

DORAEMON「タップ・アンド・チャージ」システム提案の 英文化版（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: 最適化ネットワークのための“分離型オンデマンド急速吸収エネルギー機構”)は、「タップ・アンド・チャージ」を実現する無線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をほぼ瞬時に移送することを目指す。最大の着想はエネルギー送段とエネルギー使用段を分離する点にある。すなわち、高出力の無線バーストで受側のオンボード蓄エネルギー（スーパーキャパシタの「エネルギーキャビティ」）を急速に充電し、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ー充電や動作を行う。これは、通常の無線給電が連続結合を必要とし機動性に制約がある問題に対し、一瞬の接触でエネルギー注入を可能にするものである（参考: supercapacitor を用いた無線充電の概念と例は文末の情報源参照）。

このアイデアを評価し堅固にするため、本稿では以下の理論的組み立てを密に整える：

- 短時間の電力送りで電磁結合率を高く保つ方法（瞬間接触での大電力送）。
- 中間蓄電（スーパーキャパシタ）における急速吸収ダイナミクス（容量・ESR・リクなど回路物理の限界）。
- バッテリー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検討し、主張の実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検証し、ハードテストの前に「コード上の検証」を行う方法も示す。

2 瞬時エネルギー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

無線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、形状では数値計算が要るが、間隔が近く重なり面積が大きいほど M が大することを示す。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 $f_0 = 6.78$ 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、負荷動作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 オーダーで完了し、結合中は同調逸脱 $\Delta\omega$ を最小に抑える必要がある（逸脱は率を $1/[1 + (\Delta\omega, \tau)^2]$ 的に劣化させる）。

2.2 送率と最適負荷

等回路： 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、共振点のフェーズでは二端子回路として図える。電力送率 η は入力から R_L に渡った割合で、古典的に $k^2 Q_1 Q_2$ に強く依存する ($Q_i = \omega_0 L_i / R_i$)。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 $k^2 Q_1 Q_2 \approx 5290$, $\eta_{\max} \approx 95\%$ 程度が見え、一般的な民生無充電（70–90%）を上回り、用上は有に匹敵する。最適負荷は受側の見み抵抗と釣り合わせる形となり、おおよそ $R_{L,\text{opt}} \approx R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$ 。機では受側整流・DC/DC により動的にインピーダンス整合を取る。

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 を極端に小さくすれば率は上がるが出力は小さく、重くすれば電力は図えるが損失も図える。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 ウィンドウを図らせるか

6.78 MHz で 50 ms は約 34 万周期に相当し、定常送に十分な周期数である。コイル系の立ち上がりは衰 (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 のほぼ全時間を有線送に充てられる。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 $100\text{ W} \times 50\text{ ms} = 5\text{ J}$ 、 $1000\text{ W} \times 50\text{ ms} = 50\text{ J}$ 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吸着・機構案内などを固定する。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 スーパーキャパシタ群での急速吸込

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、中間蓄電としてスーパーキャパシタを用いるのが賢明である。スーパーキャパシタは極めて高いパワー密度を持ち、kW 級の入出力に耐え、エネルギー密度は低い、本用途では必要量（数〜数十 J）を短期保存できれば良い。

基本式。 $I = C, dV_c/dt$ 。実際には容量 $C_{\text{eff}}(V_c)$ の電圧依存、等直列抵抗 R_{ESR} 、リーク電流 $I_{\text{leak}}(V_c, T)$ を考慮する。

- 電荷収支: $I_{\text{in}} = I_{\text{cap}} + I_{\text{leak}}, I_{\text{cap}} = C_{\text{eff}}(V_c) \dot{V}_c$ 。
- 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 $\frac{1}{2}CV_c^2$)。
- パワー収支: $P_{\text{in}} = V_c I_{\text{cap}} + I_{\text{in}}^2 R_{\text{ESR}} + V_c I_{\text{leak}}$ 。

50 ms ではリークは無視可、支配的損失は ESR による $I^2 R$ 。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

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

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

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。直感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増やすのが合理的で、終盤は電圧制限に合わせて減らす。実際には最適制御（ポントリヤ最小原理など）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 電流制御で実現するのが現実的である。

熱。 50 ms のスケールでは温度上昇は限定的 (数 J の損失で数度以下)。高周波タップ時は冷却インテグラルや放熱設計を要する。

例とのアナロジー。 数百 kW を十秒スケールで注入するバス充電など、短時間高出力 × 中間蓄電の装置は既に存在する。小型機器では 1 F 級スーパーキャパシタを 1 秒未満で充電しセンサ動作に使う例もある。本提案の 50 ms で 5–20 J は攻めた設定だが、同一桁の性能があり、要は ESR と電流波形設計で勝負が尽まる。

4 最適放電とバッテリー充電理論

タップ後はスーパーキャパシタからデタッチしてバッテリーへ充電 / 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 分でバッテリー充電) という二段充電で、バッテリーにはやさやかな充電のみを見せる。

4.1 バッテリーモデル

リチウムイオンを Randles モデルで表し、 $V_{OCV}(SOC)$ と R_{int} 、分散等を表す RC 支 (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} は一次微分で与えられる。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と進み、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 に合わせて調整する。大容量のスーパーキャパシタと適切な DC–DC があれば、受動的にも CC に近い初期相 → CV 的に自然に衰へ移る動作を実現しやすい。

5 シミュレーション組みとコードによる検証

- 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 → 効率 90% 台維持など) を把握。

- スパキャパ充電: $V_c(t)$ 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 レッ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、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、送信電力をなど、定量根に基づく設計判断を行う。

6 実現性と推奨事項

理論を現に近づけるポイント:

- 高性能部材の用: 6.78 MHz で $Q > 200$ を狙うリットや表面理導体、 $m\Omega$ 級 ESR のスパキャパ（セル列）を選定。整合網は低損失で可同調（バラクタ・スイッチド C）に。
- 安全・適合性: ISM の短時間 100 W バ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。
- スケリングの現: EV 級では 50 ms×5 kJ クラスでもバッテリー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、放電時はシリズ再構成で高電供給などの可接も討あり（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「ブスト / 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（“めてほしい”への回答）。上記の解析より、DORAEMON のタップ・アンド・チャ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、スパキャパは最適電流制御により高い取りみ率を達成し、バッテリー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、既存技術で可能である。システムの類例（フラッシュ充電バス、スパキャパ用）も後押しする。

推奨。 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、コッド上で反復する。想定どおりの率と充電量が得られるなら、50 ms タップでスパキャパに充電 → 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、速さと率を立する本組みは、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–電力トレドオフを改善)
- Volfpack Energy Blog, “Wireless Charging with Supercapacitors – The Future of Fast, Convenient Energy Transfer,” Mar. 2023. (スパキャパと無給電の相性・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” に着することの解析)