

「エネルギー・ハーベスティングの最新動向」  
株シーエムシー出版

タイトル: **床発電システム**

ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 小林 三昭、林 寛子  
慶応義塾大学 武藤 佳恭

## 1. はじめに

近年、地球環境問題への関心の高まりを背景として、地球温暖化防止に向けたCO2削減への取り組みが企業に求められている。鉄道システムにおけるCO2排出の原因となる電気エネルギーは、列車運用として66%、駅・建物の照明や空調に23%が消費されている。JR東日本では前者については、省エネルギー車両への置き換えやハイブリット車両の投入、ブレーキを使用したときの運動エネルギーの変化を電気エネルギーに変換する回生ブレーキの導入等に取り組んでいる。さらに後者については、太陽光発電やLED照明、自然風の活用、植栽・緑化等、エネルギー削減を実現すべく様々な環境保全技術の開発に取り組んでおり、その一つとして「床発電システム」がある。

圧電素子を用いた「床発電システム」の開発は、平成 16 年度よりジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社が慶應義塾大学環境情報学部 武藤 佳恭 教授のもと基礎研究を開始し、平成 17 年度からJR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所との共同開発に取り組んでいる。平成 19 年 6 月から平成 21 年 3 月までは、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) も加わり、三社の共同開発(平成 19 年 6 月～平成 21 年 3 月 「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業)として取り組んだ。

「床発電システム」の大きな特徴は、太陽光発電や風力発電とは異なり、人の歩行によって電気が生まれるという「参加型」発電システムだという点である。また、CO2を発生せず、今まで活用されていなかった微小なエネルギーから電力を得られるため、環境にやさしい。このように「床発電システム」はお客様の歩行により電力を得るため、通勤・通学等により歩行者数が比較的多い駅の特徴を活かすことができる。

また、鉄道業界以外においても床発電システムに興味を持ってもらう機会が増えてきたことから、一般利用も開始された。導入事例として、上海国際博覧会日本館での通路での展示、サッカースタジアムにおけるサポーターの応援スタンドへの導入などの新たな利用形態についても報告する。

## 2. 「床発電システム」の概要

### (1) 発電の原理

「床発電システム」は、人が歩行の際に床を踏むエネルギーを電気に変換する。この技術の核は圧電素子(写真 1)の持つ「圧電効果」という現象である。

圧電効果とは、素子に力を加えると内部で分極が起こり浮遊電荷が発生し、素子が力から開放された際にその電荷が放出されることで電流が発生する現象である。(図 1)



写真 1 圧電素子

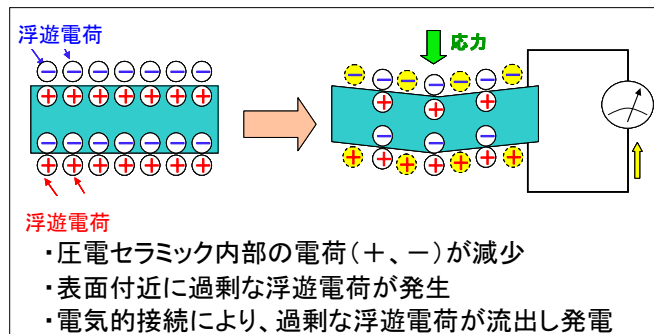


図 1 圧電効果の原理

圧電効果自体は古くから知られている物理現象であり、上記の逆の、電気を流して圧電素子を振動

させる原理は、ブザーやスピーカーで一般的に利用されている。しかし、発電用途としては、発生する浮遊電荷が極めて微量かつ一瞬であり、一定の電位差や電流を作り出せず蓄電が難しいことから、今までほとんど利用されてこなかった。

## (2) 床発電システムのしくみ

床発電システムは、力や振動により発電する「圧電素子」、圧電素子を保護し力を加えるための「発電ユニット」、発生した電力を取り出す「蓄電制御装置」で構成される。(図 2)

複数の圧電素子を組み込んだ発電ユニットを床に敷設し、発電ユニットが踏まれることで発生した電力が蓄電制御装置に蓄積される。そして、蓄電制御装置と設備等との接続により電力を供給する。

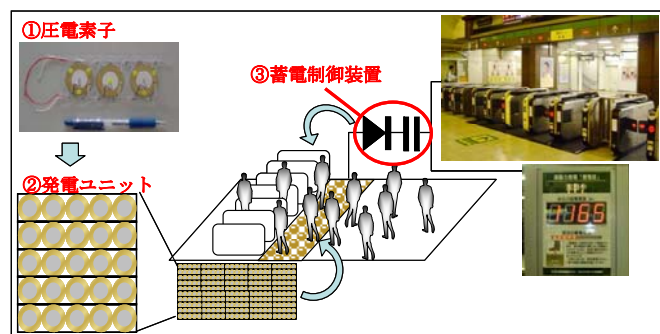


図 2 床発電システムのしくみ

## 3. 開発概要

床発電システムの開発では、微弱で瞬間的な浮遊電荷を効率よく取り出すために、それに適した圧電素子や電気回路、加圧構造などの研究開発が進められた。また、このシステムは、きわめて微弱な振動をとらえるという繊細さと同時に、より多くの歩行者に踏まれ続けなければならないという耐久性も持ち合わさなくてはならない。そのため、実用化に向けては、技術の研究開発と共に、実用に耐えることを確認するための実証試験が不可欠である。そこで、これまで東京駅において 3 回の実証試験を行ってきた。

平成 18 年度に行った「床発電システム」として初めての実証試験（基礎試験）では、発電量が改札 1 人通過あたり約 0.1W(ワット)秒と微小であり、試験開始後 1 ヶ月経過時に発電能力が 1/3 に低下して耐久性が無い等の課題が明確となった。このことから、実用化の目安として、発電量について改札 1 人通過あたり 10W 秒（床発電システムで得られた電力を IC カード改札システムに活用することを想定）と耐久性の向上を目標とした。

目標達成に向け取り組んだ開発要素を以下に示す。また、各開発段階では、実用化に向けた実証試験を平成 19 年度、20 年度に実施した。(図 3)

### <開発要素>

- ① 圧電素子：圧電素子の材料・形状の検討による発電用途向けの圧電素子の開発
- ② 発電ユニット：発電効率を継続的に維持でき、圧電素子へ効率的に力や振動をかける構造の開発
- ③ 蓄電制御装置：電力を効率的に蓄積し、ロスを少なく電力供給設備に供給できる回路の設計

## 4. 開発詳細

以下、実証試験の推移を追いながら、開発内容を述べる。

### (1)実証試験 1(基礎試験)

基礎試験は主に圧電素子の発電量の確認を目的とし、平成 18 年 10 月から 12 月にかけて、東京駅丸の内北口改札にて実施した(写真 2)。

使用した圧電素子はセラミック製直径 25mm、厚さ 0.3mm の市販品であり、それを複数枚並べて上下ゴムマットで挟んだ発電ユニットを作成し、自動改札機通路 6 通路(約 6 m<sup>2</sup>)に敷き詰めた。そして、蓄電制御装置に蓄電される電力量を測定した。(図 3)

試験の結果、1 通路あたりでは歩行者 1 人の通行による発電量は最大で 0.12W 秒であった。1 日あたりでは、システム全体で約 10kW 秒の電力を発電した。これは 100W の電球を約 100 秒間点灯できる量に過ぎない。また、設置後 1 ヶ月ほどで発電量は当初の 3 分の 1 にまで低下した。歩行者やスーツケースに踏まれ続ける過酷な状況により、多くの圧電素子が破砕し、発電量の低下につながったことが原因に考えられた。



写真 2 基礎試験 試験状況

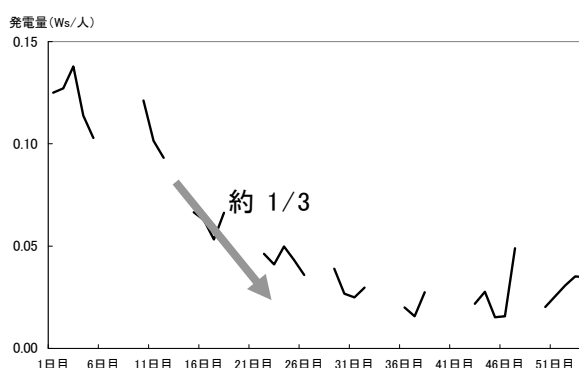


図 3 基礎試験 発電量推移

### (2)実証試験 2(平成 19 年度)

基礎試験の結果を踏まえて、床発電システムを改良し、実証試験 2 を実施した。各要素の開発内容を以下に示す。

#### <実証試験 2 開発内容>

- ① 圧電素子: 評価装置を用い、材質、大きさ、厚さを変えた圧電素子試験体により最適化を検討
- ② 発電ユニット: 圧電素子を上下から保護するゴム材の構造を検証し、過大な圧力がかからない構造に変更
- ③ 蓄電制御回路: 基礎試験の回路について電氣的な損失の割合を検証し、回路の部品、構成の改良を実施

開発の結果、実証試験 1 で使用した床発電システムは、圧電素子の圧電セラミックの厚さを変更し、発電ユニットは保護材を強化したものとなった。

試験は平成 20 年 1 月から 3 月まで行い、東京駅八重洲北口(歩行者数: 約 7~10 万人/日)の改札通路 7 通路(7 m<sup>2</sup>)、改札内通路部(約 80 m<sup>2</sup>)、階段部(約 7 m<sup>2</sup>)の計 94 m<sup>2</sup>に敷設した。そして、基礎試験同様、敷設した床発電システムにより蓄電制御装置に蓄電される電力量を測定した。実証試験 2 の試験状況を写真 3 に示す。

試験の結果、1 改札通路あたり 1 人の通行による発電量は最大で 0.94W 秒となり、基礎試験の約 10 倍の発電量が確認された。また、7 週間経過後においても、当該実験開始後の発電量の約 3 分の 2 が

維持できており、耐久性の向上も確認することができた。(図 4)



写真 3 実証試験 2 試験状況

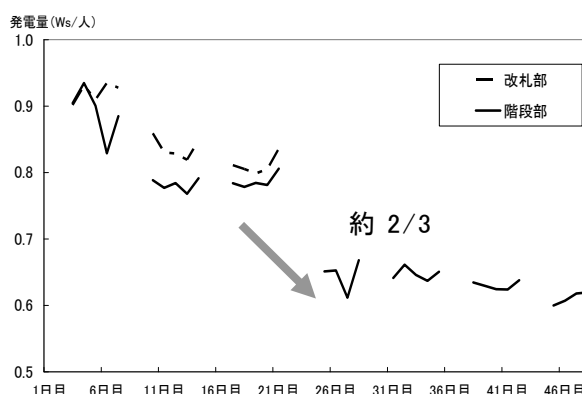


図 4 実証試験 2 発電量推移

## (2) 実証試験 3 (平成 20 年度)

実証試験 2 結果を踏まえ、さらに 10 倍の発電量を得ることを目標に、更に床発電システムを改良し、実証試験 3 を実施した。各要素の開発内容を以下に示す。

### <実証試験 3 開発内容>

- ① 圧電素子: 材質、形状を検討し、床発電システム用の圧電素子を開発
- ② 発電ユニット: 歩行による力がより効果的に圧電素子に伝わるように、圧電素子に圧力を加える構造についてシミュレーション等により形状・配置を決定。さらに駅への実導入を想定し、耐久性と設置の容易さを考慮した設計を実施
- ③ 蓄電制御回路: 回路におけるインピーダンスマッチングの実施

開発の結果、実証試験 3 で使用した床発電システムは、圧電素子の形状を円盤状から角状としたものを採用した。発電ユニットは上下ゴム材に加え、駅舎への実導入を想定して表面材に石材をスライスした特殊パネルを使用し、設置の容易さを考慮して全体の厚さを約 25mm とした。(写真 4)



写真 4 発電ユニット

試験は平成 20 年 12 月から平成 21 年 2 月まで行い、東京駅八重洲北口の改札通路 7 通路 (7 m<sup>2</sup>)、改札内通路部 (11 m<sup>2</sup>)、階段部 (約 7 m<sup>2</sup>) の計 25 m<sup>2</sup> に敷設した。実証試験 3 の試験状況を写真 5, 6 に示す。

試験の結果、1 改札通路あたり 1 人の通行による発電量は最大で 4.3W 秒となった。なお、システム全体としては 1 日当たり最大で 940kW 秒の電力量を発電した。これは 100W の電球を約 160 分間点灯できる量に相当する。また、5 週間経過後でも、当該実験開始後の発電量の約 95% が維持されており、耐

久性については大幅に向上させることができた。



写真 5 実証試験 3 試験状況(改札)



写真 6 実証試験 3 試験状況(階段)

## 5. 開発成果

実際の駅における実証試験を通じて、最終的には発電量を基礎試験の約 40 倍に向上することができた。また、実証試験後の解析、考察により、圧電素子の更なる改良等により、発電量を約 2 倍の改札 1 人通過あたり 10W 秒まで向上させる可能性を明確にした。(図 5)

また、耐久性については、発電ユニットの構造上の工夫から、最終的には試験開始から約 3 週間経過後も発電量が 95%維持でき、飛躍的に向上を図ることができた。(図 6)

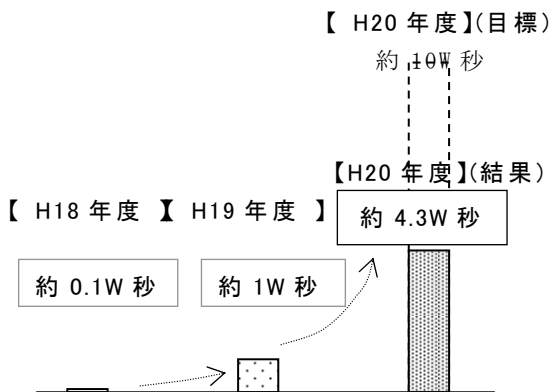


図 5 改札 1 人通過あたりの発電量\*

※ お客さまが改札(約 2.5m)を通過する間の発電量

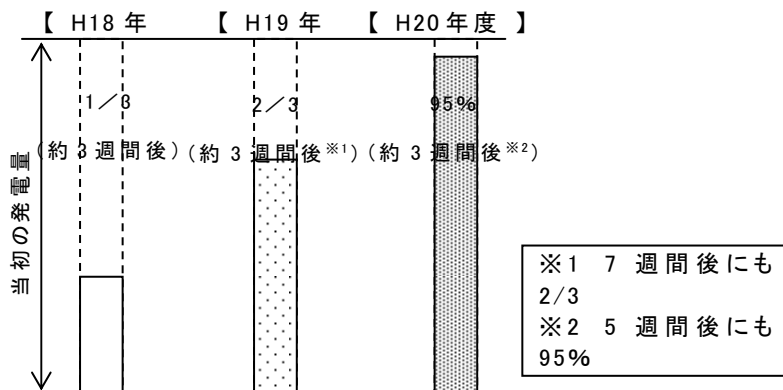


図 6 発電能力の持続性

## 6. 一般利用への展開

### 6-1. 上海国際博覧会日本館への導入事例

#### (1) 概要

上海国際博覧会日本館では、日本の新しい技術を展示し、他国に日本の取り組みをアピールすることを目的としている。床発電システムの展示は、共同開発を行っていた(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の推薦によりジェイアール東日本コンサルタンツ(株)が実施した。展示の概要を表-1に示す。

表-1 上海国際博覧会概要

2010年上海国際博覧会 (EXPO 2010 Shanghai China)
・テーマ: より良い都市、より良い生活 (Better City, Better Life)
・会期: 2010年5月1日～10月31日 (184日間)
・会場: 上海市中心黄浦江兩岸、南浦大橋と盧浦大橋間の濱江地区 328ha
・日本施設: 日本館、日本産業館、大阪館 ※床発電システムは日本館に出展
・出展規模: 日本館 ゾーン2 ゼロエミッションタウン内 3.2 m <sup>2</sup>

#### (2) 課題と対策

出展においては半年間という長期間の展示であり、博覧会の見込み来場者が7000万人、日本館1日來場者数2万人にのぼるといふ点を考慮し、耐久性をもたせつつ來場者のスムーズで安全な流動を確保できる展示にする必要があった。そこで、展示に際し、特に下記の2点の事項を重点的に検討した。

##### ① 設置方法

従来は、既存の床面の上に押さえ金具を用いて固定してきたが、床発電ユニット複数枚を連結して固定するため、不具合が生じた場合の影響範囲が大きくなってしまふ。今回の展示は長期間にわたるため、補修を容易にする必要があった。床発電システムが“振動を伝えて発電する”特性を持つため、石材とユニットを固定しつつシステムが上下に動くことを可能にし、更に段差を発生させないことが条件となる。このため、発電ユニットと石板を固定する止め金具を開発した。床周りの目地は弾性コーキング処理を行うことで、石板の上下方向の可動性および耐久性を考慮した。これにより、床発電ユニット1枚単位で交換が可能になり、補修が容易な設置方法を実現した。

##### ② 表示方法

従来は、展示用パネルによる7セグのLEDによる発電量の表示を行ってきた。しかし、設置場所となる通路幅が比較的狭いため、展示用パネルが通行の妨げになる、設置場所の安全確保が難しい等の不安がある。そのため、通行の妨げとならず見やすい表示方法とする必要があった。來場者が床を通行しつつ、発電量等を確認できるよう、日本館に設置される46インチの液晶モニターとのインターフェースを開発した。モニターでは、瞬間の発電量と、それを環境指数に換算した内容の2画面を表示可能とし、來場者の歩行速度を考慮して切り替えて表示した。

課題の検討の結果、実現した展示内容を図7に示します。



図 7 上海国際博覧会 展示内容

## 6-2. サッカースタジアムへの導入

### (1) 概要

サッカー等のスポーツ業界では、環境へ配慮した地域貢献活動が積極的に行われている。サッカースタジアムへの床発電システム導入は、平成 22 年 3 月にヴィッセル神戸からの依頼を発端として、床発電システムとしては初の一般の商業施設への導入となる。

表-2 サッカースタジアム試験導入概要

ヴィッセル神戸 エコプロジェクト	
・テーマ：	サポーターの応援を電気エネルギーに変換する
・会 期：	2010 年 3 月 7 日～
	※試験導入は 3 月 7 日、4 月 11 日、5 月 8 日
・会 場：	ホームズスタジアム神戸

### (2) 課題と対策

導入にあたっては「サポーターの応援により発電させたい」という要望があり、スタジアムの観客席に設置することとなった。そのため、観客席 1 席に 1 枚床発電システムを設置し、安全面を配慮して発電量の表示パネルは床発電システム設置位置から離れたスタジアム外の通路内に設置した。(図 8)

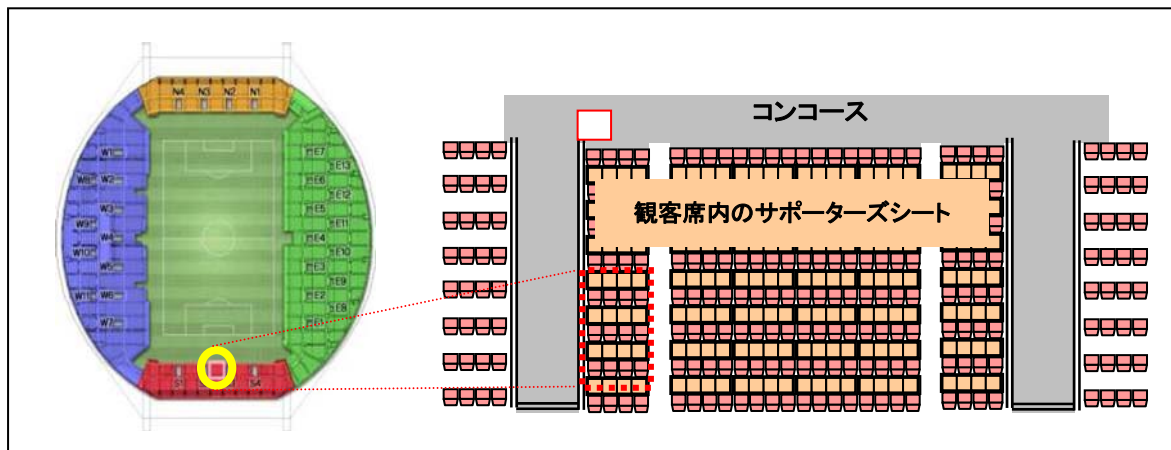


図 8 床発電システム設置位置



### ①設置方法

スポーツ観戦特有のジャンプする応援に対応するため、各座席に1枚の床発電ユニットを配置する必要がある。このため、狭い座席間に対応した床発電ユニット4枚を1セットにした止め金具を開発し、設置作業を容易とした。

### ②表示方法

床発電システム設置部分と発電量の表示パネルが離れているため、踏んで発電量が増えることを視覚的に確認することができない。観客席に設置した床発電ユニットの発電量を表示する展示パネルの他に、床発電ユニット2枚を用いた体験用の床発電ユニットとLEDライトを組み込んだ光るパネルで構成された簡易デモ機を製作し、床発電システムを体感しやすくした。

課題の検討の結果、実現した導入内容を写真-1、2に示します。



写真7 スタジアム向け床発電システム



写真8 体験用表示パネル

## 6-3 新たなサービス展開

上海国際博覧会への展示、サッカースタジアムへの導入を通じて、目的、設置環境に応じた対応を行うことで、鉄道に限らない様々な場面で床発電システムを活用する可能性が見出せた。

特に、サッカースタジアムでの試験導入の結果、試合中の発電量のログを解析したところ、発電量がゴール等のタイミングに追従していることがわかる。これは、今まで定量的に把握できていなかったスポーツ観戦等の応援のバロメーターとして把握できるということで、新たなサービス展開の可能性が見出せた。

(図9)

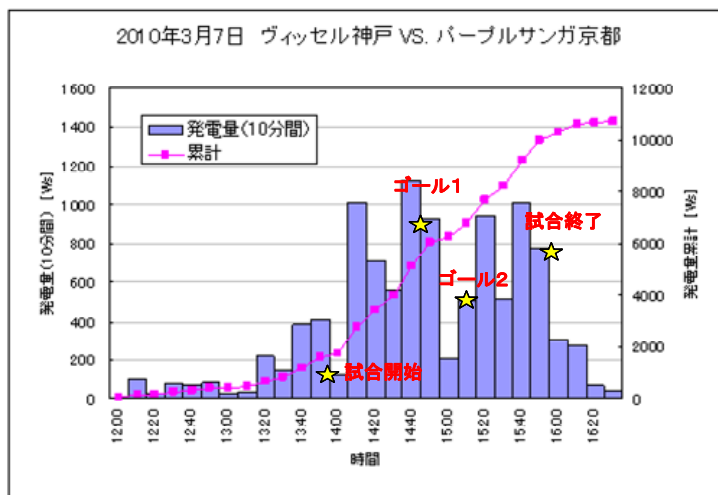


図9 発電量の計測(事例)

## 7. おわりに

これまでの鉄道事業における実証試験により、床発電システムの発電量・耐久性ともに飛躍的に向上が図られ、上海万博では6ヶ月間という長期間の実用性についても実証されるだろう。

床発電システムは、太陽光発電や風力発電に比べてその発電量は微小である。しかし、電気工事を行わなくとも電気や情報のやり取りが行えるメリットがあることから、仮設物の電源や、ビル・建物内の通路、入退管理ゲート、電子ペーパー、照明、センサー器等設備への電力供給が期待できる。

また、参加型の発電技術という特性から、スポーツ観戦等イベント的な利用方法で床発電システムを楽しんで踏んでもらいながら、エコ活動に対する意識を向上させる等特有の効果が発揮された。床発電システムは、

- ・踏むことで簡単に発電が体感できる
- ・今まで活用されていなかったエネルギーから電力を生む

という特徴より、環境への取り組みに対する意識の醸成、PR等に有効であるといえる。

今後は、駅・建物等の省エネ化を促進するため、また様々な場面において床発電システムを活用できるよう、早期の実用化に向け引き続き開発を進めていく。