T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	建築物の給水・給湯システム設計における水・エネルギー消費の評価手法に関する研究
Title(English)	Evaluation for Water and Energy Consumptions of Water and Hot Water Supply System Design in Buildings
著者(和文)	長谷川巌
Author(English)	Iwao Hasegawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12432号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:鍵 直樹,安田 幸一,湯淺 和博,淺輪 貴史,大風 翼
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12432号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

学位論文【博士(工学)】

建築物の給水・給湯システム設計における
水・エネルギー消費の評価手法に関する研究

Evaluation for Water and Energy Consumptions of Water and Hot Water Supply System Design in Buildings

2023 年 2 月

東京工業大学　環境・社会理工学院
建築学系　建築学コース

長谷川 巌

目 次

第１章 序論 ･･ 5
1-1 研究の背景･･･ 5
1-2 既往の研究･･･ 6
1-3 研究の目的･･･ 7
1-4 研究の構成･･･ 8
参考文献 ･･ 11

第２章 計算体系と計算モデルの構築･･･ 12
2-1 計算体系の全体像･･ 12
2-2 計算モデルの構築と特徴･･･ 14
2-2-1 水消費量とエネルギー消費量の同時算出 ･･････････････････････････････････････ 14
2-2-2 原単位の細分化とモジュール計算 ･･･ 14
2-2-3 計算時間間隔の考察･･ 16
2-2-4 既往研究のデータの活用と更新性 ･･･ 17
2-2-5 気象データの活用と他設備との連成計算 ･･････････････････････････････････････ 17
2-3 本研究における検討対象範囲･･･ 17
2-4 本章のまとめ･･ 17
参考文献 ･･ 18

第３章 給水システムにおける算定手法の検討と実測データによる適用･････････････････ 19
3-1 本算定手法における給水負荷算定法･･ 19
3-1-1 実用的な負荷算定手法･･･ 19
3-1-2 原単位データの細分化･･･ 20
3-1-3 給水・給湯負荷パターンデータベースの構築 ･･････････････････････････････････ 22
3-2 実測データに基づく本算定手法への適用･･ 24
3-2-1 解析対象建物の概要･･ 24
3-2-2 衛生器具別の時刻別使用頻度の解析結果 ･･････････････････････････････････････ 25
3-2-3 衛生器具別の平均吐水量と原単位データの解析 ･･････････････････････････････ 36
3-2-4 本算定手法への適用･･ 38
3-3 本章のまとめ･･ 47
参考文献 ･･ 48

第 4 章 給湯システムにおける算定手法と省エネルギー設計への適用 49
4-1 給湯システムシミュレーションの計算モデル 49
4-1-1 システム構成と計算モデル 49
4-1-2 計算順序 52
4-1-3 各モジュールにおける計算 53
4-2 用途別給湯使用量パターンのデータ整備 61
4-3 加熱装置の機器特性 62
4-3-1 機器特性の調査と整備 62
4-3-2 加熱装置の機器特性 62
4-4 計算例と省資源・省エネルギー設計への適用 65
4-4-1 計算例の諸元と計算条件 65
4-4-2 基準ケースの計算結果 65
4-4-3 比較検討ケースの計算結果 70
4-5 本章のまとめ 73
参考文献 74

第 5 章 給水・給湯システムにおける本算定手法の適用例と評価 76
5-1 雨水利用システムを例とした水・エネルギー消費の算定 76
5-2 雨水利用システムシミュレーションの計算モデル 76
5-2-1 システム構成と計算モデル 76
5-2-2 計算順序と計算内容 78
5-2-3 各モジュールにおける計算 78
5-2-4 雨水利用率、上水代替率の算定 81
5-3 計算例と既往の雨水利用システム設計方法との比較 82
5-3-1 計算条件 82
5-3-2 計算結果（年間値、年間電力消費量） 83
5-3-3 既往の計算方法との比較 86
5-3-4 降水量気象データに関する考察 88
5-3-5 年間計算における助走期間の考察 89
5-4 雨水利用システムのケーススタディー分析 91
5-4-1 節水による効果分析 91
5-4-2 水位制御による影響分析 92
5-4-3 地域別降水量による影響分析 94
5-4-4 雨水集水面積による影響分析 97
5-5 太陽熱・太陽光利用給湯システムを例とした水・エネルギー消費の算定 98

5-6 太陽熱利用給湯システムの計算モデル 98
5-6-1 システム構成と計算モデル 98
5-6-2 太陽熱集熱パネルの効率特性 99
5-7 太陽熱利用システムのケーススタディー分析 100
5-7-1 検討対象建物と給湯設備諸元 100
5-7-2 検討ケース 101
5-7-3 算定結果 102
5-8 太陽熱・太陽光発電を用いた給湯システムにおける需要供給バランスの検討 104
5-8-1 検討ケース 104
5-8-2 算定結果 105
5-9 給水・給湯システムにおける ZWB と ZEB の相互影響と本算定手法の評価 110
5-10 計画・設計・運用プロセスにおける本評価手法の有効性 114
5-11 本章のまとめ 115
参考文献 119

第 6 章 結論 120
6-1 結論 120
6-2 今後の課題 122

第 1 章 序論

1-1 研究の背景

地球環境負荷削減と水資源の保護を背景に、わが国の建築物総合環境性能評価システム CASBEE や米国が開発した建築物の環境性能総合評価システム LEED 認証では、水資源の有効利用の項目において節水化が求められている。節水化の動向とともに、建築物における雨水利用システムは、上水を節約するために有効な利水性の観点だけでなく、非常時の水の確保や河川や下水道への急激な雨水排水の流出を抑制する治水性の観点も考慮し、オンサイトでの雨水の一次貯留が計画されるようになって来た。2014 年 5 月に国土交通省より施行された雨水の利用の推進に関する法律では、国と独立行政法人等が保有する最下階床下等で雨水の一時的な貯留に活用できる空間を有する全ての新築建築物について，原則雨水利用施設を設置するとしている [1-1)]。また、米国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー部では、ゼロ・ウォータービル（Net-Zero Water Building）を、「水の総消費量の大幅な削減を行い、地下水や地表水の水量・水質を保全しつつ、できるだけ多くの上水以外の水を利用し、市水などの供給源と同等の水量の水をリサイクル再利用して、計画・設計・建設・運用される建物」と定義している。ゼロ・ウオーター・ビル（以降、ZWB）の概念 [1-2)]として、雨水は上水の代替資源の一つとして位置づけられている。このような背景から，給排水衛生設備の分野では，建設敷地内のオンサイトでの雨水利用の工夫が必要となっている。

2050 年カーボンニュートラルに向け、より一層の省エネルギー化が求められており、住宅・建築物の分野においては、2016 年 4 月より施行された建築物省エネ法（建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律）では 2024 年度に省エネ基準が強化され、遅くとも 2030 年度には省エネ基準が現行のゼロ・エネルギービル（以降、ZEB）相当の基準となる見通しである [1-3)]。とりわけ給湯設備システムは給排水衛生設備の分野の中で最もエネルギー消費量に影響する分野である。特にホテル、病院、飲食店舗の建物用途では、建築物のエネルギー消費量のうち給湯エネルギー消費量の占める割合が 1～2 割と高いため [1-4)]、今後、給排水衛生分野としても ZEB に向け、給湯エネルギー消費量の削減に向けた計画・設計はますます重要となっている。

一方、建築物の給水・給湯システムの計画・設計の実務の分野では、水槽やポンプなどの設備容量や配管口径を決定することを目的とした検討及び計算手法は確立しているが、人の水使用行為の変化、建設地や気象条件による給排水衛生システムへの影響や、水使用量とともにエネルギー消費量を体系的かつ時刻別変動により予測することは少なかった。しかしながら、今後、ZWB や ZEB の実現のためには、精度の高い省資源、省エネ設計を行い、運用段階で実績値との検証を行うことが出来る必要がある。このためには、人の水使用行為の挙動を示す給水・給湯パターン、節水器具の採用、建設地における気象状況、運転制御の考慮、雨水や太陽熱などの再生資源や給排水衛生システムにおける未利用エネルギー・再生

可能エネルギーなど他領域との連成が必要となり、現在の給排水衛生分野における検討手法とは異なる計算手法の構築が求められていると考える。

1-2 既往の研究

本研究を行うあたり、関連する既往研究や文献を調査し、本研究の位置づけと本研究で参照した内容について考察を行う。

村川ら[1-5]は、時系列的な負荷変動を考慮し、瞬時給水給湯負荷をシミュレーションする動的負荷算定法を開発している。この計算手法は瞬時最大負荷の算定精度に主眼が置かれており、給水システムの実務設計において衛生設備機器の余裕度を考慮するなど、水使用量が運用で変化した場合の設備機器の挙動を把握することを目的としたものではない。また給湯システムにおいては、給湯負荷パターンの予測をシミュレーションで行い、その結果から機器容量の算定を行っているが、建設地における外気温度、給水温度、給湯配管経路と貯湯槽から熱損失、給湯機器の機器特性を考慮した給湯エネルギー消費量を詳細に算出する方法ではない。

小坂[1-6]により、社会情勢や技術革新に伴う衛生器具の節水化や複合用途の建築物への対応など、水使用原単位の可変性に対応した水負荷計算法が提案されている。水使用量の時間負荷変動と機器容量との関係までは踏み込んだ計算手法とはなっていない。

給湯エネルギー消費量の算出方法に関しては、従前の省エネ法である CEC-HW で用いられた算定手法[1-7]は月平均での外気温度や給水温度を考慮するに留まり、時刻別の給湯負荷変動を考慮したものではない。今後は、太陽熱利用給湯による自然エネルギー利用や、温泉排熱、下水熱利用など未利用エネルギーを活用した給湯システムの検討にも拡張可能な計算手法が求められる。

また本研究では文献調査を行い、既往の調査で得られた給水・給湯負荷原単位及び負荷パターンをデータベースとして扱い、本研究の計算手法でも活用できるよう、既往の研究成果との連動性を考慮した。

内山らによる調査・分析[1-8]では、多くのアンケート調査及び文献調査データから、事務所ビルを対象に節水化に伴う設計用給水原単位の見直しを行っており、実務上有用なデータとして参考とした。

光永らによる調査・分析[1-9]では、現在の設計資料が 1980 年頃の水使用調査に基づき決定された値であることを背景に、節水化が進む状況を考慮し、設計用単位給水量の見直しの試案を行っている。この報告で特筆すべきは、住宅、事務所、総合病院、宿泊施設、飲食店、小・中・高等学校、幼稚園・保育園、駅舎、高速道路休憩施設と多用途に亘るデータ分析となっているとともに、設計用単位給水量が包括する範囲を示しており、本研究で提案採用している原単位の細分化につながるものとして参考とした。

本研究と、瞬時給水負荷算定法を対象とした既往研究との違いを図 1-1-1 に示す。既往研究に基づく設計手法は、設備容量や配管サイズを決定するための最大負荷を評価する目的としているのに対して、本研究の評価手法は、設計目標値の達成に向けた与条件やシステムの評価である。既往研究は、現状の設計条件から積み上げて規模や容量を算定する手法、いわゆる「フォアキャスティング手法」であるが、本研究は、規模や容量に制限がある目標値に対してどのような設計条件となれば実現可能かを評価する、「バックキャスティング手法」を取っている。また、本研究では与条件仮定のための設備容量算定手法、原単位、負荷パターンは既往研究の成果を活用しているが、検討の目的が異なるところが大きな違いである。

計算時間間隔の観点では、既往研究において瞬時最大負荷の算出では数秒単位で算定され、機器容量の決定では 1 時間単位で算定されている。本研究では、給排水衛生分野以外との連成計算、時刻別変動を考慮した負荷算定、設備機器特性や運転制御を考慮した計算によりシステムシミュレーションを行うことを目的とし、計算時間間隔の考察を行う。

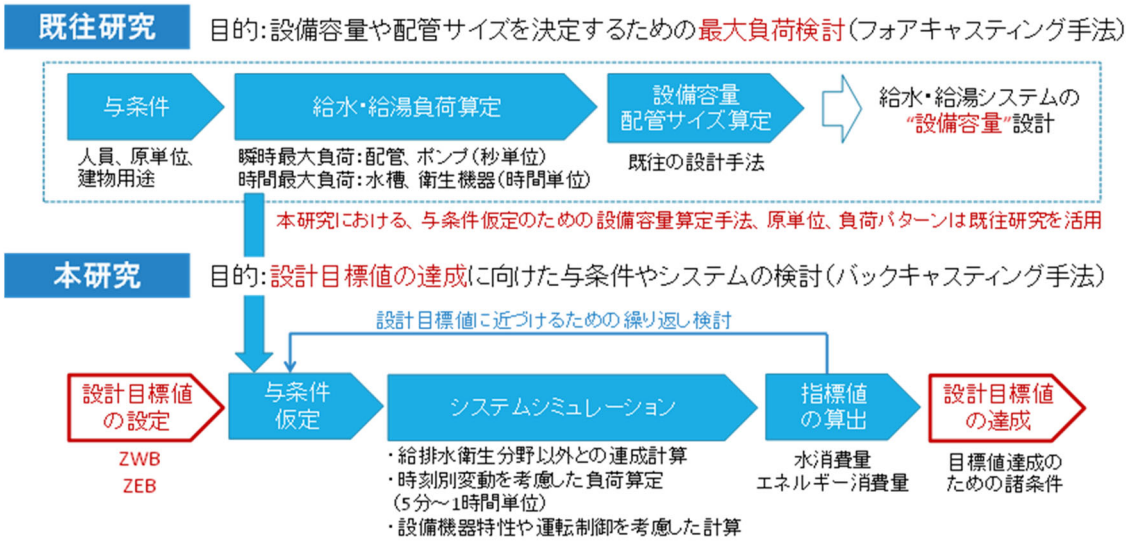


図 1-1-1 既往研究と本研究の相違点の比較

1-3 研究の目的

本研究は建築物を対象に、給排水衛生分野のうち給水・給湯システムの設計における、水消費とエネルギー消費の算定・評価手法を検討し、省資源と省エネルギー設計への適用性・有効性を示すことを目的としている。

本研究では、建築物の給排水衛生システムにおける計画・設計・運用における一連のプロセスの全体像を示した上で、給水・給湯システムを対象に、給水・給湯負荷変動による時刻別の水・エネルギー消費量と同時に算定する手法を開発した。なお、従来、給排水衛生設備分野で実施されてきた瞬時最大負荷に基づく機器装置容量や、配管口径の決定を行うための算定手法は本研究の対象外と位置づけている。

また、既往研究データベースとの連動性を考慮するとともに、節水化の進展、雨水などの代替水源、未利用エネルギー、再生可能エネルギー利用などの拡張性を図ることで、実務者にとって有用な算定手法とすることで、省資源かつ省エネルギー設計に寄与出来ることを示した。

1-4 研究の構成

本論文の構成を図 1-2-1 に示す。

本論文は「建築物の給水・給湯システム設計における水・エネルギー消費の検討手法に関する研究」と題し、以下の６章から構成される。

第１章「序論」では、地球環境負荷低減と水資源保護を背景とした社会動向と法令の整備とともに、給排水衛生設備の実務設計で求められていることを整理する。その上で、本研究に関係する既往研究と文献調査を行い、参考となる部分を引用し、既往研究との違いを示すことで、本研究は建築物を対象に、給水・給湯システムの設計における水消費とエネルギー消費の算定手法を検討し、省資源と省エネルギー設計への適用性・有効性を示すことを目的としていることを述べている。

第２章「計算体系と計算モデルの構築」では、将来像も含めた建築物の給排水衛生システムにおける計画・設計・運用における一連のプロセスの全体像を示し、水消費量の負荷算定からシステム計算によるエネルギー消費量までを同時に算出する仕組みを提案する。計算モデルには５つの特徴があり、①「水消費量とエネルギー消費量の同時算出」により、水使用行為に伴うエネルギー消費への影響をシステム計算により把握出来、設計したシステムの検証を行うことが出来ること、②「原単位の細分化とモジュール計算」により、あらゆる建物用途で負荷算定計算が可能なモデルとし検討するシステムの拡張性が高いこと、③「計算時間間隔の考察」により、設計フェーズに応じた算定が可能であること、④「既往研究のデータの活用と更新性」により、既往研究の知見との連動性と汎用性が高くなること、⑤「気象データの活用と他設備との連成計算」により、給排水衛生システムと他設備との外部境界条件を設定し、連成計算を行うことで、未利用エネルギーや再生可能エネルギーの活用検討にも寄与出来ることを述べる。

第３章「給水システムにおける算定手法の検討と実測データによる適用」では、まず実用的な負荷算定手法として原単位の細分化を行い、給水・給湯負荷は、人員、衛生器具１回あたりの吐水量、衛生器具一人１日あたりの使用回数、時刻別の使用水量・湯量の１日あたりの比率の積で求められることを示し、男女比率、節水の有無、水使用頻度や利用パターンに応じて算定が出来ることを述べる。次に既往の研究を調査し、給水・給湯負荷パターンのデータベースを整理するとともに、器具別吐水量と衛生器具別の給水負荷パターンの実測データを解析し本算定手法に適用する。給水システムの算定においては、ポンプの電力消費量を算出するための機器特性を調査し定式化し、給水システムの違いと節水の有無による電力消費量の比較を行う。さらに、時刻別に水槽内の水位変動を示し、水槽内の水の滞留時間

を分析することで衛生面での検証が出来ることを述べる。

第４章「給湯システムにおける算定手法と省エネルギー設計への適用」では、給湯システムシミュレーションの計算モデルとして、加熱装置（給湯ボイラー）、貯湯槽、給湯循環配管で構成される中央式給湯システムを対象として構築する。加熱装置、貯湯槽、給湯循環ポンプ、給湯配管をモジュールとして扱い、それぞれのモジュールでの計算方法を示すとともに、計算順序を示す。給水システム計算と同様に、既往の研究から建物用途別の給湯負荷パターンを整理し、種々の加熱装置での計算が可能なように、給湯ボイラー、連結型瞬間湯沸器、ヒートポンプ給湯機の機器特性を調査し整備する。これらにより設計への適用性を高める工夫を行う。給湯負荷の大きいホテル用途を計算例とし、給水・給湯負荷変動、給湯エネルギー消費量、給湯配管や貯湯槽からの熱損失量を示す。その後、節湯器具の採用、地域別の検討、保温仕様の検討、加熱装置の効率の変更、負荷パターンの変更、給湯使用量の変更を行った場合に、どの程度給湯エネルギー消費量が変化するかを示し、これらの検討により省エネルギー設計への適用性について述べる。

第５章「給水・給湯システムにおける本算定手法の適用例と評価」では、具体的な設計適用例として、雨水利用システムと太陽熱・太陽光利用給湯システムを取り上げ、本算定手法を用いることでどのような検討が可能かを示す。雨水利用システムでは、計算モデルと算定手法を示し、設計で用いられる雨水利用率、上水代替率の指標を用い既往の設計手法との比較を行う。時刻別計算を行う本算定手法の特徴を活かし、雨水を補給して制御する雑用水受水槽における水位制御方法を変えた場合の評価、地域別降水量による影響分析、雨水集水面積による検討を行い、オンサイトにおいて自家消費による雨水利活用を促す ZWB の検討に適用出来ることを示す。太陽熱・太陽光利用給湯システムでは、まず太陽熱利用給湯システムの計算モデルと算定手法を示し、太陽熱集熱面積と給湯エネルギー消費量の関係を地域別、集熱タイプ別に算出する。次に太陽光発電・蓄電池とヒートポンプ給湯機を組み合わせた検討を加え、発電により昼間に生じるエネルギー供給に対して、特に夜間に需要が生じる宿泊施設を対象として、需要と供給が同時・同量でバランスするシステムについて分析し、給湯エネルギー消費量の ZEB 検討に適用出来ることを示す。また、本研究を通じて、給水・給湯システムの設計において進歩した点として、ZWB と ZEB の相互影響と関係性について考察する。最後に、本算定手法を用いた給水・給湯システムの計画・設計・運用プロセスにおける適用範囲を示し、本研究で示す評価手法の有効性を述べる。

第６章「結論」では、本研究で得られた成果の概要と、研究成果による建築物の給水・給湯システム設計における活用例を示すとともに、今後の課題と研究の展開について述べる。

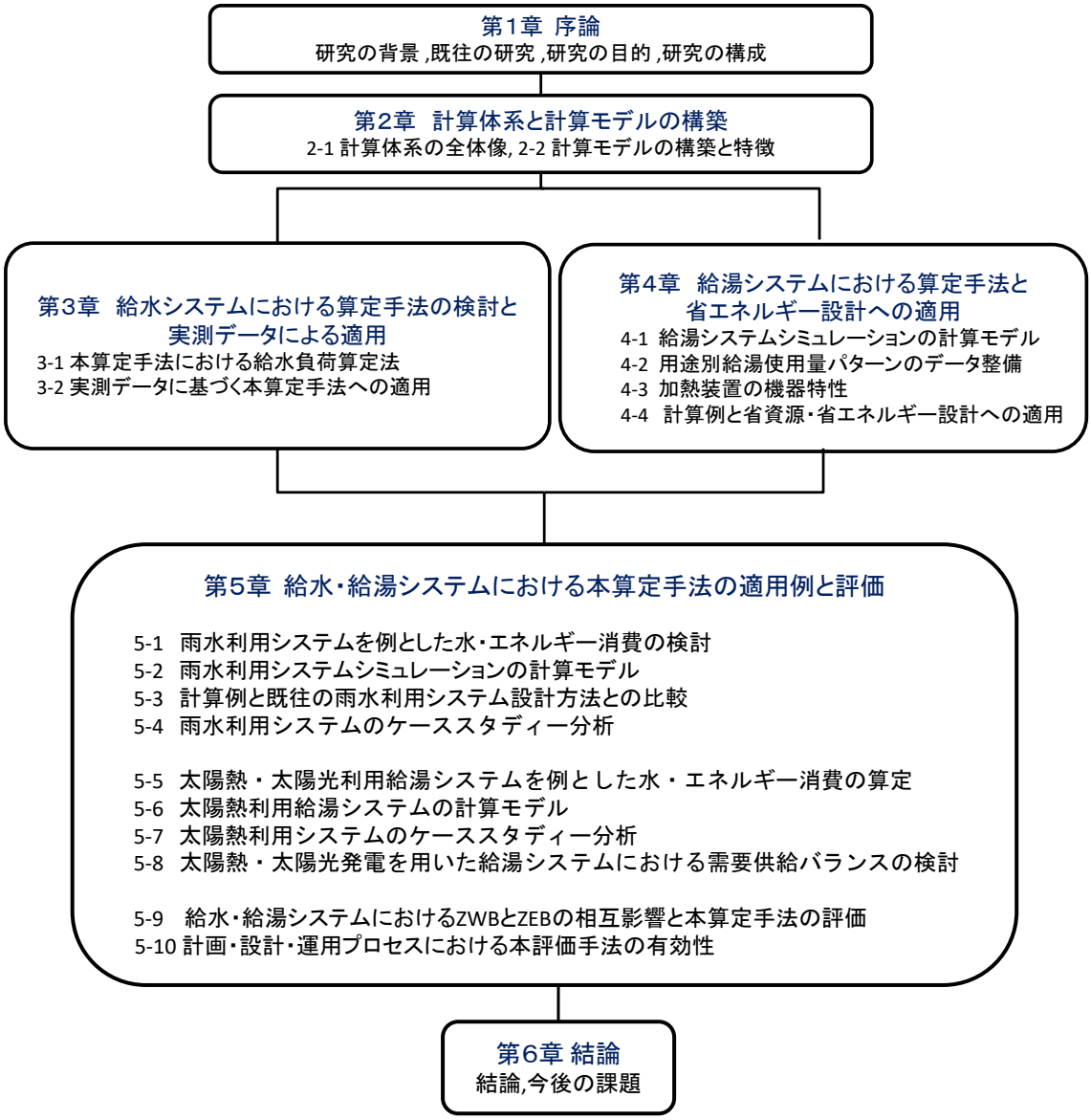

第1章 序論
研究の背景 ,既往の研究 ,研究の目的 ,研究の構成
第2章 計算体系と計算モデルの構築
2-1 計算体系の全体像, 2-2 計算モデルの構築と特徴
第3章 給水システムにおける算定手法の検討と実測データによる適用
3-1 本算定手法における給水負荷算定法
3-2 実測データに基づく本算定手法への適用
第4章 給湯システムにおける算定手法と省エネルギー設計への適用
4-1 給湯システムシミュレーションの計算モデル
4-2 用途別給湯使用量パターンのデータ整備
4-3 加熱装置の機器特性
4-4 計算例と省資源・省エネルギー設計への適用
第5章 給水・給湯システムにおける本算定手法の適用例と評価
5-1 雨水利用システムを例とした水・エネルギー消費の検討
5-2 雨水利用システムシミュレーションの計算モデル
5-3 計算例と既往の雨水利用システム設計方法との比較
5-4 雨水利用システムのケーススタディー分析
5-5 太陽熱・太陽光利用給湯システムを例とした水・エネルギー消費の算定
5-6 太陽熱利用給湯システムの計算モデル
5-7 太陽熱利用システムのケーススタディー分析
5-8 太陽熱・太陽光発電を用いた給湯システムにおける需要供給バランスの検討
5-9 給水・給湯システムにおけるZWBとZEBの相互影響と本算定手法の評価
5-10 計画・設計・運用プロセスにおける本評価手法の有効性
第6章 結論
結論,今後の課題

図 1-2-1 本論文の構成

参考文献

1-1）国土交通省「雨水の利用の推進に関する法律」（平成 26 年法律第 17 号）、雨水の利用の推進に関する基本方針（概要）

1-2) Net Zero Water Building Strategies, United States Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable energy
https://www.energy.gov/eere/femp/net-zero-water-building-strategies

1-3)「脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方検討会」まとめ、 国土交通省、経済産業省、環境省、2021.8

1-4)「ホテルの省エネルギー」「病院の省エネルギーポイント」、 財団法人 省エネルギーセンター、2021.4 閲覧

1-5) 村川三郎、池田大輔、坂本和彦、高田宏 著：建築物の新給水給湯負荷算定法と実務設計、彰国社、2020.4 発行

1-6) 小坂信二：給水使用量の新しい計算方法の提案（水負荷計算法）-水負荷計算法の概要と事務所ビルの設計用給水使用量計算例-、空気調和・衛生工学会論文集(2016.2)、pp.61-70

1-7）建築物の省エネルギー基準と計算の手引 新築・増改築の性能基準(PAL/CEC) （改定 2 版）、 財団法人 建築環境・省エネルギー機構、(2010.9.1）、pp.293-337

1-8）事務所ビルを対象とした設計給水データの検討、空気調和・衛生工学会、給排水衛生設備委員会 設計給水データ検討小委員会、委員会成果報告書 R2030-2016、 2015.10.30 発行

1-9) 各建物用途における設計用給水量と動的給水給湯負荷算定法による最適設計の検討、空気調和・衛生工学会、給排水衛生設備委員会 給水給湯設備の設計データ検討小委員会、委員会成果報告書 R2045-2022、2021.11.30 発行

第２章　計算体系と計算モデルの構築

本章では、第１章で述べた研究の背景、既往の研究に基づき、本研究のねらいとしている給排水衛生システムの計算体系の全体像を示すとともに、計算モデルの構築と特徴を示す。また、このうち本研究の検討対象としている給水・給湯システムシミュレーションの範囲を示す。

2-1 計算体系の全体像

本研究において、将来像も含めて算定手法のねらいとしている計算体系の全体像を図 2-1-1 に示す。これまで給水・給湯・排水といったシステムを個別に計算していたものを、給排水衛生システムにかかる負荷算定から、機器・配管などから構成されるシステム計算を行うことで、計画段階から運用段階にわたり、運用・制御変更も含めた事象を再現し、実務上有効な計算結果を導くことを目的としている。

図 2-1-1 に示す上段部分は、水消費量等を算出するための負荷算定であるが、この結果を入力値としてシステム計算を行うことでエネルギー消費量を同時に算出する。水消費量等の負荷算定とエネルギー消費量を同時に算出する意義は、時刻別に発生する人の水使用行為による給排水衛生システムにおける、節水、搬送、貯留、蓄熱、断熱に伴うエネルギー消費量を的確に把握することが出来、今後導入が期待される未利用資源やエネルギーや再生可能エネルギー・熱の有効利用を行うための需要予測にも適用できると考える点にある。

負荷算定では、原単位を細分化することで入力値の精度を上げ、既往研究の負荷パターンデータを活用することで、時間変動に対応したエネルギー計算が可能となる。また降水量や外気温度等，気象データの活用と他設備との連成を考慮している。

また、設計目標値を達成するための与条件と指標値について青枠で図 2-1-1 に記載し、本研究における算定プロセスとの関係を明示した。建設地、建物用途、使用人員、水使用特性を与条件として、ZWB や給排水衛生設備を対象とした ZEB を目標値とする設計における算定プロセスを示したものとなる。

なお本研究では、給水・給湯システムに関わる赤枠部分を対象としている。

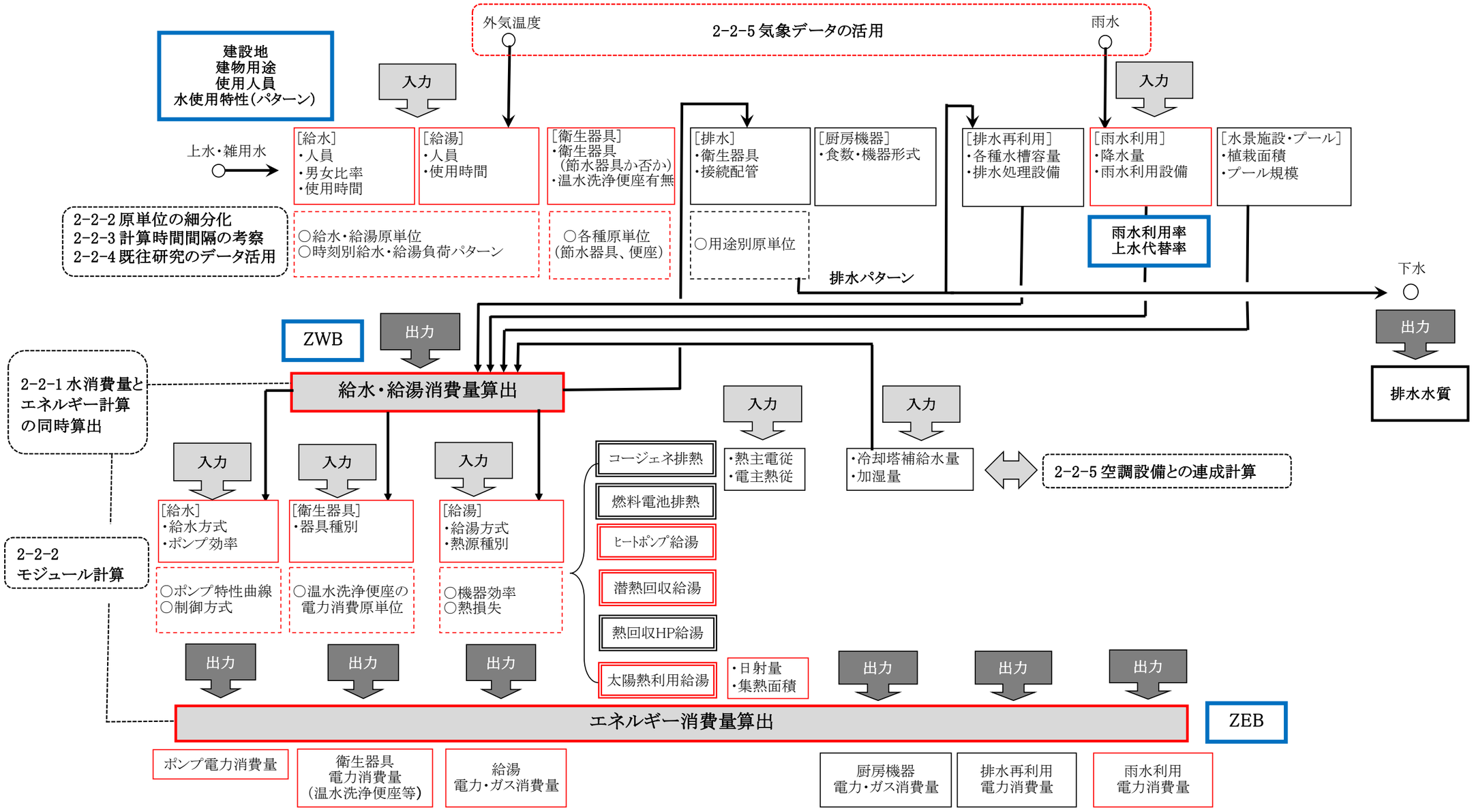


図 2-1-1 給排水衛生システムの計算体系の全体像

2-2 計算モデルの構築と特徴

本研究で述べる算定手法の計算モデルの構築と特徴を以下に示す。

2-2-1 水消費量とエネルギー消費量の同時算出

図 2-2-1 に給排水衛生システム計算のマクロモデルを示す。計画段階では、建物内での水使用行為に伴い生じる給水・給湯負荷の算定を行い、建築物で必要な水使用量を算出し、負荷変動に応じて、ポンプ、衛生器具、給湯機器などで構成される給排水衛生システムで消費されるエネルギー消費量を予測することが可能となる。このとき水槽内の水位変動やポンプの発停状況など機器の運転状態を把握することができる。運用段階では、計画した水使用量が変化した場合に、実績値に基づき、貯留量の設定、降水量に応じた雨水貯留量や機器の稼働方法を検討することができる。

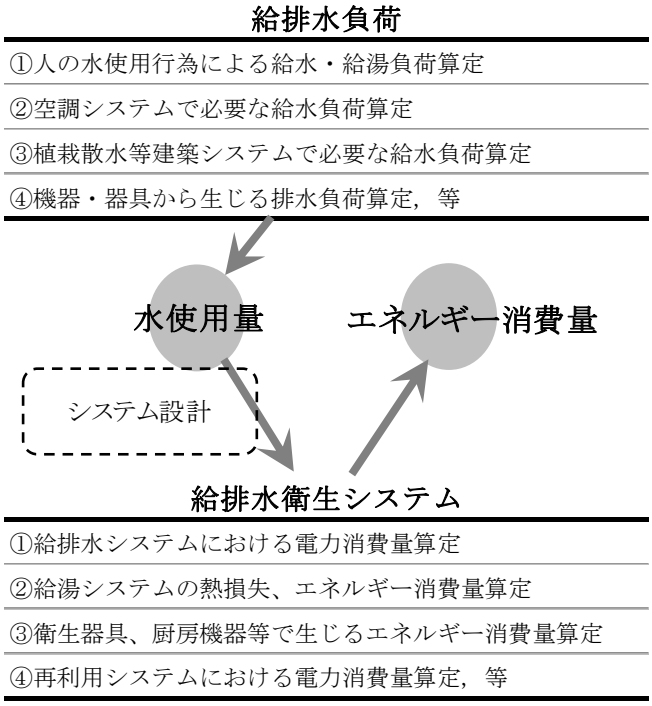


図 2-2-1 給排水衛生システム計算のマクロモデル

2-2-2 原単位の細分化とモジュール計算

図 2-2-2 に給水システムのモデル例を示す。従来から設計で用いている水使用量原単位を、便所、洗面などの水使用部位ごとに細分化し、衛生器具の吐水量、男女別使用頻度に分解することで、あらゆる建物用途で負荷算定計算が可能なモデルとしており、既往の研究データを活用できる。さらに時間負荷変動を考慮することで負荷算定と給排水衛生システムとの連動を考慮している。給排水衛生システムは、ポンプモジュール、水槽モジュール、配管モジュール等で構成され、各モジュールをつなぐことで多様なシステムを構成でき、各機器の容量変更計算も可能となる。

図 2-2-2-(a)(b)では、一般的な給水システムである高置水槽方式と加圧給水方式（ポンプ直送方式）におけるモデルを示している。高置水槽方式の場合には、水使用部位において給水負荷が発生し、高置水槽の水量が減り、水位が下限に達すると、揚水ポンプが稼働する。次に受水槽の貯水量が減り、水位が下限に達すると補給水が受水槽に給水される。加圧給水方式の場合には、給水負荷の発生に応じてポンプが発停を行う。これらの一連の動作を計算時間間隔に応じて時刻別に計算することで、水使用量とエネルギー消費量が同時に算出される仕組みとなっている。

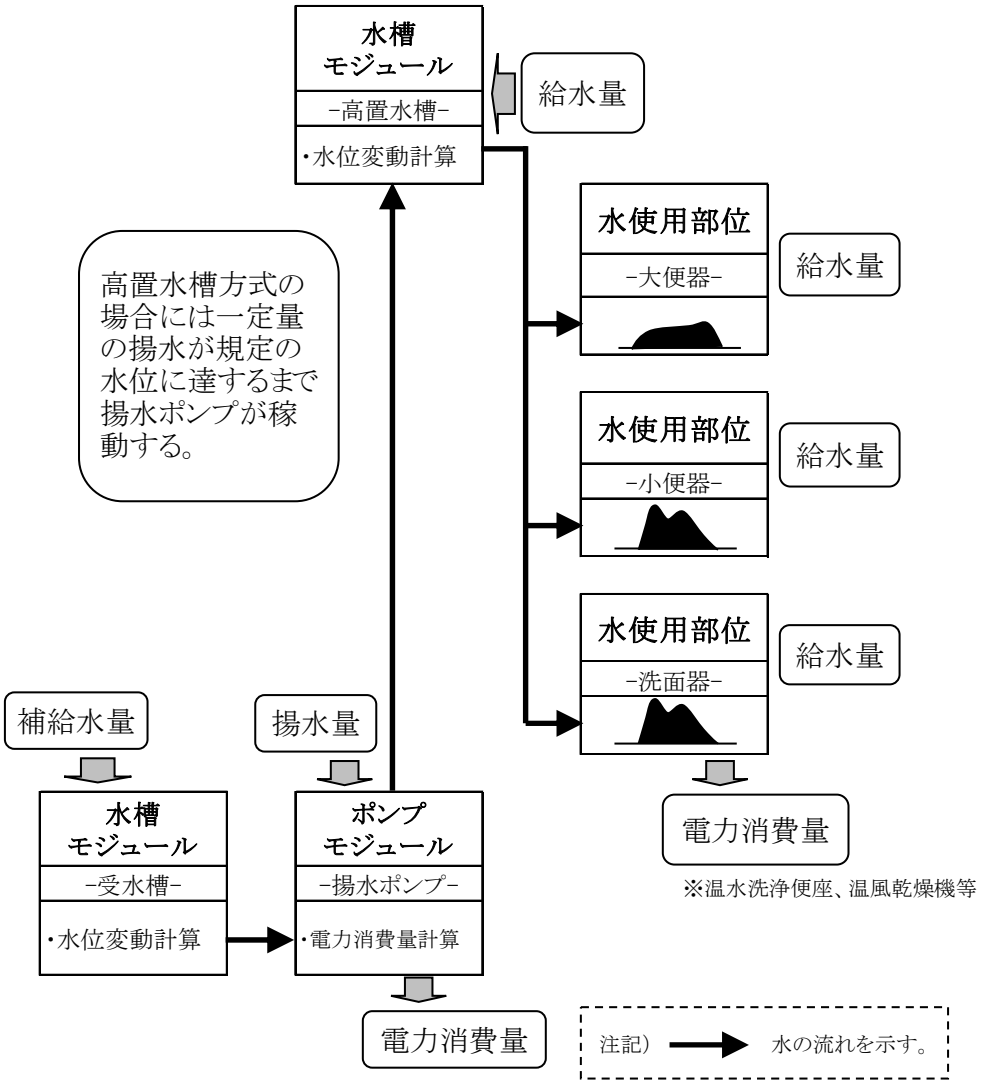


図 2-2-2-(a) 給水システムのモデル（高置水槽方式）

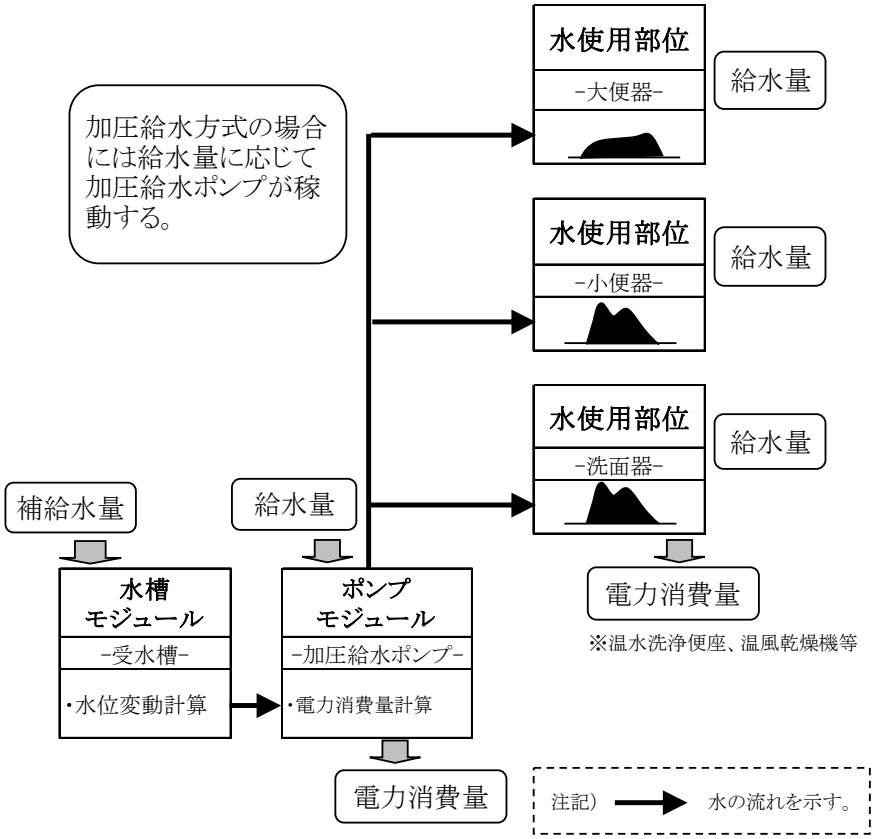


図 2-2-2-(b) 給水システムのモデル（加圧給水方式(ポンプ直送方式)）

2-2-3 計算時間間隔の考察

本算定手法はモジュール間で、水量や水温を時刻別に受け渡して計算結果を導く手法となっているため、求められる計算の精度に応じて、1 分、5 分、10 分、1 時間など計算時間間隔を変えて計算することが出来る。また計算時間間隔の設定は、入力する境界条件データの粒度によることと設計のフェーズにもよる。設計初期段階の情報が少ない段階では、計算時間間隔を長くし概略検討を行い、設計後期段階や運用段階では、目的に応じて、短い計算時間間隔により算定することが考えられる。

計算精度と実務設計の視点において妥当な計算時間間隔を考察する。設備機器特性の観点から見れば、ポンプや加熱装置などの設備機器の特性を考慮するため 5～10 分間隔が妥当となる。一方、設計に対する評価の観点からシミュレーションによる予測値と実績値を比較することを考慮すると、現時点では BEMS 等による 1 時間データが現実的な時間間隔となる。

2-2-4 既往研究のデータの活用と更新性

既往の文献値データや研究成果で調査された給水・給湯負荷パターンデータや、器具使用レベルのデータを用いることができるほか、これらのデータが更新された場合にも入れ替えることが可能な仕組みとなっている。すなわち、従来形器具を節水形器具へ変更した場合の効果の検討や、建物入居者の男女比、建物利用状況が変化した場合においても対応ができ、データの更新が可能である。

2-2-5 気象データの活用と他設備との連成計算

雨水利用システムの計算は、建設地の降雨量データによる雨水集水や雨水貯留計算、給湯システムの計算は、外気温度に影響する給水温度計算や、配管長さや配管経路に応じた熱損失計算を同時に行い数値化され、給水給湯負荷やエネルギー消費量計算に反映される。また、従来の給水給湯負荷算定法や給排水衛生システムの計算は、他設備とは独立しているものであるが、本計算体系では、空調設備や電気設備との連成計算を行うことで、建物全体のエネルギー消費量に反映されることを視野に入れている。

2-3 本研究における検討対象範囲

本研究では、給排水衛生システムのうち、基本となる給水及び給湯システムにおける算定手法の検討を対象範囲とし、図 2-1-1 の計算体系の全体像において赤枠で示した部分とする。以降、第３章～第５章において、算定手法と設計での検討例を詳述する。なお、本研究では給水・給湯システムを検討対象としており、瞬時最大負荷によって算定されるポンプの水量や配管口径を求めることは対象としていない。

2-4 本章のまとめ

本章では、地球環境負荷低減と水資源の保護の観点から、建築物における水使用量と給排水衛生システムで消費されるエネルギー消費量を同時に算定するために、給排水衛生システムの計算体系の全体像と計算モデルの構築を行った。計算モデルの特徴として、水使用量とエネルギー消費量を同時に算出することにより得られる設計実務上の内容、給水負荷原単位の細分化とシステムを機器モジュール単位で計算する手法、実務計算の精度に応じた計算時間間隔の考察、既往研究のデータの活用と更新性、気象データの活用と給排水衛生設備以外との連成計算を述べた。そして、本研究における対象として、第３章～第５章で述べる給水・給湯システムシミュレーションの範囲を示した。

参考文献

2-1）大塚雅之、村上周三、長谷川巌、小瀬博之、前真之、甕岡賢吾：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 4）：給排水衛生システムの計算体系、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2007.9）、pp.1981-1984

2-2）長谷川巌、村上周三、大塚雅之、小原直人、村江行忠、土井章弘：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 5）：給排水衛生システムの計算法、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2007.9）、pp.1985-1988

2-3）長谷川巌、大塚雅之、小瀬博之、村上周三：給水システムにおける水・エネルギー消費を算出するシミュレーションツールの開発に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集(2021.10）、pp.17-26

第３章　給水システムにおける算定手法の検討と実測データによる適用

給水設備分野における既往の研究では給水負荷算定に重きが置かれており [3-1)]、給水負荷算定からシステム設計や竣工後の運転検証に至るまで、一貫して検討するための算定手法は無かった。

本章では、給水負荷算定と給水システムにおける制御や運転状況との連動性を高めることを目的とし、給排水衛生分野における基本となる給水システムに関して検討する。既往の研究で示された水負荷計算法 [3-2)]による負荷算定手法を発展させ、給水負荷変動のデータについて、既往研究調査及び実測データにより充実させる。ポンプ類に機器特性を検討するとともに、第２章で示した計算モデルを用いて、給水システムのシミュレーション比較を行い、給水負荷、エネルギー消費量、システムにおける水槽類の水位変動を分析する。

3-1 本算定手法における給水負荷算定法

3-1-1 実用的な負荷算定手法

建物内の負荷算定においてもっとも基本となるのが、人の水使用行為による使用水量の算定となる。給排水衛生システムの設計では一人１日あたりの水使用量、単位面積あたりの水使用量などの原単位データを活用して１日あたりの水使用量を算定している。しかしこれらのデータは、節水形か従来形かなどの衛生器具の仕様、上水系と雑用水系の比率、在館人員の男女比、水使用の利用回数等、原単位データ内に介在する諸元が明示されていないため、設計段階での原単位データの見直しや検証が難しい。そこで、本計算手法での給水負荷算定として、以下の要素に原単位を細分化して計算を行う手法とし、式(3.1)より Qh を求める。

$$Qh = \Sigma\,(N \times Qe \times Nd \times Fh) \quad \cdots\cdots (3.1)$$

ここに、

Qh	時刻別給水・給湯負荷	［L / h］(時刻別換算値)
N	人員	［人］
Qe	衛生器具毎１回あたりの吐水量・湯量	［L / 回］
Nd	衛生器具一人１日あたりの使用回数	［回 / (人・日)］
Fh	時刻別の使用水量・湯量の１日あたりの比率（時刻別負荷パターン比率）	[-]

Qe×Nd の合計かつ衛生器具毎の集計結果はこれまで実用的に用いられてきた一人１日あたりの水量原単位[L/（人・日)］となる。N（人員）のデータは建物や設備諸元による基本的な与条件であり、収容人員や器具数に水使用に関わる在館率や稼動率等を考慮したものである。Qe のデータは衛生器具の仕様情報により、節水効果を反映させることができる。Nd のデータは便所・洗面における人の生理的な水使用行為や飲食店舗や厨房、医療用途における器具使用行為による情報に基づくものである。男女比による違いも考慮される。このデータは既往の研究の詳細調査データにより、まとめられており活用することが

できる。Fh のデータは Nd のデータの時刻別の発生頻度であり、何時に水使用が発生するかという習慣的な水使用行為を時系列データ（以降、時刻別負荷パターン比率）として整理したものである。既往の水負荷計算法[3-1)]では、時刻別発生頻度は考慮されていない。よってこれまで、給排水衛生システムの機器容量の設計は、受水槽や貯湯槽容量の計算に代表されるように日量原単位を用い時間最大負荷より算出され、時刻別変動を考慮することはなかった。しかし、深夜電力利用や排熱利用を行う給湯システム、雨水・排水再利用システムの運転制御を検討する場合には、計算精度を上げる必要があるため、時刻別負荷パターンの把握は不可欠となっている。本計算法では、この時刻別負荷パターン比率のデータは習慣的な水使用行為として捉え、既往の文献や研究等の統計値から引用し、今後の知見による更新性も考慮したデータベースとして構築する考え方としている。

3-1-2 原単位データの細分化

表 3-1-1 は一例として、原単位データを模擬的に男女別構成比、用途別、器具別に分解したものである。節水器具の採用、雨水利用など雑用水による便所洗浄水への利用、男女比を考慮した水使用量の算定を行うためには、これらの計算要素まで分解する必要があることが分かる。

表 3-1-1 原単位データの細分化例

（1）男女別構成比、用途（上水・雑用水）別の分割

用途毎の使用水量［L/(人・日)］

男女比 / 器具・用途		男性	女性	小計 構成比平均
人員	構成比	0.70	0.30	
	在室率	1.00	1.00	
雑用水	大便器(男)	8.0		21.3
	大便器(女)		41.3	
	小便器	4.7		73%
上水	洗面器(男)	5.0		8.0
	洗面器(女)		9.6	
	パントリー	1.6	1.6	27%
計		19.3	52.5	29.3

男女比率を使用水量に反映

雨水利用先や排水再利用の原水として雑用水の区分が分かる

（2）器具による使用水量の分割

	器具・用途	用途別使用水量［L/(人・日)］	器具による使用水量 1回当り吐水量［L/回］	器具による使用水量 使用回数[1)]［回/(人・日)］
男性	大便器(男)	8.0	8.5	0.943
	小便器	4.7	2.0	2.326
	洗面器(男)	5.0	1.0	5.010
	パントリー	1.615		
	計	19.3		

	器具・用途	用途別使用水量［L/(人・日)］	器具による使用水量 1回当り吐水量［L/回］	器具による使用水量 使用回数[1)]［回/(人・日)］
女性	大便器(女)	41.3	8.5	4.862
	洗面器(女)	9.6	1.0	9.573
	パントリー	1.615		
	計	52.5		

注記1)使用回数は、洗浄弁や水栓の操作回数を示す。

器具毎の吐水量から節水量を計算

3-1-3 給水・給湯負荷パターンデータベースの構築

表 3-1-2 は、本計算モデルにおける負荷算定手法において、参考文献 [3-1)]による最新の文献を用いてさまざまな建物用途での建築物における、水使用用途と使用される衛生器具、給水給湯負荷と相関の高い人員や器具数情報、器具吐水量、給湯使用や雑用水利用への適用区分、各建物用途で必要な器具別の使用回数、負荷パターン比率のデータ項目についてまとめたものである。また、既往の研究で蓄積されたデータを調査・整理しデータベース化を行い、文献が少ない建物用途については、今後拡充すべきデータについて一覧で分かるようにした。さらに本研究では、データベース構築の観点として、事務所ビル用途を対象に実測調査結果を次項にて実施した。

表 3-1-2 給水・給湯負荷パターンデータベースの構築

水使用用途	衛生器具	人員N[人]	器具吐水量 Qe [L/回]	水温		水質		衛生器具一人１日あたりの使用回数［回/(人・日)］と 時刻別の使用水量・給湯量の1日あたりの比率（時刻別負荷パターン比率）Fh[%]						
				給水	給湯	上水	雑用水	事務所	宿泊施設	飲食店舗	病院	学校	高齢者 福祉施設	集合住宅
男子便所	大便器	人員（男子）	✓	✓	—	✓	✓	●	○	○	●	○	●	—
	小便器		✓	✓	—	✓	✓	●	○	○	●	○	●	—
	洗面・手洗		✓	✓	✓	✓	—	●	○	○	●	○	●	—
女子便所	大便器	人員（女子）	✓	✓	—	✓	✓	●	○	○	●	○	●	—
	洗面・手洗		✓	✓	✓	✓	—	●	○	○	●	○	●	—
湯沸・パントリー	流し	人員	✓	✓	✓	✓	—	●	○	○	○	○	●	—
シャワー浴室（客室・病室・住宅）	浴槽	人員	✓	✓	✓	✓	—	—	●	—	○	—	●	●
	シャワー		✓	✓	✓	✓	—	—	●	—	○	—	●	●
	便器		✓	✓	—	✓	—	—	●	—	○	—	●	●
	洗面・手洗		✓	✓	✓	✓	—	—	●	—	○	—	●	●
	洗濯・リネン		✓	✓	✓	✓	—	—	○	—	○	—	●	●
キッチン・厨房	流し	人員（食数）	✓	✓	✓	✓	—	●	●	●	●	●	●	●
清掃	流し	器具数	✓	✓	—	✓	—	○	○	○	○	○	○	○
散水	流し	器具数（面積）	✓	✓	—	✓	✓	○	○	○	○	○	○	○

注記1)データベースに必要な器具吐水量，水温(給湯の場合は使用温度)，水質(雑用水利用を行う場合)の該当箇所に✓を記載した。
注記2)１日あたりの使用回数と時刻別負荷パターンについて，既往研究や参考文献から参照可能な用途は●，参考文献がなく，他の用途から類推する用途は○を示した。
注記3)「－」は，水使用用途として該当なしの要素や建物用途を示した。
注記4) 衛生器具一人1日あたりの使用回数は、洗浄弁や水栓の操作回数を示す。

3-2 実測データに基づく本算定手法への適用

器具別吐水量と衛生器具別の給水負荷パターンの実測データを解析し、これを本算定手法に適用した場合の計算結果を示す。

3-2-1 解析対象建物の概要

表 3-2-1 に対象建物と解析対象データの概要を示す。対象建物は 2003 年 3 月に竣工した事務所本社ビルである。この建物の代表 1 フロアにおいて男女別便所の衛生器具種類毎のフラッシュバルブの動作について、開閉信号と流量信号を常時計測している。2008 年 1 月 1 日～2008 年 12 月 31 日、2019 年 4 月 1 日～2020 年 3 月 31 日、2020 年 4 月 1 日～2021 年 3 月 31 日まで各年 1 年間のデータを用い、平日と休日（土、日曜日、祝日）に分けて解析を行った。図 3-2-1 に解析対象となる便所・パントリーの平面図を示す。

表 3-2-1 対象建物と解析対象データの概要

（１）建物概要		
所在	東京都	
規模	延床面積　20,580㎡　地上14階、地下1階、塔屋1階	
用途	本社事務所ビル	
（２）解析対象データ		
解析期間	2008.1.1～12.31（平日237日、休日129日） 2019.4.1～2020.3.31（平日241日、休日125日） 2020.4.1～2021.3.31（平日247日、休日118日）	
解析対象	基準階1フロア1,433㎡の男子・女子便所、パントリー	
収容人員	解析対象フロア　男子113人、女子27人　計140人	
衛生器具	男子便所	大便器：壁掛式サイホン洋風大便器(8L/回) 3箇所
		小便器：壁掛ストール小便器(1.8L/回) 3箇所
		手洗：自動水栓(0.4L/回)　3箇所
	女子便所	大便器：壁掛式サイホン洋風大便器(8L/回) 3箇所
		手洗：自動水栓(0.4L/回)　3箇所
	パントリー	流し：シングルレバー混合水栓　1箇所
解析データ	衛生器具用途別の1時間毎の使用回数、使用水量 (※パントリーは使用水量のみ)	

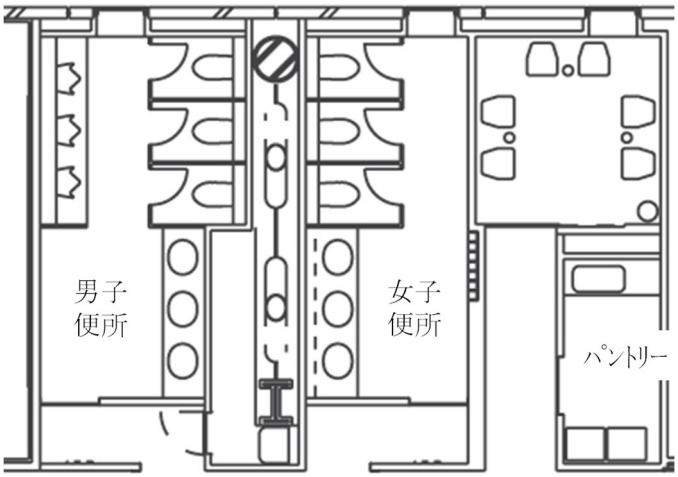


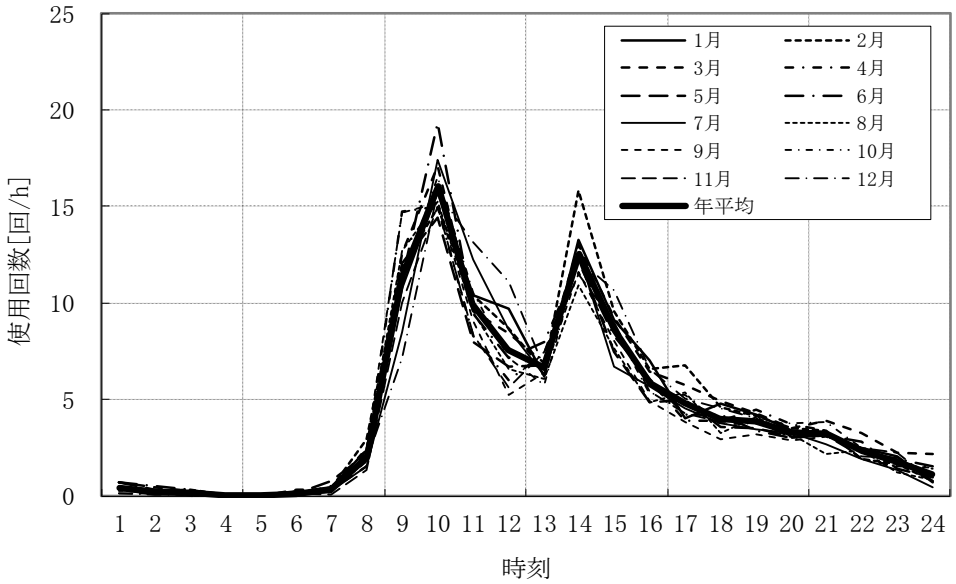
図 3-2-1 解析対象の便所・パントリー平面図

3-2-2 衛生器具別の時刻別使用頻度の解析結果

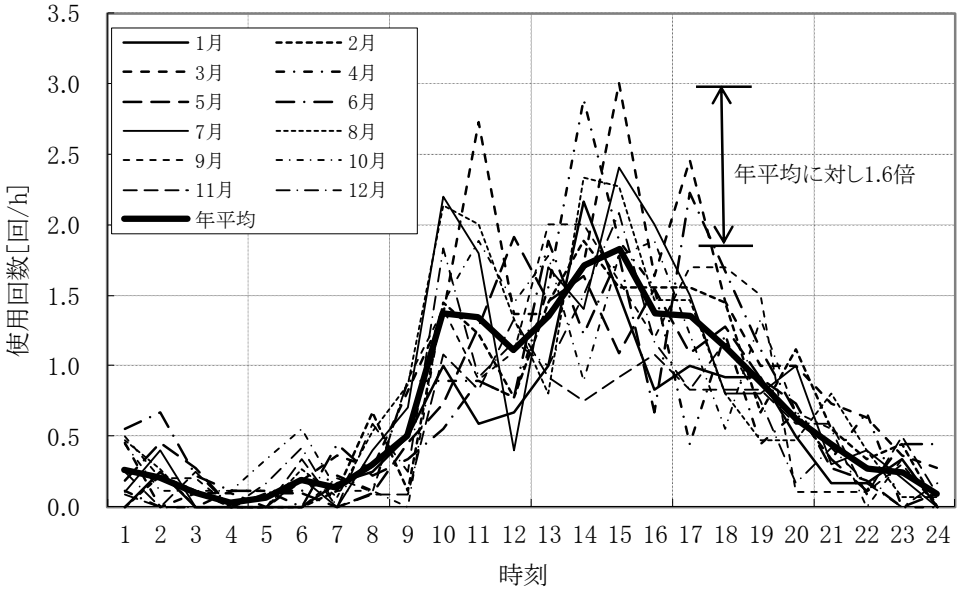
2008 年の各器具男女別の時刻別使用頻度（使用回数）のデータから月毎に平日及び休日に分けて解析した。図 3-2-2 は男子大便器を例にとり、解析をしたものである。平日においては習慣的な水使用行為が月によらず決まっており、ばらつきが少ないことが分かる。一方、休日においては出社時間が決まっていないためばらつきがあり、ピーク時には年平均値に対して 1.6 倍の差がある。営業時間や水使用形態が平日と休日で異なる場合には 2 種類の時刻別負荷パターン比率を用意する必要がある。図 3-2-3(a)~(f)は男女別衛生器具別の使用頻度について、1 日を 100%として時刻別に比率で示したものである。この値は前述の 2.1(1)式における Fh にあたるものである。男女による差、衛生器具による水使用パターンの違いが分かる。例えば、(a)(b)の大便器の使用パターンでは、男子は朝出社時と昼休み後が多く、女子は出社時から昼休み後と帰社前に多い。(d)(e)で男女ともに昼休み時間後における手洗の使用頻度が高いのは歯磨きによるもの、(f)で朝出社時のパントリーの使用頻度が高いのは洗い物等によるものと推察される。以上により、一人一日あたりの平均的な使用回数を衛生器具別に算出した。なお、この使用回数には、清掃による使用回数は含まれていない。

図 3-2-4(a)~(l)に、2008 年、2019 年度、2020 年度における、男女大便器、男子小便器、男女手洗、パントリーについて、平日・休日それぞれの時刻別負荷パターン比率について 3 年間の比較をしたものである。休日は使用人数が少なくなるため、ばらつきが見られるものの、平日では朝方にシフトしている以外、傾向は変わらなかった。

在室者の行動と給水負荷パターンは相関が高く、これまでは調査した負荷パターンを分析した後に設計に利用してきた。今後は IoT 技術によりリアルタイムで観測することが可能で、次の設計や実運用に活用するという方法が考えられる。



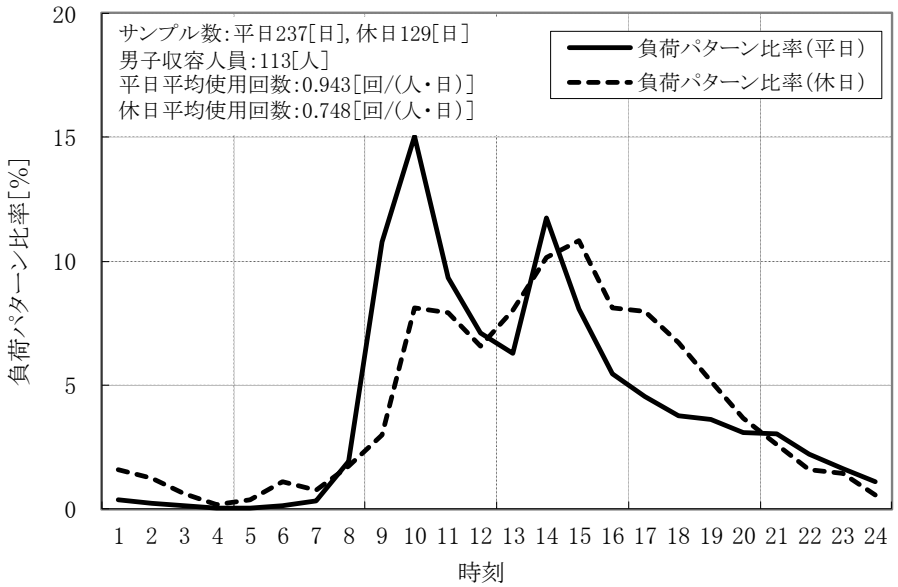
(a)男子大便器使用頻度（平日）



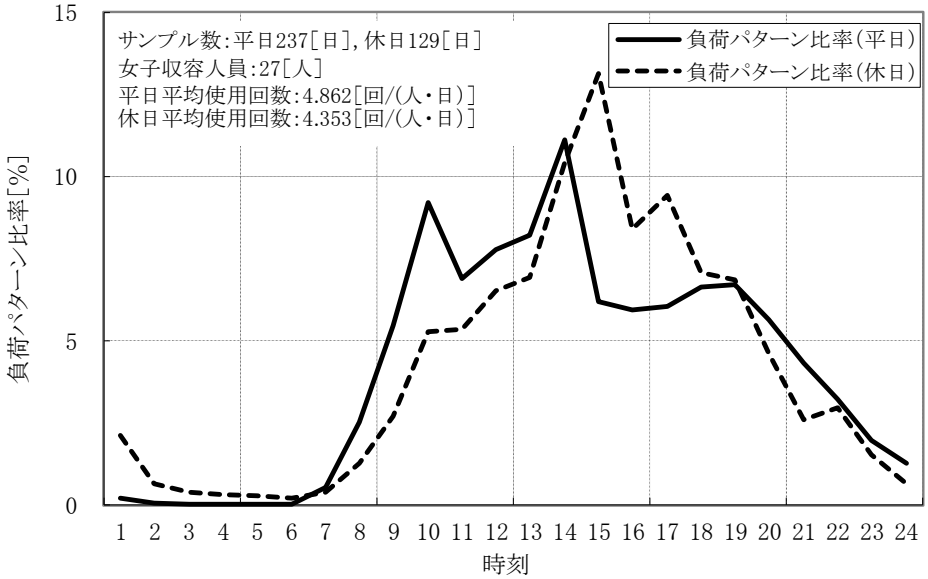
(b)男子大便器使用頻度（休日）

図 3-2-2 時刻別使用頻度（使用回数）の解析（男子大便器）

注）0 時台(0:00～0:59)までの使用回数を時刻 1 時に示す。

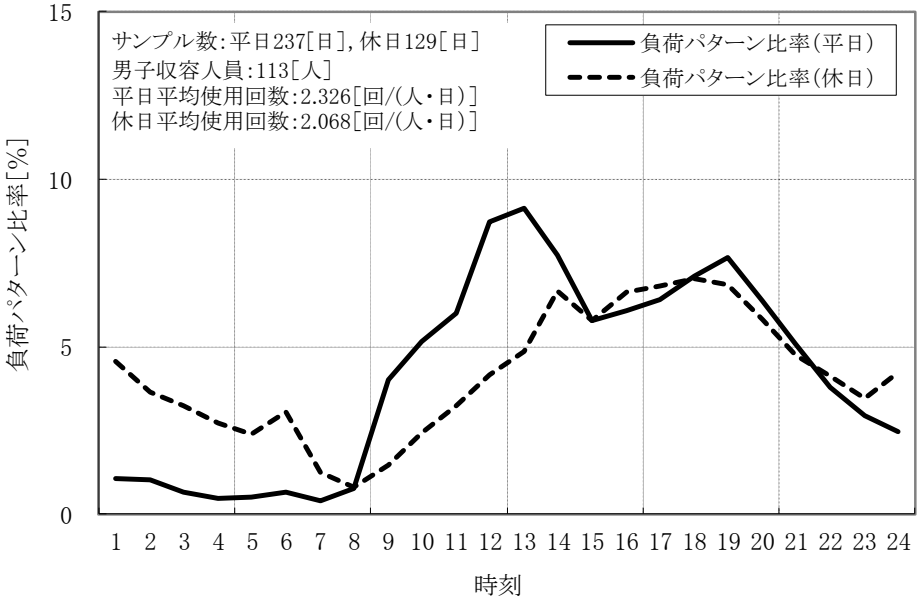


(a)男子大便器　負荷パターン比率

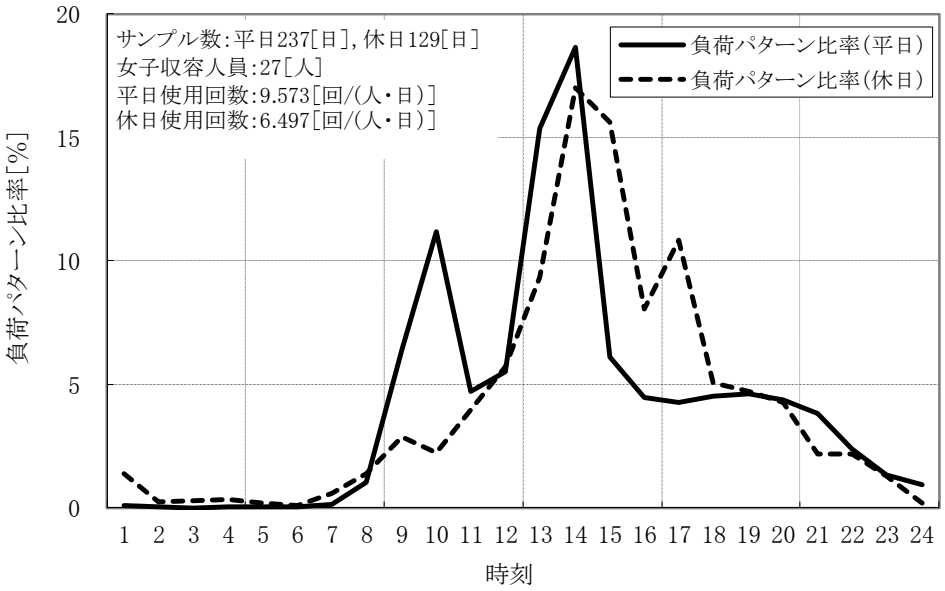


(b)女子大便器　負荷パターン比率

図 3-2-3 (a)(b) 衛生器具別の負荷パターン比率（男女別・平日休日別）

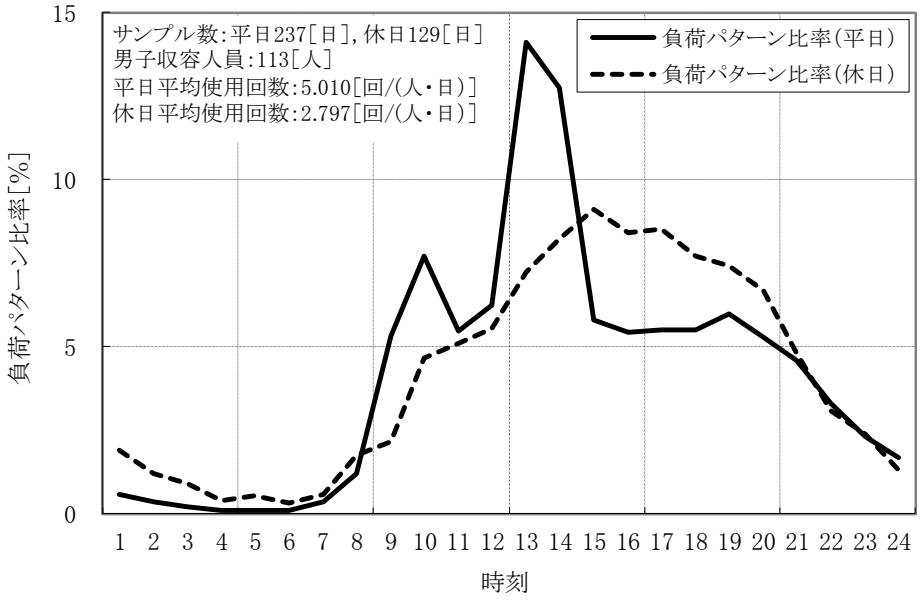


(c) 男子小便器　負荷パターン比率

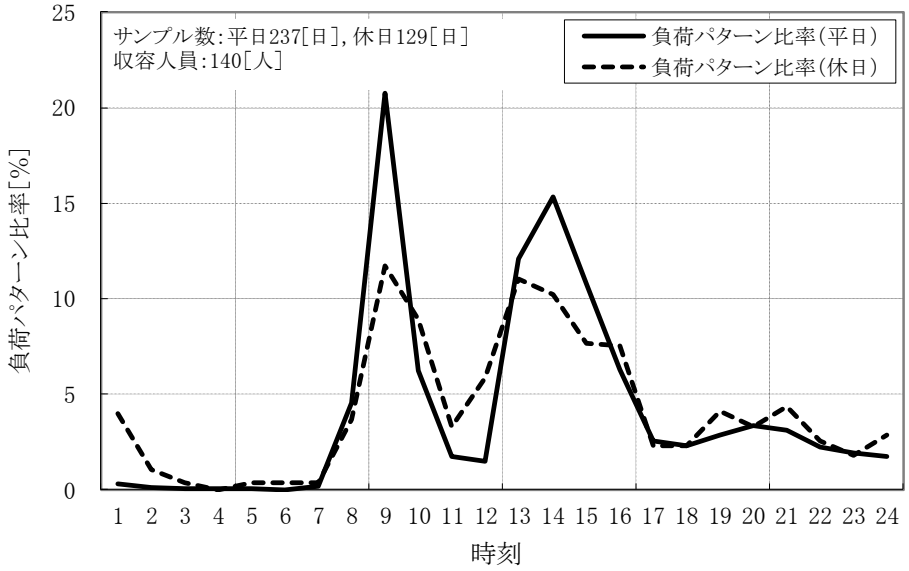


(d) 女子手洗　負荷パターン比率

図 3-2-3 (c)(d) 衛生器具別の負荷パターン比率（男女別・平日休日別）

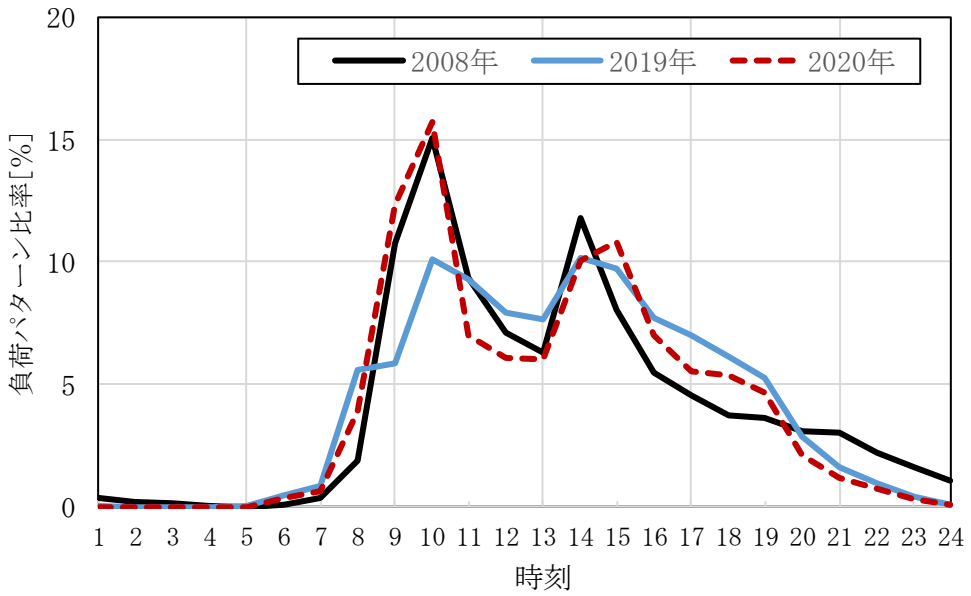


(e)男子手洗　負荷パターン比率

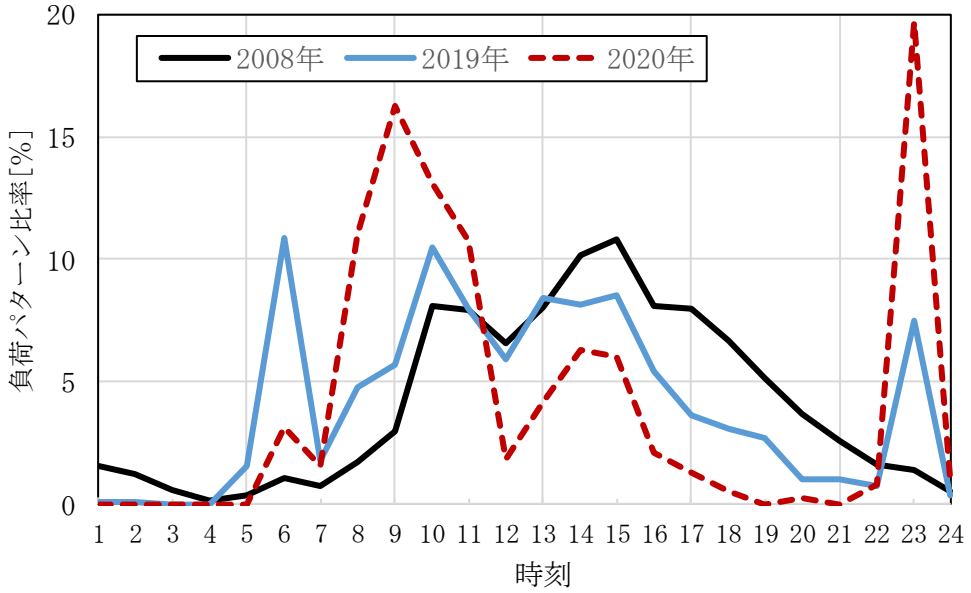


(f)パントリー 負荷パターン比率

図 3-2-3 (e)(f) 衛生器具別の負荷パターン比率（男女別・平日休日別）

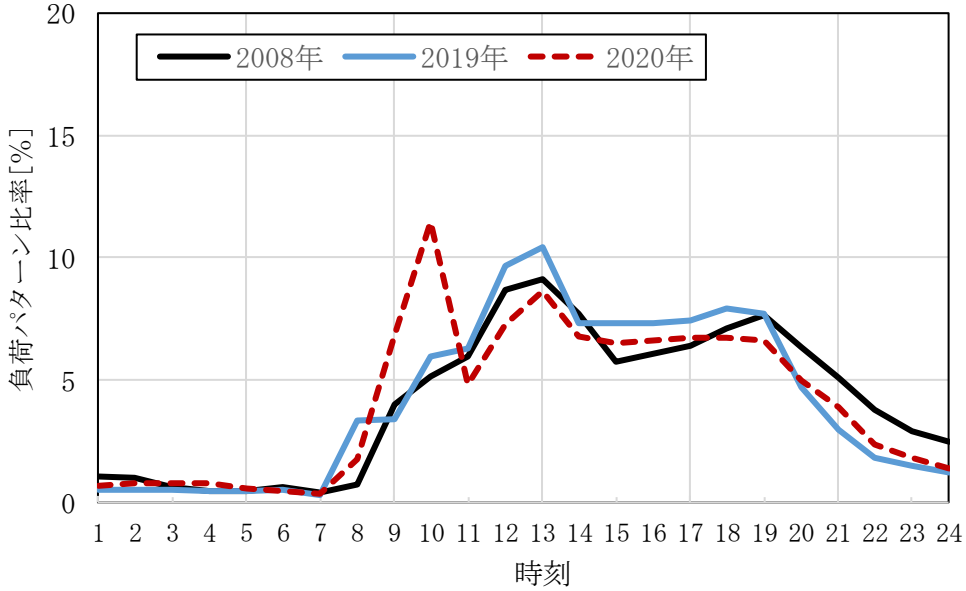


(a) 男子大便器（平日）　負荷パターン比率

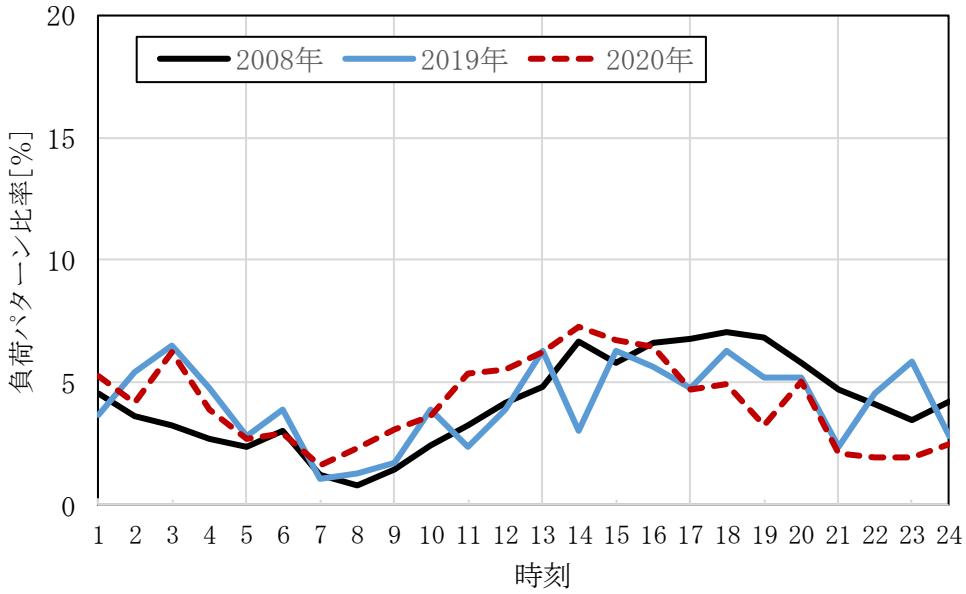


(b) 男子大便器（休日）　負荷パターン比率

図 3-2-4 (a)(b) 男子大便器の負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）

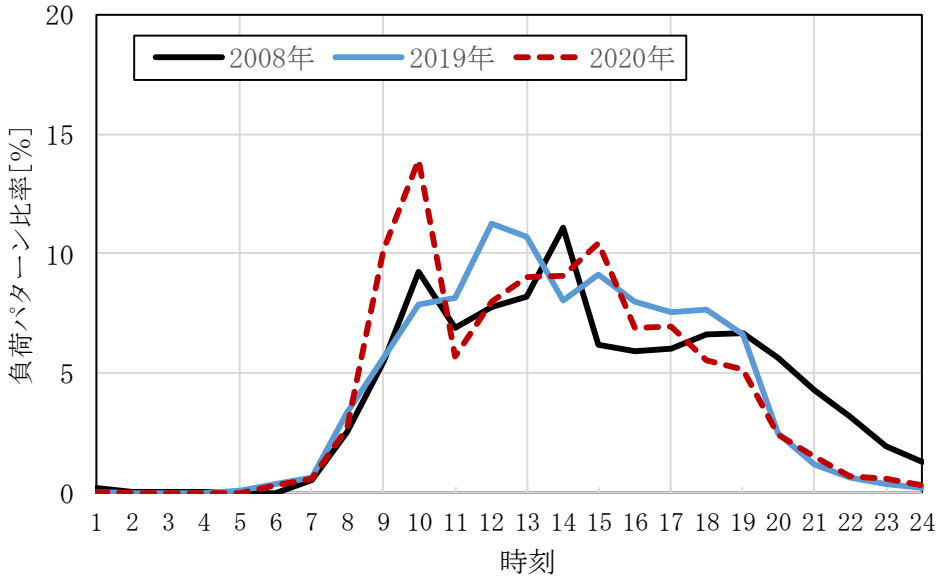


(c) 男子小便器（平日）　負荷パターン比率

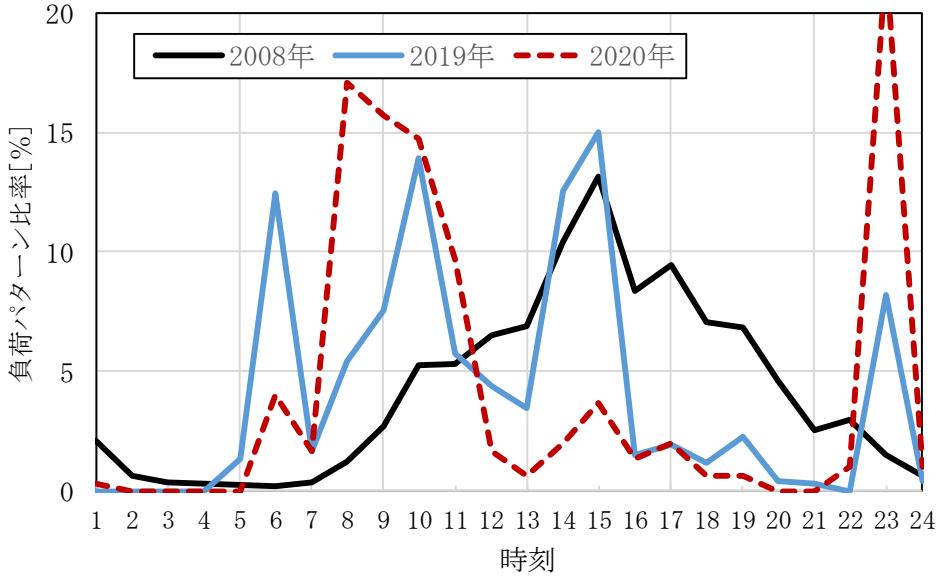


(d) 男子小便器（休日）　負荷パターン比率

図 3-2-4 (c)(d) 男子小便器の負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）

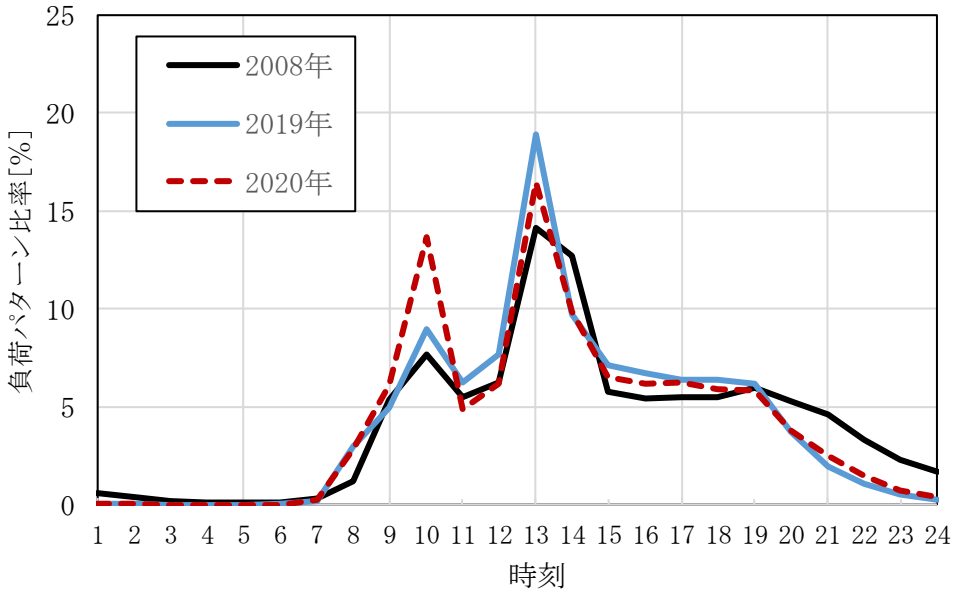


(e) 女子大便器（平日）　負荷パターン比率

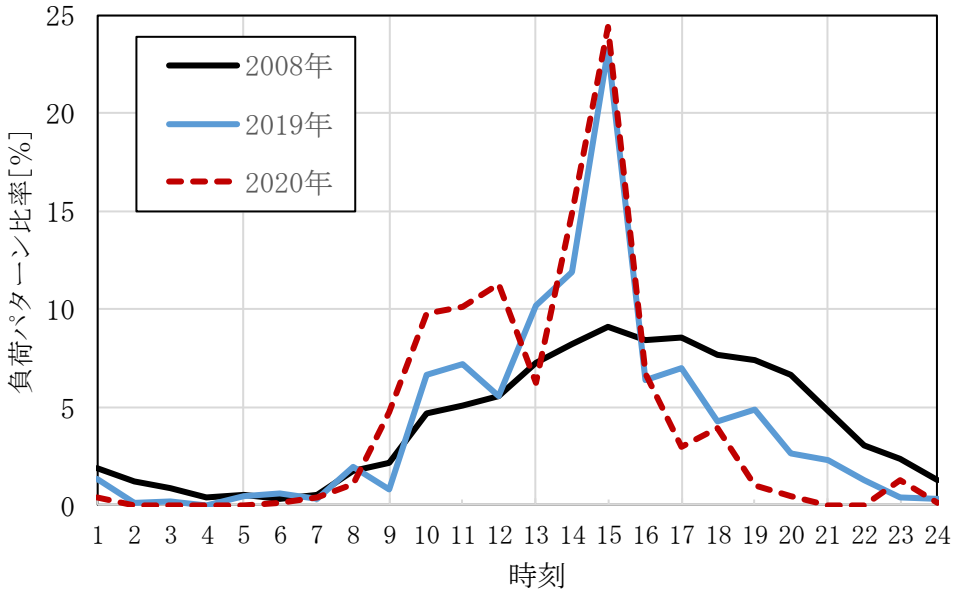


(f) 女子大便器（休日）　負荷パターン比率

図 3-2-4 (e)(f) 女子大便器の負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）

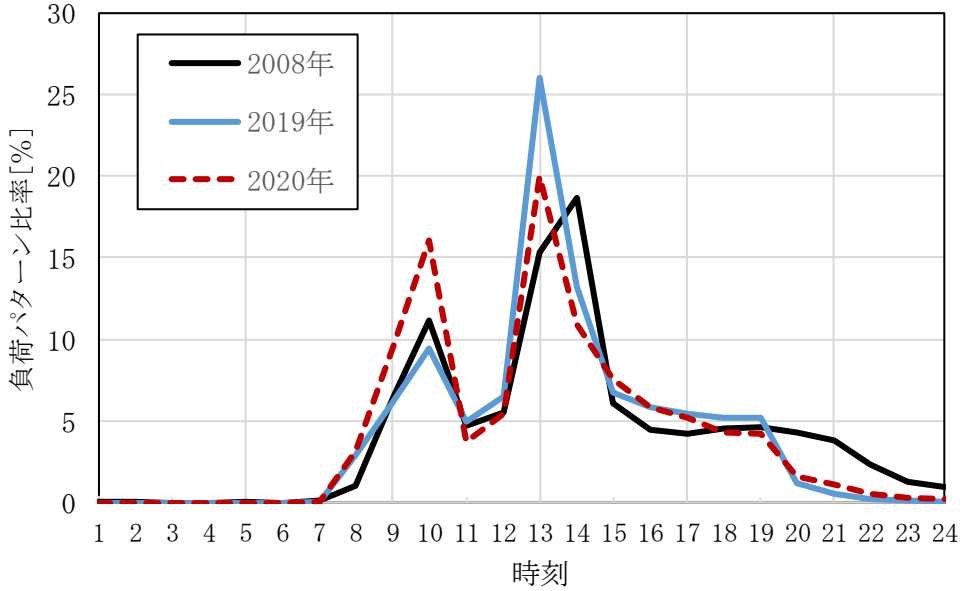


(g) 男子手洗（平日） 負荷パターン比率

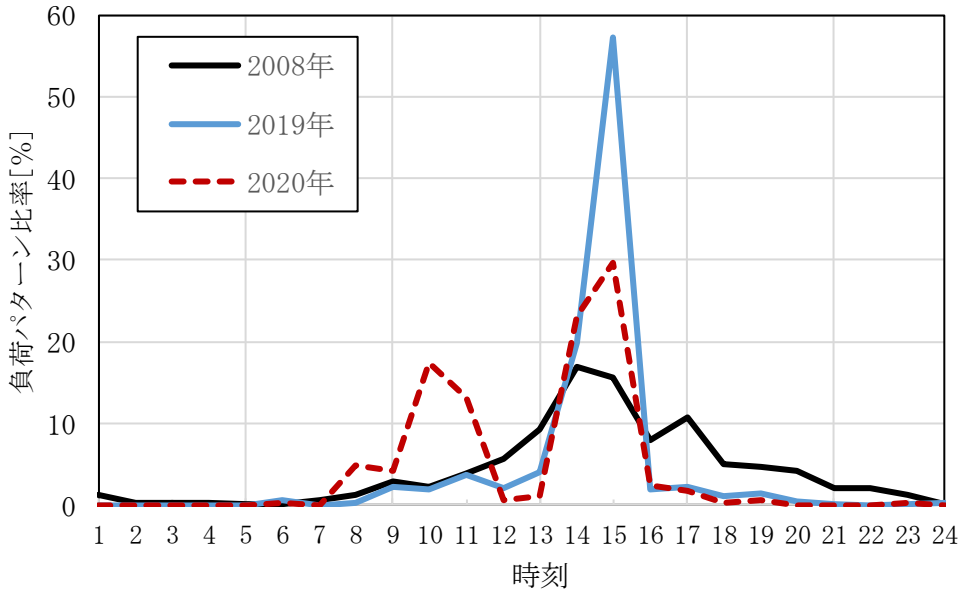


(h) 男子手洗（休日） 負荷パターン比率

図 3-2-4 (g)(h) 男子手洗の負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）

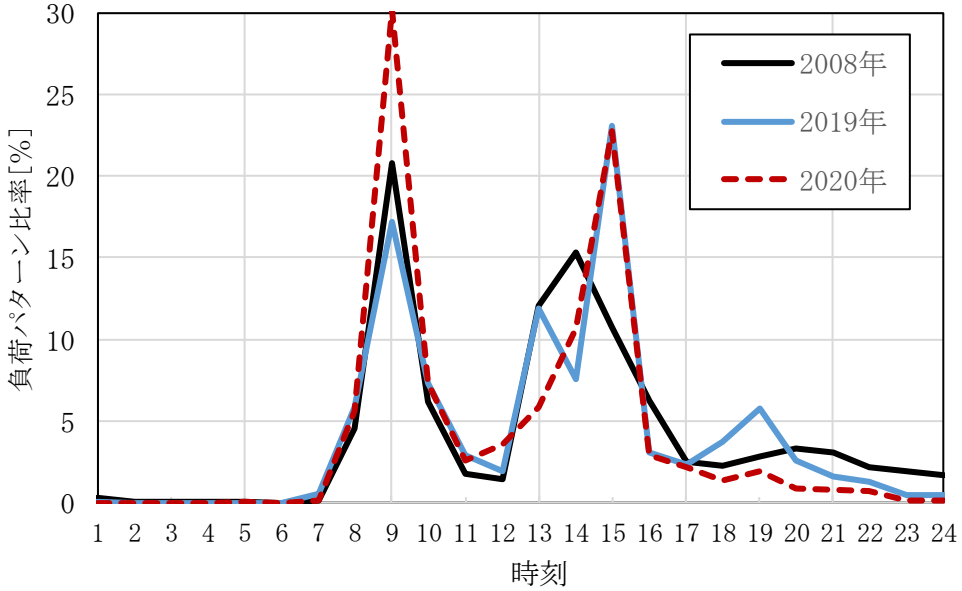


(i) 女子手洗（平日） 負荷パターン比率

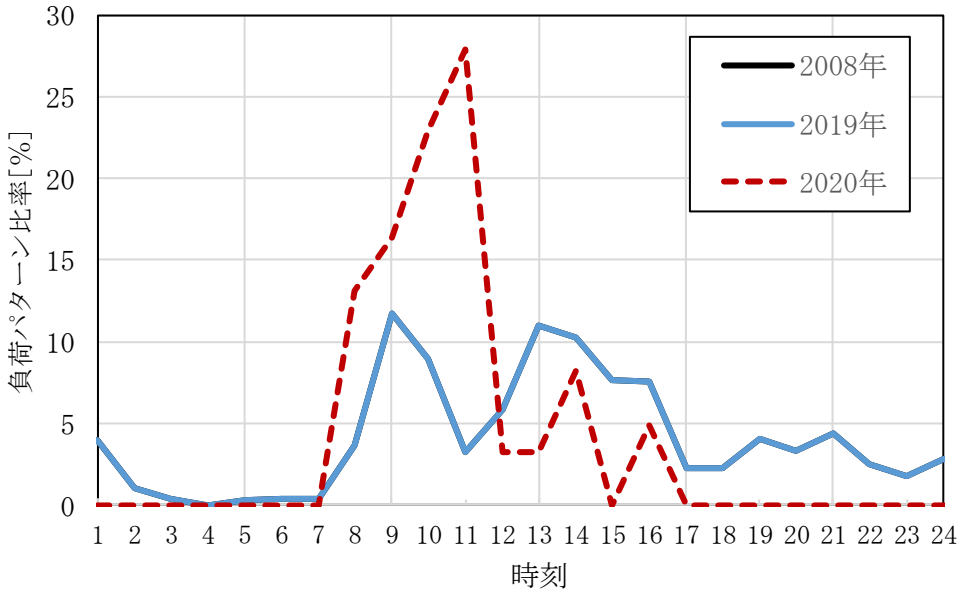


(j) 女子手洗（休日） 負荷パターン比率

図 3-2-4 (i)(j) 男子手洗の負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）



(k) パントリー（平日）　負荷パターン比率



(l) パントリー（休日）　負荷パターン比率

図 3-2-4 (k)(l) パントリーの負荷パターン比率（年別比較・平日休日別）

3-2-3 衛生器具別の平均吐水量と原単位データの解析

2008 年の器具別時刻別の使用水量を解析し、使用水量を使用回数で除して 1 回あたりの平均吐水量を算出した。これは前述(1)式における Qe にあたり、表 3-2-2 中に示すとおり大便器で 8.4［L /回］、小便器で 1.8［L /回］となり、節水器具としての性能が概ね出ていることが確認できた。

表 3-2-2 に器具別使用水量と男女別原単位データの解析結果を示す。便所・手洗のみの生活系の水使用原単位を算出するため、器具毎の平日における日量原単位［L /（人・日）］を算出した結果、収容人員に対して出勤率を 100%とした場合においては、男子は 15.7［L /（人・日）］、女子は 43.7［L /（人・日）］となり、本調査対象の事務所建物の代表フロアでは、男女比 8：2 で、平均 21.1［L /（人・日）］となった。このように器具別に積み上げることにより、より正確な原単位データを得ることが可能となる。実測による大便器の平均吐水量は JIS A 5207-2019 で規定する洗浄水量の I 形に相当し、小便器や手洗いは節水形となっている。

実測値による日量原単位は、参考文献[3-7]で示される庁舎常勤職員の 1 人 1 日平均使用水量 40～80［L /（人・日）］及び参考文献[3-8]で提案されている事務所の設計原単位の 40～60［L /（人・日）］の最低値の約半分であった。節水機器による器具吐水量や男女比率の設定により、設計原単位の精度がさらに高まると考えられる。

表 3-2-2 器具別使用水量と男女別原単位データの解析結果

	収容人員［人］	使用回数［回/(人･日)］		平均吐水量［L/回］注2)	使用水量(平日)［L/（人・日）］
		平日注1)	休日注1)		
男子大便器	113	0.943	0.748	8.4	7.9
男子小便器		2.326	2.068	1.8	4.1
男子手洗		5.010	2.797	0.4	2.1
女子大便器	27	4.862	4.353	8.0	39.0
女子手洗		9.573	6.497	0.3	3.1
パントリー	140	－	－	－	1.6
				男子（平日）	**15.7**
				女子（平日）	**43.7**
				全体（平日）	**21.1**

注1）器具利用データから，平日は出勤率を収容人員の100%，休日は収容人員の20%（男子），10%（女子）として収容人員あたりの使用回数を算出した。

注2）平均吐水量は使用水量／使用回数より、平日・休日を合わせた年間平均値にて算出した。

次に、2008 年、2019 年、2020 年の 3 年間における、各衛生器具の使用人員と衛生器具一人 1 日あたりの使用回数の変化について、図 3-2-5 及び図 3-2-6 に示す。使用人員については、2008 年に対して 2019 年は、平日では同等か増加傾向休日は減少傾向にあり、2020 年は 2008 年に対して 50～30%の使用人員となった。衛生器具一人 1 日あたりの使用回数についてはいずれの年も差は無かった。以上より、建物用途が変わらなければ、負荷パターン比率と衛生器具一人 1 日あたりの使用回数については、3 年間で大きな変化はないため、次項で示す本査定手法への適用に対して影響はないと考えられる。

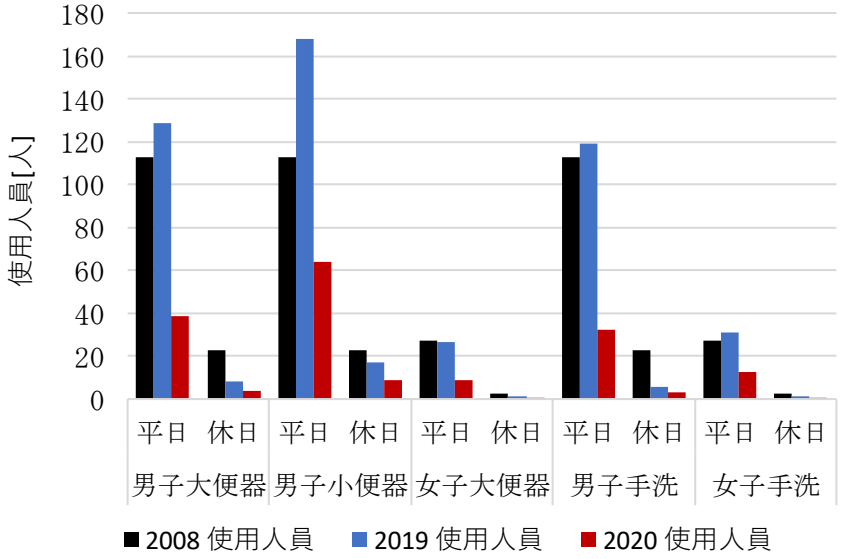


図 3-2-5 各衛生器具における使用人員の変化

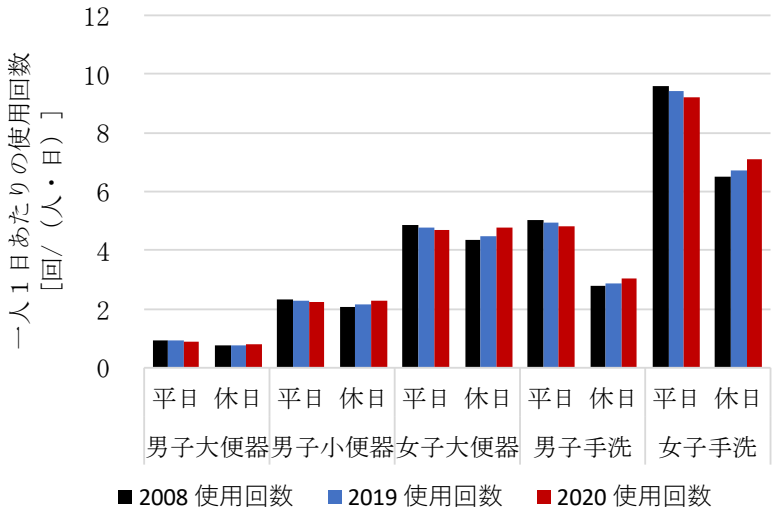


図 3-2-6 衛生器具一人 1 日あたりの使用回数の変化

3-2-4 本算定手法への適用

前項 3.2 で解析を行った衛生器具別・男女別の時刻別負荷パターン比率を本算定手法に適用し、節水器具を採用した給水システムにおいて、水使用量及びエネルギー消費量を算出するシミュレーションを行った。

(1)シミュレーション計算条件

表 3-2-3 にシミュレーション計算条件を示す。給水負荷として節水器具の組み合わせパターン①、②を２種類用意し、それぞれの節水器具による給水負荷に対して、給水システム制御方式として、高置水槽方式（方式 A)、加圧給水方式（吐出圧一定制御）（方式 B)、加圧給水方式（推定末端圧制御）（方式 C）の３種類の方式を設定した。検討ケースとして、ケース 1 は、水槽やポンプの機器容量は節水器具パターン①の給水負荷から設計し、給水負荷も節水器具パターン①の場合、ケース 2 は、機器容量は節水器具パターン①の給水負荷から設計するが、給水負荷は節水器具パターン②の場合とした。これは、衛生器具のみ更新し、設備の機器容量は従前のままの場合を想定した。ケース 3 は、機器容量は節水器具パターン②の給水負荷から設計し、給水負荷も節水器具パターン②の場合である。３つのケースについてそれぞれ、３種類の異なる給水システム制御方式を適用し、計９通りのケースで、給水負荷変動、水槽の水位変動、エネルギー消費量を 10 分間隔計算により算出した。

各ケースにおける給水システム容量の算定は、従来の設計法に準じて行い、受水槽有効容量は日使用水量の 1/2、高置水槽有効容量は日使用水量の 1/8 とし、各水槽の補給開始水量もしくはポンプ起動水量は水槽有効容量の 20%、停止水量は水槽有効容量の 80%で設定した。方式 A の揚水ポンプの水量は 8 時間平均給水負荷の 2 倍、高置水槽までの高さを 60m とし全揚程を 800kPa とした。方式 B、C の加圧給水ポンプの水量は、8 時間平均給水負荷の 3 倍、加圧給水ポンプのシミュレーション上の全揚程は、負荷が各階で平均的に発生するとし、中間階までの 400kPa で設定し、方式 C の場合は実揚程を 350kPa で設定し算出した。

表 3-2-3 シミュレーション計算条件

<table>
<tr><th></th><th></th><th>ケース１
節水器具パターン①</th><th>ケース２
節水器具パターン②</th><th>ケース３
節水器具パターン②</th></tr>
<tr><td rowspan="5">給水負荷</td><td>建物規模・用途</td><td colspan="3">10,000 ㎡の事務所ビルを想定</td></tr>
<tr><td>人員</td><td colspan="3">在館人員700 人（男子：490 人、女子：210 人）</td></tr>
<tr><td>衛生器具使用回数
（平日）</td><td colspan="3">男子大便器：0.943 回/(人・日)，男子小便器：2.326 回/(人・日)，男子手洗：5.010 回/(人・日)
女子大便器：4.862 回/(人・日)， 女子手洗：9.573 回/(人・日)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">衛生器具吐水量</td><td>男子・女子大便器：8.5 L/回注)
男子小便器：2 L/回
洗面器：1 L/回</td><td colspan="2">男子・女子大便器：6.5 L/回注)
男子小便器：1.5 L/回
洗面器：0.5 L/回</td></tr>
<tr><td colspan="3">※上記の他パントリー給水量 1.6 L/人・日を加算</td></tr>
<tr><td>日使用水量</td><td>20.5 m^3/日</td><td colspan="2">14.7 m^3/日</td></tr>
<tr><td>設計</td><td>機器容量</td><td colspan="2">節水器具①の給水負荷から機器選定</td><td>節水器具②の給水負荷から機器選定</td></tr>
<tr><td rowspan="7">給水
システム</td><td rowspan="3">方式A
高置水槽方式</td><td colspan="2">受水槽容量：10 m^3
（補給開始水量2 m^3，停止水量8 m^3）</td><td>受水槽容量：7 m^3
（補給開始水量1.4 m^3，停止水量5.6 m^3）</td></tr>
<tr><td colspan="2">高置水槽容量：3 m^3
（ポンプ起動水量0.6 m^3，停止水量2.4 m^3）</td><td>高置水槽容量：2 m^3
（ポンプ起動水量0.4 m^3，停止水量1.6 m^3）</td></tr>
<tr><td colspan="2">揚水ポンプ 85 L/min×800 kPa</td><td>揚水ポンプ 61 L/min×800 kPa</td></tr>
<tr><td rowspan="2">方式B
加圧給水方式
（吐出圧一定制御）</td><td colspan="2">受水槽容量：10 m^3
（補給開始水量2 m^3，停止水量8 m^3）</td><td>受水槽容量：7 m^3
（補給開始水量1.4 m^3，停止水量5.6 m^3）</td></tr>
<tr><td colspan="2">加圧給水ポンプ 128 L/min×400 kPa</td><td>加圧給水ポンプ 92 L/min×400 kPa</td></tr>
<tr><td>方式C
加圧給水方式
（推定末端圧制御）</td><td colspan="2">上記方式Bと同じ</td><td>上記方式Bと同じ</td></tr>
</table>

注)JIS A 5207-2019におけるⅠ形及びⅡ形の大便器の洗浄水量を参照した。

(2) 給水ポンプの機器特性

本算定手法では、以下に示す 3 種類の給水ポンプの機器特性式を用いて、計算時間間隔ごとのポンプ給水量によって軸動力を求め、電力消費量を算出した。

a 揚水ポンプ

揚水ポンプの軸動力は、定格給水量、全揚程、ポンプ最高効率より、式(3.2)にて算出した。最高効率は参考文献 3-9)のポンプ水量の関数で算出される B 効率の近似曲線を用いた。

$$Pn=Qo\times(Ho/9.8)\ /\ (6120\times\eta o) \quad \cdots\cdots(3.2)$$

ここに、

Pn：ポンプ軸動力 [kW]

Qo：定格給水量 [L/min]

Ho：ポンプ全揚程 [kPa]

ηo：ポンプ最高効率

$\eta o= -0.0145(\log(Qo))^2 +0.2682(\mathrm{Log}(Qo)) -0.6018$

b 加圧給水ポンプ(吐出圧一定制御)

加圧給水ポンプ（吐出圧一定制御）の軸動力は、給水負荷流量、全揚程、ポンプ最高効率、定格給水量と参考文献 3-10)を用いた負荷流量の流量比で求まるポンプの効率比により、式(3.3)にて算出した。

$$Pn=qn\times(Ho/9.8)\ /\ (6120\times\eta o\times\eta n) \quad \cdots\cdots(3.3)$$

ここに、

qn：給水負荷流量 [L/min]

ηn：ポンプ効率比

$\eta n= -1.02073\ (qn/Qo)^2 +1.99581\ (qn/Qo) +0.0369718$

c 加圧給水ポンプ(推定末端圧制御)

加圧給水ポンプ（推定末端圧制御）の軸動力は、給水負荷流量、全揚程、実揚程、ポンプ最高効率、及び前述 b の加圧給水ポンプ(吐出圧一定制御)での算定式と同様に、定格給水量と負荷流量の流量比で求まるポンプ効率比により、式(3.4)にて算出した。

$$P_n = q_n\times((q_n/Q_o)^2\times(H_o-H_n)/9.8 + H_n/9.8)\ /\ (6120\times\eta_o\times\eta_n) \quad \cdots\cdots(3.4)$$

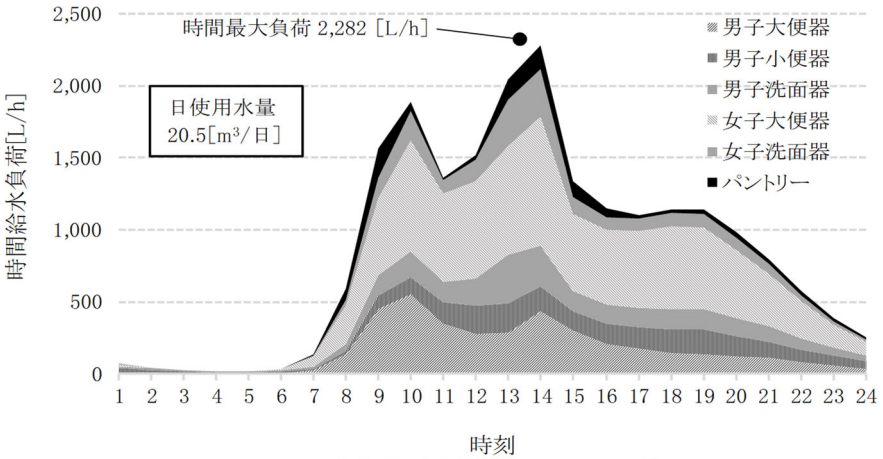
ここに、

H_n:給水量 q_n における実揚程 [kPa]

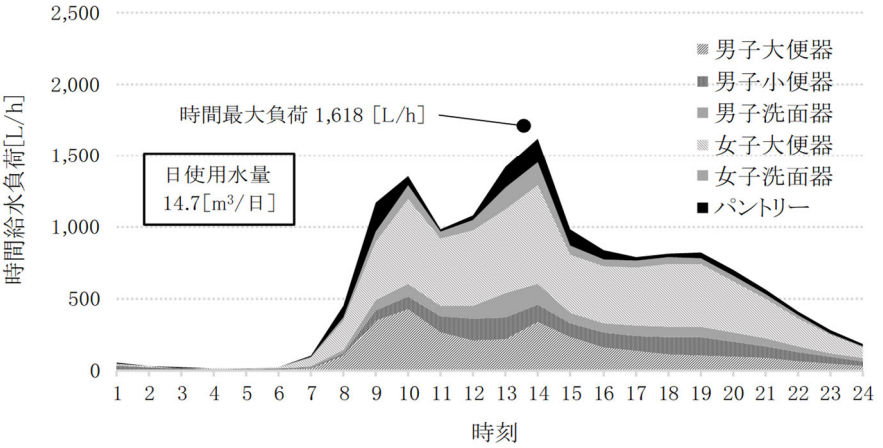
(3) 給水負荷算定結果

図 3-2-1 に平日の用途別時刻給水負荷の算定結果を示す。ケース 1 の節水器具パターン①の場合とケース 2、3 の節水器具パターン②の場合を比較すると日使用水量はそれぞれ 20.5［m^3/日］と 14.7［m^3/日］、時間最大負荷はそれぞれ 2,282［L/h］と 1,618［L/h］と

なり、日使用水量、時間最大負荷とともに、節水器具パターン②は節水器具パターン①の約 30%の削減となった。



(a) 節水器具パターン①



(b) 節水器具パターン②

図 3-2-1 用途別時刻別給水負荷

(4) 給水システムのエネルギー消費量比較

図 3-2-2 に給水システム（方式 A、B、C）と給水負荷・設計（ケース 1、2、3）における給水ポンプの電力消費量の算定比較結果を示す。ケース 1 からケース 2、3 では、節水化に伴い給水負荷が減少し、いずれの給水システムにおいても電力消費量は下がる結果となった。

給水システムの比較では、高置水槽方式が最も電力消費量が少なく、同じ給水負荷に対応した機器容量設計における電力消費量の比較では、高置水槽方式でのケース A-1 の 14.6［kWh/日］、A-3 の 12.5［kWh/日］に対して、加圧給水方式（吐出圧一定制御）でのケース B-1 の 20.4［kWh/日］、B-3 の 16.7［kWh/日］はそれぞれ 1.4 倍、1.34 倍、加圧給水

方式（推定末端圧制御）でのケース C-1 の 17.9［kWh/日］、C-3 の 14.7［kWh/日］はそれぞれ 1.23 倍、1.18 倍の電力消費量となった。加圧給水方式での電力消費量比較では、ケース B-2 の 18.7［kWh/日］から B-3 の 16.7［kWh/日］、ケース C-2 の 16.4［kWh/日］から C-3 の 14.7［kWh/日］より、給水負荷は同じであるが、設備機器の容量を節水器具パターン①から節水器具パターン②の給水量に合わせて適正化した結果、電力消費量は約 10%低減された。

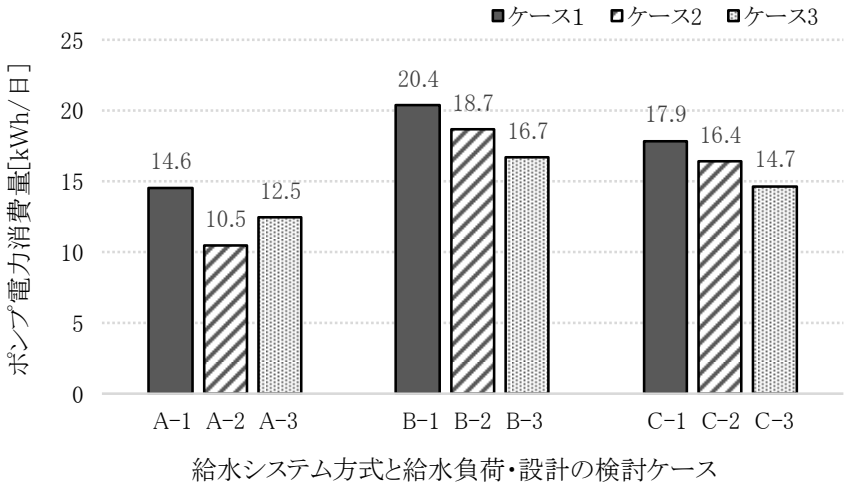


図 3-2-3 各検討ケースの電力消費量比較

一方で高置水槽方式では、ケース A-2 の 10.5［kWh/日］から A-3 の 12.5［kWh/日］となり 19%電力消費量が増加した。この要因としては、ケース A-3 では節水器具パターン②の給水量に対応して揚水ポンプや水槽容量を低減しているが、ケース A-2 と比べ、表-5 中に示すように、揚水ポンプの水量が 85［L/min］から 61［L/min］まで小さくなることで揚水ポンプの効率が下がり、さらには水槽容量の低減によりポンプの稼働時間が増加したためである。

(5) 高置水槽方式における水位変動比較

図 3-2-4(a)~(c)に高置水槽方式における、平日の受水槽の水量変動（上図）及び高置水槽の水量変動と揚水ポンプの発停及びこれに伴うポンプの消費電力（下図）を示す。給水負荷が発生することで、高置水槽内の水量が減少し、補給開始水量になると受水槽から高置水槽に揚水ポンプで給水され、補給停止水量となるとポンプは停止する。受水槽内の水量が減少し、補給開始水量になると水道本管より水が補給され、補給停止水量となると補給が停止される。本算定手法により、高置水槽方式であるケース A-1、A-2、A-3 について、各種水槽の水量変動とポンプの運転状況をシミュレーションした。ケース A-1 では、

図 3-2-4(a)より補給開始水量に 2 回到達した後、有効容量 6,000［L］のうち水位 8,000［L］から 5,900［L］まで減ったところで停止したため、受水槽の水の入替え回数は 2.4［回/日］となる。このとき揚水ポンプは 8 回起動した。図 3-2-4(b)より、ケース A-2 はケース A-1 と設計容量をそのままとし、節水化により給水負荷が低減したことにより、受水槽の水の入替え回数は 2［回/日］、揚水ポンプの起動は 6 回に減少した。図 3-2-4(c)より、ケース A-3 は節水化により設計容量を低減し、補給開始水量に 2 回到達し、有効容量 4,200［L］のうち水位 5,600［L］から 2,800［L］まで減ったところで停止したため、受水槽の水の入替え回数は 2.7［回/日］となり、揚水ポンプの起動は 9 回に増加した。このことからも、ケース A-2 に比べ A-3 では揚水ポンプの稼働時間が増加し電力消費量が増加したことが分析できる。

以上の結果から、本算定手法を用いることにより、節水器具の吐水量に基づき給水負荷が算定され、節水率の検証が可能となった。また、給水負荷に基づき計画・設計した機器容量に対して、水槽内の水の滞留時間による衛生面での検証、水槽の水位変動とポンプの稼働時間によるエネルギー消費量の算定が可能となり、機器の稼働状況を考慮した、実務上有効なシミュレーションが可能となることを示した。

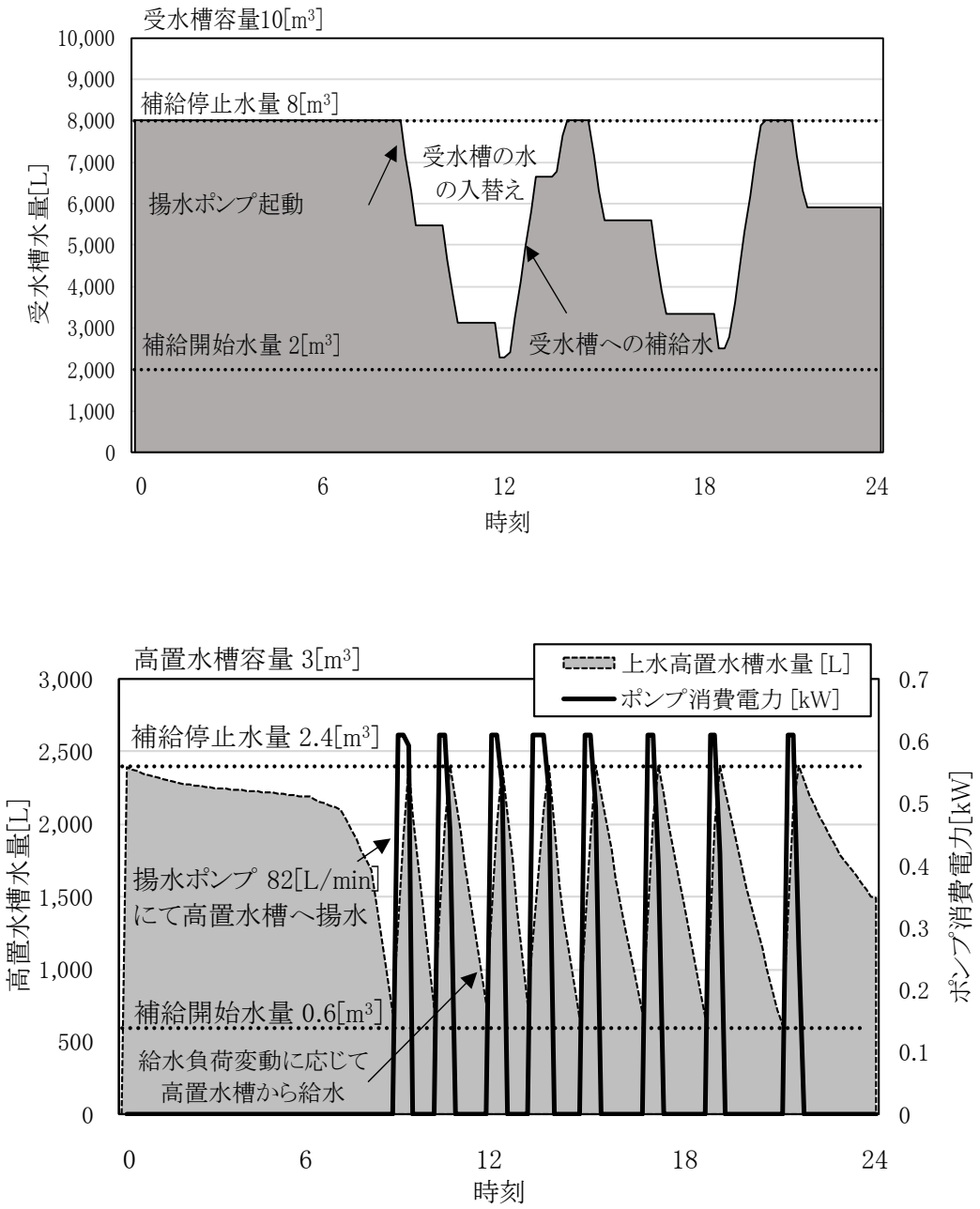


図 3-2-4-(a)　高置水槽方式における、受水槽と高置水槽の水量変動と揚水ポンプの発停とポンプ消費電力　((a)ケース A-1 における計算結果)

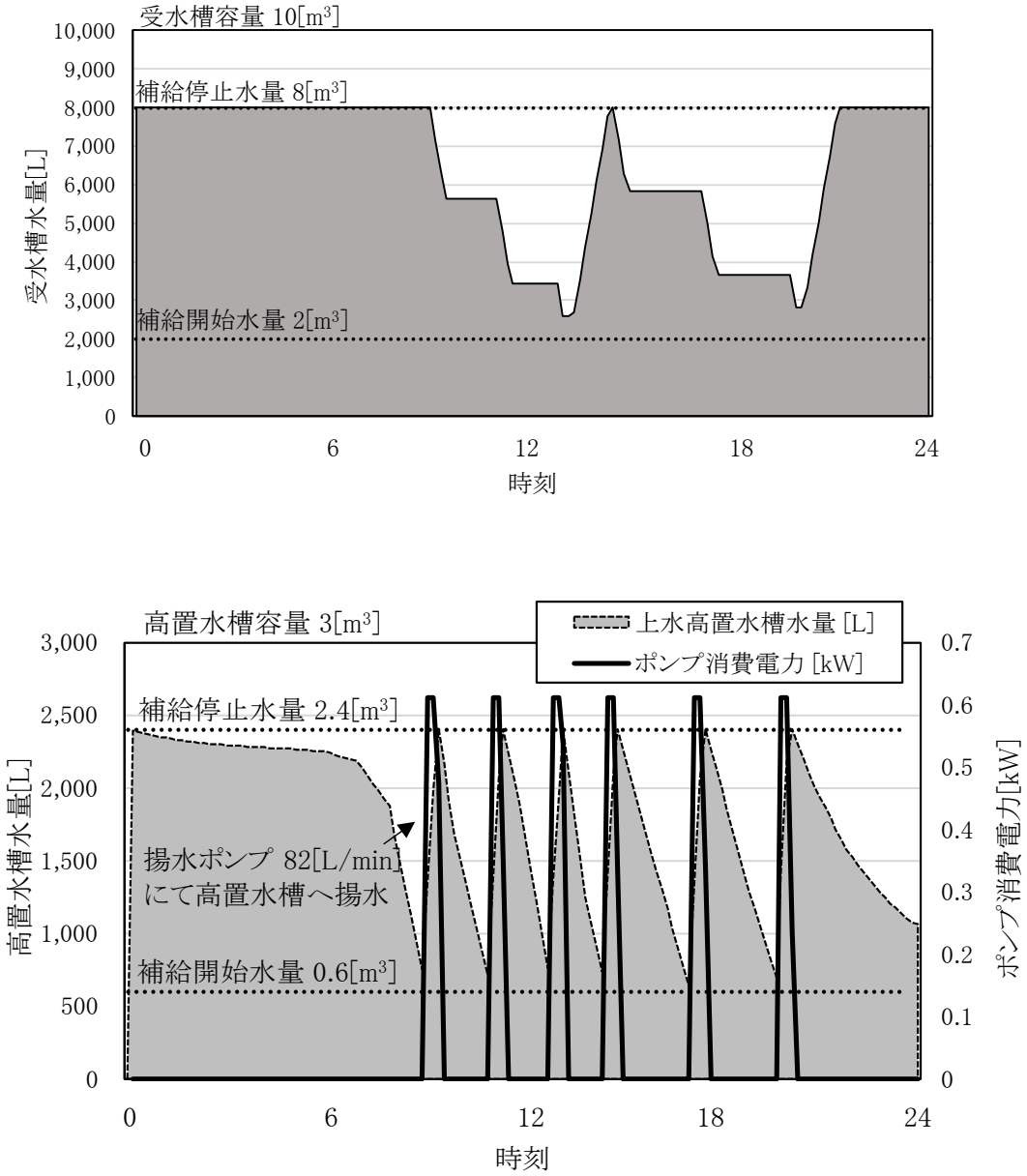
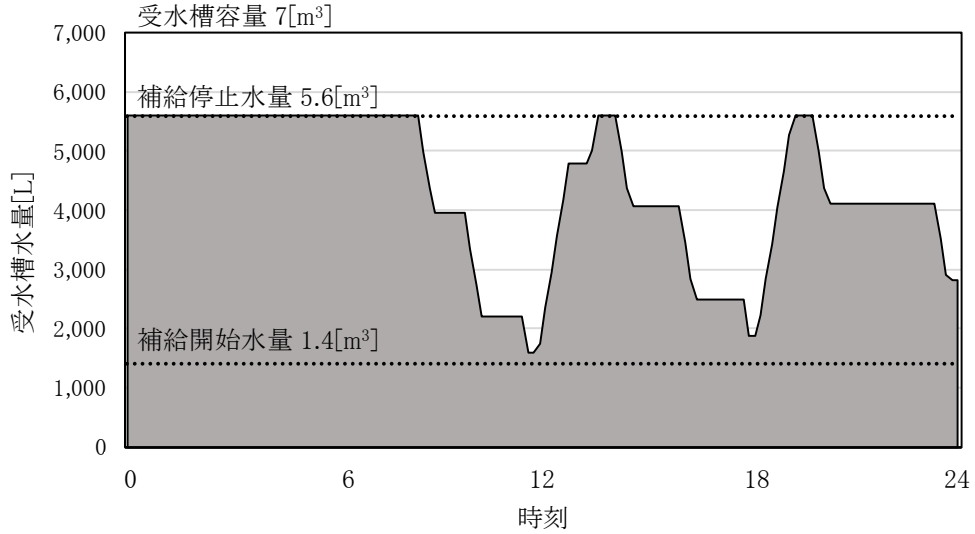


図 3-2-4-(b)　高置水槽方式における、受水槽と高置水槽の水量変動と揚水ポンプの発停とポンプ消費電力　((b)ケース A-2 における計算結果)



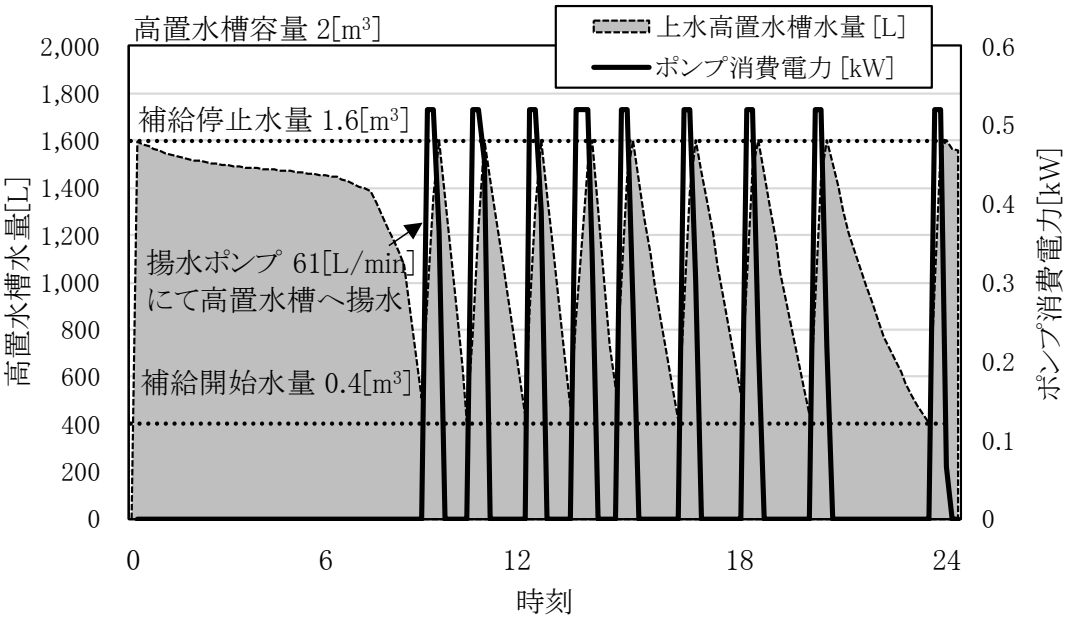


図 3-2-4-(c)　高置水槽方式における、受水槽と高置水槽の水量変動と揚水ポンプの発停とポンプ消費電力　　((c)ケース A-3 における計算結果)

3-3　本章のまとめ

本章で検討した内容と得られた知見を以下に示す。

1)　本算定手法における給水負荷算定法は、原単位の分割と時刻別負荷パターンを組み合わせることにより、節水機器への対応、上水・雑用水系など給水種別の分離、男女比などの利用形態の変化への対応を考慮した上で、給水システムのエネルギー消費量や負荷変動の挙動を予測する実用的な負荷算定手法と位置づけた。

2)　一人あたりの使用回数や時刻別負荷パターン比率について既往研究を調査し、本算定に利用可能なデータベースとして整理した。

3)　給水システムの構築は、水槽や機器をモジュール単位で構成し、給水方式によってモジュールを組み合わせることで多様なシステム構成が可能な仕組みとした。

4)　実在の事務所本社ビルにおける衛生器具別の時刻別使用頻度と平均吐水量の実測データを解析し、節水器具を用いた建物で給水原単位について考察した結果、男女比 8:2 で 21［L/(人・日)］の実績となり、従来の事務所の設計原単位 40～60［L/(人・日)］に対して 47～65%程度の削減となった。今後、事務所ビルの給水原単位データの拡充につながる数値として提示できた。

5)　実測データで解析を行った時刻別負荷パターンを本算定手法に適用し、大便器、小便器、洗面器の吐水量により、２種類の節水器具の組み合わせパターンにより、給水負荷算定と給水システムのエネルギー消費量と各種水槽類の水位変動の解析を行い、計画・設計段階における、本算定手法の実務的な有効性を示した。

参考文献

3-1）村川三郎、池田大輔、坂本和彦、高田宏 著：建築物の新給水給湯負荷算定法と実務設計、彰国社、2020.4 発行

3-2）小坂信二：給水使用量の新しい計算方法の提案（水負荷計算法）-水負荷計算法の概要と事務所ビルの設計用給水使用量計算例-、空気調和・衛生工学会論文集(2016.2)、pp.61-70

3-3）大塚雅之、村上周三、小原直人、土井章弘、甕岡賢吾、長谷川巌：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 36）：給水システムプログラムの概要、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）、pp.1145-1148

3-4）長谷川巌、村上周三、大塚雅之：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 53）：給水・給湯負荷パターンの検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2009.9）、pp.695-698

3-5）長谷川巌、村上周三、大塚雅之：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 87）：給水プログラムを用いた給水滞留時間の検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2011.9）、pp.1711-1714

3-6）長谷川巌、大塚雅之、小瀬博之、村上周三：給水システムにおける水・エネルギー消費を算出するシミュレーションツールの開発に関する研究―計算体系の構築と実測データによる適用検討―、空気調和・衛生工学会論文集（2021.10）、pp.17-26

3-7）建築設備設計基準 平成 30 年版、2018.7.24 発行

3-8）事務所ビルを対象とした設計給水データの検討、空気調和・衛生工学会、給排水衛生設備委員会 設計給水データ検討小委員会、委員会成果報告書 R2030-2016、2015.10.30 発行

3-9）建築設備設計基準 平成 18 年版、2006.9 月発行、P341 図 2-35

3-10）三宅正仁、中尾正善、西岡真稔、鍋島美奈子:渦巻ポンプの特性近似式の提案、空気調和・衛生工学会論文集　No.126(2007.9)、pp.19-26

第 4 章 給湯システムにおける算定手法と省エネルギー設計への適用

給湯設備システムは給排水衛生設備の分野の中で、最もエネルギー消費量に影響する分野である。脱炭素社会に向け、2016 年 4 月より施行された建築物省エネ法（建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律）は今後強化される見通しで、給湯エネルギー消費量の削減に向けた計画・設計がますます重要となってくる。

既往の研究 [4-1)]では、給湯負荷パターンの予測をシミュレーションで行い、その結果から機器容量を算定する手法を示しているが、これまで、給水温度、給湯配管経路と貯湯槽の熱損失、給湯機器の機器特性を考慮して、給湯エネルギー消費量を時刻別に算出する方法はない。給湯エネルギー消費量の算出方法に関しては、従前の省エネ法である CEC-HW で用いられた算定手法 [4-2)]は月平均での外気温度や給水温度を考慮するに留まり、時刻別の給湯負荷変動を考慮したものでは無かった。今後は、太陽熱利用給湯による自然エネルギー利用や、温泉排熱、下水熱利用など未利用エネルギーを活用した給湯システムの検討にも拡張可能な算定手法が求められている。

本章では、第 2 章で示した計算体系に基づき、給湯使用量と時刻別負荷パターンから給湯負荷を算出するとともに、給湯配管経路と貯湯槽の熱損失、および給湯機器の機器特性を考慮した給湯システムのエネルギー消費量を算出する、設計実務に適用可能な算定手法の検討について述べる。本算定手法は、各機器や配管をモジュール単位で細分化し、水量と水温を順次計算する計算手法を示し、本算定手法による給湯システムにおける省資源・省エネルギー検討を目的とした計算例について述べる。なお、本算定手法は、建築物省エネ法に適用可能な給湯エネルギー計算手法として、国土交通大臣がエネルギー消費性能を適切に評価できる方法として位置付けられている [4-3)]。

4-1 給湯システムシミュレーションの計算モデル

4-1-1 システム構成と計算モデル

本算定手法で検討した給湯システムの計算モデルを図 4-1-1 に示す。給湯システムにおいて最も基本となる、加熱装置（給湯ボイラー）、貯湯槽、給湯循環配管を持つ中央式給湯システムを対象として、シミュレーションモデルを構築した。本モデルでは、給湯使用に伴い、補給水と給湯循環二次ポンプで循環される返湯が貯湯槽下部に入り混合された後、給湯循環一次ポンプにより循環され加熱装置で加熱されて、貯湯槽上部に供給される。その後、給湯使用に応じて二次側給湯往配管内を流れ、給湯使用箇所で供給される。図 4-1-2 は、図 4-1-1 に示した給湯システムの計算モデルのモジュール構成を示したものである。本算定手法ではシステムにおける各機器と配管をモジュール単位に細分化し、モジュールごとに計算された水量と水温が、順次接続されているモジュールに受け渡され、計算時間間隔に応じた時刻別計算を行う手法となっている。また、貯湯槽内温度を常に一定に保つために、給湯循環一次ポンプの発停制御や給湯使用がない時間帯には給湯循環二次側ポンプを停止する運転スケジュールを設定するモジュールで構成されている。

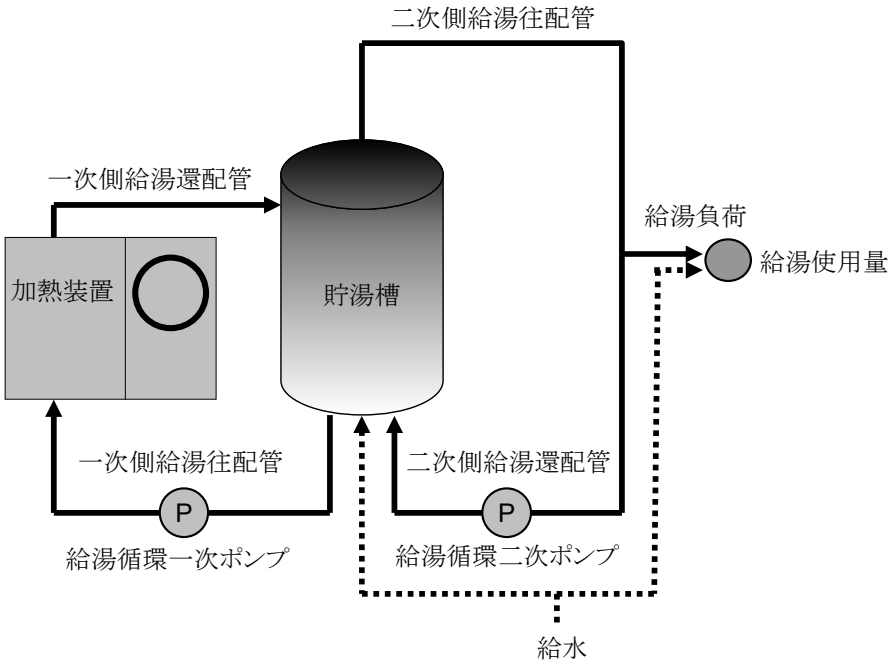


図 4-1-1 給湯システムの計算モデル

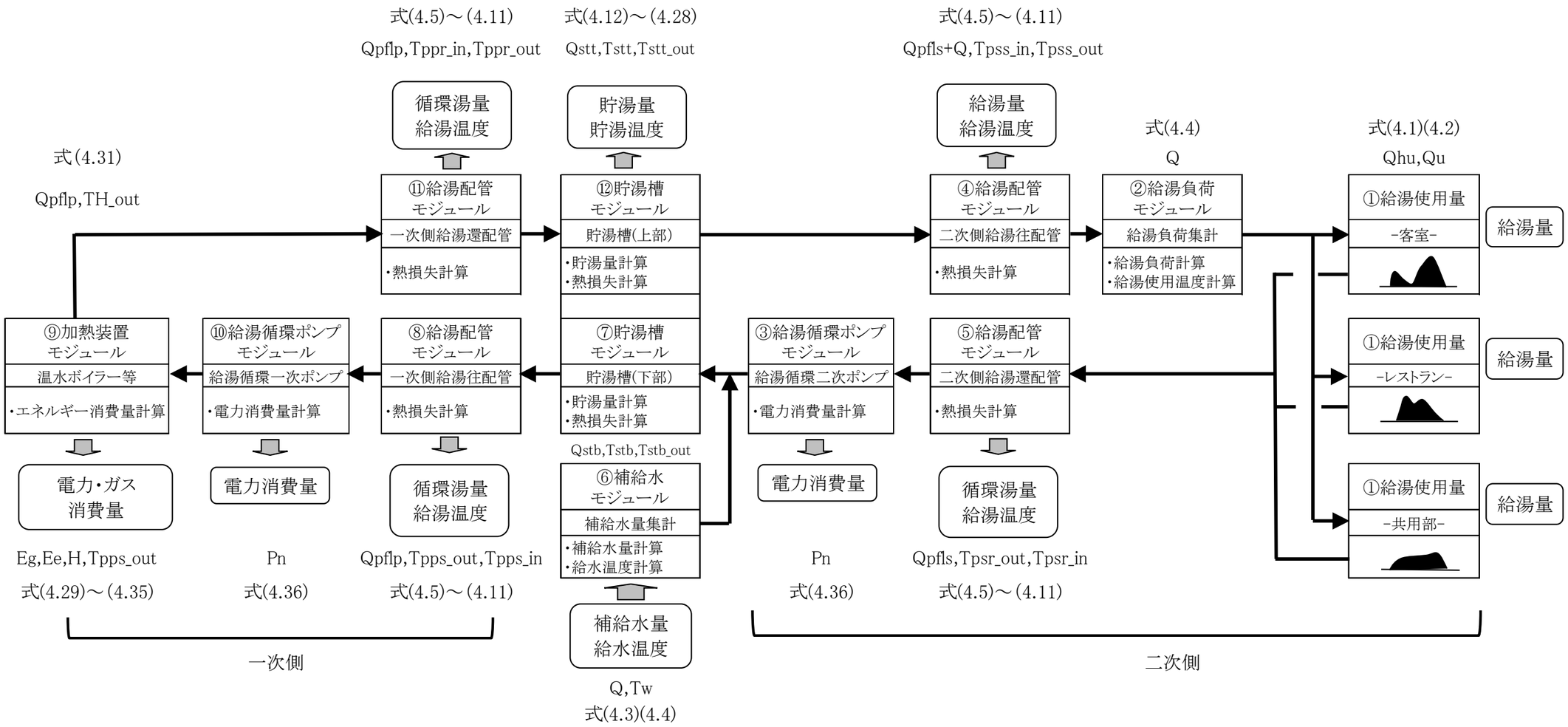


図 4-1-2 計算モデルのモジュール構成（ホテル用途の場合）

4-1-2 計算順序

表 4-1-1 に計算時間間隔における各モジュールの計算順序を示す。一般に、配管や貯湯槽の熱ロスを含めた計算においては、各モジュールにおける温度・エネルギー平衡を成立させるため収束計算が必要になる。しかしながら、収束計算を行うことはプログラムの構成を複雑化させ、モジュールの設計・実装段階のみならず入力時においても過度な作業負担が生じる可能性が高い。本計算方法の特徴は、配管や貯湯槽の熱損失量は、冷却・放熱による指数関数モデルに近似することで、計算時間間隔内での収束計算を不要としている点と、計算ステップが計算精度に応じて１分～1 時間などに自由に変えられる点である。１つの時間ステップ内で、貯湯槽や配管の出入口の温度は変化しないものとし、配管出入口の温度や熱損失量を算出し、各時間ステップで給湯使用量からエネルギー消費量までを順次解いている。収束計算を行わない代わりに計算時間間隔を短くすることで計算精度は上げることが出来るが、中央式給湯方式においては一般に給湯循環ポンプが 24 時間運転され温度変化は少ないことから、計算時間間隔が長くても年間エネルギー消費量の算出には影響が少ないと考えられる。

表 4-1-1 計算時間間隔における各モジュールの計算順序

モジュール名称	計算内容
①給湯使用量	各部位の給湯使用量計算
②給湯負荷	給湯温度と給湯使用温度による給湯負荷計算
③給湯循環二次ポンプ	給湯二次側循環流量と運転時間による電力消費量計算
④二次側給湯往配管	二次側給湯往配管の出口温度と配管熱損失計算
⑤二次側給湯還配管	二次側給湯還配管の出口温度と配管熱損失計算
⑥補給水	給湯負荷分の補給水量の集計計算
⑦貯湯槽（下部）	貯湯槽下部における、貯湯量、貯湯温度、熱損失計算
⑧一次側給湯往配管	一次側給湯往配管の出口温度と配管熱損失計算
⑨加熱装置	給湯一次循環流量と入口温度による加熱能力、エネルギー消費量、加熱後の出口温度計算
⑩給湯循環一次ポンプ	給湯一次循環流量と運転時間による電力消費量計算
⑪一次側給湯還配管	一次側給湯還配管の出口温度と配管熱損失計算
⑫貯湯槽（上部）	貯湯槽上部における、貯湯量、貯湯温度、熱損失計算

4-1-3 各モジュールにおける計算

(1) 給湯使用量計算

時刻別の給湯使用量があらかじめ推定出来る場合には、その値をそのまま算定に用いることが出来るが、建物用途に応じて積み上げて算出する場合には、式(4.1)に示すとおり、面積・人員・客室数・病床数と、1 日あたりの給湯使用量原単位、時刻別の給湯使用量の 1 日あたりの比率を乗じることにより算出する。これにより、既往の文献や調査事例を活用し、あらゆる建物用途に適用出来、実務的にも汎用性の高いものとなる。各部位で算出した給湯使用量を合計し、給湯システム単位での給湯使用量を求める。

$$Qhu = \Sigma\,(Ni \times Ndi \times Fhi) \quad \cdots\cdots (4.1)$$

ここに、

Qhu：時刻別給湯使用量　［L/h］(時刻別換算値)

Ni：面積・人員・客室数・病床数［㎡・人・室・床］

Ndi：1 日あたりの給湯使用量［L/((㎡・人・室・床)・日)］

Fhi：時刻別の給湯使用量の 1 日あたりの比率 (時刻別給湯使用量パターン比率) [-]

(2) 給湯負荷計算

給湯負荷計算の方法を式(4.2)～(4.4)に示す。本算定手法では、データの精度に応じて計算時間間隔を変更することを視野に入れており、以降は計算時間あたりでの計算として算定方法を示す。給湯負荷計算に先立ち、計算対象日時における給水温度を算出する。建設地における給水温度データがある場合には直接設定することも可能であるが、本算定手法では文献 [4-2)]p303 を用い、水槽類の熱容量を考慮し、外気温度による給水温度への即時変化は少ないと考え、気象データより導き出される朝 9 時の外気温度データと地域別給水温度係数の回帰式から給水温度を算出する。なお、図 4-1-2 に示す補給水モジュールと他の計算モジュールを接続し、太陽熱利用や温排熱により予熱された給水温度を用いることで、自然エネルギー利用や未利用エネルギー活用による省エネルギー効果が算出可能なように拡張性を持たせている。

給湯栓末端では給湯と給水を混合して、適切な給湯使用温度で使用しているため、給湯負荷と給水負荷を分離して負荷を計算する。また、末端での給湯温度の精度を高めるために、給湯システムにおける二次側給湯往配管からの出口温度を用いている。配管システム全体で収束計算を行う算定方法もあるが、本算定手法では、前計算時刻における供給給湯温度を用いている。

$$Qu = Qhu \times ct / 3600 \quad \cdots\cdots (4.2)$$

$$Tw = a \times Tout + b \quad \cdots\cdots (4.3)$$

$$Q = Qu \times (Thu - Tw) / (Tpss_out' - Tw) \quad \cdots\cdots (4.4)$$

ここに、

ct：計算時間間隔　［s］

Tw:給水温度　［℃］

Tout:外気温度　［℃］

a:給水温度換算係数 [4-2)]　［-］

b:給水温度換算係数 [4-2)]　［-］

Qu：計算時間間隔あたりの給湯使用量　［L］

Q：計算時間間隔あたりの給湯負荷　［L］

Thu：給湯使用温度　［℃］

Tpss_out'：前計算時刻における二次側給湯往配管からの出口温度［℃］

(3) 給湯配管からの熱損失計算

給湯配管からの熱損失を計算するため、給湯配管モジュールを設定した。給湯配管モジュールは、式(4.5)～(4.11)に示すとおり、配管への入口温度、流量、保温仕様、配管周囲の温度から指数関数により出口温度を算定することが出来る。給湯循環ポンプの発停制御を考慮し、ポンプが運転し、流量が発生している場合と、ポンプが停止し配管保有水量のみとなり滞留している場合に分けて計算を行う。また、給湯配管モジュールは汎用的なモジュールとして、給湯一次配管（往還）、給湯二次配管（往還）で共用化している。このようにモジュールによる計算では、システムの中での同一機器や配管部材はモジュールを再利用出来る点が特徴的である。

a 配管・貯湯槽の設置位置による周囲温度

配管・貯湯槽設置位置が、

外部の場合　Tp_amb= Tout、Tst_amb = Tout ……(4.5)

空調室内（空調室の天井内を含む）の場合

Tp_amb= Tr_air、Tst_amb = Tr_air ……(4.6)

機械室・パイプスペース内の場合

Tp_amb=（Tout + Tr_air）/2、Tst_amb =（Tout + Tr_air）/2 ……(4.7)

ここに、

Tp_amb:配管周囲温度　［℃］

Tst_amb:貯湯槽周囲温度　［℃］

Tr_air:空調室内温度　［℃］

b 配管出口温度と配管熱損失

1)給湯循環流量がない（給湯循環ポンプ停止）の場合

$$Tp_out = Tp_amb - (Tp_amb - Tp_in) \times \{\exp^{-(ct/3600)\times KwpL/(C\times Qpsl)}\} \quad \cdots\cdots(4.8)$$

$$Hp = C\times Qpsl\times(Tp_in - Tp_out) \quad \cdots\cdots(4.9)$$

2)給湯循環流量がある場合

$$Tp_out = Tp_amb - (Tp_amb - Tp_in) \times \{\exp^{-(ct/3600)\times KwpL/(C\times Qpfl)}\} \quad \cdots\cdots(4.10)$$

$$Hp = C\times Qpfl\times(Tp_in - Tp_out) \quad \cdots\cdots(4.11)$$

ここに、

Tp_in :配管入口温度　［℃］

Tp_out:配管出口温度　［℃］

Hp：配管からの熱損失量　［W］

KwpL：配管平均熱損失　［W/℃］

=Σi 配管種別・口径ごとの配管長さ［m］×単位長さあたりの配管損失熱量［W/(m・℃)］/配管合計長さ［m］（文献[4-2] p314 の表 6-10 参照）

C：水の比熱 4.19[kJ/(kg・℃)]×水の密度 1.0[kg/L]×単位換算 0.277[W/kJ] = 1.163[W/(L・℃)]

Qpsl：配管内保有水量　［L］

Qpfl：計算時間間隔あたりの循環量　［L］

c 二次側給湯往配管モジュール

配管を流れる流量は、二次側給湯還配管の循環量と給湯負荷の和として計算される。入口温度は貯湯槽上部の出口温度と等しい。

d 二次側給湯還配管モジュール

配管を流れる流量は、給湯循環二次ポンプの定格流量となる。配管への入口温度は二次側給湯往配管の出口温度と等しい。

e 一次側給湯往配管モジュール

配管を流れる流量は、給湯循環一次ポンプの定格流量となる。入口温度は貯湯槽下部からの出口温度と等しい。

f 一次側給湯還配管モジュール

配管を流れる流量は、給湯循環一次ポンプの定格流量となる。入口温度は加熱装置からの出口温度となる。

以下に給湯配管モジュールに関する記号を定義する。

Tpss_in :二次側給湯往配管への入口温度　［℃］

Tpss_out:二次側給湯往配管からの出口温度　［℃］

Tpsr_in :二次側給湯還配管への入口温度　［℃］

Tpsr_out:二次側給湯還配管からの出口温度　［℃］

Tpps_in :一次側給湯往配管への入口温度　［℃］

Tpps_out:一次側給湯往配管からの出口温度　［℃］

Tppr_in :一次側給湯還配管への入口温度　［℃］

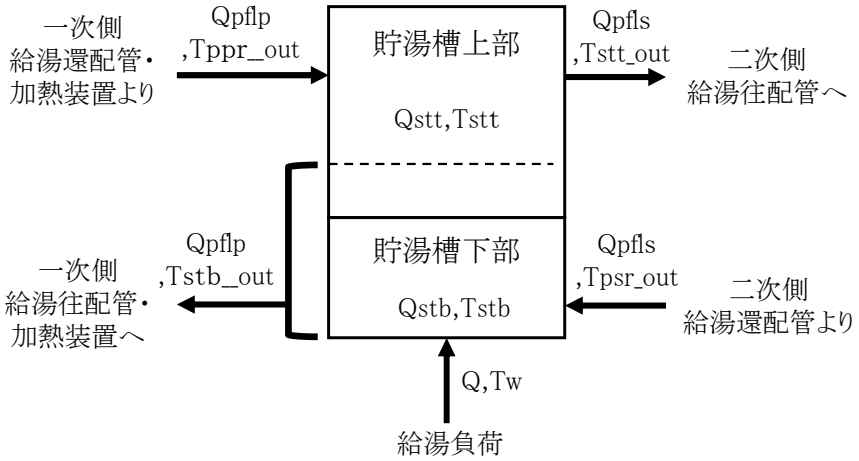
Tppr_out:一次側給湯還配管からの出口温度　［℃］

Qpfls：計算時間間隔あたりの二次側給湯循環量　［L］

Qpflp：計算時間間隔あたりの一次側給湯循環量　［L］

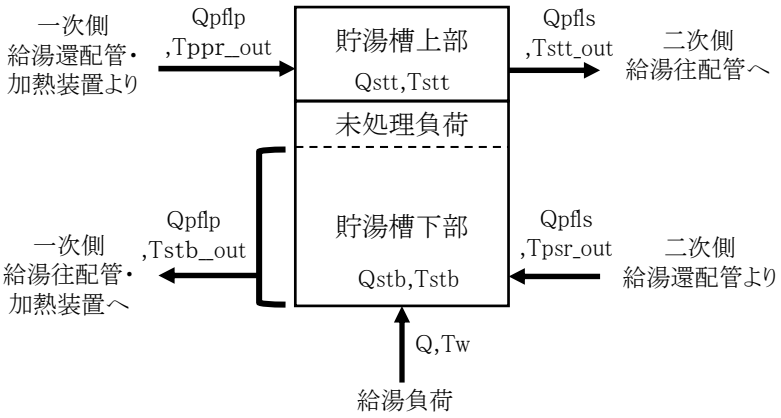
(4) 貯湯槽計算

本算定手法の給湯システムにおける貯湯槽モデルは上下に分割した２層モデルを用いた。図 4-1-3 に給湯ボイラーの場合の貯湯槽モデルの概念図を、算定式を式(4.12)～(4.28)に示す。給湯負荷の大小によって、貯湯槽下部と上部の境界線が変化し、貯湯槽下部には二次側給湯還配管からの循環量と補給水による給湯負荷が混合し、給湯負荷として加熱装置へ給湯循環一次ポンプにより送水される。よって貯湯槽下部の給湯負荷が、給湯循環一次ポンプの流量、つまり加熱装置の容量によって、計算時間間隔内において処理可能かもしくは未処理負荷として、次の計算時間に繰り越されるかを判別しながら計算を行う。
貯湯槽上部では、貯湯槽容量から貯湯槽下部の給湯負荷を差し引いたものに、一次側給湯還配管からの循環量を加えたものを貯湯槽上部における有効貯湯量として、二次側給湯往配管に供給される。また同時に、貯湯槽からの熱損失も計算される。



(a)貯湯槽下部の給湯負荷が
一次側循環量よりも小さい場合

図 4-1-3 (a) 貯湯槽モデルの概念図



(b) 貯湯槽下部の給湯負荷が一次側循環量よりも大きい場合

図 4-1-3 (b) 貯湯槽モデルの概念図

a 貯湯槽下部における温度と給湯負荷

1)給湯負荷がない場合の貯湯槽下部からの出口温度

$$Tstb_out = Tpsr_out \quad \cdots\cdots (4.12)$$

給湯負荷がない場合は、貯湯槽下部の給湯負荷は貯湯槽容量に対して極めて少ないため、式(4.21)で貯湯槽全体の熱損失量を計算する。

2)給湯負荷がある場合の貯湯槽下部温度と熱損失量

$$Qstb = Qstb_ul' + Q + Qpfls \quad \cdots\cdots (4.13)$$

$$Tstb_in = (Qstb_ul' \times Tstb' + Q \times Tw + Qpfls \times Tpsr_out)/Qstb \quad \cdots\cdots (4.14)$$

$$Tstb = Tst_amb - (Tst_amb - Tstb_in) \times \{\exp^{-(ct/3600) \times Kwst \times (Qstb/Vst)/(C \times Qstb)}\} \quad \cdots\cdots (4.15)$$

$$Hstb = C \times Qstb \times (Tstb_in - Tstb) \quad \cdots\cdots (4.16)$$

a) 貯湯槽下部の給湯負荷が一次側循環量よりも大きい場合の未処理給湯負荷と出口温度

$$Qstb_ul = Qstb - Qpflp \quad \cdots\cdots (4.17)$$

$$Tstb_out = Tstb \quad \cdots\cdots (4.18)$$

b)貯湯槽下部の給湯負荷が一次側循環量よりも小さい場合の未処理給湯負荷と出口温度

$$Qstb_ul = 0$$

$$Tstb_out = \{(Qpflp - Qstb) \times Tstt_out + Qstb \times Tstb\}/Qpflp \quad \cdots\cdots (4.19)$$

ここに、

Tstb_out:貯湯槽下部からの出口温度 ［℃］

Tstb_in: 貯湯槽下部流入温度 ［℃］

Tstb:貯湯槽下部平均温度（貯湯槽からの熱損失を考慮した温度） ［℃］

Tstb': 前計算時刻の貯湯槽下部温度 ［℃］

Tstt_out:貯湯槽上部からの出口温度 ［℃］

Qstb ：貯湯槽下部の給湯負荷 ［L］

Qstb_ul':前計算時刻の貯湯槽下部の未処理負荷［L］

Qstb_ul:貯湯槽下部の未処理負荷　［L］

Kwst：貯湯槽平均熱損失　［W/℃］

= 貯湯槽表面積［㎡］×貯湯槽熱貫流率［W/（㎡・℃）］（文献[4-2] p320 参照）

Hstb：貯湯槽下部からの熱損失量　［W］

Vst:貯湯槽容量　［L］

b 貯湯槽上部における温度と給湯負荷

1)給湯負荷がない場合の貯湯槽上部からの出口温度と熱損失量

$$Tstt_out = Tst_amb - (Tst_amb - Tppr_out) \times \{\exp^{-(ct/3600)\times Kwst/(C\times Vst)}\} \quad \cdots\cdots(4.20)$$

$$Hst = C\times Vst\times(Tppr_out - Tstt_out) \quad \cdots\cdots(4.21)$$

2)給湯負荷がある場合の貯湯槽上部温度と熱損失量

$$Qstt = Vst - Qstb \quad \cdots\cdots(4.22)$$

$$Tstt = Tst_amb - (Tst_amb - Tstt_out') \times \{\exp^{-(ct/3600)\times Kwst\times(Qstt/Vst)/(C\times Qstt)}\} \quad \cdots\cdots(4.23)$$

$$Hstt = 1.163 \times Qstt \times (Tstt_out' - Tstt) \quad \cdots\cdots(4.24)$$

a 貯湯槽下部の給湯負荷が一次側循環量よりも大きい場合の有効貯湯量と給湯供給温度

$$Vste = Qstt + Qpflp \quad \cdots\cdots(4.25)$$

$$Tstt_out = (Qstt\times Tstb + Qpflp\times Tppr_out)/ Vste \quad \cdots\cdots(4.26)$$

b 貯湯槽下部の給湯負荷が一次側循環量よりも小さい場合の有効貯湯量と給湯供給温度

$$Vste = Vst \quad \cdots\cdots(4.27)$$

$$Tstt_out = \{(Vst - Qpflp) \times Tstt + Qpflp \times Tppr_out)\}/ Vste \quad \cdots\cdots(4.28)$$

ここに、

Tstt_out：貯湯槽上部からの出口温度　［℃］

Tstt_out'：前計算時刻の貯湯槽上部からの出口温度　［℃］

Tstt：貯湯槽上部平均温度　［℃］

Qstt：貯湯槽上部の給湯負荷　［L］

Hst：貯湯槽からの熱損失量　［W］

（給湯負荷がない場合は貯湯槽全体の熱損失をここで算出）

Hstt：貯湯槽上部からの熱損失量　［W］

Vste：有効貯湯量　［L］

(5) 加熱装置の計算

加熱装置では、貯湯槽下部から給湯循環一次ポンプにより送水された負荷を加熱する計算を行う。式(4.29)～(4.32)に算定式を示す。このとき、加熱装置からの出口温度設定と入

口温度の差が 5℃未満の場合には加熱装置はサーモオフするとし負荷を処理しない。温度差が 5℃以上の場合には加熱装置が働き、この温度差と一次側給湯循環流量の積が加熱装置での必要処理負荷となる。計算時間間隔あたりの必要処理負荷と定格加熱能力の大小関係により、加熱装置による処理負荷と加熱装置からの出口温度を計算する。

a 負荷が小さい場合（THst_out - Tpps_out＜5[℃]）

$$TH_out = Tpps_out \quad \cdots\cdots (4.29)$$

b 負荷がある場合（THst_out - Tpps_out≧5[℃]）は以下のいずれかで算出する。

1)給湯負荷熱量に対して加熱装置の能力が十分にある、

Hrc ≧ C×Qpflp×(THst_out - Tpps_out) の場合は、

$$H = C \times Qpflp \times (THst_out - Tpps_out) \quad \cdots\cdots (4.30)$$

$$TH_out = THst_out \quad \cdots\cdots (4.31)$$

2)給湯負荷熱量に対して加熱装置の能力が不足する、

Hrc ＜ C×Qpflp×(THst_out - Tpps_out) の場合は、

H = Hrc とし定格能力を上限とする。

$$TH_out = (Hrc / C \times Qpflp) + Tpps_out \quad \cdots\cdots (4.32)$$

ここに、

THst_out:加熱装置からの出口温度（設定値）　［℃］

TH_out:加熱装置からの出口温度　［℃］

Hrc：定格加熱能力　［W］

H:加熱装置による処理負荷熱量　［W］

(6) 加熱装置のエネルギー消費量

加熱装置のエネルギー消費量は３．加熱装置の機器特性で示す効率比を用い式(4.33)～(4.35)に示す算定式でガス消費量、電力消費量を算出する。燃焼系加熱装置の電力消費量は式(4.34)に示すとおり、定格加熱能力に対する加熱装置による処理負荷の比に定格電力消費量を乗じて算出する。

a 燃焼系加熱装置の場合

$$Eg = H / (\eta \times \eta c) \quad \cdots\cdots (4.33)$$

$$Ee = (H / Hrc) \times Eego \quad \cdots\cdots (4.34)$$

b 電動系加熱装置の場合

$$Ee = H / (\eta \times \eta c) \quad \cdots\cdots (4.35)$$

ここに、

Eg:加熱装置のガス消費量　［W］

Ee:加熱装置の電力消費量　［W］

Eegc:燃焼系加熱装置の定格電力消費量　［W］

ηc:加熱装置の定格効率　［-］

η:加熱装置の効率比　　[-]

(7) 給湯循環ポンプの計算と発停制御

給湯循環一次ポンプと給湯二次ポンプは、汎用的なポンプモジュールとしていずれも式(4.36)に示す算定式で、給湯循環ポンプによる電力消費量を計算する。

$Pn = Qo \times (Ho/9.8) / (6120 \times \eta o)$ ……(4.36)

ここに、

Pn：ポンプ軸動力　　[kW]

Qo：定格流量　　[L/min]

（Qo は Qpflp または Qpfls と等しい）

Ho:ポンプ全揚程　　[kPa]

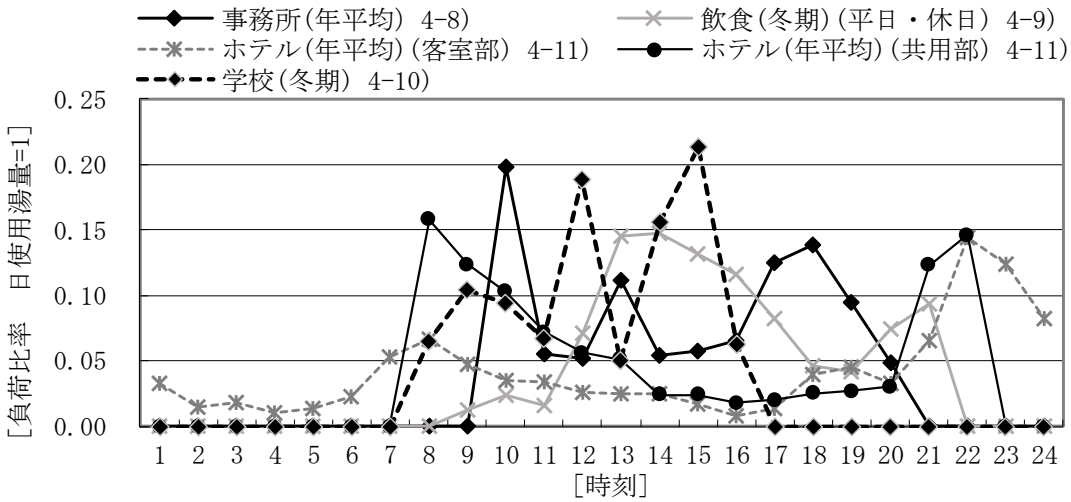
ηo：ポンプ最高効率

$\eta o = -0.0145(\log(Qo))^2 + 0.2682(\mathrm{Log}(Qo)) - 0.6018$

給湯二次ポンプは、給湯負荷がない時間帯には停止する制御が可能であるが、24 時間給湯負荷がある場合には常時運転状態となる。給湯一次ポンプは、加熱装置からの出口温度設定と一次側給湯往配管からの出口温度設定の差が 5℃以上の場合に運転され、加熱装置の発停と連動する制御を行う。

4-2 用途別給湯使用量パターンのデータ整備

本算定手法において式(4.1)に示す給湯使用量を算定するため、文献[4-8)~4-11)]の調査結果に基づき、時刻別の給湯使用量の 1 日あたりの比率（Fhi：時刻別給湯使用量パターン比率）を読み取り値から求め、データベースを整備した。図 4-2-1 は、事務所、学校、飲食の平日と休日のパターン、ホテルの客室部と共用部のパターンについて、日給湯使用量を 1 とした場合の時刻別給湯比率を示したものである。このデータに基づき、複合用途も含め様々な建物用途に対応した給湯システムシミュレーションが可能となる。



注1）凡例の季節の調査結果における対象季節を示す。
注2）凡例は片括弧の数値は参考文献の番号を示す。

図 4-2-1 用途別・時刻別給湯使用量比率

4-3 加熱装置の機器特性

4-3-1 機器特性の調査と整備

本算定手法では、給湯システムで消費されるエネルギー消費量を算出するため、加熱装置の機器特性調査とデータベースの整備を行った。実務上汎用的な加熱装置とし、給湯ボイラー、連結型瞬間湯沸器、ヒートポンプ給湯機を対象とし、調査は文献 4-6)の注記に示す各協会、工業会の協力を得て実施した。時刻別給湯負荷変動により変動する負荷率や入口温度、外気温度に応じて加熱装置の効率がどのように変化するかを、定格効率に対する比率である効率比との関係として機器特性を整備した。

4-3-2 加熱装置の機器特性

(1) 給湯ボイラーの機器特性

図 4-1-1 に示した計算モデルが、給湯ボイラーを適用した場合の給湯システムである。図 4-3-1 に給湯ボイラーの機器特性として、定格能力に対する負荷率と効率比との関係を示す 4-6)。給湯ボイラーの機器特性は、一般的な蒸気ボイラーで on-off 制御の場合とし、負荷率が 30%以下はバーナーが着火しないとされているが、本算定手法では文献 4-12)に示す間欠運転における運転時間に対する燃焼時間割合とボイラーの運用効率の関係より機器特性を作成した。

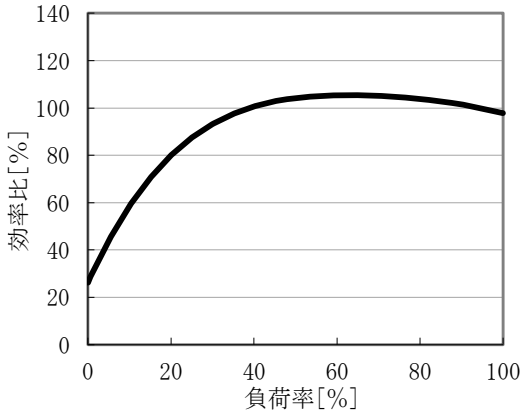


図 4-3-1 給湯ボイラーの機器特性 4-6)

(2) 連結型瞬間湯沸器の機器特性

図 4-3-2 に連結型瞬間湯沸器による給湯システムの計算モデルを示す。給湯ボイラーによる計算モデルとの違いは加熱装置部分のみである。このように異なる加熱装置を用いたシミュレーションを行いたい場合には、加熱装置以外の部分のモジュールを再利用出来ることが本算定手法の特徴である。図 4-3-3 に連結型瞬間湯沸器の機器特性を示す 4-6)。調査

結果より、給湯負荷熱量の絶対量に対する効率比の関係を示す。連結型湯沸器の場合には台数制御運転を行うため、最小負荷となる約 13MJ 以下では着火せず給湯温度は上昇しない。また約 50MJ 以上では効率比は一定となる。なお一般型瞬間湯沸器と潜熱回収型瞬間湯沸器の効率比は同じで、定格効率が変わるのみとなる。

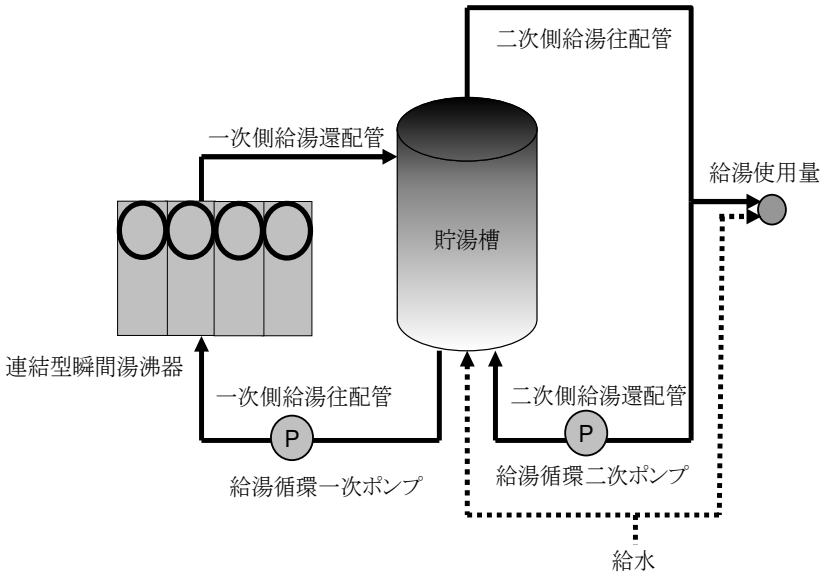


図 4-3-2 連結型瞬間湯沸器による給湯システムの計算モデル [4-6)]

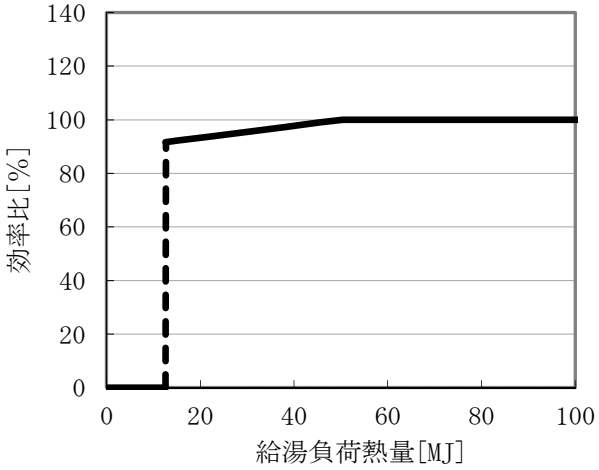


図 4-3-3　連結型瞬間湯沸器の機器特性 [4-6)]

(3) ヒートポンプ給湯機の機器特性

図 4-3-4 にヒートポンプ給湯システムの計算モデルを示す。ヒートポンプ給湯機への入口温度が高いと機器効率が低下するため、二次側給湯還配管は貯湯槽上部に接続し、貯湯槽下部には補給水のみを供給する。また給湯負荷がなく貯湯槽内の温度が設定以下となった場合には、保温回路にて循環し貯湯槽内温度を一定以上に保つシステムとなっている。

図 4-3-5 にヒートポンプ給湯機の機器特性を示す[4-6]。ヒートポンプ給湯機は外気温度が高いほど効率が上昇するため、外気温度と効率比の関係で示すことが出来る。貯湯槽下部に給水された温度の低い水を加熱する（加熱運転モード）と貯湯槽上部で温度低下が生じた場合に加熱する（保温運転モード）により切り替えられため不連続となる。貯湯槽下部で給水されるため水温が 40℃以上にはならず、貯湯槽上部では水温が循環水温により 40℃未満にならないとしたモデルである。外気温度 5℃付近を境界とし、着霧域と非着霧域に分かれ、着霧域では効率比が低下する特性がある。

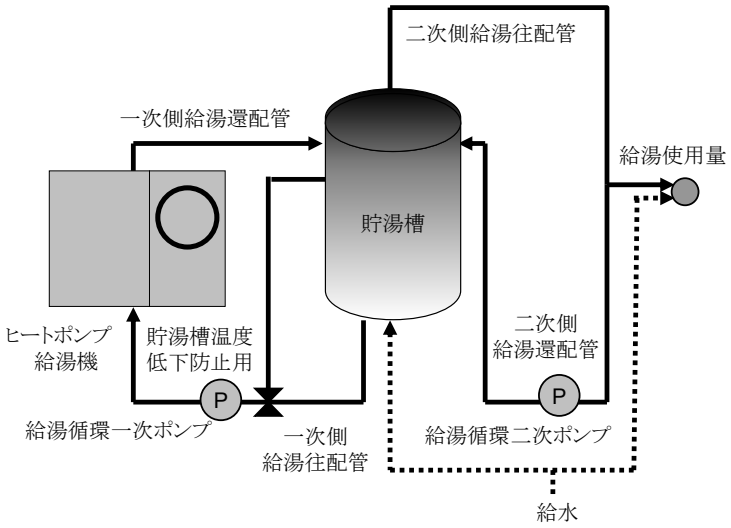


図 4-3-4 ヒートポンプ給湯システムの計算モデル

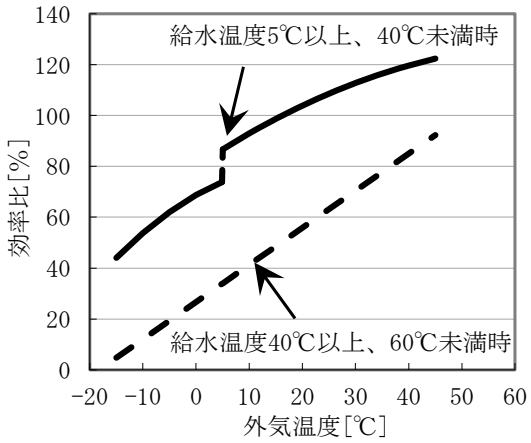


図 4-3-5 ヒートポンプ給湯機の機器特性[4-6]

4-4 計算例と省資源・省エネルギー設計への適用

4-4-1 計算例の諸元と計算条件

本算定手法を用いた計算例を示す。計算対象は、機器表や配管設備図などの設計図書がある、延床面積約 28,000 ㎡、客室数 400 室のホテル用途で実在する建物とした。本算定手法で計算に必要な各諸元と計算条件を表 4-4-1 に示す。

表 4-4-1 計算例の諸元と計算条件

1)	延床面積	28,000 ㎡			
		客室部	16,000 ㎡（400室）	共用部	12,000 ㎡
2)	建設地	東京			
3)	給湯使用量	客室部	220 L/人・日	人員	600 人
		共用部	50 L/㎡・日	給湯対象面積	350 ㎡
4)	貯湯槽容量	30 ㎥	ウレタンフォーム50mm	平均熱損失	33 W/℃
5)	加熱装置	2,000 kW	定格ガス消費量	2,500 kW（ボイラー効率0.8）	
			定格電力消費量	1 kW	
		加熱装置からの出口温度(設定値)		60 ℃	
6)	循環2次ポンプ	200 L/min	揚程	5 mAq	ポンプ効率 0.6
	循環1次ポンプ	520 L/min	揚程	15 mAq	ポンプ効率 0.6
7)	保温仕様・保有水量				
	二次側給湯往配管	保温仕様1	284.4 W/℃	保有水量	1,507.2 L
	二次側給湯還配管	保温仕様1	308.1 W/℃	保有水量	1,632.8 L
	先止まり配管	保温仕様1	261.6 W/℃	保有水量	588.8 L
	一次側給湯往配管	保温仕様1	23.3 W/℃	保有水量	392.5 L
	一次側給湯還配管	保温仕様1	23.3 W/℃	保有水量	392.5 L
8)	貯湯槽・配管設置位置	貯湯槽といずれの配管も配管設置位置 式(7)の場合として計算			
9)	給湯使用温度	43 ℃			
10)	循環2次ポンプ運転時間	0:00～24:00（常時運転）			
	循環1次ポンプ運転時間	0:00～24:00（出入口温度差5℃以上で運転）			

4-4-2 基準ケースの計算結果

表 4-4-1 に示した計算条件に基づき年間時刻別計算を行った。給湯使用量の時刻別負荷パターンは図 4-2-1 でホテル（客室部・共用部）用途として示したものを用い、1 日の給湯使用量（給湯使用温度設定：43℃）は一定であるが、給水温度によって、給湯負荷（約 60℃供給）と給水負荷に分離してシステム計算を行う。図 4-4-1 は給水温度が最も低い冬期 1/24、図 4-4-2 は給水温度が最も高い夏期 7/17 における、1 日の給水・給湯負荷変動を示したものである。給湯使用量は同じであるが、冬期の給湯負荷は夏期の 2 倍ほどになることが分かる。

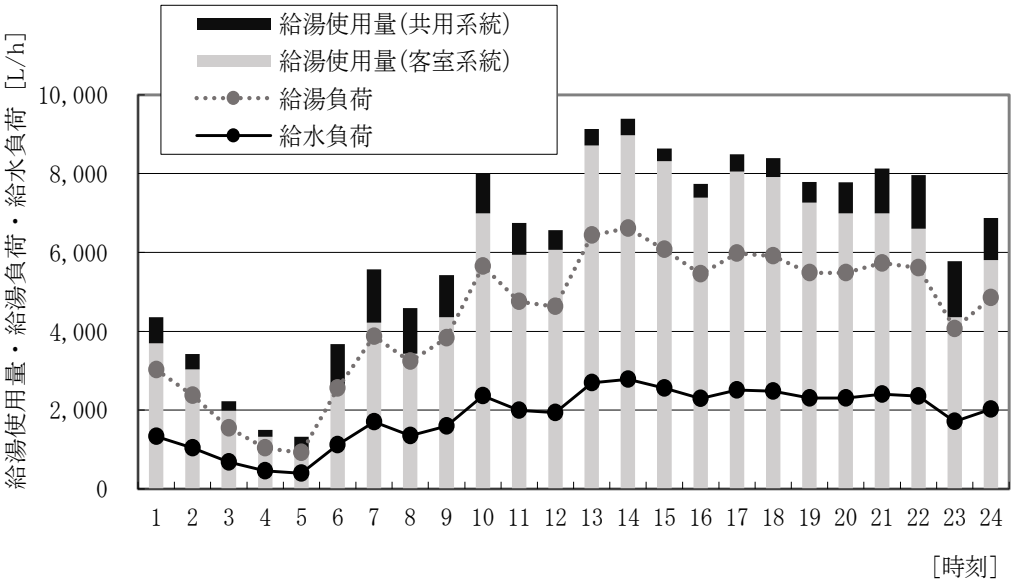


図 4-4-1 給水・給湯負荷変動（冬期 1/24）

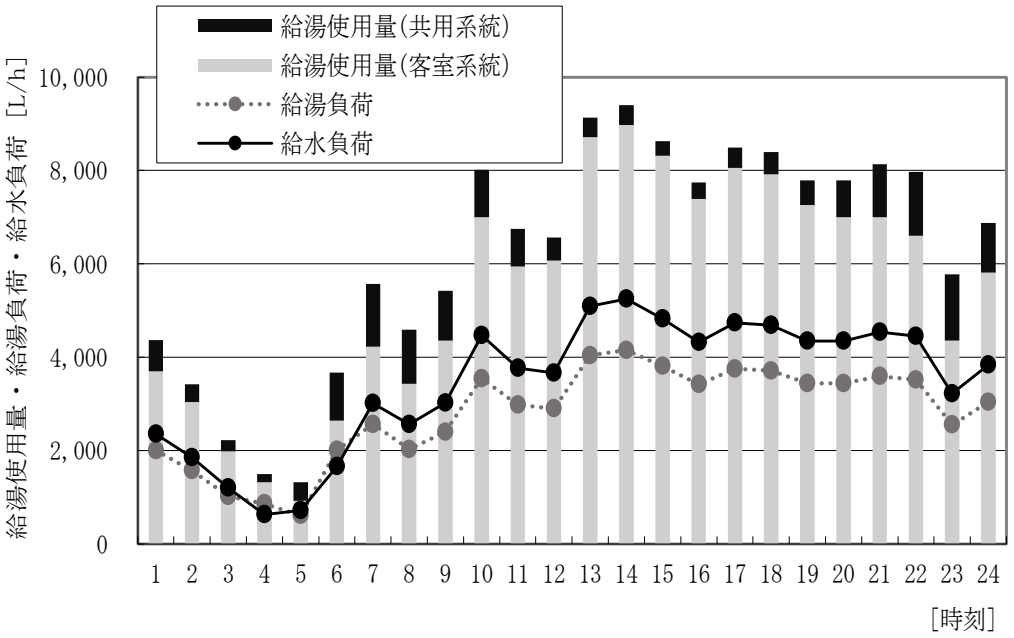


図 4-4-2 給水・給湯負荷変動（夏期 7/17）

図 4-4-3、図 4-4-4 はそれぞれの日における、加熱装置のガス消費量と各所の温度を 5 分間隔計算により算出したものである。冬期 1/24 においては加熱装置への入口温度が低いため、常に加熱装置が運転されている状態であるが、夏期 7/17 においては、加熱装置が運転される条件（加熱装置からの出口温度設定 60℃－加熱装置への入口温度＜温度差 5℃）に満たない時間帯があるため、このときは ON/OFF 状態となり加熱装置からの出口温度が変

化する。出口温度が変化しても、貯湯槽に蓄えられた貯湯量が十分であれば二次側に給湯が可能となる。

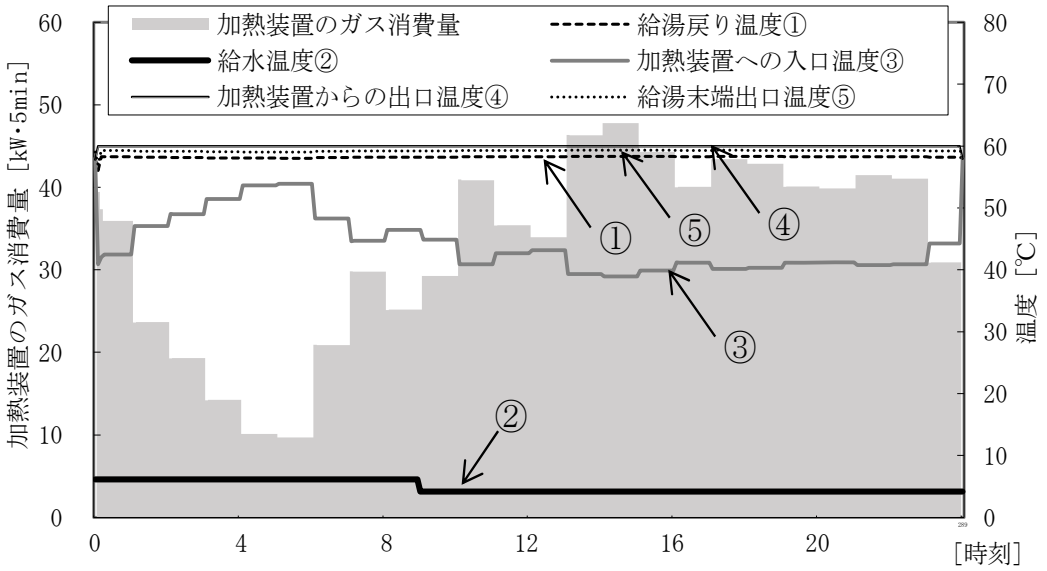


図 4-4-3 加熱装置のガス消費量・給水給湯温度（冬期 1/24）

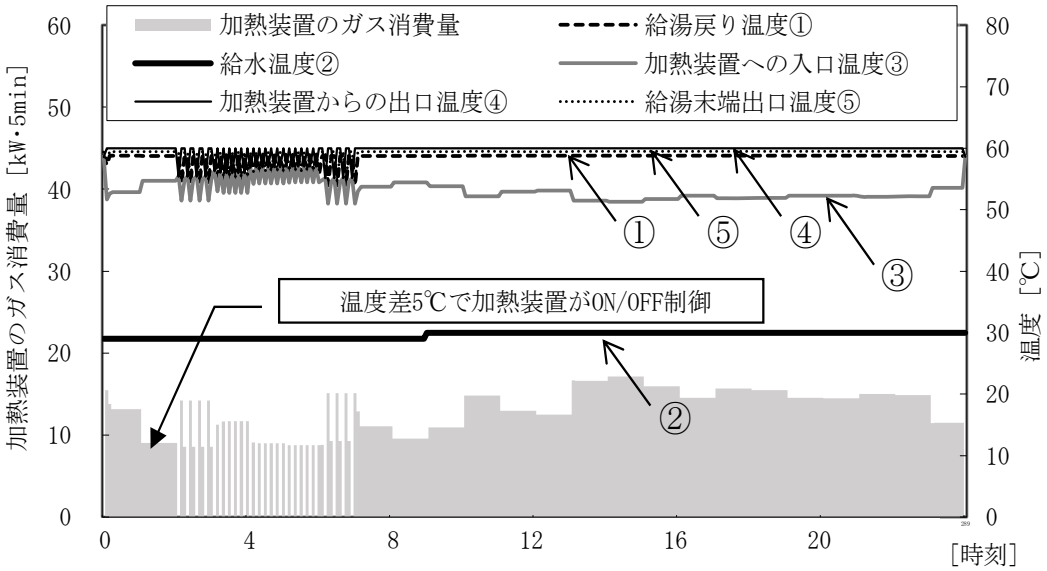


図 4-4-4 加熱装置のガス消費量・給水給湯温度（夏期 7/17）

図 4-4-5 は給湯配管、貯湯槽からの熱損失量の年間時刻変動を示す。二次側配管からの熱損失に比べ、一次側配管と貯湯槽からの熱損失は熱損失全体の 7.4%とわずかである。また夏期においては熱損失量が減少していることが分かる。

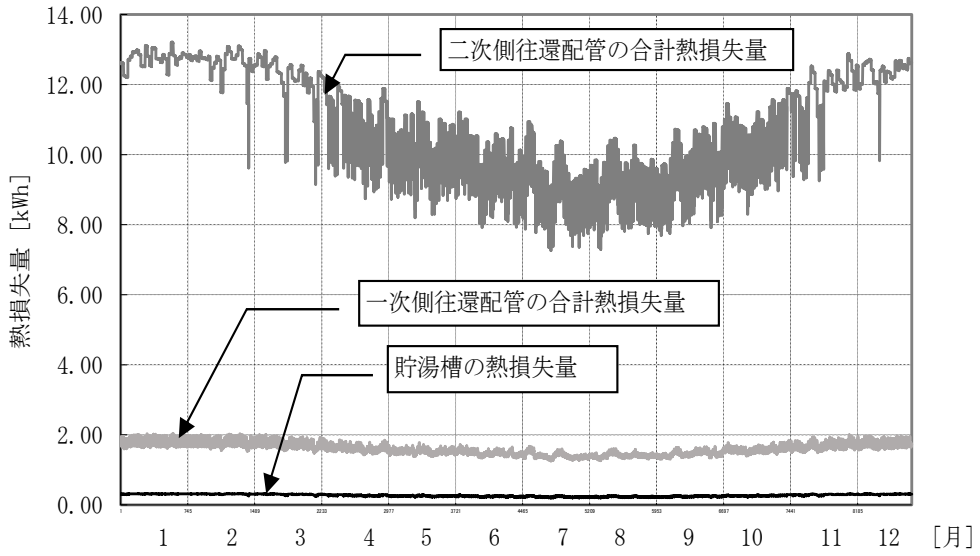


図 4-4-5 給湯配管・貯湯槽の熱損失量の年間変動

図 4-4-6 にエネルギー消費量の年間時刻変動を示す。加熱装置のガス消費量に比べ、一次・二次ポンプや加熱装置の電力消費量はごくわずかである。また夏期におけるガス消費量は冬期の約半分となっている。4 月～10 月までの間は加熱装置が ON/OFF 制御される時間が生じることが分かる。

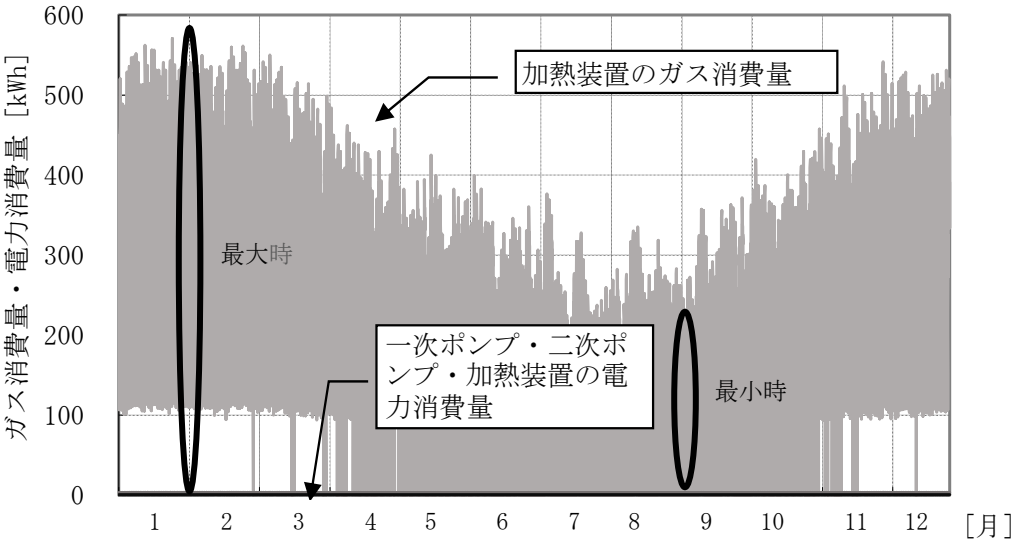


図 4-4-6 エネルギー消費量の年間変動

図 4-4-7 に給湯配管貯湯槽の熱損失、給湯負荷熱量の年間構成比率を示す。基準ケースにおける負荷構成は、給湯負荷熱量約 88%、二次側給湯配管の熱損失負荷が 10%、一次側給湯配管と貯湯槽の熱損失負荷が 2%となった。

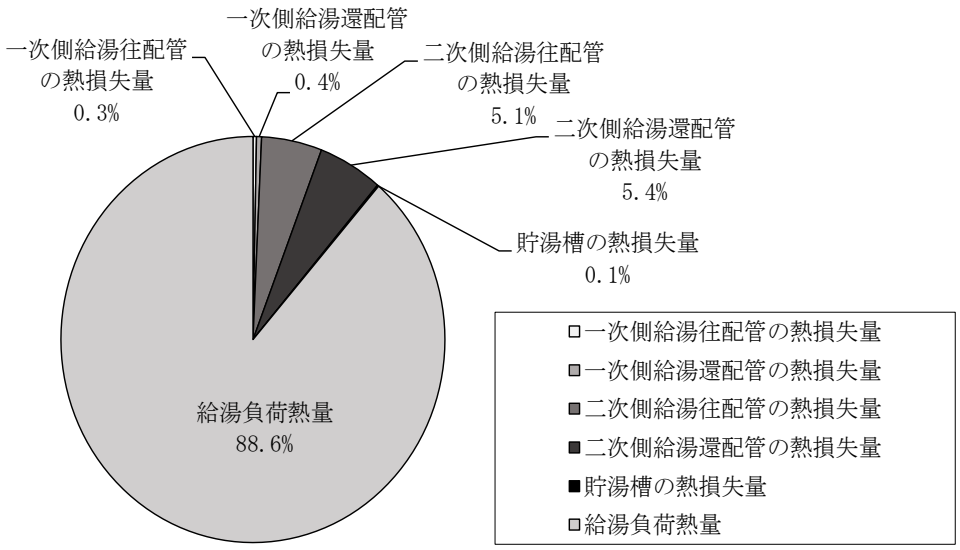


図 4-4-7 給湯配管と貯湯槽の熱損失、給湯負荷熱量の年間構成

図 4-4-8 にエネルギー消費量の年間構成比率を示す。基準ケースの加熱装置のガス消費量が 98%と大半を占め、加熱装置の電力消費量や循環ポンプの電力消費量は約 2%であった。このように年間熱損失や給湯負荷、年間エネルギー消費量の構成比率を把握することで、給湯システムに応じて省資源・省エネルギー対策の検討に寄与することが出来る。

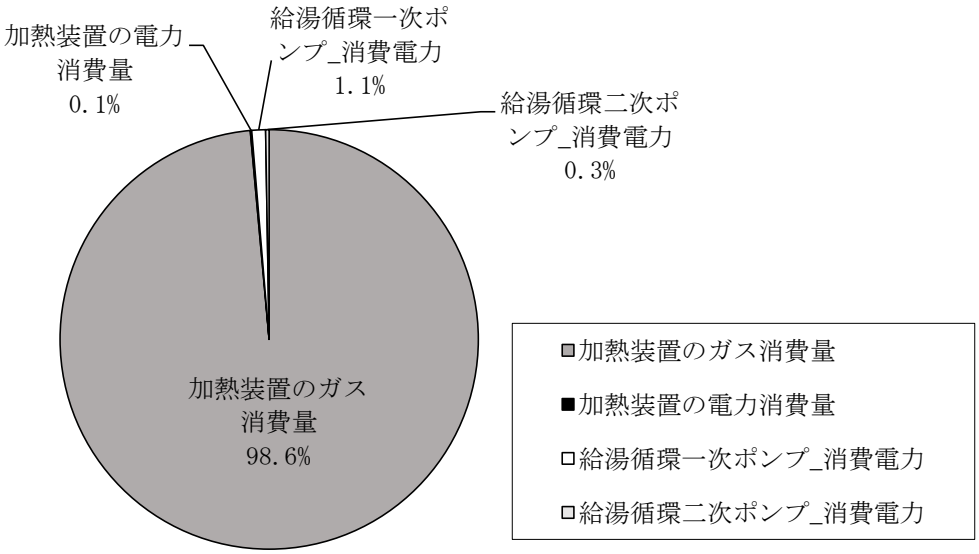


図 4-4-8 エネルギー消費量の年間構成比率

4-4-3 比較検討ケースの計算結果

給湯システムにおいて、省資源・省エネルギーの観点から効果の高い技術を検討するため、基準ケースに対して表 4-4-2 に示すケースのように設定条件を変更させ計算を行い、計算結果の比較を行った。基準ケースに対して、(1)節湯器具の採用、(2)地域別の検討、(3)保温仕様の検討、(4)加熱装置の効率の検討、(5)負荷パターンの変更、(6)給湯使用量の変更を行った。それぞれのケースにおいて給湯負荷熱量、熱損失負荷、給湯エネルギー消費量を算出した。図 4-4-9 に各比較検討ケースの計算結果を示す。

表 4-4-2 比較検討ケースの一覧

検討ケース	シミュレーション条件
基準ケース	
ケース01	表4-4-1の諸元に基づく条件
(1)節湯器具の採用	
ケース11	給湯使用量：客室系統10%減、共用部系統40%減
(2)地域別の検討	
ケース21～28	札幌、仙台、新潟、名古屋、大阪、福岡、鹿児島、高知における計算
(3)保温仕様の検討	
ケース31,32	保温仕様2、保温なし（裸管）での検討
(4)加熱装置の効率の変更	
ケース41	加熱装置の定格効率を1.0として検討
(5)負荷パターンの変更	
ケース51	夜間の給湯使用量がない負荷パターンに変更して検討
(6)給湯使用量の変更	
ケース61	給湯使用量を50%とした場合を検討

(1)節湯器具の採用

節湯器具の採用は基準ケースと比較して、節水型のシャワー器具を採用することで 10%の給湯使用量を削減、洗面器用途に自動給湯栓を採用することで 40%の給湯使用量が削減される。これにより給湯負荷熱量は約 14%削減、給湯エネルギー消費量は約 12%削減されたが、熱損失は基準ケースと変わらない。

(2)地域別の検討

代表 9 地点での地域別の計算を行ったケースである。基準ケース（東京）と比較して、給湯エネルギー消費量は札幌では約 20%増加し、鹿児島では約 12%減少した。

(3)保温仕様の検討

保温仕様[注)]の変更を行った場合の検討ケースである。基準ケース（保温仕様 1）と比較して、保温仕様 2 の場合には、配管と貯湯槽の合計熱損失が約 1.5 倍、給湯エネルギー消費量が約 5%増える。また保温なし(裸管)の場合には、配管と貯湯槽の合計熱損失が約 6 倍、給湯エネルギー消費量が約 1.5 倍にもなることが分かる。

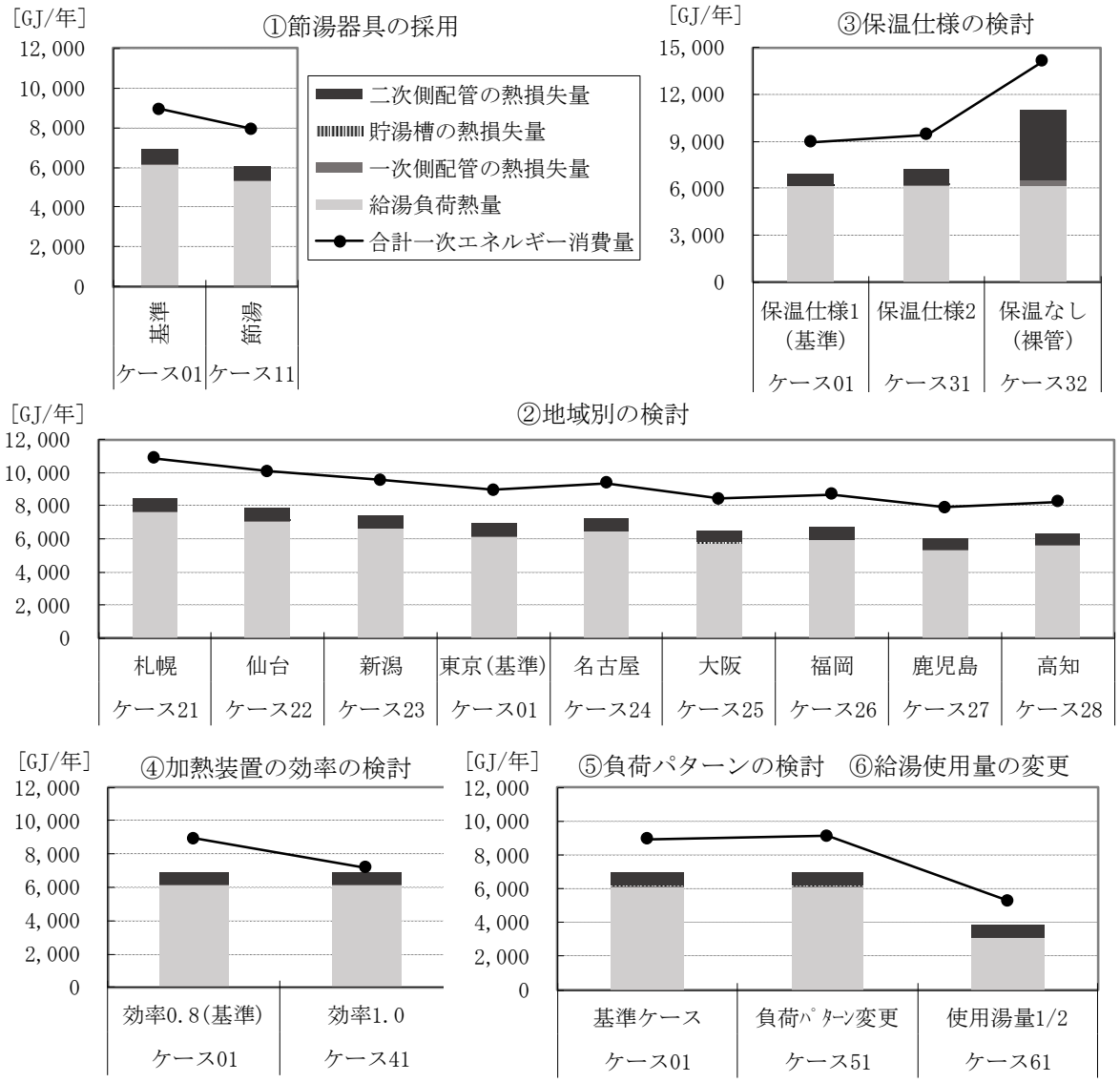


図 4-4-9 各比較検討ケースの計算結果

(4)加熱装置の効率の変更

加熱装置の定格効率（COP）を基準ケースの 0.8 から 1.0 に変えた場合には、基準ケースと比較して給湯エネルギー消費量は約 20%減となる。

(5)負荷パターンの変更

日給湯使用量は基準ケースのままとし、夜間の給湯使用量がない負荷パターンに変更して検討を行った。給湯負荷熱量の年間合計値は同じであるが、夜間に貯湯槽内の温度を設定温度に保つため、加熱装置の部分負荷運転が発生し、加熱装置の効率比が下がることにより、基準ケースと比較して給湯エネルギー消費量は 2%増加となった。

(6)給湯使用量の変更

基準ケースに対して給湯使用量が半分となった場合の試算を行った。給湯負荷熱量は50%減となるが、給湯配管と貯湯槽からの合計熱損失はほとんど変わらないことから、給湯エネルギー消費量は 40%減となった。つまり給湯負荷熱量が少なくなると相対的に熱損失の比率が増加するため、給湯配管系統の短縮化や保温の強化が重要であると言える。

以上の計算例により、本算定手法を用いることで給湯システムにおける、省資源と省エネルギー設計に適応した検討を行うことが出来ることを示した。

4-5 本章のまとめ

本章では、給湯使用量と時刻別負荷パターンから給湯負荷を算出するとともに、給湯配管と貯湯槽の熱損失、給湯機器の機器特性を考慮した給湯システムのエネルギー消費量を算出する実用的な算定手法の検討を行った。本章で示した内容を以下にまとめる。

1) 給湯システムシミュレーションの計算モデルを検討し、機器や配管をモジュールで構成し、モジュールごとに水量と水温を順次計算する計算手法を示した。
2) モジュールとなる給湯使用量、給湯負荷、給湯配管、貯湯槽、加熱装置、給湯循環ポンプの算定式の詳細を示し、各モジュールの接続関係と計算順序を示した。
3) 既往の研究から、時刻別計算に必要な用途別給湯使用量パターンを調査整理し、事務所、飲食、ホテル、学校の建物用途別データベースを整備した。
4) 加熱装置の機器特性を調査し、給湯ボイラー、連結型瞬間湯沸器、ヒートポンプ給湯機について、効率比との関係を示す機器特性データベースを整備した。
5) ホテル用途を例に、本算定手法を用いた省資源・省エネルギー設計への適応を検討した。
6) 冬期と夏期における給湯負荷、給湯配管・貯湯槽の熱損失と給湯エネルギー消費量の年間変動を示した。基準ケースの年間負荷構成は、給湯負荷熱量が 88%、貯湯槽、給湯配管の熱損失合計は 12%であった。
7) 給湯エネルギー消費量は、節湯器具の採用により 12%の削減、保温なしは 1.5 倍に増加、加熱装置の効率改善で 20%の削減となった。また、東京と比較して札幌では 20%の増加、鹿児島では 12%の減少となった。
8) 本算定により、給湯使用パターン、地域特性、加熱装置の効率と機器特性、保温仕様などのパラメータを変更することで、省エネルギー効果の比較検討を実用的に行えることを示した。

参考文献

4-1) 村川三郎、池田大輔、坂本和彦、高田宏 著：建築物の新給水給湯負荷算定法と実務設計、彰国社、2020.4 発行

4-2) 建築物の省エネルギー基準と計算の手引 新築・増改築の性能基準(PAL/CEC) （改定2版）、財団法人 建築環境・省エネルギー機構、(2010.9.1) 、pp.293-337

4-3) 建築物エネルギー消費性能基準等を定める省令の一部を改正する省令の規定による共同住宅のモデルを用いた簡易な評価方法の運用等について（技術的助言）、(2020.3.31) 、pp.4-5

4-4) 前真之、村上周三、大塚雅之、長谷川巌、武田成司、佐々木真人：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 37）：給湯プログラムの概要、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）、pp.1149-1152

4-5) 大塚雅之、村上周三、長谷川巌、前真之：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 55）：給湯プログラムの概要、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2009.9）、pp.703-706

4-6) 長谷川巌、村上周三、大塚雅之：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 74）：給湯プログラムによる省エネルギー検討、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2010.9）、pp.2575-2578

4-7) 長谷川巌、大塚雅之、村上周三：負荷変動を考慮した省エネルギー性能を算出する給湯システムシミュレーションツールの開発に関する研究―計算手法の開発と省資源・省エネルギー設計への適応―、空気調和・衛生工学会論文集（2022.9）、pp.23-32

4-8) 高田宏、村川三郎他：事務所ビルにおける給水・給湯負荷の予測、時系列的水使用行為解析に基づく給水・給湯負荷算定法に関する研究（第 3 報）、日本建築学会環境系論文集（2006.8）、pp.56

4-9) 高田宏、村川三郎他：飲食店舗における給湯負荷の解析、日本建築学会環境系論文集（2007.6）、pp.63

4-10) 高田宏、村川三郎他：学校給食施設におけるエネルギー消費特性の解析 その 3 給水・給湯負荷の解析（2003.3）、日本建築学会中国支部研究報告集 第 26 巻 、pp.571

4-11) 田中篤、村川三郎他：シティホテル客室における宿泊者の湯・水使用行為の解析、日本建築学会環境系論文集（2007.1）、pp.56

4-12) ボイラーの省エネルギーのためのノモグラフ集、社団法人 日本ボイラー協会、2021.4 閲覧 2008.12 発行

4-13) Development of Hot Water Supply System Simulation tool to Calculate Energy Conservation Performance in Consideration of Load Profile, CIB W062 47th international Symposium October 23-26, 2022 Taichung, Taiwan, pp.243-256

注）保温仕様：保温仕様１は、空気調和・衛生工学会「建築・設備の省エネルギー技術指針 p217 断熱強化の例」による。保温仕様 2 は、空気調和・衛生工学会規格 HASS010-2000　給湯管一般の場合による。

第５章 給水・給湯システムにおける本算定手法の適用例と評価

第３章で述べた給水システムの算定手法、第４章で述べた給湯システムの算定手法を踏まえ、省資源化、省エネルギー化に向けた検討として、雨水利用システム及び太陽熱・太陽光利用給湯システムを例とし、本算定手法の設計への適用性を述べる。既往の研究では給水・給湯設備単独でのシステム検討に留まっていたが、本算定手法では同じ計算体系に基づき、計算するモジュールを拡張することで、多様なシステムの計算と検討を行うことが出来ることを示す。

5-1 雨水利用システムを例とした水・エネルギー消費の算定

これまで雨水利用システムの計画・設計は、文献[5-1),5-2)]により、建設地における日別降水量データと雨水集水面積及び日使用水量を用い、雨水利用率や上水代替率から雨水貯留槽の容量算定を行ってきた。しかし実態を踏まえ、短時間での集中豪雨、建物特性の違いによる給水負荷特性、非常時の水の確保を考慮した貯留槽容量の設定や雨水の送水や上水補給水の適切な制御等を行うためには、計画・設計と運用段階で用いる各種データの時間間隔を短くし、雨水の利用先となる給水負荷変動を考慮した算出方法が必要となると考えられる。また、ゼロ・ウオーター・ビル（ZWB）の概念として、雨水は上水の代替資源の一つとして位置づけられている[5-3)]。このような背景から、給排水衛生設備の分野では、建設敷地内のオンサイトでの雨水利用の工夫が必要となり、ZWB の計画・設計のためにも、時刻別変動を考慮した算定手法が必要であると考える。

そこで、第２章で示した計算体系に基づき、拡張アメダス気象データを用いた時刻別降水量と第３章で示した時刻別給水負荷変動を用い、雨水貯留槽や受水槽内での水位変動と雨水利用率や上水代替率を算出する、実用的で各種検討に応用可能な雨水利用システムの算定手法を検討する。各モジュール単位で計算を行う算定手法を示した後に、雨水利用システムにおける省資源設計を目的とし、計算例とケーススタディー分析を行い、多様な活用の仕方の可能性を示す。

5-2 雨水利用システムシミュレーションの計算モデル

5-2-1 システム構成と計算モデル

本算定手法における計算モデルを図 5-2-1 に示す。加圧給水方式による上水・雑用水の２系統給水とし、雑用水を雨水で賄う一般的な雨水利用システムをモデルとしている。このうち同図に示す上水系統の給水システムのシミュレーションモデルは第３章で示したものと同じである。なおここでの検討は、計算モデルのうち雨水利用システムを含む雑用水系統のみを対象とした。図 5-2-2 は本算定手法のモジュール構成を示したものである。本算定手法ではシステムにおける各機器・水槽類をモジュール単位に細分化し、モジュールごとに計算された水量が、順次接続されているモジュールに受け渡され、計算時間間隔に応じた時刻別計算を行う手法となっている。

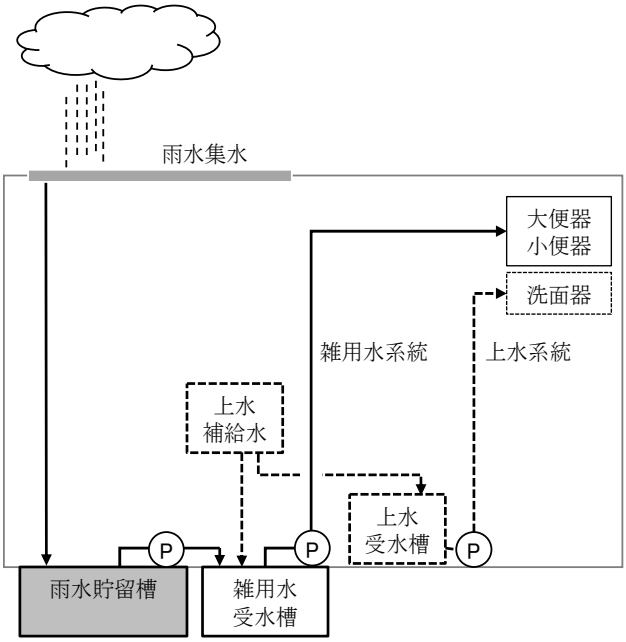


図 5-2-1 雨水利用システムの計算モデル

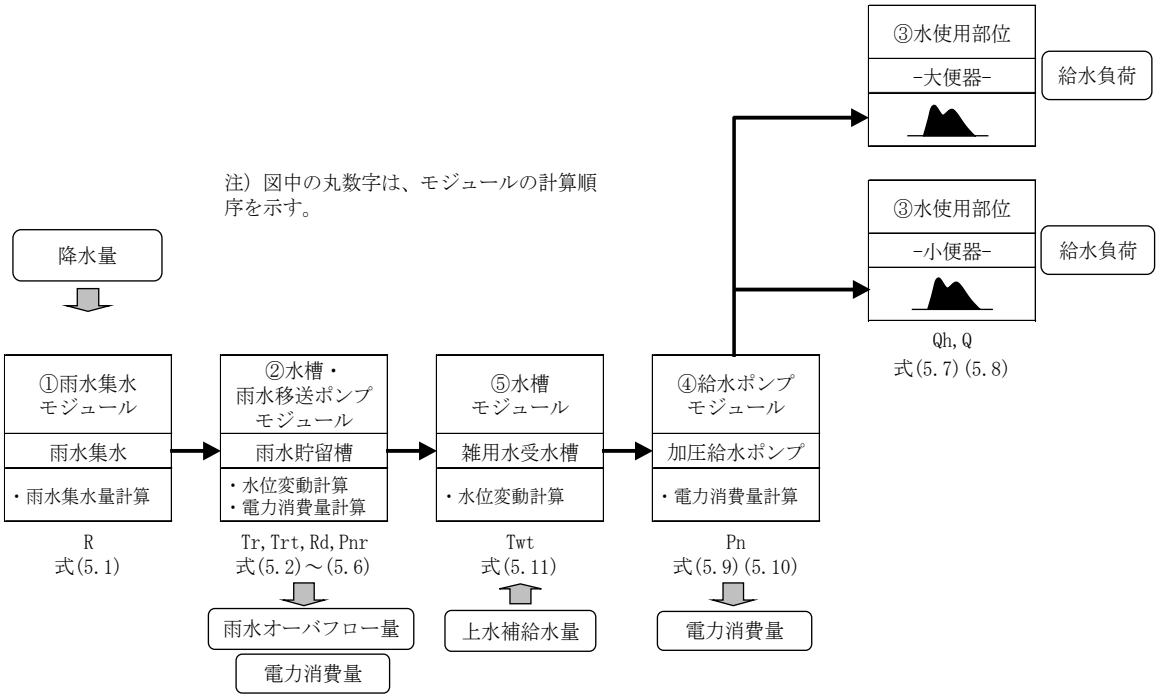


図 5-2-2 計算モデルのモジュール構成（加圧給水方式の場合）

5-2-2 計算順序と計算内容

加圧給水方式の場合の計算時間間隔における各モジュールの計算順序は、図 5-2-2 に示すモジュールの番号順で行われる。まず、気象データにおける降水量と雨水集水面積から雨水集水量を算定し、雨水は雨水貯留槽へ流入する。この時、雨水貯留槽が満水の場合にはあふれ、オーバーフローする。次に、同時刻における雑用水系統の水使用部位の給水負荷の合計値から、加圧給水ポンプによる供給水量が決定され、雑用水受水槽の水位が下がることで雨水貯留槽から雨水が送水される。雨水貯留槽に送水可能な雨水がない場合には、雑用水受水槽に上水が補給される。給水負荷は時刻別に変動し、それに伴い水槽類の水位変動とポンプの電力消費量が算出される。以上の計算を計算時間間隔ごとに繰り返して年間計算を実施し、集計値を用い、次項で示す雨水利用率と上水代替率を算出することができる。

5-2-3 各モジュールにおける計算

図 5-2-2 における各モジュールの算定式を説明する。

(1) 雨水集水量の計算

雨水集水を行う建築物の集水面積と時刻別降水量データから雨水集水量を算出する。式(5.1)に算定式を示す。本算定手法では拡張アメダス標準年気象データの降水量データを用いている。また雨水集水量は、集水面の建築計画に応じて、集水面積に有効面積率を乗じて算定する。

$$R = (Rf/1000) \times A \times \alpha \quad \cdots\cdots (5.1)$$

ここに、

R：雨水集水量 ［m^3］

Rf：計算時間間隔あたりの降水量 ［mm］

A：集水面積 ［m^2］

α：有効面積率 ［-］

(2) 雨水貯留槽の計算

計算時刻における雨水貯水量は、雨水貯留槽から雨水移送ポンプによって雑用水受水槽へ送水される水量と、雨水集水量を式(5.2)により水収支を算出し、雨水貯留槽に残った貯水量を算定する。雨水貯留槽容量を超える場合には、オーバーフロー水として排水される。

$$Tr = Trt' + R - (Qor/1000) \times (ct/60) \quad \cdots\cdots (5.2)$$

ここに、

a　Tr≦Trv（オーバーフローしない場合）

$$Trt = Tr \quad \cdots\cdots (5.3)$$

b　Tr＞Trv（オーバーフローする場合）

$$Trt = Trv \quad \cdots\cdots (5.4)$$

$$Rd = Tr - Trv \quad \cdots\cdots (5.5)$$

ここに、

Tr：計算時刻における雨水貯留槽の水収支量　［m^3］

Trt：計算時刻における雨水貯水量　［m^3］

Trt'：前計算時刻における雨水貯水量　［m^3］

Qor：雑用水受水槽へ送水される定格流量　［L/min］

Trv:雨水貯留槽容量　［m^3］

Rd:雨水貯留槽からのあふれ（オーバーフロー）量［m^3］

ct :計算時間間隔　［s］

また、雨水貯留槽から雑用水受水槽へ送水される雨水移送ポンプの電力消費量は、既報[5]より(5.6)式で算定する。

$$Pnr = Qor \times (Hor / 9.8) / (6120 \times \eta or) \quad \cdots\cdots (5.6)$$

ここに、

Pnr：雨水移送ポンプ軸動力　[kW]

Qor：雨水移送ポンプの定格流量　[L/min]

Hor：雨水移送ポンプ全揚程　[kPa]

ηor：雨水移送ポンプ最高効率[5]

$$\eta or = -0.0145(\log(Qor))^2 + 0.2682(\mathrm{Log}(Qor)) - 0.6018$$

(3) 給水負荷計算

雨水利用を行う雑用水給水系統の時刻別の給水負荷変動を算出する。給水系統毎に時刻別の給水負荷変動が既知の場合にはこの値をそのまま算定に用いるか、既報[5]で示したように、人員、衛生器具毎 1 回あたりの吐水量、衛生器具一人 1 日あたりの使用回数、時刻別の使用水量の 1 日あたりの比率を乗じた式(5.7)により算出する。衛生器具毎 1 回あたりの吐水量を変えることで節水による影響を考慮でき、また衛生器具一人 1 日あたりの使用回数と時刻別の使用水量の 1 日あたりの比率を建物特性に応じて変えることで、さまざまな建物用途に雨水利用システムを採用した際の給水負荷変動の計算が可能となる。

$$Qh = \Sigma (N \times Qe \times Nd \times Fh) \quad \cdots\cdots (5.7)$$

ここに、

Qh：雑用水系統の時刻別給水負荷　［L/h］

N：人員　［人］

Qe：衛生器具毎 1 回あたりの吐水量　［L/回］

Nd：衛生器具一人 1 日あたりの使用回数　［回/(人・日)］

Fh：時刻別の使用水量の 1 日あたりの比率（時刻別負荷パターン比率）　[-]

本算定手法では、データの精度に応じて計算時間間隔を変更可能であることを視野に入れており、式(5.8)に示す変換後以降は計算時間間隔あたりでの計算として算定方法を示す。

$$Q = Qh \times (ct / 3600) \quad \cdots\cdots (5.8)$$

ここに、

Q： 計算時間間隔あたりの雑用水給水負荷 ［L］

(4) 雑用水給水ポンプの計算

雑用水受水槽から各水使用部位へは、時刻別給水負荷変動によって雑用水給水量 Q が供給される。給水量に応じて、ポンプの電力消費量は、既報[5] より(5.9)式及び(5.10)式で算定する。

a 加圧給水ポンプ(吐出圧一定制御)の場合

$$Pn = qn \times (Ho / 9.8) / (6120 \times \eta o \times \eta n) \quad \cdots\cdots (5.9)$$

ここに、

Pn：ポンプ軸動力 [kW]

qn：給水負荷流量(= Qh/60) [L/min]

Qo：ポンプの定格流量 [L/min]

Ho：ポンプ全揚程 [kPa]

ηo：ポンプ最高効率[5] [-]

$\eta o = -0.0145(\log(Qo))^2 + 0.2682(\mathrm{Log}(Qo)) - 0.6018$

ηn：ポンプ効率比[5]

$\eta n = -1.02073\,(qn/Qo)^2 + 1.99581\,(qn/Qo) + 0.0369718$

b 加圧給水ポンプ(推定末端圧制御)の場合

$$Pn = qn \times ((qn/Qo)^2 \times (Ho - Hn)/9.8 + Hn/9.8) / (6120 \times \eta o \times \eta n) \quad \cdots\cdots (5.10)$$

ここに、

Hn：給水量 qn における実揚程 [kPa]

(5) 雑用水受水槽の計算

計算時刻における雑用水貯水量は、雑用水受水槽から雑用水給水ポンプによって各水使用部位に給水される水量と、雨水移送ポンプにより送水される雨水量により水収支によりより(5.10)式にて算出する。この時、雨水量が不足する場合には、雑用水受水槽に上水が補給される。

$$Twt = Twt' + ((Qor + Qcw)/1000) \times (ct/60) - Q \quad \cdots\cdots (5.11)$$

ここに、

Twt：計算時刻における雑用水貯水量 ［m^3］

Twt'：前計算時刻における雑用水貯水量 ［m^3］

Qcw：上水補給水量 ［L/min］

Twv:雑用水受水槽容量　　［m^3］

なお水位設定によって、Twt ≦ Twv として受水槽容量を超えないように水位制御される。

図 5-2-3 に雑用水受水槽への補給水水位制御の概念図を示す。上水補給水開始水位(Won)、上水補給水停止水位(Woff)、雨水送水ポンプ運転水位(Ron)、雨水送水ポンプ停止水位(Roff)の４段階で水位制御を行う設定としている。雨水利用率を高めるために上水補給水の開始・停止水位を可能な限り低くし、雨水ポンプの運転範囲を広げることで、雑用水受水槽へ雨水が入りやすいように制御を行う。一方、降水量が少なく上水補給水位を低く設定した場合には、雑用水受水槽容量に対して貯水量が少ない状態となるため、急激な負荷変動に対して給水量が不足しないような留意が必要となる。

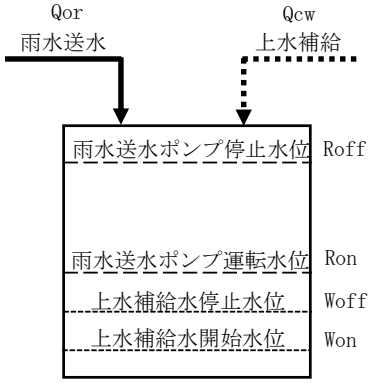


図 5-2-3 雑用水受水槽への補給水水位制御の概念図

5-2-4 雨水利用率、上水代替率の算定

雨水利用システムの評価を行うため、5-1-3 に示したモジュール計算を時刻別に行い年間計算を実施する。その結果を集計し式(5.12)で示す雨水利用率、及び式(5.13)で示す上水代替率を算出する。

$$Ur = ((\Sigma R - \Sigma Rd) / \Sigma R) \times 100 \quad \cdots\cdots (5.12)$$

ここに、

Ur：雨水利用率　　［%］

ΣR-ΣRd：年間雨水利用量　　［m^3］

ΣR：年間雨水集水量　　［m^3］

$$Ucw = ((\Sigma R - \Sigma Rd) / (\Sigma Q / 1000)) \times 100 \quad \cdots\cdots (5.13)$$

ここに、

Ucw：上水代替率　　［%］

ΣQ：年間雑用水給水量　　［L］

雨水利用率は、集水雨水のうちどの位の割合で雨水を利用するかという指標であり、概ね 90%～95%程度の場合における雨水貯留槽容量の設定が経済的としている。

上水代替率は、雑用水利用量のうち雨水利用量の割合を示す指標であり、節水等により雑用水利用量が下がれば、相対的に比率が大きくなる。

5-3 計算例と既往の雨水利用システム設計方法との比較

5-3-1 計算条件

本算定手法による、基本となる計算例の計算条件を表 5-3-1 に示す。表 3-2-3 で示した建物規模 10,000[㎡]、在館人員が男子 490[人]、女子 210[人]の事務所ビルを対象とし、ケース 1 の一般器具パターンと、ケース 2 の節水器具パターンの 2 種類を検討した。時刻別給水負荷パターン比率と衛生器具使用回数は、表 3-2-2 で示した調査結果を用い、平日と休日（土日）の 2 種類を用いた。雨水利用システムの諸元としては、地域を東京とし、雨水利用率 90～95%程度を目安とした場合の雨水貯留槽容量は一般に文献 [5-1] P66 より、集水面積に対する雨水貯留槽容量の比率が 0.1 となることから、雨水集水面積を 1,000[㎡]と設定し、雨水貯留槽容量を 100[m^3]とした。雑用水受水槽容量は、平日の雑用水日使用水量が 14.9[m^3/日]より、この約 1/2 の 8[m^3]と設定した。なお、計算時間間隔は 10 分とし、雑用水受水槽への雨水補給優先制御による設定水位とした。

ここで、雨水貯留槽容量の決定プロセスについて考察をする。図 5-3-1 は雨水貯留槽 V／集水面積 A と雨水利用率 Ur 及びその変化率の関係を示し、東京の降水量データにおいて雑用水給水量 Q／雨水集水面積 A= 0.015 の場合の線図を示したものである。雨水利用率の変化率を見ると、本ケースでは V/A の値が 0.1 で変化が緩慢となり、これ以上雨水貯留槽容量を大きくしても、雨水利用率の増加率は少なくなることがわかる。よって、雨水貯留槽の築造費用など経済的な観点も含め、V/A の比率が 0.1 で雨水貯留槽容量が決定され、このときの雨水利用率は 96.5%となった。一方で、ごく稀な例ではあるが、雨水集水面積 A に対して雑用水給水量 Q が極端に少ない場合には、集水した雨水が使い切れず上水代替率 Ucw が 100%を超える。この場合は、上水代替率の線図が優先され、上水代替率が 100%を超えた時点での V/A を読み取りし、雨水貯留槽容量Ｖを決定する。

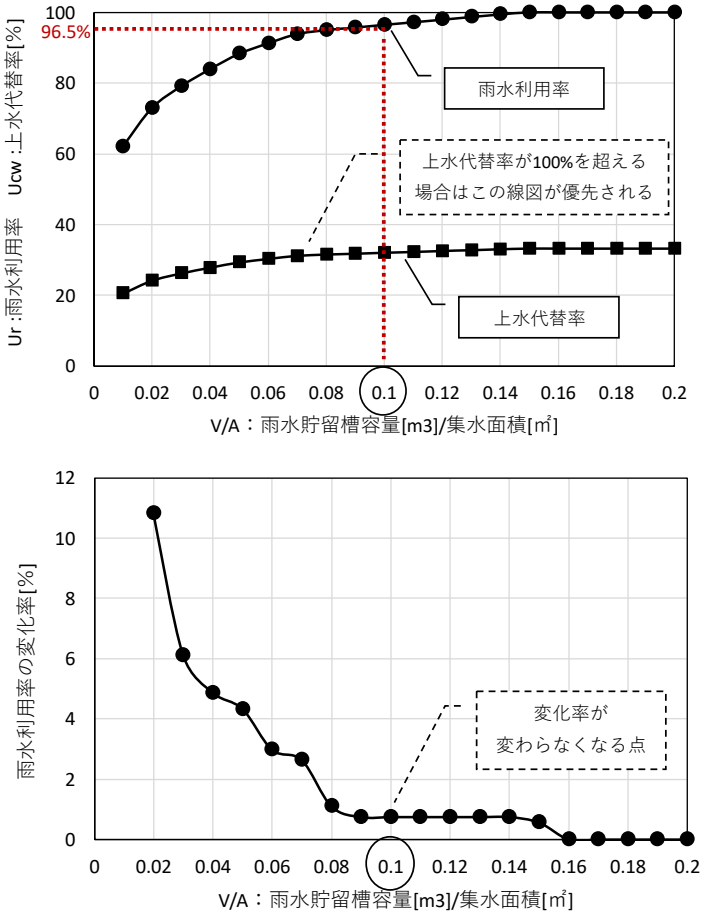


図 5-3-1 雨水貯留槽/集水面積と雨水利用率の関係(東京)

Q(雑用水給水量）/A（雨水集水面積）=0.015 の場合

5-3-2 計算結果（年間値、年間電力消費量）

ケース１の計算結果として、各モジュールで算出される、降水量、雨水貯留槽貯水量、雨水あふれ流量、受水槽への雨水送水及び上水補給水流量、雑用水給水負荷、受水槽貯水量の年間時刻別変動を図 5-3-2 に示す。図 5-3-2(b)より 10 月に雨水貯留槽からオーバーフローが発生しているが、他の月は集水した雨水を貯留することができ、無駄なく受水槽へ送水ができていることがわかる。本計算例では、雑用水給水負荷は、平日・休日において同じ時刻別変動が繰り返される設定としているが、年間変動がある場合も計算が可能である。受水槽の水位制御によって、雨水が不足する場合には上水が補給され、降水量がない場合でも最低限の水位制御ができていることがわかる。

表 5-3-1 計算例の計算条件

	設定項目	ケース１ 一般器具パターン		ケース２ 節水器具パターン
雑用水 給水負荷	建物規模・用途	10,000［㎡］・事務所ビル		
	人員[人]	在館人員 700（男子：490 、女子：210 ）		
	衛生器具使用回数[注1)]	男子大便器	男子小便器	女子大便器
	平日[回/(人・日)]	0.943	2.326	4.862
	休日[回/(人・日)]	0.748	2.068	4.353
	休日出勤率[%][注2)]	20%	20%	10%
	衛生器具吐水量[L/回]	男子・女子大便器：8.5[注3)]，男子小便器：2		男子・女子大便器：6.5[注3)]，男子小便器：1.5
	日使用水量[m^3/日]	14.9		11.3
雨水利用 給水システム諸元	地域	東京		
	雨水集水面積[㎡]	1,000		
	雨水集水有効面積率	0.9		
	雨水貯留槽	貯留槽容量：100[m^3]　雨水移送ポンプ　：100[L/min]×300［kPa］		
	雑用水受水槽[m^3]	受水槽容量：8　（上水補給開始水量0.8 ，停止水量1.6　，雨水補給開始水量2.4，停止水量7.2）		
	給水方式	加圧給水方式　ポンプ仕様 100[L/min]×全揚程500[kPa]（実揚程400[kPa]）（推定末端圧制御）		

注1）表3-2-2による実測調査に基づく平均使用回数
注2）休日は在館人員に出勤率を乗じて算出
注3）JIS A 5207-2019におけるⅠ形及びⅡ形の大便器の洗浄水量を参照した。

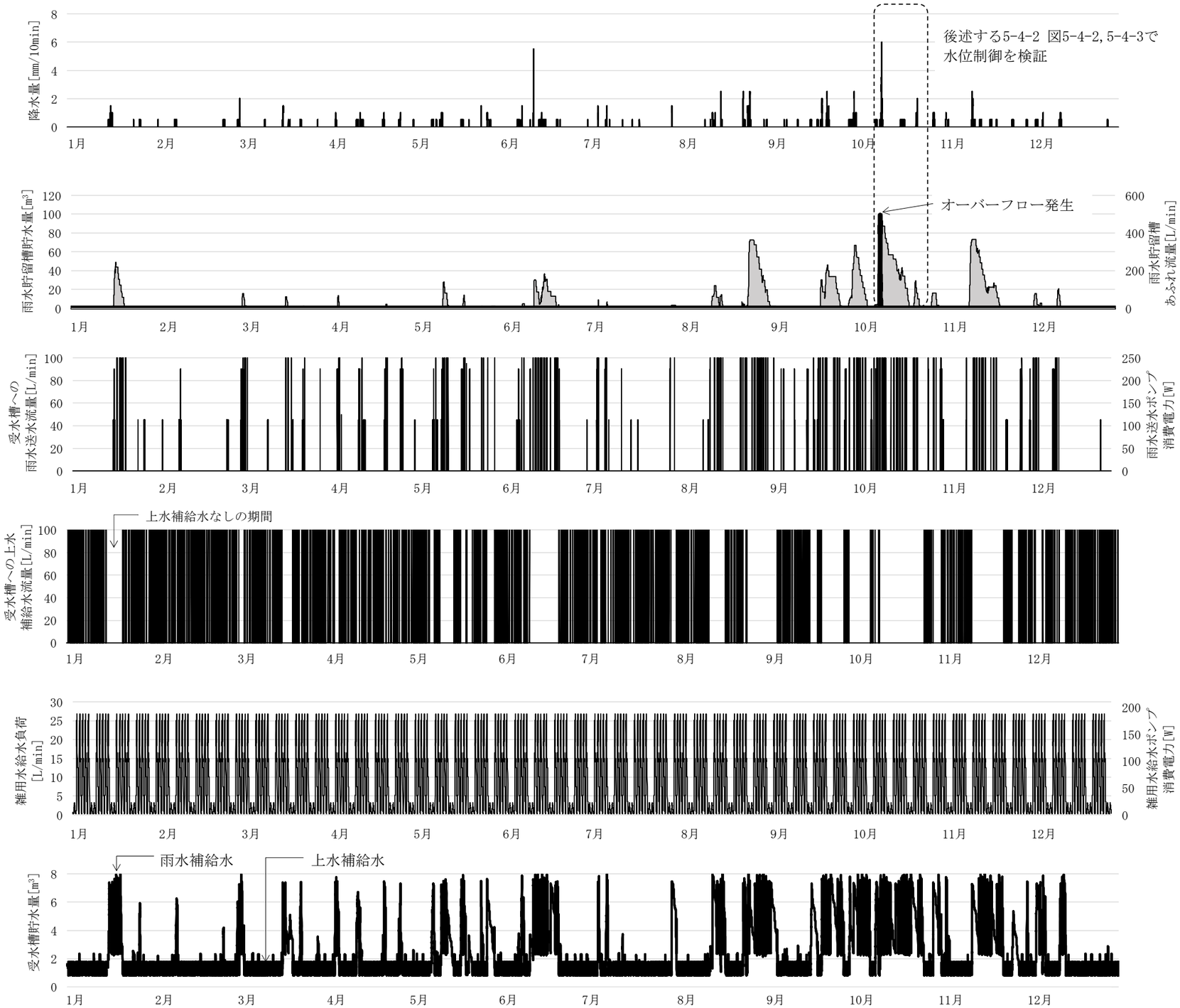


図 5-3-2 本算定手法における各モジュールで算出される年間時刻別の各水量・流量の計算結果（ケース１の場合）

表 5-3-2 にケース１とケース２の年間計算結果を示す。節水化を図ることで、年間使用水量は 965[m³](約 24%)の削減となり、雨水あふれ量は 18[m³]増加したが、雨水利用率はいずれのケースにおいても 95%以上と高い値であり、節水化による雨水利用率の減少はわずか 1.4%であった。一方、上水代替率は年間使用水量が削減されたことで、ケース１の 31.9%から 41.3%と約 10%上昇し、節水化による上水代替率の改善効果が大きいことがわかる。

また雨水利用システムを導入した際のエネルギー消費量について分析を行うと、雨水移送ポンプによりケース１では年間 324kWh の消費電力が増加した。雨水移送ポンプの消費電力の比率は、雑用水給水ポンプの消費電力を含めたシステム全体の 5.6%にあたる。同様にケース 2 では 6%となった。一方、雨水移送ポンプと雑用水給水ポンプの合計消費電力は、ケース 2 はケース 1 の 92%となり、節水化により 8%程度の削減効果となる。このことから、雨水利用システムを導入した場合の消費電力の増加分は、節水化により相殺出来ることがわかる。

表 5-3-2 計算結果の年間集計

設定項目	ケース１ 一般器具パターン	ケース２ 節水器具パターン
年間使用水量[m³/年]	4,060	3,095 (24%)
年間降水量[mm/年]	1,494	
年間雨水集水量[m³/年]	1,345	
年間雨水有効利用量[m³/年]	1,296	1,278
年間雨水あふれ量[m³/年]	49	67
雨水利用率[%]	96.4	95.0 (1.4%)
上水代替率[%]	31.9	41.3 〈10%〉
雨水送水ポンプ消費電力[kWh/年]	324	319 (8%)
雑用水給水ポンプ消費電力[kWh/年]	5,426	4,965

注) (　　) 内は削減率、　〈　　〉内は上昇率を示す。

5-3-3 既往の計算方法との比較

図 5-3-3 と表 5-3-3 に既往の計算方法との比較を行った結果を示す。雨水利用システムの計画と設計における既往の方法は、既往文献[5-1) 5-2)]に示すとおり日降水量、日使用水量を用いて算定している。計算条件は表 5-3-1 のケース１の場合とし、雨水貯留槽容量を 10～200[m³]まで変えた場合の雨水利用率、上水代替率、雨水あふれ量について、本算定手法で計算時間間隔を 10 分間隔とした場合と日量計算で行った場合の比較を行った。雨水利用率が 90～95%以上の場合には、雨水利用率、上水代替率の差は計算時間間隔によらずほとんど変わらないが、集水面積に対して貯留槽容量が小さい 10[m³]のときにそれぞれ 1.5%、0.5%の差となり、雨水あふれ量は 20[m³/年]の差が生じた。既往の計算方法は、雨水利用率から雨水貯留槽容量を算定する概略計算方法であるが、本算定手法では、計算時

間間隔を短くして計算を行うことで、水位変動計算において計算精度が変わり、短時間の降水量や急激な給水負荷変動に対応した雨水利用システムシミュレーションを行うことができる。

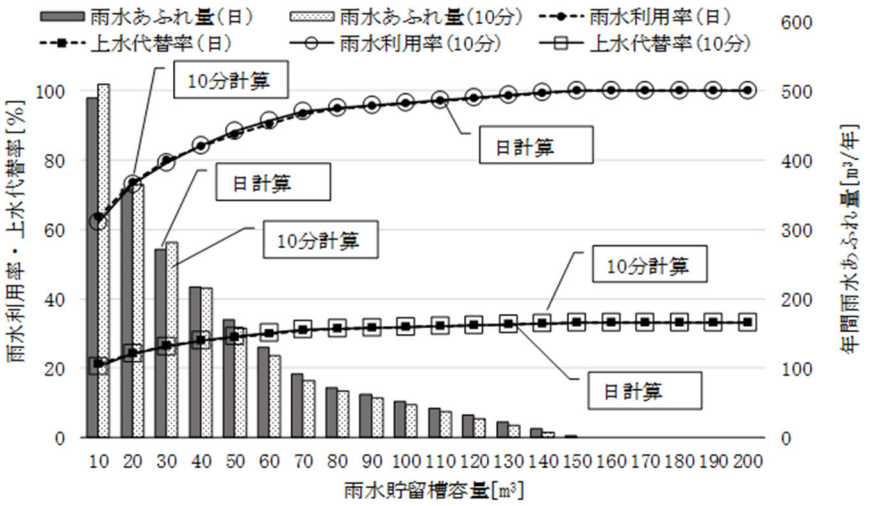


図 5-3-3 計算時間間隔の違いによる比較

表 5-3-3 計算時間間隔による比較検討結果のまとめ

雨水貯留槽容量[m³]		10	50	100	150	200
雨水利用率[%]	日計算	63.6	87.3	96.1	99.8	100
	10分計算	62.1	88.3	96.5	100	100
上水代替率[%]	日計算	21.1	28.9	31.8	33.1	33.1
	10分計算	20.6	29.2	32.0	33.1	33.1
雨水あふれ量[m³/年]	日計算	489	170	53	3	0
	10分計算	509	158	48	0	0

図 5-3-4 に本研究と既往研究の算定法における計算時間間隔の妥当性を整理する。既往研究では雨水利用率、上水代替率と雨水貯留槽容量の算定が目的であるため、日降水量と日給水量から算出しているが、本研究では雨水利用率、上水代替率の計算を始め、システムで消費される水・エネルギー量や水位制御まで行うため時刻別降水量と給水量からの算出が必要となると言える。

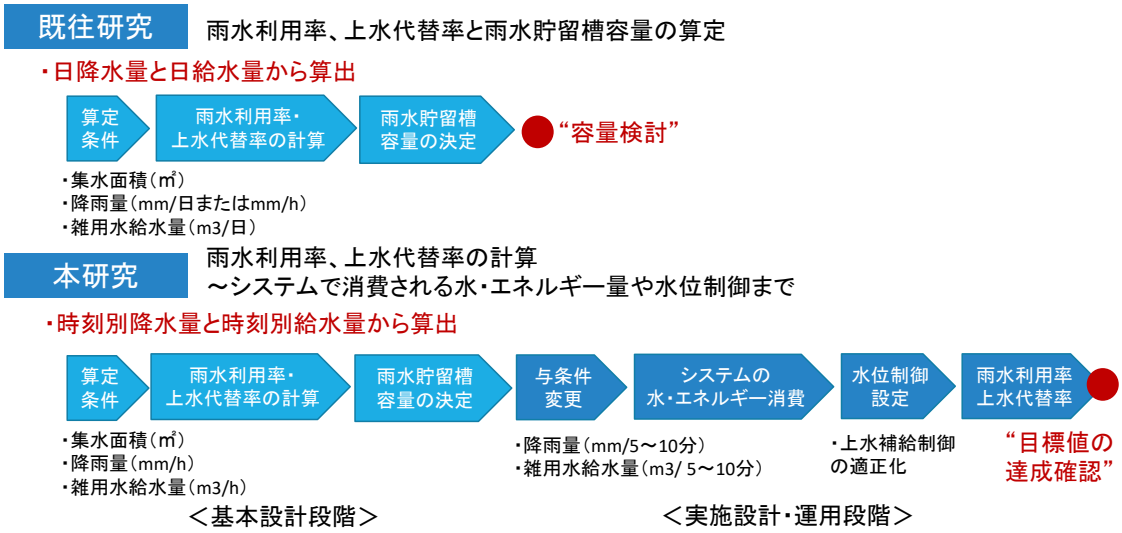


図 5-3-4 本研究と既往研究の算定法における計算時間間隔の妥当性

5-3-4 降水量気象データに関する考察

本研究では、拡張アメダス気象データ 2010 年版標準年を用いて算定を行っているが、2001 年～2010 年の実在年拡張アメダス気象データの平均値、最小値、最大値と比較したものを図 5-3-5 に示す。年間降水量は多くの都市で標準年の方が少ない傾向であった。よって、標準年における雨水集水量の算定では、過少に計算されると言えるが、このことにより雨水貯留槽容量の設定が小さくなると、オーバーフローし雨水利用率の低下につながる可能性がある。そこで、仙台、東京、那覇において、標準年と 2001 年~2010 年の間の年間降水量の平均値に最も近い実在年の降水量データの違いによる、雨水利用率、上水代替率への影響を分析したものを表 5-3-4 に示す。結果、仙台、東京では、年間降水量が多くなってもオーバーフローへの影響はなく、雨水利用率、上水代替率はともに上がった。一方、那覇では、上水代替率は上がるが、オーバーフローが増えることで雨水利用率が低下した。雨水利用率や上水代替率に影響するのは、短時間でまとまって降水が生じることでオーバーフローが発生するため、年間降水量以上に時間最大降水量と日最大降水量に影響することが予想される。表 5-3-5 は各都市において 2001 年～2010 年の間で、時間最大降水量と日最大降水量が発生した年を示したものである。ほとんどの都市で年が一致するが、雨水集水後は、雨水貯留槽容量があるため、オーバーフロー量に影響するのは、時間最大降水量よりも日最大降水量が多い時となる。

以上より今後の課題として、時刻別降雨量とその継続時間を考慮した場合の評価として、オーバーフロー量を極力少なくするための雨水貯留槽容量の設定は、実在年気象データにおいて日最大降水量が発生する年で計算を行うことと言える。

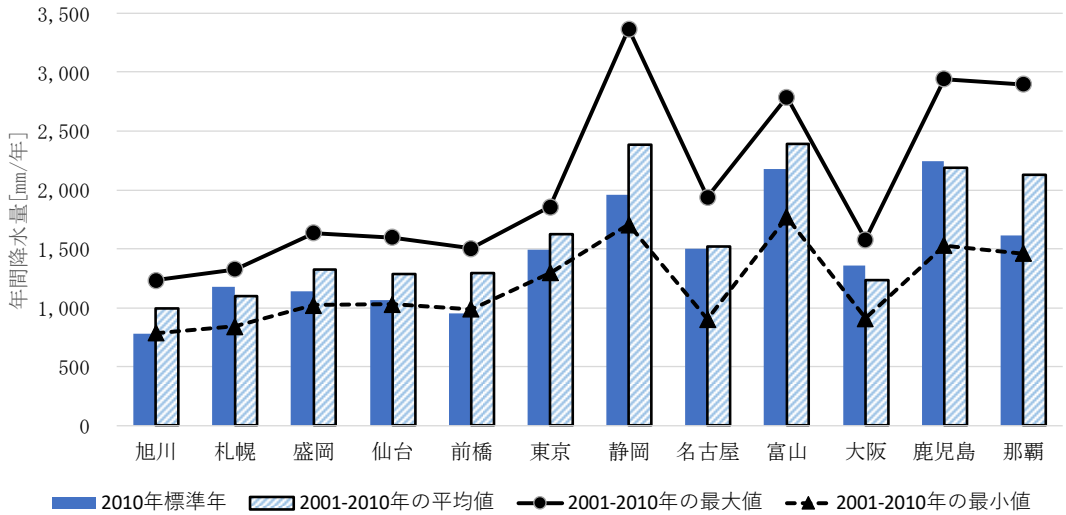


図 5-3-5 各都市における標準年と実在年気象データの年間降水量の比較
（2001 年~2010 年）

表 5-3-4 標準年と平均値に近い実在年における各数値の分析

	標準年2010年版			実在年平均年		
				2003年	2010年	2006年
	仙台	東京	那覇	仙台	東京	那覇
雨水利用率[%]	99	96	93	100	98	89
上水代替率[%]	24	32	33	28	36	42
オーバーフロー[m3/年]	0	53	108	0	37	199
集水量の差[m3/年]	―	―	―	190	167	432

表 5-3-5 時間最大降水量と日最大降水量が発生した年の比較（2001 年~2010 年）

	旭川	札幌	盛岡	仙台	前橋	東京	静岡	名古屋	富山	大阪	鹿児島	那覇
日最大降水量	91	101	198	128	139	223	368	136	113	155	231	427
発生年	2006年	2001年	2007年	2010年	2002年	2004年	2004年	2004年	2008年	2004年	2007年	2007年
時間最大降水量	37	30	36	42	69	69	111	67	50	38	71	75
発生年	2006年	2010年	2004年	2010年	2002年	2004年	2003年	2009年	2004年	2004年	2007年	2007年

5-3-5 年間計算における助走期間の考察

本研究における算定では、助走期間なしで雨水貯留槽が空の状態で 1 月 1 日から計算を開始している。そこで助走期間の有無による算定結果への影響について考察する。計算条件として、12 月最後の 1 週間を対象に、12/25～12/28 の降水量と雑用水給水量（節水器具の場合）の収支を算定した上で、12/29～12/31 は休日扱いとし雑用水給水量なしとし

て、雨水貯留槽に残る雨水残水量を算定した。この雨水残水量を助走計算の初期値として１月１日から計算する雨水貯留槽の水量に加算した。図 5-3-6 は 12/25～12/31 における各都市の 2001 年~2010 年の実在年降水量データによる、雨水残水量の平均値を示したものである。各都市とも 12 月の降水量は少なく、雨水貯留槽 100m³ に対して、雨水残水量は富山の 40 m³ を除いて概ね 20 m³ 以下となった。次にこの雨水残水量による、雨水利用率と上水代替率について助走計算ありとなしで比較したものを図 5-3-7 に示す。結果、助走計算の有無による差は、富山で助走計算ありの場合で雨水利用率が 3%上昇したのみで、他の都市で影響は無かった。よって本算定手法では、助走計算なしとして評価を行う。

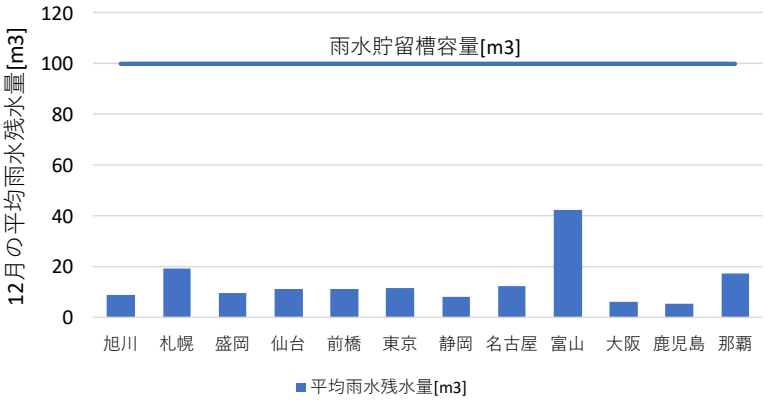


図 5-3-6 各都市における雨水残水量の平均値（12/25～12/31）

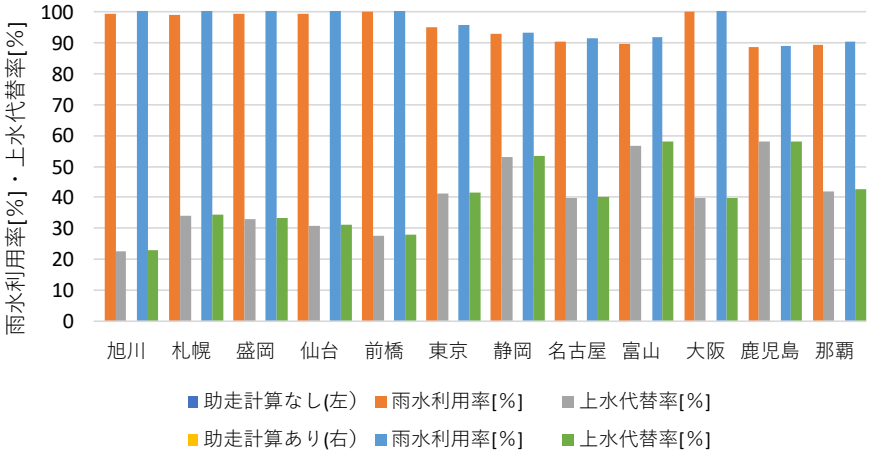


図 5-3-7 各都市における助走計算有無による雨水利用率と上水代替率の比較

5-4 雨水利用システムのケーススタディー分析

本算定手法の特徴を示すため、短い計算時間間隔で時刻別計算を実施した場合でのケーススタディー分析を行った。計算時間間隔はいずれも 10 分で実施した。

5-4-1 節水による効果分析

計算条件は表 5-4-1 に示したとおりとし、雨水貯留槽容量を 10～200[m³]まで変えた場合の雨水利用率、上水代替率、雨水あふれ量について、ケース 1 の一般器具の場合とケース 2 の節水器具の場合で比較を行った。計算結果を図 5-4-1 と表 5-4-1 に示す。一般器具に対して節水器具の場合の雨水利用率は最大で 2.7%小さくなり、雨水あふれ量は最大で 36[m³/年]増える結果となった。上水代替率は、雨水貯留槽が大きくなるほど良くなり、貯留槽容量が 10[m³]の場合には 5.2%、貯留槽容量が 200[m³]の場合には 10.3%の差が生じた。これより、雨水集水量（集水面積）が同じであれば、節水器具を導入した際には一般器具の場合よりも雨水貯留槽の大きさに留意し、計画上、建築物の地下ピット利用などコストをかけずに貯留槽容量を大きくする工夫を行うことで、雨水利用率や上水代替率の値を上げることができると考えられる。

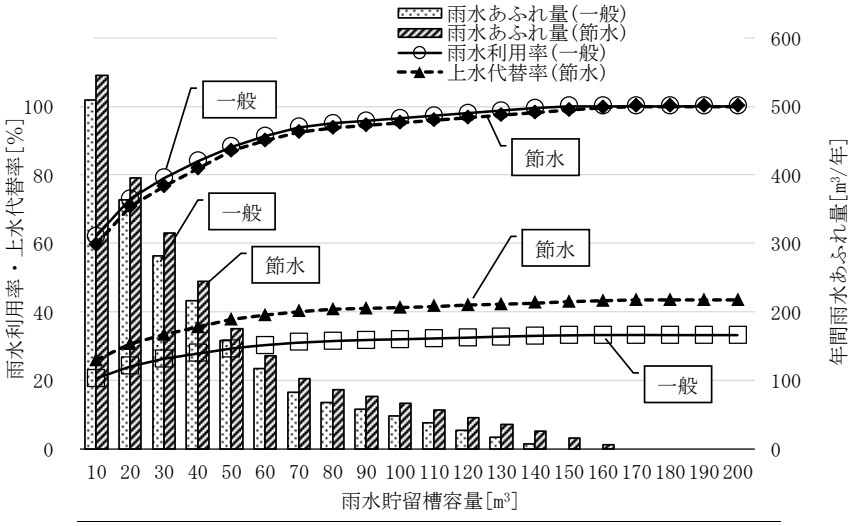


図 5-4-1 一般器具と節水器具の比較

表 5-4-1 一般器具と節水器具による比較検討結果のまとめ

雨水貯留槽容量[m³]		10	50	100	150	200
雨水利用率[%]	一般	62.1	88.3	96.5	100	100
	節水	59.4	87.0	95.1	98.8	100
上水代替率[%]	一般	20.6	29.2	32.0	33.1	33.1
	節水	25.8	37.8	41.3	42.9	43.4
雨水あふれ量[m³/年]	一般	509	158	48	0	0
	節水	545	175	66	16	0

5-4-2 水位制御による影響分析

図 5-4-2 と図 5-4-3 に東京で最も集中的に降水量があった図 5-3-1 中の 10/7～10/13 の 1 週間における、雑用水受水槽での上水と雨水補給水量、水位制御と貯水量、雨水貯留槽での雨水集水量、雨水あふれ量、雨水貯留量の変動を、表 5-4-2 に計算結果のまとめを示す。なお、10/7 と 10/8 は土日で休日の給水負荷を、10/9～10/13 は平日の給水負荷を発生させている。図 5-4-2 では BCP 時の水の確保を考慮し、常に満水に近い状態とする上水補給優先制御とし、上水補給水を受水槽容量の 10%（0.8m^3）で開始し、80%（6.4m^3）で停止、雨水補給水を受水槽容量の 85%（6.8m^3）で開始し、90%（7.2m^3）で停止する制御とした。図 5-4-3 では雨水利用を優先する雨水補給優先制御とし、上水補給水を受水槽容量の 10%（0.8m^3）で開始し、20%（1.6m^3）で停止、雨水補給水を受水槽容量の 30%（2.4m^3）で開始し、90%（7.2m^3）で停止する制御とした。図 5-4-2 より上水補給優先制御では、雨水補給が可能な容量が狭まれているため、短い時間間隔で補給が繰り返されており、この間に雨水貯留槽が満水となると雨水あふれ量が発生することがわかる。一方、図 5-4-3 の雨水補給優先制御では、雨水補給可能な容量範囲が広いため、発停間隔が長くなるとともに雨水補給水量が増えた結果、雨水あふれ量と上水補給水量が低減された。表 5-4-2 より、雨水補給優先制御の場合は上水補給優先制御と比べ、計算期間中での雨水利用率が 1.4%、上水代替率が 3.1%上昇し、雨水あふれ量が 4.4[m^3]削減された。これより、今まで雨水利用システムを導入しても、実運用上の実態を予測することが出来なかったが、給水負荷の状況に応じて雑用水受水槽への補給水の設定水位を調整するなど、本算定手法によりシミュレーションすることで、雨水利用率、上水代替率、雨水あふれ量の改善につながることが示された。

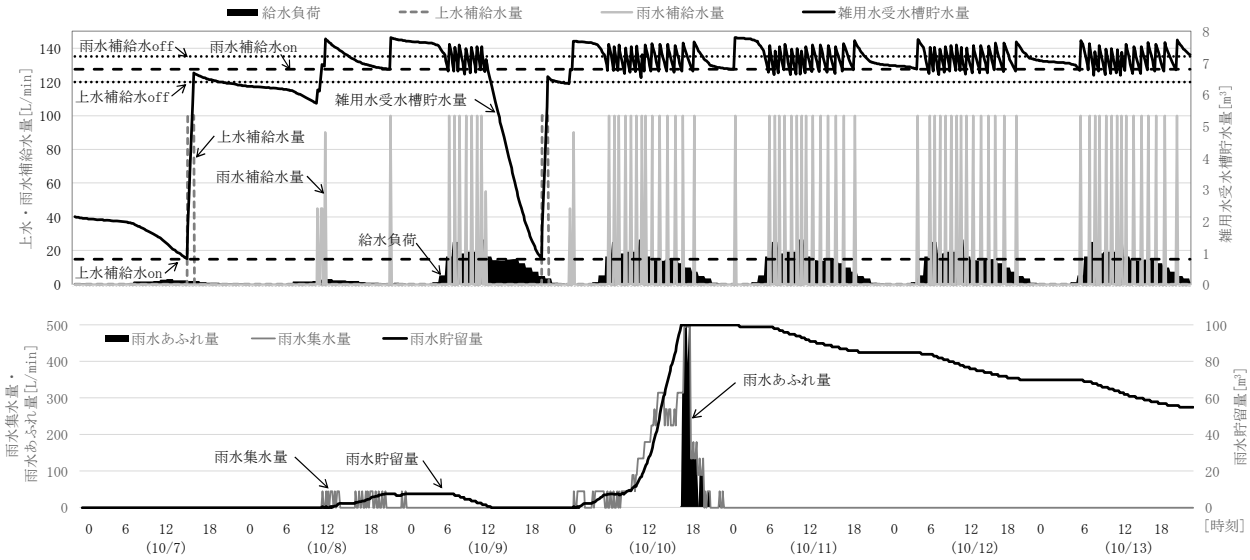


図 5-4-2 雑用水受水槽（上段）と雨水貯留槽（下段）における水位制御
（上水補給優先制御）

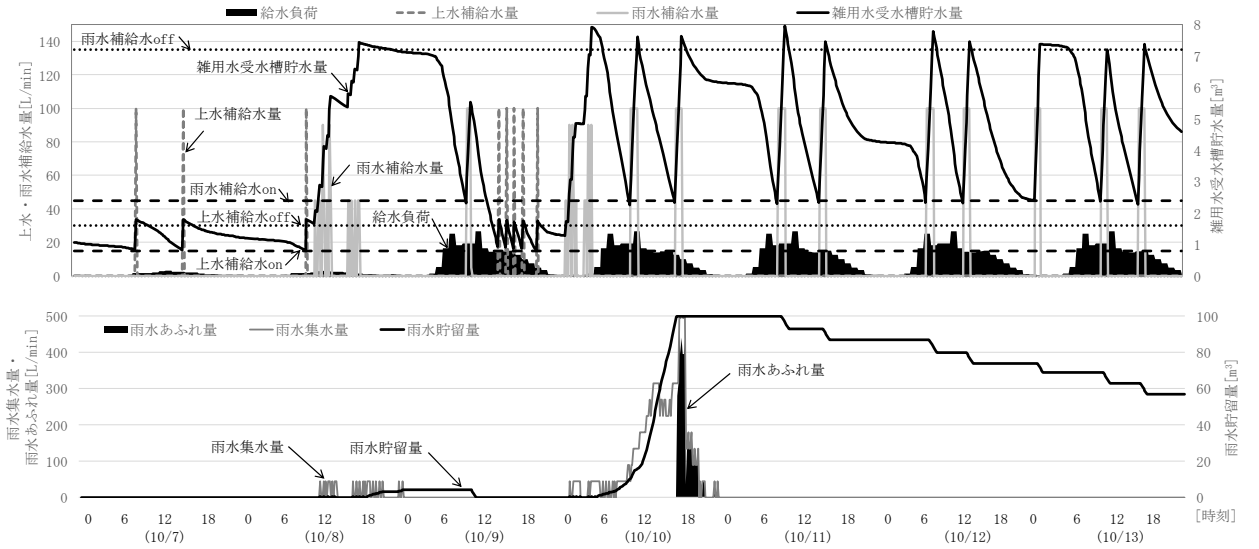


図 5-4-3 雑用水受水槽（上段）と雨水貯留槽（下段）における水位制御
（雨水補給優先制御）

表 5-4-2 補給水制御の検討結果のまとめ

評価項目	上水補給優先制御 （図 5-4-2）	雨水補給優先制御 （図 5-4-3）
雨水利用率[%]	39.7	41.1
上水代替率[%]	91.2	94.3
雨水あふれ量[m³]	52.9	48.5

5-4-3 地域別降水量による影響分析

図 5-4-4 に国内主要 12 都市における雨水利用の比較検討をしたものを示す。計算条件は表 5-4-1 のケース 2（節水器具のパターン）の場合とし、地域は各都市における拡張アメダス標準年気象データ（2010 版）の降水量データを用いた。計算結果より、年間降水量が増加することにより上水代替率が大きくなる傾向にある一方で、年間降水量が約 1,300[mm/年]までは雨水利用率は 100[%]となるが、それ以上の場合には、降水量によらず雨水利用率が低下し、88～95[%]とばらつきが生じていることがわかる。

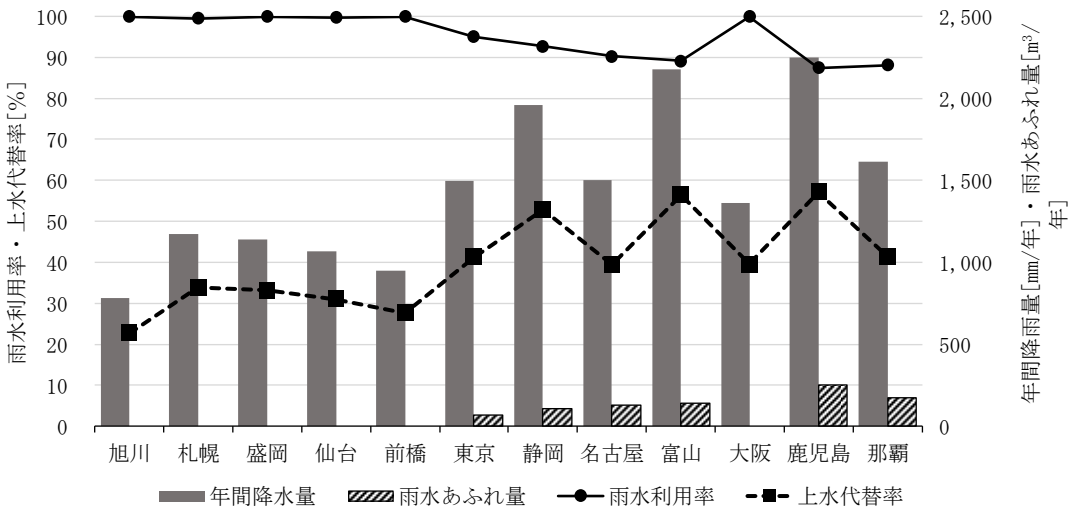


図 5-4-4 国内 12 都市における雨水利用の比較検討

図 5-4-5 に年間降水量と上水代替率の相関を示す。同じ集水面積の雨水利用システムと給水負荷において、各都市の上水代替率を比較すると、降水量に比例して最も低い旭川の 22.7[%]から最も高い鹿児島の 57.2[%]で 2.5 倍の差となった。

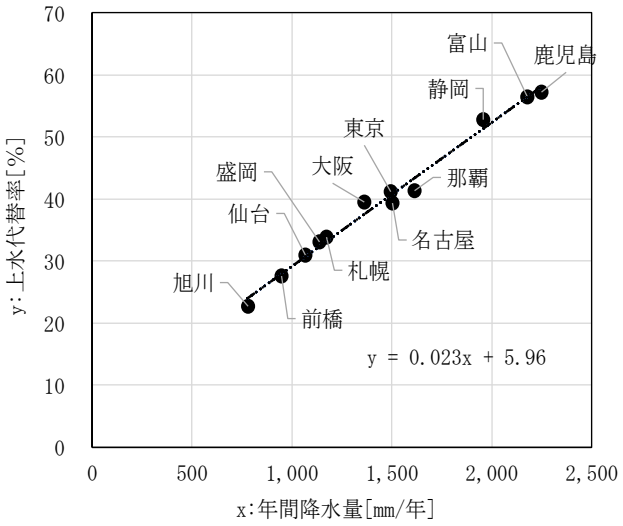


図 5-4-5 各都市における年間降水量と上水代替率

図 5-4-6 に年間降水量と雨水利用率の相関を示す。同じ降水量であっても名古屋、那覇、鹿児島で雨水利用率が低くなったためその原因を分析する。雨水利用率は、雨水貯留槽からの雨水あふれ量が多いほど低くなるため、あふれ量が増える要因を時刻別の降水量データから分析した。

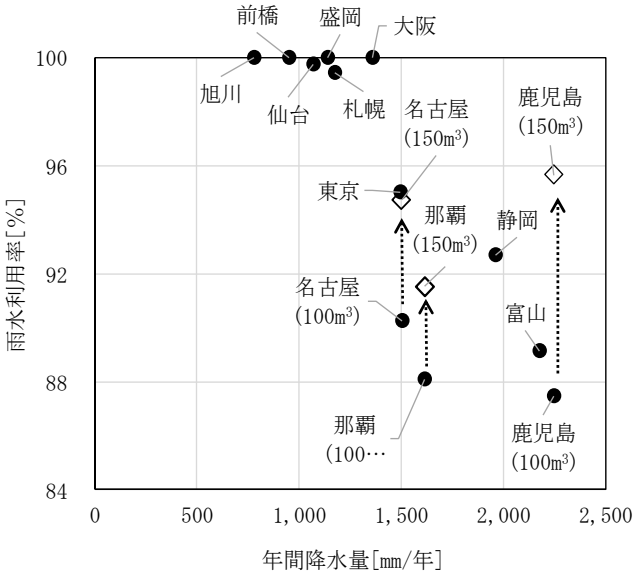


図 5-4-6 各都市における年間降水量と雨水利用率

年間降水量が多い6都市における10分間降水量の発生時間数を大きい順に並べたものを図5-4-7に、各都市における1日の間で1mm以上の降水量が生じた場合の年間降水日数を表5-4-3に示す。これらより、鹿児島と名古屋は静岡、東京、富山と比べ10分間降水量が多く、時間をかけて雨水貯留槽に貯まらずに流出してしまうことがわかる。さらに、名古屋は降水日数が少なく、短期間でまとまった降水量があると言える。那覇は、東京と名古屋と年間降水量が近いデータとなっており、東京と名古屋と比べ降水日数は長いが、雨季に4～5[mm/10min]のまとまった降水があり、この時にあふれが生じ、雨水利用率が低下する原因となっている。これらの対策のため、鹿児島、名古屋、那覇において、雨水貯留槽を100m³から150m³と大きくしたところ、あふれ量が減ることにより、雨水利用率は3～8%上昇し改善が見込められた。以上の分析より、雨水利用率向上の観点から、年間降水量が約1,300[mm/年]以上で、特に年間降水日数が短く、短時間でまとまった降水がある地域では雨水貯留槽の容量を増やすことが効果的であることがわかった。

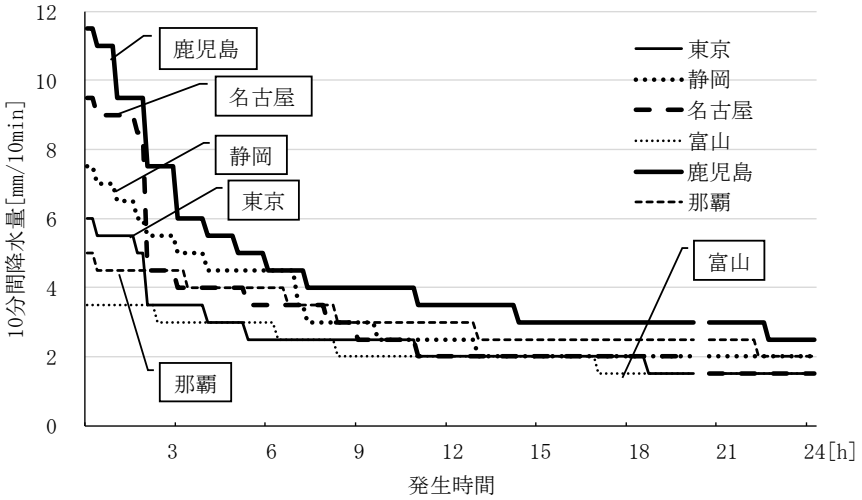


図5-4-7 各都市における10分間降水量の降順グラフ

表5-4-3 各都市にける年間降水日数

地点	東京	静岡	名古屋	富山	鹿児島	那覇
降水日数[日]	106	122	99	172	131	127

5-4-4 雨水集水面積による影響分析

ZWB（ゼロ・ウオーター・ビル）の概念では、敷地内に降った降水を敷地内で浸透させれば、還元水として扱われ ZWB に寄与するが、自家消費による雨水利活用を促すためには上水代替率を向上させる必要がある。図 5-4-8 は、節水器具を採用した場合の雑用水給水負荷で、雨水集水面積を 1,000 ㎡から 5,000 ㎡まで拡張させた場合の仙台、東京、鹿児島における雨水利用率と上水代替率の変化を示したものである。なお、このとき雨水集水面積の拡張と同時に、雨水貯留槽の容量は集水面積 1,000 ㎡の場合は 100m³、2,000 ㎡の場合は 200m³ と大きくした。図より東京では集水面積 5,000 ㎡で 96.2%、鹿児島では 3,000 ㎡で 98.3% となり上水代替率が 100%に近い値となるが、仙台では集水面積の拡張によらず 80%が限度となった。いずれも敷地面積が広くないと現実的な集水面積とならない。このときの雨水利用率はいずれも 60%以下となり、屋根面や雨水貯留槽からあふれた 40%以上の降水を敷地内で浸透もしくは一時貯留が必要となる。次に各地域共通で、図 5-4-8 中の丸印で示す雨水利用率、上水代替率が共に 80%程度の時の雨水集水面積を読み取ると、鹿児島では 1,600 ㎡、東京では 2,300 ㎡、仙台では 3,200 ㎡となり、雨水の自己消費により上水を賄え、敷地内へのあふれ量も低減出来る。さらに、5-4-1 の節水による効果、5-4-3 で示した雨水貯留槽容量の増量、5-4-2 の水位制御による調整により、雨水利用率、上水代替率を共に 100% に近い値に出来る可能性があることが示された。

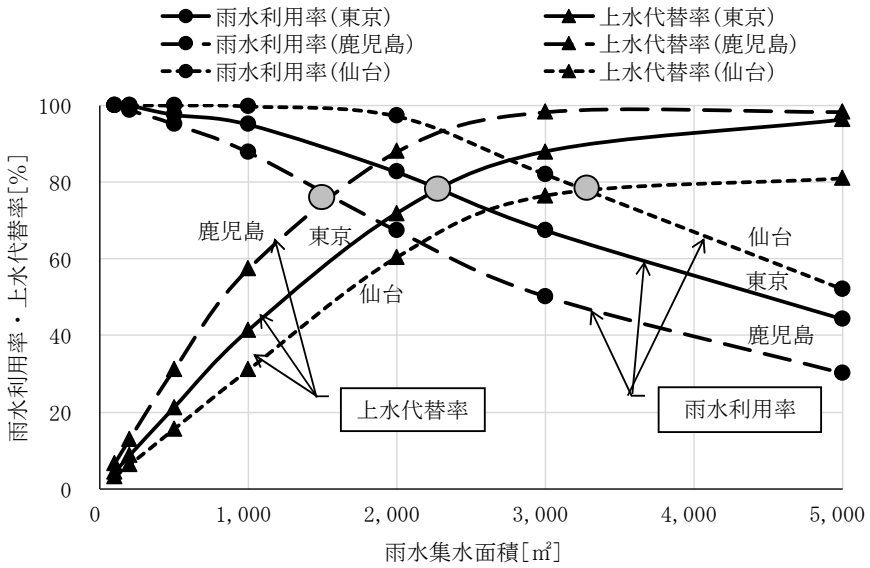


図 5-4-8 雨水集水面積と雨水利用率・上水代替率の関係

5-5 太陽熱・太陽光利用給湯システムを例とした水・エネルギー消費の算定

建築物省エネ法における現在の ZEB 化検討は、エネルギー消費と再エネ可能エネルギーの年間収支で計算されているが、今後再エネ市場が拡大し、火力発電等による調整用電力に負担がかからないようにするためには、「同時・同量」で需要と供給をバランスさせることが重要となり、需要側の建築設備システムにおける対応が必要となると考える。

そこで、標準的な宿泊施設の年間一次エネルギー消費量のうち 21%のエネルギー消費量を占める給湯システム [5-7]に着目し、太陽熱利用や太陽光発電により昼間に生じるエネルギー供給に対して、特に夜間に需要が生じる宿泊施設を例として、第 4 章で述べた給湯システムの算定手法を適用し、太陽熱・太陽光を利用した給湯システムにおける給湯エネルギー消費量の ZEB 化検討において、需要と供給が同時・同量でバランスするシステムを検討しその効果を分析した。このとき、節湯器具の採用に伴う、給湯使用量の削減による給湯エネルギー消費量への影響を同時に検討する。

5-6 太陽熱利用給湯システムの計算モデル

5-6-1 システム構成と計算モデル

図 5-6-1 に本算定手法における、太陽熱利用給湯のシステムのモデルとモジュール構成を示す。太陽熱集熱器、太陽熱集熱ポンプ、熱交換器プレート、予熱槽、予熱槽循環ポンプで構成される。次に、各モジュールでの算定式を説明する。

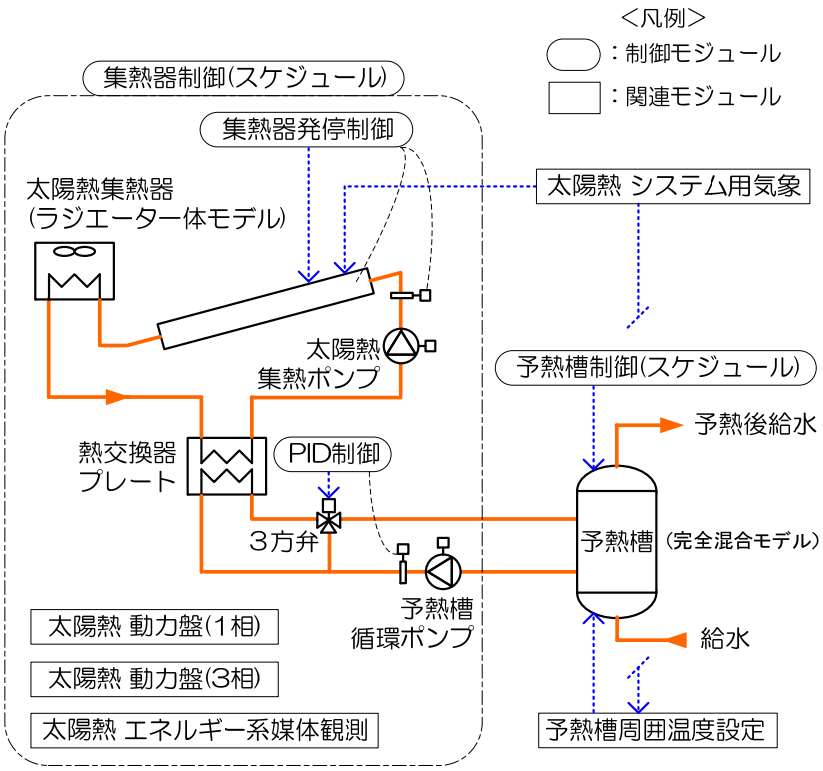


図 5-6-1 太陽熱利用給湯システムのモデルとモジュール構成

(1) 太陽熱集熱器の計算

集熱器モデルの計算条件は、①入口水温及び入口水量、②気象条件（日射量及び外気温度）、③集熱器発停制御による On-Off 信号、④集熱器の仕様（集熱器特性値、集熱面積、傾斜角度、方位）の計 4 項目であり、集熱量を以下の式から算定する。

$$Tcm = \tau \times Hr + Tout \quad \cdots\cdots (5.14)$$

$$Hs = Asc \times Cr \times Qhs \times (Tcm - Ts_in) \quad \cdots\cdots (5.15)$$

$$Ts_out = Ts_in + Hs / (Cr \times Qhs) \quad \cdots\cdots (5.16)$$

$$\eta = Hs / (As \times Hr) \quad \cdots\cdots (5.17)$$

ここに、

Hs：集熱量	［W］
Hr：集熱器の放射熱取得	［W］
τ ：集熱器の仕様で決まる係数	［1 / W］
As：集熱面積	［m^2］
Asc：集熱面積を用いた係数	［-］
Cr：熱媒比熱（1.163）	［W/(L・℃)］
Qhs：集熱系統の循環量	［L］
Tcm：集熱器の相当外気温度	［℃］
Ts_in：入口温度	［℃］
Ts_out：出口温度	［℃］
η ：集熱効率	［-］

また、集熱器水温が 100℃を超える場合には、ラジエータがあると仮定して電力消費量を加算し、集熱器出口温度は 100℃とする。

(2) 予熱槽と集熱ポンプの計算

予熱槽は完全混合水槽とした計算モデルとし、集熱ポンプは集熱器の相当外気温度と集熱器の入口温度の差を用いて発停を行う制御とする。

5-6-2 太陽熱集熱パネルの効率特性

本算定手法では、設計で一般的に採用される集熱器の種類として、平板集熱器と真空ガラス管型集熱器の効率特性を用いている。参考文献[5-8] を引用し、平板集熱器と真空ガラス管型集熱器の集熱効率 η と日射量あたりの温度差 X との関係を整理したもの[5-9]を図 5-6-2 に、それぞれの関係式を以下に示す。

平板集熱器の場合

$$\eta = 0.83 - 5.3X \quad \cdots\cdots (5.18)$$

真空ガラス管型集熱器の場合

$$\eta = 0.92 - 2.45X \cdots\cdots (5.19)$$

ここに、

$$X = (Tcm - Tout) / (Hr / As) \qquad [K \cdot m^2 / W]$$

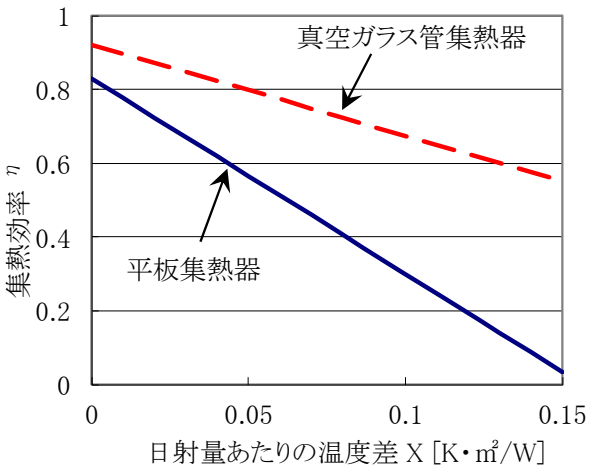


図 5-6-2 太陽熱利用給湯システムの集熱器の効率特性

5-7 太陽熱利用給湯システムのケーススタディー分析

本算定手法を用いて、太陽熱利用給湯システムを導入した場合の一次エネルギー削減効果の傾向について、集熱面積、予熱槽容量、集熱タイプ、地域性の観点から比較を行った。

5-7-1 検討対象建物と給湯設備諸元

表 5-7-1 に検討対象建物と給湯設備の諸元を示す。客室数 44 室の宿泊特化型のビジネスホテルを対象とし、中央式給湯方式を採用した建物を対象とした。

表 5-7-1 検討対象建物と給湯システムの概要

建物用途	宿泊施設
地域	東京
規模	延床面積 1,830㎡、44室、収容人員 86人
給湯原単位	165L/人・日
加熱能力	130kW
貯湯槽容量	3m³
給湯配管	二次側： 170m、25A、保温仕様２、 屋外と室内の中間で設置、バルブ・フランジの保温有
	一次側： 20m、40A、保温仕様２、 屋外と室内の中間で設置、バルブ・フランジの保温有

5-7-2 検討ケース

表 5-7-2 に検討ケースの一覧を示す。地域区分は札幌、東京、那覇の 3 地点とし、基準ケースは節湯なし、加熱装置の定格効率（COP）が 0.8 である省エネ基準の仕様とした。ケース 1 で加熱装置の効率を上げ、ケース 2 ではさらに節湯を行った場合とした。この他給湯配管の保温強化等の省エネ対策が考えられるが、抜本的な取り組みとしては限界がある。そこで図 5-7-1 に示す太陽熱利用を組み入れた給湯システムについて検討を行った。集熱タイプは文献 2)で調査した性能特性を持つ平板集熱器と真空ガラス管集熱器とし、集熱面積と予熱槽の容量を変えた場合（ケース 3~7）について試算を行った。

表 5-7-2 検討ケースの一覧（太陽熱利用給湯システム）

<table>
<tr><td>ケースNo</td><td>基準</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr>
<tr><td>地域区分</td><td colspan="8">札幌／東京／那覇</td></tr>
<tr><td>節湯</td><td colspan="2">なし</td><td colspan="6">あり</td></tr>
<tr><td>加熱装置効率</td><td>0.8</td><td colspan="7">1.0</td></tr>
<tr><td>太陽熱集熱有無</td><td colspan="3">太陽熱集熱なし</td><td colspan="5">太陽熱集熱あり</td></tr>
<tr><td>太陽熱集熱タイプ</td><td colspan="8">平板集熱器／真空ガラス管集熱器</td></tr>
<tr><td>集熱器方位角</td><td colspan="3">－</td><td colspan="5">南面</td></tr>
<tr><td>集熱器傾斜角</td><td colspan="3">－</td><td colspan="5">札幌：45°／東京：35°／那覇：25°</td></tr>
<tr><td>集熱面積</td><td colspan="3">－</td><td>50㎡</td><td>100㎡</td><td>150㎡</td><td>200㎡</td><td>250㎡</td></tr>
<tr><td>予熱槽容量</td><td colspan="3">－</td><td>2/20/30m^3</td><td>4/20/30m^3</td><td>6/20/30m^3</td><td>8/20/30m^3</td><td>10/20/30m^3</td></tr>
</table>

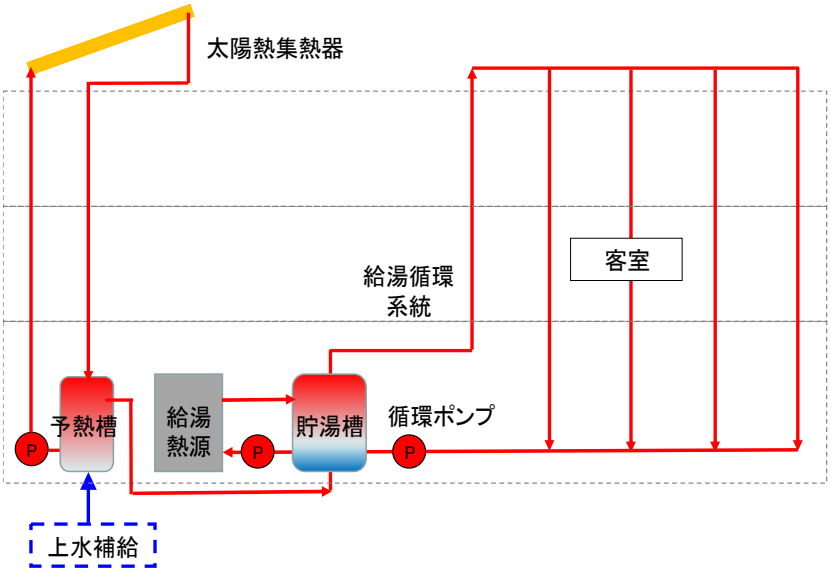


図 5-7-1 太陽熱利用給湯システムの検討モデル

5-7-3 算定結果

本算定手法における太陽熱利用給湯システムは、予熱槽に補給された水を太陽熱集熱器で集熱した温水と熱交換して昇温する計算を行っている。図 5-7-2 は東京において真空ガラス管集熱器で予熱槽 20m³（ケース 5）と太陽熱給湯なしの場合の比較として、年間時刻別計算のうち外気温度が最も低い日を含む 1 月 1 日から 1 月 7 日の 1 週間の計算結果を示したものである。給湯使用量の時刻負荷変動は毎日同じとし、夜間にも給湯負荷があることから 2 次側給湯循環ポンプは常に運転している状態で計算を行った。太陽熱利用なしの場合には補給水温度が 10℃以下で加熱装置への入口温度が 30~35℃程度となるが、太陽熱利用ありで日射が十分にある場合には加熱装置への入口温度が約 55℃となり加熱負荷がほとんど生じなくなることが分かる。また計算期間の 6 日目には日射が少なく集熱量が低かったため、予熱槽内の温度が 40℃程度まで降下し、加熱負荷が生じている。

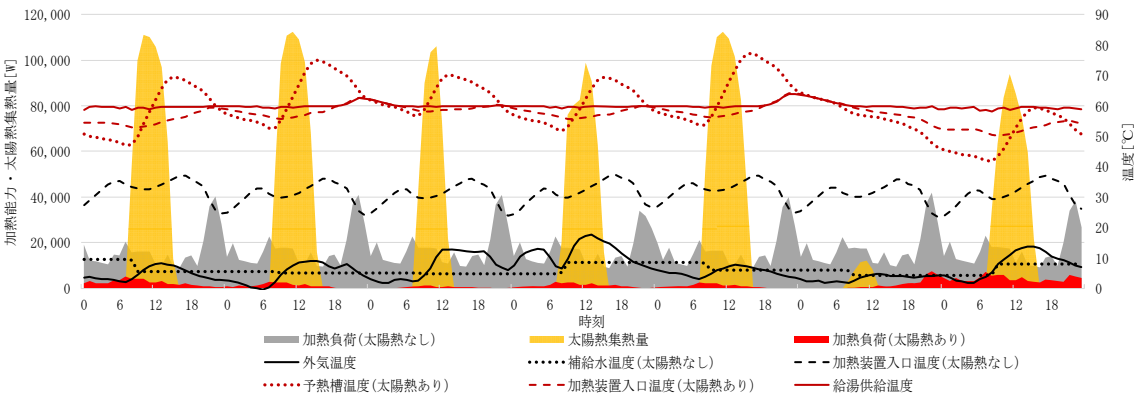


図 5-7-2 太陽熱利用給湯システムの有無による時刻別計算結果の比較

図 5-7-3 にケース 3~7 として太陽熱集熱面積と予熱槽容量を変えた場合の計算結果を示す。真空ガラス管集熱器と平板集熱器と比較ではその集熱効率の差から、集熱面積 150 ㎡以上では給湯一次エネルギー消費量の差が 2 倍以上となった。次に予熱槽容量を比較すると、予熱槽容量を最小容量から 20 m³ に増やすことで集熱面積が 50~100 ㎡分に相当する熱量を蓄えることが出来ることが分かる。また予熱槽容量が 20 m³ の場合と 30 m³ の場合ではあまり差異が無いことから、集熱面積に対する予熱槽容量の適正化が重要であることがわかる。

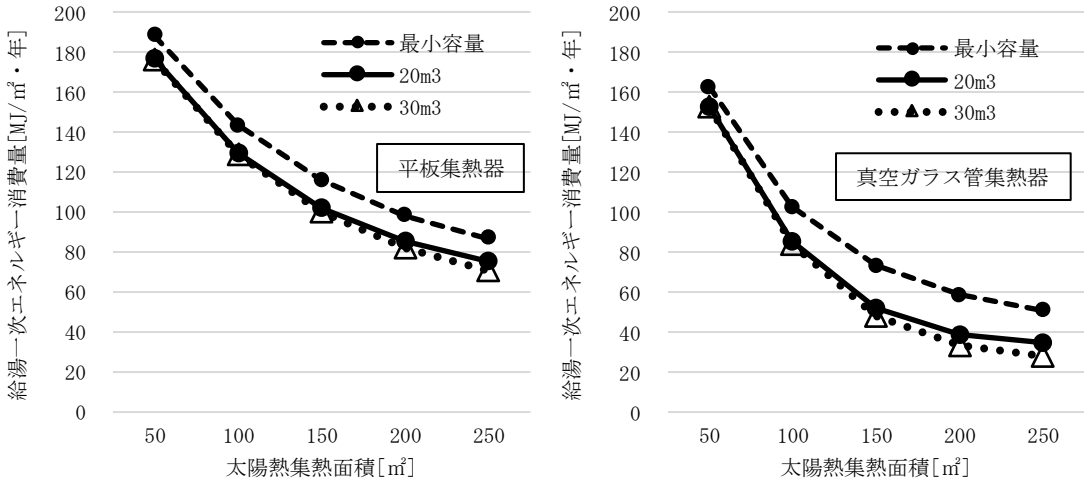


図 5-7-3 予熱槽容量の計算結果の比較

図 5-7-4 に東京における計算結果を代表として、基準ケースからケース 7 までのとして給湯一次エネルギー消費量を示す。基準一次エネルギー消費量は 483MJ/㎡・年であり、加熱装置の効率を 0.8 から 1.0 に上げ、節湯器具とすることで 263MJ/㎡・年まで下がる。さらに太陽熱給湯システムを導入することで、最大で、平板集熱器では 71 MJ/㎡・年、真空ガラス管集熱器では 31 MJ/㎡・年まで下げることが出来、給湯一次エネルギー消費量がほぼゼロに近い値となることが計算結果からわかった。

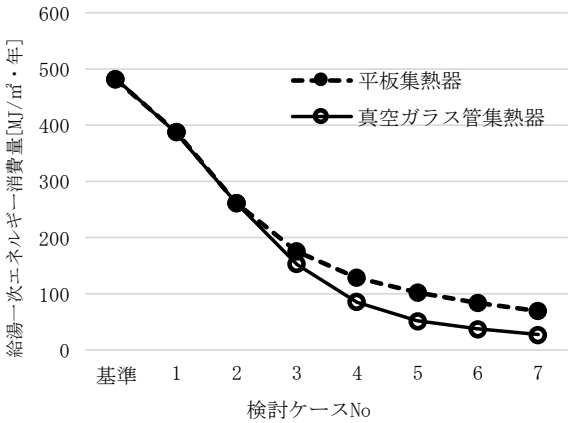


図 5-7-4 検討ケースの比較 予熱槽容量(ケース 3~6:20m³、ケース 7:30m³)

図 5-7-5 に地域別比較として札幌、東京、那覇における計算結果を示す。基準ケースとケース 1、2 では、札幌と那覇は東京の 1.15 倍、0.83 倍となったが、太陽熱利用給湯を導入した場合には、集熱面積によって差は異なり、最大で札幌と那覇は東京の 2.52 倍、0.61 倍の差となった。

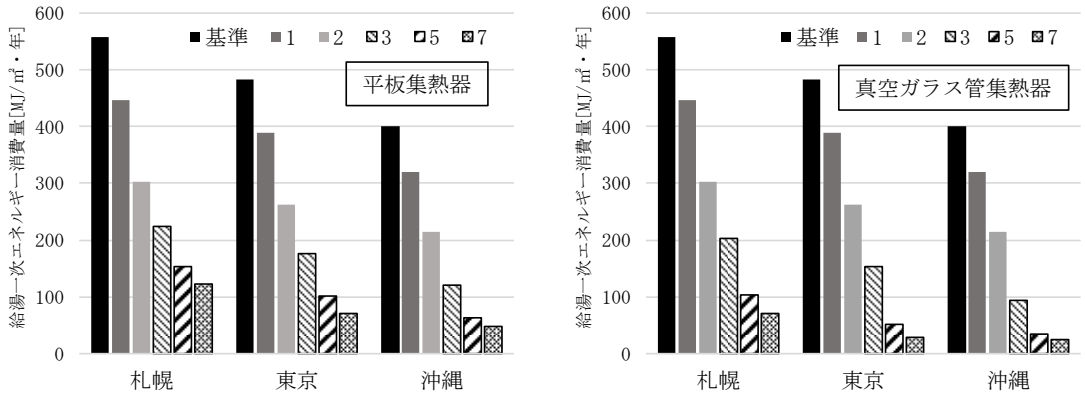


図 5-7-5 地域別計算結果の比較

5-8 太陽熱・太陽光発電を用いた給湯システムにおける需要供給バランスの検討

太陽熱利用と予熱槽、太陽光発電と蓄電池とヒートポンプ給湯機を組み合わせた給湯システムにおいて、発電により昼間に生じるエネルギー供給に対して、特に夜間に需要が生じる宿泊施設を対象として、需要と供給が同時・同量でバランスするシステムを検討しその効果を分析した。

5-8-1 検討ケース

検討対象建物は表 5-7-1 と同じである。表 5-8-1 に検討ケースの一覧を示す。地域区分は東京とし、ケース 1-1 は、節湯なし、加熱装置の定格効率（COP）が 0.8、給湯配管の保温仕様を 2 とし、省エネ基準に準じる仕様とした。ケース 1-2 は給湯配管の保温仕様を 2 から 1 に上げ、ケース 1-3 はさらに節湯シャワー器具を用いた場合とした。ケース 2-1 はガス焚温水ヒータの加熱装置の効率を一次 COP0.8 から 1 に上げ、ケース 2-2 は図 5-7-2 に示す 250 ㎡の真空ガラス管集熱器を設置した太陽熱利用給湯システムを検討した。ケース 3-1 は加熱装置について、ガス焚温水ヒータをヒートポンプ給湯機（二次 COP3.77）に変更し、ケース 3-2 は、これに太陽光発電設備、結晶型 35kW を加えた場合、ケース 3-3 は、ケース 3-2 に加え、図 5-8-1 に示すリチウムイオン蓄電池 80kWh を導入した場合とした。ケース 3-4 はケース 3-2 に対して蓄電池設備を設置せず、貯湯槽容量を 3m³ から 10m³ に上げ、ヒートポンプ給湯機の運転を 24 時間運転から、太陽光発電の発電が期待出来る日中の 7:00~17:00 までの運転時間とした場合を検討した。

表 5-8-1 検討ケースの一覧（太陽熱利用給湯、太陽光発電システム）

<table>
<tr><td>検討ケースNo</td><td>1-1</td><td>1-2</td><td>1-3</td><td>2-1</td><td>2-2</td><td>3-1</td><td>3-2</td><td>3-3</td><td>3-4</td></tr>
<tr><td>保温仕様</td><td>基準</td><td colspan="8">保温強化（保温仕様2→保温仕様1）</td></tr>
<tr><td>節湯</td><td colspan="2">なし</td><td colspan="7">あり</td></tr>
<tr><td>加熱装置</td><td colspan="3">温水ヒータ(一般)</td><td colspan="2">温水ヒータ
(潜熱回収)</td><td colspan="4">ヒートポンプ給湯機</td></tr>
<tr><td>加熱装置効率</td><td colspan="3">0.8</td><td colspan="2">1.0</td><td colspan="4">3.77</td></tr>
<tr><td>太陽熱利用
(真空ガラス管集熱器
250㎡，予熱槽30m^3)</td><td colspan="5">なし</td><td>あり</td><td colspan="3">なし</td></tr>
<tr><td>太陽光発電(結晶型35kW)</td><td colspan="6">なし</td><td colspan="3">あり</td></tr>
<tr><td>蓄電池(リチウムイオン
80kWh,充放電時効率0.95)</td><td colspan="6">なし</td><td>あり</td><td>なし</td></tr>
<tr><td>加熱装置運転(貯湯槽蓄熱)</td><td colspan="8">24時間運転(貯湯槽3m^3)</td><td>昼間運
転(貯湯
槽10m3)</td></tr>
</table>

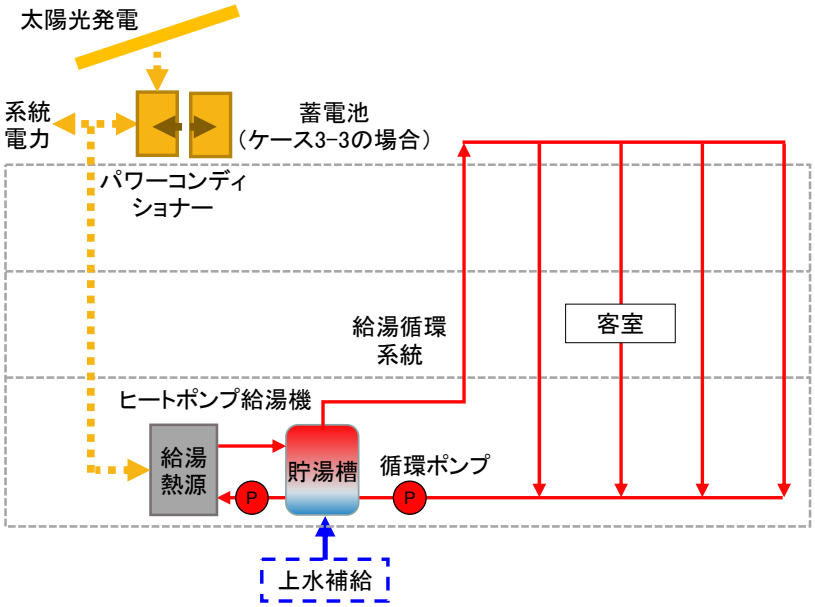


図 5-8-1 太陽光発電と蓄電池による給湯システム

5-8-2 算定結果

(1) 年間エネルギー消費量の分析

図 5-8-2 にケース 1-1 からケース 3-2 までの年間給湯一次エネルギー消費量の計算結果を示す。

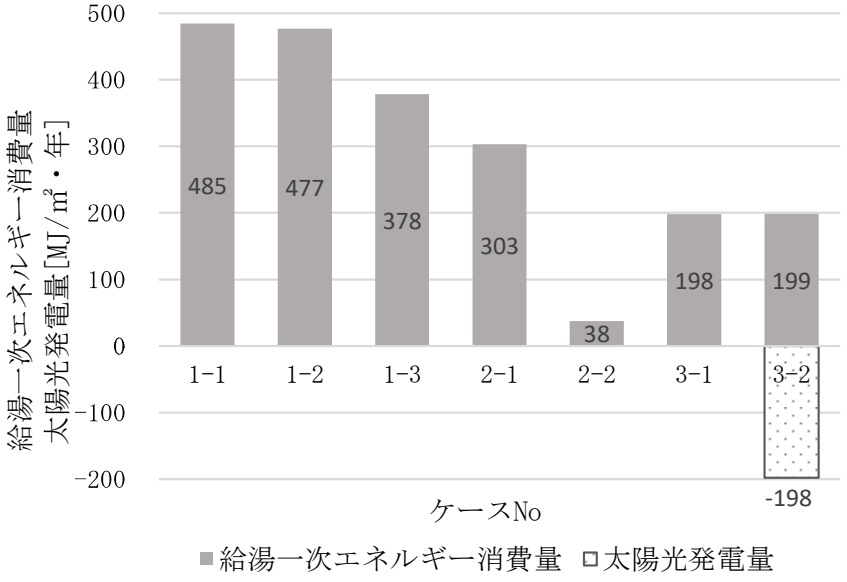


図 5-8-2 各ケースの年間給湯一次エネルギー消費量

基準ケースであるケース 1-1 の年間給湯一次エネルギー消費量は 485MJ/㎡・年となり、保温仕様を強化したケース 1-2 はケース 1-1 に比べ 2%削減された。削減効果は小さいが、本検討対象建物では給湯配管と貯湯槽による熱損失は給湯エネルギー消費量全体の 9%に相当し、仮に給湯負荷が 1/3 に減少した場合には、熱損失は変わらないため、この保温仕様によるエネルギー消費量の削減効果は 4%となる。ケース 1-3 にさらに節湯シャワーによる効果を加えると 22%の削減となり、ケース 2-1 の加熱装置を高効率の潜熱回収給湯器とすると 37%の削減、ケース 3-1 のヒートポンプ給湯機では 59%の削減効果となった。

ケース 2-2 とケース 3-2 は、給湯システムのエネルギー消費量が概ねネット ZEB となる場合の検討例である。ケース 2-2 の太陽熱利用給湯システムでは削減効果が 92%となり、年間の時刻別の熱収支においても ZEB となった。一方、ケース 3-2 では、年間一次エネルギー消費量と年間の太陽光発電量が同程度で、省エネ計算上では ZEB となるが、図 5-8-4 に示す月別のエネルギー消費量では、冬期には需要量に比べ発電量が不足し、夏期には発電量が余ることが読み取れる。また、次項で示す時刻別エネルギー消費量と発電量を分析することで、同時・同量でバランスしているかどうかを確認することが出来る。また太陽熱集熱器と太陽光発電の効率差から、太陽熱利用では設置面積 250 ㎡で ZEB に近づくが、太陽光発電では 35kW（設置面積約 350 ㎡）が必要となった。

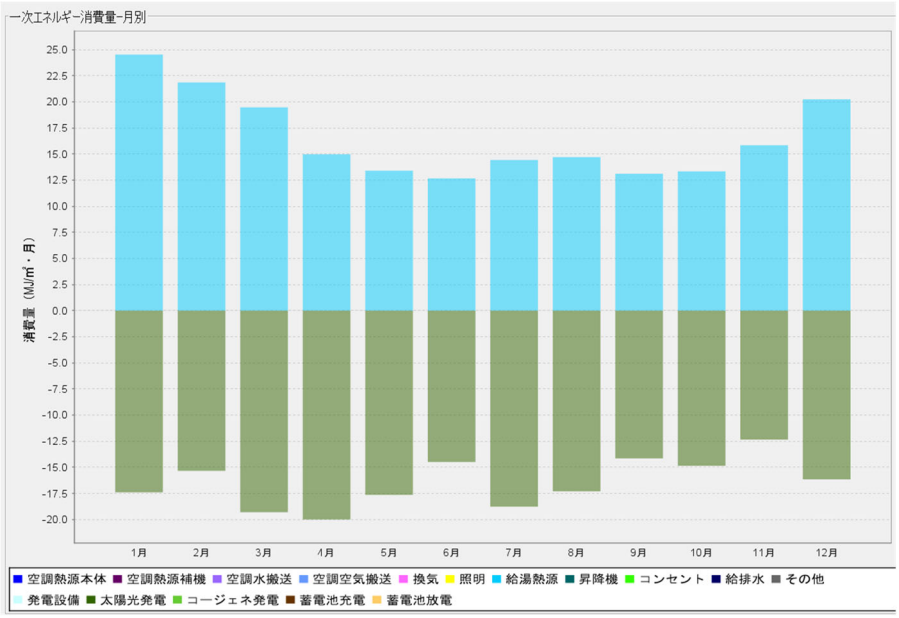


図 5-8-3 月別一次エネルギー消費量と太陽光発電量（ケース 3-2 の場合）

(2) 時刻別エネルギー消費量の分析

給湯エネルギー消費量と太陽熱利用や太陽光発電によるエネルギー供給量のバランスを解析するため、時刻別エネルギー消費量を分析した。給水温度が低く日射量が少ない 1/12~1/18 の冬期データ、給水温度が高く日射量がある 8/4~8/10 の夏期データを対象に詳細分析を行った。

①ケース 2-2：太陽熱利用システムの分析

図 5-8-4(a)(b)に太陽熱利用システムにおける分析結果を示す。冬期データより、日中日射量があれば、予熱槽に蓄熱されることで加熱装置によって加温せずに夜間負荷を処理することが出来る。冬期の 4 日目は日射量が無く、夜間 0 時頃に予熱槽の熱量が下がり槽内温度が 60℃を下回ると加熱装置が稼働するが、ピーク時でも太陽熱利用が無い場合と比べ 50%程度のエネルギー消費量となった。夏期においては、給水温度が高いため日射量が少ない日でも予熱槽内の温度は下がりにくく、概ね加熱装置の運転なしで給湯負荷を処理することが出来る。

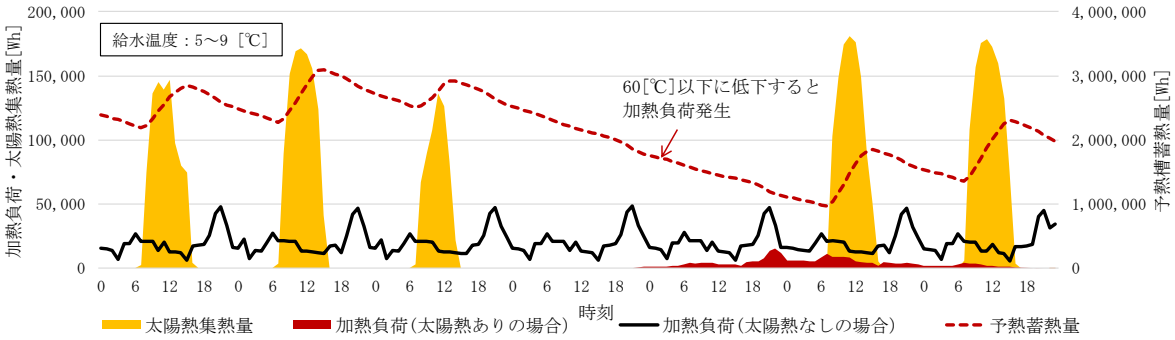


図 5-8-4(a) 太陽熱利用システムの時刻別分析結果（ケース 2-2、冬期 1/12～1/18）

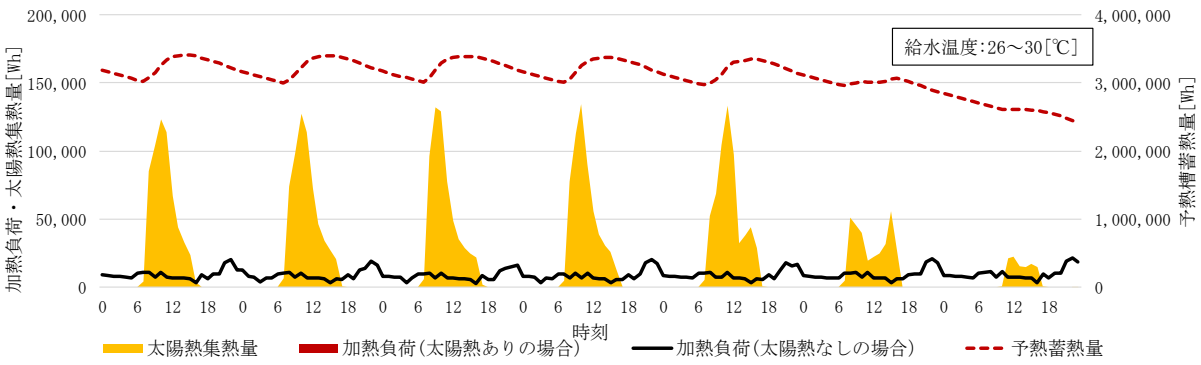


図 5-8-4(b) 太陽熱利用システムの時刻別分析結果（ケース 2-2、夏期 8/4～8/10）

②ケース 3-2：太陽光発電システムの分析

図 5-8-5 に太陽光発電システムを設置した場合の給湯エネルギー消費量と太陽光発電量の時刻別変動について、5 分間隔計算を 1 時間集計した結果を 1 月の例を用いて示す。この図より夜間発生する給湯エネルギー消費量は太陽光発電と相殺せず、年間給湯エネルギー消費量の 67%が同時・同量でバランス出来ない結果となった。

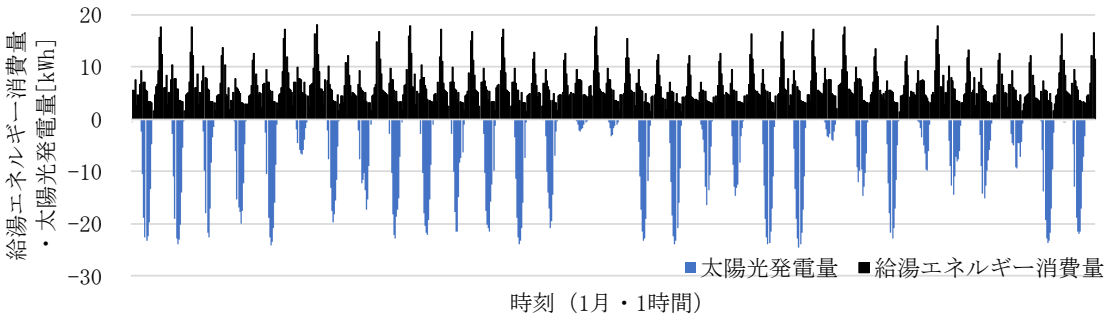


図 5-8-5 太陽光発電システムによる給湯システムの時刻別分析結果（ケース 3-2、1 月）

③ケース 3-3：太陽光発電と蓄電池システムの分析

図 5-8-6(a)(b)にケース 3-2 から蓄電池システムを加えた場合の分析結果を示す。日中は太陽光発電で発電した電力を蓄電池に充電し、夜間給湯負荷発生時に放電する運転制御とし、日中の余剰発電分は系統電力に売電、夜間の不足電力は買電する設定とした。図 5-8-6(a)(b)より冬期では、日射がない日では夜間買電が発生するが、夏期は概ね蓄電池に貯めた電力で夜間負荷を処理することが出来る。本ケースにおいて蓄電池 80kWh を設置した場合には、約 75%の給湯エネルギー消費量を同時・同量で賄うことが可能となった。

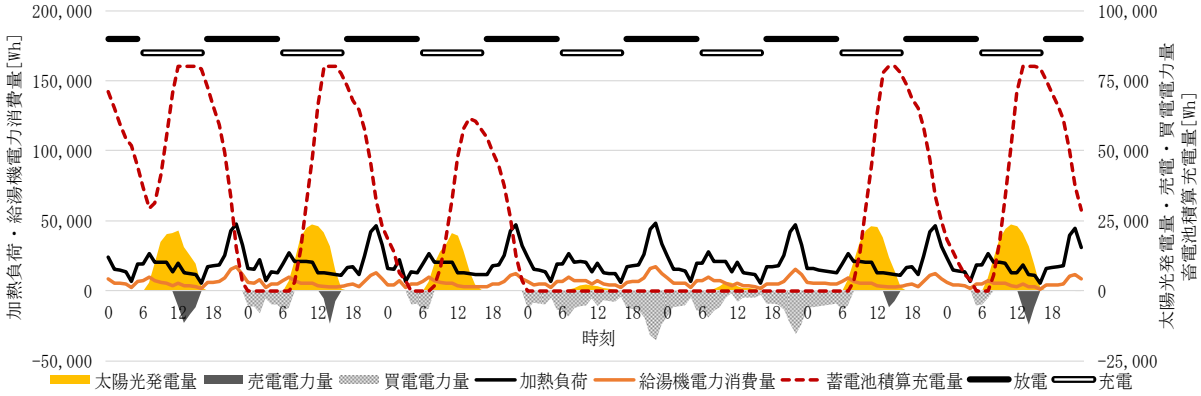


図 5-8-6(a) 太陽光発電システムと蓄電池による給湯システムの時刻別分析結果

（ケース 3-3、冬期 1/12～1/18）

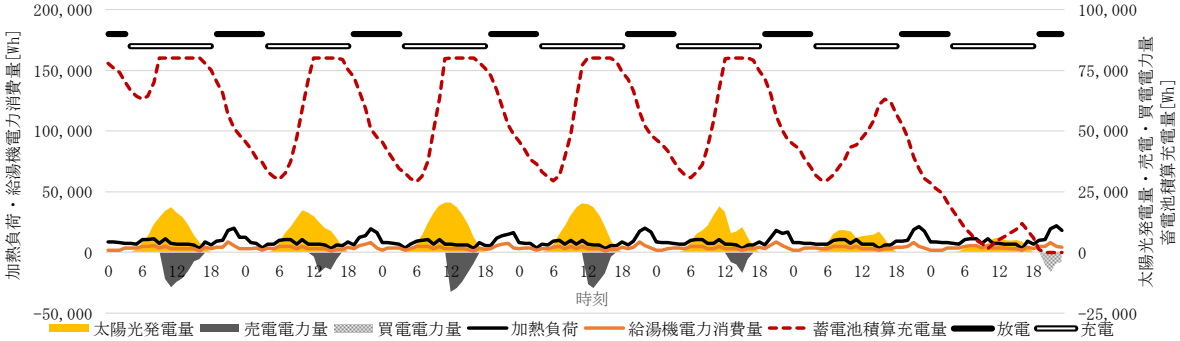


図 5-8-6(b) 太陽光発電システムと蓄電池による給湯システムの時刻別分析結果

（ケース 3-3、夏期 8/4～8/10）

④ケース 3-4：加熱装置の運転時間の分析

図 5-8-7(a)は加熱装置が 24h 運転するケース 3-2 の場合で、常に負荷がある時間に電力消費が発生する。図 5-8-7(b)にケース 3-2 から蓄電池システムの代わりに、貯湯槽を 3m³ から 10m³ と大きくし、夜間は加熱装置の運転を停止し、日中の太陽光発電により運転制御した場合について冬期 1 週間の時刻別変動を示す。温度成層型の貯湯槽とすれば、日中の太陽光発電を活用し、蓄電池を設置したケース 3-3 と同等のシステムを構築出来ることがわかった。

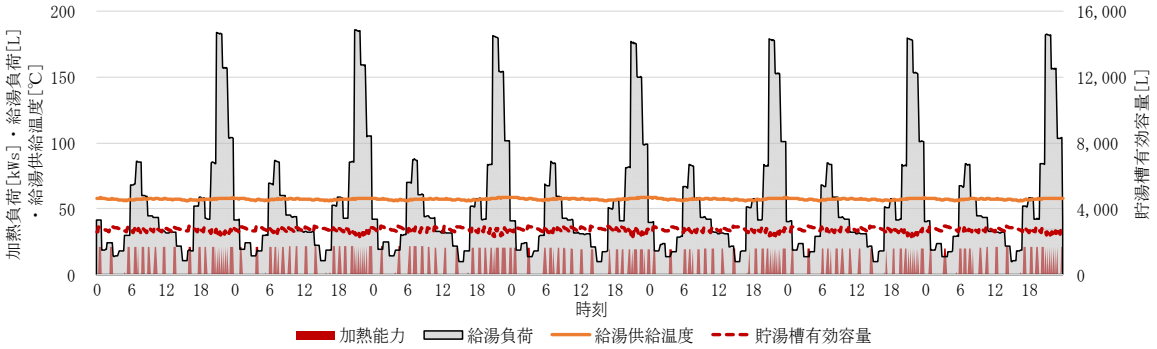


図 5-8-7(a) 加熱装置の運転時間の時刻別分析結果（ケース 3-4、24h 運転）

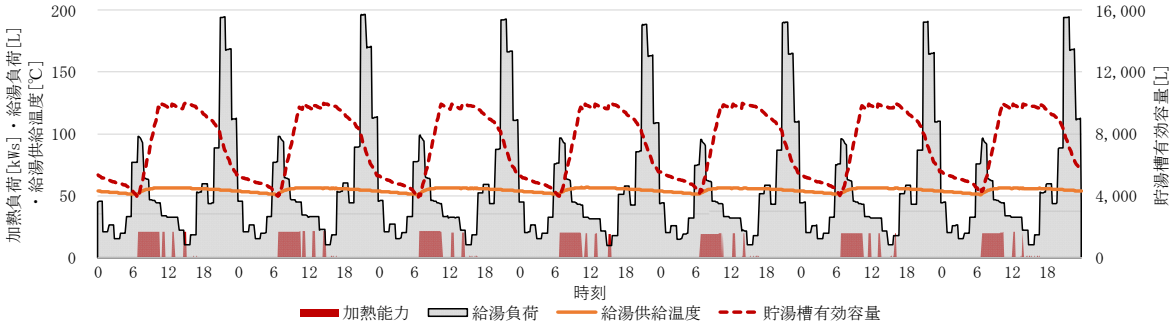


図 5-8-7(b) 加熱装置の運転時間の時刻別分析結果（ケース 3-4、日中 10h 運転）

5-9 給水・給湯システムにおける ZWB と ZEB の相互影響と本算定手法の評価

給水・給湯システムの設計において、本研究による検討手法で得られた新たな知見として、ZWB と ZEB 検討における相互影響と関係性について考察する。

給水システムにおける考察と ZWB、ZEB における相互影響について図 5-9-1 に示す。給水システムでは、節水によりポンプ電力は減少し ZWB と ZEB の両方に効果があることと、給水システムの違いにより電力消費量が異なり ZEB に影響する一方で、給水システムの違いにより ZWB として水質に影響することを 3-2-4 で示した。

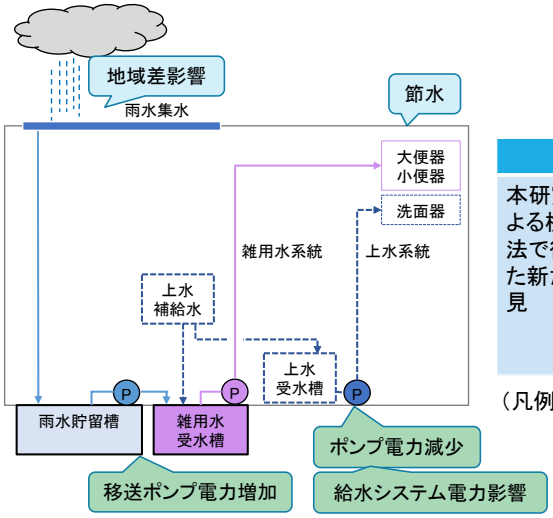
一方で、雨水利用により上水が削減されると ZWB に寄与するが、移送ポンプやろ過のための電力を考慮すると ZEB に影響する。また降水量による地域差が ZWB に影響することを 5-4-4 に示した。

給湯システムにおける考察と ZWB、ZEB における相互影響について図 5-9-2 に示す。

節湯により加熱装置も省エネとなることは ZWB と ZEB の両方に効果があること、配管熱ロスの削減による給湯省エネにより ZEB に貢献することを 4-4-3 に示した。さらには先止まり配管での捨て水防止は ZWB に貢献する。

また、太陽光・太陽熱の利用は ZEB に寄与するが、給湯使用量や給湯負荷変動の昼夜比率による蓄電池や貯湯槽容量の計画などの ZWB の設計に影響することを 5-8 に示した。

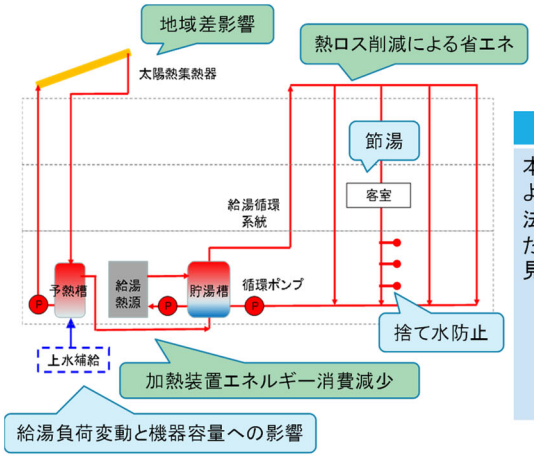
図 5-9-3 は給水・給湯システムにおいて、ZWB や ZEB を目指すために必要な要素を整理し、本研究の算定手法で検討が可能なものを示したものである。本研究では、給水・給湯システムにおける水消費量とエネルギー消費量を、負荷変動による時刻別算定手法を用いることで算定される手法を示し、水とエネルギー消費を同時に算出する意義を示した。このことにより、節水と省エネの相互作用が考慮される。さらには、雨水利用は未利用資源、太陽熱・太陽光発電利用給湯は再生可能エネルギー・熱を活用したものであるが、これらを有効活用するためには、貯留、蓄熱、蓄電の観点が必要となり、不確定な気象データの時刻別変動を取り込む算定手法としているため、本算定手法を用いることで、実務上再現性の高い検討を行うことが出来る。



	ZWBへの影響	ZEBへの影響
本研究による検討手法で得られた新たな知見	節水（＋）	ポンプ電力減少（＋）
	給水システムの違いによる水質影響	給水システムによる電力消費量への影響
	雨水利用による上水削減（＋）	移送ポンプ電力増加（ー）
	降水量の地域差影響	ー

（凡例）＋：削減効果あり、ー：増加影響あり

図 5-9-1　給水システムにおける考察と ZWB、ZEB における相互影響



	ZWBへの影響	ZEBへの影響
本研究による検討手法で得られた新たな知見	節湯（＋）	給湯省エネ（＋）
	先止まり配管での捨て水防止（＋）	配管熱ロスの削減による給湯省エネ（＋）
	給湯負荷変動（昼夜比率）と貯湯槽容量への影響	太陽熱利用（＋） 地域差影響
	給湯負荷変動（昼夜比率）と給湯機容量への影響	太陽光発電・蓄電池・HP給湯機（＋） 地域差影響

（凡例）＋：削減効果あり、ー：増加影響あり

図 5-9-2　給湯システムにおける考察と ZWB、ZEB における相互影響

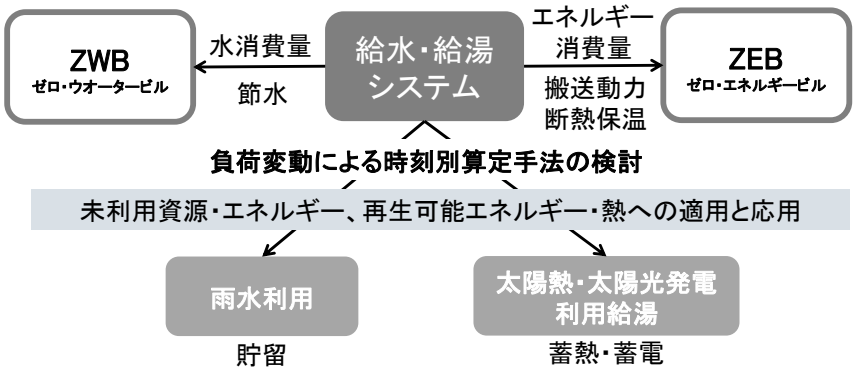


図 5-9-3　給水・給湯システムにおいて ZWB・ZEB を目指すために必要な検討要素

次に、設計に適用可能な評価項目について考察する。図 5-9-4 は本研究により得られた給水・給湯システムにおける算定手法のフローを整理したものである。給水・給湯システムにおいて、雨水を利用した省資源化システムと太陽熱・太陽光を利用した省エネルギーシステムが同じフローで算定が出来ることが分かる。算定手法としてデータベースの共通化や気象データなどの外部境界条件を連成して取り込むことが出来ることがわかった。

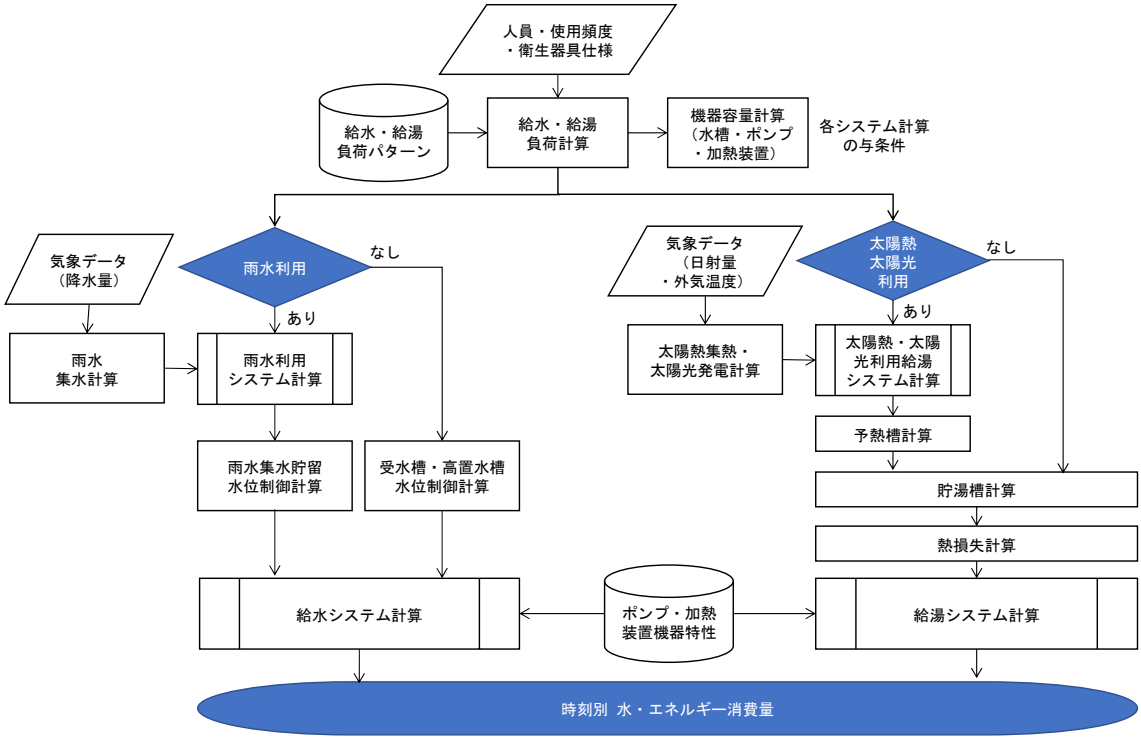


図 5-9-4　本研究により得られた給水・給湯システムにおける算定手法のフロー

本研究の算定手法を用いることで、ZWB と ZEB の検討において、給水・給湯システム設計で適用可能な評価項目をまとめたものを表 5-9-1 に示す。評価の対象として適している建物用途や本論で示した適用例を記載している。本研究の成果として、これまで設計上では考慮されなかったさまざまな検討を行うことが出来、省資源と省エネルギーの両面から評価を行うことができることがわかった。

表 5-9-1　ZWB と ZEB の検討において給水・給湯システム設計で適用可能な評価項目

システム	評価の観点	ZWB と ZEB の検討において 設計に適用可能な評価項目	評価対象として 適している建物用途	適用例 （本論での参照項）
給水システム	節水・省エネルギー	節水器具の採用による水・エネルギー消費量への影響評価	全ての建築物	3-2-4
		給水方式の違いによるエネルギー消費量比較	特に、高層建築物	3-2-4
		節水による水槽水位変動への影響と水質管理評価	特に、学校・宿泊施設	3-2-4
		複合建築物における給水負荷変動の平準化と省エネルギー評価	特に、複合建築物	-
		給水利用先種別による排水負荷変動の予測評価	全ての建築物	-
	水資源利用 (雨水利用システム)	雨水貯留槽からオーバーフローが発生する時刻の分析	全ての建築物	5-3-2
		雨水利用システム導入によるエネルギー消費量への影響評価	全ての建築物	5-3-2
		節水、雨水貯留槽容量、地域別降水量、雨水集水面積による雨水利用率、上水代替率への影響評価	全ての建築物	5-4-1, 5-4-3
		水槽水位制御方法による雨水利用率、上水代替率への影響評価	全ての建築物	5-4-2
		雨水流出抑制槽と兼用した雨水貯留槽の有効活用評価	全ての建築物	-
		オンサイト ZWB に必要な地域別の雨水集水面積の算定評価	全ての建築物	-
給湯システム	節湯・省エネルギー	節湯器具の採用による水・エネルギー消費量への影響評価	主に給湯需要が多い 宿泊・病院・飲食・住宅施設	4-4-3
		建設地の違いによるエネルギー消費量への影響評価		4-4-3
		循環配管経路と先止まり配管の長さ、配管・貯湯槽保温仕様による水・エネルギー消費量への影響評価		4-4-3
		加熱装置の種類、効率の違いによるエネルギー消費量への影響評価		4-4-3
		給湯負荷が発生する時刻、パターンの違いによるエネルギー消費量への影響評価		4-4-3
		給湯方式の違いによるエネルギー消費量比較		-
		給湯供給温度・給湯使用温度の違いによるエネルギー消費量比較		-
		給湯システムの配管経路における給湯温度の予測（レジオネラ属菌対策）		-
	未利用・再エネ利用 (太陽熱利用システム)	太陽熱利用給湯システムの集熱タイプ、予熱槽容量、建設地の違いによるエネルギー消費量への影響評価		5-7-3
		太陽熱利用給湯システム、太陽光発電による給湯システムの同時・同量需給バランスの評価 （給湯負荷が発生する時刻や給湯負荷パターンによる貯湯槽容量、蓄電池容量の算定）		5-8-2
		未利用・再エネ利用給湯システムのオンサイト ZEB に寄与する、給湯需要量抑制効果の評価		-

5-10 計画・設計・運用プロセスにおける本評価手法の有効性

図 5-10-1 に建築物の計画・設計・運用の設計実務プロセスにおいて、本研究による検討手法の適用と有効性を示す。以下にその内容を述べる。

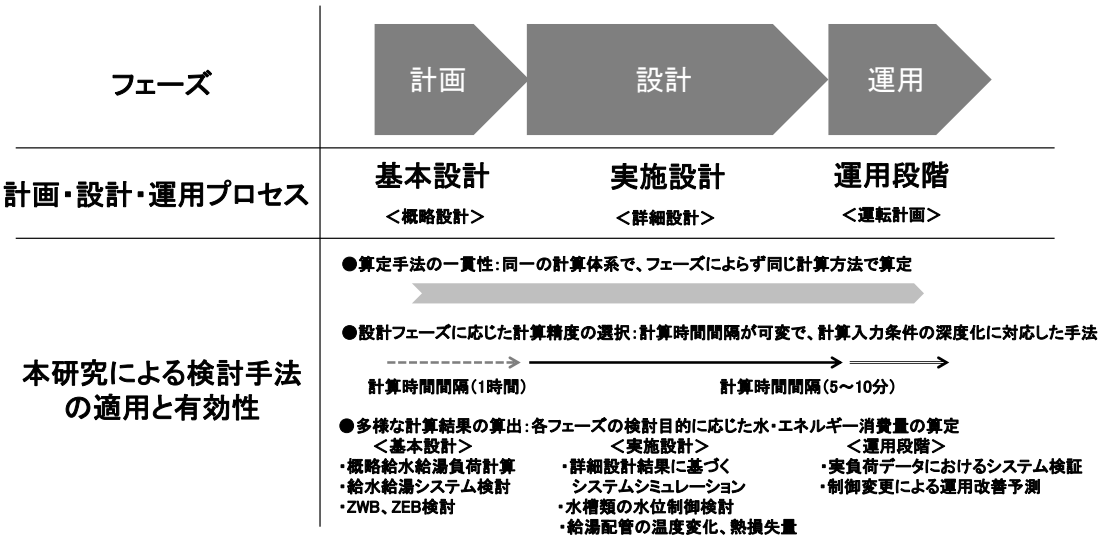


図 5-10-1 計画・設計・運用プロセスにおける、本研究による検討手法の適用と有効性

(1)算定手法の一貫性

本研究における算定手法は、同一の計算体系の下でフェーズによらず同じ計算方法で行っているため、計画~設計~運用の建築設備設計の一連のプロセスの中で、各フェーズで隔たりのないシームレスな検討が可能となる。

(2)設計フェーズに応じた計算精度の選択

本算定手法はシステムを構成するポンプ、水槽などの機器類や制御はモジュールで構成され、このモジュールで計算された水量、水温等が、接続されたモジュール間で受け渡されてシステムシミュレーションを行う。よって、計算時間間隔を可変にすることが出来、各フェーズにおける計算入力条件の深度化に応じて検討することが出来る。例えば、基本設計では計算時間間隔を 1 時間、実施設計・運用段階では計算時間間隔を 5~10 分とするなど、柔軟性の高い検討が可能となる。

(3)多様な計算結果の算出

各フェーズの検討目的に応じた水・エネルギー消費量の算定が可能である。本研究の第 3 章~第 5 章においても適用・検討例を示したが、各フェーズで検討、算出可能な内容を挙げる。

①基本設計段階

計画規模と建物用途、想定人員程度の情報で、「概略給水給湯負荷計算」が可能である。従来の検討では、日負荷原単位の設計情報のみで、日使用量のみしか把握が出来なかったが、給水給湯負荷パターンのデータベースをデフォルト値として活用することで、時刻別の給水・給湯負荷変動を設計初期段階で把握することが出来る。

「給水給湯システム検討」においては、水消費量の観点からだけでなく、エネルギー消費量の観点からも比較検討が可能となる。

省資源、省エネルギー設計に向けた「ZWB、ZEB」の検討を行うことが出来る。

②実施設計段階

実施設計段階では、設計図書に基づく機器仕様を入力し、計算時間間隔を短くして計算することで「詳細設計結果に基づくシステムシミュレーション」を行うことが出来る。

設計された水槽容量に対して、負荷変動需要を考慮した日常時と BCP 時における「水槽類の水位制御検討」を行うことが出来る。

給湯システムにおいては、「貯湯槽や給湯配管内の温度変化と熱損失量」を算定することが出来るため、衛生面ではレジオネラ属菌を発生しにくくするためのシステム内の温度状況の確認や、系統での熱損失を防ぐための保温仕様の決定が可能となる。

③運用段階

運用段階では「実負荷データにおけるシステム検証」を行うことが出来る。設計時に計画した想定人員が実運用では減った場合などにおいて、水槽類の水位制御の設定を変えることで、水質劣化防止の対策を検討することが出来る。

「制御変更による運用改善予測」として、特に雨水利用システムにおける、雑用水水槽への雨水と上水の補給水水位制御設定を降水量や実負荷に基づいて変更することで、雨水利用率や上水代替率の改善につながる検討を行うことが出来る。

5-11 本章のまとめ

本章では、第３章と第４章で述べた給水・給湯システムの算定手法を踏まえ、省資源化、省エネルギー化に向けた検討として、雨水利用システム及び太陽熱・太陽光利用給湯システムを例とし、本算定手法の設計への適用性を述べる。

雨水利用システムの検討においては、時刻別降水量と時刻別給水負荷変動を用い、水槽内での水位変動と雨水利用率や上水代替率を算出する手法を述べ、設計実務的な場面で、応用可能な検討を行った。また、本算定手法を用いた計算例とケーススタディー分析により、省資源化に向けたオンサイトでの雨水利用システムの検討を行い、実態に即した多様な活用の仕方と可能性を示した。内容を以下にまとめる。

1)　雨水利用システムシミュレーションの計算モデルを検討し、雨水集水面、雨水貯留槽、給水ポンプ等のモジュールで構成し、モジュールごとに水量や水槽内の水位変動を順次計算する計算手法の算定式を示し、各モジュールの接続関係と計算順序を示した。

2) 10,000 ㎡規模の事務所ビルを対象とし、本算定手法を用いた計算例として、雨水利用システムの各モジュールで算出される降水量、雨水貯留槽貯水量、雨水あふれ流量、受水槽への雨水送水及び上水補給水流量、雑用水給水負荷、受水槽貯水量の年間時刻別計算が出来ることを示した。

3) 一般器具と節水器具の場合で、雨水利用率、上水代替率、ポンプ消費電力の比較が可能となった。また、一般器具の上水代替率が 31.9%であるのに対して、節水器具の場合は 41.3%と約 10%上昇し、節水化による上水代替率の改善効果が高いことなどを示すことができた。

4) 既往の計算方法である日降雨量、日使用水量による算定の場合と本算定手法で計算時間間隔を 10 分間隔で算定した場合を比較した結果、10 分間隔計算では水位変動計算が可能となり、集水面積に対する雨水貯留槽容量の比率が 10%を下回ると、計算精度が変わることにより差異が生じることがわかった。

5) 節水器具を導入した際に雨水利用率や上水代替率の値を改善するためには、雨水集水量が同じであれば、雨水貯留槽を大きくすることが効果的であることがわかった。

6) 水位制御による影響分析から、給水負荷の状況に応じて雑用水受水槽への補給水の設定水位を調整することが重要であることが示唆された。

7) 国内主要 12 都市における降水量による影響分析から、上水代替率は年間降水量の増加に伴い大きくなる傾向を示した。一方で、雨水利用率は同じ降水量であっても雨水の降水特性により変わり、年間降水量が約 1,300[mm/年]以上で、特に年間降水日数が短く、短時間でまとまった降水がある地域では雨水貯留槽の容量を増やす計画が有効であることがわかった。

8) 雨水集水面積による検討から、仙台、東京、鹿児島において、雨水利用率と上水代替率を 100%に近づけるための雨水集水面積の条件や限界値を示し、オンサイトにおける雨水利用システムのみで ZWB を実現するための基礎的な検討結果を示した。

太陽熱・太陽光利用給湯システムの検討においては、太陽熱利用システムが計算手法を述べ、本算定手法を用い、宿泊施設をモデルとし給湯エネルギー消費量の削減に向けた検討を行った。また太陽光発電、蓄電池とヒートポンプ給湯機のよる給湯システムを加え、同時・同量で給湯負荷を賄い、給湯エネルギー消費量の ZEB 化検討をケーススタディー分析により行った。内容を以下にまとめる。

9) 太陽熱利湯給湯システムの計算モデルを示し、太陽熱集熱器、太陽熱集熱ポンプ、熱交換器プレート、予熱槽、予熱槽循環ポンプのモジュールで構成し、平板集熱器と真空ガラス管型集熱器の太陽熱集熱パネルの効率特性を示した。

10）客室数 44 室のビジネスホテルを対象に、本算定手法のケーススタディーを行い、太陽集熱量、加熱負荷、予熱槽温度、加熱装置の入口温度等について、年間時刻別計算が出来ることを示した。

11）給湯の基準一次エネルギー消費量 483MJ/㎡・年に対して、集熱面積と予熱槽容量を検討することで、平板集熱器では 71 MJ/㎡・年、真空ガラス管集熱器では 31 MJ/㎡・年まで下げることが出来、給湯一次エネルギー消費量がほぼゼロに近い値となることが計算結果からわかった。

12）地域別の計算結果比較では、太陽熱利用給湯を導入した場合には、集熱面積によって差は異なり、最大で札幌は東京の 2.52 倍、那覇は東京 0.61 倍の差となった。

13）本算定手法における ZEB 化検討では、時刻別エネルギー消費量と発電量を分析することで、同時・同量でバランスしているかどうかを確認することが出来ることを示した。

14）時刻別変動の分析から、太陽光発電による給湯システムにおいて、蓄電池を持たない場合、夜間発生する給湯エネルギー消費量は太陽光発電と相殺せず、年間給湯エネルギー消費量の 67%が同時・同量でバランス出来ないことがわかった。

15）太陽光発電 35kW と蓄電池 80kWh による給湯システムでは、約 75%の給湯エネルギー消費量を同時・同量の再生可能エネルギーで賄うことが可能となった。また貯湯槽を 3m³ から 10m³ と大きくすることで、夜間には加熱装置の運転を停止し、日中の太陽光発電で蓄電池なしでも、ZEB 化に向けた同等のシステムが構築できることがわかった。

給水・給湯システムの設計において、本研究による検討手法で得られた新たな知見として、ZWB と ZEB 検討における相互影響と関係性について考察し、本研究で示した、水とエネルギー消費を時刻別に同時に算出する意義を示した。給水システムでは、節水によりポンプ電力は減少し ZWB と ZEB の両方に効果がある一方で、雨水利用により上水が削減されると ZWB に寄与するが、移送ポンプやろ過のための電力を考慮すると ZEB に影響する。給湯システムでは、太陽光・太陽熱の利用は ZEB に寄与するが、給湯使用量や給湯負荷変動の昼夜比率による貯湯槽容量の計画など ZWB の設計に影響することがわかった。

また、給水・給湯システムにおいて、ZWB や ZEB を目指すために必要な要素を整理し、本研究の算定手法で検討が可能なものを示した。節水と省エネの相互作用が考慮され、雨水利用などの未利用資源、太陽熱・太陽光発電利用給湯などの再生可能エネルギー・熱の有効活用に向けた、貯留、蓄熱、蓄電の観点において、本算定手法を用いることで、実務上再現性の高い検討を行うことが出来ることを示した。

最後に、計画・設計・運用プロセスにおいて、本研究で示した検討手法の有効性を述べた。算定手法の一貫性として、同じ計算手法により、各フェーズで隔たりのないシームレスな検討が可能となることを示した。設計フェーズに応じた計算精度の選択として、計算時間間隔を可変にすることで、各フェーズにおける計算入力条件の深度化に応じて検討す

ることが出来ることを示した。

多様な計算結果の算出として、基本設計段階では、給水給湯負荷パターンも把握出来る概略給水給湯負荷計算、エネルギー消費量を含めた給水給湯システム検討、ZWB、ZEB の検討では、時刻別変動を考慮した、雨水利用等の未利用資源、太陽熱・太陽光発電利用給湯等の再生可能エネルギー・熱の有効活用に向けた検討を行うことが出来ることを述べた。実施設計段階では、計算時間間隔を短くし、詳細設計結果に基づくシステムシミュレーションが可能となり、日常時と BCP 時における水槽類の水位制御を検討することが出来ることを述べた。運用段階では、実負荷データにおけるシステム検証として、設計時の条件から変わった場合に、水槽類の水位制御の設定を変え水質劣化防止の対策を検討出来、制御変更による運用改善予測として、雨水利用システムにおける補給水水位制御の適性化を図ることが出来ることを述べた。

参考文献

5-1）雨水利用・排水再利用設備計画基準・同解説 平成 28 年版、国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修、一般社団法人 公共建築協会（2016.9.16）

5-2）雨水利用の実務の知識 設計・施工・維持管理マニュアル、社団法人空気調和・衛生工学会(2011.9.30)

5-3）長谷川巌：ゼロ・ウォータービルと環境配慮に関する最近の動向、空気調和・衛生工学 第 92 巻 第 9 号（2018.9)、pp.799-805

5-4）小瀬博之、村上周三、大塚雅之、甕岡賢悟、長谷川巌：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 38）：雨水利用プログラムの概要、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2008.8）、pp.1153-1156

5-5）小瀬博之、村上周三、大塚雅之、長谷川巌：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 54）：雨水利用プログラムの計算事例、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2009.9）、pp.699-702

5-6）長谷川巌、大塚雅之、小瀬博之：負荷変動を考慮した雨水利用システムシミュレーションツールの開発に関する研究―計算手法の開発と省資源設計への適応―、空気調和・衛生工学会論文集（2023.1）、pp.19-28

5-7)平成 28 年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報（非住宅建築物、基準値に関する情報(平成 25 年版)、第三部　基準一次エネルギー消費量の算定根拠、 モデル建物（ホテル等 10,000 ㎡）の概要

5-8)木村建一編著「建築環境学２」、丸善株式会社、pp.218

5-9)長谷川巌、村上周三、大塚雅之：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 74）：給湯プログラムによる省エネルギー検討、 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集（2010.9）、pp.2575-2578

5-10)長谷川巌、二宮博史、飯田玲香、石野久彌、村上周三：建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 102 報　太陽熱利用給湯による宿泊施設の ZEB 化に向けた検討、日本建築学会大会学術講演梗概集（2022.9）、pp.2073-2074

5-11）長谷川巌、村上周三、石野久彌、二宮博史、飯田玲香：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その 261）：太陽熱・太陽光を利用した給湯システムによる ZEB 化の検討、 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2022.9）、pp.61-64

第６章 結論

6-1 結論

本研究の結論を以下に述べる。

第１章「序論」では、地球環境負荷低減と水資源保護を背景とした社会動向と法令の整備とともに、給排水衛生設備の実務設計で求められていることを整理した。その上で、本研究に関係する既往研究と文献調査を行い、参考となる部分を引用した。既往研究に基づく、設計手法の目的は、設備容量や配管サイズを決定するための最大負荷検討＜フォアキャスティング手法＞であるのに対して、本研究による設計手法の目的は、設計目標値の達成に向けた与条件やシステムの検討＜バックキャスティング手法＞であることを示した。本研究は建築物を対象に、給水・給湯システムの設計における水消費とエネルギー消費の算定手法を検討し、省資源と省エネルギー設計への適用性・有効性を示すことを目的としていることを述べ、第１章から第６章で構成される本論文の構成を示した。

第２章「計算体系と計算モデルの構築」では、将来像も含めた建築物の給排水衛生システムにおける計画・設計・運用における一連のプロセスの全体像を示し、水消費量の負荷算定からシステム計算によるエネルギー消費量までを同時に算出する仕組みについて述べた。計算モデルの構築において以下の５つの特徴を挙げた。

①「水消費量とエネルギー消費量の同時算出」により、水使用行為に伴うエネルギー消費への影響をシステム計算により把握出来、設計したシステムの検証を行うことが出来ること

②「原単位の細分化とモジュール計算」により、既往の研究データを活用しあらゆる建物用途で負荷算定計算が可能なモデルとし、検討するシステムの拡張性が高いこと

③「計算時間間隔の考察」により、入力データの粒度や設計フェーズに応じた算定が可能であること

④「既往研究のデータの活用と更新性」により、既往研究の知見との連動性を考慮することで汎用性が高くなること

⑤「気象データの活用と他設備との連成計算」により、給排水衛生システムと他設備との外部境界条件を設定し、連成計算を行うことで、未利用エネルギーや再生可能エネルギーの活用検討にも寄与出来ること

また、本研究における検討対象範囲として給水・給湯システムを対象としており、計算体系の全体像においてこの位置づけを図示した。

第３章「給水システムにおける算定手法の検討と実測データによる適用」では、まず実用的な負荷算定手法として原単位の細分化を行い、給水・給湯負荷は、人員、衛生器具１回あたりの吐水量、衛生器具一人１日あたりの使用回数、時刻別の使用水量・湯量の１日あたりの比率の積で求められることを示し、男女比率、節水の有無、水使用頻度や利用パターンに応じて算定が出来ることを述べた。次に既往の研究を調査し、給水・給湯負荷パターンのデ

ータベースを整理するとともに、事務所建物の大便器、小便器、洗面器の男女別器具別吐水量と衛生器具別の給水負荷パターンの実測データを解析し、本算定手法に適用した。給水システムの算定においては、機器特性調査と文献調査により、ポンプの電力消費量の算定式を作成した。具体的な算定例とし、3つのケースにおいて給水システムの違いと節水の有無による電力消費量の比較を行った。さらに応用例として、高置水槽方式において水槽内の時刻別水位変動を示し、水槽内の水の滞留時間を分析することで衛生面での検証が出来ることを述べた。

第4章「給湯システムにおける算定手法と省エネルギー設計への適用」では、給湯システムシミュレーションの計算モデルとして、基本的な加熱装置（給湯ボイラー）、貯湯槽、給湯循環配管で構成される中央式給湯システムを対象として構築した。加熱装置、貯湯槽、給湯循環ポンプ、給湯配管をモジュールとして扱い、それぞれのモジュールでの計算方法を示すとともに、計算順序を示した。給水システム計算と同様に、既往の研究から事務所、飲食、ホテル、学校の給湯負荷パターンを整理し、種々の加熱装置での計算が可能なように、給湯ボイラー、連結型瞬間湯沸器、ヒートポンプ給湯機の機器特性を調査し算定式を作成した。計算例として、給湯負荷の大きいホテル用途を対象に、給水・給湯負荷変動、給湯エネルギー消費量、給湯配管や貯湯槽からの熱損失量を示した。さらに省エネルギー検討として、節湯器具の採用、地域別の検討、保温仕様の検討、加熱装置の効率の変更、負荷パターンの変更、給湯使用量の変更を行った場合のケーススタディーを実施し、どの程度給湯エネルギー消費量が変化するかを示し、省エネルギー設計への適用性について述べた。

第5章「給水・給湯システムにおける本算定手法の適用例と評価」では、具体的な設計検討例として、雨水利用システムと太陽熱・太陽光利用給湯システムを取り上げた。

雨水利用システムでは、計算モデルと算定手法を示し、設計で用いられる雨水利用率、上水代替率の指標を用い既往の設計手法との比較を行った結果、集水面積に対する雨水貯留槽容量の比率が 10%を下回ると、計算精度が変わることがわかった。時刻別計算を行う本算定手法の特徴を活かし、雨水を補給して制御する雑用水受水槽における水位制御方法を変えた場合の評価、地域別降水量による影響分析、雨水集水面積による検討を行った。オンサイトにおいて自家消費による雨水利活用を促す ZWB の検討に適用出来ることを述べた。

太陽熱・太陽光利用給湯システムでは、まず太陽熱利用給湯システムの計算モデルと算定手法を示し、太陽熱集熱面積と給湯エネルギー消費量の関係を地域別、集熱タイプ別に算出した。次に太陽光発電・蓄電池とヒートポンプ給湯機を組み合わせた検討を加え、発電により昼間に生じるエネルギー供給に対して、特に夜間に需要が生じる宿泊施設を対象として、需要と供給が同時・同量でバランスするシステムについて分析した。これらの検討を通じて、給湯エネルギー消費量の ZEB 検討に適用出来ることを述べた。

給水・給湯システムの設計において、本研究による検討手法で得られた新たな知見として、

ZWB と ZEB 検討における相互影響と関係性について考察し、本研究で示した、水とエネルギー消費を時刻別に同時に算出する意義を示した。給水システムでは、節水によりポンプ電力は減少し ZWB と ZEB の両方に効果がある一方で、雨水利用により上水が削減されると ZWB に寄与するが、移送ポンプやろ過のための電力を考慮すると ZEB に影響する。給湯システムでは、太陽光・太陽熱の利用は ZEB に寄与するが、給湯使用量や給湯負荷変動の昼夜比率による貯湯槽容量の計画など ZWB の設計に影響することがわかった。

また、給水・給湯システムにおいて、ZWB や ZEB を目指すために必要な要素を整理した。節水と省エネの相互作用が考慮され、未利用資源、再生可能エネルギー・熱の有効活用に向けた、貯留、蓄熱、蓄電の観点において、本算定手法を用いることで、実務上再現性の高い検討を行うことが出来ることを示した。

最後に、本研究を通じて給水・給湯システムの設計において，設計に適用可能な評価項目について考察し、計画・設計・運用プロセスにおいて、算定手法の一貫性、設計フェーズに応じた計算精度の選択、多様な計算結果の算出の観点から、本研究で示した検討手法の有効性を述べた。

第 6 章「結論」では、本研究の各章で得られた成果の概要と、研究成果による建築物の給水・給湯システム設計における活用具体例を示すとともに、今後の課題と研究の展開について述べた。

6-2 今後の課題

本研究では、脱炭素社会に向け地球環境負荷削減と水資源の保護を背景に、給排水衛生設備の分野における、建築物の給水・給湯システムを研究対象範囲として設計に寄与する検討を行った。第 2 章で示した「給排水衛生システムの計算体系の全体像」において骨格となる部分の算定手法に関しては述べることが出来たが、今後の課題としては、排水や排水再利用システムへの適用、植栽散水や雨水浸透による還元などによる雨水流出抑制など対象範囲の拡大、建築物のみならず、住宅分野への拡張、単用途のみならず複合用途への適用などが考えられる。さらには、本算定手法では、人の水使用行為は建物用途別の時刻別負荷パターンとしてデータベース化しているが、今後は、人の行動パターンによる給水給湯負荷パターンの整理が必要となると考えられる。このためには、LCEM ツールや DECC データなどこれまで各分野で別々に調査していたものを共通情報として共有し、本研究の負荷パターンデータとシームレスにつなげることで、他分野との連動性を持つことが可能となる。最後に、実務上の観点においては、設計者にとって使いやすいツールとするために必要な入出力部分の開発も検討が必要であると考える。

謝 辞

本博士論文（工学）は、2020 年 4 月より所属した、東京工業大学環境・社会理工学院建築学系建築学コース博士課程後期において行った研究成果をまとめたものです。

最初に、指導教員としてお引き受けくださいました 鍵直樹教授（東京工業大学環境・社会理工学院建築学系）に心から感謝申し上げます。本論文作成にあたり、終始懇切なご指導と御助言を賜りました。また本論文の審査にあたり、安田幸一教授、湯浅和博准教授、浅輪貴史准教授、大風翼准教授（東京工業大学環境・社会理工学院建築学系）には、研究課程において多大なる時間を割いて御助言と御教示を賜りました事に厚く感謝を申し上げます。本研究における着眼点や論点に関して学ぶべき点が多くあり、本論文の作成にあたり多くの知見を得ることとなりました。本研究に関する査読論文を執筆するにあたり、大塚雅之教授（関東学院大学建築・環境学部）、小瀬博之教授（東洋大学総合情報学部総合情報学科）には、専門分野の視点から多角的な御指導と御支援を賜り、私どもの研究活動への弾みをつけていただきました。

本研究を始めるきっかけとなったのは、著者が学部・大学院在学時に行った給排水設備分野の研究に関して、丁寧に御指導いただいた紀谷文樹名誉教授（元東京工業大学）と、企業に所属してから実務として行った、建築物におけるエネルギーシミュレーションツールの開発において御指導いただいた村上周三名誉教授（元東京大学）との出会いによる賜物と考えます。大変貴重な経験をさせていただいたことに感謝申し上げます。

最後に、企業に在職しながらの博士論文取得の折にも深いご理解をいただいた、職場の上司・同僚・部下に感謝するとともに、研究活動に没頭するために、長期に亘り支えてくれた妻に感謝いたします。