トイレにおける非常時のゼロ・エネルギー照明に関する研究 — 東北大学工学部実証サイトにおける検証実験 —

STUDY ON ZERO ENERGY LIGHTING SYSTEM FOR TOILET UNDER THE EMERGENCY SITUATION — Verification experiment at demonstration site in Tohoku University —

藤山真美子 — * 1 石田壽一 — * 2
小林 光 — * 3 石井久史 — * 4

Mamiko FUJIYAMA — * 1 Toshikazu ISHIDA — * 2
Hikaru KOBAYASHI — * 3 Hisashi ISHII — * 4

キーワード：
レジリエンス, 大学キャンパス, 自然光利用, ゼロエネルギー,
省エネ災害対応トイレ

Keywords:
Resilience, University campus, Utilizing natural light, Zero energy,
Energy-saving disaster response toilet

Under the emergency evacuation situation after the disaster, maintaining normal state of Toilet is indispensable both for physical and psychological health however mega disaster like the Great East Japan Earthquake the initial infrastructure or Life Line is utterly lost. Thus the Toilet often becomes malfunction. The article explicates the optimum design spec and utility for the so-called ZET: Zero Energy Toilet that affords the durable comfort use of toilet environment regardless normal and emergency. The article reports basic system and preliminary demonstration result focusing on resilient lighting system.

1. 序

1.1. 研究の背景と目的

現代日本におけるトイレ^{注1)}は、1970年初めに普及の進んだ水洗化に伴い、独自の衛生・快適性概念を形成し、技術を発展させたといわれる。¹⁾ トイレは、温水便座や自動洗浄・開閉等の機能増設ならびに機械式換気や人工照明による安定的な衛生環境の整備に伴い、上下水道・系統電源等の都市インフラと不可分な関係を形成した。その結果、現代のトイレは、災害等による都市インフラの途絶と同時に機能停止を起こす脆弱性を不可避に内包している。

一般的に、非常時のトイレ対策として、携帯トイレや簡易トイレの備蓄、組立トイレの設置等が想定されるが、製品単体の処理能力や備蓄量の制限およびコスト負担も大きく、必要十分な対応は困難である。また、これらのトイレは、屋外設置であることも多く、天候や季節によっては、厳しい状況となる。非常時において、不慣れたトイレ環境が続くことは、避難者の肉体的・心理的負担を著しく増加させることが報告されており、使い慣れた常設トイレが、非常時にも継続的に維持されることの意義が指摘されている。²⁾

本研究では、このような背景を踏まえ、従来の分離・外付け型の非常用トイレが抱える課題へのアプローチとして、自立的なインフラ代替システムの併設による常設トイレの継続利用の可能性を検証することを目的としている。

1.2. ゼロ・エネルギー・トイレ(ZET)

東北大学工学部では東日本大震災時に約200名の大学職員と学生が緊急避難を余儀なくされた。^{注2)} 同大キャンパスは避難所や防災拠点に指定されておらず、震災後の職員や学生に対するトイレを含む外部支援が不在の状況にあった。また、緊急避難建物^{注3)}のトイレは、

ライフラインの被害を受け、排水用の水は付近の池からバケツリレーで搬送し、光源は懐中電灯を利用した。更に、自然採光や自然換気の開口がなく、トイレ環境は、時間経過と共に著しく悪化した。

非常時の常設トイレにおいて、電気、給水、排水処理の有無は、大きな影響を及ぼす。本研究では、これらすべてのインフラに対し代替システムが構築された状態を「ゼロ・エネルギー・トイレ(ZET)」と呼び、いかなる状況下においても継続的に利用可能な常設トイレの理想形として位置づけている。インフラから独立した常設トイレの検証は、非常時対策に限らず、平時の省エネ対策にもつながるため、従来の平時・非常時機能分担の二分立から脱却した冗長性と弾力性の高いハイブリッドモデルの創出として、防災や減災都市コミュニティ計画への適用に敷衍しうる可能性が高いと考える。

2. ゼロエネトイレ照明システム

災害時の電源喪失や計画停電等によって、上下水道が使用可能でありながら、トイレが使用停止となる場合がある。近年、太陽光発電設備、蓄電設備、自家発電設備など災害に対応する設備を持った建物も増えているが、防災拠点などで特別なBCP機能^{注4)}を有する場合をのぞき、非常時の優先順位は、主に基幹システムにあり、照明領域は最小の運用がなされる。結果、非常時にトイレへの電源供給が断たれ、暗室化することで、やむなく使用停止となる。

本稿では、「ゼロ・エネルギー・トイレ(ZET)」検討の端緒として、このような状況下での、常設トイレの継続利用を目指し、トイレの給水圧を利用した発電によって必要最小限の電力を代替するゼロエネトイレ照明システムについて開発と実証を試みた。東北大学キャンパス内に構築した実証サイトの基本構成と試験的運用で得られた実測データに関する考察結果について、以下に報告を行う。^{3) 4) 5)}

¹⁾ 東北大学工学研究科都市・建築学専攻 助手・修士(芸術工学)
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²⁾ 東北大学工学研究科都市・建築学専攻 教授・博士(工学)

³⁾ 東北大学工学研究科都市・建築学専攻 准教授・博士(工学)

⁴⁾ (株)LIXIL R&D 本部ゼロエネ建築 Gr. グループリーダー・博士(工学)

¹⁾ Assistant, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., M. Design

²⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Group Leader, ZEB ZEH Research Group, R&D Division, LIXIL Corp., Dr. Eng.

本システムは、水力発電ユニット・発電電力を蓄えて制御するバッテリーと制御基板・ハイブリッド型LED 照明の3要素で構成される。

LED照明は、低電力で点灯する暗所視モードと系統電源を利用する明所視モードを併設したハイブリッド型とすることで、一台の照明機器内で平時・非常時の切り替えを行う機器を開発した。暗所視モードでは、低照度として消費を抑え、更に照明器具内に人感センサを内蔵し、利用者動線に沿った限定的なエリアでこまめに自動点滅することで、消費電力を最小限化する。また、有窓のトイレは、昼光利用によって照明の消費電力を最小限化するため、照度センサを設置し、LED照明の使用を自動停止する制御を行っている。

東日本大震災の被害を受け、復旧改築を行った東北大学工学研究科人間・環境系建物(2014年竣工)の5階男子・女子トイレを対象とし、実証サイトの構築を行った(図2)。対象トイレは、同フロアの研究室や教職員室の職員・学生による日常的な利用が行われ、一般的な文教施設における実測データを得ることができる環境である。

システムの設備概要について図3に示す。同トイレは、人員算定数を男64人、女21人として便所適正器具数が決定されている。

水力発電機は、従来品の組み合わせによる改良で発電量の向上に努めた。ただし、発電能力向上と圧力損失は相反関係にあり、適宜調整を要する。そこで、小便器用と大便器用ユニットによる圧力損失と流量、模擬負荷電圧3Vを与えた流量と発電特性を把握する目的で疑似トイレによる簡易実験を実施した。その結果を図4、5及び表1に示す。実証サイト(建物5階)の給水圧力は0.16MPa程度を見込んでおり、発電機による圧力損失がこの値を下回り、かつ残余圧力と適正流量で排泄物を処理する必要がある。そこで、簡易実験結果を基に確認を実施した。女子トイレでは、図4の結果から発電機の圧力損失は0.059MPa (16L/min)、機器の損失0.070MPaを加えた後の残余圧力は0.031MPaとなる。また男子トイレでは、圧力損失が0.079MPa (12L/min)、これに機器の損失分0.050MPaを加えても0.16MPa以下となる。これらの結果を踏まえ、男女トイレの実機において同時使用下でも円滑に流れることを確認した。

図5. 電力量-流量特性曲線⁴⁾

一方、発電量は、図5に示す電力と流量特性の関係から、小便器の場合は1.030W、大便器の場合は0.949Wの発電能力が簡易実験結果から得られている。これを踏まえ、回路の効率や充放電効率など加味して全体のエネルギー収支を計画した。

表1. 簡易実験結果一覧

測定項目	小便器		大便器		
	1台	4台	1台	2台	3台
差圧 Q (Mpa)	0.079	-	0.059	-	-
電圧 E (V)	4.235	16.937	4.234	8.468	12.701
電流 I (A)	0.255	1.022	0.237	0.478	0.718
電力 P (W)	1.030	4.120	0.949	1.899	2.849

斜線部は実測値、その他は計算値

3.2 制御基盤

制御基盤では、発電した直流電流を一括し、内蔵のLi-Ionバッテリーに効率的に蓄電を行っている。

3.3 LED照明

一般的な照明システムは、消費電力を抑えればエネルギー収支は向上するが、出力が小さいと十分な視環境は得られない。そこで、本研究では、最小の消費エネルギーで一定の明るさ感を得るためにブルキンエ効果を活用した新たなLEDを開発した。

人間の目は、明るさに応じて使われる視細胞（明所は錐体，暗所は桿体）が異なる。特に暗所視におけるブルキンエ効果は、よく知られている。各波長における放射束相対値（全波長領域における絶対視感度のピークに対する比）を図6に示す。図中、明所の絶対視感度（lm/W）ピークは555nmにあり、暗所では507nmがピークとなる。視環境に応じてこれらのピークに近づけられれば、低消費電力でありながら明るさは維持される。このコンセプトに基づき開発したLED照明を図7に示す。このLED照明は、中央に人感センサ、その外周部にブルキンエ効果を活用した暗所視用LEDを6素子配置し、さらにその外周にはAC電源用のLEDを30素子配置することで暗所視と明所視を使い分けられる構成とした。暗所視における出力は0.14Wであるが、生産上0.15Wに統一した。この開発したLED照明（紫色7000K）と従来LEDとを比較すると、特に暗所視のピークである507nmでは、その差が顕著である。また、従来品と開発品のLED素子を同条件下で暗所視照度計で測定した結果、従来品の暗所視照度が7.2lxに対し、開発品は8.9lxと20%性能が向上した。

図6. 放射束相対値（絶対視感度）⁴⁾

図7. LED照明⁴⁾

4. エネルギー収支予想(計画仕様)

ここでは、本システムのエネルギー収支予測について定量化する。実証サイトのトイレ機器数に対し、LIXIL社内で測定した男子トイレの平均使用頻度5.3回/人・日を参考として、男子トイレの暗所視モードにおける1日あたりのエネルギー収支を式(1)にて確認する。表2には実使用を想定した計算条件を示す。

表2. 計算条件

ΣPb : 一日の総充電電力量(Wh)		Pb : 取出し電力(W/台)	
ηc : コンバーター効率		t : 使用時間(h/台)	
ΣPc : 一日の総消費電力量(Wh)		N : 総使用回数	
ΣT : 全台数点灯予測時間(h・台)		PL : 発光電力(W/台)	
ΣS : 1日の総待機電力量(Wh)		ηb : LED回路駆動効率	
		ηd : 放電効率	
小便器	計画人員64人が5.3回/人・日(実働12時間)の使用とし、来客数も含め1.2倍とした。		
	洗浄時間は7秒(前洗浄2秒, 後5秒), 保護洗浄2回/台・日とした。		
	照明点灯時間は36秒/回(空気調和衛生工学会)		
大便器	計画人員64人が1回/人・日の使用とし、来客数も含め1.1倍とした。		
	1回使用(13秒)につき2回洗浄(使用前と使用后)とした。		
	男子トイレは無窓で外光が得られず、ブースは昼夜問わず照明点灯時間は300秒/回(空気調和衛生工学会)		

$\Sigma Pb = Pb \times t \times N \times \eta c \geq \Sigma Pc = PL \times (\eta b \times \eta d)^{-1} \times \Sigma T + \Sigma S \dots (1)$

結果、暗所視モードでの節約対応によるエネルギー収支予測は、 $\Sigma Pb = 1.484$ (Wh) $\leq \Sigma Pc = 1.962$ (Wh) となり、消費電力量の約75%を発電量でまかなえる結果を得た。本計算条件は、無窓トイレの収支予測であるため、有窓トイレでは、より余裕のある結果になると考えられる。以上、各機器の仕様について表3にまとめる。今後、平時と利用状況が異なる非常時の運用制御については、継続利用可能時間はじめ、より詳細な検討が必要と考える。また、バッテリーについては、常設設備として耐用年数等の検証も必要と考えるが、現システムで小型の18650電池を使用していることから、非常時の常設トイレの継続的利用が『汎用的な蓄電型単電池1本を備蓄すること』で実現する意義も大きいと考え、両面から検証を続けたい。

表3. ゼロエネトイレ照明システム機器仕様一覧

小便器(センサー一体形ストール)	照明器具(暗所視モード)※
排水方向: 壁	定格電圧: DC24V
洗浄方法: スプレッダー洗浄	定格消費電力: 0.15W
洗浄水量: 0.8L~2L	人感センサー(内蔵): 焦電型赤外線型
設備保護洗浄: 2時間連続して使用者がいない場合に2L洗浄	人感センサー検出範囲: 41°
電源: 自己水力発電方式	バッテリー(リチウムイオン18650電池)
大便器	定格出力電圧: 3.7V
排水方向: 床上排水・中水仕様	定格容量: 3400mAh
洗浄方法: 水道直結式	耐用年数想定: 4年
洗浄水量: 大5L/小3.8L	(小便器自己水力発電方式実績より)
大便器用発電機※	制御基板(コンバータ、マイコン等)※
出力電圧: 4.234V	定格消費電力: 4μW
出力電力: 0.949W	(実証用履歴データ送信電力を含む)
小便器用発電機※	照度センサー照射角: 40°
出力電圧: 4.235V	照度センサー閾値: 200lx
出力電力: 1.030W	

※は開発品

5. 実測データの概観

実証サイトで、測定を行っている項目について表4に示す。各種データについて、1秒毎の測定値がデータロガーに蓄積されている。

表4. 実証サイトにおける測定項目一覧⁵⁾

測定対象	測定項目
Li-Ionバッテリー	電池電圧 [mV] 電池電流 [mA] 電池残量 [%] 放電電圧 [V] 電池満容量 [mAh] 電池残容量 [mAh] 過電力放電 [01]
水力発電機	発電電圧 [V] / 各設置箇所
LED照明	ZETLEDダウンライト [01] / 各設置箇所
センサ	照度センサ信号 [01] 人感センサ [01]
システム動作状況	外部充電 [01] ZET機能 [01] DC24V入力 [01] ZET Mode [01] 環境温度 [°C]

今回、同実証サイトにおいて唯一の外的要因であり日中の節電要素として利用している自然光が、有窓トイレにとって最も不利な条件である冬至を対象として実測データの概観を行った。2014年の冬至である12月22日0:00:00~23:59:59における男女トイレの実測データに基づき、ゼロエネトイレ照明システムの試験的運用から観察されたシステムとトイレ構成の特徴的な相関関係を概観する。

図8. 実測データ (左) 女子トイレ (右) 男子トイレ⁵⁾

男女各トイレにおける、毎秒のバッテリー残量[mAh]、発電量[V]、LED点灯[箇所]の推移を図8に示す。LED点灯は、LED照明の総点灯箇所数の合計値である。

女子トイレでは、00:00:00～07:17:42の間、回数は少ないもののトイレ使用に伴って、バッテリー残量は1507 mAhから1498 mAhまで減少した。その後、照度センサの検知により07:17:42～15:20:38の間、自然光利用が行われた。この間、LED消灯により消費電力がゼロになると共に、トイレ使用による発電のみが起るため、バッテリー残量は1498 mAhから1539 mAhまで増加した。一方15:20:38以降は、照度センサの検知によりLEDが点灯したことで、発電量とLED消費電力量の収支によりバッテリー残量は1539 mAhから1437 mAhまで減少した。

男子トイレでは、00:00:00～09:00:00の間、利用回数は少ない。図中にLEDの点灯を伴わない発電が複数確認できるが、これは小便器の設備保護洗浄による定期清掃時の水流を示している。設備保護洗浄により、LED消費のない状況下で発電が起り、バッテリー残量は1770 mAhから1786 mAhまで増加した。その後、主な利用時間帯である09:00:00～19:00:00の間は使用率が徐々に増え、発電量とLED消費電力量の収支によりバッテリー残量は1786 mAhから1522 mAhまで減少した。19:00:00以降は利用回数が減って消費が緩やかになり、最終的には1502 mAhまで減少した。

最終的なバッテリーの減少量として、女子トイレでは-34 mAhで、バッテリー満充電時の1.7%、男子トイレでは-268 mAhで13.4%であり、男子トイレにおいて現システムのバッテリー満容量の想定で一週間程度は継続利用できる事が分かった。

年末で学生利用者が少ない状況下の実証データではあるが、男女それぞれのトイレにおける衛生設備構成と自然光利用による平面計画の特徴が、発電と消費の収支バランスに影響をもたらし、バッテリーの持続的利用に貢献している可能性が考察された。

6. まとめ

本稿では、東北大学キャンパス内に構築したゼロエネトイレ照明システムの実証サイト概要と試験的運用による実測データの概観について報告を行った。従来の外付け・分離型の非常時対応を常時システムに内包する最適化プロセスにおいては、常時・非常時を連携する全体構成からエネルギー需給の弾力的維持を構成する要素に至るまで統合的視点にたった整備指針が求められる。

また安全・衛生・快適・省エネに関わる複合的指標の検証や、トイレにおける人間行動に関する設備機器の各種閾値設定についても、多面的な利用状況に対する最適化の検討が必要である。今後、実証環境において収集したデータを元に、運用ロジックの検証を行い安定的なZETシステムの構築を目指したい。

(謝辞) 本研究に際し資料提供等のご協力をいただきました東北大学施設部、実証サイトの設営およびLED照明等の開発にご協力頂いた(株)LIXIL熊谷力也氏、安尾貴司氏、松田宏氏、京セラ㈱大平雅寛氏、今朋哉氏、児玉崇一氏ならびに関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 前田裕子著. 水洗トイレの産業史, 名古屋大学出版会, 2008. 5
- 2) 加藤他: 震災時の避難所等のトイレ・衛生対策, 保健医療科学 Vol. 59, No. 2, 2010
特定非営利活動法人日本トイレ研究所「災害時のトイレの機能の確保に関する調査報告書」(平成23年8月)。
- 3) 石田壽一他: 東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ: ZET 全体構成について, (その5) 日本建築学会大会学術講演梗概集 2015
- 4) 石井久史他: 東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET 整備について, (その6) 日本建築学会大会学術講演梗概集 2015
- 5) 藤山真美子他: 東北大学におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET 実証サイトの整備について, (その7) 日本建築学会大会学術講演梗概集 2015

脚注

- 注1) 本稿において、「トイレ」という用語は、便器に関する機能一般と室としての空間を示している。
- 注2) 青葉山東キャンパスのライフラインの被害状況及び復旧過程を示す。
(道路) 青葉山東キャンパスにアクセスする公道6カ所の内、仙台城址付近の道路が石垣崩落のため通行止め、城址から八木山方面に向かう橋に段差が生じた。また川内キャンパスから青葉山キャンパスに至る道路には亀裂が入り、一時通行止めとなった。
(電気) 電気は2日後には復旧していたが、通電再開時の火災を防ぐため、すべての居室・実験室における通電時の立会いを実施したことから順次復旧となった。通電の全面再開は一週間以内には完了した。
(水道) 市内平地部の片平・川内・星陵・雨宮の各キャンパスは3月15日には、ほぼ通水されたが、丘の上の青葉山に関してはポンプ設備が地震被害を受けたため完全復旧に20日を要した。また、漏水やタンクの破損等の調査を行いながらの復旧となった。
(都市ガス) 仙台港のガス供給施設が津波により停止したが、日本海經由のバイパスにより約2週間後の3月24日から一部供給が開始され、青葉山キャンパスは4月以降徐々に復旧し、同月末までに完全復旧した。ガス供給は中圧導管が用いられ大規模災害時にも供給可能とされていたが、今回は供給元が被害に遭遇し復旧に時間を要した。
東北大学大学院工学研究科キャンパスデザイン復興推進室活動報告書所収(平成27年3月)
- 注3) 青葉山東キャンパスに滞在していた大学関係者の緊急避難場所として、震災時に一部仮使用中であった中央棟食堂エリアを開放し使用した。
- 注4) 事業継続性を目的とした計画(Business Continuous Planning)

[2015年6月3日原稿受理 2015年7月21日採用決定]