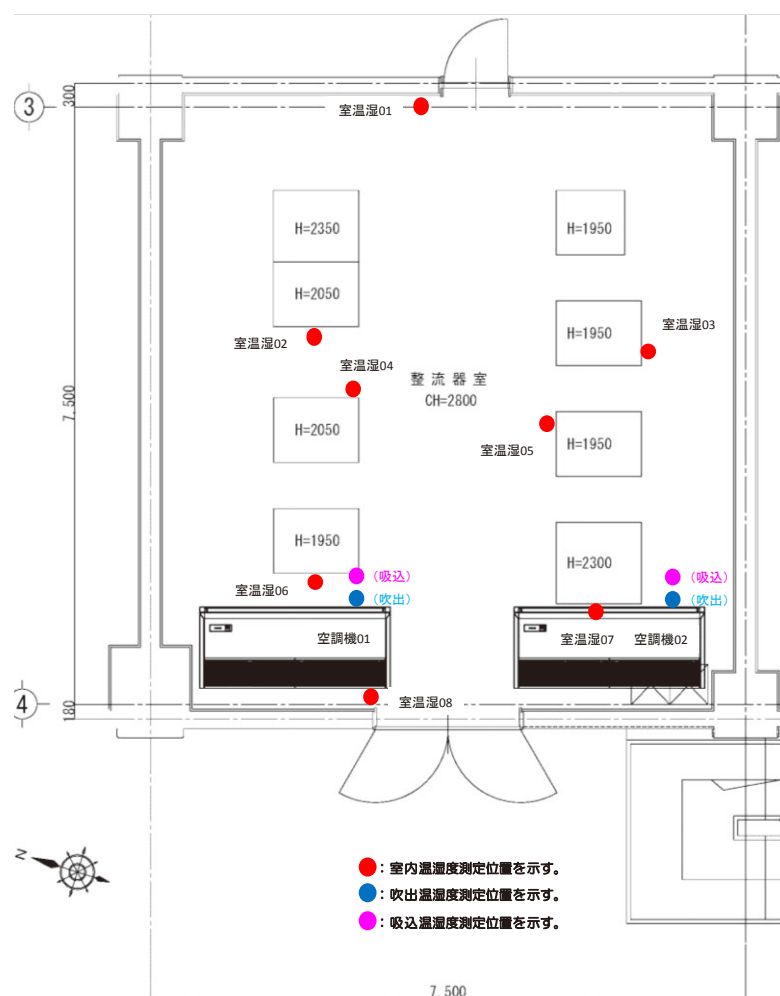


図 4-22 D 建物の電源室の平面図と計測器設置位置

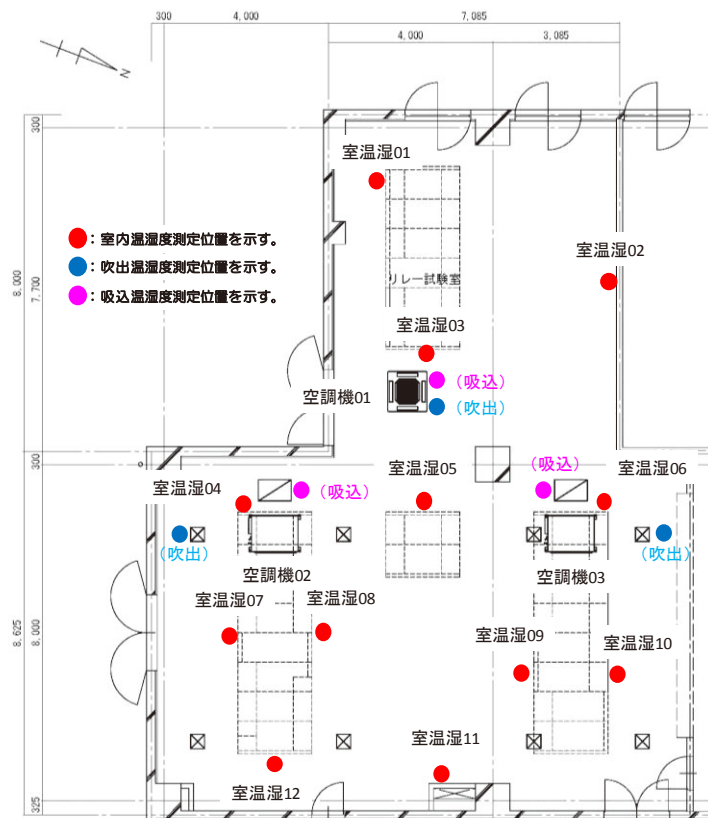


図 4-23 E 建物の配電盤室の平面図と計測器設置位置

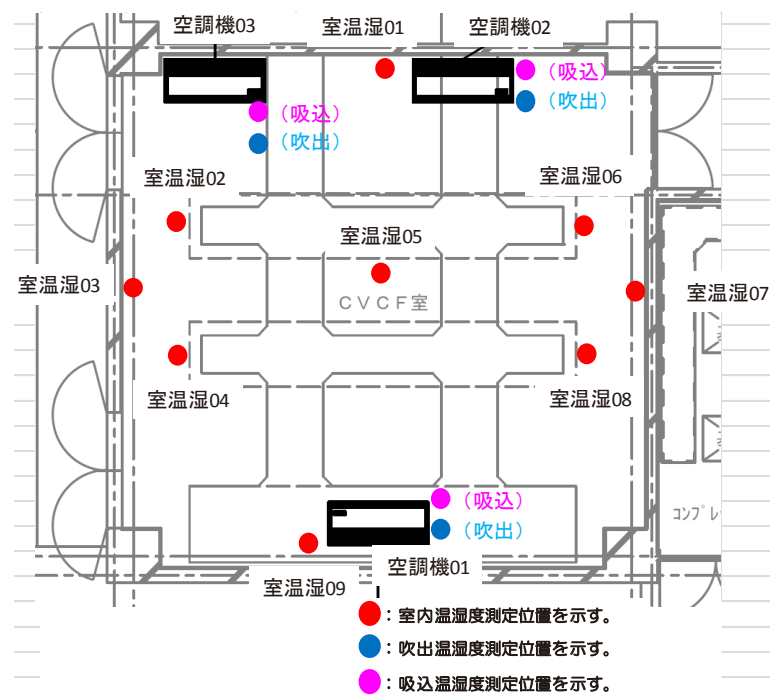


図 4-24 E 建物の電源室の平面図と計測器設置位置

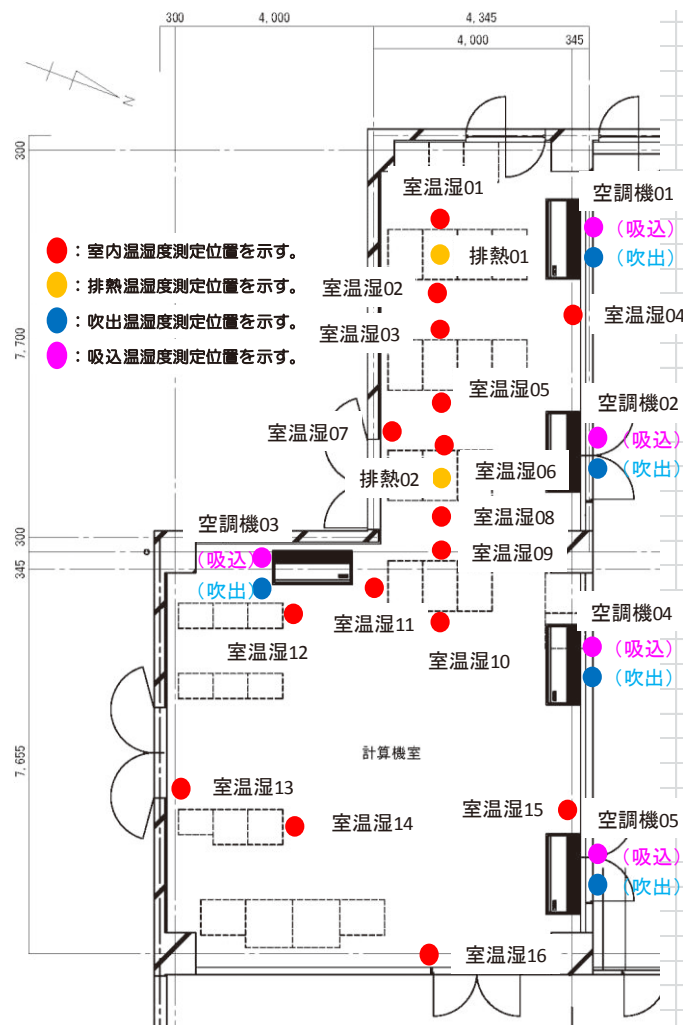


図 4-25 E 建物の計算機室の平面図と計測器設置位置

4.7.3 機器発熱量の推定

実測対象室 10 室の測定期間中における空調顕熱処理量と室内外温度差から機器発熱量を推定した（図 4-26～図 4-30）。機器発熱量は 4.5.4 節の手法を用いて算出し、推定には条件 1 を用いた。実測期間等は表 4-6 に示した条件とした。

この結果を用いて次節以降の比較を行うこととする。

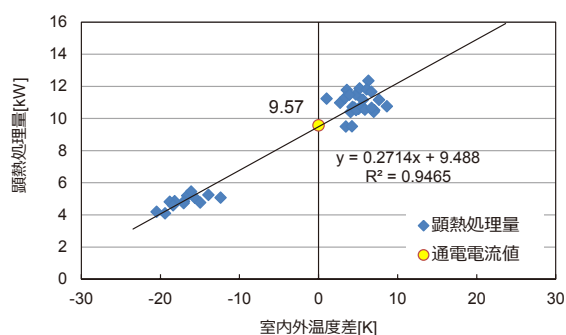


図 4-26 A 建物 計算機室における空調顕熱処理量と室内外温度差

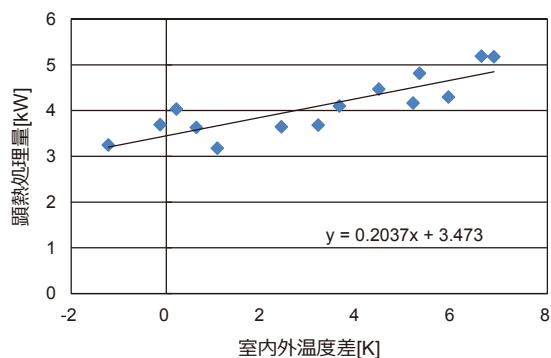


図 4-27 B 建物 通信機械室における空調顕熱処理量と室内外温度差

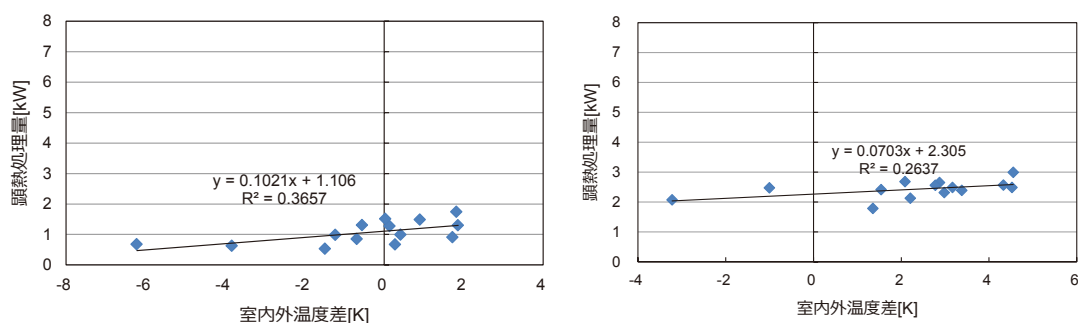


図 4-28 C 建物における空調顕熱処理量と室内外温度差（左：通信機械室 右：電源室）

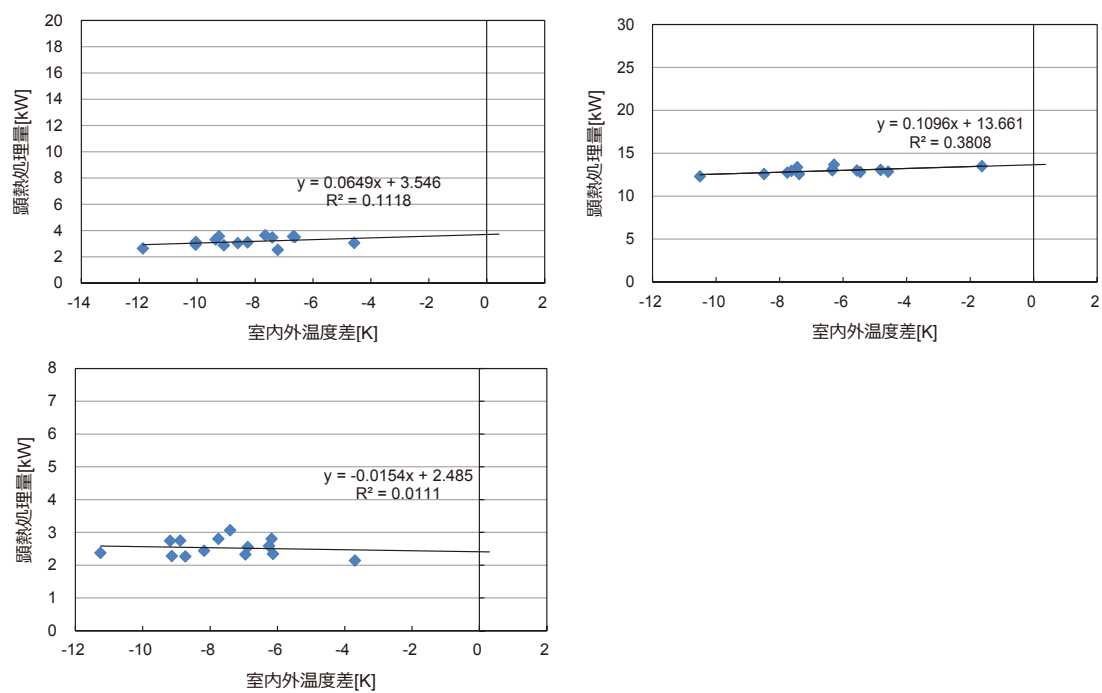


図 4-29 D 建物における空調顕熱処理量と室内外温度差
(左上：通信機械室 右上：配電盤室 左下：電源室)

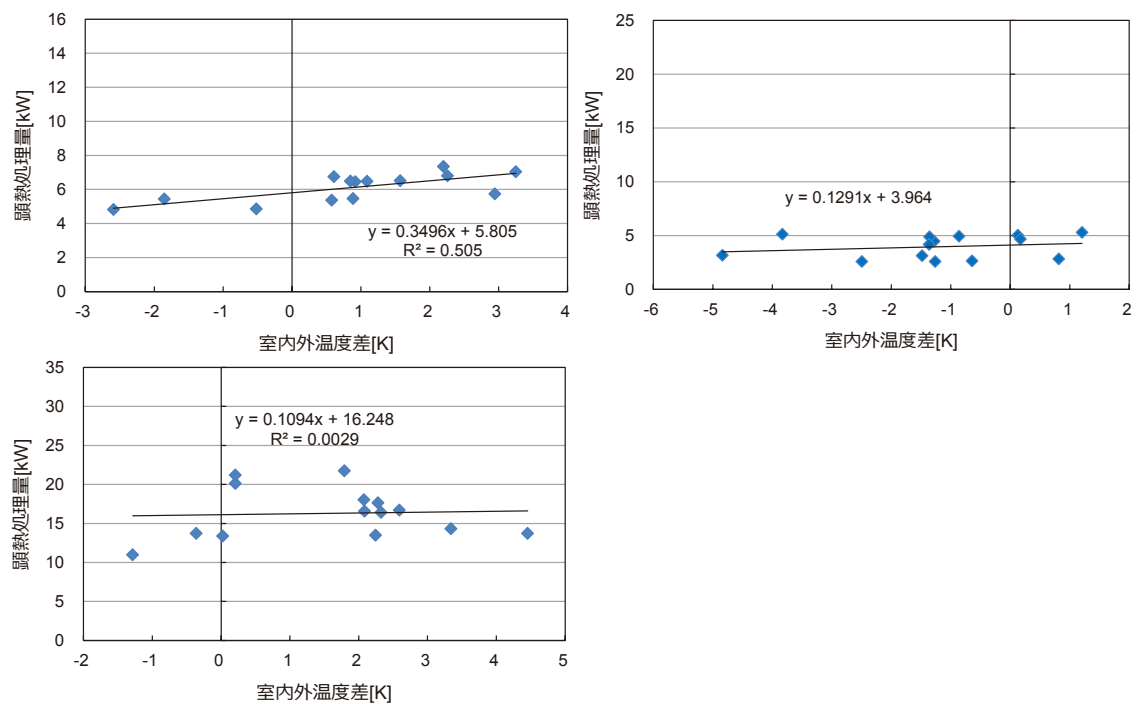


図 4-30 E 建物における空調顕熱処理量と室内外温度差
(左上：配電盤室 右上：電源室 左下：計算機室)

4.7.4 全対象室における空調機負荷の最大値に関する検討

対象室 10 室における前節で推定した機器発熱量，空調機負荷の最大値および空調機容量を表 4-9 に示す。なお，機器発熱量，空調機負荷の最大値（最大負荷），空調機容量の定義は以下とする。

機器発熱量：室内外温度差が 0 K の条件で推定された値

空調機負荷の最大値（最大負荷）：空調機の全熱処理熱量 10 分値，1 時間値および 1 日値の最大値

空調機容量：バックアップ機器を除いた空調機容量

表 4-9 機器発熱量，最大負荷および空調機容量

建物	部屋	機器発熱量 [kW]	最大負荷 (10分値) [kW]	最大負荷 (1時間値) [kW]	最大負荷 (1日値) [kW]	空調機容量 [kW]
A	計算機室	9.49	15.66	14.98	13.55	22.4
B	通信機械室	3.47	7.51	7.42	6.08	14.2
C	通信機械室	1.11	8.27	6.55	2.12	7.1
	電源室	2.31	7.76	4.93	3.64	8.0
D	配電盤室	13.66	33.85	20.57	15.17	32.0
	通信機械室	3.55	19.70	14.38	4.23	11.2
	電源室	2.49	7.56	4.59	3.33	5.0
E	配電盤室	5.81	9.70	9.38	8.85	14.6
	電源室	3.96	21.13	11.87	6.93	47.2
	計算機室	16.25	33.33	28.45	24.42	64.0

また，図 4-31～図 4-33 に空調機負荷の最大値と機器発熱量の関係を示す。

空調機のローテーション運転が行われている対象室が多く，空調機負荷(10 分値および 1 時間値)では空調機の発停による影響から非定常状態となるため最大負荷の瞬時値が過大となる傾向が見られた。そのため空調機負荷の実績値として 1 日値を最大負荷とした。

この結果，空調機負荷（1 日値）では全ての実測対象室において最大負荷の過半を機器発熱量が占めていると推定された。

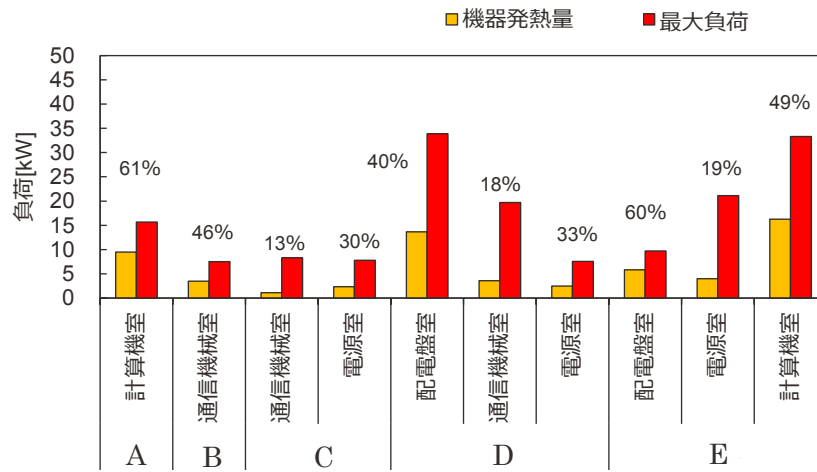


図 4-31 空調機負荷（10 分値）の最大値と推定機器発熱量

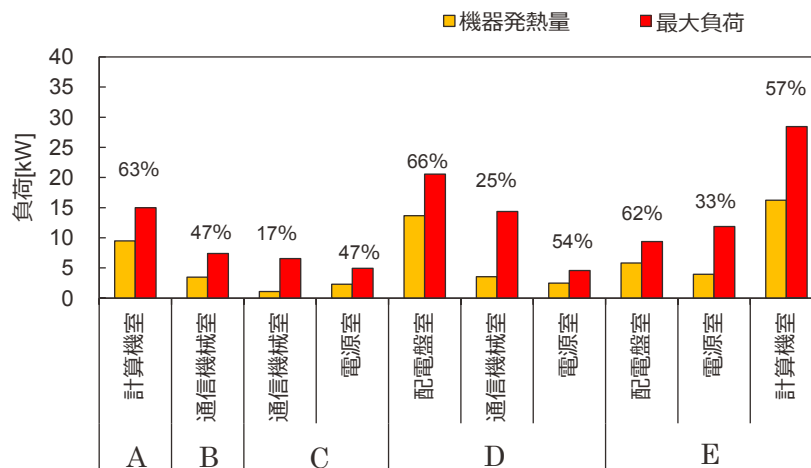


図 4-32 空調機負荷（1 時間値）の最大値と推定機器発熱量

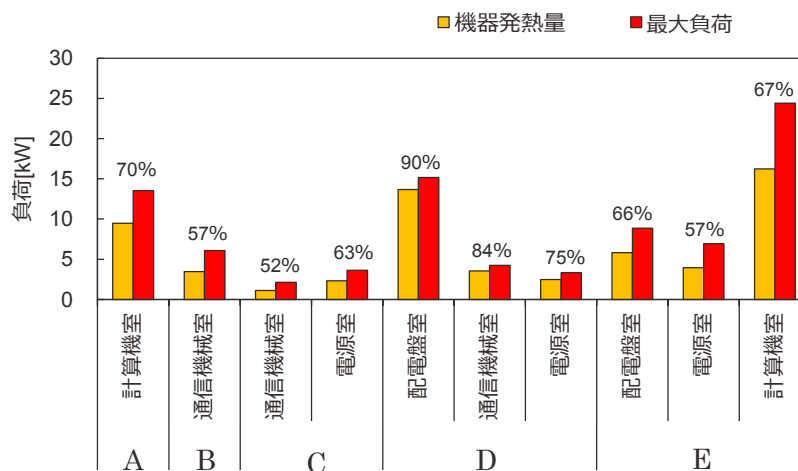


図 4-33 空調機負荷（1 日値）の最大値と推定機器発熱量

図 4-34～図 4-36 に空調機容量（バックアップ機器を除いた容量）と空調機負荷の最大値との関係を示す。空調機容量と最大負荷に差があることが確認され、過大な空調機容量の選定とならないためには設計においては空調機負荷の大部分を占める機器発熱量を適切に把握する必要があることが示唆された。

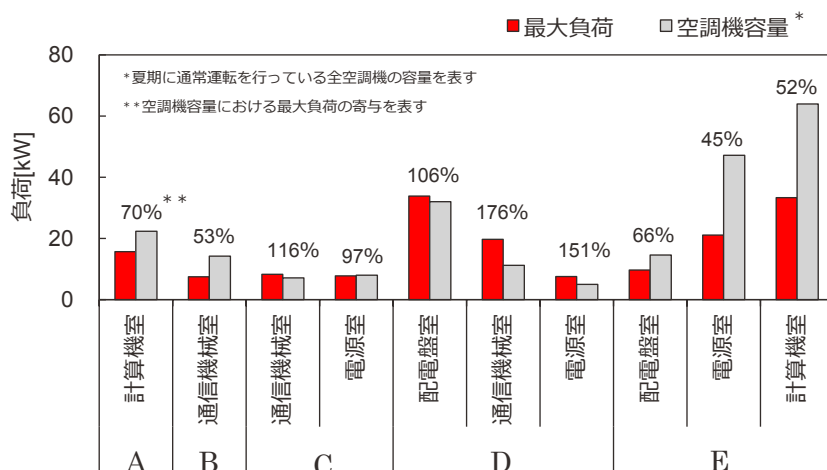


図 4-34 空調機容量と空調機負荷（10 分値）の最大値

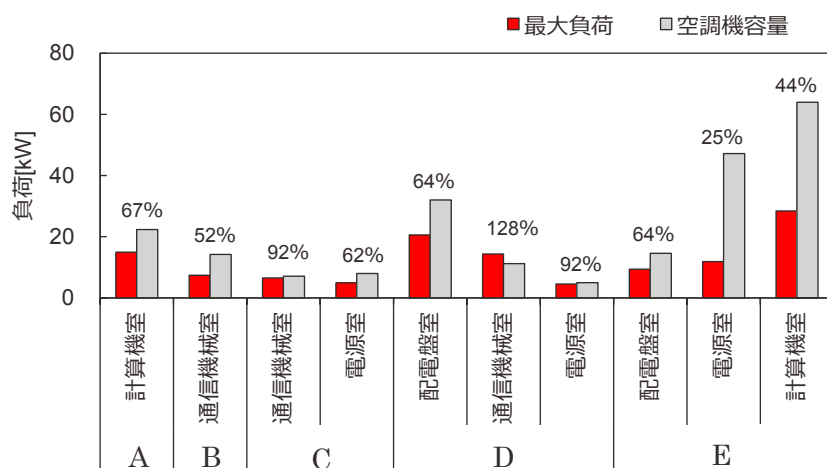


図 4-35 空調機容量と空調機負荷（1 時間値）の最大値

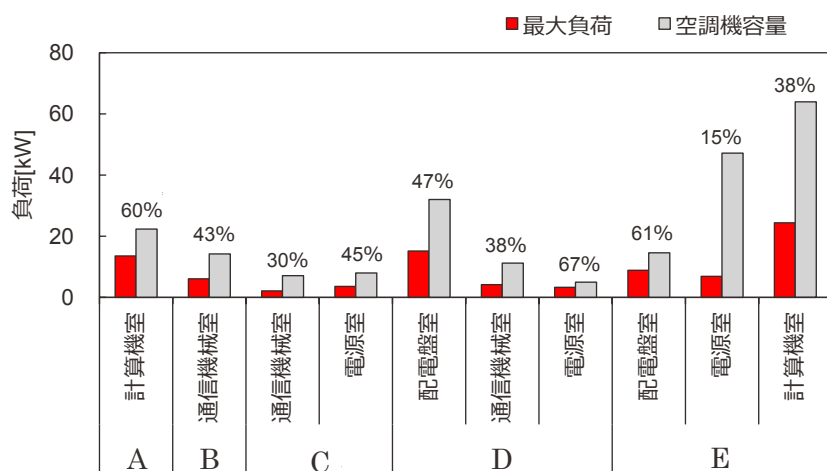


図 4-36 空調機容量と空調機負荷（1 日値）の最大値

これらの結果をもとにした日平均空調負荷の最大値に対する機器発熱量と空調負荷の割合を図 4-37 に示す。

夏期のみデータに基づいた機器発熱量の推定は大きく見積もられる可能性があるが、全ての実測対象室において最大負荷の過半を機器発熱量が占めていることを確認した。また、大半の室において空調機容量と空調負荷に乖離があることが確認され、過大な空調機容量の選定とならないためには前章で述べたとおり設計時において、空調負荷の大部分を占める機器発熱量を適切に把握する必要があると考えられる。なお、設計時においては、機器発熱量はメーカー等からの提示による定格発熱量で負荷計算する場合には、適切な低減率を乗じることにより、より運転時に近い空調機容量を選定することが可能となることが示唆された。

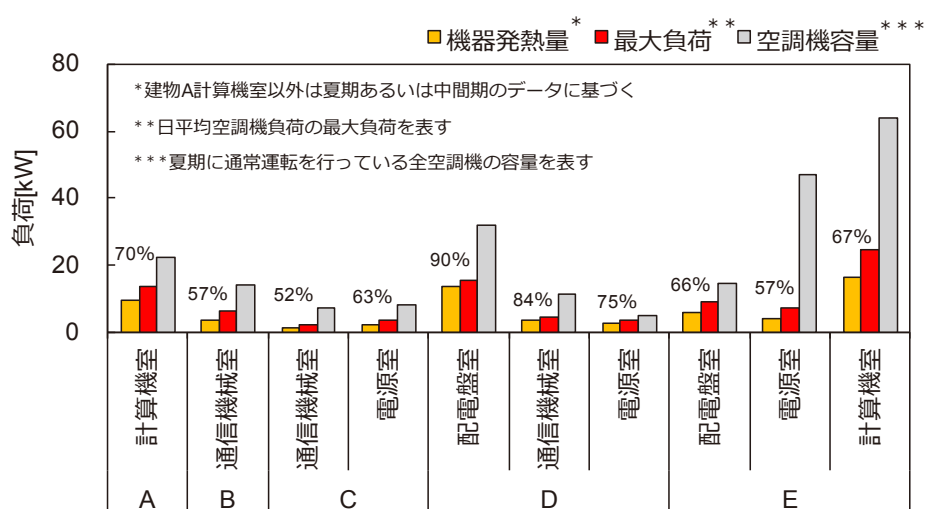


図 4-37 日平均空調負荷の最大値と機器発熱量

4.7.5 室用途と機器発熱量の関係

機器発熱量の把握を目的とし、測定対象室 10 室の室用途における機器発熱量の関係について検討を行った。図 4-38 に室用途別における機器設置面積と機器発熱量の関係を示す。

重要機器は設置架台の大きさを標準化している場合が多く、用途別の単位機器設置面積当たりの機器発熱量は相関関係が認められ、通信機械室が約 0.14kW/m^2 、電源室は約 0.54kW/m^2 、計算機室は約 0.71kW/m^2 、配電盤室は約 0.17kW/m^2 であり、従来の設計時における発熱量の与条件よりも少ないことが確認された。これらの結果より、設計時点において発熱量に関する与条件を適正化することで、合理的な空調設備の設計が可能となることが示唆された。

今後、更なるデータの蓄積により、設計時において室用途と機器設置面積から機器発熱量を正確に把握し、設計に反映することが必要である。

また、これらの手法は同じ用途の重要機器室を所有する業種においても、個々の施設でのデータを取得することで同様の比較検討が可能であり、今後更なる計画手法の合理化に向け、データ整備が求められる。

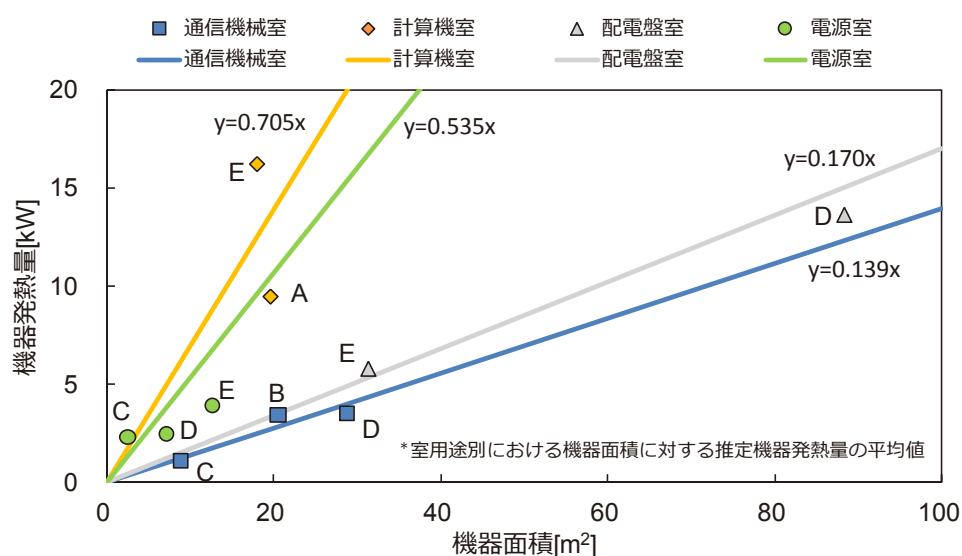


図 4-38 室用途別における機器設置面積と機器発熱量の関係

4.8 重要機器室における省エネポテンシャルの評価

4.8.1 目的とポテンシャルの推定手法

前節までは、これまで明らかにされていなかった機器発熱量の実状について実測をもとにした分析を行った。本節では、各室の運用条件に対して『設定温度の緩和（空調温度を上げる）』という運用改善を行った際に、どの程度の便益が生じるか、すなわち、年間消費電力量及びピーク時の消費電力等がどの程度低減できるかについて、そのポテンシャルを評価する。

ポテンシャル評価のために計測調査を行った四国電力関連施設について、計測結果ならびに四国電力管内の重要機器室の延床面積から上記ポテンシャルを推定する。

まず、4.8.2 節で重要機器室の種別を用途別に4種類に分類した各室種類ごとの省エネ・ピークカット効果の原単位（ m^2 あたり・ 1°C あたりの値）を、質点系熱負荷シミュレーションツール「CADIEE」⁴⁻¹⁰⁾を用いて熱負荷計算を行い、算出する。

次いで、4.7.2 節で決定した各重要機器室が上記の室種類のいずれに該当するかの結果と推定した各室の面積を足し合わせることで、4.8.3 節において四国電力管内の各室種類の合計延床面積を推定する。最後に、4.8.4 節で各室種類の原単位及び延床面積から、四国電力管内全体の削減効果を推定する（図 4-39）。

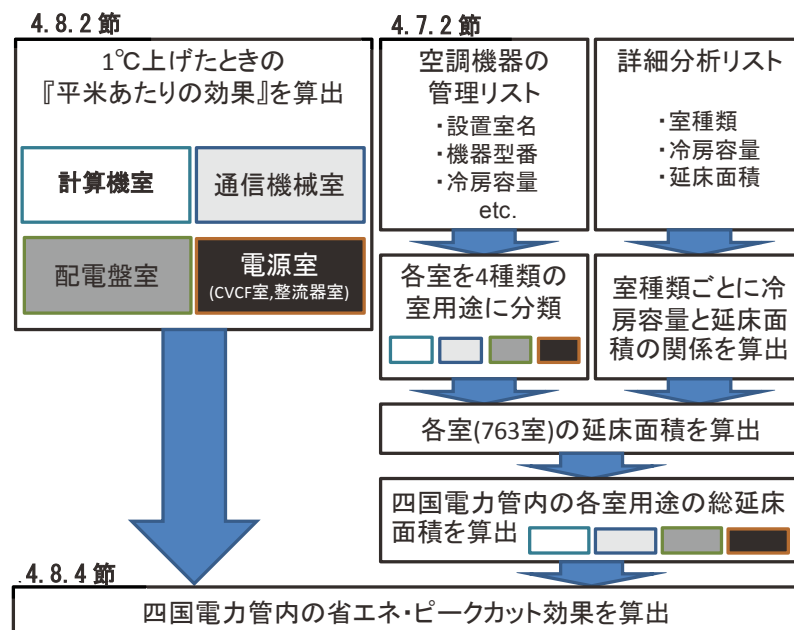


図 4-39 省エネ・ピークカット効果の推定方法の概要

4.8.2 室用途ごとの省エネ効果の原単位の算出

既往の研究⁴⁻⁰⁾では、A 建物の通信機械室における実測結果と CADIEE による熱負荷計算の結果を比較することで、CADIEE によって重要機器室における熱負荷・室内温度等を精度よくシミュレーションできることを示した。また、空調設定温度を変えてシミュレーションを行い、空調設定温度と熱負荷がほぼ線形の関係にあることを示した。これは、重要機器室では室内発熱が常時一定で、また人の出入りや換気負荷もほぼ無いことから、それに起因する発熱もなく、さらに居室でないために窓もブラインド等で常時日射を防ぐことができているためである。

上記の通信機械室や前節で述べた計算機室のほかに、本節では新たに A 建物で電源室（CVCF 室）を、F 建物において配電盤室、電源室（整流器室）の実測を行い、各室の図面、また室内発熱を電流値による計測結果により CADIEE を用いて熱負荷計算を行い、室内温度を変更することによる空調負荷の変化量を求めた。なお、A 建物では計測期間前後でサーバの機器更新があり更新後は 4.5.2 節の発熱量となったが、本節では他の施設の更新中であることより更新前の発熱量をもとに検討を進めることとした。図 4-40 および図 4-41、対象室の平面・立体図を示す。また表 4-10 に、各室の床面積ならびにシミュレーションに用いた室内発熱を示す。

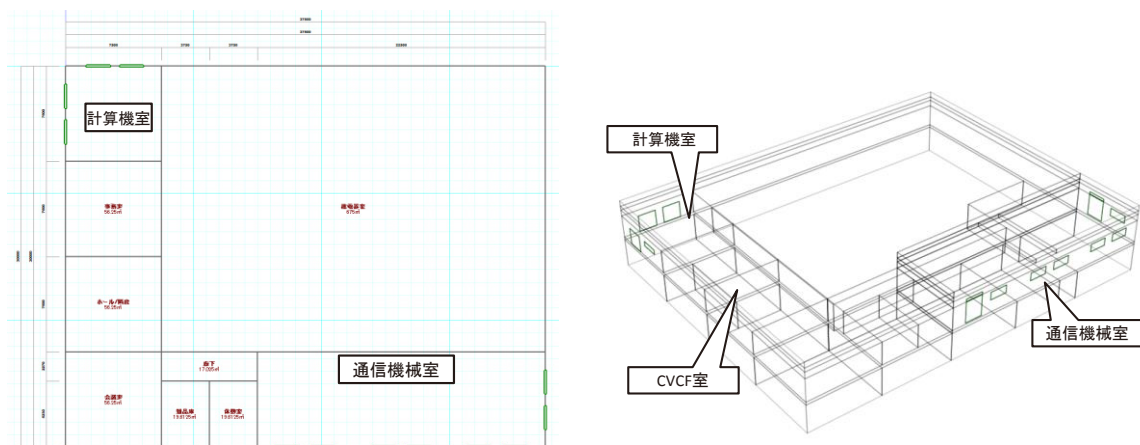


図 4-40 A 建物 計算機室・通信機械室・電源室（CVCF 室）の平面・俯瞰図

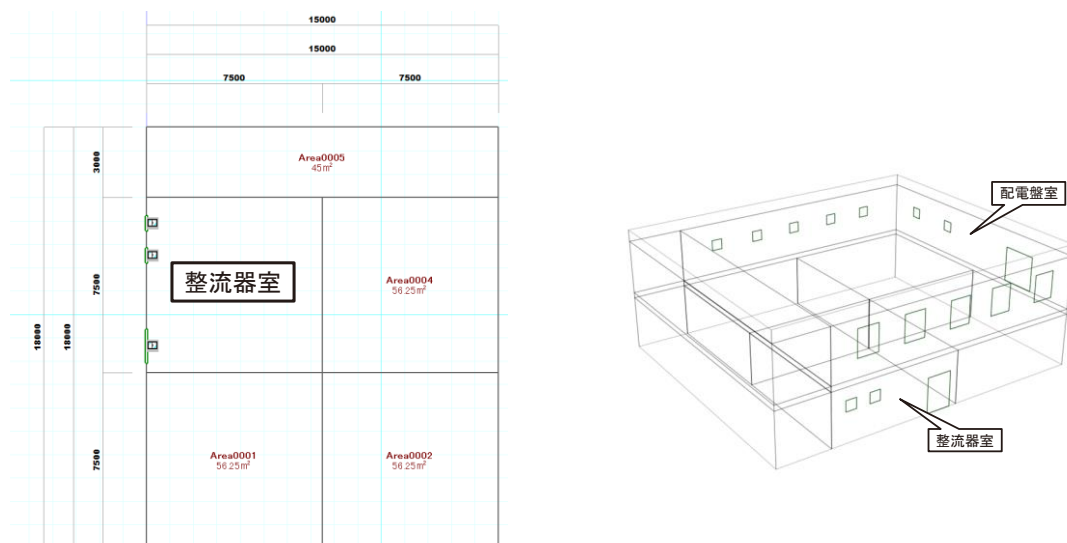


図 4-41 F 建物 配電盤室・電源室（整流器室）の平面・俯瞰図

表 4-10 各室の面積と機器発熱

室名称	面積 [㎡]	室内機器発熱 [kW]	平米あたり機器発熱 [W/㎡]
計算機室	56	17.3	309
通信機械室	169	10.4	62
配電盤室	225	13	58
電源室(CVCF室)	32	9.9	310
電源室(整流器室)	56	2.6	46

表 4-11 に各室の延床面積単位面積あたりの年間・ピーク時空調負荷のシミュレーションによる計算結果（28℃の場合）を示す。また、表 4-12 に各室の単位面積あたり・1℃あたりの年間・ピーク時空調負荷の変化量の計算結果を示す。

ここでは、1℃あたりの変化量を計算するに当たっては、実設定条件であった 22℃（通信機械室は 23℃）と、28℃の 2 ケースで計算を行い、空調負荷の差を温度差で割って原単位を算出した。また、次節以降では、分析に用いた空調機器の管理リストの分類の都合上、CVCF 室と整流器室を合わせて電源室として分類し、原単位としてはその平均値を用いることとした。

表 4-11 各室の単位面積あたり空調負荷計算結果（室温 28℃）

室名称	年間空調負荷 [MJ/㎡]	ピーク時空調負荷 [W/㎡]
計算機室	7589	315
通信機械室	781	76
配電盤室	745	89
電源室(CVCF室)	6473	299
電源室(整流器室)	234	51

表 4-12 各室の単位面積あたり空調負荷計算結果（1℃あたりの変化量）

室名称	年間空調負荷削減量 [MJ/㎡/℃]	ピーク時空調負荷削減量 [W/㎡/℃]
計算機室	180.7	6.8
通信機械室	141.5	4.7
配電盤室	90	3.8
電源室(CVCF室)	256	8.6
電源室(整流器室)	89.3	5.5

4.8.3 室用途ごとの総延床面積の推定

前節では、各室の単位面積あたり・1℃あたりの年間・ピーク時空調負荷の変化量を求めた。この値に対して、各室用途の総延床面積を乗じることによりエネルギーポテンシャルを推定するために、4.7.2 節の図 4-11 で求めた各室の延床面積の分布から面積を積算し、各用途別の総延床面積を推定した（図 4-42）。

なお、四国電力にて利用する一般業務用途建物の床面積の概算は 633,000m² であることがわかっており、図 4-42 に示した床面積の合計である 49,635m² はその 7.8% に当たる。

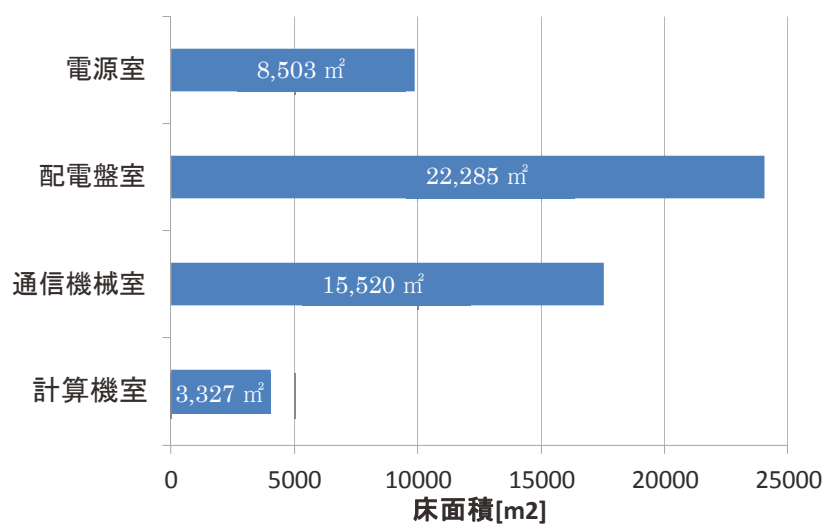


図 4-42 各室用途別の総床面積

4.8.4 省エネ効果の計算結果

4.8.2 節において単位面積あたりの空調負荷の削減量を推定した。また 4.8.3 節において各室用途別の延床面積を推定した。本節では、互いを乗じることによって、室種類別の年間空調負荷・ピーク時空調負荷の削減量を推定した。図 4-43 に、年間空調負荷削減量、ピーク時空調負荷削減量を示す。

この結果より空調温度を 1℃ 上げることによって、年間空調負荷を約 7,050GJ 減らし、またピーク時の空調負荷を約 270kW 減らす効果が期待できる。この年間空調負荷を空調機に係るエネルギーとして COP を 3 として換算すると、年間で削減できる電力量は $2,350\text{GJ} = 652.7\text{GWh}$ と推定される。仮にこれを四国電力の電力従量料金（業務用[500kW 以上]夏期：1kWh 15.06 円）で換算すると、年間で削減できる従量コストは、約 1,000 万円程度と試算される。重要機器室は、管理上設定温度を個々の施設ごとに設定しており、その値にも差があることが分かっている。近年、重要機器本体も電子化が進んでおり、以前のようなリレー機器の組合せで構成されることが少なくなった。このため、冷却による機器寿命の延命化も機器の種類によっては以前ほど効果が得られないことがある。これらのことから一度管理者による設定温度の見直しを行うことが必要である。また、重要機器室には空調機がバックアップの目的のため個別分散し設置されていることを鑑みると、ピークカット効果として、空調負荷を約 270kW 削減できる場合には、設置する空調機を複数台低減することで、設置コストに対しても寄与できる可能性が示唆された。

なお、本章の試算は四国地域での条件で演算したため、気候等の差による地域差は加味する必要があると考えられるが、四国管内で使用される総電力量は全国の総計の約 3% 程度であることを鑑みると、全国大でのこれらの取り組みが可能となるならば、ある一定の効果が期待できる。

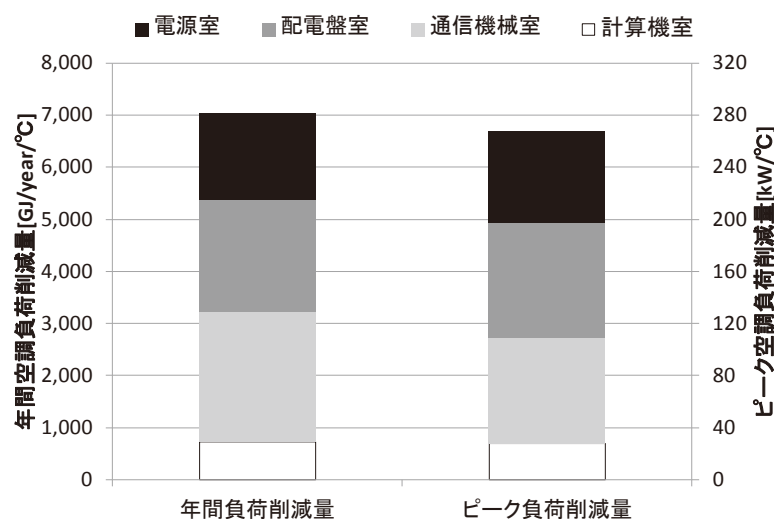


図 4-43 室用途別・1℃あたりの年間・ピーク時空調負荷削減量の計算結果

4.9 設計フローの提案

これまでの評価において、機器発熱の実態について様々な知見の確認ができた。図 4-37 では最大空調機負荷と推定機器発熱量の関係を明らかにし、いずれの室においても負荷の過半数を機器発熱量が占めることが確認でき、最大で 90%を占める室も存在した。図 4-38 では機器発熱量と機器面積との関係を明らかにし、通信機械室では 0.14kW/m^2 と最も低く、 0.71kW/m^2 と最大であることが分かり、四国電力管内における各重要機器室の機器発熱量を想定する基礎的資料として整理できた。

図 4-8 からは推定機器発熱量から最大負荷の実績値とシミュレーション値との比較を行い、解析ソフトには様々な安全性の配慮がなされていることを改めて確認できた。空調機器の選定および運用に際して負荷計算を正しく条件化することが重要なポイントとなるが、施工後十数年にわたり空調機器を使用していく過程での運用方法も重要なポイントであることが本章のエネルギー試算等の結果で明らかになった。重要機器の更新に伴い機器レイアウトの変更、機器発熱量の変化などが生じてくることは明白であり、それに対応した空調設備の温度設定など運用面でも工夫が必要不可欠である。また、不必要な空調機発停の継続や、空調吹出のショートサーキットによる送風運転など様々な不具合を未然に防ぎ、運用についても合理化することが望まれる。

以上を踏まえ、本章で分かった知見に基づき、本節では合理的な空調設備計画・運用手法について検討を行った。空調負荷計算の実施から図面作成、施工、運用までの全体的な空調設備における合理的な設計・運用フローの改善案を図 4-44 にまとめた。また、その中で空調負荷計算時において、合理化した与条件を図 4-45 に示す。

空調負荷計算時における設計フローについては、新築時とリニューアル時でそれぞれ与条件のとりまとめ方法について提案を行う。新築時においては、まず躯体負荷の最小化を図るために意匠設計者と十分調整を行い、開口部は最小限に抑えるなど検討が必要と考えられる。その他、運転管理者から十分な情報提供を受ける必要があるが、その中でも最重要項目が機器発熱量であることがわかった。定格発熱量をそのまま扱わず、メーカー聞き取りや本章にて把握できた室用途別発熱量との比較を行い、計算時に採用する合理的な機器発熱量を選定する必要がある。リニューアル時においても同様に機器発熱量の設定が一番のポイントとなる。リニューアル時であればすでに重要機器が稼働しているため、管理箇所と調整の上で可能であれば簡易計測手法などを利用し、機器消費電力量を測定した上で、その結果を実発熱量とすることが望ましい。また将来の機器更新予定についても配慮を行い計画すべきと考えられる。

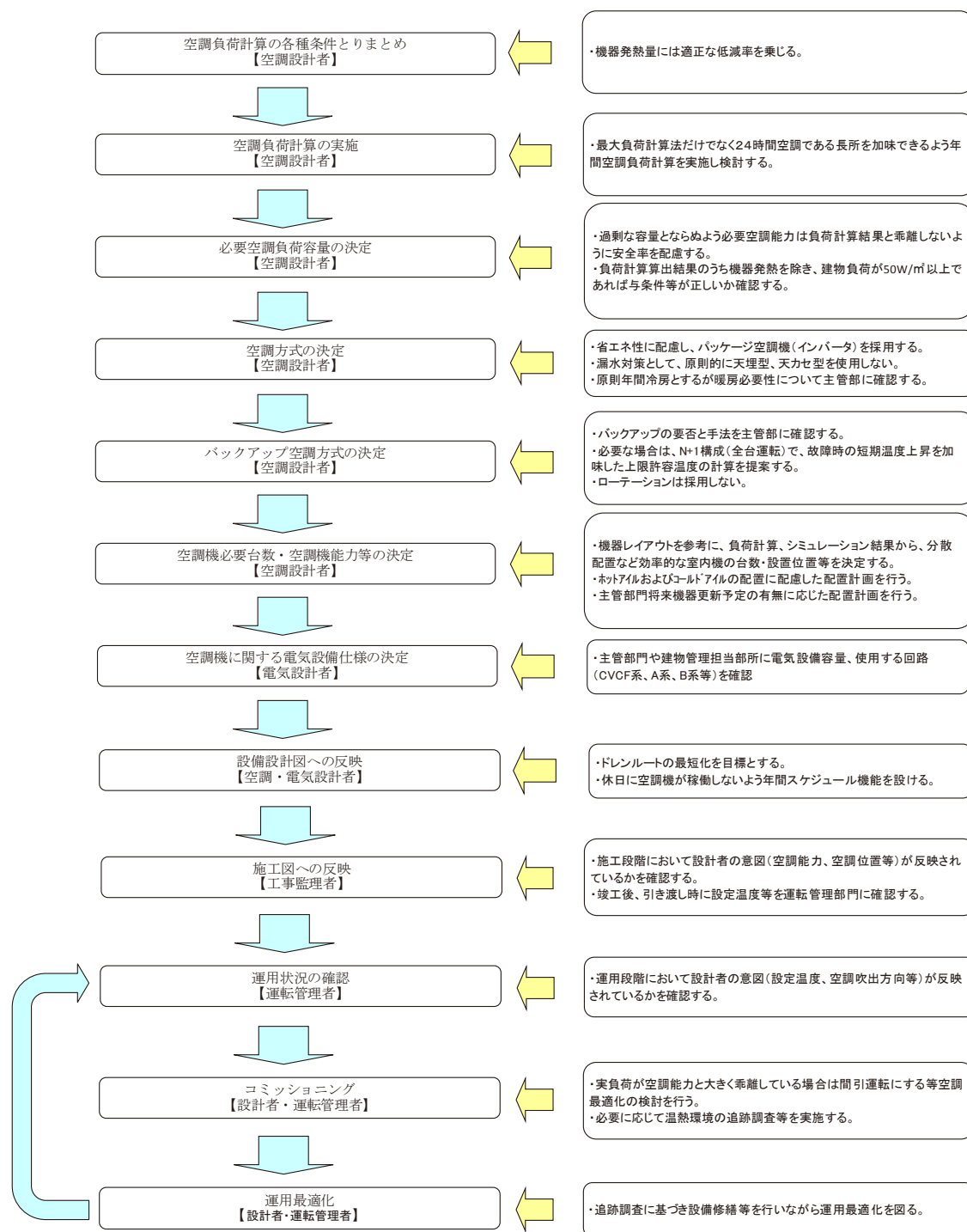


図 4-44 合理的な設計・運用フローの改善案

情報入手先	項目	与条件の処理方法【空調設計者】			
		チェック	新築時	チェック	リニューアル時
意匠設計者	躯体負荷	<input type="checkbox"/>	外部日射等による熱的影響を最小化するため開口部分は最低限とし、庇を設置する。	<input type="checkbox"/>	日射遮蔽が不十分である場合は内部ブラインドや後付庇の設置を検討する。
		<input type="checkbox"/>	窓ガラスの仕様はlow-eガラスとし、内部ブラインドを設ける。	<input type="checkbox"/>	隣室の用途変更等による計算条件の変更有無を確認する。
		<input type="checkbox"/>	高断熱化は年間負荷を増大させる可能性があるため十分検討する。	<input type="checkbox"/>	高断熱化は年間負荷を増大させる可能性があるため十分検討する。
運転管理部門	人体負荷	<input type="checkbox"/>	人体負荷は0とする。 (メンテナンス時の人員は短時間により考慮しない)	<input type="checkbox"/>	人体負荷は0とする。 (メンテナンス時の人員は短時間により考慮しない)
	外気負荷	<input type="checkbox"/>	外気負荷は0とする。 (居室ではないため基本的に換気不要)	<input type="checkbox"/>	外気負荷は0とする。 (居室ではないため基本的に換気不要)
	照明負荷	<input type="checkbox"/>	換気を必要とする蓄電池設置時は充電時のみ換気ONとし、外気負荷としては見込まない。	<input type="checkbox"/>	照明負荷は0とする。 (メンテナンス時の点灯は短時間により考慮しない)
	設定温・湿度	<input type="checkbox"/>	照明負荷は0とする。 (メンテナンス時の点灯は短時間により考慮しない)	<input type="checkbox"/>	照明負荷は0とする。 (メンテナンス時の点灯は短時間により考慮しない)
		<input type="checkbox"/>	通常運転及び空調機故障時における機器許容上限の設定温度を把握する。	<input type="checkbox"/>	通常運転及び空調機故障時における機器許容上限の設定温度を把握する。
	機器発熱量 (最重要項目)	<input type="checkbox"/>	機器許容の湿度範囲を確認する。	<input type="checkbox"/>	機器許容の湿度範囲を確認する。
		<input type="checkbox"/>	定格発熱量に適正な低減率を乗じる。 メーカーへの聞き取りを主管部へ依頼する。	<input type="checkbox"/>	運転時の実発熱量（機器消費電力量）を入手する。
		<input type="checkbox"/>	想定発熱量が下図と比較し、対象用途の平均発熱量から大きく外れていないか確認する。	<input type="checkbox"/>	実発熱量が不明な場合は想定発熱量が下図と比較し、対象用途の平均発熱量から大きく外れていないか確認する。
		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	将来機器更新予定の有無に応じて発熱量を考慮する。

※今後の課題

重要機器室の各用途、各機器における定格発熱量の適正な低減率の評価が必要

図 4-45 設計時における与条件の整理

4.10 まとめと今後の課題

本章では重要機器室における機器発熱量の計測が電力量計などを用いる直接的な方法では安全性の面から実施が困難であるため、空調処理熱量と温度差の関係から簡易推定する手法を提案し、分析・比較を行った。また、四国電力管内におけるエネルギー削減ポテンシャルを試算し考察した。本章で得られた知見は下記のとおりである。

- 1) 重要機器室のカテゴリーを通信機械室、配電盤室、電源室、計算機室の4用途に区分した。そして、計算機室で簡易推定手法の精度検証を実施し、直接電流値を計測した事例と推定した発熱量を比較し、推定精度が良好であることと空調処理熱量のうち機器発熱量に寄与する熱量が支配的であることが確認された。
- 2) 四国管内における10箇所の実稼働している重要機器室について、空調処理熱量、空調稼働状況、温熱環境などについて実測・評価を行ったところ、すべての室において最大空調負荷が空調機容量を大幅に下回っていることが確認された。また、重要機器は設置架台の大きさを標準化している場合が多く、用途別の単位機器設置面積当たりの機器発熱量は相関関係が認められ、通信機械室が約 0.14kW/m^2 、電源室は約 0.54W/m^2 、計算機室は約 0.70W/m^2 、配電盤室は約 0.17kW/m^2 であり、従来の設計時における発熱量の与条件よりも少ないことが確認された。これらより、与条件を適正化することで、合理的な空調設備の設計が可能となることが示唆された。
- 3) 最後に四国管内の重要機器室473室に対して、温度条件を変更した場合における四国管内全体での空調機容量や年間空調負荷の低減度合について試算した。その結果、空調設定温度を 1°C 上げることによって、空調機容量を約 270kW 、年間空調負荷を約 $7,050\text{GJ}$ 削減する効果が期待できる。重要機器室の空調設定温度は統一されておらず管理者の判断に任されていることが多く、電子化が進んだ設備においても従来の機器長寿命化を目的とした過冷却を行っている室も見受けられるため、設計温度を過冷却にならない設定温度とすることでも空調機容量の削減等の効果が期待できることが確認された。
- 4) 本章で明らかになった知見をもとに合理的な設計フローを提案した。重要機器室における空調設備の計画では、新築時およびリニューアル時に関わらず空調負荷計算時の与条件である機器発熱を適正に把握した上で、実稼働状況を加味した条件設定が重要であることが確認された。

今後の課題として、本章での検討は四国地域のフローとして整理したが、このフローの考え方は異なる地域・業種でも利用可能であり、同様のフローを地域ごとに構築することが可能ならば、全国大で一定の効果があると想定できる。また、設計時に利用できる明確な低減率を設定できるよう重要機器室の各用途、各機器における定格発熱量の適正な低減率の評価を進める予定である。

なお、本研究は重要機器室の空調設計・運用の高度化に関する電力共同研究（四国（幹事）、北海道、東北、東京、北陸、中部、中国、九州、電源開発）の一環として実施した。調査実施にあたり関係者の方々に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

本章に関する既往発表文献

審査付き論文

- 4-a) 天野雄一郎，中川克也，田島昌樹，堀岡建吾，上野剛，宮永俊之：重要機器室における機器発熱量の簡易推定手法の提案と空調負荷特性の分析，日本建築学会技術報告集（2017.3 現在 審査中）

口頭発表

- 4-b) 天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その1）通信機械室の空調環境と機器発熱の実態把握，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-44，2012
- 4-c) 宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿，天野雄一郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その2）通信機械室の空調省エネポテンシャルの試算，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-45，2012
- 4-d) 天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，前田幸司郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その3）通信機械室における複数台パッケージ空調の CFD シミュレーション，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，J-16，2013
- 4-e) 宮永俊之，上野剛，天野雄一郎，前田幸司郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その4）CFD シミュレーションによる計算機室の空調省エネ方策評価，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-57，2014
- 4-f) 堅田大貴，天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，堀岡建吾，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その5）空調負荷計算手法の最大冷房負荷に関する比較，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，D-6，2015
- 4-g) 中川克也，天野雄一郎，安岡稔弘，堀岡建吾，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その6）実測に基づく空調機負荷特性の分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，J-9，2016
- 4-h) 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，黒本英智：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その1）通信機械室の空調環境の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2013
- 4-i) 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，黒本英智：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その2）通信機械室の機器発熱の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2013
- 4-j) 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，上野剛，安岡絢子：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その3）CPU 室の機器発熱の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
- 4-k) 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その4）通信機械室における CFD シミュレーション解析概要，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
- 4-l) 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その5）通信機械室における CFD シミュレーション解析結果，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
- 4-m) 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最

- 適化に関する基礎的研究：(その6) CFD シミュレーションによる空調省エネ方策の条件検討，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 4-n) 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：(その7) CFD シミュレーションによる空調省エネ方策の検討結果について，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 4-o) 堅田大貴，天野雄一郎，堀岡建吾，中川克也，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：(その8) 計算機室等の温熱環境調査，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 4-p) 中川克也，天野雄一郎，堀岡建吾，堅田大貴，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：(その9) 配電盤室等の温熱環境調査，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 4-q) 堅田大貴，天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，安岡絢子，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：(その10) 空調負荷計算手法の比較について，日本建築学会四国支部研究報告集，2015

参考文献

- 4-1) 羽山広文，降旗由紀，森太郎，絵内正道，木下学：データセンターの機器冷却特性と空調効率に関する研究，日本建築学会環境系論文集 第74巻 第640号，pp.721-728，2009
- 4-2) 二渡直樹，羽山広文，森太郎，菊田弘輝：データセンターにおける省エネルギー対策と再循環の影響，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，F-12，2011
- 4-3) 吉井存，宇田川陽介，柳正秀，藁谷至誠他：サーバールームにおける空調運用改善施策の検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，F-3，2011
- 4-4) 西田龍一，吉井存，柳正秀，藁谷至誠：データセンター用空調機と ICT 装置の連係制御に関する検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，F-6，2011
- 4-5) 天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，田島昌樹：小規模事務所建物における空調設備の稼働実態に関する基礎的研究，日本建築学会環境系論文集，第729号，2016.11
- 4-6) 山田恭輔，清水拓，野部達夫：プローブ挿入法によるマルチパッケージ型空調機の運用実態調査，空気調和・衛生工学会論文集，No.193，2013.4
- 4-7) 宮田征門，吉田治典，辻忠男，湯川求他：業務用建築のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究（その5）個別分散型空調システムの実稼働状態における入出力特性計測手法に関する検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 4-8) 上野嘉夫，吉田治典，宮田征門，辻忠男他：業務用建築のためのエネルギー消費評価手法に関する評価研究（その6）個別分散型空調システムの実働特性分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2010.9
- 4-9) 建築設備技術者協会：MICRO-PEAK/2000
- 4-10) 熱回路計算プログラム CADIEE（国土交通大臣特別認定 1034 号，商標登録 5289986 号）
- 4-11) 電気事業連合会 HP <http://www.fepc.or.jp/library/data/60tokei/>，2016.8.1 参照

第 5 章

環境共生型事務所建物における継続的なコミッションングに関する実践研究

第5章

環境共生型事務所建物における継続的なコミッショニングに関する実践研究

5.1 はじめに

昨今、ZEB(Zero Energy Building)の概念等から建物での使用エネルギーの低減が求められる中、建築設備において設計時に設計者が計画していたパフォーマンスが運用時に必ずしも発揮できているとは限らない事例が散見されており、設計時のみならず、運用時においてもコミッショニング（性能検証）による運用の適正化が求められている。コミッショニングの考え方は日本ではまだ十分に浸透しているとは言い難いが、個々の建物に対して先進的なコミッショニングによるエネルギー低減、要求性能の検証が行われている。

しかし、長期間の運用時には、建物使用用途の変更や機器類の老朽劣化などに起因する能力低下等が発生することは既知の事実であり、初期コミッショニング→最適化コミッショニング→継続コミッショニング→再コミッショニングとこれらを段階的・継続的に検証した事例はほとんどなく、空調設備を含む、建物全体のエネルギー低減に寄与できるコミッショニング手法の確立が必要である。

新築時に適用することで始まったコミッショニングであるが、既存建物の改修や調整にもコミッショニングを適用することによって大きな省エネルギーが図れるという研究成果が示されはじめ、圧倒的にストック量の多い既存建築の省エネでも導入が必須と考えられるようになってきた。そして、最近では設計から運用までライフサイクルでコミッショニングの適用を図ることが重要であるとの考え方が提唱されるようになってきた。

このため、本章では運用改善による省エネ手法の実践的事例として、新蓄熱技術として開発した自然エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱空調システムを採用している環境共存型の事務所ビルを対象に、初期コミッショニング、最適化コミッショニング、継続コミッショニング、再コミッショニングの各段階におけるシミュレーションを用いた建築設備全体を対象とした10年間に亘る継続的な性能検証手法を検討・適応し、その有用性について検証する。なお、土壌蓄熱空調システムについては初期・最適化コミッショニングのフェーズにおいて宮田ら^{5-b)}が効率向上に向けた最適化シミュレーション手法を構築しており、本章ではそれらの成果の一部を引用し、実建物での継続的な運用手法の検討と実践した結果について述べる。

5.2 本章に関連する既往の研究

コミッショニングによる運用改善に関する既往の研究では、中原、吉田らがある研究施設を対象に設計、施工、運用における各フェーズの性能検証手法の概念や実施事項を取りまとめた事例や一瀬らが事務所ビルにおける改修工事を対象とした復性能検証を実践した事例、地域冷暖房施設の運転保守段階における性能検証について示している。

しかし、新築の建物に関して設計段階から10年を超える長期運用段階までを通して、フェーズ毎に運用改善を実施し、継続的な性能検証に取り組んだ事例はほとんどない。

5.3 研究フロー

本章で対象建物とするヨンデビル新館は、建物自体で熱源設備を持っておらず近隣の地域熱供給施設から冷温水を受給している。このため、受給する冷温水に加え、新技術として導入した自然エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱空調システムおよび地域冷暖房施設の負荷平準化を目的とした水蓄熱空調システムを主な空調熱源としている。しかし、季節間および日間の蓄熱手法を複合化した空調システムを適正に運転するためには、運転管理者の経験による運転改善では困難である。このため、本章ではまず土壌蓄熱システムおよび水蓄熱システムのシステム効率向上、使用エネルギー低減に向け、各コミッショニングフェーズによる運用改善手法を検討し、効果を検証する。これらに加え、建物全体のエネルギーを削減するために継続的に実践した各省エネルギー施策の効果を検証し、建物全体のエネルギー低減を目的とした運用改善手法を検討する。研究フローを図 5-1 に示す。

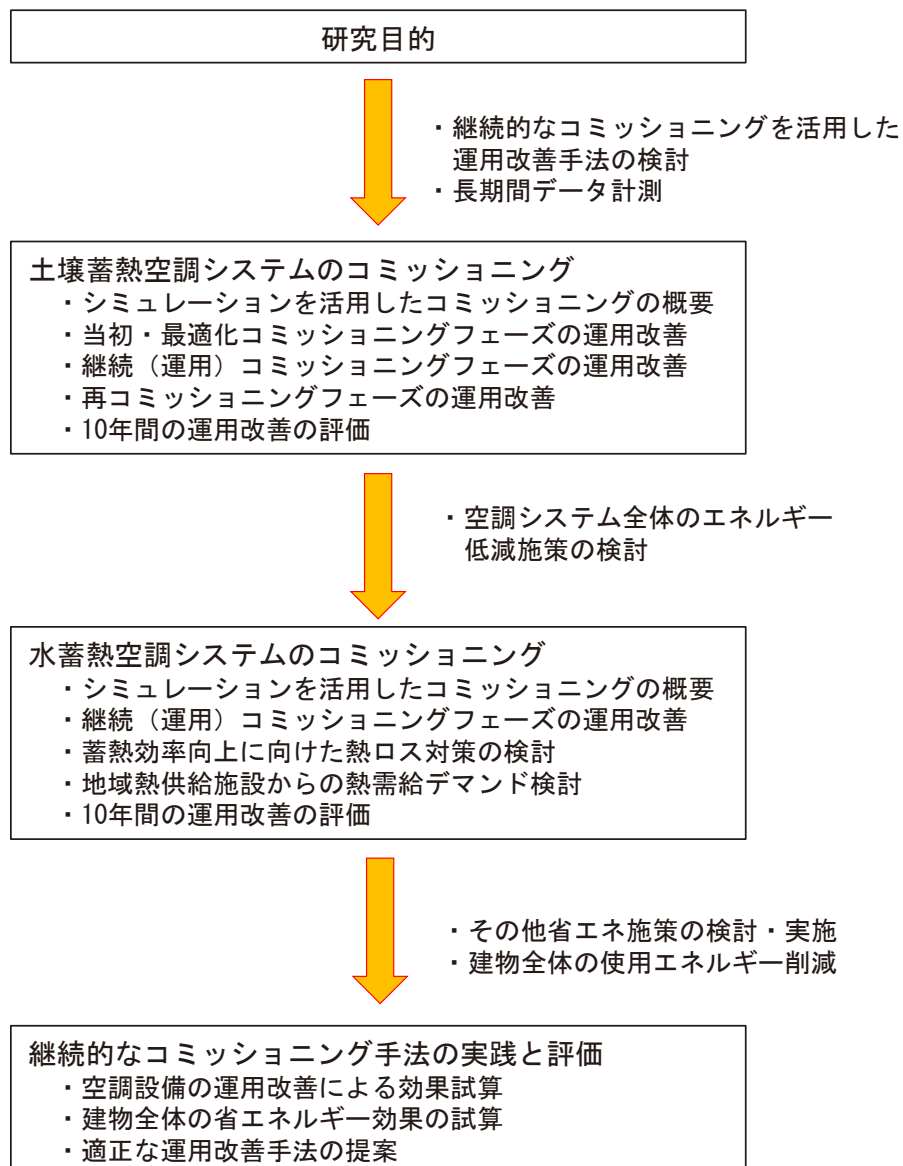


図 5-1 研究フロー

5.4 対象建物の概要

5.4.1 建物概要

ヨンデビル新館は、四国電力株式会社の新本社ビルとして「自然エネルギーの利用」「負荷の抑制」「負荷の平準化」「資源の有効利用と環境負荷の低減」を4つの基本コンセプトとした「環境共生型の省エネオフィスビル」を目指し、2004年3月に竣工した(写真 5-1, 図 5-2)。

ヨンデビル本館に隣接する形で建設され、中央エントランスにより2つのビルを一体的に活用できる計画となっている(図 5-3)。また、2階にコンファレンスホール、食堂を配置、利便性を考慮して本館との連絡通路を設けた。3階には総合健康開発センターを配置している。4階～7階は執務室フロアである。新館には、電力会社特有の通信機械室等はなく、通常のオフィスビルと同様の形態で使用されている(図 5-4)。

外皮計画として窓台部を一部屋外へ張り出すことで、オフィスエリアの有効利用を図りつつ、アルミ庇の採用による日射負荷の軽減など、環境に配慮した建築計画となっている。建築概要を表 5-1 に示す。



写真 5-1 ヨンデビル新館外観



図 5-2 建物の基本コンセプト

表 5-1 建物概要

建物名称	ヨンデビル新館
所在地	高松市丸の内2番5号
建築主・維持管理	四電ビジネス株式会社
基本計画	四国電力株式会社
詳細設計	(株)四電技術コンサルタント (株)安井建築設計事務所 共同企業体
建築面積	2,438.07 m ²
延床面積	13,922.72 m ²
構造	S造, 一部SRC造
階数	地上7階, 地下1階, 塔屋1階
主用途	事務所
運用開始	2004年3月

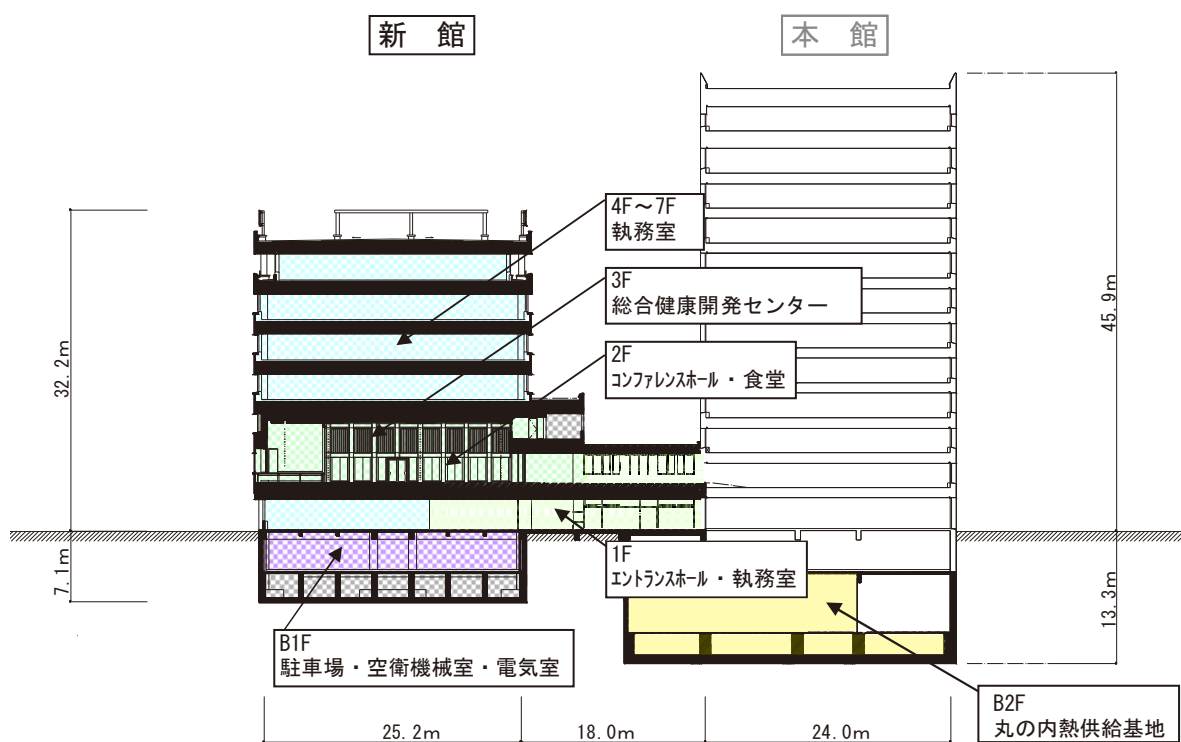


図 5-3 建物断面図

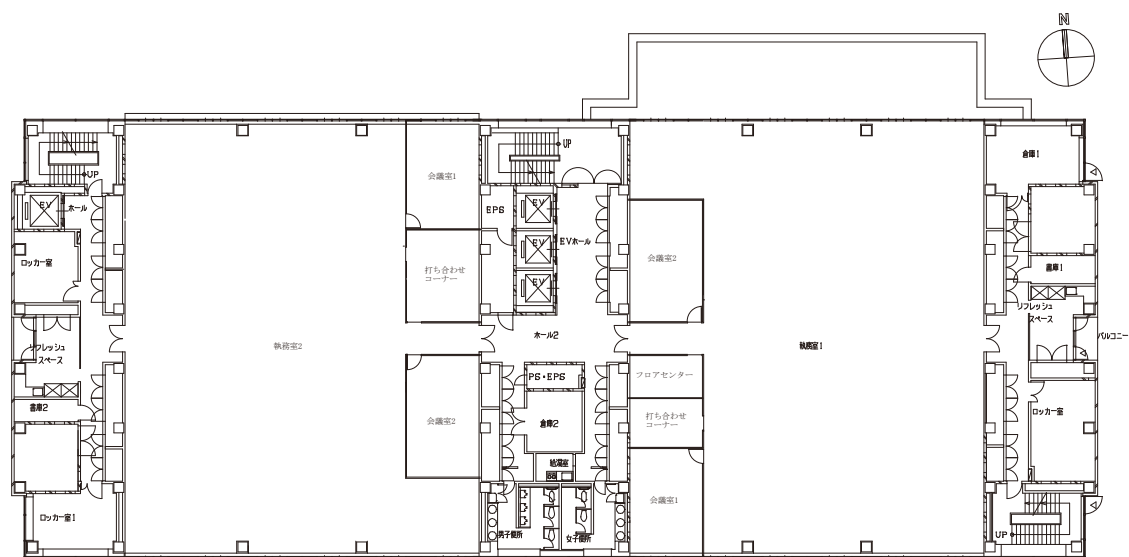


図 5-4 基準階平面図

5.4.2 建築設備概要

ヨンデビル新館では、電力負荷平準化および省エネルギー・環境負荷軽減を実現するため様々な施策を実践している。建築設備概要を表 5-2、建築設備のイメージを図 5-5 に示す。

この建物の特徴として、自己熱源を保有せず、本館地下に設置されている丸の内地域冷暖房施設（以下、地冷）から冷熱、温熱の熱供給を受けている。また、蓄熱の複合化による負荷平準化効果の向上を目的とした空調システムの構成となっており、複合化蓄熱として水蓄熱システム、土壌蓄熱システム、躯体蓄熱システムを導入している。

水蓄熱システムは、蓄熱容積 1000 m³の水蓄熱槽を地下ピットに有している。また、交換熱量 1000kW の熱交換器が 3 台（HEX-1, HEX-2, HEX-3）存在し、時間帯や地域冷暖房から受け入れる冷温水の流量によって運転台数を制御されている。土壌蓄熱空調システムは、屋上の密閉式冷却塔(CT-1 とする)で熱交換した冷水で建物下部の土壌(10000 m³)を冷却することにより蓄熱を行う。また、交換熱量 350kW の熱交換器（HEX-4）が 1 台存在する。

基本的な空調時間は 8 時から 18 時まで（業務時間外の空調は 22 時まで）である。地域冷暖房用空気熱源ターボ冷凍機、水熱交換器、密閉式冷却塔、冷温水往ヘッダー等の外観を写真 5-2 に示す。なお、本章では還ヘッダーと往ヘッダーで囲まれた部分を一次側、空調機側を二次側と定義する。

空調 2 次側システムには躯体蓄熱が採用されており、夜間に建物躯体に冷熱を蓄え、その熱を昼間の空調に利用している。対象システムにおいては、熱容量の大きい床スラブに最大限蓄熱することが効果的であると考えたため、床スラブ上面及び下面の両方に冷気を吹き付ける方式としており、4F～6F で行われている。また、ナイトパージを採用しており、夜間の低温な外気を取り入れ室温を下げることで、翌日の冷房負荷を削減している。空調方式としては、各階に配置された四管式の AHU と二管式の FCU によって空調を行っており、内部負荷に合わせて空調吹出方式を切り替える床／天井吹出方式（暖房：床吹出、冷房：天井吹出）を採用している。なお、躯体蓄熱システムについては、補助的に使用する目的で導入されており、通常は使用していない。

冷温水系は主に地域冷暖房、冷水系は土壌蓄熱およびフリークーリングに使用する。空調系統図を図 5-6、空調システムの機器仕様を表 5-3 に示す。その他、中間期の自然通風、ナイトパージ、昼光照明制御、中水・雨水利用などを行っている。

表 5-2 建築設備の概要

熱源方式	丸の内地域熱供給施設
	供給力(冷熱/温熱)：32/9[GJ/h]
	供給温度(冷熱/温熱)：5/48[℃]
熱交換器容量	1,000[kW](新館用HEX-1～3)
蓄熱設備	土壌蓄熱、水蓄熱、躯体蓄熱
空調方式	各階空調機方式（冷温水＋冷水（土壌蓄熱）の四管式）
	個室はFCU方式
空調吹出方式	床／天井吹出切替（4～6階執務室）
搬送設備	インバータ／末端圧制御方式(2次側系統)
換気設備	全熱交換器（外気冷房・ナイトパージ可能）

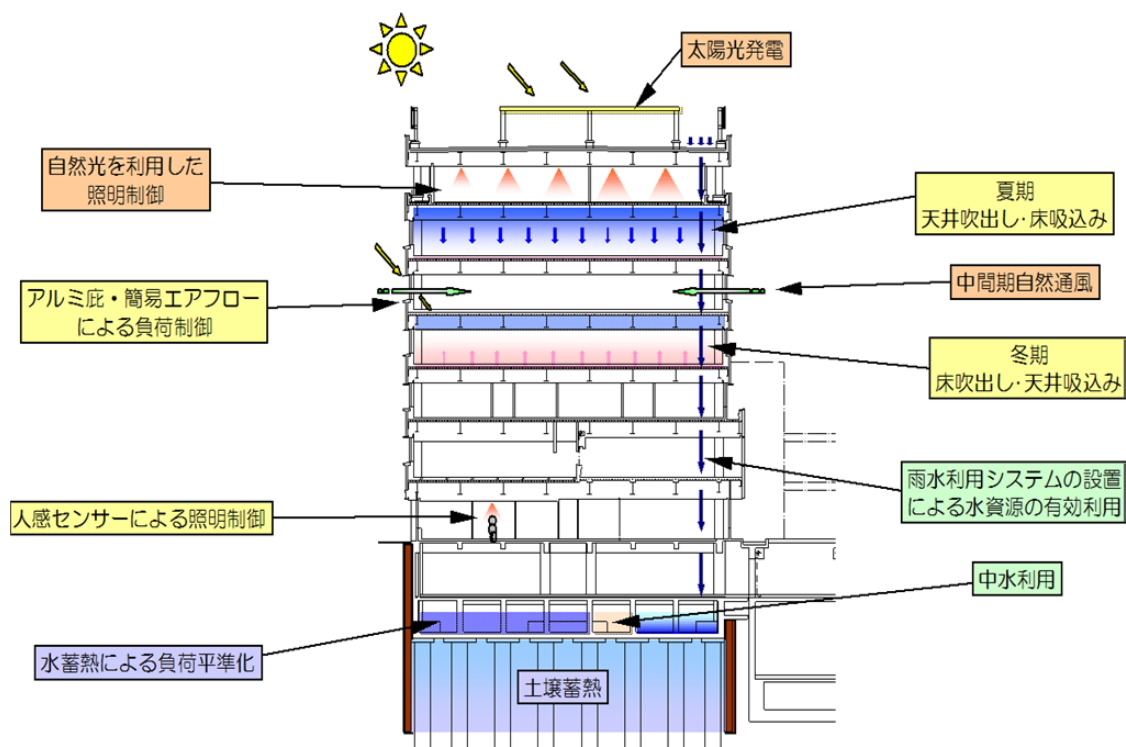


図 5-5 建築設備のイメージ図

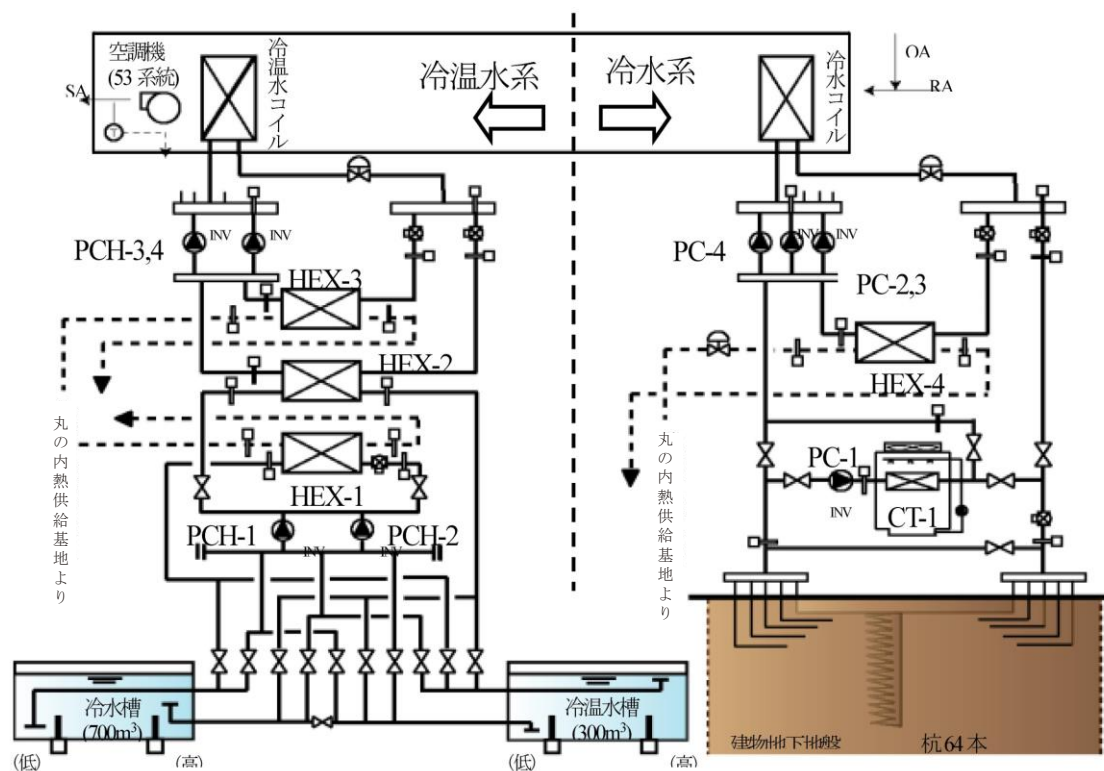


図 5-6 空調システム系統図



地域熱供給ターボ冷凍機



屋上密閉式冷却塔



水熱交換器 (HEX-4)



冷温水(往)ヘッダー



ポンプ (PC-1)



各階コンパクト AHU



電化厨房



太陽光発電設備

写真 5-2 建築設備外観

表 5-3 機器仕様

機器名	記号	仕様
冷却塔	CT-1	冷却能力498.8kW、冷却水入口温度37.5℃ 冷却水出口温度32℃ファン台数4台、ファン定格出力1.5KW/台
熱交換器	HEX-1	交換熱量1000kW、1次側冷水入口温度6℃ 1次側冷水出口温度13℃、1次側流量122.9m ³ 1次側圧力損失0.99Kg/cm ² 、2次側冷水入口温度14℃、2次側冷水出口温度7℃ 2次側流量122.9m ³ 、2次側圧力損失0.99Kg/cm ²
	HEX-2	交換熱量1000kW、1次側冷水入口温度7℃ 1次側冷水出口温度14℃、1次側流量122.9m ³ 1次側圧力損失0.96Kg/cm ² 、2次側冷水入口温度18℃、2次側冷水出口温度8℃ 2次側流量86.0m ³ 、2次側圧力損失0.48Kg/cm ²
	HEX-3	交換熱量1000kW、1次側冷水入口温度6℃ 1次側冷水出口温度13℃、1次側流量122.9m ³ 1次側圧力損失0.97Kg/cm ² 、2次側冷水入口温度17℃、2次側冷水出口温度7℃ 2次側流量86.0m ³ 、2次側圧力損失0.49Kg/cm ²
	HEX-4	交換熱量1000kW、1次側冷水入口温度6℃、 1次側冷水出口温度13℃、1次側流量43.0m ³ 、 1次側圧力損失0.47Kg/cm ² 、2次側冷水入口温度17℃、2次側冷水出口温度7℃ 2次側流量30.1m ³ 、2次側圧力損失0.23Kg/cm ²
冷温水1次ポンプ	PCH-1,2	定格流量66.0m ³ /h、定格消費電力11kW、定格用程20kPa
冷温水1次ポンプ	PCH-3,4	定格流量90.0m ³ /h、定格消費電力15kW、定格用程30kPa
冷水ポンプ	PC-1	定格流量90.0m ³ /h、定格消費電力15kW、定格用程30kPa
冷水2次ポンプ	PC-2,3	定格流量24.0m ³ /h、定格消費電力5.5kW、定格用程30kPa
冷水ポンプ	PC-4	定格流量5.4m ³ /h、定格消費電力0.4kW、定格用程10kPa

5.4.3 土壌蓄熱空調システムの概要

新技術として採用した自然エネルギーを利用した土壌蓄熱空調システムは、外気が低温となる冬期の夜間に密閉式冷却塔で循環水を冷却し、建物の杭内部に設置した配管を通じて循環することにより土壌に蓄冷し、夏期に冷熱として利用するものである(図 5-7)。

64 本ある基礎杭の内部にらせん状に総長 14,000m の架橋ポリエチレン配管を配置し、循環水と土壌との熱交換を行っている(図 5-8、写真 5-3)。

運用方法としては、冬期夜間に、冷却塔 CT1 とポンプ PC1 を運転して外気と熱交換を行い、土壌に冷熱を貯める（これを蓄熱運転と呼ぶ）。貯めた冷熱は夏期の昼間に冷水ポンプ PC2 および PC3 を交互に運転して取り出し、空調機の冷水コイル（土壌蓄熱用）でプレカールの冷熱として使用されている（これを採熱運転と呼ぶ）。

土壌蓄熱空調システムの運転制御は、外気温度や土壌内平均温度、土壌に対する冷水往還温度差などにより行っている。冷水コイルの冷水流量は、コイル冷水出口温度が 23℃ になるように制御されている。また、往ヘッダーの冷水温度が 19℃ となるように熱交換器 HEX4 の地冷側の冷水流量が制御される。往ヘッダーの冷水温度が 19℃ 以下であれば、HEX4 に地冷からの冷水は流れない。

本建物では BEMS を利用して空調システムの運転データを収集している。土壌温度は、図 5-9 の地点 A～E の 5 箇所にて、杭頭より深さ 500mm、3500mm、6500mm の 3 点で計測している。対象建物の敷地土壌は、表土層から下は GL-12m 付近まで緩い砂質地盤が続き地下水位は GL-1m から 2m と高い。そのため、地下掘削時の安定対策、湧水対策として止水壁を設けている(写真 5-4)。本章では、止水壁で囲まれた領域内では地下水の流れは無いとし、地下水による熱の移動を考慮しない。

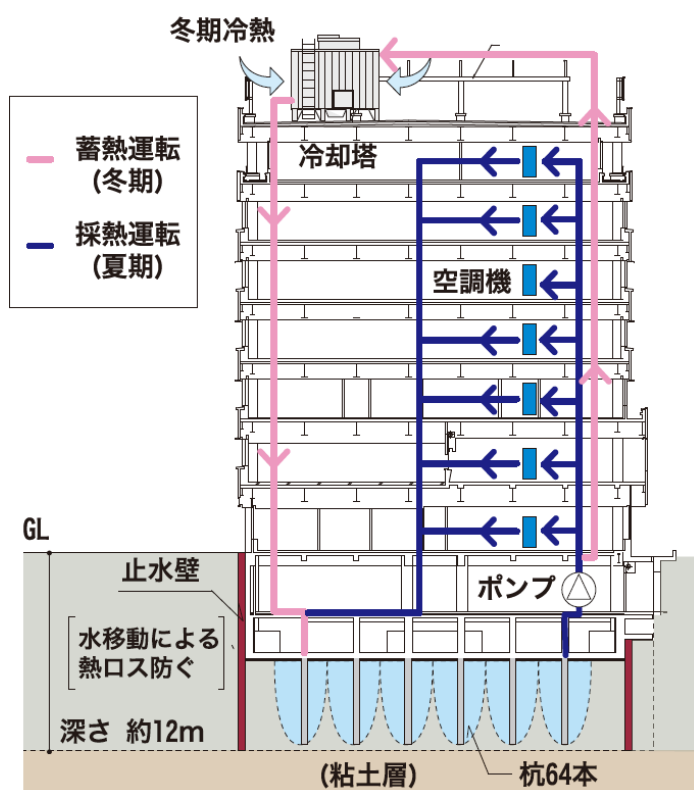


図 5-7 土壌蓄熱空調システムの概念図

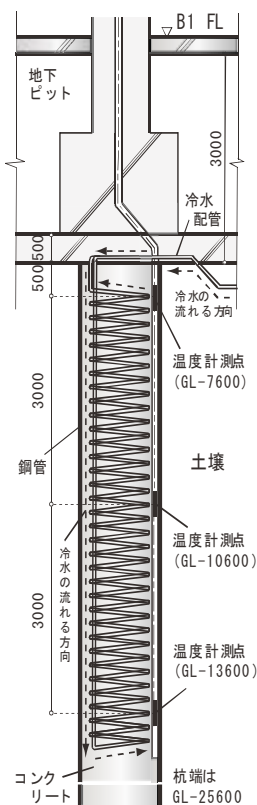


図 5-8 杭の断面図

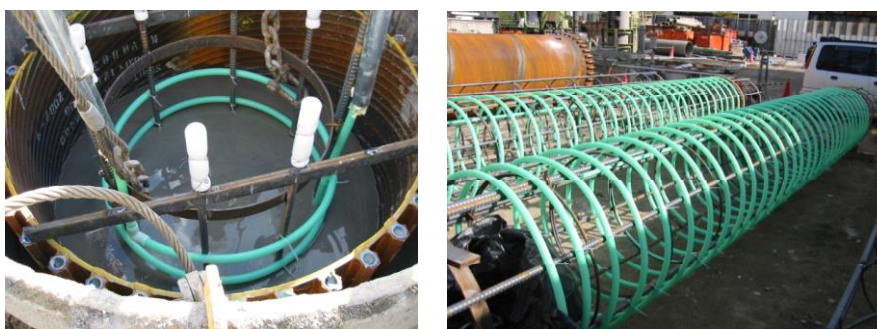


写真 5-3 熱交換配管

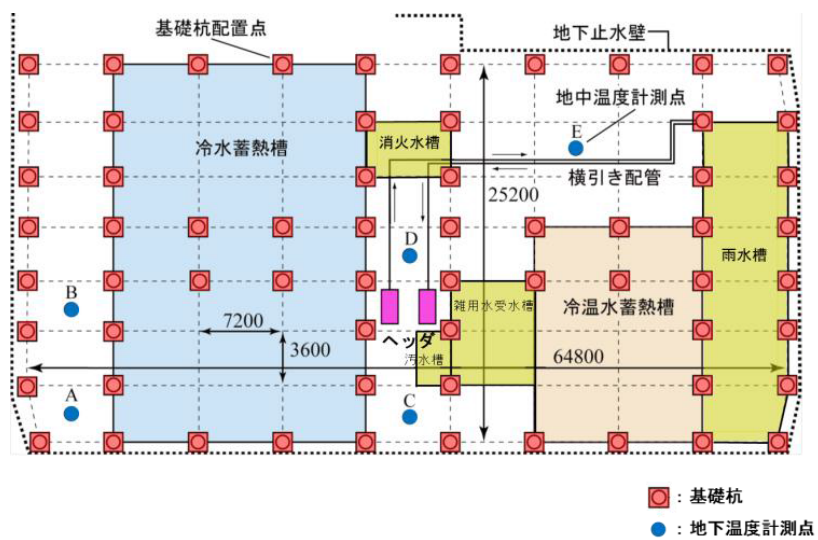


図 5-9 基礎杭の配置図



写真 5-4 止水壁

5.4.4 水蓄熱空調システムの概要

丸の内地域冷暖房施設は、近隣の3施設に対しても冷水・温水を供給しているため負荷平準化による供給熱量のデマンド低減を目的とし、専用の水熱交換器を介して、新館地下の水蓄熱槽（冷水槽 700 m³、冷温水槽 300 m³）に蓄熱している。蓄熱槽方式は、L字型連通管を採用した「温度成層型多槽連結方式」である。水蓄熱空調システムの概要を表 5-4 に、水蓄熱槽の平面配置図を図 5-10 に示す。

表 5-4 水蓄熱空調システムの概要

	水蓄熱システム
熱源	地冷で製造した冷温熱
サイクル	日間（昼間⇔夜間）
蓄熱媒体	地下ピットを利用した蓄熱槽内の水
蓄熱容積	1,000m ³
蓄熱方法	夜間に蓄熱槽内の水と地冷殻の冷温水を熱交換に通し、直接冷却・加熱することにより、蓄熱を行う。
放熱方法	昼間に蓄熱槽内の冷温水を空調機へ送水し、空調を行う
蓄熱	夜間（22：00～8：00）
放熱	昼間

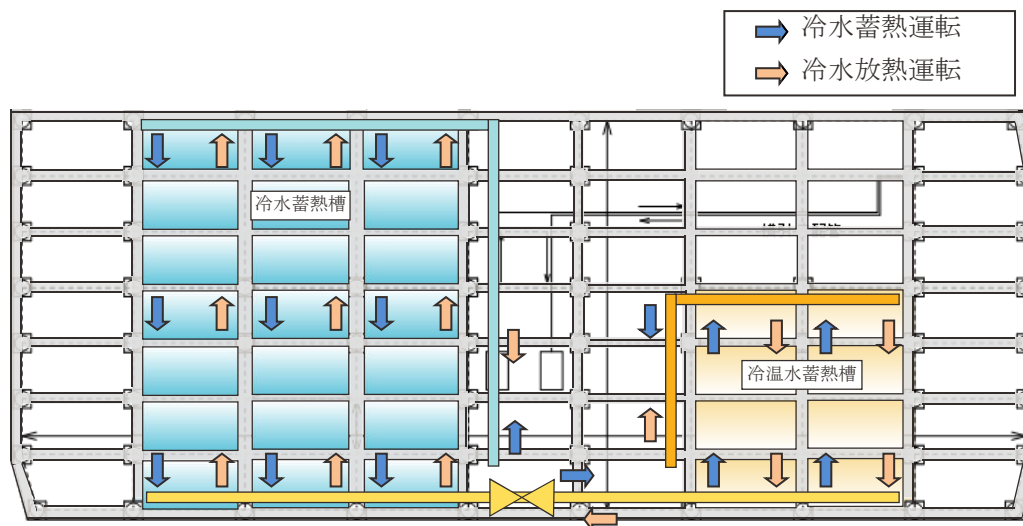


図 5-10 水蓄熱槽平面配置図

5.4.5 丸の内地域冷暖房施設の概要

前節で述べたように、丸の内地域冷暖房施設は、近隣の 3 施設に対しても冷水・温水を供給している。施設概要を図 5-11 および表 5-5 に示す。

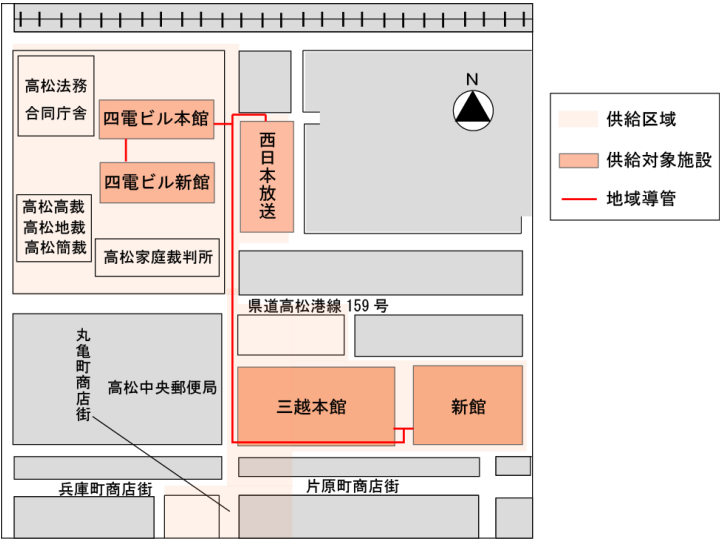


図 5-11 供給区域図

表 5-5 丸の内地域冷暖房施設概要

丸の内地域冷暖房施設		
供給対象施設		・三越高松店 ・西日本放送 ・ヨンデンビル本館 ・ヨンデンビル新館
供給区域面積		2.4Ha
熱供給基地		ヨンデンビル本館地下
設備能力	加熱能力	9.4 GJ/h
	冷却能力	32.9 GJ/h
蓄熱槽容量		2,340m ³

5.4.6 空調システムの運転制御方法

本建物の空調システムの制御を図 5-12～図 5-15 に示す。

(1) 夏期夜間

冷水系

① 冷水供給

還ヘッドからの高温の水と、地冷からの低温の水を、熱交換器 HEX-4 で熱交換し、冷水系へ冷水供給を行う。

冷温水系

① 冷水供給

冷水系と同様に、還ヘッドからの高温の水と、地冷からの低温の水を、熱交換器 HEX-3 で熱交換し、冷温水系へ冷水供給を行う。

② 水蓄熱運転

地冷からの低温の水と水蓄熱槽からの高温の HEX-1 で熱交換し、水蓄熱を行う。

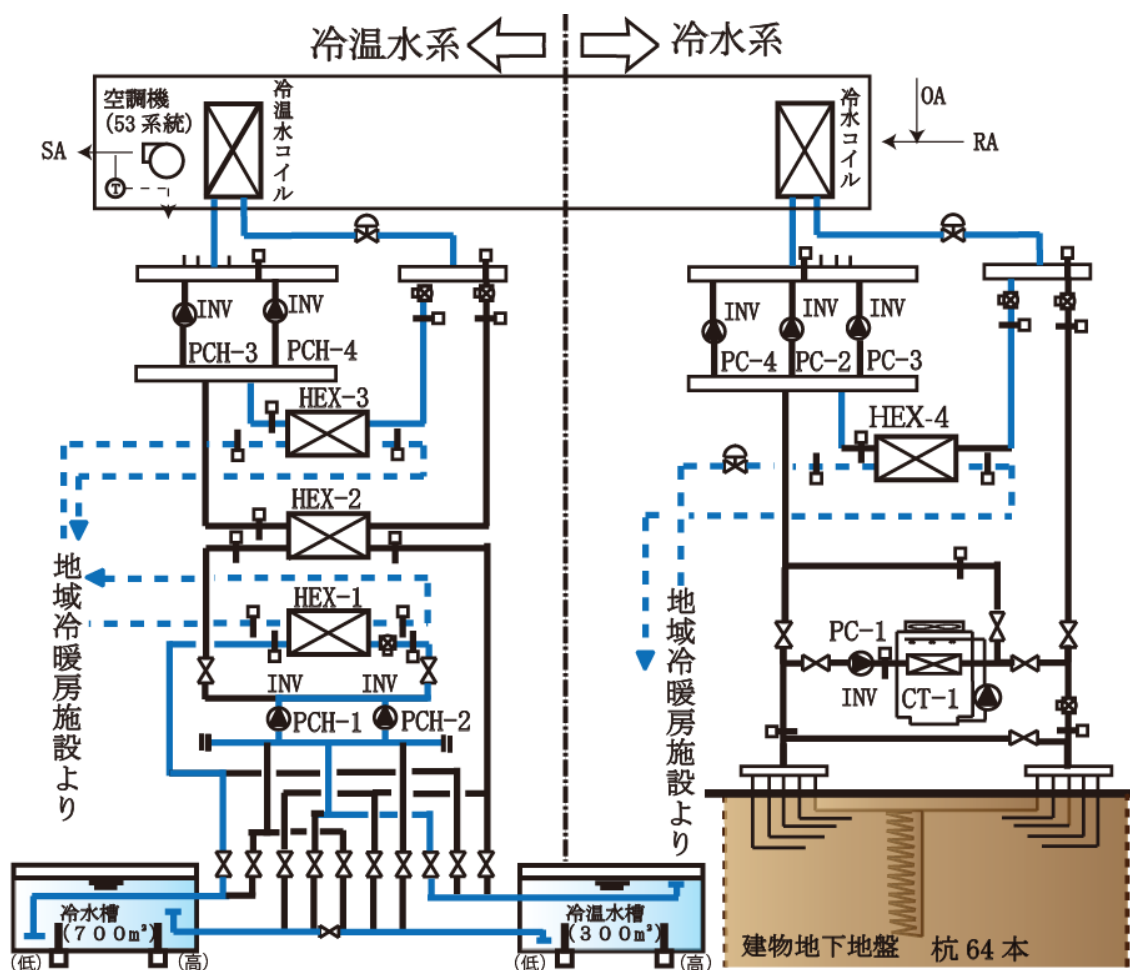


図 5-12 運転方法（夏期夜間）

(2) 夏期昼間

冷水系

① 土壤放熱運転

土壤内に蓄えた冷熱を取り出し（送水温度 18℃以下）、冷水系へ冷水供給を行う。

冷温水系

① 冷水供給

還ヘッダーからの高温の水と、地冷からの低温の水を、熱交換器 HEX-3 で熱交換し、冷温水系へ冷水供給を行う。

② 水蓄熱槽放熱運転

還ヘッダーからの高温の水と、水蓄熱槽からの低温の水を、熱交換器 HEX-2 で熱交換し、冷温水系へ冷水供給を行う。

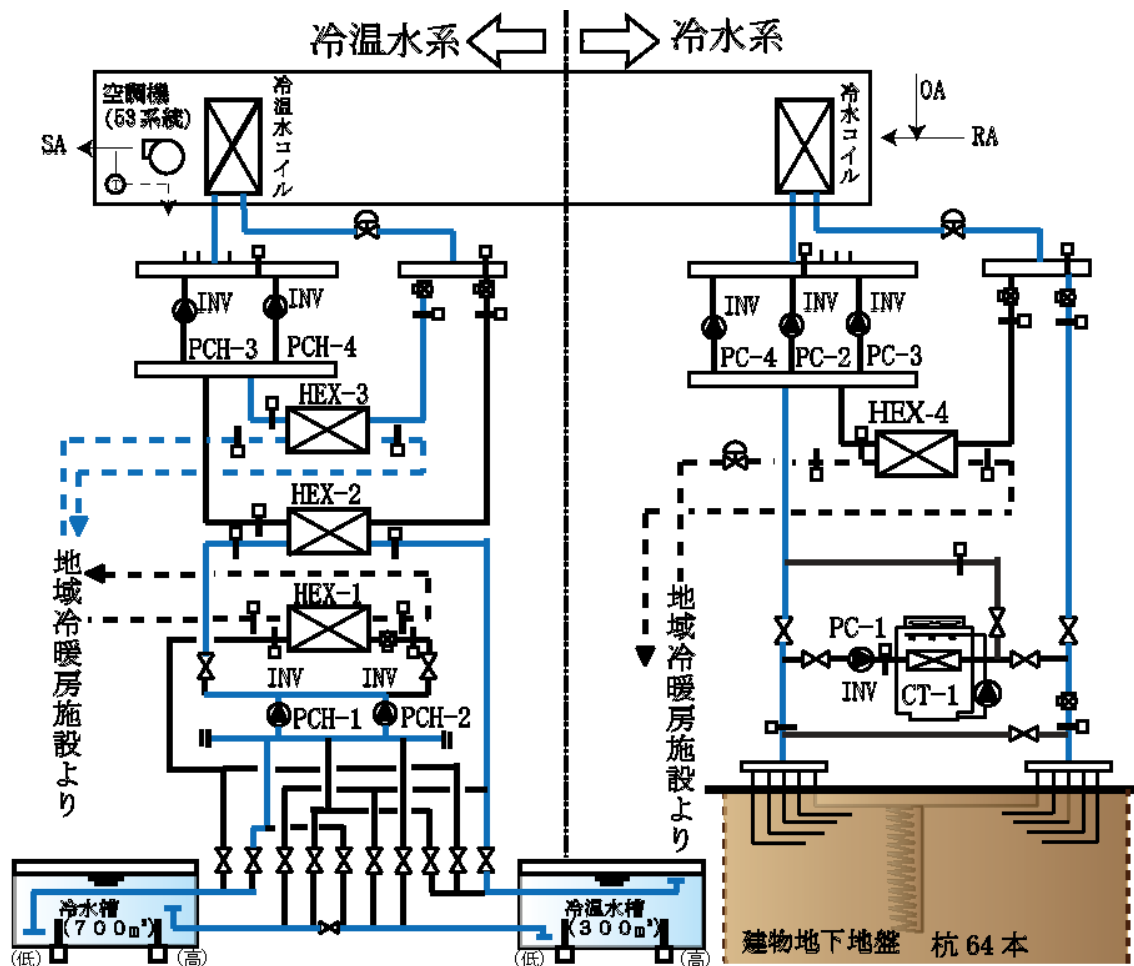


図 5-13 運転方法（夏期昼間）

(3) 冬期夜間

冷水系

① 冷水供給

還ヘッダーからの高温の水と、地冷からの低温の水を、熱交換器 HEX-4 で熱交換し、冷水系へ冷水供給を行う。

② 土壌蓄熱運転

冷却塔により、夜間の冷気を取り入れて冷水を冷却し、熱交換器及び土壌内に埋設されたポリエチレン配管を介して土壌蓄熱を行う。

冷温水系

① 水蓄熱運転

地冷からの高温の水と水蓄熱槽からの低温の水を HEX-1 で熱交換し、水蓄熱(温水)を行う。

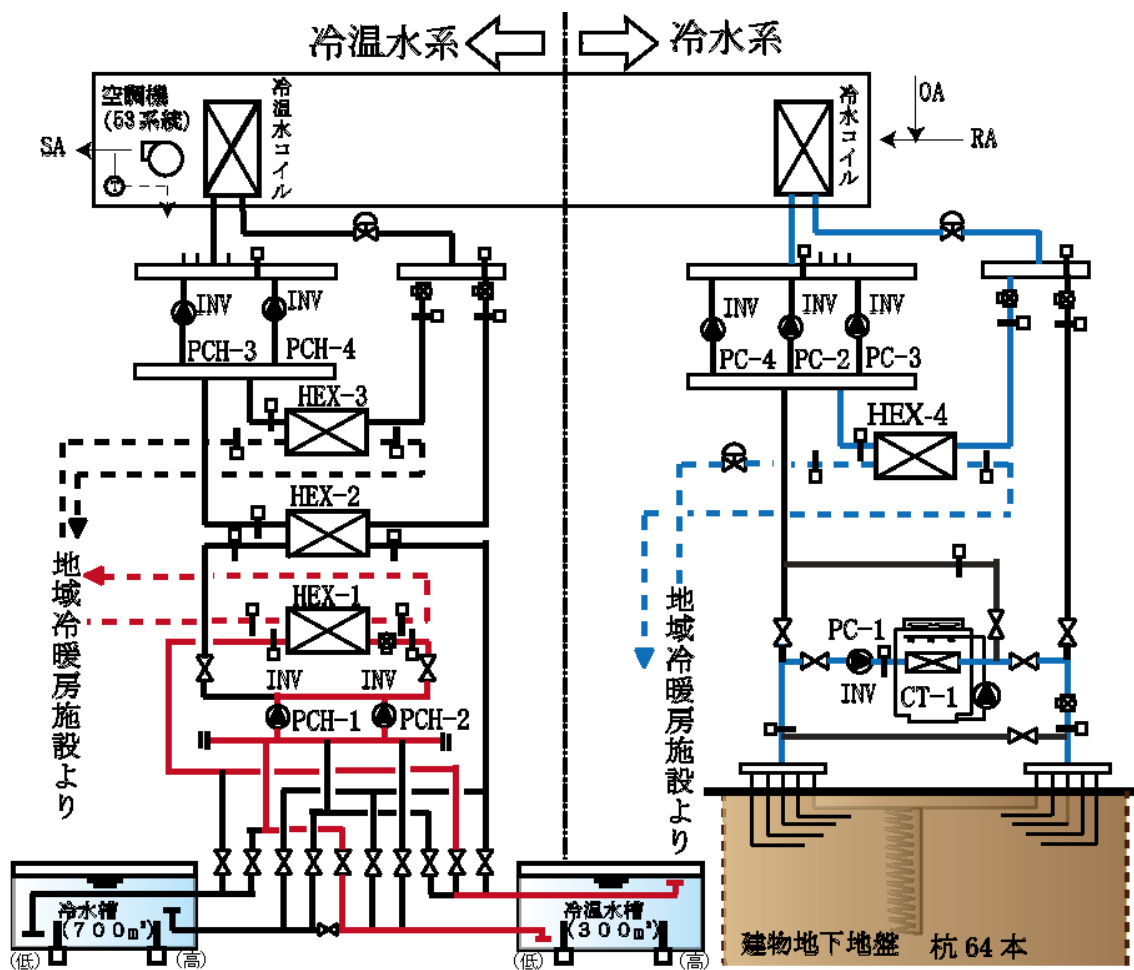


図 5-14 運転方法 (冬期夜間)

(4) 冬期昼間

冷水系

① 冷水供給

還ヘッダーからの高温の水と、地冷からの低温の水を、熱交換器 HEX-4 で熱交換し、冷水系へ冷水供給を行う。

② 冷水供給

冷却塔 CT-1 により冷水系へ冷水供給を行う。

冷温水系

① 温水供給

還ヘッダーからの低温の水と、地冷からの高温の水を、熱交換器 HEX-3 で熱交換し、冷温水系へ温水供給を行う。

② 水蓄熱槽放熱運転

還ヘッダーからの低温の水と、水蓄熱槽からの高温の水を、熱交換器 HEX-2 で熱交換し、冷温水系へ温水供給を行う。

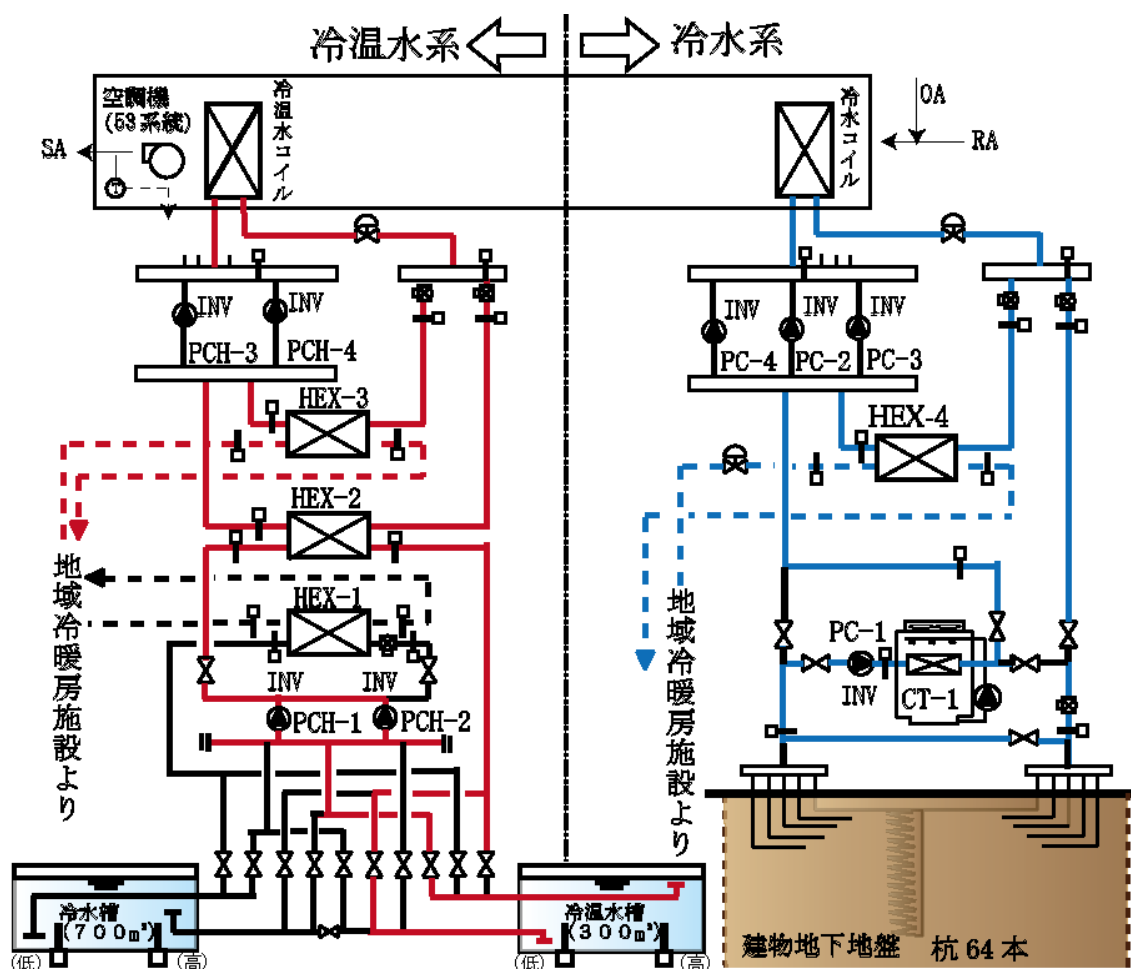


図 5-15 運転方法 (冬期昼間)

(5) 制御ロジック

本システムの制御ロジックを以下に示す。

1) 熱交換器制御

〈HEX-1〉

熱交換器の2次側出口温度が設定値になるよう、1次側2方弁の比例制御を行う。その時、1次側ポンプ(PCH-1,2)は1台の交互、流量固定(100%)運転とする。ただし、1次側2方弁が全開時に2次側出口温度が満たされない時は、2次側出口温度によるインバータ制御を行う。

〈HEX-2〉 〈HEX-3〉

熱交換器の2次側出口温度が設定値になるよう、1次側2方弁の比例制御を行う。

〈HEX-4〉

冷水系往ヘッダー温度が設定値になるよう、1次側2方弁の比例制御を行う。

2) 冷水系切り替え制御

〈冬期昼間〉

ベースは基本的に冷却塔(CT-1)で、負荷熱量が設定値以上になった場合、熱交換器(HEX-4)も運転する。しかし、負荷熱量がPC-1の最小流量以下になった場合、PC-1を停止し、HEX-4に切り替えることとする。

冷却塔出口冷却水温度が設定値になるよう、冷水ポンプ(PC-1)の流量をインバータ制御する。

3) 冷温水系台数制御

ベースは基本的に熱交換器(HEX-3)で、負荷熱量が地冷からの受入熱量の上限を超える場合、熱交換器(HEX-2)も運転する。

4) 冷却塔ファン運転台数制御

冷却塔出口温度によって、冷却塔ファンのON/OFF制御を行う。

5) 水蓄熱槽制御

夜間、各蓄熱槽内温度により残蓄熱量の算出を行い、設定された目標蓄熱量となるよう地冷受入による蓄熱運転を行う。夏期は冷温水蓄熱槽と冷水蓄熱槽を併用して使用する。冬期は冷温水蓄熱槽を使用し、冷水蓄熱槽は使用しない。

6) 土壌蓄熱制御

冬期夜間、冷却塔により夜間の冷気を取り入れて冷水を冷却し、熱交換器及び土壌内に埋設されたポリエチレン配管を介して土壌蓄熱を行い、夏期に土壌内に蓄えた冷熱を取り出し、空調機の外気・還気の予冷に使用する。

7) 空調機運転制御

給気温度(設定値:18℃)により、冷温水コイルの流量を制御する。冷水コイル出口水温(設定値:23℃)により、冷水コイルの流量を制御する。室内温度によりVAVの比例制御を行う。

5.5 コミッショニングを活用した運用改善

5.5.1 コミッショニング体制

本建物では、設計時に計画された最新の建築設備の要求性能を実現するために竣工後 10 年間に亘り、関係者（建物利用者、建物所有者・維持管理者、設計者）による段階的なコミッショニング体制を構築した(図 5-16)。このコミッショニング体制により、定量的な検証・確認を行い、適切な調整や改修を検討し確実な性能実現と適切な維持管理を実践することが可能となる。この中で、筆者は建物利用者および基本計画者の立場として、統括的・継続的にこのコミッショニングチームのハンドリングを行いながら運用改善を実施する。

本章では、実測データを基にしたシミュレーション解析による省エネルギー評価を継続的に実施し、運用方法の適正化等に取り組んだ。PDCA サイクルにおける運用改善の実施体制を図 5-17 に示す。

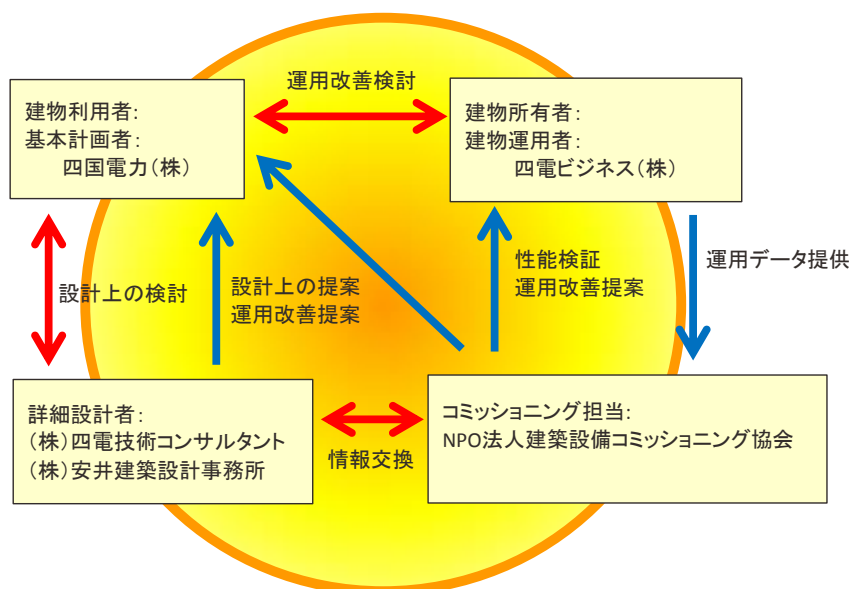


図 5-16 コミッショニング体制

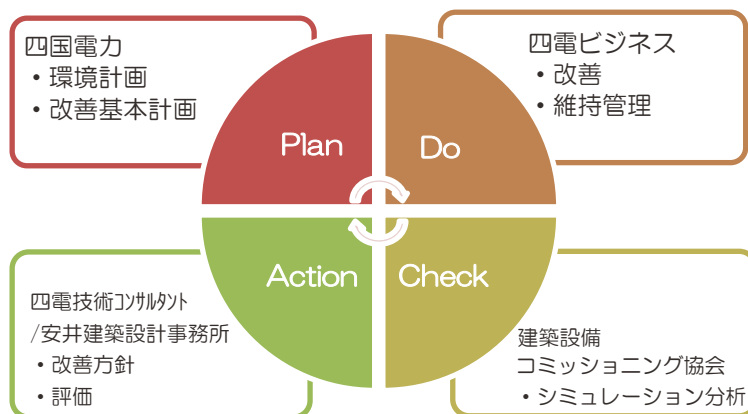


図 5-17 実施体制

5.5.2 コミッショニングフェーズについて

コミッショニングフェーズとしては、土壌蓄熱空調システムやその他設備の設計時から竣工後3年目までの①当初・②最適化コミッショニングと、4年目から10年目における定常的な運用段階に入ってからのも蓄熱・2次側空調システムを含んだ③継続・④再コミッショニングの大きく2段階で実施した(図5-18)。また、将来的なコミッショニングとして、現状では試行段階であるが今後段階的に実施する予定の項目を整理した。

具体的な実施項目として①当初コミッショニングフェーズでは、試運転調整および運用開始時期において導入した水蓄熱システム、自然換気システム、ナイトパージシステムなどの建築設備が運用状態で正常に稼働するかを検証する。

②最適化コミッショニングフェーズでは、土壌蓄熱空調システムの運用改善に取り組む。土壌蓄熱空調システムは自然エネルギーを利用した季節間蓄熱であることと新技術として先進的に導入したため運用方法についての知見が殆どないため、運転データを蓄積しながらシミュレーションを構築し、短期間での運用改善を図る。

③継続(運用)コミッショニングフェーズでは、①②で得られた知見をもとに運用管理をベースに継続的なコミッショニングを実施する。地域冷暖房施設の需給デマンド熱量の低減やピークカット運転、建物使用エネルギー量の低減を目標に空調システムのバランスやその年の気候を鑑みながら、運転条件を変更し適正化を図る。なお、建物の使用状況は建物使用者の状況により変化するため、逐次状況を把握しながら運用改善に反映を実施することが必要である。

④再コミッショニングフェーズでは、③の運用改善の中で設備改修などが必要とされる項目について実施し、改修後はシミュレーション等により再度適正化を図る。

以上の内容をもとにフェーズ毎に運転改善を実施した。

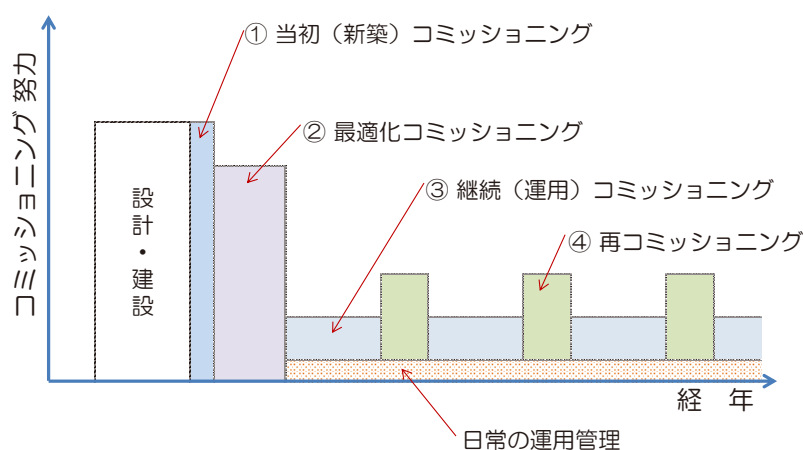


図 5-18 継続的なコミッショニングフェーズのイメージ

5.6 土壌蓄熱空調システムにおける継続的なコミッショニング

本建物で採用した「杭基礎を利用した自然エネルギーによる土壌蓄熱空調システム」は、設計時において金ら⁵⁻¹⁹⁾が3次元差分法によるシミュレーションを実施し、期間蓄熱量・採熱量、効率等の効果予測を行い、有用性を確認したうえで採用を決定している。

土壌蓄熱空調システムは、季節間蓄熱方式であるため、1年間のインターバルでしか運用実績が得られない。このため竣工後の実運用段階において、試行錯誤の運用でチューニングを図ることは困難と考えられたが、BEMS データの分析による問題点の抽出、システムシミュレーションを用いたコミッショニングによる短期間のチューニングで高効率な運用改善を試行した。

5.6.1 当初・最適化コミッショニングフェーズにおける運転条件の検討

竣工当初は夏期採熱時において、土壌内平均温度と還り温度等の関係などにより制御を行っていたが、過蓄熱状態等の原因よりシステム効率が悪い結果となった。2001～3年目の新技術である土壌蓄熱システムの最適化コミッショニングフェーズにおいて、宮田ら⁵⁻⁶⁾が土壌蓄熱空調システムの詳細シミュレーションモデルを構築し、冷水温度、流量等を入力パラメータとしてシステム効率向上を目的とした検討を行った(図5-19)。

シミュレーション結果より、蓄熱時においてポンプPC1冷水流量は20m³/h、冷却塔ファンインバータ設定値は50%が最もエネルギー消費量が少ない結果となった(図5-20)。しかし、冷水流量が20m³/hとなるようにPC1のインバータ値を設定するとポンプ本体が振動を起こして動作が不安定になったため、蓄熱時の冷水流量は30m³/hとして運転を行った。振動の原因としては、設計時にPC1は昼間における冬期冷房時のフリークーリング用のポンプを兼ねていたためポンプ容量が大きくインバータで正常に制御できる範囲を外れていたことがあげられる。また、採熱時においては、土壌蓄熱冷水系統に15m³/hでの一定運転とした場合が、最もシステム効率が高くなる結果となった(図5-21、表5-6)。

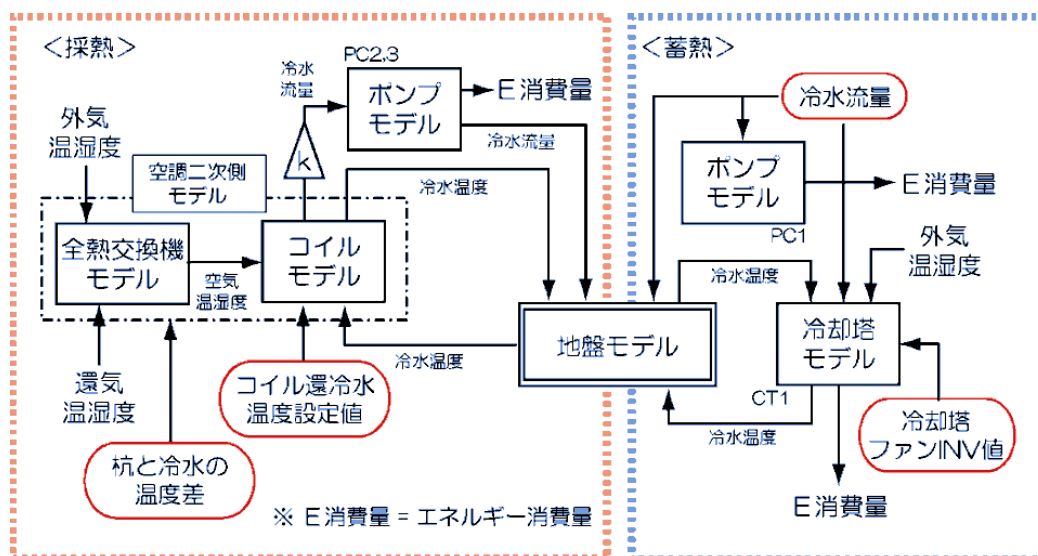


図 5-19 解析モデル

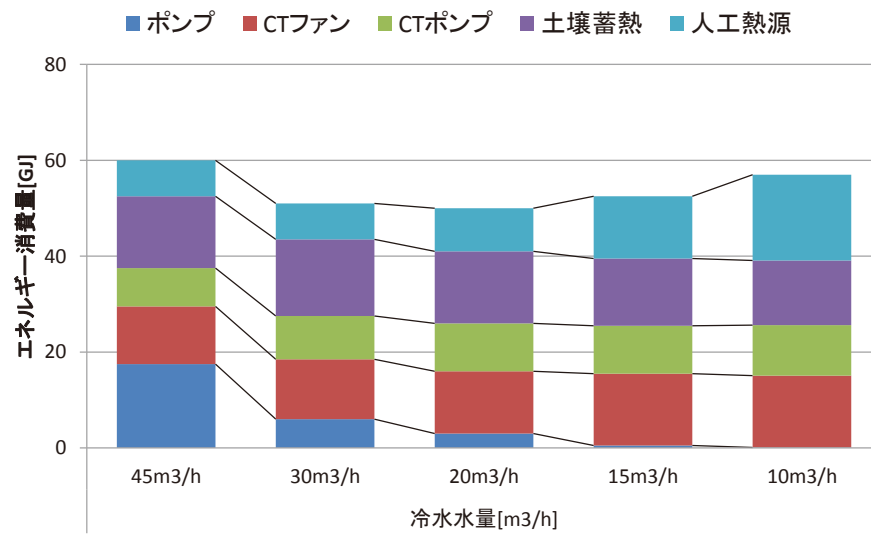


図 5-20 運転パラメータ検討（蓄熱時ポンプ冷水流量）

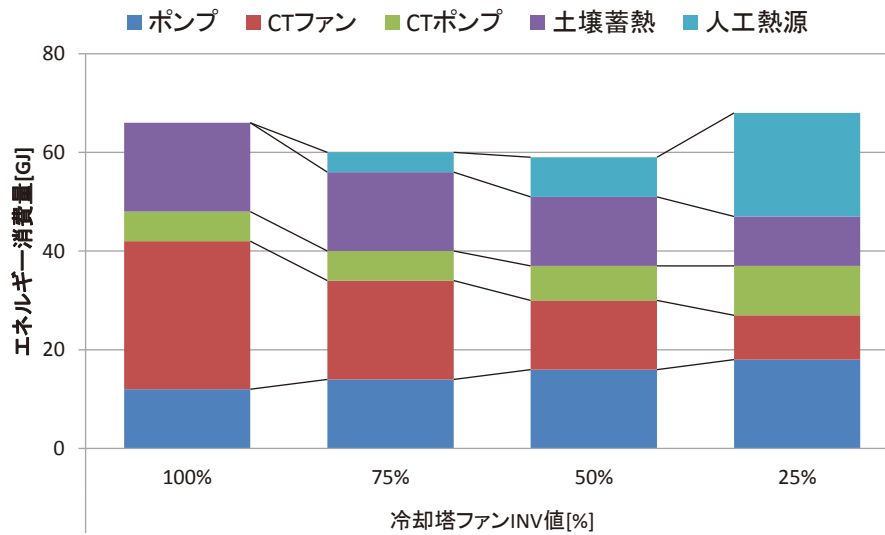


図 5-21 運転パラメータ検討（冷却塔ファンインバータ値）

表 5-6 採熱ポンプ(PC2,3)運転パラメータ検討

ケース	制御ロジック		熱量			消費電力[GJ]		蓄熱時 平均流量 [m³/h]	効率		
			蓄熱量 [GJ]	採熱量 [GJ]	蓄採熱比 [-]	蓄熱	採熱		蓄熱効率 [-]	採熱効率 [-]	システム効率 [-]
CASE 1	温度一定	25℃	279.4	176.0	63.0%	21.93	9.71	34.23	12.74	18.13	5.56
CASE 2	流量固定	20m³/h	279.4	203.9	73.0%	21.93	5.13	20.00	12.74	39.73	7.53
CASE 3		15m³/h	279.4	197.5	70.7%	21.93	3.70	15.00	12.74	53.44	7.71
CASE 4		10m³/h	279.4	175.5	62.8%	21.93	2.42	10.00	12.74	72.64	7.21

5.6.2 当初・最適化コミッショニングフェーズにおける運転実績

(1) 1年目（2005年）の運転実績

1年目の蓄熱運転期間は、2004年12月～2005年4月であるが、12月からの2ヶ月間は試運転期間であり、密閉式冷却塔の散水を行わず運転したため、実際の土壌への蓄熱運転期間は2005年2月3日～2005年4月14日の期間である。また、採熱期間は、2005年6月25日～2005年7月4日、2005年7月25日～2007年11月12日までである。

蓄熱時の冷水水量は50m³/hである。採熱時は、空調機出口温度が23℃になるように2方弁制御を行い、それにあわせてインバータによる流量制御を行っている。以下に1年目の運転実績を示す。土壌蓄熱空調システムの年間の蓄熱量と採熱量を図5-22および表5-7に示す。夏期採熱は11月まで確保することが出来た。蓄熱量に対して夏季採熱量の割合（蓄熱効率）は68%であった。

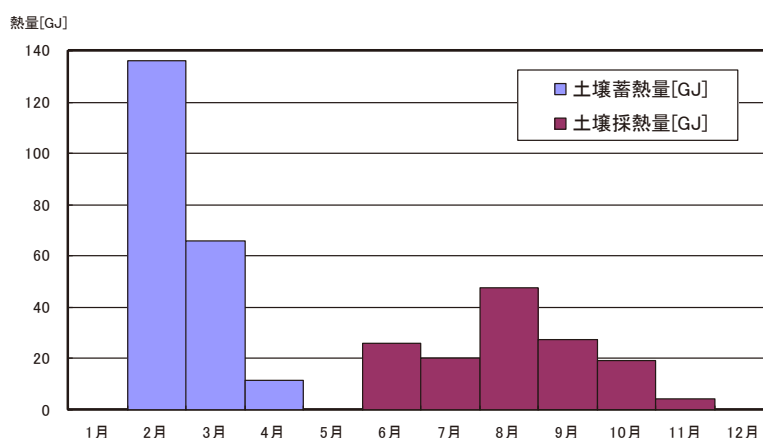


図 5-22 1年目の蓄採熱量の変化

表 5-7 1年目の蓄採熱量のまとめ

	土壌蓄熱量[GJ]		土壌採熱量[GJ]
	試運転	実運転	
2005年1月	10.2		—
2005年2月		136.0	—
2005年3月		65.9	—
2005年4月		11.5	—
2005年5月		—	—
2005年6月		—	25.8
2005年7月		—	20.1
2005年8月		—	47.8
2005年9月		—	27.6
2005年10月		—	19.3
2005年11月		—	4.5
合計	10.2	213.4	145.1
割合		100%	68%

1) 地域冷暖房熱供給負荷平準化効果

a. ピークカット率（夏期ピーク日）

本システムと地域冷暖房（以下 DHC）引込冷水の比較により，効果の数値的比較を行った(式 5-1)。この結果，冷房負荷のピーク 8 月 15 日(月)の土壤蓄熱利用による負荷軽減率（ピークカット率）は 8.7%であった(図 5-23)。本システムが負荷平準化効果に効果的であると確認した。

ピークカット率（夏季ピーク日 8/15）

$$\begin{aligned}
 &= \text{本システムの昼間ピーク採熱量（実測値）} : A \\
 &\quad \div (\text{昼間ピーク DHC 引込冷水量（実測値）} + A) \quad \dots (5-1) \\
 &= 0.344\text{GJ} \div 3.964\text{GJ} \\
 &= 8.7\%
 \end{aligned}$$

b. ピークシフト率（年間）

夏季の冷房熱量に対する土壤蓄熱利用の割合（負荷移行率）が 5.5%であった(図 5-24)。

ピークシフト率（年間）

$$\begin{aligned}
 &= \text{本システムの年間採熱量（実測値）} \div \text{本建物の年間冷房熱量（実測値）} \\
 &= 145.1\text{GJ} \div 2,643.5\text{GJ} \\
 &= 5.5\%
 \end{aligned}$$

自然エネルギー技術として，従前の他の技術としては中間期の自然換気や初夏の夜間ナイトパーズと言った技術が挙げられるが，最も省エネルギーが求められる真夏昼間に効果を示すことが出来る点で他の技術にないメリットと考えられる。

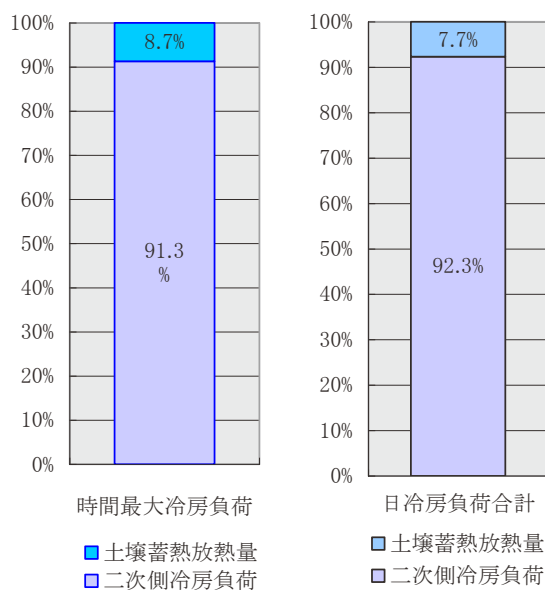


図 5-23 1 年目のピークカット率

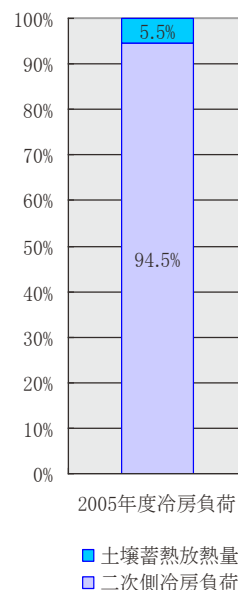


図 5-24 1 年目のピークシフト率

2) エネルギー効率性

a. 土壌蓄熱（冬期）

土壌蓄熱運転時に冷却塔 CT1 で取得した冷熱量 218.8GJ のうち 213.4GJ の冷熱を土壌に有効に投入でき、約 2.5%程度が配管等で損失していることを確認した。

土壌蓄熱に投入したエネルギーは、冷却塔のファンと散水ポンプ、および冷水循環ポンプで消費され、内訳は冷却塔ファン動力が全体の 55%，冷水循環ポンプが 31%，散水ポンプが 14%の割合である。蓄熱運転全体で 27GJ が消費されており、土壌への投入熱量に対する消費エネルギー量で算出すると蓄熱時の効率は 7.9 である。

b. 土壌採熱量（夏季）

採熱運転の結果、145.1GJ の冷熱を夏季の冷房熱源として利用した。これは、蓄熱量 213.4GJ の 68%である。残りの 32%は土壌上部建物への熱拡散が主たるものである。

土壌の採熱に要するエネルギーは、全て冷水ポンプで消費されるエネルギーである。夏季の採熱量 145.1GJ に対し消費エネルギー量 13.19GJ であるので採熱時の効率は 11.0 となる。本システムの特徴である季節間蓄熱により、夏季の消費エネルギー低減に寄与していることが確認出来た。

c. 土壌蓄熱空調システム効率

蓄熱運転と採熱運転の結果から、年間の蓄熱空調システムの効率を評価する。採熱熱量 145.1GJ に対し、消費エネルギー量は 40.19GJ であり、土壌蓄熱空調システム効率は 3.61 である。消費エネルギーの構成は蓄熱時 67%，採熱時 33%となった。

土壌蓄熱空調システム効率

$$\begin{aligned} &= \text{採熱量（夏季）} \div (\text{蓄熱時と採熱時の消費エネルギー}) \\ &= 145.1\text{GJ} \div 40.19\text{GJ} \\ &= 3.61 \end{aligned}$$

3) 2年目の運転に向けての運転改善

1年目の運転結果より、システム効率をさらに向上させるためには、蓄熱運転でのポンプ動力、冷却塔動力の削減、採熱運転でのポンプ動力の削減が必要と考えられた。

1年目の運転終了時に詳細シミュレーションによるケーススタディを行い、蓄熱時冷水流量を 50m³/h から 30m³/h に変更しても、蓄熱量はほとんど変化しないという結果を得た。しかし、シミュレーション結果がでたのが、2年目蓄熱運転開始後であったため、2年目は冷水流量 45m³/h で運転を行った。

また、採熱運転では、1年目終了時にシミュレーションを利用してコイル還り冷水温度設定値に関する検討を行い、還り冷水温度設定値を上げれば採熱量が増えるという知見を得た。この結果に基づき、2年目の設定値は 25℃に変更した。また、1年目は時間外運転時の採熱運転を行っていたが、2年目はこれを禁止した。この理由は、勤務時間外や休日に運転をしないことにより、停止時間に杭付近の土壌温度を回復させて、翌朝の空調開始時のピークカットを有効に機能させるためである。

(2) 2 年目 (2006 年) の運転実績

2 年目の運転は蓄熱運転期間 2005 年 12 月 4 日～2006 年 4 月 26 日, 採熱運転期間 2006 年 6 月 29 日～2006 年 11 月 10 日で実施した。蓄熱運転時間は 1,162.9 時間で, 蓄熱熱量は 373.6GJ であった。また, 採熱運転時間は 784.1 時間で採熱熱量は 205.1GJ である。採熱量は, 1 年目の 145.1GJ に比べて, 約 41%増加したが, 蓄熱効率は約 55%となり, 1 年目の蓄熱効率の 68%と比較すると大幅に減少している。

蓄熱運転時間の増加に対して採熱運転時間は, 2006 年 6 月の改造に伴い, 時間外運転を中止した為に極端に減少している。

1) 地域冷暖房熱供給負荷平準化効果

a. ピークカット率 (夏期ピーク日)

ピークカット率は, 時間最大負荷日である 2006 年 8 月 22 日の 8 時の負荷比で表した。時間最大負荷は, 8 月 22 日で 3.43GJ/h であった。ピークカット率は, 7.6%でその時の土壌による負荷低減量は 0.343GJ であった。また, 日負荷合計での土壌比率は, 8.9%とピークカット率より高くなっている (図 5-25)。

b. ピークシフト率 (年間)

土壌蓄熱依存率は夏期の冷房負荷の 8.6%で増加している。しかも, 計画時点の予想は冷房負荷の 5%と想定していた値より, 高い数値を示している (図 5-26)。

ただし, 2006 年の夏はクールビズの影響か, 2004 年と比較して冷房負荷が減少している。2004 年の月最大負荷は 7 月の 778GJ に対して, 2005 年および 2006 年の月最大負荷は 8 月の 710GJ と 9%程度減少していた。ただし, 気象条件も違う為, クールビズの影響のみとは言えない。なお, 8 月の負荷は同じ値であった。



図 5-25 2 年目のピークカット率

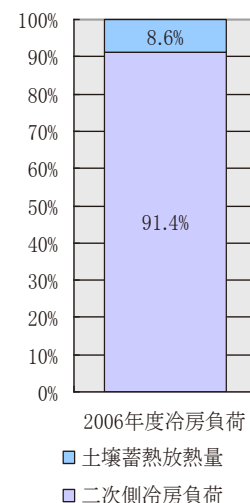


図 5-26 2 年目のピークシフト率

2) エネルギー効率性

a. 土壌蓄熱（冬期）

土壌蓄熱運転時に冷却塔で取得した冷熱量 394.3GJ のうち 373.6GJ の冷熱を土壌に有効に投入でき、約 5.2%程度が配管等で損失しており、1 年目より増加した。土壌蓄熱に要したエネルギーは、冷却塔のファンと散水ポンプおよび冷水循環ポンプの中で、冷却塔ファンの動力が一番大きく全体の 58.5%を占めている。冷水循環ポンプが 25.8%で散水ポンプが 15.6%であった。冷水循環ポンプの比率は流量を 50m³/h から 45m³/h に低減したので減少している。土壌蓄熱時の効率=6.7 と昨年より若干低下した。1 年目よりも蓄熱運転期間が長く、出入口温度差の小さい運転になったためと思われる。

b. 土壌採熱量（夏季）

2006 年 11 月 10 日に土壌からの採熱熱量は終了し、採熱熱量は 201.4GJ と蓄熱量の 54%であった。土壌からの取り出しに要した消費電力は 13.0GJ で採熱効率=15.5 と昨年の 2 倍以上になった。昨年に時間外運転時の土壌利用を中止し、また、還り温度設定を 23℃から 25℃に高くした結果、効率が大幅に向上した。

c. 土壌蓄熱空調システム効率

採熱熱量 204.1GJ に対し、消費エネルギー量は 68.5GJ であり、土壌蓄熱空調システム効率は 2.97 となり 1 年目運転より低下した。消費エネルギーは蓄熱時 55.5GJ(81%)、採熱時 13.0GJ(19%)となり、蓄熱時のロスが大きいことがわかった。

3) 3 年目に向けての運転改善

蓄熱時の効率化という課題が明確になり、特に消費電力に占める割合の大きい冷却塔ファンにインバータを取り付けることとした。

詳細シミュレーションによるケーススタディを行った結果、蓄熱運転時は、冷水循環ポンプ流量 20m³/h、冷却塔ファン風量 50%で運転することが最適であることがわかった。しかし、冷水流量を 20m³/h まで絞るとポンプの動作が不安定になったため、冷水流量は 30m³/h、冷却塔ファンインバータ値は 50%として運転した。また採熱運転では、冷水還り温度を季節に応じて変更する方法も詳細シミュレーションにより検討し、25℃一定の設定温度とするよりも効率が高くなることがわかった。しかし、より簡単な運転方法として、冷水ポンプ流量 15m³/h の流量一定運転を行うことにより、ほぼ同等の性能が確認できたので、3 年目採熱運転は 15m³/h で行うこととした。

(3) 3年目(2007年)の運転実績

3年目の蓄熱運転は後詰め運転となるように前年より開始時期を20日程遅らせ2006年12月23日から開始した。2007年3月31日までの蓄熱量は293.2GJである。3年目の採熱運転は2007年7月1日から10月22日で実施し、採熱熱量は199.3GJである。採熱量は、2年目の205.1GJに比べて同等程度であった。

1) 地域冷暖房熱供給負荷平準化効果

a. ピークカット率(夏期ピーク日)

ピークカット率は、時間最大負荷日である2007年8月20日の8時の負荷比で表した。時間最大負荷は、8月20日で3.43GJ/hであった。

ピークカット率は、6.4%でその時の土壌による負荷低減量は0.22GJであった。冷水水量を減らして一定としたため、ピークカット率は2年目運転より下がっている。また、日負荷合計での土壌比率は、8.9%とピークカット率で2年目と同等である(図5-27)。

b. ピークシフト率(年間)

土壌蓄熱依存率は夏期の冷房負荷の7.5%であった。これは、2年目の8.6%からやや減少している。冷水水量を減らした原因と考えられるが、水量が減った割合ほどは減少しておらず、効率のよい運転となっている(図5-28)。

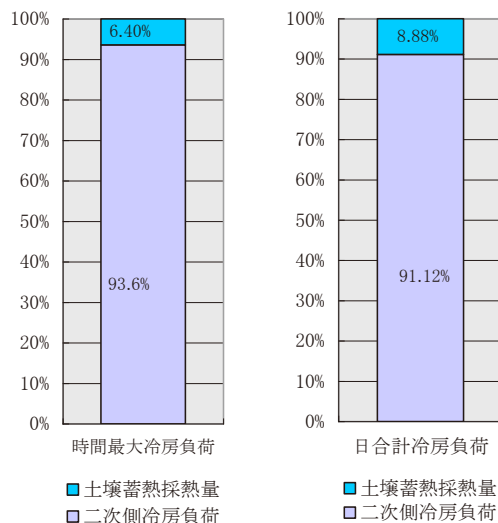


図 5-27 3年目のピークカット率

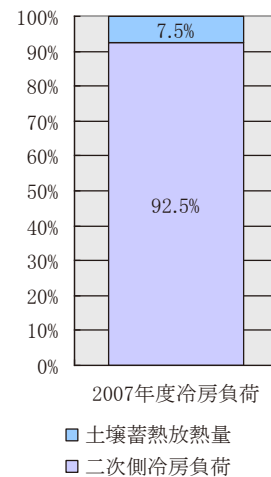


図 5-28 3年目のピークシフト率

2) エネルギー効率性

a. 土壌蓄熱(冬期)

2007年3月31日までの蓄熱量は293.2GJ、蓄熱に要したエネルギー消費量は24.0GJ(ポンプ5.1kW, 冷却塔ファン10.8kW, 冷却塔ポンプ8.2kW)となり、蓄熱効率は12.2となり、2年目の蓄熱効率(6.7)と比べて大きく向上した。シミュレーションで推定された蓄熱効率は11.2であり、シミュレーションの精度は充分良いことがわかる。

b. 土壌採熱量（夏季）

採熱量は 199.3GJ であり，蓄熱効率は 68%，蓄熱時の効率＝12.2，採熱時の効率＝51.1 システム効率は 7.14 であった。

図 5-29～図 5-31 に年間の土壌熱量の推移を示す。図 5-32，図 5-33 に土壌採熱量の推移と 2 次側冷房負荷に対する土壌採熱量の占める割合を示す。最適運転により，3 年目に 1，2 年目とほぼ同等の蓄熱量で，2 年目の採熱量を確保しながらシステム効率が最大となる結果となった。

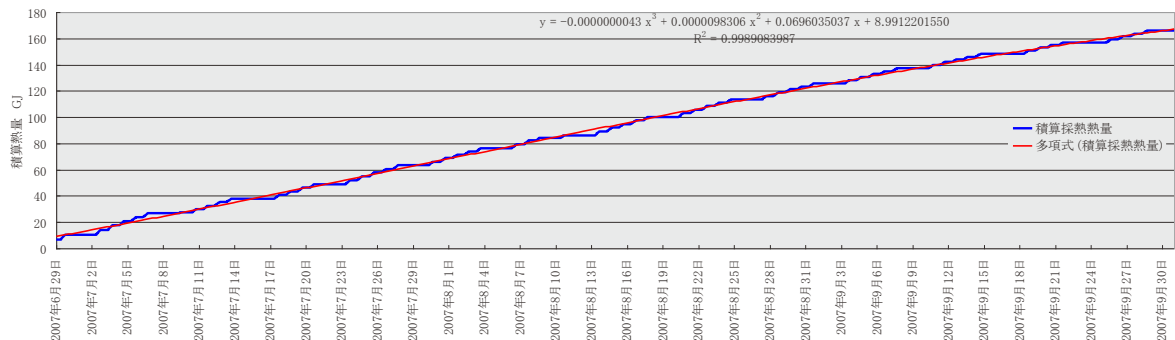


図 5-29 積算土壌採熱量(3 年目夏期)

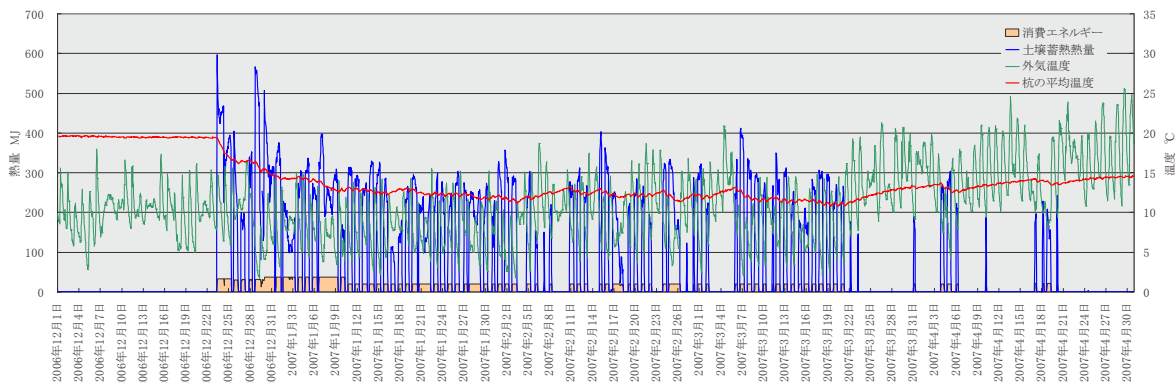


図 5-30 土壌蓄熱量と消費積算エネルギー量(3 年目冬期)

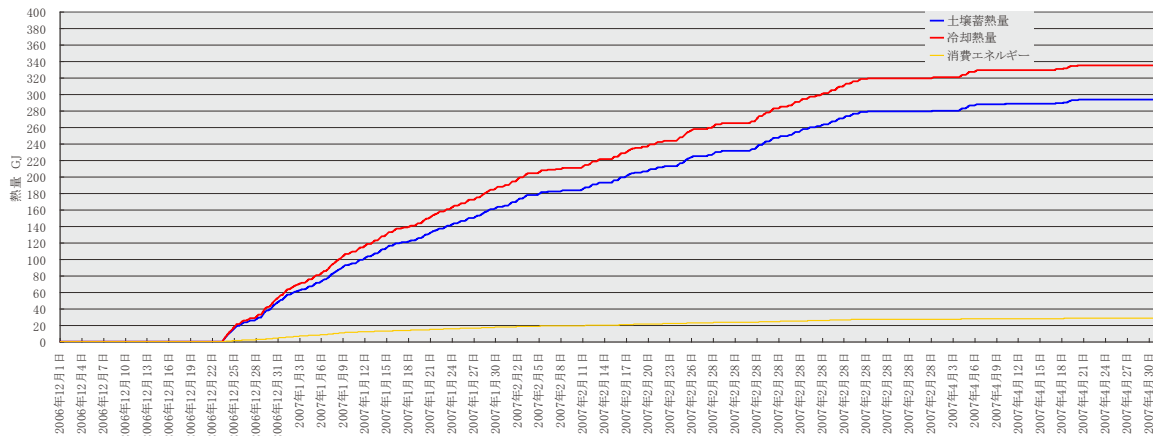


図 5-31 積算土壌蓄熱量と消費エネルギー量(3 年目冬期)

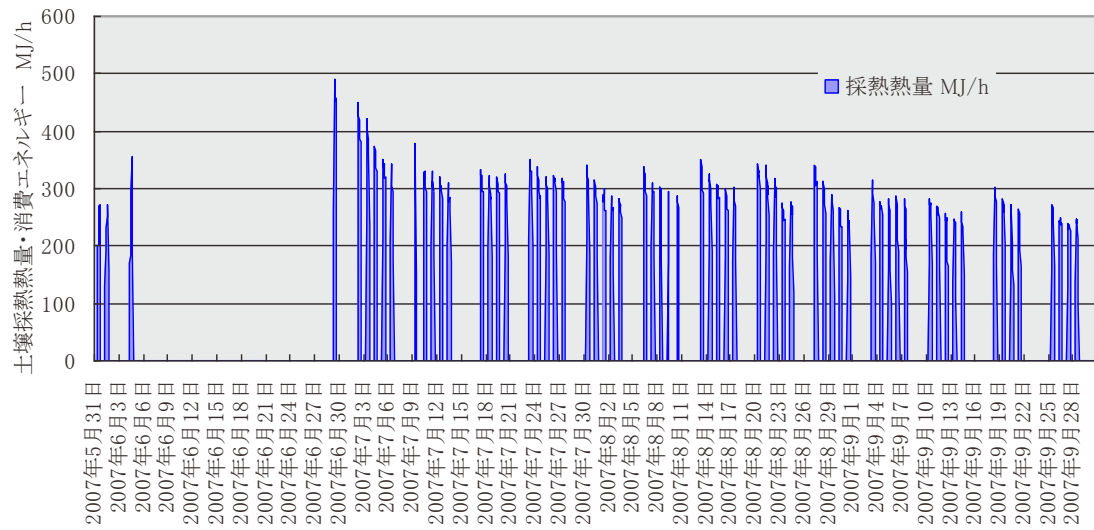


図 5-32 土壌採熱量の推移 (3 年目夏期)

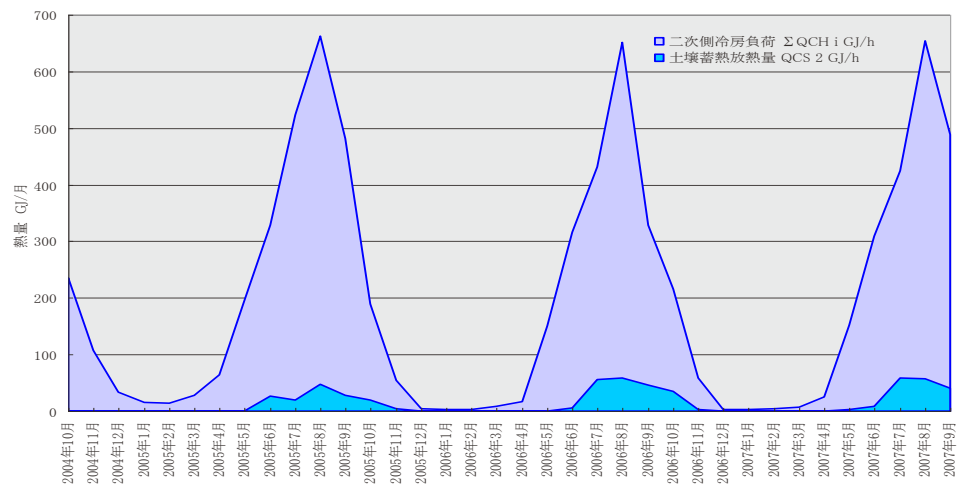


図 5-33 2 次側冷房負荷に対する土壌採熱量の占める割合 (2004 年 10 月～2007 年 9 月)

5.6.3 継続・運用コミッショニングの運転実績

継続・運用コミッショニングのフェーズでは、当初・最適化コミッショニングで得られた運転条件を基本とした運用を実施する。しかし、外気温変動、建物の使用状況、水蓄熱システムや地冷施設とのバランスを鑑みながら、蓄熱時期および採熱時期、採熱時間帯などについて検討しながら運転改善を図る。前節では、運転状況全体を把握するため多岐にわたる評価項目を実施したが、本節では、運用上の指標となるシステム効率やピークカット率、採熱量等を対象項目とし、考察を実施する。表 5-8 に 10 年間の運転実績を示す。

表 5-8 土壌蓄熱空調システム運転実績

	運転 時間	蓄熱運転期間	採熱運転期間	エネルギー			システム 効率	最大冷房負荷日 ピークカット率	年間冷房負荷 ピークシフト率	コミッショニング フロー
				蓄熱熱量 (GJ)	消費電力 (GJ)	効率				
2005	蓄熱	683.3	2005年2月3日～ 4月14日	2005年6月25日～ 7月4日、7月25日～ 11月12日	213.4	27.0	7.9	8月15日 2.2 GJ/日/ 29.0 GJ/日=7.7%	145.1 GJ/年/ 2643.5 GJ/年=5.5%	最適化コミッショニング (1年目) ・運転開始、データ収集開始
1年目	採熱	1208.1			145.1	13.2	11.0			
2006	蓄熱	1162.9	2005年12月4日～ 4月26日	2005年6月29日～ 11月10日	373.6	55.5	6.7	8月22日 2.9 GJ/日/ 32.4 GJ/日=8.9%	205.1 GJ/年/ 2373.1 GJ/年=8.6%	最適化コミッショニング (2年目) ・シミュレーションモデルの構築・解析
2年目	採熱	784.1			205.1	13.0	15.5			
2007	蓄熱	1145.6	2006年12月23日～ 2007年3月31日	2007年7月1日～ 10月22日	293.2	24.0	12.2	8月20日 3.0 GJ/日/ 33.3 GJ/日=8.9%	199.3 GJ/年/ 2412.7 GJ/年=5.5%	最適化コミッショニング (3年目) ・解析結果の運転への反映 ・設計・解析手法の構築
3年目	採熱	874.4			199.3	3.9	51.1			
2008	蓄熱	1179.3	2007年12月23日～ 2008年3月31日	2008年6月23日～ 11月9日	296.1	25.7	11.5	8月4日 3.1 GJ/日/ 34.6 GJ/日=9.0%	209.7 GJ/年/ 2489.5 GJ/年=8.4%	継続コミッショニング (1年目) ・採熱期間3週間延長
4年目	採熱	820.8			209.7	3.9	54.4			
2009	蓄熱	1103.5	2008年12月25日～ 2009年4月5日	2009年7月1日～ 11月7日	263.9	24.1	10.9	8月7日 2.4 GJ/日/ 29.6 GJ/日=8.1%	229.3 GJ/年/ 2331.3 GJ/年=9.8%	継続コミッショニング (2年目) ・採熱開始時期を変更 ・ピークカット運転試行
5年目	採熱	887.3			229.3	4.2	55.1			
2010	蓄熱	1139.5	2009年12月22日～ 2010年4月5日	2010年6月1日～ 11月7日	315.6	23.7	13.3	8月30日 2.6 GJ/日/ 35.1 GJ/日=7.4%	249.2 GJ/年/ 2602.3 GJ/年=9.6%	継続コミッショニング (3年目) ・最冬による蓄熱量増加 ・採熱量増大のために採熱開始を前倒し
6年目	採熱	997.4			249.2	4.7	53.2			
2011	蓄熱	1306.9	2010年12月13日～ 2011年4月6日	2011年6月6日～ 10月4日	334.5	26.5	12.6	8月16日 2.7 GJ/日/ 29.9 GJ/日=9.0%	211.7 GJ/年/ 2612.3 GJ/年=8.1%	継続コミッショニング (4年目) ・東日本大震災による節電施策を実施 ・空調運転時間減少による効率低下
7年目	採熱	769.2			211.7	3.6	58.6			
2012	蓄熱	1271.8	2011年12月26日～ 2012年4月8日	2012年6月1日～ 10月2日	276.4	27.5	10.1	7月30日 2.6 GJ/日/ 28.2 GJ/日=9.2%	186.3 GJ/年/ 1899.9 GJ/年=9.8%	継続コミッショニング (5年目) ・土壌蓄熱ポンプPC-1更新 ・空調運転時間減少による効率低下
8年目	採熱	709.4			186.3	3.3	55.9			
2013	蓄熱	1102.7	2012年12月20日～ 2013年4月9日	2013年6月3日～ 9月30日	257.8	23.8	10.8	8月12日 3.0 GJ/日/ 29.0 GJ/日=10.3%	208.2 GJ/年/ 2270.0 GJ/年=9.2%	継続コミッショニング (6年目) ・空調運転時間増加による採熱量増加
9年目	採熱	761.8			208.2	3.6	58.2			
2014	蓄熱	861.5	2014年1月1日～ 2014年4月7日	2014年5月21日～ 9月30日	207.9	16.4	12.6	7月24日 2.6 GJ/日/ 25.3 GJ/日=10.2%	183.8 GJ/年/ 1593.9 GJ/年=11.5%	継続コミッショニング (7年目) ・再性能検証による蓄熱時の効率上昇 ・システム効率10を達成
10年目	採熱	842.3			206.7	4.0	52.3			
平均	蓄熱	-	-	-	2245.4	191.7	11.7	-	-	・2007年から2014年の平均システム効率
	採熱	-			1501.1	27.2	55.1			

(1) 4年目(2008年)の運転実績

3年目と同期間で蓄熱運転を行った。多くの冷熱を採熱でき土壌への残蓄が少なくなるように採熱運転を3週間延長したところ、採熱量は199.3GJから209.7GJとなり約10GJ増加した。しかし、蓄熱時の効率が前年度に比べ若干悪かったこともあり(12.2→11.5)、システム効率は2007年度と同程度の7.10であった。最大冷房負荷日のピークカット率は、9.0%であった。

(2) 5年目(2009年)の運転実績

5年目の運転は、夏期の冷房ピーク時に土壌蓄熱の冷熱を多く利用できるよう採熱運転時期を7月1日開始に変更し、ピークカット運転を試行した。最大冷房負荷日のピークカット率は8.1%と逆に前年度より低くなったが、年間冷房ピークシフト率は9.8%となり、ピークシフトへの寄与を確認した。ピークカット率が低くなった原因は夏期の外気温の影響や残業等の増加により全体の空調処理熱量が増加したと推測される。

また、冬期の平均気温が若干高かったこともあり、蓄熱量は 263.9GJ と例年より 10%程度少なかつたものの、効率的に採熱できたため採熱量が約 15%増加し、システム効率は 8.11 に向上した。

(3) 6 年目 (2010 年) の運転実績

例年より冬期の平均気温が低かったため効率よく蓄熱を行なうことができ、蓄熱量は 315.6GJ と前年と比べ大きく増加し、蓄熱時の効率は 13.3 と過去最高となった。

蓄熱量が増加したことや、放熱ロスを防ぎ年間の冷房負荷をより多く土壌蓄熱で賄うことを目標とした運転を試行するため、採熱開始を予定より 1 ヶ月早め、6 月初旬から採熱運転を開始した。これにより採熱時間が例年よりも約 150 時間増加したことや放熱ロスが少なくなったこともあり、土壌蓄熱で賄った年間の冷房負荷は 249.2GJ/年と 3 年目に比べ約 20%増加し、ピークシフト率は 9.6%となり、システム効率は過去最高の 8.79 となった。

ピークカットの観点からは、最大冷房負荷日が 8 月 30 日と晩夏に記録されたため、土壌蓄熱で賄うことのできる冷熱量が少なくなり過去一番低い 7.4%となった。しかし、省エネルギーの面からは、自然エネルギーを積極的に使うことができたことで、地冷からの受け入れ熱量を減少させることができていると考えられる。

(4) 7 年目 (2011 年) の運転実績

7 年目は例年よりも冬期の気温が早く下がりはじめたため、蓄熱運転を 10 日早く開始し、蓄熱運転時間が 1306 時間と過去最長を記録したこともあり、蓄熱量は過去最高の 334.5GJ となった。

また、2011 年 3 月に発生した東日本大震災の影響もあり「節電」「省エネ」を目標とした空調運転を行うことを計画し、前年と同様に土壌蓄熱で賄う冷房負荷を多くするため、採熱開始を 6 月初旬とし、採熱開始時から優先的に採熱する運転とした。しかし、残業時間帯の空調運転を基本的に停止する対策等の原因により土壌蓄熱で賄った年間の冷房負荷 211.7GJ と少なくなり、蓄熱効率は約 63%まで低下した。

また、土壌温度が例年よりも早く上昇し、前年より 1 ヶ月早く 10 月初旬に採熱運転を停止した。ピークシフト率は 8.1%となり、システム効率は 7.02 であった。

5.6.4 再コミッショニングの運転検討

再コミッショニングのフェーズでは、当初・最適化および継続（運用）コミッショニングで得られた運転条件を基本とした運用を実施する。

東日本大震災の影響による夏期空調設定温度の上昇や空調時間帯の短縮，地震対策による建物使用人数の増加などが発生し，これまでの運転条件の設定では必ずしも適正な運転が実施できるとは言い難い状況となった。また，竣工後 8 年が経過し，設計時とは空調制御も変わり冬期のフリークーリングの需要が皆無であることや老朽劣化などを加味し，土壤蓄熱に係るポンプ容量を再検討する必要があるこれらの検討と更新工事を実施した。本節では，更新に併せ運用上の指標となるシステム効率やピークカット率，採熱量等に着目し考察を行う。

（１）８年目（２０１２年）の運転実績

８年目は土壤蓄熱空調システムの効率向上のため再コミッショニングフェーズにおける検討を実施した。

冷水ポンプ PC1（定格流量 90m³/h，定格消費電力 15kW）は，フリークーリング用のポンプと兼用しているため蓄熱運転時に，最適化コミッショニングで求めた流量 15m³/h に近づくようインバータで流量を低減したが，振動や異音が発生するため 30m³/h までしか安定した運転状態を確保できず非効率な運転をしていた。

ウォームビズでの建物運用下では，設定温度が低いことや日射を遮る外皮性能が高いことで，設計時に予想された冬期冷房を必要としない状態で建物の運用がされておりフリークーリングの運転実績は年間を通してほぼ無く，2011 年度の採熱運転終了後に土壤蓄熱時に必要な流量に合わせた適正な容量のポンプ（定格流量 50m³/h，定格消費電力 5.5kW）に更新した(写真 5-5)。なお，流量はこれまでとほぼ同様の 28m³/h で試行した。

蓄熱時の流量においては同等としたが，更新したポンプの性能曲線を鑑みると 30m³/h 付近においては，更新前のポンプのほうが効率的であることもあり，蓄熱時の効率は更新前の 12.6 から 10.1 に低下した。しかし，土壤蓄熱は長期間の蓄熱運転となることから，外気温度などの他の影響も示唆される。また，前年よりも厳格化された「節電」を目的とした空調時間の短縮の影響で（7 年目：997 時間→9 年目：709 時間）採熱量が少なく，システム効率は 6.05 に低下した。



写真 5-5 ポンプ更新（左：更新前 右：更新後）

(2) 9年目（2013年）の運転実績

節電施策の緩和もあって冷房運転時間が約 7%増加したこと（709.4 時間→761.8 時間）に伴い採熱量も約 11%増え（186.3GJ→208.2GJ）、システム効率は 7.61 に上昇した。しかし、蓄熱時の効率は 10.8 と過去最高であった 2010 年の 13.3 と比較しても格段に低い結果となっており、ポンプ特性に合った条件を解析する必要があることが示唆された。

(3) 10年目（2014年）の運転実績

再コミッショニングの一環として、蓄熱運転の前に更新したポンプ特性に合わせたシミュレーションを再度行い、ポンプ流量、蓄熱運転の起動条件、停止条件についての検討を実施し、更なる効率の向上を試みた。

1) シミュレーションの概要

土壌蓄熱モデルについて、最適化コミッショニングフェーズで使用した詳細シミュレーションは本節では使用せず、建物全体のモデルと土壌蓄熱空調システムの部分を無限円筒理論の空間内温度場の重ね合わせを利用し地中温度計算を応用したモデルの組み合わせとした。

本モデルは、時々刻々の地中熱交換器冷水入口温度と循環流量を入力値として与え、地中熱交換器冷水出口温度と地中温度の計算を行う。熱交換器として使用される基礎杭は図 5-34 左側に示されるようにスパイラル型のコイルを用いているが、計算を簡略化するため、図 5-34 右側に示す通りパイプの長さや表面積の等しい U 字管型地中熱交換器に置き換えて計算する。配管の設置される U 字管の深さ方向の長さは 7m と設定し、U 字管の対数はスパイラル配管長 80m から U 字管 1 対当たりの配管長 14m を除して、6 対と設定した。

シミュレーションは大きく分けて 2 次側モデルと 1 次側モデルからなり、1 次側モデルは機器モデル、制御ロジックモデルを組み合わせ、システムシミュレーションを構築する。機器モデルはメーカー提供の仕様書を基に作成した。制御ロジックモデルは制御仕様書に基づいて作成した。シミュレーションの入力は、外気温湿度であり、出力は、冷水二次ポンプ、冷水ポンプ、冷却塔ファンの電力消費量、土壌蓄熱量、土壌採熱量である。建物の空調負荷は実績値を与えている。計算間隔は 5 分とし、入力には 2011 年 11 月～2012 年 10 月の実測データを用いた。

検討ケースを表 5-9 に示す。土壌蓄熱時のポンプ流量を現状の運転流量 28m³/h のケースと最適化コミッショニングの解析で求めた最適流量 15m³/h のケースについて、冬期夜間の蓄熱時に効率よく蓄熱を行うことに着目し、起動条件（土壌入口水温と出口水温との差）の Δt を 3 パターン（2℃、4℃、6℃）、また、搬送動力として大きなウェイトを占める冷却塔ファンのインバータ設定値を同じく 3 パターン（50%、75%、100%）に変化させて、20 ケースのシミュレーションを実施した。また、現状との比較のため、現在の起動条件の $\Delta t=2^{\circ}\text{C}$ 、ファンインバータ値 50%のケースについて流量を大きく低減させた 10m³/h と 5m³/h の場合についても検討を行った。

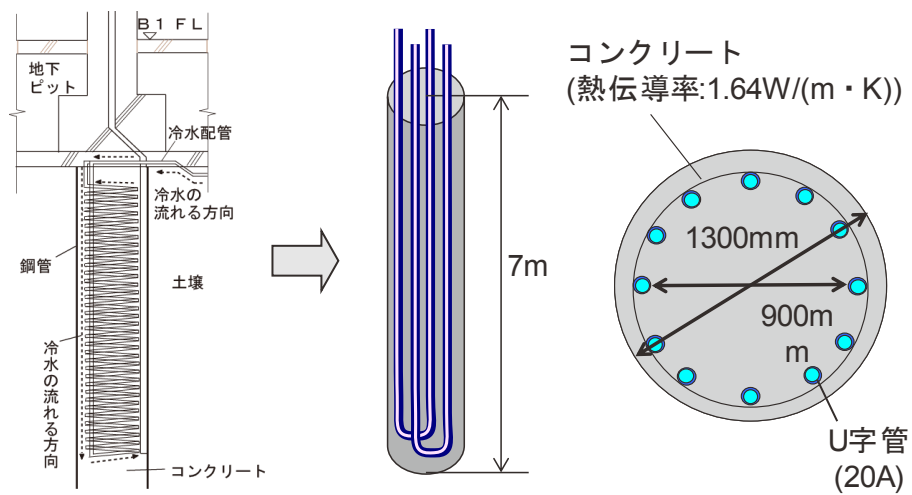


図 5-34 土壌蓄熱シミュレーションモデル

表 5-9 解析条件

Case	運転流量 f [m ³ /h]	起動条件 Δt [°C]	ファンインバータ値 [%]
1	28	2	50
2	28	2	75
3	28	2	100
4	28	4	50
5	28	4	75
6	28	4	100
7	28	6	50
8	28	6	75
9	28	6	100
10	15	2	50
11	15	2	75
12	15	2	100
13	15	4	50
14	15	4	75
15	15	4	100
16	15	6	50
17	15	6	75
18	15	6	100
19	10	2	50
20	5	2	50

2) 設定条件の検討

前節のシミュレーションによる試算結果を図 5-35 および図 5-36 に示す。

システム効率が向上しても、空調システムとして最低限必要な熱量を確保できなければ空調システムの熱源としての意味をなさない。本節ではこの閾値を 200GJ とし、最低限土壌からの採熱量を 200GJ 程度確保でき、システム効率が最大となる条件を検討した。

この結果、ポンプ流量:15m³/h、起動条件(外気温度と土壌平均温度との差): $\Delta t=6^{\circ}\text{C}$ 、停止条件: $\Delta t=0.5^{\circ}\text{C}$ 、冷却塔ファンインバータ値:50%を設定値として採用した。実運転に反映する際には、安定した運転状態となった流量 18m³/h とした。

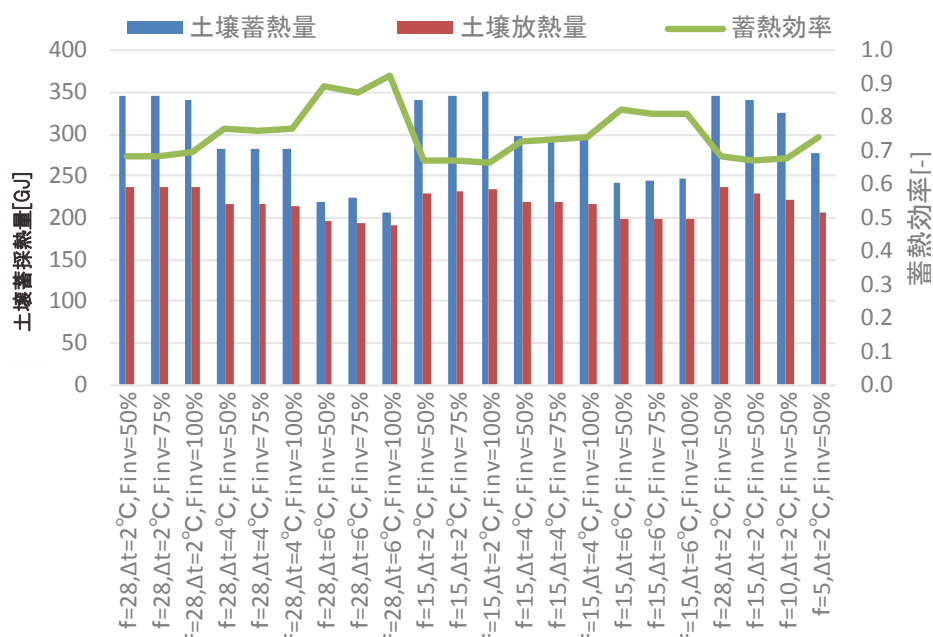


図 5-35 土壌蓄熱年間エネルギー検討

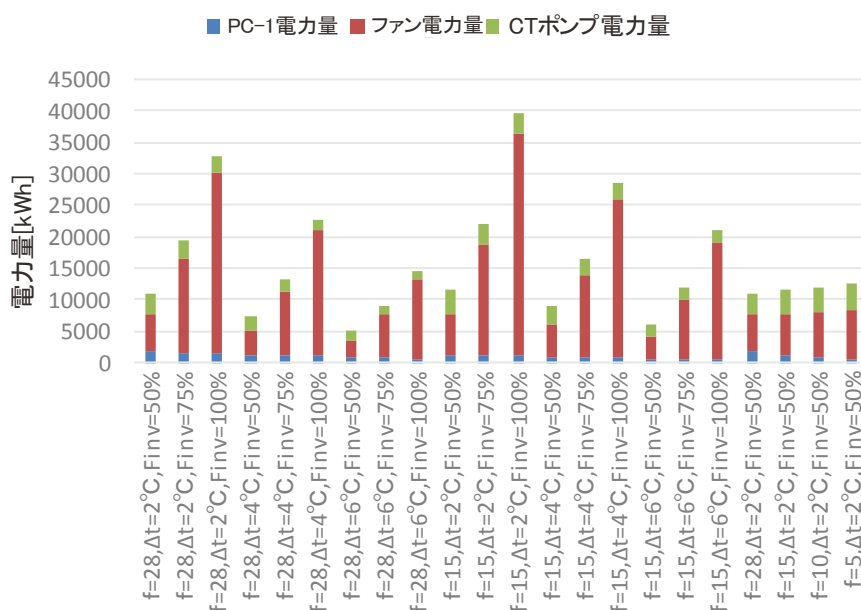


図 5-36 設備毎電力量検討

3) 効果検証

図 5-37～図 5-40 に 10 年目（2014 年）における年間の土壌蓄採熱量の推移を示す。図 5-40 に採熱時の各評価（採熱量，採熱効率，積算効率）を示す。10 年目の運転は再コミッショニングのシミュレーションによる運転改善により，200GJ の採熱量を確保しながらシステム効率が最大の 10.13 となる結果となった。また，図 5-41，図 5-42 に空調冷房負荷に対して土壌採熱が占める割合を示す。時間最大冷房負荷時の土壌採熱の占める割合は 9.0%，日合計冷房負荷に占める割合は 10.4%でありベース空調負荷を賄っていることがわかる。

また，図 5-43 に 10 年間に亘る空調冷房負荷と土壌採熱量の推移を示す。空調冷房負荷量はクールビズなどの影響により減少する傾向にあるが，土壌採熱量は毎年安定していることから，結果的に土壌採熱により処理する割合が増加しており，ベース熱源として長期間における安定した性能を発揮していることが確認された。

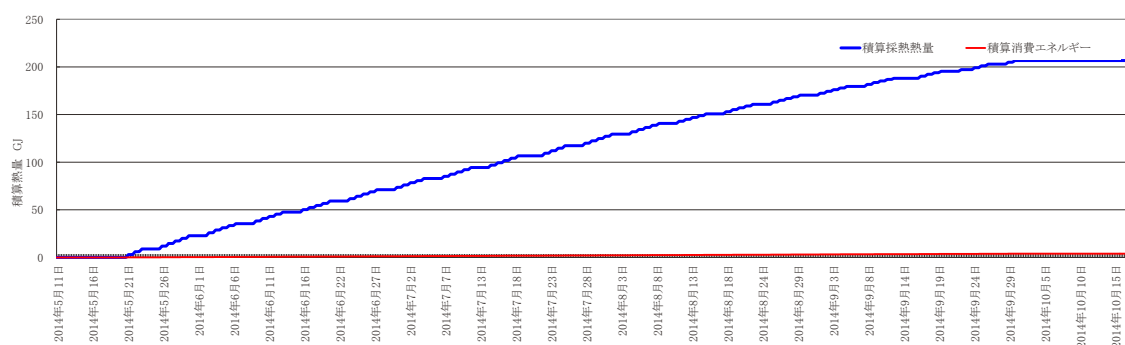


図 5-37 土壌採熱量(10 年目夏期)

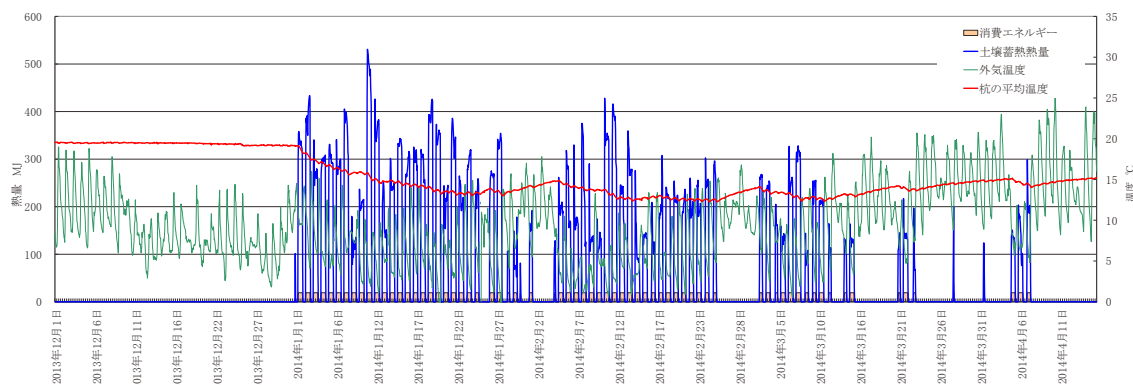


図 5-38 土壌蓄熱量と消費積算エネルギー量(10 年目冬期)

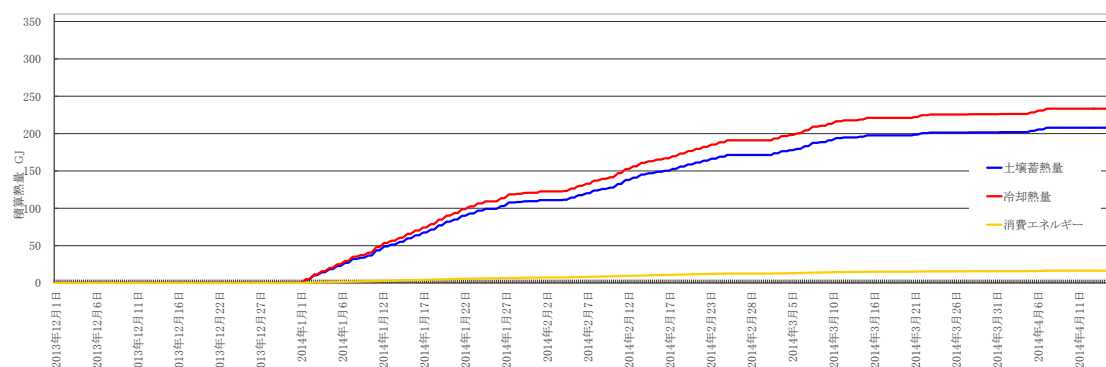


図 5-39 積算土壌蓄熱量と消費積算エネルギー量(10 年目冬期)

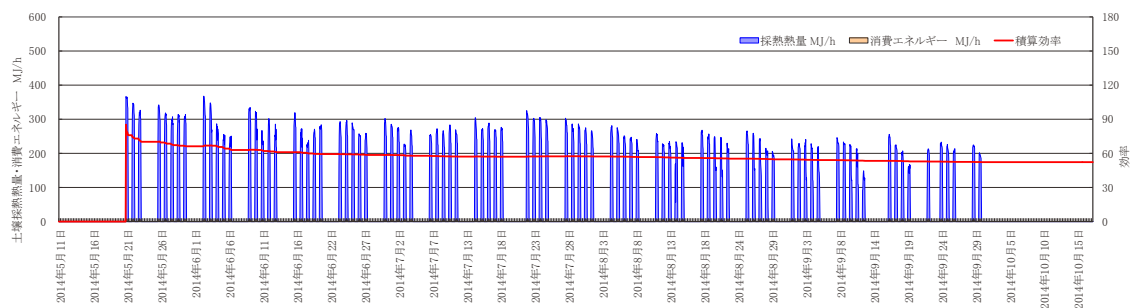


図 5-40 土壌採熱量の変移(10 年目夏期)

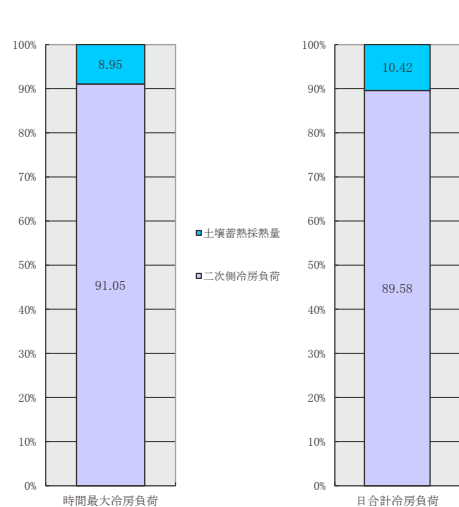


図 5-41 土壌採熱量の割合(10 年目)

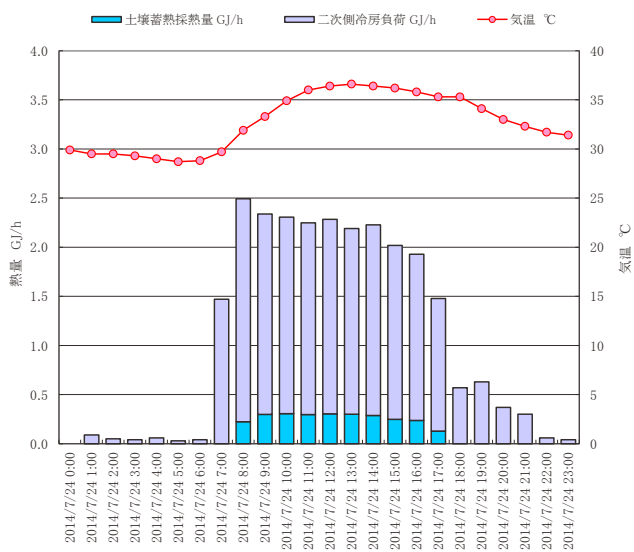


図 5-42 最暑日における土壌採熱量の変移

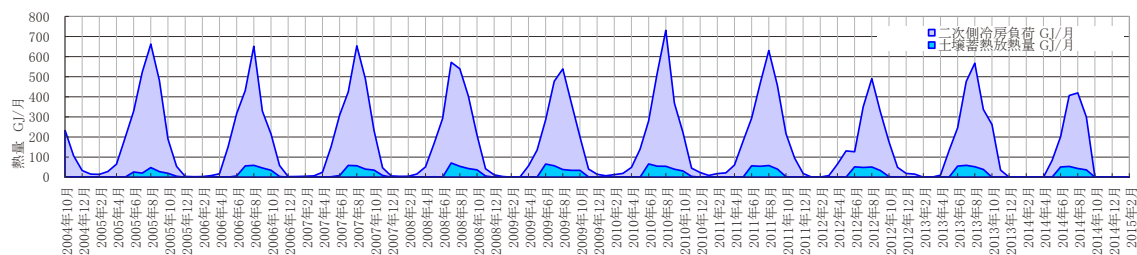


図 5-43 10 年間に亘る土壌採熱量と空調冷房負荷の変移

5.6.5 コミッショニングによる運用改善効果

10 年間における各コミッショニング時の土壌蓄熱空調システムに関する蓄採熱量の推移を図 5-44 に、土壌蓄熱時間の推移を図 5-45 に、システム効率を図 5-46 に示す。最適化コミッショニング後、継続・再コミッショニングの期間も毎年安定して高いシステム効率を発揮したが、東日本大震災発生後の空調稼働状況の変化によるシステム効率の低下やポンプなどの設備更新を鑑みると、コミッショニングによる定期的な運用改善による影響が大きいことが実証された。

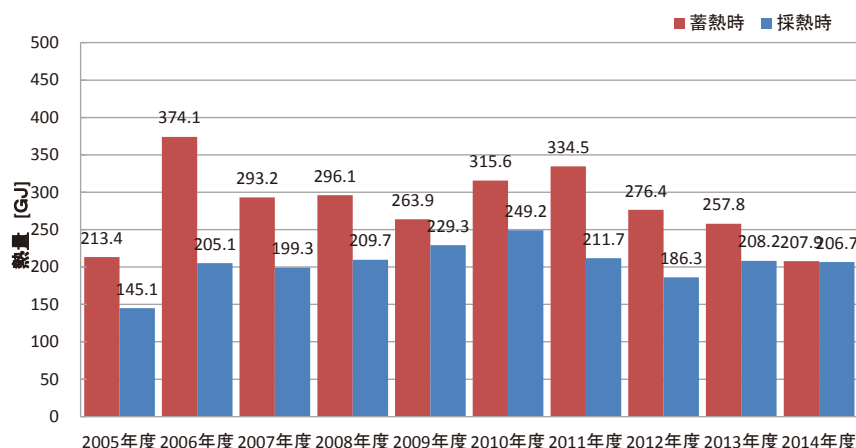


図 5-44 蓄採熱量の推移

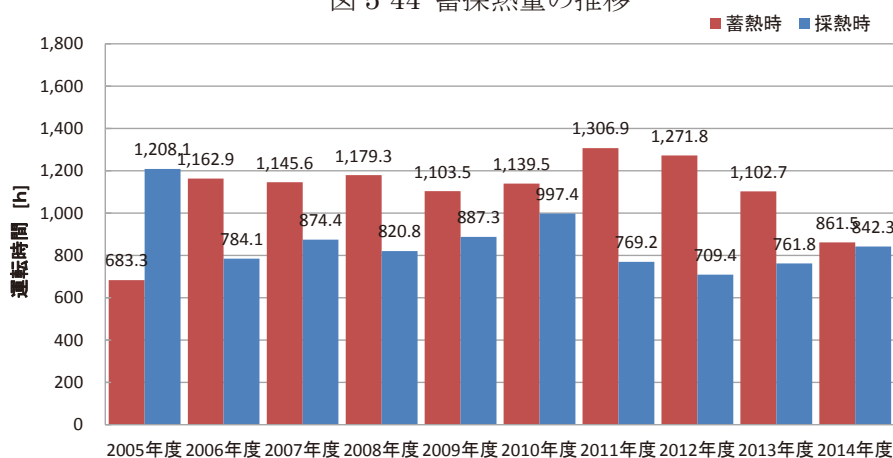


図 5-45 蓄採熱運転時間の推移

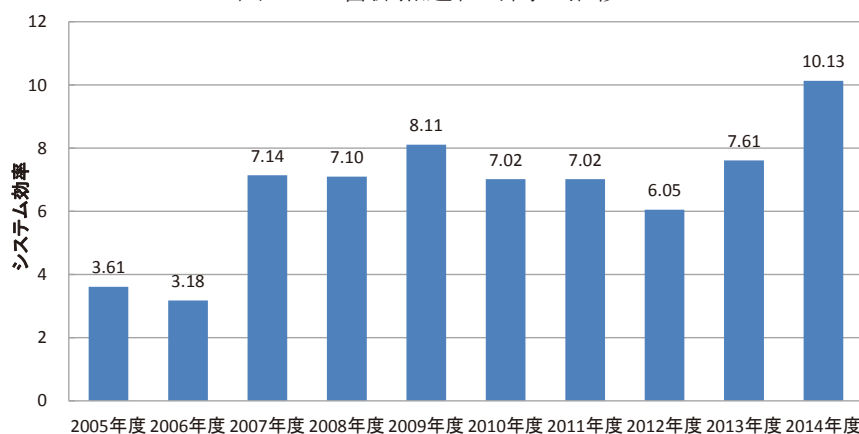


図 5-46 システム効率の推移

5.7 水蓄熱空調システムにおける継続的なコミッショニング

土壌蓄熱空調システムの他にも、複合化蓄熱空調システムとして採用している「水蓄熱空調システム」について、効率的な運用方法を検討するため、計測やシミュレーションによる検討を実施する。特に、本建物は熱源機器を持たず地冷から冷温水の供給を受けているため、水蓄熱の利用は負荷の平準化の観点より熱量デマンド対策の意味合いが高い。そこで、デマンド対策だけでなく省エネルギーや負荷平準化を含め効率的な運用に向けた改善施策の検討を実施する。

4.7.1 水蓄熱空調システムの分析

水蓄熱空調システムの系統図を図 5-47 に示す。水蓄熱槽は 700 m³の冷水槽と 300 m³の冷温水槽があり、いずれも地下ピットを利用して設けている(図 5-48)。夏期は冷水槽、冷温水槽ともに冷水を蓄熱し、冬期は冷温水槽のみに温水を蓄熱し、冷水槽は使用しない。

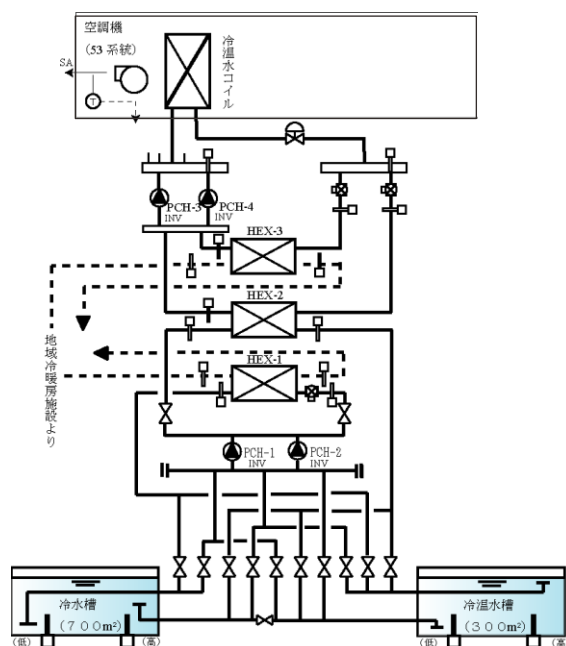


図 5-47 水蓄熱空調システム系統図

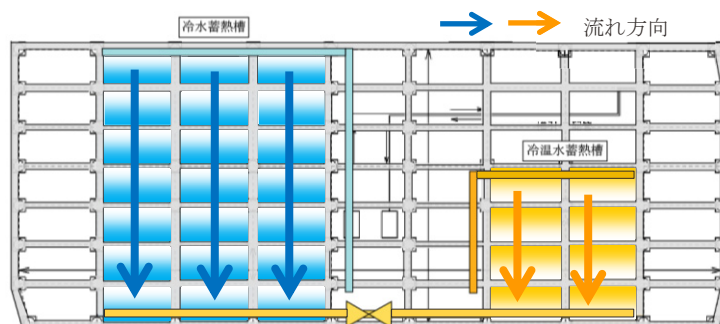


図 5-48 水蓄熱槽平面図

(1) 制御ロジックについて

・冷温水系熱交換器運転制御

冷温水系において放熱時に稼働する熱交換器は、丸の内 DHC からの冷温水と直接熱交換を行う HEX-3 と蓄熱槽からの放熱を行う HEX-2 がある。本システムではベースとして HEX-3 が稼働し、冷温水系二次側負荷が丸の内 DHC からの受入熱量の上限(以下、熱量デマンド)を超える場合に HEX-2 が運転する。

・熱交換器出口温度制御

熱交換器の二次側出口温度が設定値になるように一次側二方弁の比例制御を行う。

(2) 4 年目までの運転実績について

4 年目までの水蓄熱システムの蓄熱効率は、夏期平均 58.0%、冬期平均 50.4%と、効率の良い運転ができていない。そこで、2010 年度よりデータ分析・再コミショニングを行い、運用改善を開始した。

まず状況を把握するため、2009 年 10 月～2010 年 9 月の月ごとの水蓄熱槽の蓄熱量・放熱量と蓄熱効率の推移を分析した(図 5-49)。この期間における、冷蓄熱の平均蓄熱効率は 65.3%、温蓄熱は 59.6%であり、年間を通しての平均蓄熱効率は 65.4%であった。

水蓄熱槽は、冷温水系二次側負荷が熱量デマンド値を超える場合に放熱運転を開始するため、蓄熱した熱を使い切らないまま一日の運転を終えることが多いことが確認された。そのため、運転順序や蓄熱目標、熱量デマンド値を見直すことで、蓄熱効率を改善することが可能と考えた。

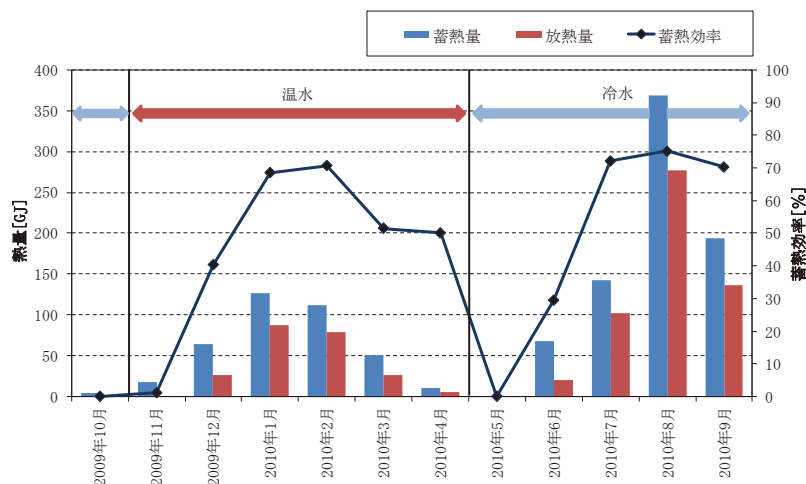


図 5-49 月別蓄熱量・放熱量と蓄熱効率の推移

5.7.2 水蓄熱空調システムの蓄熱効率の検証

更に詳しく蓄熱効率が低下している原因を分析するため、まず蓄熱槽の槽内温度から算出した蓄放熱量と熱交換器の熱交換熱量を比較した(図 5-50)。蓄熱時に、熱交換器 HEX-1 で熱交換した熱量のうち 14.6%は蓄熱量に反映されていないことが分かり、熱交換器前後で熱損失があることが推察された。

次に、熱流計を蓄熱槽の上部及び下部計 4 か所に設置し、熱損失を分析した。熱流計から推定された熱ロス(蓄熱量の 29%)に当たることが分かり、槽の断熱性能が低いことが確認できた。また、蓄熱量に対して約 15%が不明分の熱損失として失われており、その他にも課題がある可能性が示唆された(図 5-51)。

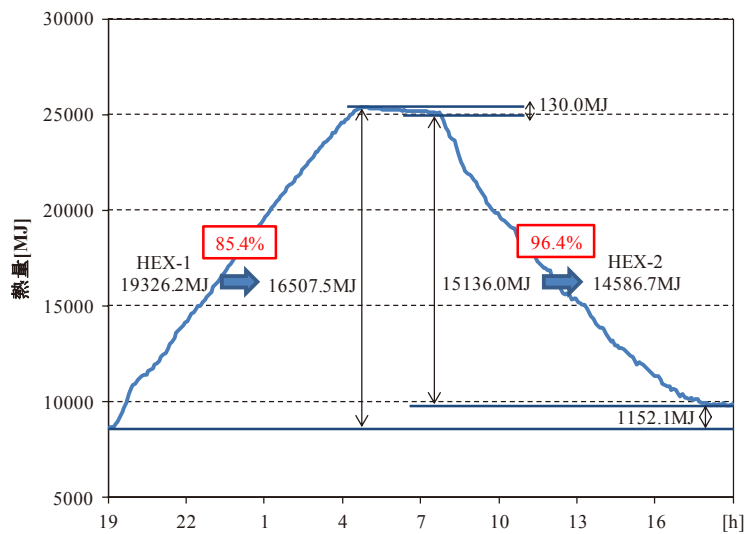


図 5-50 冷水蓄熱量の推移

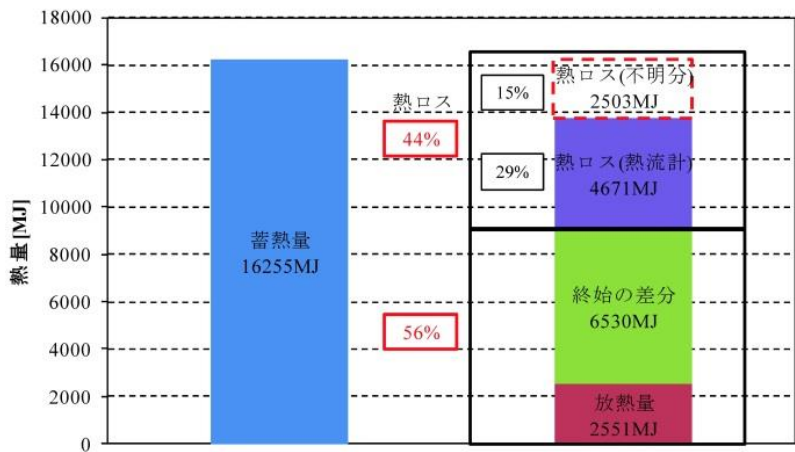


図 5-51 代表日における水蓄熱槽の熱損失

5.7.3 シミュレーションによる運用改善手法の検討

本空調システムを対象としたシミュレーションモデルを構築し、水蓄熱空調システムの運用改善方法についての検討を行った(図 5-52)。

水蓄熱槽の熱損失量は 5.7.2 節の実測値と同等となるようにしている。ここまでの検討で示された改善策のうち、水蓄熱槽の目標蓄熱量と熱量デマンド値を変更する影響について CASE 0 から CASE H までの 9 つのケースに分けてシミュレーションを行った(表 5-10)。ただし、CASE B・CASE G・CASE H は、蓄熱不足となっており、適正な蓄熱目標を設定することが重要である。また、蓄熱効率に関しては、熱量デマンド値が小さいケースほど高い。熱量デマンド値が小さいことで水蓄熱槽の利用頻度が高くなることが要因である。シミュレーションより熱量デマンド値を小さくし放熱を増やす CASE F の運転を実運転に反映することで蓄熱効率を向上できることが示唆された(表 5-11)。このため、2012 年より設定値を変更して運用改善を実施した。

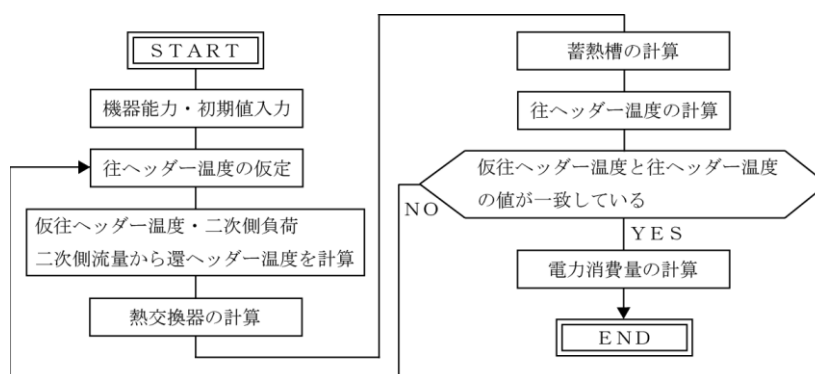


図 5-52 シミュレーションフロー

表 5-10 検討ケース

	内容	
	熱量デマンド値	目標蓄熱量
CASE 0	7.2GJ/h	実測データ×100%
CASE A		× 80%
CASE B		× 60%
CASE C	9.0GJ/h (+25%)	実測データ×100%
CASE D		× 80%
CASE E		× 60%
CASE F	5.4GJ/h (-25%)	実測データ×100%
CASE G		× 80%
CASE H		× 60%

表 5-11 夏期 1 ヶ月間の計算結果

	蓄熱量 [GJ]	採熱量 [GJ]	熱損失 [GJ]	不足蓄熱量 [GJ]	蓄熱不足 運転時間 [h]	蓄熱効率 [%]
CASE 0	201.9	113.4	88.4	0.0	0.0	56.2
CASE A	187.1	111.4	75.6	0.0	0.0	59.6
CASE B	138.8	80.3	58.5	9.3	16.6	57.9
CASE C	111.8	44.0	67.8	0.0	0.0	39.3
CASE D	94.6	44.0	50.6	0.0	0.0	46.5
CASE E	90.2	44.0	46.3	0.0	0.0	48.7
CASE F	314.5	211.3	103.2	0.0	0.0	67.2
CASE G	240.5	166.2	74.3	39.0	25.0	69.1
CASE H	164.3	111.1	53.2	88.8	52.6	67.6

5.7.4 運用改善の実施

前節までの検討を踏まえて、以下 2 点の改善に取り組んだ。

(1) 熱交換器の断熱化

熱交換器での放熱ロスが 14.6%見られたことから、9 年目の 2013 年夏期に熱交換器 4 台 (HEX-1~4) の簡易断熱を行った。保温材は住宅等で防湿材としても使用されている両面アルミ反射シートを採用した(写真 5-6)。この保温材は、シート状で施工性が良く防湿にも優れており、冷房期・暖房期共に使用が可能で、結露水等に対しても耐久性が期待できる。断熱性能を重視し保温材を二重に巻くこととし、断熱加工を施した。施工にかかる時間は、1 台あたり数時間であった。断熱施工後、断熱シート内外の温度差計測を実施した(写真 5-7)。計測結果より、夏期の運転期間中、断熱シート内外温度差は常時約 10℃であり、熱交換器部分の放熱ロスの軽減に寄与していると考えられる(図 5-53)。



写真 5-6 両面アルミ反射シート



写真 5-7 水熱交換器の施工状況 (左：断熱前 右：断熱後)

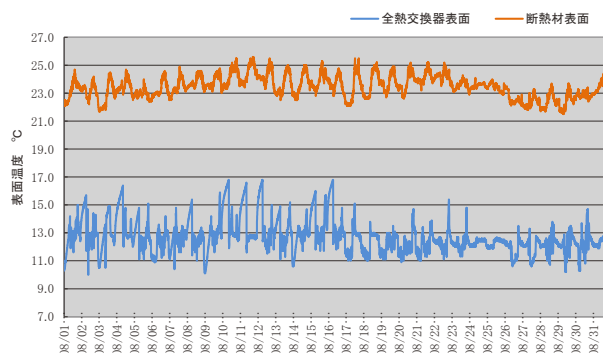


図 5-53 水熱交換器断熱施工前後の温度比較

(2) 水蓄熱槽の運用改善

前節のシミュレーションの結果、水蓄熱槽からの放熱を開始する熱量デマンド値を下げ、蓄熱目標も下げることで蓄熱効率が改善することが示唆されている。また、2004年夏期の水蓄熱運転を主とした試運転調整期間では、残蓄熱が少ない場合には蓄熱効率が低いことが分かっている。そこで2013年夏期より、放熱運転を開始する目標熱量デマンド値を契約値の約7割（冷水：6GJ/h、温水：3GJ/h）に設定変更し、極力残蓄が少なくなる運用を行った。蓄熱目標値については運転管理員によって状況を見ながら期間中段階的に変更を行った。

この結果、冷蓄熱の平均蓄熱効率は2004～2008年度までの5年間の平均蓄熱効率58.0%から2013年度は68.7%に約10%向上した。温蓄熱は5年間の平均蓄熱効率50.4%から2013年度は67.1%に約15%向上することができた(図5-54)。

竣工時から現在までの丸の内地域冷暖房施設からの熱量デマンドの推移を図5-55に示す。継続コミッショニングや省エネルギーへの取り組み結果より、地冷からの冷水デマンドの実績値は竣工時より約50%、温水デマンドの実績値は約30%低減することが可能となった。地冷に支払う熱量金は熱量デマンド値に大きく影響されるため、コストの観点からもデマンドを下げるということは、負荷平準化の観点以外にも有用である。

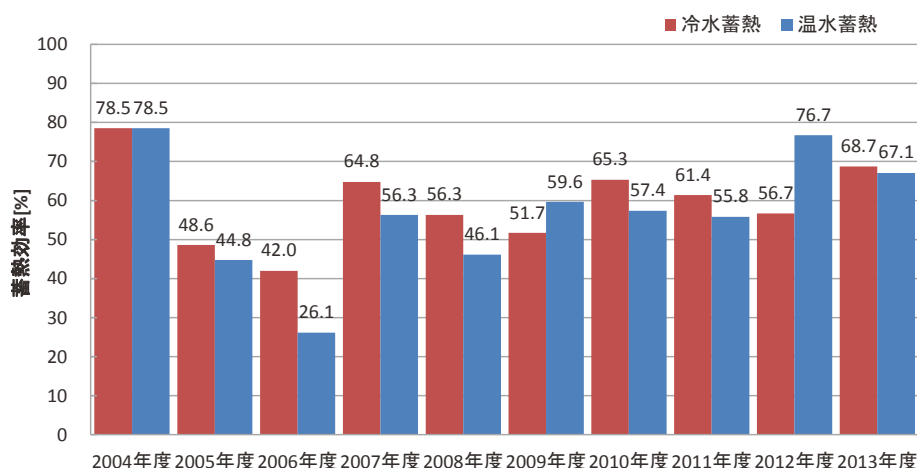


図 5-54 水蓄熱槽蓄熱効率の推移

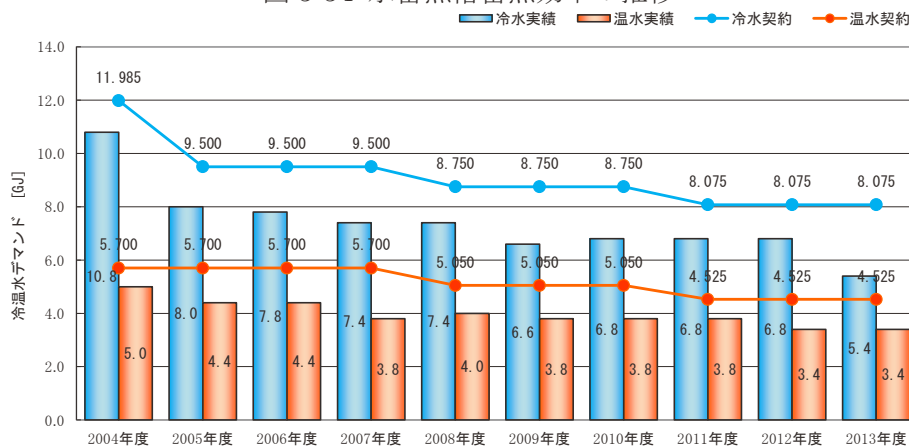


図 5-55 地冷需給熱量デマンド値の推移

(3) 今後の課題

前節の結果より、熱交換器の放熱ロス以外に水蓄熱槽本体の放熱ロスが示唆されており断熱改良による蓄熱効率の向上が必要とされている。本建物の水蓄熱槽の配置図と断面図を 5.7.1 節 図 5-48 および図 5-56 に示す。

冷水槽は上部が地下駐車場となっているが、ドライエリアを通じて常時外気が通風するため、温度条件的には外気に面しているのと同じ状況である。冷温水槽は建物地下 1 階の下部となり、冷水槽ほど外気の影響を受けない。

冷水槽は、槽が 7 つ直列に連結された槽列が 3 組並列に設置されている。このため、互いに隣合う槽の温度差は無いと考え槽間の壁面には断熱材が施工されておらず、壁面上下部の柱脚部がヒートブリッジとなり、地下駐車場および地中に放熱されていると考えられる。また、冷温水槽は冷水槽とは違い、断熱材が槽ごとに巻き上げられるように施工されている。夏期において、冷水槽上部の柱脚部や冷水槽のマンホールをサーモカメラで撮影した温度分布状況を図 5-57 に示す。柱脚部やマンホール周辺の温度は他の部分よりも低く、ヒートブリッジ（熱橋）となっている様子が示唆される。

今後の改善策として、中長期的な改修計画に槽間の断熱化等を含む断熱補強を盛り込むとともに、至近的な対策として熱交換器を断熱化した際に使用した両面アルミ反射シート等による柱脚部の断熱対策を提案する。

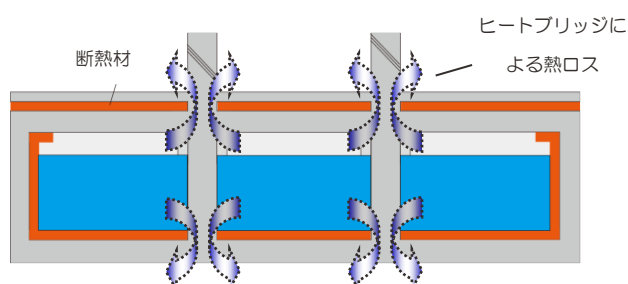


図 5-56 水蓄熱槽断面図

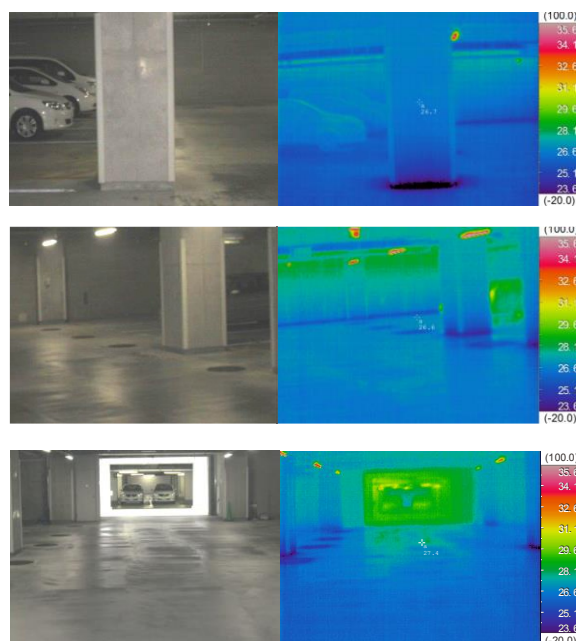


図 5-57 柱脚部・冷水槽上部の熱画像

5.8 省エネルギーに向けたその他の取り組み

5.8.1 建物使用状況の変化と対応

竣工以来、各コミッショニングを導入して省エネルギーへ向けて運用改善を継続している。時代背景を受け、電力自由化・発送電システム検討・東日本大震災対策に関する部門の設置により、建物の使用人数（社員のみ、契約社員等は含まず）は竣工時の約 540 人から 10 年間で約 100 人増加の 640 人となり、執務室面積も増加している。また、2011 年東日本大震災以降は節電運用を実施し、それ以降も継続中である。

5.8.2 継続的な省エネ施策の検討と実施

定期的に省エネ施策の検討会を開催し、シミュレーション結果や省エネ試算を基に建物設備への適用・評価を繰り返し、建物全体のエネルギー削減に向けて改善を実施した。代表的な改善検討・実施項目を下記に示す。

1) 運用管理での取り組み

当社オフィスで実施している具体的な省エネルギー活動

- ・省エネ型 OA 機器の優先使用
- ・執務室における空調の温度設定（夏季 28℃・冬季 20℃）
- ・執務室照度設定値の見直し(750lx→500lx)
- ・昼休みおよび退社時の事務所内の消灯の徹底
- ・洗浄便座ヒーターおよび手洗い用給湯の運転取り止め
- ・電化厨房機器を省エネ型に更新
- ・最寄階への昇降時のエレベータ使用の自粛
- ・電気スイッチや水道蛇口付近への省エネ啓発表示
- ・電気自動車の導入拡大および車両燃料の節約

2) 当初・最適化コミッショニング

- ・自然換気・ナイトパージの性能検証・性能評価
- ・水蓄熱・躯体蓄熱の性能検証・性能評価

3) 継続（運用）コミッショニング

- ・換気設備 CO₂制御設定値の変更(850ppm→950ppm)
- ・二次冷温水ポンプの配管末端圧制御の設定値検討
- ・電化厨房(食堂)の換気量の最適化
- ・電気室の冬季冷房を外気冷房に変更
- ・冬期における冷水ポンプの停止
- ・駐車場の換気ファンを間欠運転に変更
- ・プレート式熱交換器の簡易断熱の実施
- ・DHC 熱量デマンド値の変更

5.9 省エネルギー・負荷平準化効果の検証

本建物の設計・施工時から現在までの、建物の運用状況やコミッショニングの取り組み内容を図 5-58 および表 5-12 に取りまとめる。前節で述べたが、竣工以来、日常の運用管理や半年に一度程度の定期的な改善会議等の継続的なコミッショニングにより、省エネルギー・負荷平準化へ向けての運用改善を実施し、運用開始時から毎年徐々に消費エネルギー量を削減した。負荷平準化の観点からは、土壌蓄熱空調システムや水蓄熱空調システムの複合化利用によるベースとなる空調熱量の確保および地域冷暖房施設の負荷平準化に貢献している。

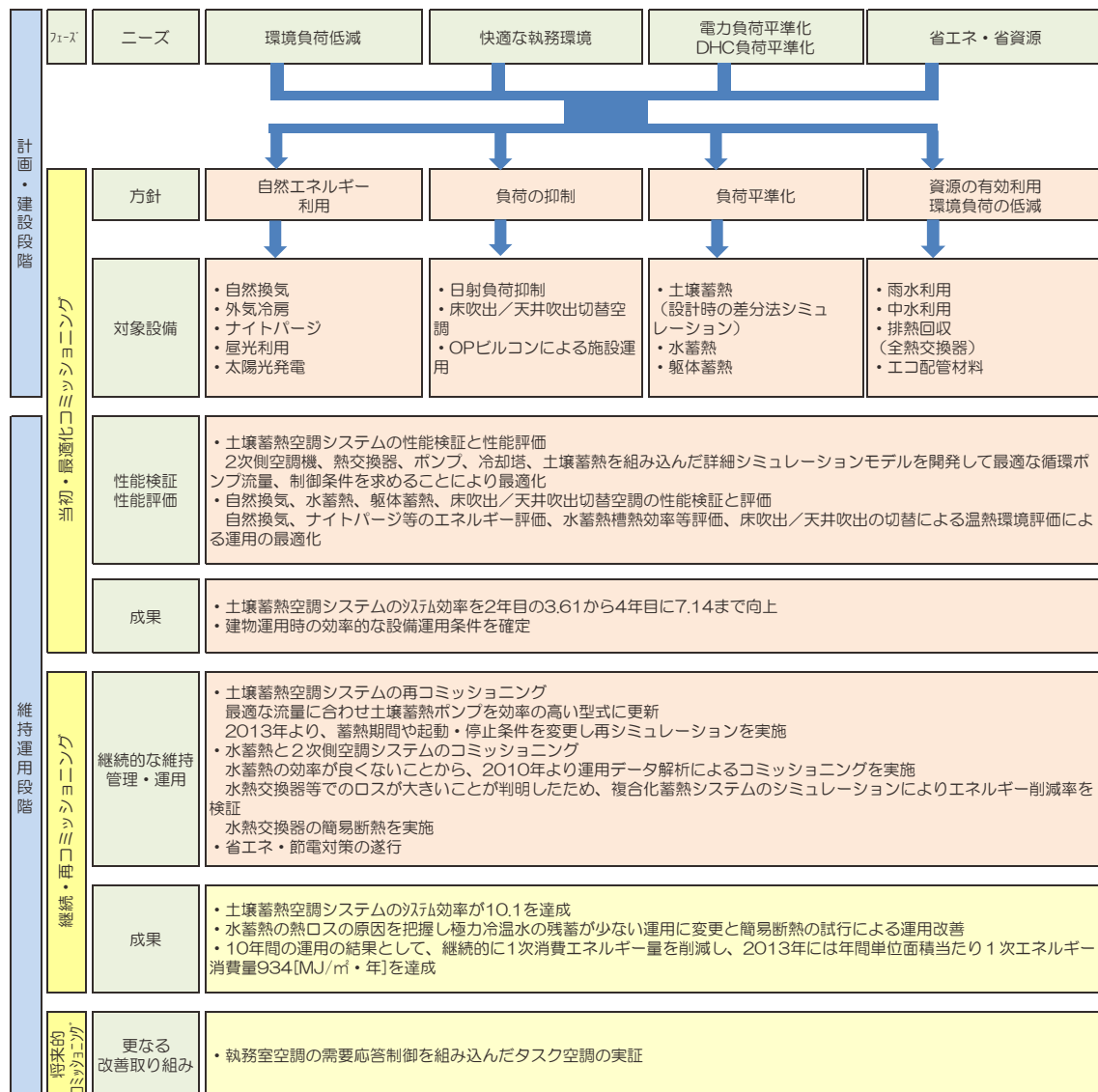


図 5-58 具体的なコミッショニングフェーズと実施内容

表 5-12 コミッショニング年表

経年	設計・施工時	0年目	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目	8年目	9年目	10年目
年度	2001～2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年
入居者数増減理由	-	540	540	540	540	590	590	590	610	620	630	640
					▼料金事務C開設					▼震災対策増員		
									▼スマートメータPJT等増員			
コミッショニングフェーズ		当初・最適化コミッショニング				継続・再コミッショニング						
コミッショニング体制		土壌蓄熱空調システム技術開発等に関するコンソーシアム 基本設計・企画：四国電力 実施設計・開発：四電技術コンサルト 安井建築設計事務所 研究・開発指導：京都大学吉田研究室				継続コミッショニングに関するコンソーシアム 建物利用者：四国電力 建物所有・管理者：四電ビジネス 建物施設者：四電技術コンサルタント 安井建築設計事務所 コミッショニング担当：建築設備コミッショニング協会						
データ収集				▼クールビズ/ウォームビズ開始 ▼EMS活動の更なる強化 ▼空調設定温度28/20℃に変更 環境方針に沿った省エネ・省資源の取り組み			▼改正省エネ法施行		▼東日本大震災 ▼執務室照度変更(750lx→500lx) 節電・電力デマンド抑制の取り組み			
省エネ・節電の取り組み		土壌蓄熱データ収集	水蓄熱データ収集	躯体蓄熱データ収集		中央監視データ収集(OPビルコン)		土壌蓄熱データ継続収集	水蓄熱等データ再収集			
データ収集	設計時シミュレーション	▼竣工・運用開始 初期性能検証・性能評価	詳細シミュレーションモデル作成	シミュレーションによる最適化検討 フィードバックと検証					▼土壌蓄熱ポンプ更新 再性能検証・性能評価			
その他システム等性能評価		自然換気・ナイトバージ初期性能検証	水蓄熱初期性能検証	躯体蓄熱初期性能検証				水蓄熱運用検証	▼蓄熱槽運用変更 ▼蓄熱デマンド変更 水蓄熱再性能検証	▼熱交換器断熱 2次側空調システム性能検証		

図 5-59 に 10 年間にわたる年間単位面積当たり 1 次エネルギー消費量の推移を示す。2011 年の東日本大震災以降は電力量低減に向けて節電運用を実施した。2013 年には年間単位面積当たり 1 次エネルギー消費量が 934MJ/m²・年となり、一般的なオフィスのエネルギー消費原単位 1,737MJ/m²・年と比較して約 45%の省エネ、竣工当時の 2005 年の実績と比較して約 40%の省エネを達成した。

2004 年度の使用エネルギー量を基準として試算すると、10 年間で削減した 1 次エネルギー量は 49,785GJ、電力従量料金で換算すると約 7680 万円のコストメリットとなった。

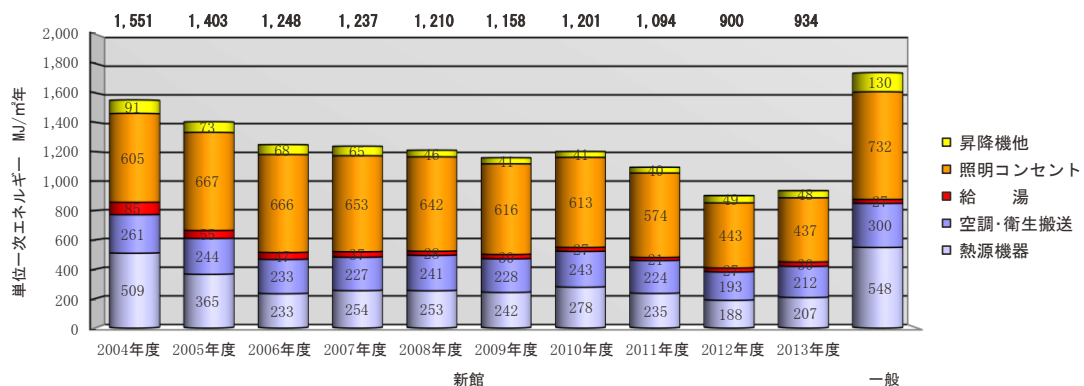


図 5-59 10 年間の建物全体の使用エネルギー量の推移

*四国電力 業務用電力(500kW 以上)夏季従量料金：15.06 円

1 次エネルギー換算係数 (省エネ法換算値)：1kWh=9760kJ より算出

5.10 まとめと今後の課題

本章では、自然エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱方式を導入した建物における10年間に亘る継続的なコミッショニング（性能検証）を実践した結果と省エネルギー・負荷平準化の運用改善効果について示した。

対象建物は、土壌蓄熱システム、水蓄熱システムを複合化した空調システムを導入しており、システム構成が多岐にわたることから運用者による経験的手法での運転改善が困難であり、当初→最適化→継続（運用）→再コミッショニングの4つのフェーズにおけるコミッショニングによる空調設備全体の運用適正化に取り組んだ。

土壌蓄熱システムの運転改善においては、当初・最適化のフェーズにおいて、数値シミュレーションによる運転改善に取り組み、システム効率を初年度の3.61から3年目に7.14まで向上することができた。このシステム側の設定条件をもとに、継続・運用フェーズにおける気候条件や建物側の使用条件などを考慮した運用改善を実施し6年目にはシステム効率を8.79まで向上させた。しかし、7年目に発生した東日本大震災による節電要請の影響で空調システムの運転時間の短縮等が原因の効率低下が著しくなった。このため、ポンプ更新による搬送設備の適正化およびポンプ特性を考慮したシミュレーションによる再コミッショニングにより蓄熱時の効率を向上させることが可能となり、10年目にはシステム効率を10.13まで向上させた。

水蓄熱システムの運用改善においては、竣工当初から運転条件が定まらず放熱ロスが多いことが指摘されており、地域冷暖房設備からの需給熱量（熱量デマンド）とのバランスを考慮しながら運転改善を行った。実測調査では水熱交換器周りの放熱ロスが多いことが確認され、これを改善するために安価で施工性の高いアルミ反射シートによる断熱化を試行し、また残蓄熱状態とならないようにシミュレーションにより熱量デマンドと目標蓄熱量の8ケースの組合せを解析し、最も蓄熱効率が高くなるような運転を検討した。これらの結果、設定値について目標熱量デマンドを契約値の約7割（冷水：6GJ/h、温水：3GJ/h）とした運転により、冷水蓄熱の平均蓄熱効率は2004～2008年度までの5年間の平均蓄熱効率58.0%から2013年度は68.7%に約10%向上した。また、温水蓄熱は5年間の平均蓄熱効率50.4%から2013年度は67.1%に約15%向上した。

その他、オフィスでの省エネに向けた取り組みや厨房施設の風量適正化などに取り組み、ビル全体の消費エネルギーについて、2013年には年間単位面積当たり1次エネルギー消費量が934MJ/m²・年となり、一般的なオフィスビルのエネルギー消費原単位1,737MJ/m²・年と比較して約45%の省エネを達成した。

なお、ZEBの評価基準は設計段階での評価であるがこの実績を基に評価を行うと、平成25年度基準（10,000 m²・7階建）が1,693MJ/m²・年であるため45%削減となり、運用改善のみではZEB-Ready(50%削減)となったと言える。

以上より、本章では運用の適正化に向け、継続的にコミッショニングを実施した実践結果を示した。シミュレーションを利用し10年間に亘る長期間のシステム運用改善を図った事例はこれまでほとんどないが、本章では継続的にコミッショニングに取り組み、運転の適正化を実施することで建物の使用エネルギーを段階的に低減できることを明らかにし、大幅な省エネルギーを達成した。

今後はこれらの知見をもとに、他の施設へのコミッショニング手法の展開を図るが、データ収集や運用改善に労力およびコストを費やすことから、より有効な手段を選択・実践できるような手法の確立が望まれる。

本章に関する既往発表文献

審査付き国際会議論文（第一筆者）

- 5-a) Yuichiro AMANO, Masanobu AONO, Toshihiro YASUOKA, Tadakatsu TAKEGAWA, Yoshiyuki NAGURA, Youichi KOBAYASHI, Harunori YOSHIDA, Masato MIYATA, Jeong-soo KIM: Development and Analysis of Seasonal Underground Thermal-Storage HVAC System Using Natural Energy and Pile Foundation, Proceedings of 10th IEA Heat Pump Conference, 3-14, pp1-8, 2011

審査付き論文（第一筆者以外）

- 5-b) 宮田征門, 吉田治典, 安岡稔弘, 竹川忠克, 小林陽一, 金政秀, 天野雄一朗: 季節間蓄熱機能を有する空調システムのシミュレーションを利用したコミッショニング（第2報）運用開始後3年間に亘る運転最適化プロセス, 空気調和・衛生工学会論文集, No.218, 2015.5
- 5-c) 花園新太郎, 村川三郎, 西名大作, 宇草和義, 天野雄一朗, 堀岡建吾: 全電化学校給食施設における換気量制御装置の導入が室内環境並びに電力消費量に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, No.692, 2013.10

国際会議論文

- 5-d) D. Sumiyoshi, Y. Akashi, H. Yoshida, T. Katsura, Y. Amano, M. Onosaka, Y. Nagura: Effect of Energy Saving and Peak Power Reduction by Combination of Several Thermal Storage Methods –Analysis of Measurement Data–, 8th Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environmental and Energy (YSRIM 2013), 2013

口頭発表

- 5-e) 天野雄一朗: ヨンデビル新館のコミッショニングを活用した継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 特別賞（十年賞）賞受賞講演, 2015
- 5-f) 天野雄一朗, 安岡稔弘, 小野坂充央, 小林陽一, 吉田治典, 赤司泰義, 住吉大輔, 葛隆生, 金政秀, 宮田征門: ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み（第1報）建物概要とコミッショニングも取り組みについて, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, H-28, 2015
- 5-g) 小野坂充央, 天野雄一朗, 安岡稔弘, 小林陽一, 吉田治典, 赤司泰義, 住吉大輔, 葛隆生, 金政秀, 宮田征門: ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み（第2報）省資源・省エネルギーを目的とした継続的な取り組みと実績, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, H-29, 2015
- 5-h) 天野雄一朗, 赤司泰義, 住吉大輔, 吉田治典, 葛隆生, 安岡稔弘, 小野坂充央: 杭基礎を利用した自然エネルギーによる土壤蓄熱空調システムの運転改善手法の検

- 討（その１）継続的な運転改善試行と運転実績，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1063，2013
- 5-i) 天野雄一郎，青野政信，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，小野坂充央，名倉義行，明智一晃：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その１）空調システム概要と実運転データの解析，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1029，2011
- 5-j) 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その２）システムシミュレーションモデルの開発と運転方法の検討，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1031，2011
- 5-k) 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その３）蓄熱システムの性能評価と土壤蓄熱運転方法の検討，日本建築学会学術講演会講演梗概集(選抜梗概)，pp1257，2012
- 5-l) 中熊霞，住吉大輔，赤司泰義，天野雄一郎，小野坂充央，安岡稔弘：蓄熱方式を複合した空調システムの効率的運用に関する研究：（第５報）２次側モデルの構築と土壤蓄熱運転法の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，F-54，2015
- 5-m) 天野雄一郎，住吉大輔，赤司泰義，吉田治典，葛隆生，安岡稔弘，小野坂充央：ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み：（その１）コミッショニングの取り組み，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 5-n) 天野雄一郎，住吉大輔，赤司泰義，吉田治典，葛隆生，安岡稔弘，小野坂充央：ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み：（その２）省資源・省エネの継続的な取り組み，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- 5-o) 天野雄一郎：自然エネルギーによる土壤蓄熱システムの開発と運転実績について，日本ヒートアイランド学会全国大会（第８回），ベストポスター賞，2013

参考文献

- 5-1) 廣岡正，玉置進，末岡直彦，中原信生：空気調和設備の当初性能検証（コミッショニング）の実践研究（第一報）性能検証実施の目的・実施体制，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，E-10，2001
- 5-2) 湯澤秀樹，笠置徹，村山俊尚，近本智行，廣岡正，中原信生：空気調和設備の当初性能検証（コミッショニング）の実践研究（第二報）空調設備の概要と企画・設計段階の事後性能検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，E-11，2001
- 5-3) 笠置徹，小野島一，濱田和康，佐々木繁，廣岡正，中原信生：空気調和設備の当初性能検証（コミッショニング）の実践研究（第三報）施工段階性能検証と保守性能検証，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，E-12，2001
- 5-4) 小野島一，堀内文章，笠岡徹，濱田和康，廣岡正，中原信生：空気調和設備の当初性能検証（コミッショニング）の実践研究（第四報）試験調整作業（TAB）の確認と受渡し前性能検証プロセス，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，E-13，2001
- 5-5) 村山俊尚，伊藤嘉奈子，関口史，廣岡正，中原信生：空気調和設備の当初性能検証（コミッショニング）の実践研究（第五報）受渡し段階性能検証プロセスと検証結果の概要，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，E-14，2001

- 5-6) 伊藤嘉奈子, 村山俊尚, 関口史, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究 (第六報) 受け渡し後段階性の検証における BEMS 援用ツールの評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-15, 2001
- 5-7) 松岡一平, 吉田治典, 廣岡正, 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (第七報) 検証データとシミュレーションに基づく FDD の試み, E-16, 2001
- 5-8) 中原信生: 空気調和設備の当初性能検証 (コミッショニング) の実践研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (第八報) 性能検証 (コミッショニング) の総括と提言, E-17, 2001
- 5-9) 一瀬茂弘, 河路友也, 羽津本好弘, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 1 報) 復性能検証過程の枠組みと各フェーズにおける実行概要, 空気調和・衛生工学会論文集, No.153, 2009.12
- 5-10) 一瀬茂弘, 河路友也, 桐山大蔵, 羽津本好弘, 山羽基, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 2 報) 機能性能試験の枠組みと夏期における試行概要, 空気調和・衛生工学会論文集, No.160, 2010.7
- 5-11) 一瀬茂弘, 河路友也, 桐山大蔵, 羽津本好弘, 山羽基, 松田則雄, 中原信生: 事務所ビルの空調改修プロジェクトへの復性能検証過程の適用に関する実践研究 (第 3 報) 機能性能試験の実行結果と実用化に向けての課題と考察, 空気調和・衛生工学会論文集, No.174, 2011.9
- 5-12) 吉田治典, 高浦敬之, 柳原隆司, 松下直幹, 岡敦郎, 牛尾智秋, 山口淳志: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 1 報) コミッショニングの概要と種熱源機器の最適運転, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-1, 2016
- 5-13) 松下直幹, 吉田治典, 柳原隆司, 岡敦郎, 山口淳志, 牛尾智秋, 高浦敬之: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング, (第 2 報) 熱回収ヒートポンプ熱源の最適運転制御と制御プログラムの実装法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-2, 2016
- 5-14) 青山博昌, 吉田治典, 松下直幹, 山口淳志, 牛尾智秋, 高浦敬之: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 3 報) コミッショニングのための BEMS 構築と計測データポイントの管理・確認方法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-3, 2016
- 5-15) 山口淳志, 吉田治典, 松下直幹, 矢部克明, 牛尾智秋, 高浦敬之: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 4 報) 種々の搬送動力削減とポンプ選定, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-4, 2016
- 5-16) 西山満, 吉田治典, 山本雄二, 矢部克明, 山口淳志, 牛尾智秋, 福島正成, 高浦敬之: 大規模複合用途建物の熱源・空調設備改修プロジェクトのコミッショニング (第 5 報) 連結型冷却塔の性能確保と運用方法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-5, 2016
- 5-17) 久保井大輔, 吉澤昭彦, 福田秀朗, 工藤良一, 松本義明, 開口善典, 平田幸治, 中倉誠司: 東京電力技術開発センターの省エネルギーシステム, (第 17 報) 21 年間の運用実績および自動制御設備の保全状況, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-21, 2016

- 5-18) 金政秀, 安岡稔弘, 竹川忠克, 名倉義行, 小林陽一, 吉田治典, 宮田征門: 季節間蓄熱機能を有する空調システムのシミュレーションを利用したコミッショニング (第1報) 土壤蓄熱空調システムの開発と初期性能評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No.149,2009.8
- 5-19) 長野克則, 葛隆生: 土壤熱源ヒートポンプ設計・性能予測ツールに関する研究 (第1報) 単独垂直型地中熱交換器の設計・性能予測ツールの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No.101,2005.8
- 5-20) 建築設備コミッショニングマニュアル (全訂第3版), 特定非営利活動法人建築設備コミッショニング協会, 2016
- 5-21) 天野雄一郎, 竹川忠克, 青野政信, 宇草和義, 丸岡政司, 中田紀一, 小林陽一, 安岡稔弘, 小野坂充央, 吉田治典, 赤司泰義, 住吉大輔, 葛隆生, 金政秀, 宮田征門: ヨンデンビル新館のコミッショニングを活用した継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み, 空気調和・衛生工学, 第89巻 第7号, pp67-70, 2015.7

第 6 章

総 括

第6章 総括

本論文は、業務用途建物における空調設備の省エネルギー・負荷平準化に寄与する設計・運用手法の確立を目指して、都市域の植生計画による屋外温熱環境の改善およびヒートアイランド化の抑制を目的としたリモートセンシング技術を利用した都市域における土地被覆分類手法の確立、小規模事務所建物および電力供給に供する建物の空調設備の稼働状況の把握による設計手法の提案、また自然エネルギーを利用した新蓄熱技術を採用した事務所建物における長期間コミッショニングによる運用の実践について取りまとめたものであり、以下の5章から成る。

第1章は序論であり、昨今、地球温暖化現象の抑制に向けあらゆる分野の省エネルギー対策が喫緊の課題として取り上げられているなか、一般的な事務所建物において約40%を、重要機器室に関しては半分以上を占める空調設備に関わるエネルギーを低減するためには、適正な設計・運用が肝要であることを述べ、現状と課題をまとめた。

まず、都市温熱環境のマクロな視野から空調設備の省エネルギーを検討する観点より最適な植生計画によるヒートアイランド化の抑制手法の一助として、リモートセンシング技術を利用した都市域の詳細な土地被覆分類手法が望まれていることを述べた。また、設計の観点から鑑みると、最大空調負荷計算手法による負荷計算時の与条件に機器の定格消費電力量を採用するなど、実状と乖離した条件により過大な空調設備設計をしている可能性があるが、これらを実証するための計測に多くの労力を費やす必要があることや電力供給の安全性の観点から解明されていない点が多く、まだ設計における適正化の余地があることを述べた。また、運用の観点からは、性能検証を実施して適正な運転状態を保つコミッショニングの重要性は認知され始めているものの、検証のためには労力やコストが必要なことからコミッショニングの過程を竣工開始から長期間実践した事例が少なくその成果についても検証が進んでいないことを述べた。

このような背景から、業務用途建物における空調設備の省エネルギー・負荷平準化に寄与する設計・運用手法の合理化が必要であることを述べた。

第2章では、都市温熱環境のマクロな視野から空調設備の省エネルギーに寄与する都市域のヒートアイランド化の抑制に有用な植生の配置計画等に利用することを目的とし、ハイパースペクトルデータ AVIRIS を用いて実施した詳細な土地被覆分類解析手法の検討と精度の検証等について示した。高分解能マルチスペクトルデータを利用した従来手法では、詳細な緑被を抽出することは可能であるが、緑被より温暖化抑制に有用な緑量を把握するための樹種の判別までは精度良く行うことができなかった。ハイパースペクトルデータは、高空間分解能・高周波数分解能という特性から従来の最尤法などの解析手法の適応が困難であり解析手法の確立が期待されている。本章では新たな解析手法として SAM 分類を試行し、緑被・屋根材共に精度良く分類ができることを確認した。

以上より、植生や屋根材などに関する精度の高い解析手法を確立し、空調設備の省エネルギーに寄与する屋外環境改善を目的としたリモートセンシングによる解析手法を示した。

第3章では、小規模事務所建物における空調設備の稼働状況検証と合理的な設計手法の提案について示した。小規模事務所建物では、一般的にはビル用マルチパッケージ空調機が採用されている場合が多く、大中規模事務所建物に採用されている冷温水を利用した中

中央空調方式に比べ、冷媒を計測する方法および室内機もしくは室外機の空気のエンタルピー変化から算出する方法などと処理熱量を計測する手法に限られるため、計測が困難かつ労力を要する場合が多く検証事例が少ない。また、併せて設計時の与条件と空調負荷計算結果および実稼働条件下における計測結果とを比較した事例が少なく、設計の合理化に関しての知見を蓄積することが必要である。そのため、各空調室内機の処理熱量を詳細に計測することで、用途別の部屋ごとの空調処理熱量の変動やピーク時における建物全体の空調負荷の実状を把握し、これらを設計条件と比較することにより、熱源や空調室内機の実稼働時の必要容量と設計時の設備容量についての差異を明らかにした。

実測結果から、室内温度の実測値は、設計値と比較して暖房期には低く、冷房期には高い値となっており、設計条件の温度設定ではなく、節電施策等による温度設定の変更状態で運用が継続されていることが確認された。このような条件下で、暖房期においては、空調処理熱量は空調機の暖房定格能力 **158.0kW** に対して、最大処理熱量の実測値は **45.9kW** となり既設の空調機熱源容量と比べ大きな乖離があることを確認した。また、冷房期においても空調処理熱量は空調機の冷房定格能力 **152.0kW** に対して、最大処理熱量の実測値は **51.3kW** となり、空調機の冷房定格能力が過大であることを示した。併せて、計測期間中の最暑日において熱源が 30%程度の低負荷率で稼働していることを明らかにした。CO₂ 濃度については、暖房期・冷房期共に概ね衛生管理基準内にあり、環境維持に必要な外気導入が確保されていることを確認した。既設の空調機熱源容量と最大処理熱量の実測値における乖離の原因は、設計時の空調負荷の与条件の差異や空調負荷計算時における安全率等によることが示唆され、本章で対象とした建物においては空調機熱源容量が半分以下でよいという結果になった。原因としては、業務時間中において人員が出入りすることが多く人員数が与条件の半分にも満たないこと、人員数に比例する換気量が過大であること、OA 機器などの発熱量が稼働状況や定格消費電力量を採用していることなどが挙げられ、想定よりも負荷が少ない状況であったことが考えられる。

以上より、本章では設計の合理化に向け小規模事務所建物での実状を計測し一考察を述べたが、今後はこれらと同様の計測を行うことで設計データを整備し、規模や用途に応じた合理的な設計が行える可能性があることを示した。

第 4 章では、電力供給に供する重要機器室において、機器発熱量の簡易推定手法を提案し、これまで明らかにされていなかった空調設備の稼働状況や機器発熱状況などを整理し、与条件の変更によるポテンシャル試算を実施した上で、合理的な設計手法について示した。

重要機器室は、給電網上の重要拠点として位置付けられており各地域に多数存在し、空調設備は安全性・冗長性の観点から、最大負荷計算法にて十分に余裕をみた与条件のもと算出された能力を満たし、かつバックアップを考慮した分散型の空調機を設置している。空調機は近年設置されたものは可変出力型のインバータ機が多く、それ以前の設備は出力一定の定速機とローテーション制御を組合せた空調機構成となっている。このため、低負荷時はインバータ機の下限を切る状態となり室外機が発停を繰り返す運転が散見される。

本章では機器発熱量の計測が電力量計などを用いる直接的な方法では安全性の面から実施が困難であるため、空調処理熱量と温度差の関係から簡易推定する手法を提案し、分析・比較を行った。

まず、重要機器室のカテゴリーを通信機械室、配電盤室、電源室、計算機室の 4 用途に区分した。そして、計算機室で簡易推定手法の精度検証を実施し、直接電流値を計測した事例と推定した発熱量を比較し、推定精度が良好であることと空調処理熱量のうち機器発熱量に寄与する熱量が支配的であることが確認された。次に、四国管内における 10 箇所の

実稼働している重要機器室について、空調処理熱量、空調稼働状況、温熱環境などについて実測・評価を行ったところ、すべての室において最大空調負荷が空調機容量を大幅に下回っていることが確認された。また、重要機器は設置架台の大きさを標準化している場合が多く、用途別の単位機器設置面積当たりの機器発熱量は相関関係が認められ、通信機械室が約 0.14kW/m^2 、電源室は約 0.54kW/m^2 、計算機室は約 0.71kW/m^2 、配電盤室は約 0.17kW/m^2 であり、従来の設計時における発熱量の与条件よりも少ないことが確認された。これらより、設計時点において発熱量に関する与条件を適正化することで、合理的な空調設備の設計が可能となることが示唆された。

最後に四国管内の重要機器室 473 室に対して、温度条件を変更した場合における四国管内全体での空調機容量や年間空調負荷の低減割合について試算した。その結果、空調設定温度を 1°C 上げることによって、空調機容量を約 270kW 、年間空調負荷を約 $7,050\text{GJ}$ 削減する効果が期待できる。重要機器室の空調設定温度は統一されておらず管理者の判断に任されていることが多く、過冷却を行っている室も見受けられるため、設計温度を過冷却にならない設定温度とすることでも空調機容量の削減等の効果が期待できることが確認された。

以上より、本章では重要機器室の設計・運用の合理化に向け、設計に資する重要機器の発熱量に関するデータを整備し、設定温度変更による低減効果についての試算結果を示した。

第 5 章では、自然エネルギーを利用した季節間土壌蓄熱方式を導入した建物における 10 年間に亘る継続的なコミッショニング（性能検証）を実践した結果と省エネルギー・負荷平準化の運用改善効果について示した。

対象建物は、土壌蓄熱システム、水蓄熱システムを複合化した空調システムを導入しており、システム構成が多岐にわたることから運用者による経験的手法での運転改善が困難であり、当初→最適化→継続（運用）→再コミッショニングの 4 つのフェーズにおけるコミッショニングによる空調設備全体の運用適正化に取り組んだ。

土壌蓄熱システムの運転改善においては、当初・最適化のフェーズにおいて、数値シミュレーションによる運転改善に取り組み、システム効率を初年度の 3.61 から 3 年目に 7.14 まで向上することができた。このシステム側の設定条件をもとに、継続・運用フェーズにおける気候条件や建物側の使用条件などを考慮した運用改善を実施し 6 年目にはシステム効率を 8.79 まで向上させた。しかし、7 年目に発生した東日本大震災による節電要請の影響で空調システムの運転時間の短縮等が原因の効率低下が著しくなった。このため、ポンプ更新による搬送設備の適正化およびポンプ特性を考慮したシミュレーションによる再コミッショニングにより蓄熱時の効率を向上させることが可能となり、10 年目にはシステム効率を 10.13 まで向上させた。

水蓄熱システムの運用改善においては、竣工当初から運転条件が定まらず放熱ロスが多いことが指摘されており、地域冷暖房設備からの需給熱量（熱量デマンド）とのバランスを考慮しながら運転改善を行った。実測調査では水熱交換器周りの放熱ロスが多いことが確認され、これを改善するために安価で施工性の高いアルミ反射シートによる断熱化を試行し、また残蓄熱状態とならないようにシミュレーションにより熱量デマンドと目標蓄熱量の 8 ケースの組合せを解析し、最も蓄熱効率が高くなるような運転を検討した。これらの結果、設定値について目標熱量デマンドを契約値の約 7 割（冷水： 6GJ/h 、温水： 3GJ/h ）とした運転により、冷水蓄熱の平均蓄熱効率は 2004～2008 年度までの 5 年間の平均蓄熱効率 58.0% から 2013 年度は 68.7% に約 10% 向上した。また、温水蓄熱は 5 年間の平均蓄

熱効率 50.4%から 2013 年度は 67.1%に約 15%向上した。

その他、オフィスでの省エネに向けた取り組みや厨房施設の風量適正化などに取り組み、ビル全体の消費エネルギーについて、2013 年には年間単位面積当たり 1 次エネルギー消費量が $934\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ となり、一般的なオフィスビルのエネルギー消費原単位 $1,737\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ と比較して約 45%の省エネを達成した。なお、ZEB の評価基準は設計段階での評価であるがこの実績をもとに評価を行うと、平成 25 年度基準 ($10,000 \text{ m}^2 \cdot 7$ 階建) が $1,693\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ であるため 45%削減となり、運用改善のみでほぼ ZEB-Ready(50%削減)となったと言える。

以上より、本章では運用の適正化に向け、継続的にコミッショニングを実施した実践結果を示した。シミュレーションを利用し 10 年間に亘る長期間のシステム運用改善を図った事例はこれまでほとんどないが、本章では大中規模の業務用途建物において継続的にコミッショニングに取り組み、運転の適正化をことで建物の使用エネルギーを段階的に低減できることを明らかにし、大幅な省エネルギー・負荷平準化を達成した。

本研究に関する既往発表論文リスト

1. 審査付き論文（第一著者）

第2章関連

- [1] 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトルデータ AVIRIS を利用した都市域植生分類精度に関する研究 コロラド州ボウルダーにおける詳細な植生把握, 日本建築学会環境系論文集, 第 590 号, 2005.4

第3章関連

- [2] 天野雄一郎, 堀岡建吾, 安岡稔弘, 田島昌樹: 小規模事務所建物における空調設備の稼働実態に関する基礎的研究 ビル用マルチパッケージ空調機を採用した事例検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 729 号, 2016.11

第4章関連

- [3] 天野雄一郎, 中川克也, 田島昌樹, 堀岡建吾, 上野剛, 宮永俊之: 重要機器室における機器発熱量の簡易推定手法の提案と空調負荷特性の分析, 日本建築学会技術報告集 (2017.3 現在 審査中)

2. 審査付き国際会議論文（第一筆者）

第2章関連

- [1] Yuichiro AMANO, Naoki TAKAGI, Alexander. F. H. Goetz : A Study on the Classification of Urban Region Using Hyper-spectrum Data at AVIRIS, Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008), IV (pp.687-690), 2008.9 ISBN: 978-1-4244-2808-3

第5章関連

- [2] Yuichiro AMANO, Masanobu AONO, Toshihiro YASUOKA, Tadakatsu TAKEGAWA, Yoshiyuki NAGURA, Youichi KOBAYASHI, Harunori YOSHIDA, Masato MIYATA, Jeong-soo KIM: Development and Analysis of Seasonal Underground Thermal-Storage HVAC System Using Natural Energy and Pile Foundation, Proceedings of 10th IEA Heat Pump Conference, 3-14, pp1-8, 2011

3. 審査付き論文（第一著者以外）

第5章関連

- [1] 宮田征門, 吉田治典, 安岡稔弘, 竹川忠克, 小林陽一, 金政秀, 天野雄一郎: 季節間蓄熱機能を有する空調システムのシミュレーションを利用したコミッショニング (第2報) 運用開始後3年間に亘る運転最適化プロセス, 空気調和・衛生工学会論文集, No.218, 2015.5
- [2] 花園新太郎, 村川三郎, 西名大作, 宇草和義, 天野雄一郎, 堀岡建吾: 全電化学校給食施設における換気量制御装置の導入が室内環境並びに電力消費量に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, No.692, 2013.10

4. 国際会議論文

第4章関連

- [1] D. Sumiyoshi, Y. Akashi, H. Yoshida, T. Katsura, Y. Amano, M. Onosaka, Y. Nagura: Effect of Energy Saving and Peak Power Reduction by Combination of Several Thermal Storage Methods –Analysis of Measurement Data–, 8th Yellow Sea Rim International Exchange Meeting on Building Environmental and Energy (YSRIM 2013), 2013

4. 口頭発表論文

第2章関連

- [1] 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトル AVIRIS データを利用した都市域土地被覆分類精度に関する研究, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 2005
- [2] 高木直樹, 小松義典, 天野雄一郎, 梅干野晃: 建築分野におけるリモートセンシング技術の応用と統計処理, 日本リモートセンシング学会学術講演会梗概集, 2006
- [3] 天野雄一郎, 高木直樹: ハイパースペクトルデータを利用した都市域土地被覆分類に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 2007

第3章関連

- [1] 天野雄一郎, 堀岡建吾, 安岡稔弘, 河田浩太郎, 堅田大貴, 橋田智和, 田島昌樹, 南部佑輔: 中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究 (その1) 測定時の温熱環境, 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 2014
- [2] 河田浩太郎, 天野雄一郎, 堀岡建吾, 安岡稔弘, 橋田智和, 田島昌樹: 中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究 (その2) 測定時の温熱環境, 日

- 本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
- [3] 堅田大貴，天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，橋田智和，田島昌樹：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その3）暖房期の実測に基づくエネルギー評価，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
 - [4] 南部佑輔，天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，橋田智和，田島昌樹：中規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（その4）冷房期の実測に基づくエネルギー評価，日本建築学会大会学術講演会梗概集，2014
 - [5] 天野雄一郎，堀岡建吾，安岡稔弘，田島昌樹：節電要請下における中小規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（第1報）計測概要と室内温熱環境分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2014
 - [6] 堀岡建吾，天野雄一郎，安岡稔弘，田島昌樹：節電要請下における中小規模事務所における空調機熱源容量の最適化に関する研究（第2報）暖房期および冷房期の実測にもとづくエネルギー評価，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2014
 - [7] 堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，橋田智和：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その1）計測概要と冬期実測結果，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
 - [8] 堅田大貴，永田竜弥，堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，橋田智和：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その2）夏期の実測に基づく検討，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
 - [9] 南部佑輔，堀岡建吾，天野雄一郎，田島昌樹，安岡稔弘，堅田大貴：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その3）空調時における空気室の評価，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
 - [10] 堀岡建吾，安岡稔弘，天野雄一郎，田島昌樹，南部佑輔，堅田大貴：中規模事務所建物における空調機熱源容量の最適化に関する研究：（その4）冷房時における評価，日本建築学会四国支部研究報告集，2015

第4章関連

- [11] 天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その1）通信機械室の空調環境と機器発熱の実態把握，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-44，2012
- [12] 宮永俊之，上野剛，黒本英智，田村英寿，天野雄一郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その2）通信機械室の空調省エネポテンシャルの試算，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-45，2012
- [13] 天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，前田幸司郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その3）通信機械室における複数台パッケージ空調のCFDシミュレーション，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，J-16，2013
- [14] 宮永俊之，上野剛，天野雄一郎，前田幸司郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その4）CFDシミュレーションによる計算機室の空調省エネ方策評価，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-57，2014
- [15] 堅田大貴，天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，堀岡建吾，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する検討（その5）空調負荷計算手法の最大冷房負荷に関する比較，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，D-6，2015
- [16] 中川克也，天野雄一郎，安岡稔弘，堀岡建吾，田島昌樹：重要機器室の空調設備の

- 最適化に関する検討（その 6）実測に基づく空調機負荷特性の分析，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，J-9，2016
- [17] 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，黒本英智：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 1）通信機械室の空調環境の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2013
 - [18] 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，黒本英智：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 2）通信機械室の機器発熱の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2013
 - [19] 天野雄一郎，宇草和義，宮永俊之，上野剛，安岡絢子：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 3）CPU 室の機器発熱の実態把握，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
 - [20] 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 4）通信機械室における CFD シミュレーション解析概要，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
 - [21] 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 5）通信機械室における CFD シミュレーション解析結果，日本建築学会四国支部研究報告集，2014
 - [22] 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎，宇草和義：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 6）CFD シミュレーションによる空調省エネ方策の条件検討，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
 - [23] 宮永俊之，上野剛，安岡絢子，天野雄一郎：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 7）CFD シミュレーションによる空調省エネ方策の検討結果について，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
 - [24] 堅田大貴，天野雄一郎，堀岡建吾，中川克也，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 8）計算機室等の温熱環境調査，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
 - [25] 中川克也，天野雄一郎，堀岡建吾，堅田大貴，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 9）配電盤室等の温熱環境調査，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
 - [26] 堅田大貴，天野雄一郎，宮永俊之，上野剛，安岡絢子，田島昌樹：重要機器室の空調設備の最適化に関する基礎的研究：（その 10）空調負荷計算手法の比較について，日本建築学会四国支部研究報告集，2015

第 5 章関連

- [27] 天野雄一郎：ヨンデビル新館のコミッショニングを活用した 継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，特別賞（十年賞）賞受賞講演，2015
- [28] 天野雄一郎，安岡稔弘，小野坂充央，小林陽一，吉田治典，赤司泰義，住吉大輔，葛隆生，金政秀，宮田征門：ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み（第 1 報）建物概要とコミッショニングも取り組みについて，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，H-28，2015
- [29] 小野坂充央，天野雄一郎，安岡稔弘，小林陽一，吉田治典，赤司泰義，住吉大輔，

- 葛隆生，金政秀，宮田征門：ヨンデンビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み（第2報）省資源・省エネルギーを目的とした継続的な取り組みと実績，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，H-29，2015
- [30] 天野雄一郎，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，葛隆生，安岡稔弘，小野坂充央：杭基礎を利用した自然エネルギーによる土壌蓄熱空調システムの運転改善手法の検討（その1）継続的な運転改善試行と運転実績，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1063，2013
- [31] 天野雄一郎，青野政信，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，小野坂充央，名倉義行，明智一晃：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その1）空調システム概要と実運転データの解析，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1029，2011
- [32] 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その2）システムシミュレーションモデルの開発と運転方法の検討，日本建築学会学術講演会講演梗概集，pp1031，2011
- [33] 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：複合蓄熱方式を導入した空調システムの効率的な運用に関する研究：（その3）蓄熱システムの性能評価と土壌蓄熱運転方法の検討，日本建築学会学術講演会講演梗概集(選抜梗概)，pp1257，2012
- [34] 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：蓄熱方式を複合した空調システムの効率的運用に関する研究：（第1報）運転データの解析とシミュレーションによる運転方法の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，G-69，2011
- [35] 明智一晃，赤司泰義，住吉大輔，吉田治典，天野雄一郎，青野政信，小野坂充央，名倉義行：蓄熱方式を複合した空調システムの効率的運用に関する研究：（第2報）蓄熱システムの性能評価と土壌蓄熱運転方法の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，E-82，2012
- [36] 中熊霞，住吉大輔，赤司泰義，天野雄一郎，小野坂充央，安岡稔弘：蓄熱方式を複合した空調システムの効率的運用に関する研究：（第5報）2次側モデルの構築と土壌蓄熱運転法の検討，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，F-54，2015
- [37] 天野雄一郎，住吉大輔，赤司泰義，吉田治典，葛隆生，安岡稔弘，小野坂充央：ヨンデンビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み：（その1）コミッショニングの取り組み，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- [38] 天野雄一郎，住吉大輔，赤司泰義，吉田治典，葛隆生，安岡稔弘，小野坂充央：ヨンデンビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み：（その2）省資源・省エネの継続的な取り組み，日本建築学会四国支部研究報告集，2015
- [39] 天野雄一郎：自然エネルギーによる土壌蓄熱システムの開発と運転実績について，日本ヒートアイランド学会全国大会（第8回），ベストポスター賞，2013

謝辞

本学位論文は、信州大学大学院総合工学系研究科高木研究室および四国電力株式会社において進めてきた研究の成果をまとめたものです。調査研究を進め、本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご指導、ご協力、ご支援をいただきました。

本研究を進めるにあたり、卒業研究時代より長年にわたり並々ならぬご指導ご鞭撻を賜りました信州大学大学院総合工学系研究科山岳地域環境科学専攻 教授 高木直樹博士に深甚なる謝意を表します。「地球に優しい人間になりたい」と初めて高木教官室の扉をたたいてから早や十数年が経ちましたが、社会人博士課程入学後も、何かと実務に追われなかなか研究の進まない私にいつも温かいご指導とご鞭撻をいただきました。大学院時代には休学したいとの我儘にも快く送り出していただいた上に、遊学中の私を先生の留学先である米国コロラド州立大学リモートセンシング研究センターに呼び寄せて頂き、先進的な調査研究をさせていただいた貴重な経験など、いくら感謝しても感謝しきれません。高木先生から学んだことは山ほどありますし、卒業後も先生を慕って集まる様々な分野でご活躍の研究室の諸先輩方、後輩からも沢山のことを教示して頂きました。これも先生の仁徳だと思っています。先生から学んだことは研究の分野だけに限りません。少しでも後世に伝えていけたらと思っています。

また、論文審査委員として本論文の審査をして頂きました信州大学学術研究院（工学系）教授 浅野良晴博士、准教授 高村秀紀博士、准教授 岩井一博博士には、本論文をまとめるに際し、論文の構成や内容に関して貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

高知工科大学システム工学群 准教授 田島昌樹博士には、学外論文審査委員を引き受けて頂いたほか、本論文の肝となった第3、4章の四国地域における空調設備の調査研究のご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。計測、解析技術はもちろんのこと、先生の研究に取り組む真摯な姿勢など、様々なことを学ばして頂きました。四国における数少ない環境工学の研究者として、今後とも宜しくお願い致します。

京都大学 名誉教授 吉田治典博士、東京大学大学院工学系研究科 教授 赤司泰義博士、安井建築設計事務所 小林陽一氏、武蔵野大学工学部 准教授 金政秀博士、九州大学大学院人間環境学府 准教授 住吉大輔博士、国土技術政策総合研究所 主任研究官 宮田征門博士、北海道大学大学院工学研究院 准教授 葛隆生博士、㈱四電技術コンサルタント 名倉義行氏、小野坂充央氏には、本論文第5章を行うにあたりご指導を頂きました。ヨンデビル新館での10年間に亘るコミッションングを活用した継続的な省エネルギー・負荷平準化の取り組みで空気調和・衛生工学会特別賞十年賞を受賞できたことは、皆様のご協力の賜物です。深く感謝いたします。

一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション創発センター 黒本英智氏、宮永俊之博士、上野剛博士、岩松俊哉博士、安岡絢子博士、㈱電算センター 前田幸司郎氏、電共研参画電力会社担当者各位、㈱四電技術コンサルタント 堀岡建吾氏、高知工科大 中

川克也氏には、第4章を行うにあたりご指導を頂きました。これまで電力会社における重要機器室の空調設備の状況はほとんど解明されておらず何もかもが試行錯誤でしたが、研究を実施した6年間の成果はとても大きなものとなりました。本論文ではほんの一部しか取り上げることができませんでしたが、この研究における成果が日本中の重要機器室の省エネルギー・コスト削減に寄与できると信じています。長い間、ありがとうございました。

福島大学共生システム理工学類 特任教授 赤井仁志博士、中部電力株式会社 一瀬茂弘博士には、本研究以外にも多大なるご指導ご鞭撻を頂きました。都市環境工学出身の私がこれまで建築設備系の研究を続けることができたのは、皆様のご指導の賜物だと思います。本当に感謝しております。ありがとうございました。

コロラド州立大学 教授 Alexander F. H. Goetz 博士には、第2章に関する調査、研究を実施するにあたり、ご指導ご鞭撻を頂きました。当時の日本では入手が困難であったハイパースペクトルデータはもちろん、現地調査や解析の際には、ポータブル分光放射計や解析プログラムなどの機材まで提供して頂きました。私の技術が未熟でまだ解析できていない部分も沢山残っていますが、海外での調査、研究は非常に貴重な経験となりました。ここに記して謝意を表します。

四国電力株式会社 故田中英成氏、別枝修氏、末澤等氏、故渡部雄一氏、長尾和明氏、大野裕紀博士、細川高志氏、安岡稔弘氏、青野政信氏、竹川忠克氏、宇草和義氏、西山道大氏、南部佑輔氏、藤井良平氏には、建築業務、研究全般にわたりご指導ご鞭撻を頂きました。何かとご迷惑をおかけいたしました、なんとか学位論文として取りまとめることができました。本当にありがとうございました。

(株)四国総合研究所 土木技術部の皆様には本論文執筆にあたり、多大なるご支援を頂きました。皆様の研究に対する熱意を感じ、環境工学以外からの観点で本論文執筆に対するモチベーションを上げることができました。ここに記して謝意を表します。

高木研究室の卒業生、現役生の皆様には、本研究以外にも多大なるご協力を頂きました。(株)フジタ 滝澤勇輝氏、中部電力株式会社 西川武志氏をはじめ、皆様のご協力なくしては私の研究は成り立ちませんでした。ありがとうございました。

最後に、長い間私の実務とこれまでの研究生活を様々な面で支えてくれた全ての方々、特に両親と妻 絵美、そして長男 岳、長女 奏に感謝をいたします。

平成 29 年 3 月吉日

天野 雄一朗