

DORAEMON 「タップ・アンド・チャージ」 システム提案の F化版（日本語版）

1 はじめに / コンセプト概要

DORAEMON (Detached On-demand Rapid Absorption Energy Mechanism for Optimized Networks: 最適化ネットワ^クのための“分離型オンデマンド急速吸^Fエネルギー^F機構) は、「タップ・アンド・チャージ」を^F現する無^F給電システムの提案であり、50–200 ms 程度のごく短い接触でデバイスへエネルギー^Fをほぼ瞬時に移送することを目指す。最大の^F想はエネルギー^F送段とエネルギー^F使用段を分離する点にある。すなわち、高出力の無^Fバ^Fストで受側のオンボ^Fド蓄エネルギー^F（ス^Fパ^Fキャパシタの「エネルギー^Fキャビティ」）を急速に^Fたし、その後はそのキャビティが時間をかけて放電し、デバイスのバッテリ充電や^F動を行う。これは、通常の無^F給電が連^F結合を必要とし機動性に制約がある問題に^Fし、一瞬の接触でエネルギー^F注入を可能にするものである（参考：supercapacitor を用いた無^F充電の概念と^F例は文末の情報源参照）。

このアイデアを評^Fし堅固にするため、本稿では以下の理論^F組みを^F密に整える：

- 短時間の電力^F送で電磁結合^F率を高く保つ方法（瞬間接触での大電力^F送）。
- 中間蓄電（ス^Fパ^Fキャパシタ）における急速吸^Fダイナミクス（容量・ESR・リ^Fクなど回路物理の限界）。
- バッテリ健全性を守りつつ充電速度を最大化する最適放電制御。

各項目を数式と物理に基づき^F討し、主張の^F現可能性を確認する。また、ソフトウェアシミュレーションで個々の要素を^F示し、ハ^Fド試^Fの前に「コ^Fド上の^F」を行う方法も示す。

2 瞬時エネルギー^F送のための電磁結合理論

2.1 相互インダクタンスと共振結合

無^Fリンクの中心は送受二つの共振コイルで構成される結合誘導系である。二コイル間の相互インダクタンス M は、送信コイルの磁束が受信コイルへどれほど結び付くかを表す。一般形

は（ビオ・サバル則に基づく積分）

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{\ell}_1 \cdot d\vec{\ell}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}, \quad (1)$$

で与えられ、形状では数計算が要るが、間隔が近く重なり面積が大きいほど M が大きくなることを示す。結合数 $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ (L_1, L_2 は自己インダクタンス) で規格化する。DORAEMON の試作では ISM である $f_0 = 6.78 \text{ MHz}$ に同調し、約 12 mm の間隔で $k \approx 0.42$ を達成している。短時間で大電力をやり取りするには結合が肝要である。

共振動作。 各コイルにコンデンサ (C_1, C_2) を直列に組み、角周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ で同調させる。准静近傍場では、時間調和な磁界は $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \Re\{\mathbf{H}_0(\mathbf{r})e^{j\omega_0 t}\}$ の形で表される。コイルが同一の ω_0 を保つことでエネルギー交換が最大化され、負荷動時にも迅速に再同調されるべきである。短時間タップでは共振の立ち上がりが μs オーダで完了し、結合中は同調逸脱 $\Delta\omega$ を最小に抑える必要がある（逸脱率を $1/[1 + (\Delta\omega, \tau)^2]$ 的に劣化させる）。

2.2 送電率と最適負荷

等価回路：送受は相互結合した RLC に写像できる。コイル損を R_1, R_2 、負荷を R_L とし、共振点のフェザでは二端子回路として見える。電力送電率 η は入力から R_L に渡った割合で、古典的に $k^2 Q_1 Q_2$ に依存する ($Q_i = \omega_0 L_i / R_i$)。負荷が最適整合されたときの最大電率は

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\right)^2}, \quad (2)$$

（表記ゆれはあるが同等の形）となり、 $k^2 Q_1 Q_2$ が大きいほど高率となる。例として $k = 0.42$, $Q_1 \approx 200$, $Q_2 \approx 150$ なら $k^2 Q_1 Q_2 \approx 5290$, $\eta_{\max} \approx 95\%$ 程度が見られる。一般的な民生無線充電（70–90%）を上回り、用上有は有に匹敵する。最適負荷は受側の見込み抵抗と釣り合わせる形となり、およそ $R_{L,\text{opt}} \approx R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$ 。機では受側整流・DC/DC により動的にインピダンス整合を取る。

最大率 vs 最大電力。 最大電力点と最大率点は一致しない。 R_L を極端にくすれば率は上がるが出力は小さく、重くすれば電力は見えるが損失も見える。タップ・アンド・チャージでは短時間で“損せず取り切る”ことが重要で、最大率付近の運用が合理的である。

2.3 50 ms ウィンドウをたせるか

6.78 MHz で 50 ms は約 34 万周期に相当し、定常送電に十分な周期数である。コイル系の立ち上がりは衰減 (Q) に支配され、結合時間定数

$$\tau \approx \frac{2Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2} \frac{1}{\omega_0} \quad (3)$$

は本設計で μs オーダ。ゆえに 50 ms のほぼ全時間是有効送に充てられる。送信機が当該時間幅で所要電力を供給できること、熱ストレスが許容内であることを確認すればよい。例えば 100 W × 50 ms = 5 J、1000 W × 50 ms = 50 J の注入は、短デューティなら熱的にさばきやすい。

アライメント許容度。 $k > 0.4$ は定位置タップや磁石吸着・機構案内などを決定する。短時間ゆえリアルタイム補正は難しいため、位置ずれに鈍感なコイル形状や自然に位置決めできる機構が望ましい。

3 スパッキヤパシタ群での急速吸収

3.1 充電ダイナミクスとエネルギー式

短接触の間に受側は入射エネルギーを素早く捕捉する必要がある。化学電池へ直接 100 W 級のスパイクを叩き込むのは難しいため、中間蓄電としてスパッキヤパシタを用いるのが賢明である。スパッキヤパシタは極めて高いパワーフロー密度を持ち、kW 級の入出力に亘り一方、エネルギー密度は低いが、本用途では必要量（数十 J）を短期保存できれば良い。

基本方程式。 $I = C, \frac{dV_c}{dt}$ 。實際には容量 $C_{\text{eff}}(V_c)$ の電圧依存、等直列抵抗 R_{ESR} 、リバタク電流 $I_{\text{leak}}(V_c, T)$ を考慮する。

- 電荷支: $I_{\text{in}} = I_{\text{cap}} + I_{\text{leak}}, I_{\text{cap}} = C_{\text{eff}}(V_c) \dot{V}_c$ 。
- 蓄積エネルギー: $E_{\text{stored}}(t) = \int_0^{V_c} C_{\text{eff}}(V) V dV$ (C 一定なら $\frac{1}{2}CV_c^2$)。
- パワーフロー支: $P_{\text{in}} = V_c I_{\text{cap}} + I_{\text{in}}^2 R_{\text{ESR}} + V_c I_{\text{leak}}$ 。

50 ms ではリバタクは無視可、支配的損失は ESR による I^2R 。特に $V_c \approx 0$ 付近では、同じ電流でも蓄積率が著しく低下する。瞬時の蓄積率を

$$\eta_{\text{storage}} = \frac{P_{\text{stored}}}{P_{\text{in}}} \approx \frac{V_c I}{V_c I + I^2 R_{\text{ESR}}} = \frac{1}{1 + \frac{IR_{\text{ESR}}}{V_c}} \quad (4)$$

と書くと、 V_c が低いほど $\frac{IR}{V_c}$ が大となり率が落ちる。策は (1) R_{ESR} を徹底的に下げる (串联セルで見かけ ESR を $\text{m}\Omega$ 以下へ)、(2) 初期は電流を抑制し V_c を稼いでから流れる、(3) 事前プリチャージで $V_c > 0$ を確保、のいずれか (用が理想)。

3.2 エネルギー捕捉を最大化する最適充電プロファイル

目的は限られた T_{charge} 内での E_{stored} 最大化。直観的には低電圧域で電流を控え、電圧が上がるにつれ電流をやするのが合理的で、終盤は電流制限に合わせてテープする。密には最適制御 (ポントリヤギン最小原理など) で解け、短時間・飽和制約の下ではバンバン制御 (最大電

流と低電流の切替)に近い解になりやすい。送信側も出力ランプを持てるが、受側のインピーダンス整合 / DC-DC 電流制御で現れるのが現実的である。

熱。50 ms の範囲では温度上昇は限定的(数 J の損失で数度以下)。高頻度タップ時は冷却インターバルや放熱設計を要する。

例とのアロジ。数百 kW を十秒オーバーで注入するバス充電など、短時間高出力 × 中間蓄電の装は既に存在する。小型機器では 1 F 級スピーカーを 1 秒未満で充電しセンサ動に使う例もある。本提案の 50 ms で 5–20 J は攻めた設定だが、同一桁の実績があり、要は ESR と電流波形設計で勝負が立まる。

4 最適放電とバッテリ充電理論

タップ後はスピーカーからデタッチしてバッテリへ充電 / 給電する。提案では 30 分超の後段放電を想定し、段階 1 (50 ms でキャパ充電) → 段階 2 (30 分でバッテリ充電)という二段充電で、バッテリには直接やかな充電のみを見せる。

4.1 バッテリモデル

リチウムイオンを Randles モデルで表し、 $V_{OCV}(SOC)$ と R_{int} 、漏散等を表す RC 支路 (R_{RC}, C_{RC}) を用いる。端子電圧

$$V_{bat}(t) = V_{OCV}(SOC(t)) + I_{bat}(t)R_{int} + V_{RC}(t), \quad (5)$$

V_{RC} は一次近似で立つ。制約は (1) 所望 SOC 達成、(2) 温度上限、(3) 許容 C レート内の電流。

4.2 最適電流プロファイル

任務の最適は CC–CV (定電流 → 定電圧) で、最適制御でもしばしば最大電流で制約に当たるまで進み、以降は制約に沿うという“バン–制約”解になる。温度制約が支配的でなければ、初期は高電流、電圧・温度・SOC に応じてテープする。大容量のスピーカーと適切な DC–DC があれば、受動的にも CC に近い初期相 → CV 的に自然衰へ移る動作を立てる。

5 シミュレーション組みとコードによる実験

- 電磁シミュレーション: FEM (COMSOL/Maxwell) または SPICE/Simulink の相互インダクタンス素子で k と過渡を評価。距離・偏心・周波数掃引で感度を定量化し、設計余裕(例: 2 mm の偏心で k が 10% 低下 → 頻率 90% 台維持など)を把握。

- ・スパキヤパ充電: $V_c(t)$ と $T(t)$ の微分方程式を数積分。定電流 vs 段階電流を比較し、初期低電域での電流抑制が蓄積エネルギーの劇的向上をもたらすことを確認。最適化（勾配・探索）で 50 ms の電流波形を求める。
- ・バッテリ放電: 受側に DC-DC を介して目標 C レートで充電するシミュレーションを行い、タップでの SOC 分、キャパ電の時間化、温度上昇を確認。数タップの積み上げも評価。
- ・全体系連成: 送信 RF → 相互インダクタンス → 整流 → キャパ → DC-DC → バッテリを連結し端 - 端の感度解析（接触短縮、環境温度上昇、微小デチューン）を実施。必要に応じてパルス幅を 100 ms に延長、送信電力を調整など、定量根に基づく設計判断を行う。

6 現性と推事項

理論を現に近づけるポイント:

- ・高性能部材の選用: 6.78 MHz で $Q > 200$ を狙うリツツや表面理導体、 $\text{m}\Omega$ 級 ESR のスパキヤパ（セル列）を選定。整合網は低損失で可調（バラクタ・スイッチド C）に実現。
- ・安全・適合性: ISM の短時間 100 W パワーストでも規制適合と近傍場の閉じめ（フェライト・シールド）を確保。金属物知・近接判定によるインタロック必須。大電流配の熱と力学（ループ反力）に配慮。
- ・アライメント支援: 機構ガイド / 磁吸着 / 浅いドックで再現性ある結合を担保。
- ・スケーリングの現: EV 級では 50 ms×5 kJ クラスでもバッテリ全体から見れば微小。小中電力デバイス（スマホ・ウェアラブル・センサ）にまず適用し、トップアップ用途から展開。
- ・列・再構成: 充電時は列で低 ESR 吸引、放電時はシリズ再構成で高電供給などの可接も討議あり（要高信スイッチ）。
- ・適制御: 計測した V_c, I に基づきオンザフライで電流波形を最適化、コイルの自動チューニングで kQ を最大維持。用途に「パワースト / エコ」モードを用意し、率・エネルギー・寿命の重み付けを切替。

最終判断 (“めでほしい”への回答)。上記の解析より、DORAEMON のタップ・アンド・チャージは物理的に健全で現可能である。共振結合で短時間・高率の電力移送ができ、スパキヤパは最適電流制御により高い取り込み率を達成し、バッテリは分離段で安全に充電できる。課題は ESR・同調・位置合わせに集約され、既存技術で実現可能である。システムの類例（フラッシュ充電バス、スパキヤパ用）も後押しする。

推。まずシミュレーションと小規模プロトに進む。導出式とモデルを設計指針（コイル寸法・キャパ容量・コンバタ定格）に落とし込み、コード上で反復する。想定どおりの率と充電量が得られるなら、50 ms タップでスマートフォンに充電 → LED 動やスマホ数% 充電を示すデモ機を構築する。“瞬時無充電”の体感は大きく、速さと率を立てる本組みは、その現に十分な基盤を提供する。

参考情報源

- Kurs, A. et al., “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, 317(5834), 83–86 (2007). (結合共振型 WPT の古典的)
- Wang, X. et al., “Time-varying systems to improve the efficiency of wireless power transfer,” *Phys. Rev. Applied*, 21, 054027 (2024). (調により率-電力トレードオフを改善)
- Volfpack Energy Blog, “Wireless Charging with Supercapacitors – The Future of Fast, Convenient Energy Transfer,” Mar. 2023. (スマートフォンと無線給電の相性・事例)
- ABB Press Release, “ABB demonstrates flash charging electric bus in 15 seconds,” June 3, 2013. (400 kW 級の短時間充電の例)
- Park, S. et al., “Optimal Control of Battery Fast Charging Based on Pontryagin’s Minimum Principle,” Proc. IEEE CDC, 2020. (最適充電則が“最大電流 → 制約走行”に着するとの解析)