トイレにおけるゼロ・エネルギー照明システムに関する研究

エネルギー・ハーベスティング技術を使った ZET 照明システムの実建物への実装

STUDY ON ENERGY ZERO BALANCE BASED LIGHTING SYSTEM IN TOILET

ZET lighting system using the energy harvesting technology implement to actual building

石井 久史^{*1}, 藤山 真美子^{*2}, 小林 光^{*3}, 石田 壽一^{*4}*Hisashi ISHII, Mamiko FUJIYAMA, Hikaru KOBAYASHI
and Toshikazu ISHIDA*

In this research, the relationship between the possibility of zero balance of energy and the excretion were confirmed based on the data obtained from the demonstration experiment of ZET system. In the windowless the gents' toilet, found that the zero balance of energy could be achieved by reducing energy used for the behavior of needless excretion and wrong detection of lighting. The energy loss due to the lighting of unnecessary area for the excretion accounts for 2.8 to 15.7 %. In parametric study, one with the daylight window has surplus capacity from 1.65 to 3.65 times comparing to windowless one.

Keywords : *Energy harvesting, Energy Zero Balance, Zero Energy Toilet (ZET), Business Continuity**Planning at Ordinary Time, Hydroelectric Power, Behavior Pattern at Toilet,*

ハーベスティング, エネルギーゼロバランス, ゼロ・エネルギー・トイレ(ZET), 常時 BCP, 水力発電, トイレの行動パターン

1. 序

自然災害は、時として国民の生命や財産に大きな被害をもたらす。前の東日本大震災では、建築物の倒壊や損傷、震災直後の火災や津波などによって甚大な被害を受けた¹⁾。震災には、直接的な被害とは別に震災直後から復旧に向けた間に起こる二次的被害がある。二次的被害は、避難先の衛生状態が悪化し発症する感染症や自ら水分補給を抑制することに起因する血栓症等が挙げられる²⁾。すなわち、トイレ環境の悪化は、臭気や使い難さだけの問題ではなく、生死にかかわる問題となり得る。そのため、災害時には、このリスクを軽減する必要がある。現状では、主な対処法として仮設トイレの設置が行われている。しかしながら、被災地に仮設トイレが行き渡るまで4日以上を要した自治体が66%を占め³⁾、タイムリーに対応しきれていないとは限らない。このような状況では、避難所や防災拠点に十分に機能を果たすことは難しく、被災初期から機能できるトイレ環境作りが欠かせない。災害時にトイレで想定される懸念事は、臭気、汚損、暗い、恐い、寒い、数が少ない、段差、設置場所が遠い、男女共用およびプライバシーがない等であり、物理的機能による充足と精神的プレッシャーによる負担の双方に影響を及ぼす。これらを予防するには、使い難さの解消や常用トイレの冗長性の担保が肝

要であると考えられる。例えば、汚損、暗いおよび恐いに対しては、暗所で見え難いことの解消がある。また、寒い、数が少ない、段差、設置場所が遠い、男女共用およびプライバシーがない等に対しては、普段から使い慣れた建物内既設トイレの活用が望ましい。

一方、災害時における建物内トイレは、衛生状態が極めて厳しい状況にあることが報告⁴⁾されている。災害発生後のトイレは、系統電力や設備運転用電力の途絶など使い難さが助長される。一般的にトイレには、Fig.1 に示す様々な機器が設置されている。災害時などに最低限トイレ機能を維持するには、明るさ、換気および水が必要である。換気は建築的に窓で対処でき、洗浄水は外部から供給できるが、明るさは昼夜を問わず必要なため、窓だけでは不十分となる。東日本大震災で被災した東北大学工学部、同大学院工学研究科青葉山キャンパスの事例⁵⁾では、災害時の停電により、洗浄用水は敷地内の池から人力で供給できたが、視環境の確保には対処しきれなかった。その結果、衛生状態の悪化を一部で体感した。そのような体験から、災害時の停電状況下ではトイレ空間を綺麗に使うとしても薄暗さからの使い難さによりトイレ内の汚れが増大していくという仮説を立て要因を絞り込んだ。そこで、本研究では、災害時に大学や公共施設および一般事務所ビルなど、一定規模以上の建

^{*1} (株) LIXIL Technology Research 本部先端技術研究所
主任研究員・博士(工学)

^{*2} 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 助教・博士(工学)

^{*3} 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 准教授・博士(工学)

^{*4} 東北大学大学院工学研究科都市建築学専攻 教授・博士(工学)

Senior Research Scientist, Advanced Technology Laboratory, Technology Research Division, LIXIL Corporation, Ph.D.
Assist. Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.
Assoc. Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.
Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.

建築物に設置されるトイレの視環境維持に必要な照明関連エネルギーについて、平時に上水道圧からエネルギー・ハーベスティングを行い、そこで得られたエネルギーが常時非常時を問わずトイレ内照明消費電力を賄うことだけに焦点を充てた。このシステムをゼロ・エネルギー・トイレ (ZET: Zero Energy Toilet) 照明システムと呼ぶ。ZET 照明システムは、普段から使い慣れた災害時トイレという概念の元、災害時における地域防災拠点の業務継続および避難環境維持を円滑にすると共に建築のゼロエネ化に貢献することも目的としている。ここで対象とする非常時とは、下記の状況を想定している。

- 1) 上下水道が使える状況(損傷が小)でありながら電源復旧の遅れや計画停電のような状況でトイレ使用が出来ない状態。
- 2) 自家発電設備が稼働しているが基幹電源だけに供給され、トイレ照明用電源は供給されず使用困難となる状態。

どちらも上下水道に大規模損壊がなく、事業継続性が可能でありながら、トイレ環境として不便な状況を想定したものである。

以上より、本研究では、水道圧から発電した電力を蓄え、常時非常時におけるトイレ内照明電源等(Fig.1 □が対象)のゼロバランスに向けたシステムを構築するための実証研究を東北大学大学院工学研究科人間・環境系研究棟(2014 年竣工)にて試みた。本報では、実証実験にて取得したデータから、照明エネルギーのゼロバランスにおける検証を行い、その要因分析とゼロバランスの可能性について論じる。なお、本論文は日本建築学会大会学術講演において発表した内容⁶⁾⁷⁾と日本建築学会技術報告集で報告した内容⁸⁾に新たな実証実験データ、分析結果および考察を加えて作成したものである。

Fig.1 Breakdown of energy consumption in public toilet⁶⁾

2. システム概要

2.1 ZET 照明システム

本システムは、トイレ空間内における照明機器類の電力に対して、給水圧を活用して小型水力発電によりエネルギー回収を行い、その電力を効率よく充放電する回路、蓄電池および LED 照明を用いてエネルギー収支のゼロバランスを目指したものである。この ZET 照明システムは、主に発電部、消費部、蓄電部および制御部の 4 つで構成される(Fig.2)。発電部は、小便器や大便器ごとに発電ユニットを給水管側に設置しており、便器使用時と定期清掃時の流水により発電を行う。発電された電力は、制御基板内(以下:ZET 基板)に用意された高効率回路にて全波整流を掛け DC-DC コンバータにより降圧し、ZET 基板内の Li-Ion 蓄電池に蓄える。蓄えられた電力は、人感センサにより制御された LED 照明の電源、ZET 基板での制御電力およびセンサ待機

電力として活用する。蓄電不足時には電池による外部供給の運用が可能であり、常用は AC 電源による急速充電機能も設けている。

Fig.2 Outline of ZET lighting system^{6), 8)}

2.2 圧力損失と発電特性

小便器や大便器などの衛生機器は、流水により便鉢を清掃するが、その際、機器に応じた所定の給水水压を要する。特に本システムでは、給水側に発電機が設けられるため、発電機の圧力損失も併せて検討する必要がある。本システムの発電機は、従来品に改良を加え、小便器用と大便器用を用意した。発電能力と圧力損失は、相反関係にあり適宜調整を要する。そこで、実証実験に先立ち、小便器と大便器ユニットについて、圧力損失特性と疑似負荷電圧時の発電特性を確認した。その結果を Fig.3, Fig.4 および Table1 に示す。図中、縦軸は圧力損失[kPa]、電力[W]であり、横軸は流量[L/min]である。

Fig.3 Pressure loss-Flow rate curve⁶⁾

Fig.4 Electric power-Flow rate curve⁶⁾

Table1 Pressure condition of each toilet equipment and power generator

pressure	Supply water pressure [kPa]	Pressure loss [kPa]		Water pressure capacity available [kPa]
		Hydro electric generator	Sanitary ware	
Urinal	160	79.0	50.0	31.0
Water closet		59.0	70.0	31.0

小便器用発電機の圧力損失は 12L/min 時において 79kPa であり、大便器用は 16L/min 時において 59kPa であった。今回設置した東北大学工学研究棟 5 階の当該給水圧力は、160kPa 程度が見込まれたため、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。小便器全体の圧力損失は 50kPa、大便器全体の圧力損失は 70kPa であるから、発電機の圧力損

失と機器の圧力損失を給水圧力 160kPa から差引き、小便器大便器共に残余圧力は 31kPa となる。この結果を踏まえ、各実機において、同時使用下で円滑に流れることを確認した。

一方、発電特性は、Fig.4 に示す電力[W]-流量特性[L/min]関係から、小便器用で 12L/min 時に 1.030W、大便器用で 16L/min 時に 0.949W の発電能力が得られた。また、発電に最適な取出し電圧を把握するため、7V、11V、17V の電圧による発電特性も確認した。流量は、機器類の都合上、大学に設置したものよりも大きい、傾向は把握できるため、その流量で確認した。その結果を Fig.5 に示す。結果から、小便器大便器共に同一電圧の運用を想定すると 11V 時の発電が総じて大きいため、本実証では発電機電圧を 11V に設定した。

Fig.5 Power generation capacity by generated voltage and flow rate

2.3 充放電回路および蓄電池

充放電回路は、Fig.6 に示す様に水力発電機、全波整流基板、DC-DC コンバータ、電流制限器、放電用負荷抵抗器および LED 駆動回路で構成される。各デバイスにおける損失は、充電回路の全波整流基板 5%、DC-DC コンバータ 10%および電流制限器 10%であり、放電回路では抵抗損失 1%、LED 駆動回路損失が 20%である。これらに加えて、蓄電池の充電時内部抵抗 5%をカウントすると、充放電回路効率は 57.9%となる。このような充放電回路を本実験用に自作した⁶⁾。

電池は自己放電が少なく、電力密度の高い市販の Li-ion 電池を使用した。サイズは 18650(直径 18 mm、長さ 65.0 mm)で容量 3,400mAh、標準電圧 3.7V であり、充電、過放電および過電流保護機能付きである。Li-ion 電池の一般的な電圧許容範囲は 3.0~4.2V であるが、充放電回路の複雑さへの回避と充放電回数を増やすことに注力したため、今回使用する範囲は 3.4~4.1V とした。それにより、シンプルな制御回路が得られ、使用可能容量も全体容量に対して設計として 6 割を使用可能と想定し、約 2,040mAh を見込んでいる。

Fig.6 Outline of charge discharge circuit for ZET systems

2.4 LED 照明

本研究では、最小の投入エネルギーで高い明るさ感を得るためにブルキンエ効果による LED を実験用に開発した⁶⁾。Photo1 に外観を示す。この LED 照明は、中央に赤外線人感センサ、その外周部にブルキンエ効果による暗所視用 LED を 6 素子配置、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る構成とした。暗所視モードの出力は 0.15W である。Fig.7 に全波長領域における絶対視感度のピークに対する比を示す。開発した LED 照明(紫色 7000K)と従来 LED とを比較すると、暗所視のピークである 507nm では、その差が顕著である。また、光源を床面から 2.7m の高さに配置し、従来品と開発品とを床面に配置した暗所視照度計で計測比較した結果、従来品が 7.2 lx に対して開発品は 8.9 lx と 24%性能が向上した。LED 素子性能の向上とリフレクタなどの調整により、最適な実験用 LED 照明を自作した⁶⁾。

Photo1 LED down light⁶⁾

Fig.7 Spectrum of LED lighting developed⁶⁾

3. 実証サイト

実証サイトは、東北大学工学研究科人間・環境系研究棟 5 階の男女トイレを対象とした(Fig.8)。対象のトイレは、5 階の職員や学生が日常的に利用し、一般的な文教施設における実測データを得られる環境にある。同トイレは、5 階の利用人員を男性 64 人、女性 21 人として適正器具数算定表に基づき器具が設置されている。Fig.9 に配置図を示す。男性用トイレは、大便器 2 台、小便器 4 台、手洗器 2 台、LED 照明 7 灯で構成され、各便器のみ水力発電機を設置し、手洗器は将来的に発電機の増設が可能な仕様とした。男性用トイレは、無窓のため、昼夜問わず LED 照明の点灯を要する環境にある。

一方、女性用トイレは、大便器 3 台、手洗器 2 台、LED 照明 8 灯が配置され、男性用トイレ同様に便器にのみ発電機を設置している。ただし、女性用トイレには、西側に全面採光可能なフロストガラス調の窓を有し、昼光利用が可能であるため、照度センサを 3 か所に設置して照明点灯を制御した。また、夜間は、西側に配置された研究室の照明により間接的に女性用トイレ内が照らされる環境にある。

Fig.8 Floor plan of demonstration experiment site^{7), 8)}

Fig.9 Layout of toilet equipment, power generator and LED lighting^{7), 8)}

4. 実験条件

4.1 実験方法

実証実験は、5 階利用者の年間スケジュールによって滞在人員の増減を考慮の上、閑散期、通常期、繁忙期の 3 期に分けて土日を含んだ 10 日間で実施した。実証実験中、蓄電池の不具合から 2016 年 3 月に実施した閑散期のみ、1 週間の測定となっている。実施日程を Table2 に示す。実証実験の実施にあたっては、トイレ入口上部に実証実験実施中の張り紙をして利用者に周知した。

Table2 Duration of the experiment

Period	The date of implementation
Normal	28th Nov.2015 - 7th Dec.2015
Busy	23rd Jan.2016 - 1st Feb.2016
Off	17th Mar.2016 - 23rd Mar.2016

4.2 計測項目および計測方法

トイレ内照明エネルギーの収支に関わる影響要因は、昼光率、発電量、充放電回路効率、LED 回路効率、センサ類消費電力、基板制御電力、利用者の振舞い、機器配置計画などが考えられるが、ここでは、発電部と消費部における電流電圧および点灯箇所別点灯回数について計測した。計測項目は、電池電圧[mV]、電池電流[mA]、電池残容量[mAh]、電池満容量[mAh]、各発電機の発電時電圧[V]、環境温度[°C]、照度、各 LED 照明の点灯の有無を 1 秒ごとにカウントした。また、実験開始にあたっては、充電電池が満充電或未充電であると正確に充放電量を確認できない恐れが想定されるため、電池残容量が 50% の状態から計測を開始した。女性用トイレの照度センサは、床面から 1100 mm の高さにて①～③(Fig.9)のどれか一つでも照度が 10 lx 以下となった時点で人感センサが検知する制御とした。

4.3 機器の特性とモードの決定

実証実験に採用した小便器には、主に従来モード、節水モード、超節水モードの 3 種類がある。Table3 に各モードの特徴を示す。小便器の洗浄は、予備洗浄と本洗浄で構成される。予備洗浄は、尿の飛散や付着を抑制するため、使用前に 0.5L の洗浄が行われる。一方、本洗浄は、即時洗浄と追加洗浄(保護洗浄)で構成され、即時洗浄は、使用者が立ち去った直後に行い便鉢を洗浄してトラップ内の封水を入れ替える役割を果たす。さらに、追加洗浄は、使用者が立ち去った後、次の使用者が予測した時間通りに来なかった場合に追加で行う洗浄であり、所定の時間間隔で使用状況に応じて適宜追加洗浄が行われる(Table3)。追加洗浄時には、実際に人が小便器を使用している訳ではないので、LED 照明の消費は無く単に発電のみがカウント

される。本実証実験では、一般的に広く利用されている節水モードを選択した(Table3 網掛け部)。

大便器の洗浄には小洗浄と大洗浄があり、小洗浄と大洗浄の発電量には違いが生じる。予備実験では、小洗浄は、大洗浄に対して平均で 0.78 倍の発電量であった。小洗浄と大洗浄は、用途に応じて使い分けられるが、必ずしも正確に使い分けられているとは限らない。通常、男性用トイレでは、トイレブースを使用する主目的は大便時に限られることが多く、女性用トイレでは小便利用が多いと想定されるが、本実験では、単にブースの使用回数としてカウントした。

Table3 Flashing type and flashing mode for urinal

Mode	Flashing type	Pre flashing	Main flashing	
			Immediately flashing	Additional flashing time
Normal		0.5L	4.0L	-
Water conservation		0.5L	2.0L-4.0L	0.25hr-8hr
Super water conservation		0.5L	0.8L-2.0L	0.25hr-2hr
		None		

4.4 発電量および消費量

発電量は、上水の使用状況に応じて電流値が変動することに加え、計測は蓄電池出入口近傍のため、照明点灯による消費側の電流値も含まれる。そのため、日当りの総発電量[Wh]は、計測点の発電時電圧と電流値だけでは導けない。そこで、既知である LED 照明の消費電流 50mA を用いて各 LED 照明の合計点灯時間をカウントし、日当りの電池電圧と電池電流の増減から発電量を導いた。消費側電力量は、LED 照明、LED 基板、ZET 基板およびセンサ類に使用している電力量を合算し、LED 駆動効率や放電回路効率を加味した。

一方、発電側電力量は、本来、全波整流回路効率、降圧用 DC-DC コンバータ効率、電流制御器効率および充電電池効率 (Table4)を見込む必要があるが、ここでは、蓄電池近傍の計測点(Fig.6)データから蓄電池部において消費量と発電量との比較を行った。比較用の消費量と発電量は、式(1)、式(2)にて算定した。式(1)の右辺第 1 項は LED 照明の日当たりの消費電力量を示し、第 2 項は機器類の待機電力である。また、ここでは、放電時蓄電池内部抵抗は小さいため無視した。式(2)のカッコ内は、日当りの電池容量の増減であり、これに式(1)の結果を加え、充電時蓄電池内部抵抗の蓄電池効率と充放電電圧率を乗じて発電量を導く。エネルギー収支は、これらの比較で判別した。式(3)は、発電機部での各種効率を考慮した際の総発電量である。

$$\sum P_{CB} = \frac{I_L \cdot \left(\sum_{k=1}^n a_k \right) \cdot t}{\eta_d \cdot \eta_e} \cdot V_D + \int_{h=0 \sim 24} (I_b + I_l + I_s + I_g) \cdot V_D \quad \text{式(1)}$$

$$\sum P_{GB} = \left\{ \sum P_{CB} + (I_{end} \cdot V_{end} - I_{start} \cdot V_{start}) \right\} \cdot \eta_b \cdot \frac{V_C}{V_D} \quad \text{式(2)}$$

$$\sum P_G = \sum P_{GB} / (\eta_r \cdot \eta_c \cdot \eta_l \cdot \eta_b) \quad \text{式(3)}$$

ここに

$\sum P_{CB}$:比較用消費量[Wh]	$\sum P_{GB}$:比較用発電量[Wh]	$\sum P_G$:総発電量[Wh]
I_L :LED の定格電流[mA]	h :時間[h]	
I_b :ZET 制御基板電流量[μAh]	I_l :LED 制御基板電流量[μAh]	
I_s :センサ制御基板電流量[μAh]	I_g :発電制御基板電流量[μAh]	
I_{start} :開始時電池残容量[mAh]	I_{end} :終了時電池残容量[mAh]	

V_{start} : 開始時電圧[mV]	V_{end} : 終了時電圧[mV]
a_k : 各照明の日当たりの点灯回数	t : 1 回当たりの点灯時間[sec]
η_d : 放電回路抵抗負荷効率	η_e : LED 照明駆動効率
η_b : 蓄電効率	η_c : DC-DC コンバータ効率
η_r : 全波整流基板効率	η_l : 電流制限器効率
V_D : 放電電圧平均値[mV]	V_C : 充電電圧平均値[mV]

Table4 Efficiency of each component [%]

Full wave rectification	η_r	95	DC-DC converter	η_c	90
Current limiters	η_l	90	LED drive circuit	η_e	80
Discharge circuit	η_d	99	Battery	η_b	95

各種機器類の待機電力を Table5 に示す。放電時電池電圧の平均値から ZET 基板や LED 基板のセンサなどの待機消費電力量は男性用トイレで 0.080 [Wh/day], 女性用トイレで 0.084 [Wh/day]となる。

Table5 Standby power consumption of ZET system circuit

	Energy consumption	
	The Gents' Toilet	The Ladies' Toilet
ZET circuit board I_b	850 μ Ah	850 μ Ah
LED circuit board I_l	5 μ Ah $\times$ 7 = 35 μ Ah	5 μ Ah $\times$ 8 = 40 μ Ah
Illuminance sensor I_s	-	4 μ Ah $\times$ 3 = 12 μ Ah
Electric power board I_g	0 μ Ah	0 μ Ah
Discharge voltage (av.) V_D	3.756 V	3.860 V
Total consumption per day	0.080 Wh/day	0.084 Wh/day

5. 実験結果および考察

5.1 男性用トイレ（無窓）

日当たりのエネルギー収支と各期間で平均化したエネルギー収支を Fig.10 に示し、日当たりの総利用者数、各機器利用者数およびエネルギー収支を Fig.11 に示す。エネルギー収支を示すエネルギーバランス率は、発電量を消費量で除して無次元化した値である。また、Fig. 10, Fig.11 では、12 月 7 日(月)のみセンサに異常を確認したため、このデータを除外した。さらに、洗面水洗のみの利用、清掃時の SK 利用は、全体に占める割合が少なかったため、これらも除外した。

実験結果から期間別のエネルギー収支は、総じて発電量よりも消費量の方が大きく、エネルギー収支はゼロバランスを保てなかった。

一方、Fig.10 が示すように通常期と閑散期の休日(土日)では、発電量が消費量を上回り、ゼロバランスが達成できた。全般的には、消費量が 1Wh 以下の時にエネルギーバランス率が 1.0 以上となる傾向があり、利用頻度の高い繁忙期では、全曜日で 1Wh を超えたため、ゼロバランスできていない。また、利用者が増加するほど消費量と発電量の乖離が生じる結果となった。したがって、本システムでは、消費量が 1Wh くらいを閾値としてゼロバランスの可否が決定する。

Fig.11 中の数値は、全利用者数であり、斜字数値はトイレブースの利用者数を示す。小便器の利用者数は、全体からトイレブース利用者数を差し引算定する。実験結果から、各期間共に平日と休日(土日)の利用者数による差が大きい。平日の利用者数は繁忙期>通常期>閑散期だが、休日は繁忙期>通常期=閑散期であり、特に繁忙期の休日は全体を通じて最も利用者数の多い日であった。また、本システムでは、全利用者数が 61 人以下でトイレブース利用者数が 20 人未満であれば概ねゼロバランスするが、この利用者数を超えると

エネルギーバランス率は 1.0 を下回り始める。これは、利用者の振舞い方、機器発電能力および追加洗浄等に関係があると推察する。

Fig.10 Energy balance for each day in The Gents' Toilet

Fig.11 Total number of users for each day in The Gents' Toilet

次に消費の仕方を把握する上で各便器の平均利用者数を確認する。Table6 には、各小便器と各トイレブースにおける日当たりの平均利用

者数を期間別にまとめ示す。期間別平均利用者数は、通常期 72.9 人に対して繁忙期で 1.6 倍、閑散期で 0.8 倍である。小便器利用者は、全体の 66.7～75.1%を占め、その割合は繁忙期が高く閑散期では低い。また、トイレブースの利用者数は、通常期と閑散期は概ね同じだが、繁忙期は通常期と比べ 42%多い。次に消費電力への影響を考慮し、便器やブースの位置ごとの利用頻度を確認する。実験結果では、出入口に一番近い小便器 D の利用頻度が最も高く、小便器利用者は全体の 65～69%を占めた。続いて、小便器 B が高く、一番奥の小便器 A、小便器 C の順となった。この小便器 C と最も利用頻度の高い小便器 D との差は 7.0～8.4 倍であった。したがって、男性用トイレでは、出入口に一番近い小便器は利用頻度が最も高く、その隣の小便器は最も低く利用を避ける傾向にある。一方、トイレブースでは、出入口に近いブース A に対するブース B の利用回数は 1.2～1.8 倍で小便器ほどの差はない。この要因は、設置数が少なく、片方が利用されると選択の余地が無いためである。トイレブースも小便器同様に出入口に近いブースが選択されることが読み取れる。

Table6 Average usage per day for each toilet equipment [times/day]

	Total	Urinal					Water closet		
		A	B	C	D	Total	A	B	Total
Normal	72.9	5.9	7.4	4.9	34.2	52.4	7.2	13.3	20.5
Busy	117.4	9.3	10.4	7.3	61.2	88.2	13.2	16.0	29.2
Off	59.2	3.9	5.0	3.6	27.0	39.5	7.7	12.0	19.7

Fig.12 と Fig.13 には、小便器利用とトイレブース利用の期間別平均利用者数を時間毎に示す。平均利用者数の推移は、各期間共にオフィスアワーに集中し、繁忙期の小便器のみ深夜から明け方にかけて利用者の増加が確認された。小便器利用では、通常期と閑散期で大きな差はない。また、トイレブースでも、一部を除き期間別による大きな差は見られず、利用者数は小便器に比べ総じて少ない。

Fig.14 は、トイレ出入口人感センサ(Fig.9 照明①)が検知した期間別平均検知回数を時間毎に示す。これは、トイレ利用を意図しない廊下の通行者がトイレ出入口の人感センサに検知された回数であり、トイレ利用目的の検知はカウントしていない。Fig.14 中、12:00 - 18:00 では、通常期で 10 [回/h]、繁忙期 15~20 [回/h]、閑散期 5 [回/h]くらいと誤検知点灯の多さが覗える。これらを日当りの平均点灯回数で表すと通常期で 122 [回/h]に対し、繁忙期はその 2 倍、閑散期は 0.5 倍であった。また、繁忙期は、深夜や明け方の誤検知点灯もあり、人員の滞在時間の長さや滞在者数に依存した結果と考える。

Fig.12 Average usage number of urinal per hour for The Gents' Toilet

Fig.13 Average usage number of toilet booth per hour for The Gents' Toilet

Fig.14 LED sensor detection number of lighting No.① per hour

Table7 は、トイレを 1 回使用する際に点灯する LED 照明の平均点灯回数を示す。平均点灯回数は、総じて奥に位置する小便器やブースが多くなる。出入口に近い小便器 D と C は、LED 照明の配置 (Fig.9) から理論上の点灯回数は同じだが、ここでは差が生じた。これは、点灯の必要のない照明センサ検知が原因であり、利用者の振舞い、配置計画の影響と推察する。トイレブースでも同様であった。

Table7 Number of LED lighting due to using toilet once [times]

Toilet equipment Period	Urinal				Water closet	
	A	B	C	D	A	B
Normal	10.7	9.7	9.8	8.2	13.2	8.5
Busy	11.7	10.9	9.8	9.0	13.3	9.9
Off	11.4	11.4	11.1	8.4	12.8	10.8

Table8 には、トイレを 1 回使用する際の期間別平均消費量と平均発電量を示す。平均消費量は、トイレで排泄行為を済ませるまでに要した照明点灯回数分の電力および待機電力の積算値を利用者数で除した値の期間平均である。また、平均発電量は、小便器を例にとると予備洗浄と本洗浄に加え追加洗浄も含めた発電量の積算値を利用者数で除した値の期間平均である。

実験結果から、通常期、繁忙期、閑散期に関わらず、消費量は発電量より大きく、発電量で消費量を賄えていない。平均消費量は、全体で通常期<繁忙期<閑散期となるが、小便器利用では、繁忙期<通常期<閑散期となり、トイレブース利用では、通常期<閑散期<繁忙期となった。繁忙期の小便器利用では、例えば同時利用者により消費量が少なく、繁忙期のトイレブース利用ではブース内滞在時間が長い可能性がある。小便器利用とトイレブース利用における平均消費量の差は 1.1～1.4 倍と後者の方が多く、これは、点灯回数

と滞在時間に依存する。平均発電量は、小使器利用において繁忙期＜通常期＜閑散期であり、繁忙期における1回当りの発電量が少なくなる原因は、追加洗浄が減少したためである。追加洗浄は、利用者数が増えるほど洗浄回数が減少し、1回当りの発電量は少なくなる。また、トイレブース利用では、繁忙期＜通常期＜閑散期となり、通常期と閑散期は概ね同じで繁忙期よりも発電量が多い。これは、1度の利用で2回以上洗浄を行った結果と推察する。さらに、小使器とトイレブースの比較では、トイレブースの発電量が小使器の1.1～1.4倍となり、追加洗浄を除くと1.5～1.8倍まで拡大する。

本システムでは、利用者数が61人以下の場合に消費量は約1Whとなり、1回当りの利用によるエネルギー収支が消費量＞発電量であっても追加洗浄によりゼロバランスの可能性は高まるが、利用者数が61人を超えると追加洗浄回数が減少する。そのため、消費量と発電量の間で乖離が生じ、その差は拡大していく。つまり、消費量と発電量の差分は、追加洗浄により消費量1Whまでは賄えるが、それ以降はゼロバランスが保てない。したがって、ZETシステムでは、利用者数、誤検知回数、機器設置計画、追加洗浄および利用者の振舞いがエネルギー収支に影響することが明らかとなった。

Table8 Consumption and generation per using toilet once [mWh/time]

Period	Power Consumption			Power Generation				
	Total	Urinal	W.C.	Total Incl.added flushing	Total Exc.added flushing	Urinal		W.C.
						Incl.added flushing	Exc.added flushing	
Normal	14.83	14.24	17.36	13.52	9.43	12.78	8.95	16.34
Busy	14.95	13.82	19.27	11.30	9.33	10.44	8.62	14.53
Off	16.80	16.78	17.89	15.46	11.00	15.44	10.97	16.49

5.2 女性用トイレ（有窓）

各期間におけるエネルギー収支の平均値と一日当りのエネルギー収支をFig.15に示す。エネルギー収支を表すエネルギーバランス率は、発電量を消費量で除して無次元化した値である。また、女性用トイレは、昼光利用が可能だがトイレブース内は日中でも薄暗く感じることと利用者の振舞いを確認する目的で、閑散期のブース内に限り日中でもLED照明が人感センサで検知点灯するよう改良した。

実験結果から通常期と繁忙期の各期間別エネルギー収支はゼロバランスできたが、閑散期は消費量が大幅に増加し、エネルギー収支のゼロバランスは未達となった。消費量と発電量ともに、閑散期＞繁忙期＞通常期となるが、消費量は通常期0.084Whと比べ繁忙期1.9倍、閑散期5.6倍と閑散期の消費量増加が顕著であった。一方、発電量は、通常期と繁忙期において日曜日とその翌日を除き、発電量が消費量の1.5～4.8倍と大きいが、通常期の日曜日とその翌日は利用者が少ないため、待機電力0.084Whを発電量で賄えていない。

Fig.16には、日当りの利用者数を示す。通常期と繁忙期は、利用者数が40人以上でゼロバランスする傾向にあり、当然、利用者数が少なればゼロバランスできない。閑散期では、日当りの平均利用者が通常期と概ね同等にも拘らず、消費量は格段に増加した(Fig.15)。これは、比較実験において日中のブース内照明を人感センサにより検知点灯する運用にしたことが主な原因である。

各トイレブースにおける日当りの平均利用者数を期間別にまとめTable9に示す。通常期と閑散期は、男性用トイレと概ね同じであり、繁忙期は通常期の1.58倍であった。ブースの利用状況は、一番手前

のブースCが圧倒的に多く、全利用者数の56～69%を占めた。通常期と閑散期の利用者数はA>Bだが、繁忙期はA<Bとなった。通常期は男性用トイレ同様に利用者が隣り合うことを避ける傾向にあるが、繁忙期では時間的余裕の無さからか、手前側ブースの選択を助長したと推察する。また、昼光利用時の利用者率は全体の37.6～48.2%を占め、消費量削減への寄与度が伺える結果となった。

Fig.15 Energy balance situation for each day in The Ladies' Toilet

Fig.16 Total number of users for each day in The Ladies' Toilet

Table9 Average number of users for toilet booth in The Ladies' Toilet

Booth Situation	Toilet booth [times/day]				Users of 9:00-14:59
	Total	A	B	C	
Normal	36.7	9.3	6.5	20.9	15.5
Busy	58.0	11.4	14.2	32.4	21.8
Off	33.8	6.3	4.1	23.4	16.3

Fig.17 には、各トイレブースの期間別平均利用者数を時間毎に示す。全期間の消費は、オフィスアワーに集中している。通常期と繁忙期は、オフィスアワーで概ね同じ傾向にあり、閑散期のみ利用者数が減少した。また、繁忙期では、深夜から明け方のカウントが多く、男性用トイレ同様に大学での長時間滞在が要因の一つと考えている。

Fig.18 には、トイレ出入口の照明センサ(Fig.9 照明②)が検知した期間別平均検知回数を時間毎に示す。これは、男性用トイレ同様に、トイレ利用を意図せず、廊下を通行するなどしてセンサに検知された回数である。Fig.18 中、通常期は検知されておらず、繁忙期と閑散期は昼光利用時間を除くオフィスアワー、夜間、深夜および明け方に検知された。Fig.18 中の網掛け部 9:00-14:59 は、昼光利用可能領域で照度センサが閾値を下回らず人感センサが作動しないが、照度センサ②は西側窓近傍に位置するセンサ①、③よりも暗く影になる出入口付近に配置したため、計測値としては安全側の結果となる。

Fig.17 Average number of users per hour for toilet booth

Fig.18 Sensor detection number of users per hour for toilet booth

Table10 は、トイレを 1 回使用する場合の期間当りの平均消費量と平均発電量を示す。平均消費量は、トイレでの排泄行為を済ませるまでに要した LED 照明の点灯回数による消費量および待機電力の積算値を利用者数で除した値である。また、平均発電量は小洗浄と大洗浄により発電された積算電力量を利用者数で除した値である。実験結果から通常期と繁忙期の消費量は、発電量よりも小さいため、発電量で消費量は賄えるが、閑散期では発電量に対して 1.8 倍ほど消費量が増加した。閑散期の消費量は、通常期よりも平均利用者数が少ないにも拘らず、4.2~5.0 倍に増加した。この要因は、誤検知

点灯と比較実験により閑散期のみ昼光利用時の人感センサ検知を行ったためである。誤検知点灯は、繁忙期に比べて閑散期では少なく要因から除外できるため、主要因はトイレブース内で LED 照明を連続点灯させたことに絞られる。また、発電量は、通常期や繁忙期と比べて、閑散期は 1.4~2.1 倍増加した。閑散期は、トイレ利用者数が通常期と比べ 8%、繁忙期で 42%少ないが、それでも発電量は増加した。これは、1 回のトイレ利用に対して複数回洗浄を行っている可能性が高い。何故、複数回洗浄を行うのかの原因は特定できていないが、利用者は少なくとも発電量が増加する結果となった。

Table10 Power consumption and generation per using toilet once

Booth Situation	Power Consumption [mWh]				Power Generation [mWh]			
	Total	Toilet booth			Total	Toilet booth		
		A	B	C		A	B	C
Normal	3.81	0.97	0.68	2.17	6.16	1.57	1.08	3.50
Busy	3.17	0.62	0.78	1.77	4.18	0.85	1.04	2.29
Off	15.86	2.91	1.92	10.85	8.66	1.45	1.24	5.97

女性用トイレは、男性用トイレに比べ利用者数は少なく、消費量発電量共に限られるが、昼光利用により消費量は抑制できる。そのため、エネルギー収支ゼロの達成率は高い。しかしながら、女性用トイレは、旗竿型経路(Fig.9)により、夜間等には本来点灯の必要がない照明による消費量増加が懸念される。また、トイレブースの利用頻度は、一番手前のブース C が高いが、利用前に隣ブースの確認等選択行動による迷い、利用後の忘れ物や洗浄状況の再確認行動と思われる点灯も散見された。この結果から、プランニングと機器の配置計画、センサの検知範囲および検知方法が重要であると考えられる。

6. 実験結果に基づく改善検討

6.1 男性用トイレ

実験では、エネルギー収支の影響要因として発電能力や機器消費電力、誤検知点灯数および利用者の振舞いが確認された。ここでは、誤検知の削減や動線計画および昼光利用などのケーススタディーを行い、エネルギーゼロバランスの可能性を確認する。

ZET 照明のエネルギー消費量は、利用者数、機器の配置、センサの検知範囲や方法および人々の振舞いに影響される。実験では、小便器利用に対してトイレブース内の照明も点灯するなど本来必要のない照明点灯が確認された。そこで、ここでは、排泄行為時の誤検知による点灯削減に加え、理想的な点灯予測回数と現実的な点灯予測回数および照明点灯のさせ方について検討した。Fig.19 は便器に至る動線を示し、Table11 には各便器における理想点灯モデルと現実点灯モデルおよび点灯回数を示す。理想点灯モデルは目的の便器に迷いなく到達し最小限の点灯数となる行動であり、現実点灯モデルは理想点灯モデルに排泄行為時だけ当該便器に連続点灯を追加したものである。これらの点灯パターンは、実験でも確認されており、排泄行為時における誤検知点灯の削減を含んでいる。さらに、点灯のさせ方では、Fig.20 の点灯モデルを想定した。実験での通常点灯は、同じ出力レベルで 7 秒間点灯し続けるが、エネルギー削減モデルでは、極端に明るさを損なわず点灯後と消灯前に出力調整を行い、通常点灯に比べて 6/7 秒モデルで 14.3%、5/7 秒モデルで 28.5%削減が可能となる。このモデルで削減した消費量を全消費量から減じてエネルギーバランス率を算定した。その結果を Table12 に示す。

Fig.19 Usage pattern regarding flow line plan for The Toilets

Table11 Ideal lighting pattern and number of lighting times for The Gents' Toilet

No.	Ideal lighting model	Realistic lighting model
Urinal	A '1②④③④②①	7 '1②④③③③④②①
	B '1②④③④②①	7 '1②④③③③④②①
	C '1②④②②①	5 '1②④④④②①
	D '1②④②①	5 '1②④④④②①
WC	A '1②④③⑥③④②①	9 '1②④③⑥...⑥③④②①
	B '1②④⑦④②①	7 '1②④⑦...⑦④②①

Fig.20 Lighting pattern of reduce energy consumption model

Table12 中，網掛部はゼロバランスした部位である。誤検知④による点灯のみ削減したモデルでは，全体のエネルギー消費に対して 2.8～6.4%，理想モデル⑥では 9.6～15.7%，現実モデル③は 3.5～8.0%の削減が可能となった。しかしながら，誤検知④と現実モデル③だけではゼロバランスはしない。また，理想モデル⑥では，通常期と閑散期でエネルギーバランス率が 1.0 を上回るが，全期間ではない。一方，照明の出力調整をした 6/7 秒モデル④は，理想モデル⑥と同様に全期間によるゼロバランスは達成できていないが，5/7 秒モデル⑤を採用することで全期間ゼロバランスが可能となる結果を得た。そこで，6/7 秒モデル④との組み合わせによる検討を行う。現実モデル③と④の組み合わせでは，ゼロバランスは可能となるが全期間ではなく，理想点灯モデル⑥と④との組み合わせにより，全期間でのゼロバランスが可能となった。本検討結果から，無駄な点灯削減と点灯のさせ方による削減を組み合わせることで，昼光利用が無い場合でもエネルギー収支ゼロが十分に実現できる見通しを得た。

Table12 Energy balance rate regarding each reduction model for The Gents' Toilet

Reduction behavior and Lighting pattern	Energy balance rate		
	Normal	Busy	Off
Experimental result	0.858	0.745	0.895
④Sensor detection	0.905	0.795	0.921
⑥Ideal lighting	1.019	0.918	1.026
③Realistic lighting	0.934	0.840	0.945
④The 6/7 model	1.001	0.869	1.045
⑤The 5/7 model	1.201	1.043	1.254
③+④	1.090	0.979	1.103
⑥+④	1.189	1.071	1.197

次に男性用トイレが昼光利用した場合の余力を検討する。条件は女性用トイレの実験結果と同じ 9:00～14:59 間で昼光を利用可能とした。Table13 の上段には，昼光利用時における出入口誤検知回数，小便器利用者数およびブース利用者数を示し，下段には昼光利用時削減後の日当りの消費量とゼロバランス率を各モデルと組合せモデルとして示した。ここに，昼光利用のみ削減した状態を①とする。検討結果から，昼光利用だけでは全期間でゼロバランスはできないが，誤検知④と組み合わせれば，ゼロバランスが可能である。また，理想⑥と現実③の組み合わせでは，大幅な効果向上が見込め，昼光利用①と理想モデル⑥では，1.78～4.31 倍の余力が得られる。さらに，無窓との比較では 1.65～3.62 倍の余力を有する結果を得た。

Table13 Reduction effect of lighting energy by using daylight for The Gents' Toilet

Reduced behavior		Normal		Busy		Off	
Lighting detection [Times/day]		79.2		45.5		31.2	
Urinal users [Persons/day]		24.7		16.0		13.1	
W.C. users [Persons/day]		13.2		8.8		7.9	
Result of parametric study		[Wh]	ratio	[Wh]	ratio	[Wh]	ratio
Total energy consumption [Wh]	①Daylight	0.49	1.94	1.32	0.97	0.67	1.40
	①+④Detection	0.43	2.22	1.29	1.00	0.66	1.42
	①+⑥Ideal	0.26	4.31	0.97	1.78	0.52	1.98
	①+③Realistic	0.34	3.24	1.10	1.57	0.60	1.73

6.2 女性用トイレ

女性用トイレでは，男性用トイレ同様に誤検知の削減や動線などのケーススタディーを行い，ゼロバランスの可能性を確認する。

Fig.19 に女性用トイレの各便器別動線を示し，Table14 には，各便器別点灯モデルと点灯回数を示す。ここでは，ゼロバランスしなかった閑散期を対象とし検討を行った。エネルギー削減方法は，LED 照明の点灯回数を削減することでゼロバランスの可能性を確認した。Table15 に検討結果を示す。閑散期の女性用トイレでは，誤検知④や理想モデル⑥，現実モデル③および照明点灯のさせ方などを検討したが，どれもゼロバランスはできていない。しかしながら，理想モデル⑥と 5/7 秒モデル⑤を組み合わせただけの場合には，ゼロバランスが実現できた。したがって，本システムでは，トイレブース内点灯を昼光利用時に行わなくても済む工夫(例えば半透明なドア)が必要であり，それにより，ゼロバランスの可能性は大幅に高まると考える。

Table14 Ideal lighting pattern and number of lighting times for The Ladies' Toilet

	Ideal lighting pattern	Realistic lighting pattern
A	'1②③④⑤⑥⑤④③②①	11 '1②③④⑤⑥⑥⑥⑤④③②①
B	'1②③④⑤⑦⑤④③②①	11 '1②③④⑤⑦⑦⑦⑤④③②①
C	'1②③④⑧④③②①	9 '1②③④⑧⑧⑧④③②①

Table15 Energy balance rate regarding each reduction model for The Ladies' Toilet

Reduction behavior and Lighting pattern	Energy balance rate		
	Normal	Busy	Off
Experimental result	2.894	1.573	0.611
④Sensor detection	2.895	2.400	0.634
⑥Ideal lighting	2.895	2.400	0.723
③Realistic lighting	2.895	2.400	0.676
④The 6/7 model	3.376	1.835	0.713
⑤The 5/7 model	4.051	2.202	0.856
⑥+⑤	4.053	3.360	1.012
③+⑤	4.053	3.360	0.946

6.3 限界利用者数の検討

ここでは、本システムの限界利用者数を予測する。非常時の利用者数や振舞いは常時と同じではないが、実験結果から限界利用者数の定量化を試みた。限界利用者数は、式(4)にて算定した。計算は、非常時 72 時間対応($d=3$)、避難者一人当たり日当りのトイレ使用回数 n は 6 回、トイレ利用一回当りの発電量と消費量は Table8、10 から厳しい値を抽出した。また、非常時の蓄電池容量は、実験同様 50%($a=0.5$)とし、男性用のみ追加洗浄の有無を検討した。さらに、被災した東北大学工学部では、本件より 2 倍以上便器の多いトイレを有する食堂棟に当時約 200 人⁹⁾(男女比 3:1)が避難しており、本実験フィールドにその人員が避難した場合の必要電池容量も検討した。

$$N_L = \frac{I_B \cdot a \cdot V_{Bav}}{(P_C - P_G) \cdot n \cdot d} \quad \text{式(4)} \quad d : \text{非常時継続日数 [days]}$$

P_C : 平均消費電力量 [mWh/time] P_G : 平均発電量 [mWh/time]
 N_L : 限界利用者数 [persons] a : 蓄電池容量係数
 I_B : 電池電流量 [mAh] V_{Bav} : 平均電池電圧 [mV]
 n : 避難者一人当たり一日当りの想定トイレ利用回数 [times/(day・person)]

検討結果から男性用の限界利用者数は、追加洗浄有りが 57 人で無しが 37 人、女性用は 29 人となった。しかし、非常時蓄電池容量の閾値を 50%超 ($a>0.5$)とすれば、限界利用者数はさらに向上する。

一方、当時の避難人員を想定した追加洗浄無しの男性用トイレでは、同蓄電池 2 本を並列とし、蓄電池残量の閾値を 100%とすれば、限界人員 150 人を満たせる。また、女性用トイレでは、同じ蓄電池 1 本で蓄電池容量の閾値を 86%以上とすれば、50 人にも対応できる。

さらに、トイレ規模の変化が消費と発電にもたらす影響に関しては、規模増大に伴い照明器具が増加しトイレ利用一回当りの消費量も増すが単位発電量はトイレ規模に依存しないため、トイレ規模が大きくなるほどゼロバランスは難くなる。トイレ規模の増大は、単位消費量に影響する照明器具配置、誤検知を軽減する動線計画および追加洗浄回数が鍵となる。この検討は次に取組むべき課題である。

7. 結

本研究では、ZET システムを被災大学に適用し、トイレ内の照明エネルギー収支に与える影響を確認した結果、以下の知見を得た。

- 1) 男性用トイレ利用 1 回当りのエネルギー収支は、消費量>発電量でも、追加洗浄による発電で、利用者数と消費量が所定の条件を満たせば、照明エネルギー収支はゼロバランスする。すなわち、収支は利用者数、振舞い方および自動洗浄回数の関係に依存する。
- 2) 小便器の利用頻度は、出入口に一番近い便器が最多で、出入口に一番近い小便器の隣は最も少ない。小便器の利用頻度は、出入口からの距離に必ずしも依存せず、利用者が隣り合わない様に振舞う傾向が強い。トイレブースの利用頻度も男女問わず、出入口に一番近いブースが多く、特に女性用は、その傾向が顕著である。
- 3) 男性用トイレは、排泄行為を伴わない誤検知が最大 240 回/日あり、女性用も同様に多い。また、女性用トイレでは、ブース選択による迷いや利用後再確認行動による無駄な検知点灯が散見された。トイレの平面・機器計画は、エネルギー消費に影響を与える。
- 4) 男性用トイレは、出入口の誤検知や利用時の無駄な点灯削減および照明点灯のさせ方による削減を組合せることで、昼光利用が無

い場合でもエネルギー収支ゼロが実現できる見通しを得た。

- 5) 昼光利用や出入口誤検知および無駄な点灯削減を行った結果、エネルギーバランス率は大幅に向上した。昼光利用が有効な手段であることが確認できた。この傾向は、女性用トイレも同様である。
- 6) 女性用トイレでは、ブース内の照明点灯による消費量が男性用と比較して格段に多く、男女間でブース内での振舞い方に差があることが明らかとなった。女性は使用中連続点灯させる傾向がある。
- 7) 限界利用者数は、非常時の蓄電池運用条件と蓄電池容量により更に向上できることを計算により確認した。

今後は、トイレ規模の変化に対応した検証とトイレ内エネルギー消費に寄与する平面・機器計画手法の提案等を継続する計画である。

謝辞

本研究にご協力頂いた熊谷力也氏、安尾貴司氏、松田宏氏、山崎晴生氏、大平雅寛氏、今朋哉氏および児玉崇一氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan: Preliminary Reconnaissance Report of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiy-Oki Earthquake, 2011.7 (in Japanese)
日本建築学会: 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2011.7
- 2) Itabashi, T. et.al: Diagnosis algorithm of deep vein thrombosis (DVT) medical examination needed at a large-scale disaster, Japanese Association of Medical Technologists, JAMT Vol.66 No.5, pp.449-468, 2017.6 (in Japanese)
板橋匠美, 他: 大規模災害時に必要とされる DVT 検診の診断アルゴリズム, 医学検査 Vol.66 No.5, pp.449-468, 2017.6
- 3) Japan Toilet Labo.: Toilet of 3.11 The Great East Japan Earthquake, 2013.3 (in Japanese)
特定非営利活動法人 日本トイレ研究所: 東日本大震災 3.11 のトイレ・現場の声から学ぶ, 2013.3
- 4) Kato, A. et.al: Toilet and Hygiene Measures for Refugees following an Earthquake, National Institute of Public Health, Journal of the National Institute of Public Health 2010 Vol.59, No.2, pp.116-124, 2010.6 (in Japanese)
加藤篤, 他: 震災時の避難所等のトイレ・衛生対策, 保健医療科学 2010 Vol.59, No.2, pp.116-124, 2010.6
- 5) Ishida, T. et.al: Tohoku University Aobayama East Campus Construction Toward Resilient Campus - Part 5 / Total System and Components of ZET, Summaries of Technical Paper of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp.1085-1086, 2015.9 (in Japanese)
石田壽一, 他: 東北大学工学部におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET の全体構成について レジリエント・キャンパス構築に関する研究 (その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1085-1086, 2015.9
- 6) Ishii, H. et.al: Tohoku University Aobayama East Campus Construction Toward Resilient Campus - Part 6 / Outline of Zero Energy Toilet Systems regarding zero balance of lighting energy consumption, Summaries of Technical Paper of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp.1087-1088, 2015.9 (in Japanese)
石井久史, 他: 東北大学工学部におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET の全体構成について レジリエント・キャンパス構築に関する研究(その6) ゼロエネルギー照明システムの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1087-1088, 2015.9
- 7) Fujiyama, M. et.al: Tohoku University Aobayama East Campus Construction Toward Resilient Campus - Part 7 / Implementation of ZET in the Empirical Location Site, Summaries of Technical Paper of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-II, pp.1089-1090, 2015.9 (in Japanese)
藤山真美子, 他: 東北大学工学部におけるゼロ・エネルギー・トイレ/ZET の全体構成について レジリエント・キャンパス構築に関する研究(その7) ZET 実証サイトの整備について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1089-1090, 2015.9
- 8) Fujiyama, M. Ishida, T. Kobayashi, H. and Ishii, H.: Study on Zero Energy Lighting System for Toilet Under The Emergency Situation-Verification Experiment at Demonstration Site in Tohoku University-, AIJ journal of Technology and Design. Vol. 22, No.50, pp.281-284, 2016.2 (in Japanese)

STUDY ON ENERGY ZERO BALANCE BASED LIGHTING SYSTEM IN TOILET

ZET lighting system using the energy harvesting technology implement to actual building

*Hisashi ISHII^{*1}, Mamiko FUJIYAMA^{*2}, Hikaru KOBAYASHI^{*3}
and Toshikazu ISHIDA^{*4}*

^{*1} Senior Research Scientist, Advanced Technology Laboratory, Technology Research Division, LIXIL Corporation, Ph.D.

^{*2} Assist. Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.

^{*3} Assoc. Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.

^{*4} Prof., Dept. of Urban and Architecture, Graduate School of Engineering, TOHOKU University, Ph.D.

In this study, the energy harvesting system for public toilet was constructed that stores electric energy recovered by micro hydropower generator equipped in tap water supplying pipe into battery. This system uses high-efficiency charge / discharge circuit and Purkinje effect visibility adjusted ultra-high-efficiency LED lighting. ZET system was installed to the toilet of disaster affected Tohoku University and confirmed the influence on the lighting energy balance and excretion behavior by demonstration experiment. As a result the following knowledge was obtained.

1. In the gents' toilet despite that the consumption amount is larger than power generation amount, if the number of users and the consumption amount satisfy the predetermined conditions, the lighting energy of zero balance can be achieved by the power generation of additional flashing for cleaning. That is, the balance depends on the relationship between the number of users, how it behaves, and the number of automatically self-flushing.
2. Regarding the frequency of use of urinal, the closest to the entrance was most frequently used and the fewest were next to the urinal nearest to the entrance. Frequency of use of urinal is not dependent on the distance from the entrance, and there is a strong tendency for the users to act not to be next to each other. Regardless of gender, it was confirmed that toilet booth closest to the entrance were frequently used, especially for Ladies' toilet, the trend is remarkable.
3. Gents' toilet has maximum 240 erroneous detections of LED lighting motion sensor per day without excretory activity, and for Ladies toilets as well. In female toilets, unnecessary detection lights due to lost stances due to booth selection and reconfirmation action after use were found. The toilet plan / equipment plan affects energy consumption of LED lighting.
4. By combining reduction of erroneous detection of entry, reduction of wasteful lighting at the time of use, and controlling how to turn on/off the lighting, the gents' toilet got a prospect that zero energy balance can be achieved even if no daylight use toilet.
5. As a result of utilizing daylight, reduction of erroneous entry detection and wasteful lighting reduction, the energy balance rate of gents' toilet improved significantly. This tendency is the same for ladies' toilet.
6. In ladies' toilet, consumption by lighting in the booth was much larger than that for gents', and it became clear that there is a difference in behavior between male and female. Female tend to turn on the LED lighting continuously during use.
7. Calculation confirmed that the number of maximum capacity of users can be further improved by the storage battery operating conditions and the storage battery capacity in emergency.

In the following research, verification corresponding to changes in the size of the toilet will be continued and both an effective toilet plan and equipment layout methods that contribute to energy consumption will be examined.

(2018年6月10日原稿受理, 2018年11月19日採用決定)