

テーマ 3「エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発（成果概要）」

防災拠点 災害対応 移動式
自立型エネルギーシステム 電力供給 情報通信

中島 裕輔 * 水野 修 **
野呂 康宏 *** 横山 計三 *
富樫 英介 * 柳 宇 *

1. はじめに

災害時、大規模ターミナル駅周辺エリアの避難所や一時滞在施設などの防災拠点では、情報の収集・提供、地元住民や帰宅困難者の受け入れ、応急救護などが重要な課題となる。課題解決のためには、エネルギーと情報通信インフラの確保が必要である。しかし、その整備がなかなか進んでいないのが現状である。そこで、研究テーマ 3「エリア防災拠点をつなぐ自立移動式災害対応支援ユニットの開発」では、災害時にエリアの防災拠点に駆け付け、情報通信、必要最小限のエネルギー供給、応急救護のサポートを実施する自立移動式災害対応支援ユニット（D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle）の開発を行い、社会実装に向けて、その有用性を検証することが大きな研究目的である。

2. D-ZEV システム構成

Fig.1 に D-ZEV システム構成図を示す。D-ZEV は、ハイエースを改造した D-ZEV 本体車両 2 台と情報通信端末を搭載した複数の電動アシスト自転車 D-ZEV mini により構成される。D-ZEV mini の一部に加えて、D-ZEV 本体車両には、リチウムイオンバッテリー、太陽光発電パネル、太陽熱集熱器、組立式テント、組立式簡易救護ユニット、情報通信設備、デジタルサイネージ等が搭載される。

災害時には、ターミナル駅周辺部では一時滞在施設等、住宅地では避難所となる小中学校等にこの D-ZEV が駆け付け、情報の収集・発信、必要最小限のエネルギー供給、応急救護のサポートを実施する。災害時の救護室となる簡易救護ユニットには、自然エネルギー利用をベースとした必要最低限の空調・換気設備も備えている。また、D-ZEV mini は、車で調査しにくい市街地の路地などを走りながら、建物や道路の被害状況やけが人の状況を情報収集する役割を持っている。

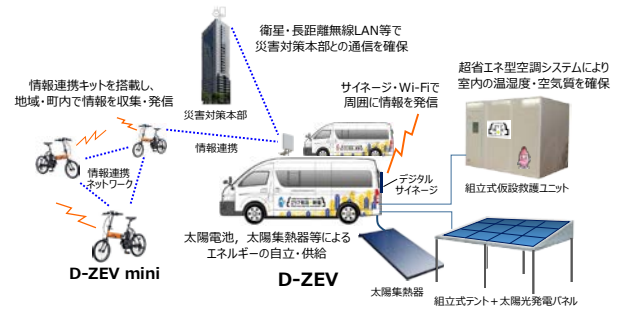


Fig.1 D-ZEV システム構成図

3. 研究実施体制

3.1 実施体制と役割分担

Fig.2 に研究実施体制を示す。建築学部建築学科 2 名、建築学部まちづくり学科 2 名、情報学部情報通信工学科 1 名、工学部電気電子工学科 1 名の計 6 名で構成されている。

主に、野呂、横山、富樫が電気や空調などエネルギー設備の研究開発を行い、水野、柳がこれらを評価・活用する環境面・情報面のソフト開発的な役割を担い、中島が社会実装のための情報コンテンツ開発と全体取りまとめを行う。

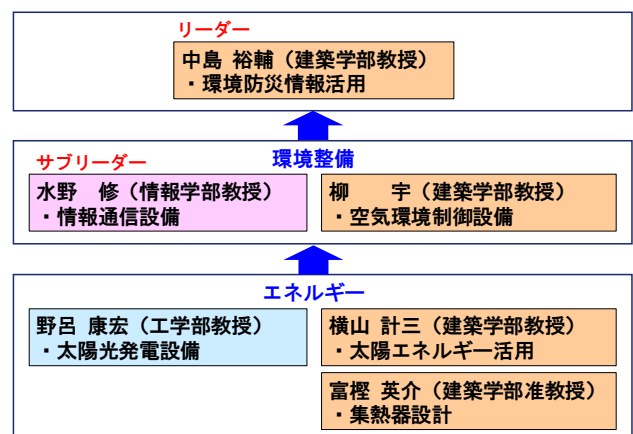


Fig.2 研究実施体制

3.2 主な研究項目

テーマ 3 の主な研究項目とその概要は以下の通りである。

(1) D-ZEV が提供するエネルギー自立型の簡易救護ユニットの開発（横山・柳・富樫）

パッシブな環境調整技術の開発、安全な空気質環境の設計・開発

(2) D-ZEV 用の電源システムの開発（野呂）

防災拠点において、短時間で設置・使用が可能な太陽光発電・蓄電池ユニットの開発

(3) D-ZEV・D-ZEV mini 用情報通信システムの開発（中島・水野）

可搬型通信機器による情報伝送システムの開発

(4) 平常時・災害時における D-ZEV のあり方と情報収集・提供システムの開発（中島・水野）

平常時・災害時の情報発信コンテンツの検討、情報提供システムの開発

4. 過去 4 年間の成果の概要

4.1 1 年目（2016 年度）

簡易救護ユニットのエネルギー設備に関しては、太陽集熱器モデルの整備、電源システムについては、電力供給システム構成の検討、情報通信システムについては、通信システムの基本検討とサイネージからの情報発信項目の検討を行い、D-ZEV システム構築の準備作業を実施した。

4.2 2 年目（2017 年度）

初年度の準備検討作業をふまえ、ハイエース 2 台を改造し、リチウムイオン蓄電池を搭載して屋根には太陽光発電パネルを設置した D-ZEV 車両（コウガ号）と、後部ドアにデジタルサイネージが設置可能とした D-ZEV 車両（クイーン号）を開発した。同時に、これらに積み込む D-ZEV mini、組立式テント、太陽光発電パネル、簡易救護ユニット、デジタルサイネージ、情報通信設備を整備し、一通りの実証実験ができる状況を整えた。

4.3 3 年目（2018 年度）

まず簡易救護ユニットについては自然エネルギーを活用した自立型空調システムの開発を目指し、水膜外皮による夏期の熱負荷低減を図った上で、間接蒸発冷却器及び太陽集熱器、空気清浄機を組み込んだ実証実験を行い、一定の有効性が得られた。

また電力供給システムについては、学生でも短時間で設置・配線作業ができるシステムを開発し、発

電・蓄電の実証実験や負荷側とのバランスを考慮した需要予測等、有用性の確認を行った。

情報通信システムでは、D-ZEV 及び D-ZEV mini の情報伝送システムの開発と Web アプリの作成、平常時・非常時双方を想定した収集・発信コンテンツの調査とデモ画面の作成等を行った。これらの情報通信システムについては、エネルギー設備の試験運用と合わせて、新宿防災ウィーク期間に新宿校舎前と新宿野村ビル前にてデモンストレーション実験を実施し、その有用性の検証を行った。

4.4 4 年目（2019 年度）

簡易救護ユニットの自立型空調システムについては、フラクタル日よけを用いた負荷軽減手法を検証するとともに、空調機器の小型化・高効率化を進め、実用化に向けた検討を行った。

電力供給システムについては、前年度末に追加した太陽光発電パネルを組み合わせた実験や、設置時の方位角・傾斜角を可動式とする想定の実シミュレーション検討等を行い、発電量の改善が見込めることを確認した。

情報通信システムについては、D-ZEV と D-ZEV mini 及び D-ZEV mini どうしの通信システムを確立するとともに、情報収集配信アプリケーションの開発を行った。また、社会実装に向けたコンテンツについては、西新宿に加えて住宅地における運用を想定して羽田地区の住宅地にある小学校においてもデモンストレーション実験を実施し、地域住民からも一定の評価が得られた（Fig.3）。



Fig.3 デモンストレーション風景（羽田／新宿）

5. おわりに

研究項目ごとに一定の成果は得られているが、地域に実装した際のシステム全体の運用方法については、平常時・非常時ともに検討していく必要がある。パッケージとしての D-ZEV システム確立に向けて、さらに研究開発を進めていく計画である。各研究項目の詳細内容については各報告書を参照されたい。

D-ZEV を利用した環境防災情報伝達システムの構築

情報伝達システム 環境情報 災害情報
防災拠点 デジタルサイネージ 屋外温熱環境

中島 裕輔 * 水野 修 **
野呂 康宏 *** 横山 計三 *
富樫 英介 * 柳 宇 *

1. はじめに

D-ZEV（自立移動式災害対応支援ユニット）を利用した環境防災情報伝達システムの構築においては、ハード面では、D-ZEV 車両を改造して太陽光パネルやバッテリーを搭載し、着脱式のデジタルサイネージを整備し、災対本部や D-ZEV mini との通信設備を搭載し、ソフト面では、収集発信する情報コンテンツ及び画面デザインについて、平常時・非常時の両方について開発を行っている。また、D-ZEV 活動エリアについては、ターミナル駅周辺部と住宅街の双方を想定している。

本研究においては、この環境防災情報伝達システムの構築に関して、社会実装を想定し、平常時・非常時の情報コンテンツ及び収集発信システムを確立することと、D-ZEV システム自体のあり方や活用方法についても検討・提案することを目的としている。本報告では、これまでの開発状況と検証実験の結果について報告する。

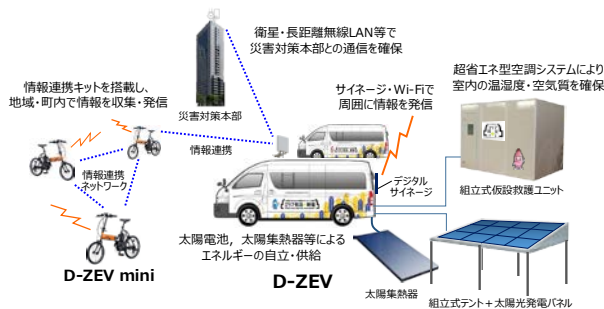


Fig.1 D-ZEV システム構成図

2. 計画の概要と 2018 年度までの成果

2.1 環境防災情報伝達システム構築の検討（2016～2017 年度）

災害時、大規模駅周辺エリアの避難所、一時滞在施設などの地域防災拠点では、情報収集・発信、地元住民や帰宅困難者の受け入れ、救急救護などが重要な課題となる。そこで、災害時にこれらの地域防

災拠点に駆け付け、情報通信、最低限のエネルギー供給、救急救護のサポートを行う D-ZEV による情報伝達システムの構築を行う。非常時・平常時の D-ZEV による情報収集発信イメージを Fig.2 に示す。

非常時、災害対策本部を中心とした現状の情報システムを Fig.3、この現状のシステムに D-ZEV システムを加えた今回提案する「環境防災情報伝達システム」のイメージを Fig.4 に示す。

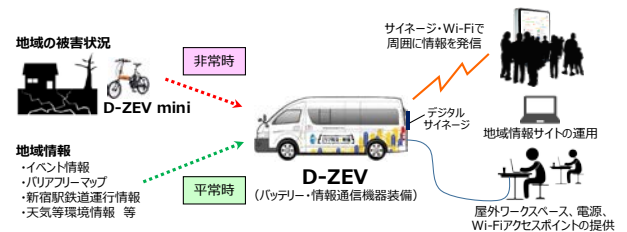


Fig.2 D-ZEV による情報収集発信イメージ

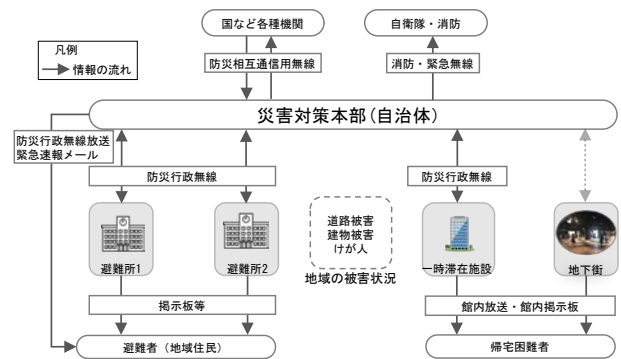


Fig.3 現状の情報システムイメージ

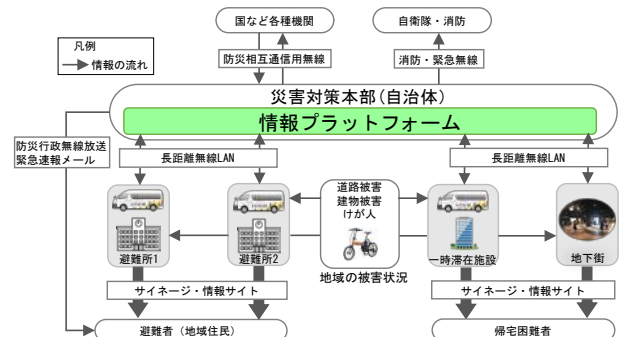


Fig.4 環境防災情報伝達システムイメージ

現状のシステムでは、災害対策本部と各避難施設（避難所及び一時滞在施設）が原則防災行政無線のみでそれぞれで情報伝達を行っている。そのため情報収集に時間がかかるだけでなく、情報が集約されているのは災害対策本部だけであり、避難者や帰宅困難者に対する迅速かつ正確な情報提供が不十分である。また地域の被害等の情報についても不足している状況である。そこで、災害対策本部と各避難所や一時滞在施設周辺、地下街など帰宅困難者の流入・滞在が想定される施設をネットワーク回線で結び、情報プラットフォームを構築し、従来防災行政無線や有線の電話などで行っていた情報伝達をネットワーク共有で行う。この通信は停電時にも備え、災害対策本部と D-ZEV 等のアンテナで長距離無線 LAN を介して直接やり取りを行える独立したネットワークを構築する。これにより、情報を迅速また同時に多数の避難施設が受け取ることができるようになる。また各避難施設は D-ZEV mini 用いて地域の被害情報を収集し、ネットワーク共有で災害対策本部に伝えることが可能となる。地域の被害情報は災害対策本部が集約することにより、避難経路の提示や緊急車両等の誘導に用いることが可能となる。避難者や帰宅困難者への情報発信については、各避難施設にある D-ZEV のデジタルサイネージに加えて、個人のスマートフォンやパソコンにも災害情報ページから発信を行う仕組みを構築する。サイネージ、災害情報ページの発信項目の選定、更新については災害対策本部が行う。

2.2 システムの平常時活用手法の検討（2018 年度）

2.2.1 平常時コンテンツの検討

平常時のシステム管理は、地域のエリアマネジメント組織が行うことを想定する。平常時の利用方法としては、イベント等の拠点としてキッチンカーとしての利用や電源供給スポットなどが考えられる。その平常時利用の中で情報発信を行うことにより D-ZEV 及び情報発信拠点としての認知度が上がり、非常時にも有効な活用が見込まれる。情報発信コンテンツとしては、駅周辺のバリアフリーマップや ATM・トイレなどの情報をまとめたマップなど、既存の情報サイトにはない、地域に限定した情報コンテンツの検討・制作を行った。

2.2.2 提案システムのデモンストレーション調査

(1) 調査概要

2018 年 11 月 13 日～21 日の新宿防災 Week にて、

環境防災情報伝達システムに関するデモンストレーション調査を行った。工学院大学新宿キャンパス南側と野村ビルの公開空地にて行ったデモンストレーションを Fig.5 に示す。デモンストレーションでは D-ZEV の情報システムについて D-ZEV のデジタルサイネージや災害情報ページなどを用いてシステムの説明を行い、アンケート調査を実施した。デジタルサイネージ・災害情報ページの情報画面を Fig.6 に示す。アンケートの有効回答数は 84 部であった。回答者は、学生が約 4 割で 20 代の割合が高いが、その他の年齢割合は同程度であった。来街頻度別でも毎日通う人は約半数であった。情報コンテンツ内容に関しては非常時・平常時共に必要度を 5 段階評価で行った。

合わせて、平常時利用に特化した屋外ワークスペースとしてのアンケート調査も実施した。D-ZEV の周囲にテーブルとイスを置き、一部の席には D-ZEV バッテリーから給電する電源コンセントを設置し、フリーWi-Fi サービス、コーヒー等の飲み物提供も行い、D-ZEV を活用した屋外ワークスペースとしての利用可能性調査を実施した。



Fig.5 デモンストレーション風景



a. 一時滞在施設情報



b. バリアフリーマップ

Fig.6 システム画面例

(2) D-ZEV システムに関するアンケート調査結果

Fig.7 に来街頻度別の非常時コンテンツ必要度、Fig.8 に職業別の平常時コンテンツ必要度を示す。非常時コンテンツに関しては全体的に必要な度が高い。来街頻度別でみると「月1以下」の電源スポットニーズが高い。平常時コンテンツでは必要度の高い情報と低い情報が顕著に見られた。職業別では「会社員他」に比べ「学生」のニーズが低い結果となった。

全体のシステム評価では、「有効である」「やや有効である」が9割以上であった（Fig.9）。サイネージの見やすさでは評価が得られた一方で、災害情報ページ等については課題も挙げられた。

(3) 屋外ワークに関するアンケート調査結果

今回の屋外ワークスペース（WS）の設置により、実際に利用した91人の回答が得られた。約7割が公開空地を休憩目的で利用しており、作業目的の利用は1割程度であった。屋外ワークスペースで良かった点をFig.10に示す。テーブル・イスが最も評価が高く、次にカフェ機能となった。

公開空地に欲しい設備をFig.11左に示す。最もニーズが高かったのは植栽や日よけ、風よけといった環境面の設備となった。また、今回の屋外ワークスペースに対して、さらにほしい設備についての回答をFig.11右に示す。最も高かった回答は、天気や気温などの温熱環境の情報発信であった。

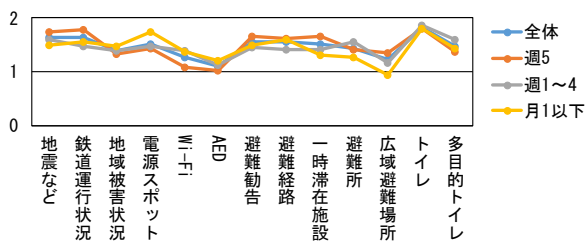


Fig.7 非常時コンテンツ評価（来街頻度別）

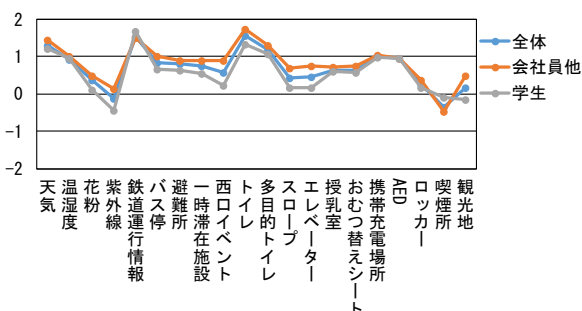


Fig.8 平常時コンテンツ評価（職業別）

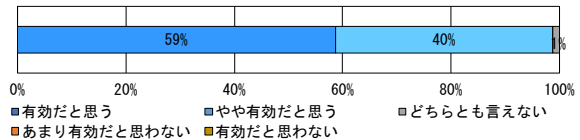


Fig.9 システムの総合評価

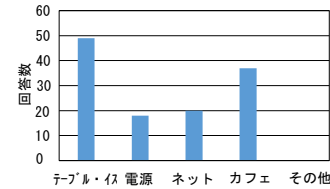


Fig.10 屋外ワークスペースの良かった点

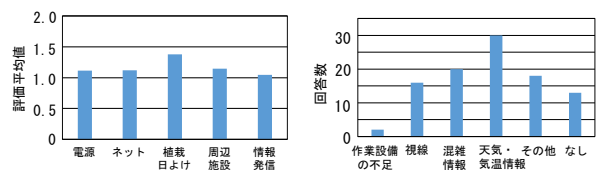


Fig.11 欲しい設備（左：公開空地／右：その他）

2.2.3 西新宿エリアの温熱環境シミュレーション

(1) シミュレーション概要

屋外ワークスペース向けの環境改善策の1つとして日よけ設備を配置した場合の公開空地の温熱環境の改善効果を把握するため、熱環境シミュレーションを行った。対象エリアは新宿野村ビルとその周辺とし、対象日は気象庁データで最高気温が37.4℃を記録した7/23、最高気温が27.5℃と比較的涼しかった8/19、これら2日の中間的な日で最高気温32.8℃の8/21を選定した。対象日の天気はいずれも晴れである。今回配置した日よけは一般的なテントを想定し、性能と配置をTable.1、Fig.13に示す。シミュレーションでは、新宿野村ビル公開空地内の地点1、地点2の2か所のSET*を算出した。シミュレーションソフトはTHERMO Render 5Proを使用した。

(2) シミュレーション結果

7/23の13時の日よけ設備配置前後の表面温度分布をFig.14に示す。また3日間の9時から17時までの外気温と地点1・2の日よけ設備配置前後のSET*の値をFig.15に示す。最も暑い7/23の日よけ配置前のSET*の最高値は37℃なのに対し、配置後は32.8℃と4.2℃下がっていることが分かる。同様に8/19は4.1℃、8/21は3.5℃下がる結果となった。

SET*30℃以下で屋外作業可能と仮定した場合、現状では外気温が約31℃でSET*は30℃を超えるが、日よけがあれば外気温が約33℃を超えないとSET*

は 30℃を超えないことが分かった。2018 年の 7 月から 8 月の晴れの時間数（日照時間が 0.5 時間以上）でみると、現状では屋外作業が可能な日は、対象となる 334 時間中 55 時間であったが、日よけ設備配置後はこれが 266 時間と約 5 倍に増加する。

以上より、日よけ設備を配置することは屋外作業可能日の大幅増につながり、公開空地活用の利用促進及びエリア環境の改善に有効な手段の 1 つと言える。このワークに適する環境かどうかの判断情報を D-ZEV の環境防災情報提供システムから発信すれば、このシステムは平常時の公開空地の活性化にも寄与する仕組みとなることが期待される。

Table.1 日よけ設備の性能

日射反射率	0.8	熱伝導率(W/m3*K)	0.17
長波長反射率	0.95	容積比熱(J/m3*K)	1,023,000
日射透過率	0.1	厚さ(mm)	1

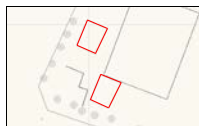
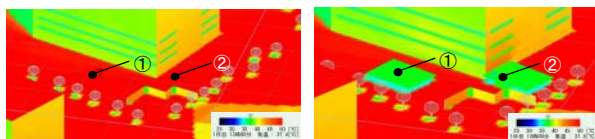


Fig.13 日よけ設備配置図



＜日よけ配置前＞

＜日よけ配置後＞

Fig.14 表面温度シミュレーション結果（7/23）

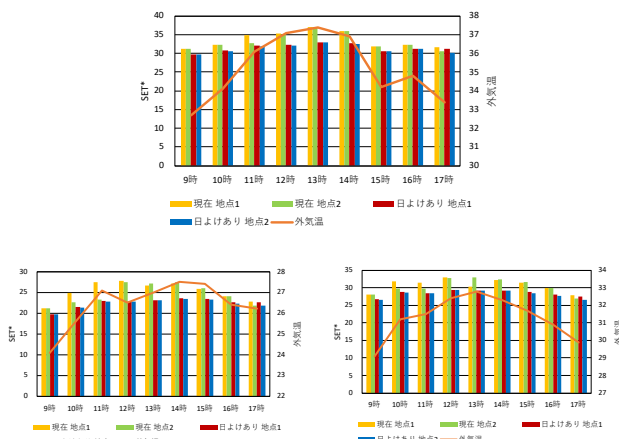


Fig.15 日よけ有無による SET*の時間変化比較

（上：7/23，左下：8/19，右下：8/21）

3. 2019 年度の成果

3.1 大規模駅周辺エリアにおけるシステム検討

3.1.1 エネルギー源の把握と可視化の検討

2018 年北海道胆振東部地震における全道停電に

おいて、札幌市中心部では DHC プラントの CGS の電力供給建物へ帰宅困難者を誘導しており、災害時に使用できるエネルギー源の把握は重要である。そこで新宿区と横浜市に対して退避施設の把握状況に関してアンケート調査を行ったところ、各退避施設の受入人数やその面積、非常用発電機容量についてはほとんど把握できていないことが分かった。そのため、東京消防庁のデータを元に新宿駅周辺エリアの非常用発電機（消防法の法定外）をマップにプロットして可視化を行った（Fig.16）。新宿駅からの距離と発電用容量の合計を Fig.17 に示す。非常用発電機を整備していない建物も多くあることが分かる。



Fig.16 非常用発電機(消防法の法定外)の設置状況

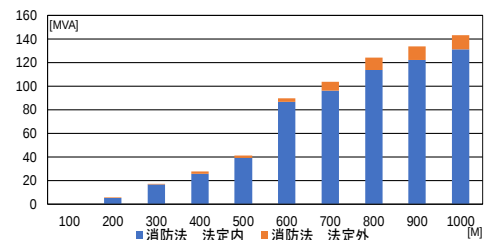


Fig.17 新宿駅からの距離と発電容量合計

3.1.2 夏期の温熱環境の把握と可視化の検討

退避施設に空調設備が導入されているか分からない状況で自治体が避難誘導するにあたり、温熱環境を把握することは重要であり、特に夏は屋内外の温熱環境の情報も必要だと考える。そこで、災害時に退避施設になる建物と周辺エリアの温熱環境に関する現状把握を行う。

実測調査は 2019 年 8 月 7 日に新宿駅周辺にて計測を行った。実測項目は、温度、相対湿度、路面温度、風速、サーモグラフィーによる表面温度である。17 箇所にて 10 時、13 時、16 時に測定を行った。

新宿駅周辺エリアの屋内と屋外の 13 時の計測結果を Fig.18 に示す。屋外では高い場所で 36℃を超え、建物内でも空調温度は大きく異なり、常時低い温度を維持している建物も見られた。平常時にこのようなリアルタイムの温熱環境を発信することで自発的な熱中症対策行動が期待できる。



Fig.18 西新宿エリアの温熱環境マップ (8/7 13時)

3.1.3 西新宿におけるデモンストレーション調査

(1) 調査概要

2019年11月8日の防災訓練・新宿駅周辺防災対策協議会の一時滞在施設運営訓練と11月12日~15日の新宿防災Weekにて、環境・防災情報システムに関するデモンストレーション調査を行った。Table.2 にデモンストレーションの際に使用した平常時・非常時の情報発信コンテンツのリストを示す。

また、新宿中央公園と工学院大学新宿キャンパス南側にて行ったデモンストレーションの風景を図9に示す。デモンストレーションではD-ZEVの情報システムに関して、デジタルサイネージや災害情報ページなどを用いて説明を行い、アンケート調査を実施した。アンケートの有効回答は防災訓練が38、防災Weekが100で計138部であった。情報コンテンツの必要度に関しては非常時・平常時ともに5段階評価で行った。

Table.2 平常時・非常時の情報発信コンテンツ

①退避施設情報マップ	⑥周辺地域情報マップ
②鉄道運行情報	⑦温熱環境シミュレーションマップ
③退避施設情報リスト	⑧消防法・法定外非常用発電機稼働マップ
④地域災害情報	⑨温熱環境マップ
⑤バリアフリーマップ	⑩リアルタイム温熱環境マップ



Fig.19 西新宿でのデモンストレーション風景

(2) 調査結果

回答者は学生が約6割で20代の割合が高く、また男性が約8割であった。Fig.20 に年齢別の非常時

コンテンツ必要度、Fig.21 に性別の平常時コンテンツ必要度を示す。「必要である」を2、「必要ではない」を-2とした。非常時では、60歳以上の必要度は全体に高く、中でも「温熱環境マップ」は他の属性に比べて必要度が高い結果となった。平常時コンテンツに関しては必要度の差が見られ、特に女性はバリアフリー情報の必要度が高くなる結果となった。システムの総合評価では、有効・やや有効の回答が97%を占め、フリーコメントには情報の即時性や正確性を求めるものや災害時の停電等の被害情報や少人数で運営できるか懸念する声などが挙げられたが、概ね高く評価・期待される結果となったと言える。

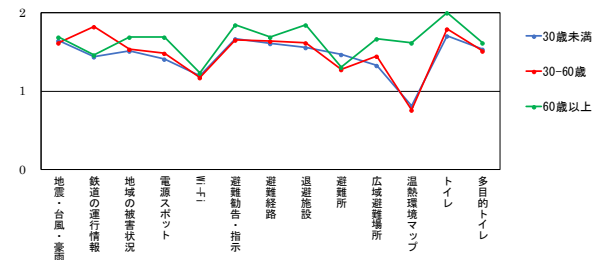


Fig.20 属性別非常時コンテンツ評価

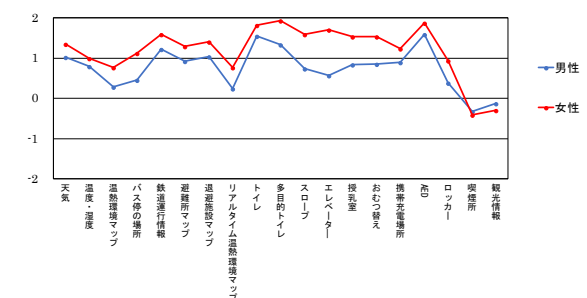


Fig.21 属性別平常時コンテンツ評価

3.2 住宅地エリアにおけるシステム検討

3.2.1 環境情報収集発信システムの開発

日本の夏の平均気温は上昇傾向にあり、高齢者や子供の多い住宅地での地域の温熱環境情報のニーズは高いと考えられる。本実験では環境・防災情報システムの平常時に発信するコンテンツのひとつにすることを目的として、住宅地の数箇所に環境センサとWi-Fiルータを設置し、集めた温熱環境情報を住民に発信するシステムを開発した（Fig.22）。

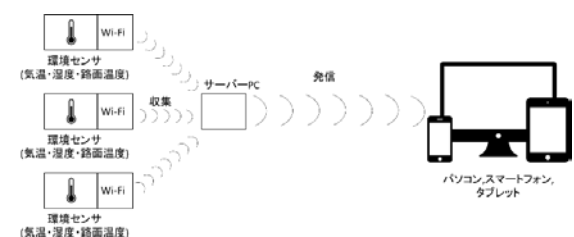


Fig.22 システムイメージ図

今回、大田区羽田地域に対応したシステムを開発するにあたり、環境センサを大田区設掲示板に設置した。大田区設掲示板には避難所への案内や海拔が書かれているほか、ソーラーパネル式 LED ライトが付いており、掲示物を貼るだけでなく避難誘導にも利用できるツールのひとつとなっている。システムの実測項目は気温、湿度、路面温度であり、Wi-Fi を通じてパソコンに収集する。

温熱環境情報の発信における、デジタルサイネージの情報表示画面のモデルとして製作したリアルタイム温熱環境マップを Fig.23 に示す。画面左側で情報の収集場所を地図上に示し、右側で収集されたリアルタイムの温湿度情報を表示する構成としている。

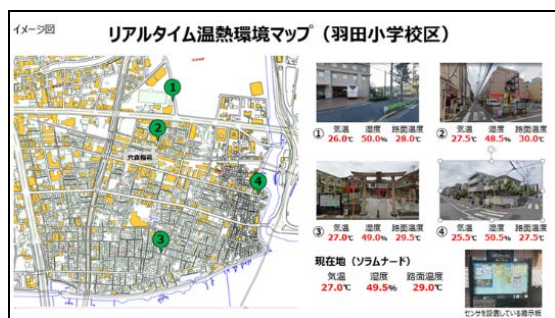


Fig.23 リアルタイム温熱環境マップ

3.2.2 羽田地区におけるデモンストレーション調査

(1) 調査概要

2019 年 11 月 17 日、大田区立羽田小学校で行われた防災訓練にて、環境・防災情報システムに関するデモンストレーション及びアンケート調査を実施した。情報コンテンツ内容に関しては非常時・平常時共に必要度を 5 段階評価で行った。

(2) 調査結果

アンケート回答者数は 120 人で、70 代以上が約 5 割、60 代が約 2 割と年齢層は高い傾向が見られた。Fig.24 に台風 19 号時の避難所の開設情報の適切さの評価を示す。50 代以上で「適切でなかった」「あまり適切でなかった」と回答する割合が半数を超え、現状の課題が見える形となった。Fig.25 に年代別の非常時コンテンツの必要度を示す。非常時コンテンツに関しては全体的に情報の必要度が高いが、医療救護所情報は 30 歳未満と 30 代以上で必要度に差がみられた。Fig.25 に年代別の平常時コンテンツの必要度を、Fig.26 に温熱環境情報の熱中症対策への有用性の評価を示す。平常時コンテンツに関しては、防災マップや水害ハザードマップ等の必要度が高く

なった。夏季の温熱環境マップとリアルタイム温熱環境マップは他の項目に比べて必要度は低くなっているが、温熱環境情報の有効さの評価で「有効」「やや有効」と回答する割合が 8 割以上であり、温熱環境情報の一定の有用性が確認できた。Fig.27 に全体のシステムの評価を示す。「有効」「やや有効」と回答する割合が 9 割以上であった。

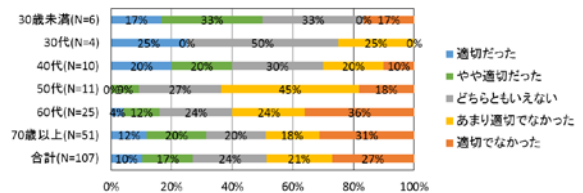


Fig.24 避難所の開設情報の適切さの評価

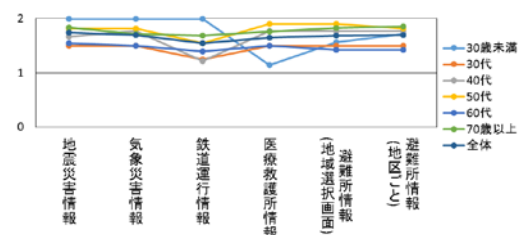


Fig.25 年代別非常時コンテンツ評価

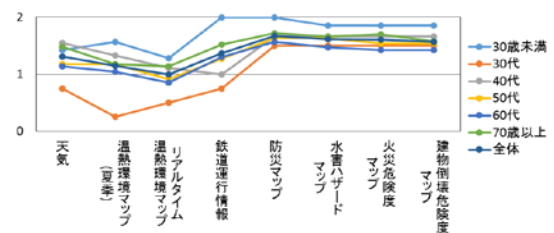


Fig.26 年代別平常時コンテンツ評価

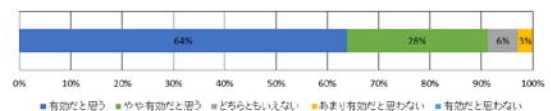


Fig.27 温熱環境情報の熱中症対策への評価

5. おわりに

デモンストレーション実験を通じて、構築した環境防災情報システムの有用性とニーズの高いコンテンツが把握できた。今後はこの D-ZEV ユニットのハード面、ソフト面のさらなる充実を図り、実装に向けた改良と検証を重ねていく計画である。

参考文献

- 1) 鍋田穂高, 中島裕輔他: 大規模駅周辺エリアにおける平常時・非常時に機能する環境・防災情報システムの構築に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2020.3
- 2) 石川未来, 中島裕輔他: 住宅地における平常時・非常時に機能する環境・防災情報システムの構築に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2020.3

自立移動式災害対策支援ユニットにおける情報通信システムの開発

キーワード 無線 LAN, アドホックネットワーク, DTN, データ収集

* 水野 修

1. はじめに

本事業は巨大都市・中心市街地(新宿区等)とその周辺地域を対象として、震災・水害等による複合災害に強く、速やかな機能回復を可能とする「逃げる必要のない都市」の実現を目的としている。そのうち、テーマ 3 では、地域防災拠点であるエリアの現地本部や避難所等において、災害時に情報通信面、必要最小限のエネルギー供給面、救急救護面のサポートを行う、自立移動式ゼロエネルギーユニット(D-ZEV: Disaster-robust Zero Energy Vehicle)を開発する¹⁾。

本研究においては、D-ZEV に搭載する情報通信システムの構成を明らかにし、災害時における情報コンテンツの収集配信方式を確立することを目的とする。本報告では、2016～2019 年度に検討した D-ZEV に搭載する情報通信システムの状況を総括する。

2. 計画の概要と 2018 年度までの成果

2.1 計画の概要

D-ZEV はトヨタハイエースロングをベースとした 2 台の車両（“コーガ君号”と“クインちゃん号”）から構成されており、コーガ君号には主にバッテリーと太陽光発電のためのソーラパネル、テントが搭載されており、関連機器や簡易救護施設への電源供給を行う。クインちゃん号には簡易救護施設の資材と、通信機器を搭載できる。またより小回りの利く D-ZEVmini は電動アシスト折り畳み自転車（Panasonic オフタイム）であり、それぞれの車両に分散して 3 台搭載できる。D-ZEV ネットワークの概要を図 1 に示す。

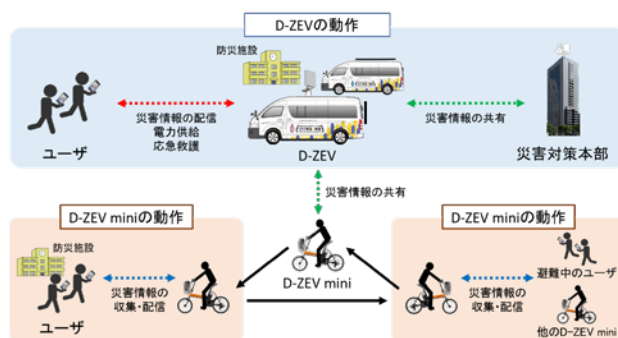


図 1 D-ZEV のネットワーク

このネットワークには以下の経路が含まれる。

(1)D-ZEV～災害対策本部間

(2)D-ZEV～D-ZEVmini 間

(3)D-ZEVmini～D-ZEVmini 間

(4)D-ZEV,D-ZEVmini～一般市民、防災担当者

ここで、災害対策本部とは、街区の被害状況や鉄道の運行状況、病院、避難可能な施設等を把握し、一般市民や防災担当者に指示を行う施設であり、そのためのサービシステム²⁾を保有している。

前提として D-ZEV は車両ではあるが移動中には通信を行わないものとする。一方で、D-ZEVmini は移動中にも通信を行うこととする。また、いずれの場合でも、移動体網など通信インフラは使用できない、あるいは使用制限があることを想定する。

D-ZEV および D-ZEVmini への通信システムの要件を以下に示す。

[要件 1]小型であり、省電力であること。

[要件 2]設置や運営が容易であること。

[要件 3]安定した伝送条件でなくとも、持続的に運用できること、である。

2.2 情報通信システムの基本構成の検討（2016～17 年度）

2016 年度および 2017 年においては、情報通信システムの基本検討を行った。

D-ZEV～災害対策本部間は災害対策本部に設置する固定局と D-ZEV に搭載する移動局で構成される。固定局は UDM で構築した長距離無線 LAN システム³⁾を再利用した。D-ZEV の通信システムの構成を図 2 に示す。また表 1 は、図 2 の PC に含まれるシステムサーバの構成である。なお、D-ZEV の情報通信システムには TV チューナーを含んでいる。これは、デジタルサイネージに放送コンテンツを表示するために設けている。D-ZEV の情報通信システムでは、特に[要件 2]が重要である。そこで、機器の組み立てや運用方法についてマニュアルを作成し、未経験者の学生により実施検証したところ、1 時間以内で固定局との疎通確認まで実施できた。

D-ZEV～D-ZEVmini 間、D-ZEVmini～D-ZEVmini 間、D-ZEV,D-ZEVmini～一般市民、防災担当者は、D-ZEVmini との通信においては、Wifi を用いる。

* : 工学院大学情報学部情報通信工学科

D-ZEVmini の情報通信システムを図 3 に示す。

また、これらはすべて D-ZEV および D-ZEV-mini に搭載できる大きさであり、また D-ZEV に搭載された電源や小型充電電池で半日以上動作できるため[要件 1]を満たしている。

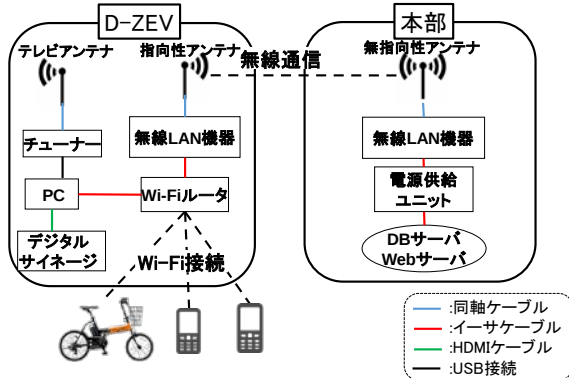


図 2 D-ZEV の情報通信システム

表 1 D-ZEV の情報通信システム構成

	システムサーバ	
	Webサーバ	DBサーバ
OS	Ubuntu 16.04 LTS	
CPU	Intel Celeron(R) CPU G1840@2.80GHz × 2	
メモリ	4GB	
Webサーバ	Apache2.4.18(ubuntu)	MySQL5.7.22
DBMS		
Webインタフェース	PHP 7.0.30	

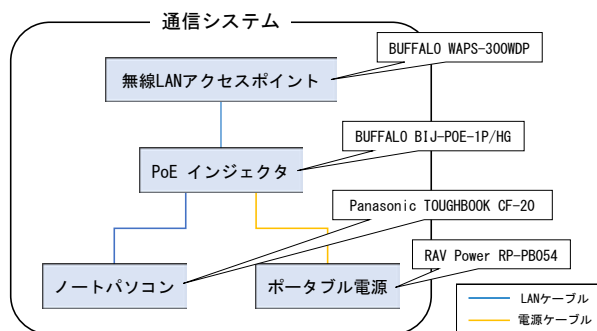


図 3 D-ZEVmini の情報通信システム

2.3 情報伝送方式の検討（2018 年度）

（1）D-ZEV を介した情報の提供

D-ZEV を介した情報として、「発生災害情報」「新宿駅発着路線情報」「医療救護所情報」「一時滞在施設情報」「避難所」「ハザードマップ」を提供する。これらは、施設名、路線名などの情報を災害対策本部に設置されるデータベースに格納し、Web を通じて提供する。また、土地勘の無い来街者には、D-ZEV の位

置情報を表示し、現在地などの提供も合わせて行う。

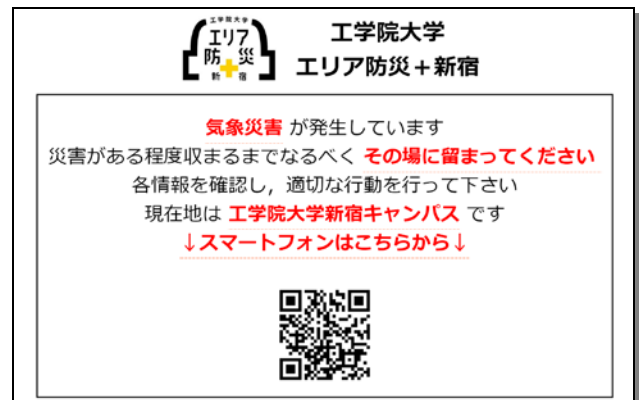
図 4 に災害情報提供システムの表示例を示す。図 4 中(a)(b)は、個人端末向け災害情報提供機能の PC およびスマートフォンページの TOP 画面、(c)は、更新型デジタルサイネージの TOP 画面である。この画面では、情報量が多くスクロールが発生する場合には、自動でスクロールする機能を実装した。



(a) PC 向けの画面

(b) スマート

フォン向けの画面



(c) 更新型デジタルサイネージ向けの画面

図 4 D-ZEV のコンテンツ表示

（2）D-ZEVmini の情報伝送方式

D-ZEV mini については[要件 3]を満たす必要がある。そこで、D-ZEV mini の通信機器は、無線 LAN アクセスポイント（以下 AP）に Delay Tolerant Networking³⁾（DTN）機能を実装した。

DTN とは、蓄積した情報を持った端末が移動し、他の端末とのリンクが確立できれば情報を伝送してその端末に蓄積することを繰り返す方式である。これは、アドホックネットワークと異なり、情報発信元から目的の相手までのリンクをすべて確立する必要がなく、不安定なネットワークでも情報伝送ができる特徴を持っている。また、D-ZEVmini では、AP を使用するため、D-ZEV の通信範囲外の防災拠点に滞在する多くのユーザに対して同時通信が可能となる。移動

中は、AP と DTN 機能の両方を利用するため、通信範囲に避難中のユーザや他の D-ZEV mini が存在した場合、移動しながらの通信が可能となる。

DTN においても、蓄積されている情報の伝送中にリンクが切断されると、それまで伝送したデータが無効になってしまう。そのため、一回に送るデータサイズを制限して、複数に分割することで無効になるデータを減らす。一方で、小さいデータサイズで分割を行いつぎと、全体に占めるリンク確立のための時間の割合が多くなるため、伝送できるデータの総量が少なくなる恐れがある。そのため、ユーザおよび他の D-ZEV mini と移動しながらの通信を行う場合に、通信システムが送信する適切なデータサイズを実験により把握した⁴⁾。

実験結果を図 5、図 6 に示す。D-ZEVmini-ユーザ間については、送信するデータサイズが 20MB のときが、受信データ総量が最も多く平均 60MB となった。これは 3 回の通信が実現できたことを意味している。続いて、1 回あたりのデータサイズが 10MB, 30MB, 40MB の順となっている。1 回あたりの送信データサイズが 40MB のときに、受信データ総量も約 40MB であり、これはこの条件では 1 回しかデータが伝送できていないことを示している。また、10MB の時の受信データ総量が、20MB のときよりも少ない。これは、先に述べたようにリンク確立の時間ロスのためであると考えられる。D-ZEV mini 同士の場合は、1 回あたりのデータサイズが 10MB のときの受信データ総量が一番多く、データサイズが大きいくほど受信データ総量が少なくなっている。特に、30MB, 40MB のときはそのサイズよりも平均受信データ総量が少ない。これは、試行によっては、データが受信できなかった可能性を示している。

平均スループットの値は、D-ZEVmin とユーザ、D-ZEVmin 同士の違いはあるが、D-ZEVmin 同士で送信データサイズ 40MB の場合を除いて、大きな変化は見られなかった。D-ZEVmin とユーザでばらつきが大きいのは、通信を行っている 2 者の距離によってリンクの状態が変わることと、通信時間で除算をしているため、通信時間が短いと測定誤差の影響が大きく出ると考えられる。また、リンクの状態が悪いと TCP の性質によりスループットが下がるため、このことが通信中で 2 者間の距離が変化する D-ZEVmin 同士で送信データサイズ 40MB の場合のケースに表れていると考えられる。

この結果、1 回あたり 10~20MB のデータサイズを送信することで、災害時に通信システムを有効に使用することが可能であることが明らかになった。

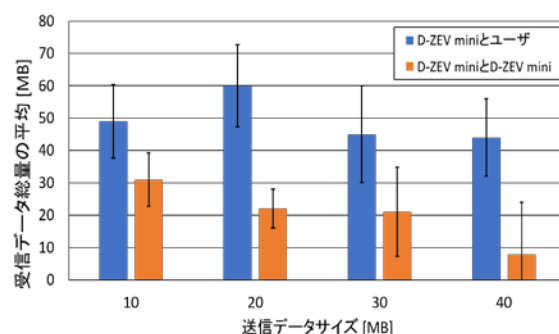


図 5 D-ZEVmini の受信データ総量

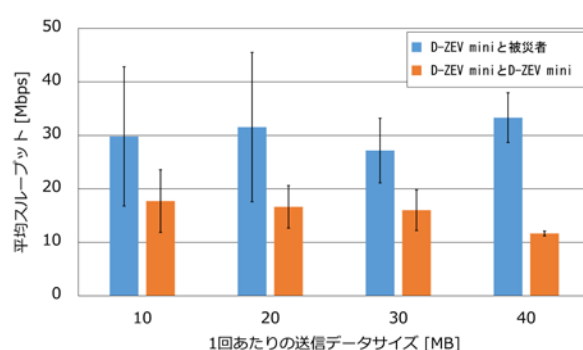


図 6 D-ZEVmini の伝送スループット

3. 情報収集配信アプリケーション開発と情報提供の汎用化（2019 年度）

3.1 情報収集配信アプリケーションの開発

D-ZEV で用いる情報収集システムでは、管理者は情報の更新が可能であること、情報の種類・状態が選択可能なこと、収集した情報の管理が容易なことが求められる。そのため、取得した情報の種類・状態を選択し、通信システムに格納するアプリケーションの作成した(図 7(a)). また、格納した情報はデータベースを用いて管理する。

また、情報の種類・状態が判別可能であること、および、被災場所が判別可能であることから、情報を一覧で表示するリスト表示機能、情報取得場所にマッピングを行い、表示するマップ表示機能をそれぞれ作成した(図 7(b)). また、マッピングに使用する地図データには画像を用いるため、通信インフラが損傷しても利用可能である。これらは、PHP および HTML で作成し、被災者のモバイル端末および D-ZEV のデジタルサイネージを用いて配信する。

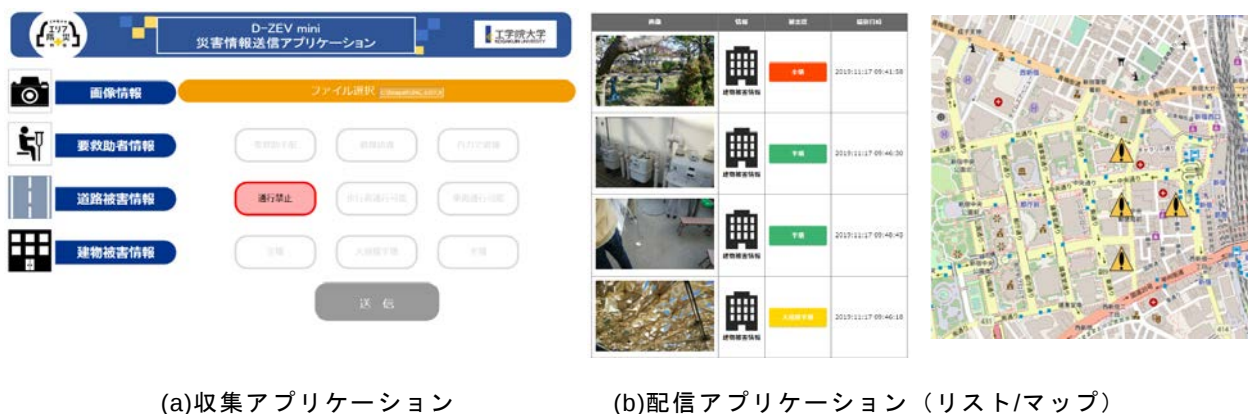


図 7 情報収集配信アプリケーション

3.2 提供情報の汎用化

ここまで検討で構築したシステムは新宿区西新宿を対象に災害関連情報を提供するものである（以下、新宿システムと呼ぶ）。西新宿以外での運用を想定すると、新宿システムをベースに地域性によって提供に必要な情報を再構成する必要がある。このことをシステムの汎用化と呼ぶ。今年度は運用地域として、東京都大田区羽田地区（ただし、羽田空港は含まない）を選定する。羽田地区は地域住民が多く外部からの来訪者が少ないという西新宿とは対照的な地域性を持つ。

D-ZEV を羽田地区に適用した際、発生災害情報、医療救護所情報、ハザードマップは、新宿システムのデータベース構造を利用することで対処が可能である。しかし、鉄道運行情報と避難所情報は、運用地域の特徴によって変化する。新宿システムの鉄道運行情報では、大規模ターミナル駅に発着する路線の情報を表示している。しかし、羽田地区にはこのような大規模ターミナル駅が存在しないため、最寄りで乗降客数の多い蒲田駅と京急蒲田駅から乗換可能な路線に絞って表示することとした。新宿システムの避難所情報では、地域ごとに避難所の場所と状況を表示している。しかし、大田区全体では、地域ごとに表示すると、1つの地域に表示される情報量が増加する。そのため、自治会・町会区分による18ヶ所の地域に分割し、情報を表示するページに変更した。

3.3 アンケートによる有効性の評価

3.1, 3.2 で作成したシステムについてアンケートのより評価実験を行った。

3.1 の情報収集配信アプリケーションにおいては、2019年11月の新宿区防災ウィークにおいて、合計135人から回答を得た。被験者には実際に端末を操作およ

びデジタルサイネージを目視で確認してもらい、評価を依頼した。

アンケート結果を図8に示す。結果より、評価4以上が80%以上になった。情報収集の設問では、モバイル端末から情報収集が可能であることが評価されたと考えられる。また、情報配信の設問では、マップ表示を実装することで直観的に被災場所を把握できる点が評価されたと考えられる。

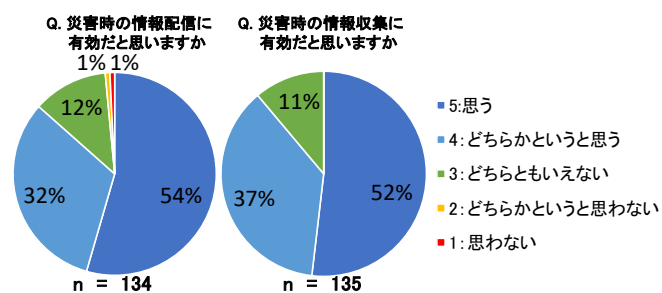


図 8 情報収集配信アプリケーションの評価結果

3.2 で示した、羽田地区に適用したシステムの有効性を確認するため、2019年11月17日大田区立羽田小学校で行われた避難訓練でアンケート評価を行った。アンケートは、5段階で評価し、個人端末やデジタルサイネージの表示を目視での評価を依頼し、82人の方から回答を得た。その結果を図9に示す。これより「思う」と「どちらかというと思う」が50%前後となった。これはアンケート回答者の大半が地域住民であり、滞留者向けの情報に対して必要性を感じず、冗長と思われたことが考えられる。そのため、展開場所の被災者の傾向に応じて表示情報を切り替える必要がある。

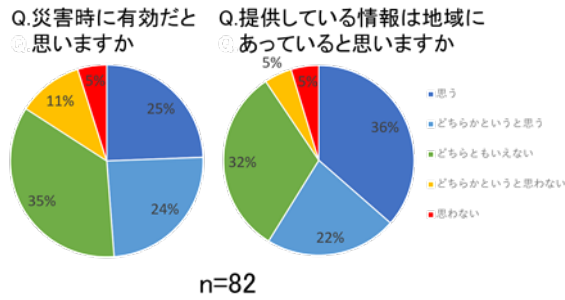


図 9 羽田地区での評価結果



(b)巡回モデル

図 10 D-ZEVmini の移動モデル

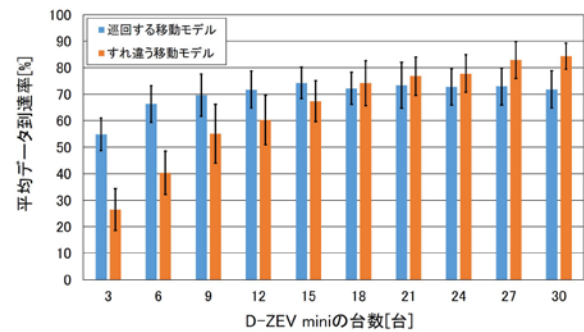


図 11 D-ZEVmini の台数とデータ到達率

4. D-ZEVmini の情報共有方式（2019 年度）

4.1 運行モデルの違いによるデータ到達率評価

D-ZEVmini 同士はすれ違い時に DTN 通信によりデータの共有を行う。災害情報を収集・配信するものであり、より効率がよいルートで運航させる必要がある。そのため、2つのモデルについて情報配信の効果をシミュレーションにより確認した。1つ目は、D-ZEV mini が各防災施設を巡回する移動モデルである。D-ZEV から出発したすべての D-ZEV mini が各防災施設を巡回し、通信する。2つ目は、D-ZEV mini がお互いにすれ違いながら通信する移動モデルである。それぞれの移動モデルを図 10 に示す。

それぞれのモデルについて、データの到達率をシミュレーションにより評価した。D-ZEVmini の配置台数を 3～30 台とし、東新宿にある防災施設 6 カ所へ情報を配信することを想定した。1 個のデータ生成時間は、300[s]とする。また、生成するデータの大きさは、2.3 の結果により 10～20[MB]とする。

シミュレーションの結果を図 11 に示す。これ、D-ZEV mini の台数が 15 台以下とき、巡回する移動モデルの方がすれ違う移動モデルと比較して平均データ到達率が高い。しかし、台数が 18 台以上のとき、すれ違う移動モデルの方がデータ到達率は高くなる。これは、台数の増加に呼応して、すれ違い区間でのすれ違い可能性が高くなるためである。



(a) すれ違いモデル

4.2 災害情報共有方式の提案と評価

2.3 に示したように、一度のすれ違いで通信できるデータ量には限りがあるので、情報の共有を戦略的に行う必要がある。3.1 で示したように災害情報の収集時には被害度を記録しているため、被害度に着目した情報共有方式を提案した⁵⁾。ここで重要なのは、被害度の高い「けが人が居る」「建物が全壊している」という情報は必要であるが、被害度が低い情報についても救助の必要がなく、安全な場所があること伝える点で必要であることである。

提案した災害情報共有方式には、被害度の高い情報を優先して共有する被害情報優先共有方式と、被害度の高い情報の共有を優先しつつ、被害度の低い情報も共有する重み付け被害情報優先共有方式がある。被害情報優先共有方式は被害度の高い情報を優先的に送る方法(図 12)であり、重み付け被害情報優先共有方式は一定量の被害度の低い情報の伝送を担保する方式(図 13)である。

D-ZEV mini の移動モデルを使用したときの災害情報共有方式の有効性をシミュレーションで評価した。本シミュレーションでは、各 D-ZEV mini が被害度ごとに情報を生成し、D-ZEV に到達した被害度ごとの情報量を測定する。評価指標として、2つの移動モデル

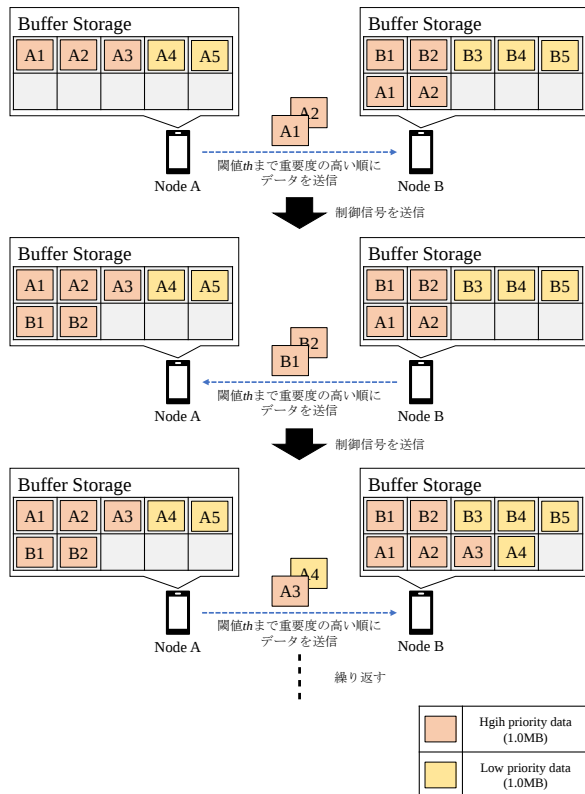


図 12 被害情報優先共有方式

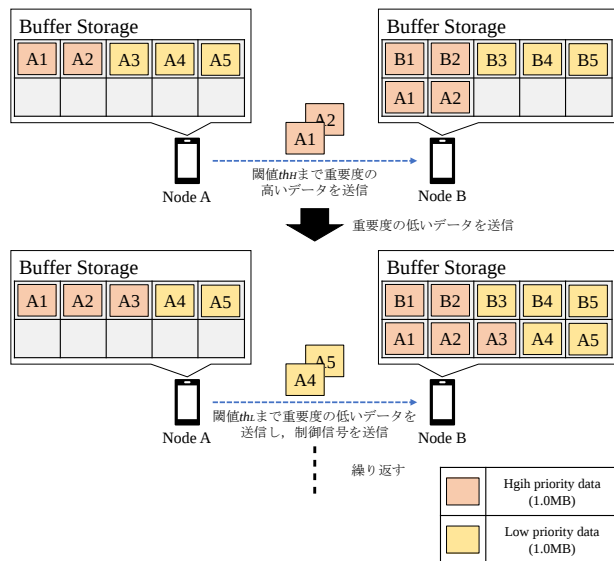


図 13 重み付け被害情報優先共有方式

ルを使用したときの DTN の標準的な伝送方式である Epidemic Routing⁶⁾、被害情報優先共有方式、重み付け被害情報優先共有方式の 3 つを評価する。シミュレーション環境とシミュレーション結果を表 2 と図 14 に示す。図 14 より Epidemic Routing では、被害度ごとの到達した情報量に大きな差はなかった。これは、送信制御が FIFO に基づいて行われたからである。被害情報優先共有方式は、他の方式と比較すると被害度の高い情報が約 1.3 倍多く到達している。また、重み付

け被害情報優先共有方式では、被害情報優先共有方式と比較すると、被害度の低い情報が 1.2 倍程度多く到達している。これらは、災害情報共有方式の制御が正しく動いているからである。

表 2 シミュレーションパラメータ

パラメータ		
シミュレーション範囲	4000 m × 2500 m	
シミュレーション時間	10800 s	
試行回数	10 回	
ノード数	D-ZEV	1 台
	D-ZEV mini	30 台
移動速度	4.0 ~ 6.0 m/s	
ストレージサイズ	固定ノード	20.0 GB
	D-ZEV mini	20.0 GB
通信速度	5.0 Mbps	
情報生成間隔	被害度 “高”	180 s
	被害度 “中”	180 s
	被害度 “低”	180 s

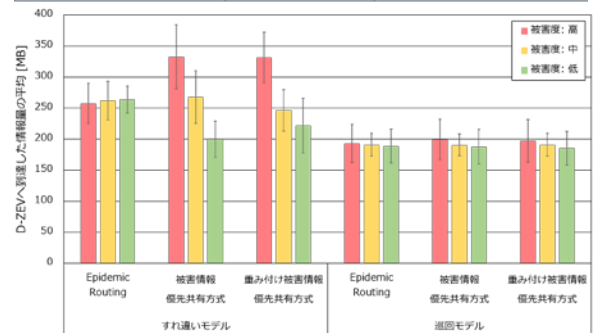


図 14 共有方式の違いによる到達したデータ量

5. おわりに

D-ZEV および D-ZEVmini のネットワークを構成し、情報収集配信のためのシステムを開発した。これらはユーザ評価により有効性を確認した。また、D-ZEVmini の DTN のための基礎数値の明確化や情報共有方式を明らかにした。

今後は、平常時でも使用可能なシステム化や、実装による情報共有方式の効果を測定する。

謝辞

本研究に携わった学生諸君に感謝します。また評価実験にご協力いただいた西新宿、羽田地区の皆様にも感謝します。

参考文献

- 工学院大学，エリア防災テーマ 3：自律移動式ゼロエネルギーユニット，
<https://www.kogakuin.ac.jp/bousai/theme/theme3.html>
(2009 年 3 月 6 日閲覧)
- 鈴木 浩平，田島 氷河，水野 修，自立移動式災害対策支援ユニットにおける災害情報提供システム，2019 年電子情報通信学会総合大会，A-19-26，Mar. 2019.
- S. Farrell and V. Cahill, Delay and Disruption Tolerant Networking, Artech House, 2006
- 田島 氷河，鈴木 浩平，水野 修，小型自立移動式災害対策支援ユニットにおける通信システムの構築，2019 年電子情報通信学会総合大会，B-6-16，Mar. 2019.
- 田島 氷河，井上 勇気，水野 修，小型自立移動式災害対策支援ユニットにおける災害情報共有方式，電子情報通信学会技術報告，vol. 119, no. 226, ICTSSL2019-19, pp. 17-22, Oct. 2019.
- A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially connected ad hoc networks,” Technical report, CS-2000-06, Duke University, 2000.

自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV）の電力供給システム

キーワード（D-ZEV、太陽光発電、蓄電池、自立運転、移動型）

野呂 康宏*

1. はじめに

本ブランディング事業のテーマ 3 では、地域防災拠点となる避難所等に移動して、救急救護、情報通信、エネルギー供給等、現地の活動をサポートする D-ZEV（Disaster - robust Zero Energy Vehicle）の開発を行っている。

D-ZEV は、大災害時に地域災害拠点に駆けつけることができ、D-ZEV 自身が災害対策本部と通信連携可能な情報設備を備え、搭載するサイネージ等から情報発信を行う。避難所では仮設の救急・救護スペースを開設し、その運営を、照明や空調、空気清浄機などでサポートする。さらに、小回りの利く電動アシスト自転車の D-ZEV mini と連携し、D-ZEV を拠点とした近距離圏の情報を収集する一方で、地域住民や帰宅困難者への情報発信に対応する。

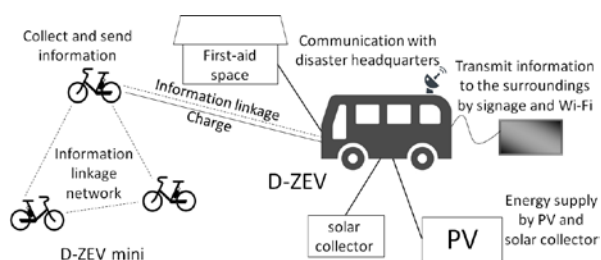


図 1 D-ZEV の構成イメージ

報告者は、D-ZEV の電力供給システムを担当した。その特徴は、太陽光発電（PV）をエネルギー源とし、停電が発生しても自立して電力供給が可能である。ただし、PV の発電量は気象条件に依存することより蓄電池を併用し、その必要容量の見極めと、移動に適した構造、収納方法、重量の検討を行った。

2. 過去 4 年間の成果の概要

2.1 2016 年度の成果概要

電力供給システムの構築にあたり、まずは、負荷設備の抽出と消費電力の調査を行った。また、これ

らに自立的に電力供給可能な設備の概要を立案した。負荷設備の詳細、搭載する車両の条件と相互に調整が必要であるため、仮仕様として下記の二種類を製作する方針とした。

1) 移動型

車両が移動中は車内に格納し、避難所など現場で広場などに PV パネルを仮設して発電する。設置が容易で軽量、省スペースであることが要件である。

- ・ PV 発電容量：4～5 kW
- ・ 蓄電池容量：20 kWh 程度
- ・ インバータ出力：AC 100 V、3 kW 程度

2) 車両固定型

フレキシブルモジュール等を利用して車両の屋根に搭載し、D-ZEV 内の照明などに利用する。

- ・ PV 容量：200～600W
- ・ インバータ出力：AC 100 V、200～500 W

2.2 2017 年度の成果概要

2017 年度には、電力供給システムを構成する要素が満たすべき条件を明確にし、太陽光発電や蓄電池の必要容量をシミュレーションにより決定し、実際に製作仕様を整理したうえで D-ZEV の製作まで実施した。

2.2.1 電力供給設備に必要な条件

D-ZEV の電力供給設備に求められる条件は以下の通りである。

- ・ 1 週間程度、自立的に電力供給が可能（商用系統は停電していて利用できない前提）
- ・ 簡易救護所の運営や情報通信に必要な電力供給が可能
- ・ D-ZEV 本体に搭載が可能（サイズ、積載重量等の制約を満たす）
- ・ 地域防災拠点にて、短時間で設置が可能

2.2.2 電力供給設備の構成

対象とする電力供給システムの全体構成を図 2 に示す。エネルギー源は太陽光（PV）による発電とする。PV のみでは夜間や雨天時に発電ができないため、

* ：工学院大学工学部電気電子工学科

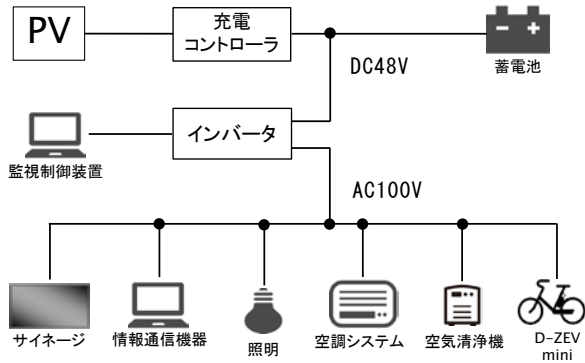


図 2 電力システムの全体構成

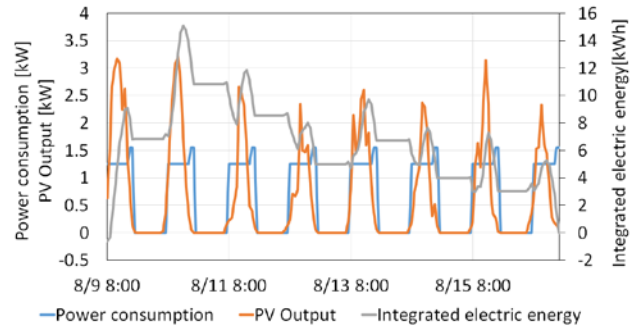


図 3 負荷消費電力、PV 発電電力、積算電力量

蓄電池を使用し、負荷へインバータ経由で電力供給するものとする。負荷は、簡易救護所内の照明、及び環境維持に必要な空調システム・空気清浄機、災害対策本部との通信を行う情報通信機器（無線 LAN 機器、PC、モニタ）、周囲への情報発信を行うサイネージおよび D-ZEV mini を想定する。

2.2.3 電力供給設備の容量検討

負荷の一時間ごとの消費電力を表 1 のように仮定して、インバータ、PV、蓄電池の容量を検討した。なお、D-ZEV の使用期間を 2016 年 8 月 9 日～8 月 16 日、電力供給時間を 8 時～18 時とした。このとき、負荷を一斉に動作させたときの総消費電力は 1.55[kW]であったため、インバータの出力は負荷起動時の突入電力を考慮して 3[kW]とした。また、PV 容量は工学院大八王子キャンパスの PV システムの実測値を基に計算を行い、多少のマージンを加味して 5[kW]程度とした。さらに、D-ZEV 使用期間中の負荷総消費電力、PV 発電電力から、蓄電池の積算電力量（PV の発電量と負荷設備消費電力の差を積算したもの）を算出した（図 3）。その結果、蓄電池に必要な容量は 15.7[kWh]であったため、損失および SOC 範囲を考慮して約 20[kWh]とした。

表 1 負荷設備の消費電力

設備名	消費電力[W]	台数
照明	30	1
空調システム	810	1
空気清浄機	30	1
情報通信機器	130	1
サイネージ	250	1
D-ZEV mini	100	3

2.2.4 太陽光パネルの設置方法

前述の通り、D-ZEV は防災拠点にて PV を使用して電力供給を行う。その際、PV 及びそれを支える架台はあらかじめ D-ZEV に搭載しておき、防災拠点到着後に設置を行う。そのため、PV パネルは 2.2.1 に示した条件を満たす必要がある。そこで、一般的な架台に代えてテントを利用し、また、PV パネルは軽量のフレキシブルモジュールを使用することとした。

着後に設置を行う。そのため、PV パネルは 2.2.1 に示した条件を満たす必要がある。そこで、一般的な架台に代えてテントを利用し、また、PV パネルは軽量のフレキシブルモジュールを使用することとした。

PV パネルの設置図を図 4 に示す。パネルはテントの屋根に設置し、テント 1 張りあたりのパネル数を 12 枚とする。また、テントは片流れ屋根の傾斜角度を 10 [度]とする。テントの脇に集電箱を設置することでテント～D-ZEV 間の配線を最小とし、事故の可能性を軽減する。また、テントの内側に簡易救護所を設置することで、夏場の直射日光による簡易救護所内気温上昇を抑制する効果も期待できる。

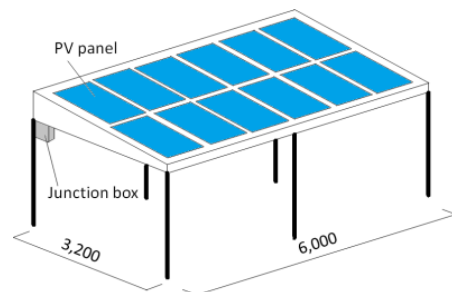


図 4 PV パネルの設置図

2.2.5 D-ZEV への組み込み方法の検討と製作

D-ZEV の車両は、普通車サイズで積載スペースの大きなハイエースとし、電源設備は図 5 に示す組み込みを行った。



図 5 D-ZEV への組み込み

2.3 2018 年度の成果概要

2018 年度には、前年に試作した D-ZEV を用いて PV の発電量や負荷設備の電力需要を計測・分析し、当初の検討方法の妥当性の確認を行った。また、改善点を検討して、太陽光パネルの追加分を試作した。さらに、電力供給設備の使用方法をサポートする電源監視システムの開発を行った。

2.3.1 試作品の設置状況

製作した D-ZEV の試作品を図 6 に示す。D-ZEV は、電力を供給する車両（以下、電力供給車）（図 6 左）と、サイネージなどで情報を発信する車両（以下、情報発信車）（図 6 右）の 2 台を使用する。この試作品では、PV パネルが合計 15 枚（テントの屋根:12 枚、電力供給車の屋根:3 枚）使用できる。なお、PV パネルの容量は 2.2.3 で検討した必要容量に対して不足しており、今後、増設する計画である。

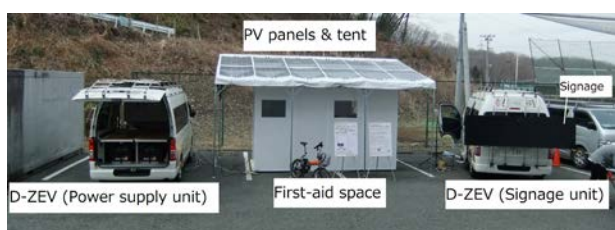


図 6 D-ZEV 試作品

2.3.2 太陽光発電の発電量評価

試作品を用いて、PV 発電電力の計測を行った。図 7 はテントに設置した PV パネルの発電電力と蓄電池の充電残量のグラフである。計測期間中（2018 年 7/21～7/24）は天気が概ね良かった。これより、天気がよければ、テント 1 張り分の PV パネルでバッテリーを 1 日あたり 30 %程度充電できることがわかる。また、2018/7/23 PM 12:00 ごろ、発電量が 0 まで低下している。これは、蓄電池の充電が 100 %になったことによって、PV 発電出力が自動的に止まったためである。

図 8 は電力供給車の PV パネルの発電電力と蓄電池の充電残量のグラフである。こちらも、計測期間中は天気の良い日が多かった。すなわち、電源供給車の PV パネルでバッテリーを 1 日あたり 10 %程度充電することが可能である。従って、テント 3 張り分の PV パネルと同時に発電を行えば、1 日でバッテリーをほぼ 100 %充電が可能である。

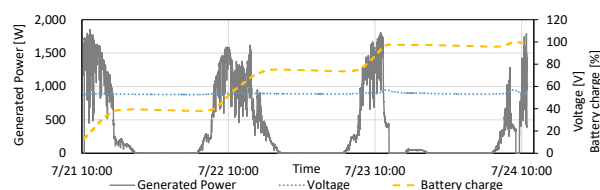


図 7 テントに設置した PV の発電出力

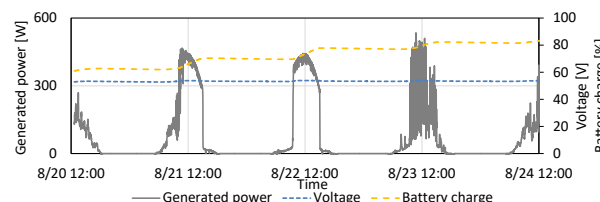


図 8 D-ZEV の屋根に設置した PV の発電出力

2.3.3 負荷設備の消費電力評価

負荷設備の消費電力・突入電流に関しては、照明、D-ZEV mini、空調、サイネージの計測を行った。また、空調では、D-ZEV からの電力供給のみで運転が可能なのかについても実験を行った。

計測を行った負荷設備の消費電力や、当初想定していた消費電力との差を表 2 にまとめる。なお、当初サイネージは 1 台だけ使用する想定だったが、実際には 2 台使用することとした。また、D-ZEV mini は 3 台使用するため、消費電力の実測値・想定値ともに、3 台分の数値としている。

表 2 より、実際の負荷設備消費電力は想定していた消費電力より約 90 W 上回っている。しかし、D-ZEV に搭載した各電力供給設備の容量にはある程度の余裕を持たせてあるため、上回った分の消費電力が大きな影響を及ぼす可能性は低いと思われる。

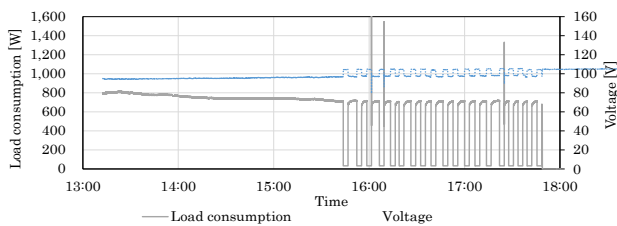
図 9(a) は空調の消費電力、(b) は始動電流である。今回使用した空調は、配管工事が不要なスポットエアコンである。(a)を見ると、16:00 前頃からグラフが凸凹している部分がある。これは、室温が設定温度に達したことで、空調のコンプレッサが ON・OFF

表 2 負荷設備の消費電力

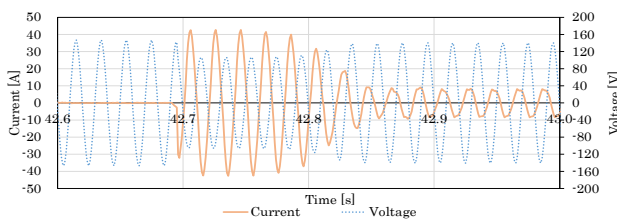
Name	Actual load [W]	Assumed load [W]	Load difference [W]
Illumination	33	30	+3
Air conditioner	750	810	-60
Signage	370 (2 units)	250 (1 unit)	+120
D-ZEV mini	336 (3 units)	300 (3 units)	+36

を繰り返して温度調整を行っているからである。計測の結果、室内を冷却しているときの空調の消費電力は 750 W 程度、コンプレッサが OFF(室内ファンのみ稼動)の時の消費電力は 30 W 程度だった。

始動電流は、(b)よりピーク値 42.7 A と大きな値であった。定常時はピーク値 9 A 程度であるため、始動電流は定常時の 4.7 倍であり、インバータの許容値とほぼ同レベルであることがわかった。また、この時、電圧は約 25.9 % (ピーク値 142.3 V→105.5 V) 低下したが特に保護装置は動作しなかった。



(a) 消費電力と供給電圧



(b) 始動電流

図 9 空調の消費電力および始動電流の計測結果
(7/21)

次に、外気温の高い日に D-ZEV から空調への電力供給を行った。前述のように空調の始動電流は大きかった。しかし、D-ZEV に搭載されているインバータの保護機能は動作しなかった。また、空調を数十分間動作させ続けたが、D-ZEV からの電力供給は停止しなかった。すなわち、空調の始動・運転は正常に行われる結果が得られた。

2.3.4 蓄電池の容量およびシステムの評価

実測した PV 発電電力データおよび負荷データを用いて、蓄電池容量の妥当性を評価した。その結果、PV パネルが現状（約 2.6 kW）の容量であれば、1 週間の運用のためには蓄電池容量が明らかに不足しているが、PV パネルの容量を 2 倍（約 5.2 kW）とすると、空調を使用しても蓄電池残量は必要量を維持できる可能性が高いことが確認できた。すなわち、当初検討した設備容量が妥当であると評価できた。

2.3.5 成果の公表

2018 年 8 月 30 日～31 日に開催されたイノベーションジャパン 2018 では、D-ZEV の電源車と説明パネル（テーマ 3 合同）を出展し、成果を発信した。また、11 月 13 日～11 月 21 日に開催された新宿駅周辺防災対策協議会の防災ウィークでは、工学院大学南側、新宿中央公園、および、新宿野村ビルの 3 か所で D-ZEV 全体の展示に加え、サイネージや炊き出し（電磁調理器）への電源供給を行い、成果の発信とともに運用上の問題点をチェックした。

2.3.6 試作品の改善点の分析

いくつかの状況での運用を行った結果、以下に代表する要改善点が判明し、今年度の研究・製作に反映した。

- (1) 保管中に蓄電池残量が自然減で低下するため、商用電源からも充電ができるようにする。
- (2) テントは大型で重量もあるため、設置のために最低でも 12 人程度が必要であり、時間もかかる。そこで、軽量化が必要である。

2.3.7 2018 年度の試作

2017 年度に製作した試作機では、PV パネルの容量が不足しているため、テント一張り+PV パネルを 12 枚追加で製作する。ただし、テントは 2.3.6 に示した改善点を考慮して、支柱をアルミ製にする、高さを低くするなど軽量化を図ることとした。

2.3.8 電源監視システムについて

電源監視システムとは、災害時に蓄電池からの電力供給をなるべく長期間利用するために、その日の使用可能電力量を把握し、利用者を支援するためのシステムである。システムには、(i)使用可能電力予測機能 (ii)予測値補正機能 (iii)計測機能 (iv)ログ機能 の 4 つの機能を搭載させる。以下に、この機能を実現するうえで重要な研究開発要素について検討結果を示す。

2.3.9 太陽光発電量の予測

以下の手順で発電量を推定することとし、プログラムを作成し、精度の検証を行い、システム運用には十分な精度が得られることを確認した。

- (1) 天気予報より、予報データを収集する。
- (2) 天気予報の結果より、晴天係数を算出する。
- (3) 地域の緯度経度や季節情報から 1 時間ごとの大気圏外全天日射量を算出する。
- (4) (2)、(3)およびパネルの効率などのデータより発電量を推定する。

2.3.10 需要の推定

負荷設備の内、空調については消費電力が大きく、また、気温により変化することより、計測データを分析して消費電力推定のための近似式および予測フローを決めた。その他の設備は、前日の稼働実績を当日以降の予測に使用することとした。

2.3.11 電源使用ガイドの算出方法

PV の発電量、負荷の消費電力より、2 日先まで 1 時間ごとの蓄電池残量を推定し、その値から、蓄電池残量が十分であるか、不足する可能性があるかをアナウンスする方法を検討した。また、これらの表示方法を検討した。

2.4 2019 年度の成果概要

2018 年度までの製作品の組み合わせ試験を実施した。また、新宿エリアの防災ウィークを始め、出展して成果の公表を行った。さらに、PV パネルの発電電力量を増加させる方法について検討を行った。詳細については、3 章に説明する。

3. 2019 年度の成果

3.1 2018 年度製作品の動作確認

3.1.1 組合せの動作確認

これまで製作した D-ZEV システム全体を組み合わせでの実験を計画した。組み立てた状況を図 10 に示す。このタイミングで、2018 年度同様、太陽光発電の発電状況の計測や負荷設備の消費電力の計測を計画していたが、動作確認中にリチウムイオン蓄電池の 1 ユニットが故障していることが判明した。

原因調査の結果、蓄電池の残量が少ない状態が継続すると、リチウムイオン蓄電池は故障が発生し、復帰できないことが判明したため、対象ユニットの交換、制御保護回路の再調整などを行った。また、今回の事象を教訓として、電力供給車（ハイエース）天井に設置している太陽光パネルは、極力常時運転し続ける運用に方針を変更した。



図 10 D-ZEV 組合せ試験の状況

3.1.2 イベントにおける出展

10 月 12 日に大田区水辺のフェスタにて展示予定で準備を進めたが、あいにくの台風で中止となった。

新宿防災ウィーク（2019 年 11 月）では、防災訓練の一環として新宿中央公園での D-ZEV 展示を、体験型イベント「自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV）のデモンストレーション」で新宿キャンパス南側広場での展示を行った。期間中は D-ZEV の電力供給システムから、情報機器への電力供給を問題なく行った。

3.2 太陽光発電の発電電力増加の検討

2018 年度までの研究で、太陽光発電設備の発電実績や負荷設備の消費電力実績を確認してきた。2017 年度に設備を立案した時点ではもう一組の太陽光パネルを追加する計画であったが、既設と構造が同じものであれば、発電量などは推定できることから、新たに製作する代わりに、少ない太陽光パネルで発電量を増やす方法について検討した。具体的には、テントに固定となっている太陽光パネルの方位角や傾斜角を可動式とすることによって、季節や時間帯に応じて最適な角度に調整することを想定し、その効果の見極めをシミュレーションによって行った。

3.2.1 評価指標について

太陽光パネル一組（2.6 kW 分）を利用して、設置時の方位角および傾斜角の調整方法をパラメータとし、1 年間の各日から 1 週間運転を継続するものとして発電量と総需要のシミュレーションを行い、発電量が不足する（1 週間の発電電力量 < 負荷の消費電力量となる）週数 B を算出する。この不足週数 B を用いて、目的達成率 A [%] を以下の式で算出し、評価指標とする。

$$A = \left(1 - \frac{B}{365}\right) \times 100$$

3.2.2 検討方法および条件

傾斜角の調整方法については、以下を基本パラメータとした。

- ・ケース 1 現状（テントの天井の傾斜角 15°）
- ・ケース 2 年間を通して最適角に固定
- ・ケース 3 月単位で最適角に固定
- ・ケース 4 週単位で最適角に固定
- ・ケース 5 各日毎に最適角に設定
- ・ケース 6 1 時間ごとに最適角に調整

一方、方位角については以下のパラメータとした。

- ・ケース 1 南向き

- ・ケース 7 月単位で最適角に固定
- ・ケース 8 週単位で最適角に固定
- ・ケース 9 各日毎に最適角に設定
- ・ケース 10 1時間ごとに最適角に調整

3.2.3 検討結果

上記基本パラメータおよびその組み合わせに対して、発電量と負荷消費電力の算出を行い、不足週数 B および目標達成率 A を算出した。組合せケースおよび目標達成率を表 3 に示す。また、傾斜角をパラメータとした時の目標達成率を図 11 に、方位角をパラメータとした時の目標達成率を図 12 に示す。

図 11 より、傾斜角を調整するケースは、年間最適（ケース 2）や月間最適（ケース 3）でも大きな改善効果が得られる。この場合、設置時に一度調整してしまえば、運転期間である 1 週間は再調整が不要であるため、比較的簡単に実現できそうである。これに対して方位角を調整するケースは、各日最適（ケース 9）でも効果が小さく、各時間最適（ケース 10）にしないと顕著な効果は得られない。表 3 より、両者を組み合わせたケース 13 やケース 25 も改善効果

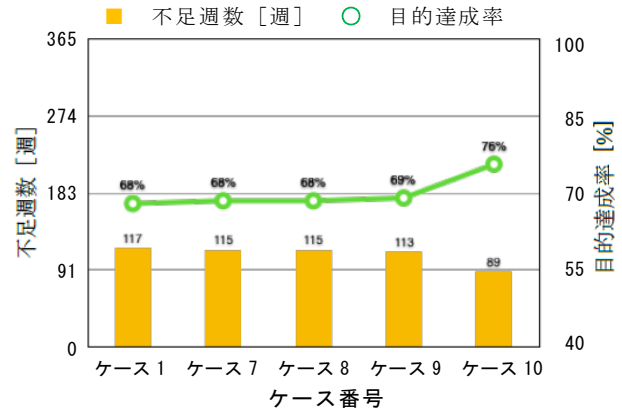


図 12 方位角をパラメータとした目標達成率

が大きい。ただし、これを実現するためには、太陽高度に応じて追従するトラッカーなど、複雑なシステムが必要になり、D-ZEV の制約条件を満たすのは困難と思われる。

以上より、複雑なシステムとしなくても、傾斜角を調整できるようにする事で、太陽光発電の発電量の改善が見込めることが定量的に明らかとなった。

表 3 検討ケースおよび目標達成率（下段）

	15°現状 D-ZEV	最適 年間	最適 月間	最適 各週間	最適 各日	最適 各時間
南方向	ケース1 68%	ケース2 79%	ケース3 83%	ケース4 84%	ケース5 85%	ケース6 86%
最適 月間	ケース7 68%	ケース11 79%	ケース15 84%	ケース19	ケース23	ケース27
最適 各週間	ケース8 68%	ケース12 80%	ケース16	ケース20	ケース24	ケース28
最適 各日	ケース9 69%	ケース13 83%	ケース17	ケース21	ケース25 86%	ケース29
最適 各時間	ケース10 76%	ケース14 91%	ケース18	ケース22	ケース26	ケース30

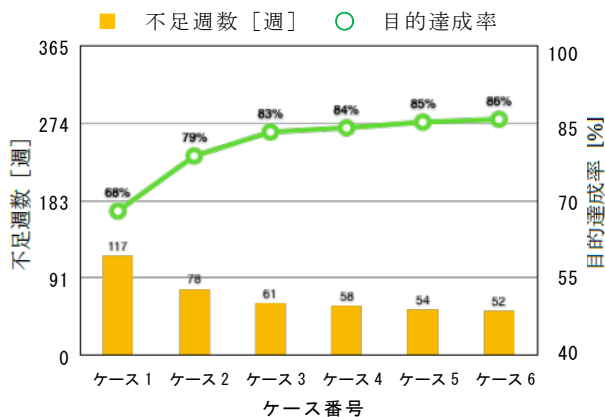


図 11 傾斜角をパラメータとした目標達成率

4. おわりに（課題や次年度計画など）

本研究では、D-ZEV の立案からスタートし、制作、実測を通して検証・改善を進めることができた。残された課題は、システム構築の精度を高められるよう、組み合わせでの計測を継続することと、電源監視システムについてプロトタイプの完成度を高めていくことであり、次年度に取り組みたい。

謝辞

本稿における電源設備に関する検討は、2017 年度卒業の細谷亮太君、2018 年度修了の久保陽平君および 2018 年度卒業の板倉陽平君、篠塚祐樹君、2019 年度卒業のブルキ アブドルマジード君が中心となって行ったものである。また、D-ZEV 製作にあたり、日比谷総合設備株式会社の阿波田様はじめ、関係各位に議論に参加いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 久保、野呂、自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV）における電力供給システムの検討、電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会、pp. 101-105、2017
- 2) Y. Kubo, Y. Noro, Study of Power Supply System for Disaster-robust Zero Energy Vehicle (Part 4), IEEE IWPI2018, pp. 101-105, 2018
- 3) 久保、野呂、自立移動式ゼロエネルギーユニット（D-ZEV）における電力供給設備の検討（その 5）、平成 31 年電気学会全国大会、7-508

簡易救護ユニット用空調システムの研究

簡易救護ユニット、間接蒸発冷却、太陽熱集熱器

横山 計三* 富樫 英介*

中島裕輔* 柳 宇*

1. はじめに

本ブランディング事業のテーマ3では、災害時に避難所などに移動して、自前の電力で現地の活動をサポートするD-ZEVの開発を行っている。本報では、移動先に太陽光発電装置、太陽集熱装置および紙をベースとしたパネルによる簡易救護ユニットを設置し、その内部環境を調整する空調システムを対象としている。この空調システムは、できるだけ現地のエネルギー源を用いずに自立して行うことを想定している。本年は、研究が開始されて4年目にあたるので、これまでの経過とその成果について報告する。

2. システム・構成装置の概要とこれまでの経過

2.1 簡易救護ユニット

ハニカムボード製の広さ4m×2m、高さ2mのユニットで、通常は、2m×1mのパネルに分解して車の荷室に収められている。組み立てには、数人で1時間程度かかる。このユニットを太陽電池が上面に搭載されたテントの下に設置する。



Fig.1 簡易救護ユニットとテント

2.2 空調システム

簡易救護ユニットの空調は、床置小型空調機、間接蒸発冷却器、太陽熱集熱器を組み合わせたシステムとした。当初は、デシカントユニット、間接蒸発冷却器を組み合わせ、除湿剤の再生と暖房に太陽熱を利用する予定であったが、間接蒸発冷却器の能力が十分ではないことがわかり、小型空調機を太陽光

発電による電力で運転し、外気処理を冷房時は間接蒸発冷却器で、暖房時は太陽熱により加熱を行うというシステムとした。システムのダイアグラムをFig.2に示す。間接蒸発冷却器、太陽熱加熱器は、導入外気の一次処理を行うこととし、隙間風による外乱を少なくするために、室内を正圧に保つように運転する。

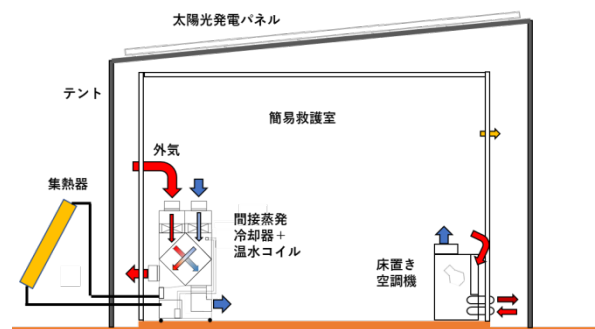


Fig.2 空調システムダイアグラム

2.3 床置き小型空調機

パッケージ型小型空調機をベースの空調とする。その仕様をTable.1、Fig.3に示す。

Table.1 床置き空調機仕様

製品名	トヨミスボット冷暖エアコン	
型式	TAD-22HW	
電源	単相100V 50/60Hz	
冷風能力	kW	2.0/2.2
温風能力	kW	1.7/1.9
冷風消費電力	W	590/690
温風消費電力	W	600/730
コード長さ	m	2.5
除湿能力	L/日	36/42
外形寸法	幅	mm
	奥行き	mm
	高さ	mm
製品質量	kg	26
冷媒	R-410A	



Fig.3 空調機外観

2.4 間接蒸発冷却器

間接蒸発冷却とは、水の蒸発潜熱を利用して、気流中で水を噴霧して冷却された空気と被冷却空気を顕熱交換器により熱交換する装置である。2017年度は、G社製試験装置を用いたが十分な性能が期待できず、2018年、2019年度はM社製顕熱交換器と水噴霧を組み合わせた装置を試作した。特に2019年度は、装置の小型化とユニット化をおこなった。

*：工学院大学建築学部

2.5 太陽熱集熱器

デシカントの再生用および暖房用に使用する予定であった太陽熱集熱器は、2018年度に真空管式集熱器の性能評価を行った。しかし、真空管式は、集熱性能は高いが重量が過大で運搬に適さないと判断されたため、2019年度は、集熱器の軽量化を図り、プラスチックパネルによる集熱器を用いてその性能評価を行った。

3. 試験概要と評価結果

3.1 簡易救護ユニット外壁パネルの熱伝導率

本事業で用いる救護ユニットの外壁パネルの熱伝導率を測定した。計測方法は、熱電対によりパネル両側の表面温度、恒温室側空気温度、外側空気温度を計測し、熱流計により試験体の熱流量を計測した。Fig.4、5 に実験装置全体と測定器取り付け状況を示す。試験体は、神田産業製のハニリアルボードで、ハニカム構造を形成している（Fig.6、7）。この構造により紙でありながら荷重に強く、廃棄も簡単のため、災害時の簡易救護施設に適していると考えられる。



Fig.4 実験装置全体 Fig.5 測定器取り付け状況

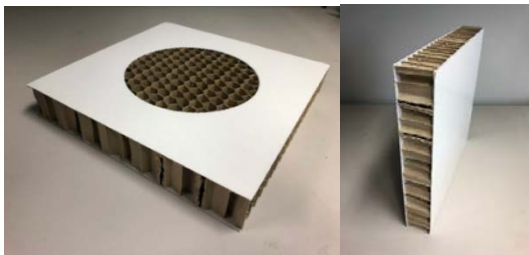


Fig.6 試験体側面 Fig.7 試験体表面

熱流の方向を2方向で計測するために、恒温室の設定温度を5℃と40℃とし、それぞれ2回ずつ計4回計測して安定した5分間の平均値を算出した。熱伝導率の計測結果をTable.2に示す。この結果、試験体のパネルの熱伝導率は、0.111W/mKとなり、熱貫流率は、2.23W/m²Kとなった（パネル厚さ31mm、表面熱伝達率8 W/m²K、23W/m²Kとした）。

Table.2 計測結果

ケース	恒温室設定温度[℃]	CH	熱伝導率[W/mK]	ケース毎平均	全平均
1	5	14	0.108	0.110	0.111
		15	0.112		
2	40	14	0.110	0.113	
		15	0.115		
3	5	14	0.105	0.104	
		15	0.103		
4	40	14	0.114	0.116	
		15	0.117		

3.2 間接蒸発冷却ユニットの性能評価

(1) ユニットの概要

間接蒸発冷却器では水噴霧を行う流路をウェットチャンネル、冷却される流路をドライチャンネルと呼ぶ。ウェットチャンネルでは、水噴霧を行うことで空気が冷却され、顕熱交換機を通してドライチャンネルの空気が冷却される。顕熱交換器はM社製HEATEX-H（Fig.8、Table.3）を使用した。コンパクト化を実現するために顕熱交換器を45°に傾けて設置した。その模式図をFig.9に示す。ユニットには、2台のファン、ファンコントローラー、水噴霧ポンプとノズル、フィルターなどで構成される。

Table.3 仕様

	排気	給気
風量	220m ³ /h (0.069kg/s)	220m ³ /h (0.07kg/s)
圧力損失	24/22Pa	24/23Pa
効率	N/A	63%
	64%	64%
最大効率	65~70%	
風速(表面)	0.68m/s	0.68m/s
風速(チャンネル)	1.85m/s	1.87m/s
消費電力	0.2kW	
プレート材質	アルミ/アルミ+エポキシコート	

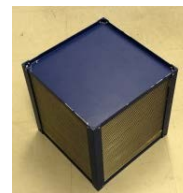


Fig.8 顕熱交換器

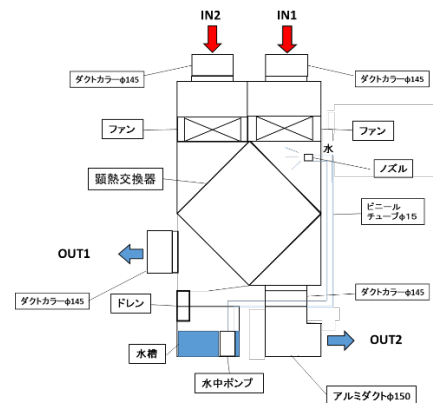


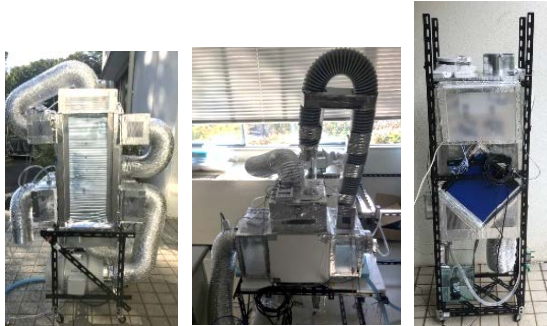
Fig.9 間接蒸発冷却機模式図

Table.4 間接蒸発冷却器の仕様

	ドライチャンネル	ウェットチャンネル
風量	max 500 m ³ /h	max 500 m ³ /h
水噴霧量	—	max 300 mL
冷却熱量	0.6 kW (温度差 10K 時)	
外形寸法	430×1380×430 mm	
電力	ファン MAX140W×2、ポンプ 11W 運転時消費電力 80W 以下	

(2) ユニットのコンパクト化

2017年、2018年と2019年度に製作されたコンパクト化したユニットの外観を示す。



2017年 2018年 2019年

Fig.10 ユニット外観

(3) 間接蒸発冷却ユニットの計測結果

本ユニットの性能を把握するために Table.5 の条件にて計 8 ケースについて計測を行った。計測結果の一例を Table.6、Fig.12 に示す。本冷却装置は、いかに効率よく水を噴霧して冷却するかがポイントであるので、できるだけ広く拡散させるようにノズルの方向を調整した。また、顕熱交換器の表面に水がいきわたることも重要である。そのために拡散シートを噴霧する熱交換器表面に張り付けた (Fig.11)。

Table.5 実験パラメータ水準

項目	ウェットチャンネル (1)	ドライチャンネル (2)
風量	250 m ³ /h (100%) 125 m ³ /h (50%)	250 m ³ /h
温度	室温 25℃～30℃ (成行き)	外気 35℃、31℃ (電気ヒータで制御)
水噴霧	噴霧量：300 mL 噴霧方向：水平、垂直 水拡散シート：あり、なし	



Fig.11 ノズルと拡散シート

(4) 冷却能力

ウェット・ドライの二つの空気の温度差と冷却能力の関係をみると Fig.13 のようになる。冷却能力は

Table.6 ケース 2 計測結果（風量 250,250m³/h、外気 35℃、噴霧方向：水平、拡散シートあり）

	IN1	OUT1	IN2	OUT2	
乾球温度 [°C]	26.8	30.3	34.3	27.8	
湿度 [%]	44.7	42.2	30.1	42.9	
比エンタルピー [kJ/kg]	52.0	59.6	60.6	53.5	
絶対湿度 [g/kg]	0.0098	0.0114	0.0102	0.0100	
湿球温度 [°C]	18.5	20.8	21.1	18.9	
風量 [m ³ /h]	250	250	250	250	
熱量 [kW]	排熱	0.63	冷却	0.59	
水噴霧後の乾球温度 [°C]	23.1	飽和効率	0.45		

風量比	1
熱量比	0.93
顕熱交換率	0.87
水噴霧時の交換効率	0.58
実加湿量 L/min	0.008
水噴霧量 L	0.30
加湿比	0.026

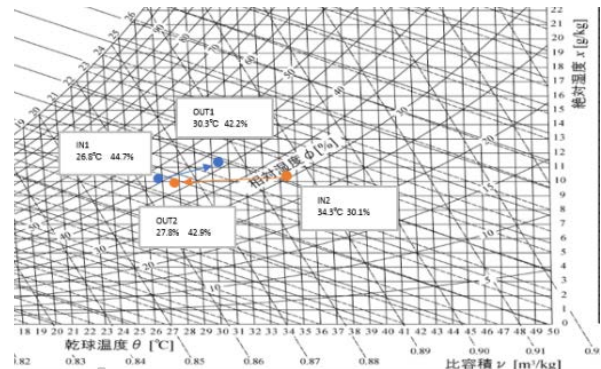


Fig.12 空気状態（ケース 2）

約 0.10～約 0.60kW で温度差が大きいほど冷却能力は高くなる。また、ウェット側風量が 50%より同風量の方が冷却能力が高い。最も冷却能力が高かったのは外気条件 35℃、風量 250m³/h (風量比 100%)、水量 300ml、噴霧方式ノズル式(横)、水拡散シートありのケースで 0.59kW である。この時、消費電力が約 80W なので、COP は 7.4 となった。

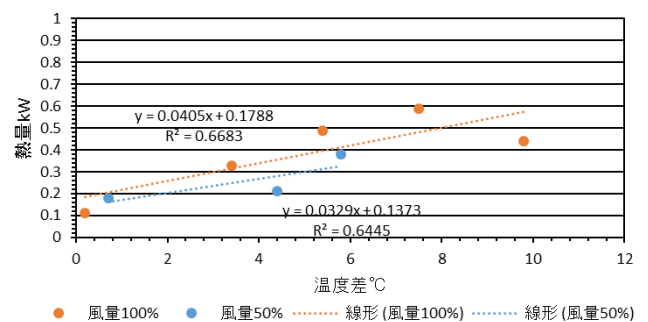


Fig.13 冷却能力

(5) 飽和効率

水噴霧を行った際に、どれだけ加湿されたかを飽和効率で表す。飽和効率は噴霧前の空気が水噴霧によって飽和したときの絶対湿度増加分に対する、噴霧後の排気の絶対湿度増加分の比とした。実験では 0.40～0.94 の範囲であった。

(6) 顕熱交換効率

顕熱交換率は約 0.6～0.9 であった。顕熱交換器の仕様では、0.65～0.70 であるので、同等の能力は出

ていることが分かった。

(7)実加湿量

実加湿量は約 0.004~0.012L/min であった。噴霧量が、0.3L/min であるので、加湿効率は、4%程度である。加湿されなかった水分は、ドレンを通して株の水槽に戻るので無駄に水を消費しているわけではない。

3.3 太陽熱集熱器

(1)集熱器の概要

軽量型の集熱器として、NPO 法人エスコットで考案されたプラスチック簡易コレクターを使用する。Table.7 に仕様、構造を、Fig.14 に、集熱器模式図と外観を示す。

Table.7 集熱器仕様表

項目	内容
集熱器形式	平板フレキシブル型・太陽集熱器
モデル名	ヒートル・パネル(NPO エスコット)
寸法	910x1810x4.5(受光面)
集熱器面積	1.66㎡(集熱面積 1.64±0.01㎡)
製品重量	2.7kg(満水時 8.7kg)
受光部材質	ポリカーボネート
最大使用圧力	30KPa(試験圧力60KPa)
配管呼び径	1/2インチ、平行雄ネジ

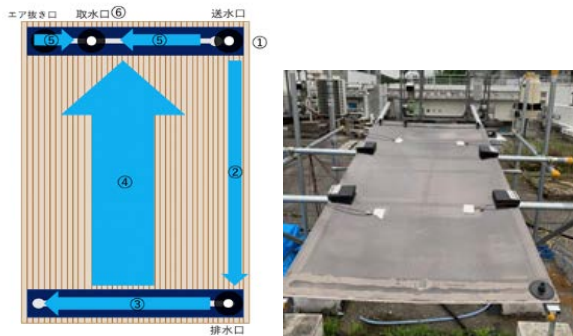


Fig.14 集熱器模式図と外観

(2)集熱器の製作

今回使用する集熱器は、部材を購入して自作したものである。Table.8 に製作手順を示す。

(3) 集熱器の性能実験

集熱特性を把握するために集熱器単体における試験を行う。試験装置は Fig.15 に示すように、集熱器を1枚設置でき、パネル架台は角度が調節できるようになっている。計測内容は試験体の水の出入り口温度、循環流量、パネル傾斜面日射量、風向、風速、冷却装置の出入口空気温度と風量、周囲温度である。試験では、流量を 0.5L/min と 1.0L/min の2水準、断熱材は、黒色または白色の断熱材をパネル裏面に張り付けた場合と無い場合

Table.8 集熱器製作手順



Fig.15 実験装置系統図

の3水準で計6ケースを行った。パネル傾斜角は、10°とした。

(4) 実験結果

Fig.16~21 に流量 0.5L/min、断熱材（黒）の代表日（9月10日）の計測結果を示す。その結果、以下の知見を得た。

- ・日射量は最大約 1000W/m² で、集熱量の最大は 542W であった (Fig.16)。

- ・集熱器の出口温度は最大 63℃ (外気温 + 22.5℃) にまで上がる。また、入口温度との温度差も最大 8℃になる (Fig.17)。夜間は、放射量が大きくなり、入り口と出口の水温が逆転する。

- ・集熱効率は、断熱材のなし、白色、黒色をパネル裏面に張り付けたが、黒色断熱材を使用したときに最も大きく、最大で 37%となった。また、全体的な数値も 20~30%近辺に集中していることがわかる

(Fig.18、19)。ここで、絞り込みとは、JIS の計測条件を参考に、日射量 400W 以上、日射量の変動は 50W/m² 以内、風速 4m/s 以内、集熱媒体入口温度の変動 ±0.5K/分以内のデータを用いた結果である。

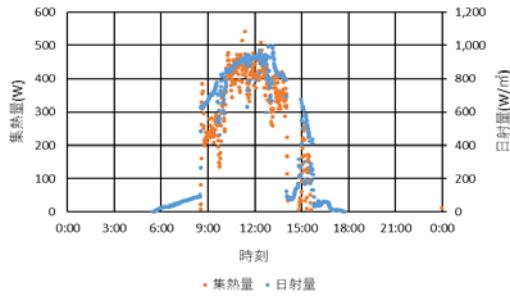


Fig.16 集熱量と日射量

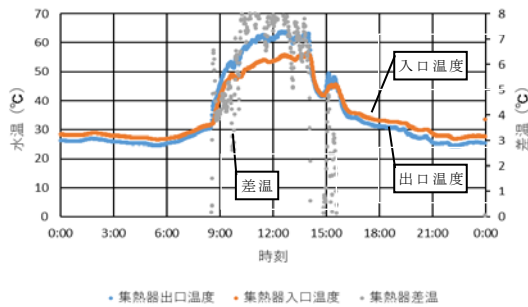


Fig.17 水の出入口温度、差温

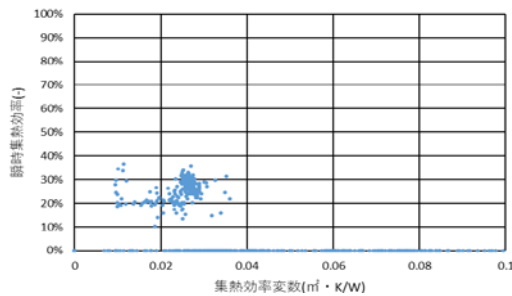


Fig.18 効率線図（絞込み）

(5) 集熱効率特性

6 ケースの効率線図をそれぞれまとめ、絞り込み後の効率特性式を得た。Fig.20 に最も効率の高かった黒断熱材付きのケースを示す。以下のシミュレーションではこの特性式を用いることとする。

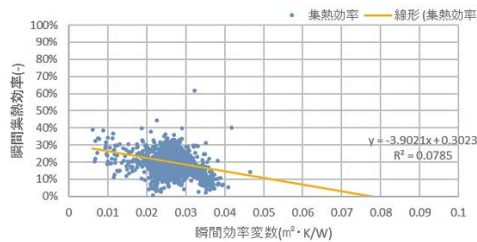


Fig.19 瞬時集熱効率（絞込み）

4. シミュレーションによる検討

上記で述べた間接蒸発冷却器と太陽熱集熱器を用いて、簡易救護室の室内状態を予測する。間接蒸発冷却器と太陽熱集熱器の特性は、上記で述べた試験結果を用いることとする。

4.1 夏期シミュレーション

(1)概要

6/1~10/31 の夏期について、試験で用いた性能の間接蒸発冷却器を設置した場合の簡易救護ユニット室内温度のシミュレーションを行った。外気データは、省エネルギーセンターの原単位管理ツール v6.10 内 2014 年東京の気象データを用いた。

熱バランスの模式図を Fig.21 に示す。給気・排気熱量、貫流熱量、機器発熱量、人体発熱量など簡易救護施設内の熱負荷を時間ごとに求め、熱バランスから室温を算出した。間接蒸発冷却器は取り入れ外気の冷却に使用する。計算時間間隔は 1 時間である。

シミュレーションは、間接蒸発冷却器のみ、間接蒸発冷却器+補助空調機の 2 ケースで行い、その結果を比較する。補助空調機は冷却能力を 2kW とし、室内温度が 28℃を超えたとき、設定温度を 28℃として冷却を行うものとする。

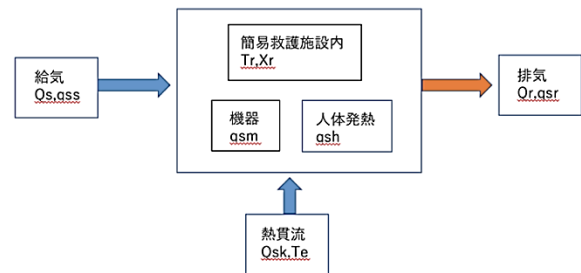


Fig.20 簡易救護施設 熱バランス模式図

(2) シミュレーション結果

間接蒸発冷却器のみの場合、6 月下旬から 9 月末まではほとんどの時間 28℃を超えていた (Fig.21)。室内温度が外気温度より高くなるため、間接蒸発冷却器は機能しておらず、外気と室内空気を熱交換する際に逆に室内温度を上げてしまっている時がある。

一方、間接蒸発冷却器と補助空調機を併用した場合 (Fig.22)、間接蒸発冷却器の室内空気と外気の温度差が大きくなるので単独で使用するよりも冷却能力が上昇していた。

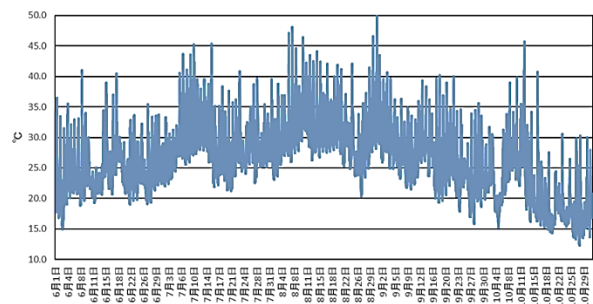


Fig.21 室内温度（間接蒸発冷却器のみ）

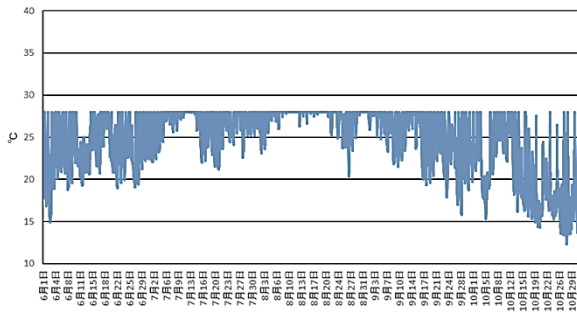


Fig.22 室内温度（間接蒸発冷却器＋補助空調機）

4.2 冬期シミュレーション

(1)概要

LCEM¹⁾により、集熱器、加熱コイル、簡易救護ユニット室内をモデル化した(Fig.23)。集熱器は、実測結果の効率特性式 $y = -3.9021x + 0.3023$ を入力し、角度は 10° で集熱器の枚数や蓄熱槽容量を変えシミュレーションを行った。

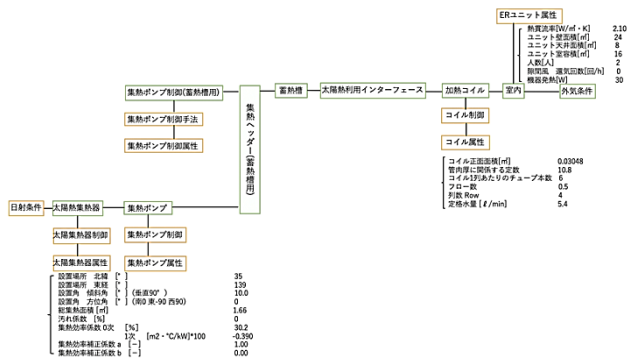


Fig.23 LCEM モデル

(2)シミュレーション結果

fig.24～27に、断熱材黒、パネル1枚、蓄熱槽なしの場合のシミュレーション結果を示す。

- ・集熱量は、最大で 0.6kW で、枚数を増やせばそれに応じて増加する。
- ・集熱効率は、日最大でおおむね 30%程度であった。
- ・室内温度は、18℃を目標としていたが、11月や4月は日中を超えることがあった。パネルを3枚まで増やしても、日中の温度は2-3℃の改善はあるが大きな改善とはならなかった。
- ・24時間運用とした場合、暖房負荷は、最大 2.7kW となり、1.7kW（小型空調機の暖房能力）を越える時間が 1173 時間ある。夜間は外気取入れを停止することで、最大負荷が空調機的能力内となる。また、蓄熱槽を設置することも有効であるが、パネル枚数を増加しないと十分な蓄熱量が確保できないこととシステムが複雑となるので得策ではない。

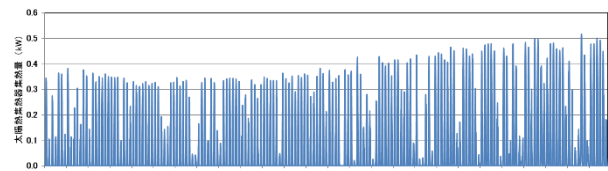


Fig.24 集熱器集熱量

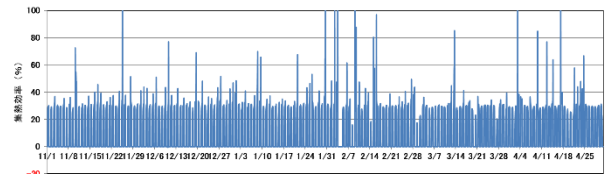


Fig.25 集熱効率

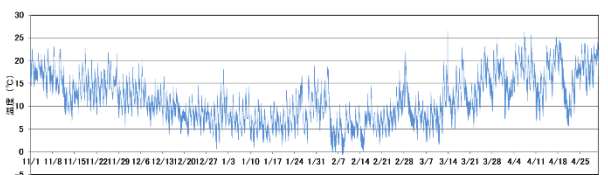


Fig.26 室内温度

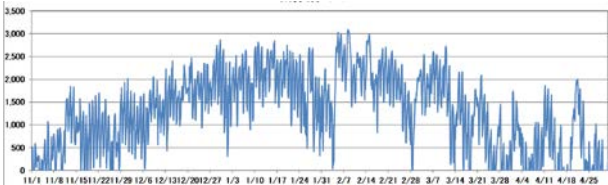


Fig.27 室内暖房負荷

5.まとめ

8m²の簡易救護ユニットについて、できるだけエネルギーを使わないで空調を行うことを目的として検討を行ってきた。

システム構成は、床置き小型空調機に間接蒸発冷却器と太陽熱暖房を組み合わせることとした。間接蒸発冷却器は、顕熱交換器と水噴霧ノズルの組み合わせで一定の冷却能力を得ることができた。また、集熱器は可搬性を考慮して軽量なものを入手した。それぞれの機器について試験を行い性能を把握した。

また、シミュレーションにより、東京における年間の室内温熱環境について評価した。その結果、冬の夜間に外気導入を停止すれば、上記の組み合わせで年間対応できることがわかった。今後、①地域による対応性、②空気集熱の検討、③システムのさらなる簡略化などについても検討していきたい。

謝辞

本稿における計測と解析は、2017、2018、2019 年度卒業生の平尾拓巳君、平田彩夏君、横山慶一君、井後尋人君、高橋凌太君、沖倉直樹君が中心に行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課、LCEM ツール ver3.10、http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcemtool_index.htm

フラクタル日よけの可視光透過率の検討

フラクタル日除け、可視光透過率、Radiance

富樫 英介 * 横山 計三 *

中島 裕輔 * 柳 宇 *

前年度までの成果

被災時にエネルギーを消費せずに運用が可能な災害時拠点の構築を目的に各種の検討を行ってきた。軽量で運搬、建設、除却が容易な簡易救護ユニットに着目し、その断熱性能を高めるための検討を行った。過年度は、熱負荷を削減するために、湿潤状態にある外装で覆う方法を提案して実測とシミュレーションモデルの開発を行った。概要を以下に記す。

1) シミュレーションモデルの開発

定常状態では外装材において式(1)の熱収支式が成立する。ただし、 T [°C]は乾球温度、 x [kg/kg]は絶対湿度、 α_o [W/(m²·K)]は総合熱伝達率、 γ [J/kg]は水の蒸発潜熱、 k_x [(kg/s)/(m²·(kg/kg))] γ は絶対湿度基準の物質移動係数、 a_{ex} [-]は日射吸収率、 I_{df} [W/m²]は入射する拡散日射である。また、添字の oa と ex はそれぞれ外気と外装材を表す。

$$\alpha_o(T_{oa} - T_{ex}) + \gamma k_x(x_{oa} - x_{ex}) + a_{ex}I_{df} = 0 \quad (1)$$

拡散日射 I_{df} が 0 であれば、外装材の温度は湿球温度 $T_{wb,oa}$ [°C]となり、湿度は当該温度での飽和湿度 $x_{wb,sat}$ [kg/kg]となる。従って、物質移動係数は式(2)で計算できる。

$$k_x = \frac{\alpha_o(T_{oa} - T_{wb,oa})}{\gamma(x_{wb,sat} - x_{oa})} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入して整理すると式(3)となる。外装材の湿度は温度 T_{ex} における飽和絶対湿度であり、湿り空気計算により求められる（式(4)）。式(3)と式(4)を連成させれば外装材の温湿度を求めることができる。

$$T_{ex} = T_{oa} + \frac{x_{oa} - x_{ex}}{x_{oa} - x_{wb,sat}}(T_{wb,oa} - T_{oa}) + \frac{a_{ex}I_{df}}{\alpha_o} \quad (3)$$

$$x_{ex} = f_{sat}(T_{ex}) \quad (4)$$

式(1)から明らかなように、単位面積あたりに必要な給水量 m_{ex} [kg/s]は式(5)である。式(5)を用いて、上記の代表日について日積算の給水量を計算すると 2.5 kg/(m²·day)となる。従って、単位面積あたりで 2.5 kg 程度の水を保有できるのであれば 1 日に 1 度の給水で足りるということになる。

$$m_{ex} = k_x(x_{oa} - x_{ex}) = \frac{\alpha_o(T_{oa} - T_{ex}) + a_{ex}I_{df}}{\gamma} \quad (5)$$

2) 実測

2組の同型の簡易救護ユニットで実測を行った。一方は標準の外装、もう一方は外部を湿潤外装で覆うことで、湿潤外装の有無による温熱環境の差を検証する。標準のユニットをユニット A (U_A)、湿潤外装で覆ったユニットをユニット B (U_B) とする。蒸発冷却の効果を高めるためには風通しの良い日陰である必要があり、八王子校舎3号館ピロティ部に設置する。

断面図と測定箇所を Fig.1 に示す。表面温度の測定には熱電対を用いる。放射温度の測定には熱電対を黒体球で覆ったグローブ温度計を用いる。空気の湿度測定には静電容量式センサを用いた。

実測値とシミュレーション結果の比較を Fig.2 に示す。直達日射の入射しない 10:00~13:00 に関しては、概ね整合する結果となった。

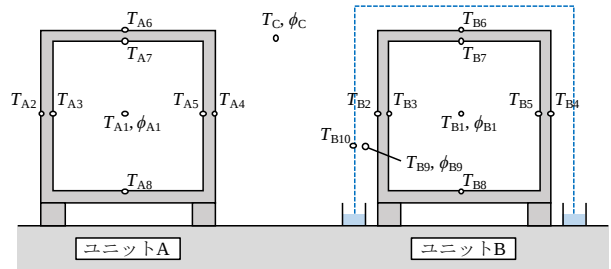


Fig.1 温湿度測定箇所一覧

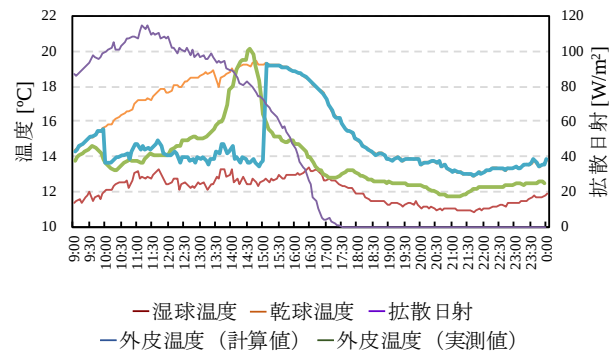


Fig.2 ユニット外皮の温度とシミュレーションの比較

湿潤外装の効果は認められたが水分の補給が必要となるため、手法としてはやや煩雑であった。そこで本年度は無給水の日射軽減手法としてフラクタル日よけについて検討を行った。

1. 今年度の活動結果

直達日射を拡散光に変換するための日よけの例として、フラクタル日よけが存在する。フラクタルはFig.3に示すように全体と一部が相似形状となる自己相似の特徴を持つ図形である。いくつかの植物はフラクタルの性質を持つことで知られており、フラクタル日よけは、この特徴を利用して木漏れ日に似た拡散光を生み出すことを意図した日射遮蔽である。

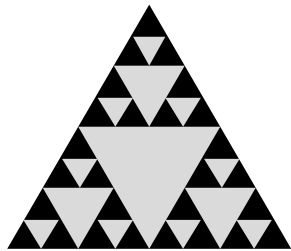


Fig.3 フラクタルの例
（シェルピンスキーの三角形）

Fig.5 がフラクタル日よけであり、1枚の正方形を切り出すことで、シェルピンスキーの三角形が立体的に形成される。Fig.5は3Dモデルを用いて理想的な形状を描いた結果であるが、現実にはFig.4に示すように形状維持のために端部が完全には切り取られない。

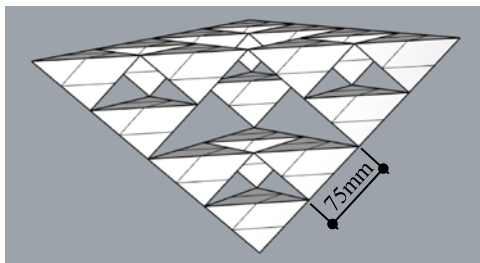


Fig.4 フラクタル日よけ（3Dモデル）



Fig.5 フラクタル日よけ（実物）

フラクタル日よけの放射熱環境性能に関しては酒井らの研究報告があり¹⁾²⁾、実物の放射熱環境の測定を行っているために信頼性が高いが、一方で、フラクタル日よけの性能に影響を与える様々な要素の寄与を個別に定量的に評価することは難しい。フラクタル

日よけの形状は複雑であり、可視光の相互反射の結果を幾何学的に解析的に求めることは困難である。そこで本研究では、光環境シミュレーションソフトウェアである Radiance を用いることで、フラクタル日よけの透過率測定モデルを作成し、可視光透過率を太陽位置や日よけの素材が可視光透過率に与える影響を検討する。

2. 計算モデルの作成

1) Radiance

Radiance は光環境シミュレーションを目的としたプログラムライブラリであり、1985年頃に LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) の Greg Ward によって開発が開始されて以来、30年以上に渡って改良が重ねられている³⁾。本研究では3Dモデラーであるライノセラスから Radiance を呼び出すプラグインである DIVA を用いて光環境シミュレーションを実施する。

2) 計算モデル

計算対象のモデルを Fig.8 と Fig.6 に示す。5m×1m×5mHの完全黒体の箱を用意し、南面を単層ガラスで覆った。ガラスの1m手前にフラクタル日よけを設置し、側面からの日射の回り込みを防ぐために上下左右に1mの袖壁を設置した。中央の1m×1mを照度測定範囲とし、日よけ入射前、ガラス面手前、ガラス面奥、を測定面とした。これらの照度を比較することで、フラクタル日よけによってどの程度の日光が遮断されたのかを定量的に捉えることができる。

フラクタル日よけ単体の寸法は Fig.4 に示したように、最も小さい直角二等辺三角形の短辺が75mmである。300mm×300mmの正方形を切り出して形状を作る。

フラクタル日よけを配置する向きを Fig.7 に示す。山折りの線が上下に連なるように配置した。素材が布の場合、ワイヤーなどが必要になるであろうが、計算上はこの形状を維持できるものとした。

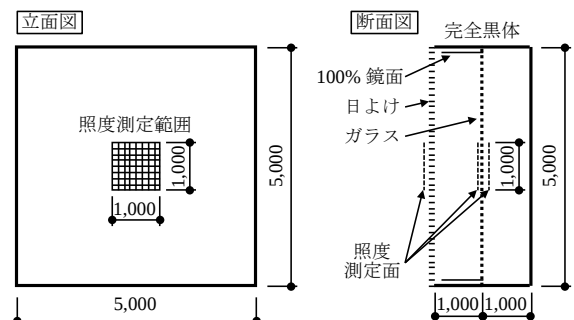


Fig.6 計算モデルの立面図と平面図

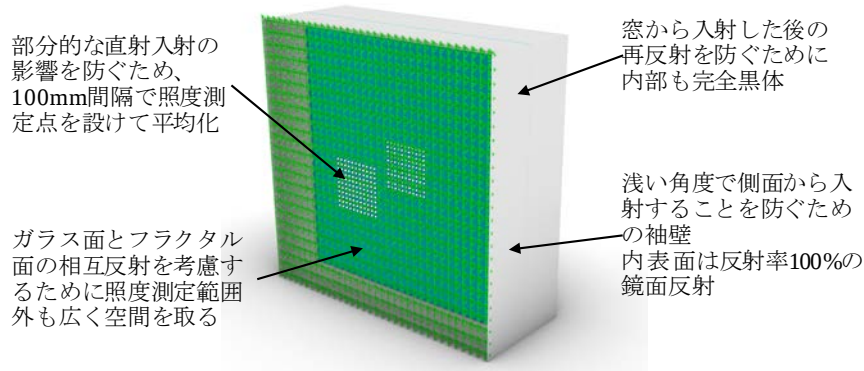


Fig.8 計算モデルのパス

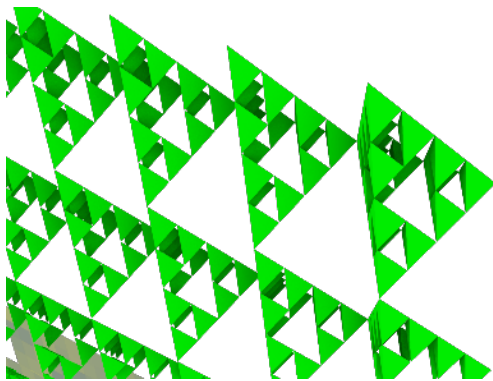


Fig.7 フラクタル日よけの配置方向

3) 計算条件

気象条件は、練馬地点（北緯 35 度 44.1 分 東経 139 度 40.1 分）の拡張アメダス気象データを用いた。いずれも晴天日であり、CIE（Commission Internationale de l'Eclairage）による“Clear sky with sun”条件とした⁴⁾。入射角特性を検討するため、1月20日と7月24日の8時から12時まで2時間毎に計算を行った。練馬地点における同時刻の太陽位置および垂直南面入射角をTable 1に示す。

Table 1 太陽位置と垂直南面入射角（練馬地点）

日時		太陽方位 ^{※1}		太陽高度 ^{※2}		入射角 ^{※3}	
		radian	degree	radian	degree	radian	degree
1/20	8:00	0.20	11.6	-0.95	-54.4	0.96	55.2
	10:00	0.49	28.1	-0.52	-30.0	0.70	40.2
	12:00	0.59	34.0	0.04	2.2	0.60	34.1
7/24	8:00	0.66	37.9	-1.54	-88.0	1.54	88.4
	10:00	1.07	61.4	-1.10	-62.9	1.35	77.4
	12:00	1.29	73.7	0.18	10.5	1.29	74.0

※1 東：-90度、西：90度

※2 水平：0度、垂直：90度

※3 法線面からの角度

3. 計算結果の確認

1) フラクタル日よけ単体の日射遮蔽性能

フラクタル日よけ単体の日射遮蔽性能を確認するためにガラスを削除した場合の計算を行った。日よけの吸収率を100%（完全黒体）に設定して、照度分布を計算した結果をFig.9に示す。日よけに入射した光や日よけを通過した後に箱にあたった光は完全に吸収されるため、この計算結果は日よけの幾何学形状による性能を表している。

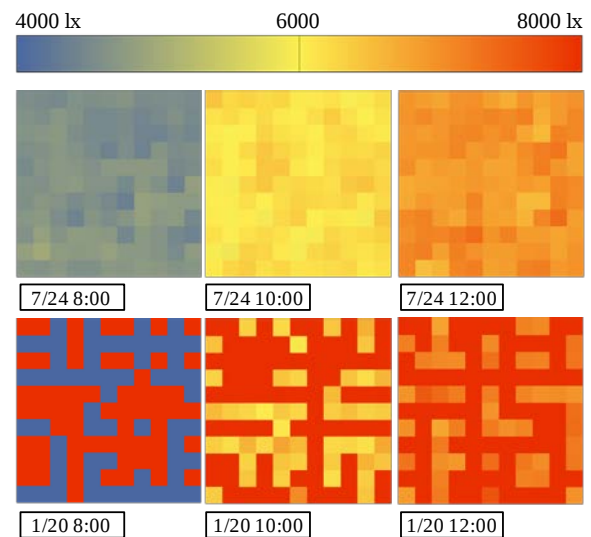


Fig.9 日よけが完全黒体の場合のガラス面照度分布

法線方向に近い角度で入射する冬季に関しては照度が高い点と低い点で斑になっており、直射光が侵入している。これを防ぐためにはFig.7の空白部分に日よけを重ねるなどの工夫が必要になるだろう。ただし、夏季は遮蔽して冬季は透過させるという特性であるから、熱環境としては一概に問題ありとは言えない。

日よけの前後の平均照度と透過率をTable 2に示す。日よけの材料として、完全黒体以外に白色の布（完全拡散反射、反射率70%）の場合の計算も行った。反射光の一部も日よけの内側に到達するため、完全黒体の場合に比較すると白色の布の方が透過率は高いが、数パーセントである。

Table 2 日よけの前後の平均照度と透過率

日よけ 材料	日時	平均照度 [lx]		透過率	
		屋外垂直面	日よけ内側		
完全黒体	7/24	8:00	10,474	4,619	44%
		10:00	27,633	6,182	22%
		12:00	33,680	6,960	21%
	1/20	8:00	24,472	11,858	48%
		10:00	60,582	34,949	58%
		12:00	69,165	39,832	58%
白色の布	7/24	8:00	10,474	4,845	46%
		10:00	27,633	7,037	25%
		12:00	33,680	7,646	23%
	1/20	8:00	24,472	12,366	51%
		10:00	60,582	36,099	60%
		12:00	69,165	41,190	60%

2) ガラスとの相互反射を考慮した日射遮蔽性能

ガラス（可視光透過率 88%）を設置した場合の、ガラスと日よけとの相互反射を考慮した総合透過率を計算した結果を Table 3 に示す。

Table 3 日よけとガラスの総合透過率

日時		平均照度 [lx]			総合透過率
		屋外垂直面	ガラス外側	ガラス内側	
7/24	8:00	10,474	5,054	4,103	39%
	10:00	27,633	7,728	6,177	22%
	12:00	33,680	8,231	6,573	20%
1/20	8:00	24,472	13,709	10,450	43%
	10:00	60,582	38,076	31,508	52%
	12:00	69,165	43,659	36,293	52%

4. ER ユニットへの設置試験

実際にフラクタル日除けを ER ユニットへ導入するため、設置試験を行った。Fig.10 に設置風景を示す。日除けは屋根を形成するように水平に設置する場合もあるが、本検討では垂直に吊った。この場合には日除けの自重によって垂れ下がり、きれいな三角形形状を保つことはできない。吊るためのワイヤーを二重に重ねるなどの工夫が必要であろう。



Fig.10 ER ユニットへのフラクタル日よけの設置

Radiance によってフラクタル日除けの効果を計算し、輝度分布を求めた結果を Fig.11 と Fig.12 に示す。現実よりも日除け形状による明暗がはっきりと表れており、自重による変形を考慮する必要がありそうである。

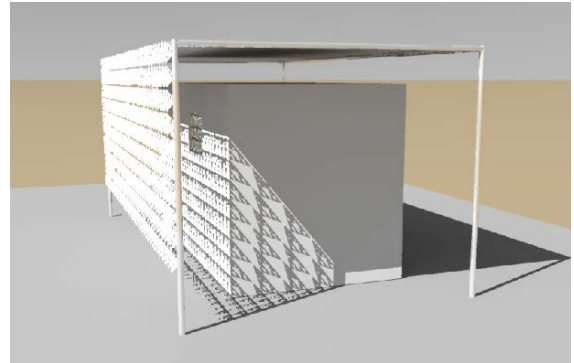


Fig.11 Radiance によるフラクタル日よけの効果計算 1

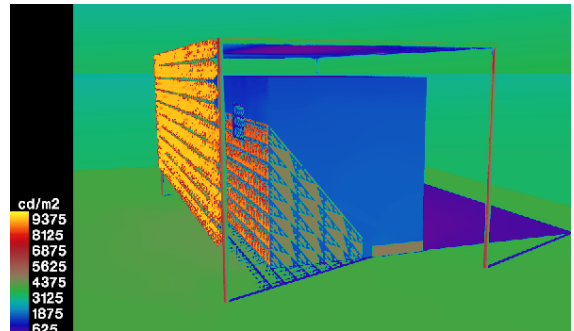


Fig.12 Radiance によるフラクタル日よけの効果計算 2

【謝辞】

フラクタル日除けの検討にあたっては、株式会社ロスフイー 保清人 様に多くの助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 中村 美紀, 酒井 敏, 大西 将徳, 古屋 姫美愛 (2011) フラクタル日除けによる放射環境改善効果, 日本ヒートアイランド学会論文集, vol.6, 8-15.
- 2) Sakai, S., M. Nakamura, K. Furuya, N. Amemura, M. Onishi, I. Iizawa, J. Nakata, K. Yamaji, R. Asano, K. Tamotsu (2012), Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes, Energy and Buildings, vol.55, 28-34
- 3) Ward, G., F. Rubinstein, "A New Technique for Computer Simulation of Illuminated Spaces," Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 17, No. 1, Winter 1988.
- 4) "Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky" and ISO 15469:1997.