

DORAEMON 「タップ・アンド・チャージ」 システム提案の 強化版（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。最大の発想はエネルギー転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」) を急速に満たし、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駆動を行う。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実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枠組みを厳密に整える：

- 短時間の電力転送で電磁結合効率を高く保つ方法 (瞬間接触での大電力伝送)。
- 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・リー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、ハード試験の前に「コード上の実験」を行う方法も示す。

2 瞬時エネルギー転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・サバール則に基づく線積分）

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

で与えられ、実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 が増大することを示す。結合係数 $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ (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 帯である $f_0 = 6.78$ 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強結合が肝要である。

共振動作。 各コイルにコンデンサ (C_1, C_2) を直並列に組み、角周波数 $\omega_0 = 2\pi f_0$ で同調させる。準静近傍場では、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。両コイルが同一の ω_0 を保つことでエネルギー交換が最大化され、負荷変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 μ s 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（逸脱は効率を $1/[1 + (\Delta\omega, \tau)^2]$ 的に劣化させる）。

2.2 伝送効率と最適負荷

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、共振点のフェーザでは二端子対回路として扱える。電力伝送効率 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効率は

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

（表記ゆれはあるが同等の形）となり、 $k^2 Q_1 Q_2$ が大きいほど高効率となる。例として $k = 0.42$, $Q_1 \approx 200$, $Q_2 \approx 150$ なら $k^2 Q_1 Q_2 \approx 5290$, $\eta_{\max} \approx 95\%$ 程度が見込め、一般的な民生無線充電（70–90%）を上回り、実用上は有線に匹敵する。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 $R_{L,\text{opt}} \approx R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$ 。実機では受側整流・DC/DC により動的にインピーダンス整合を取る。

最大効率 vs 最大電力。 最大電力点と最大効率点は一致しない。 R_L を極端に軽くすれば効率は上がるが出力は小さく、重くすれば電力は増えるが損失も増える。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、最大効率付近の運用が合理的である。

2.3 50 ms ウィンドウを満たせるか

6.78 MHz で 50 ms は約 34 万周期に相当し、定常転送に十分な周期数である。コイル系の立ち上がりは減衰 (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 のほぼ全時間是有効転送に充てられる。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気吸着・機構案内などを仮定する。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 級の入出力に強い一方、エネルギー密度は低いが、本用途では必要量（数～数十 J）を短期保存できれば良い。

基本関係。 $I = C, \frac{dV_c}{dt}$ 。実際には容量 $C_{\text{eff}}(V_c)$ の電圧依存、等価直列抵抗 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^2R 。特に $V_c \approx 0$ 付近では、同じ電流でも蓄積効率が著しく低下する。瞬時の蓄積効率を

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

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

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増やすのが合理的で、終盤は電圧制限に合わせてテープする。厳密には最適制御（ポントリヤーゲン最小原理など）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 電流制御で実現するのが現実的である。

熱。50 ms の単発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。

実例とのアナロジ。数百 kW を十秒オーダで注入するバス充電など、短時間高出力 × 中間蓄電の実装は既に存在する。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駆動に使う例もある。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決まる。

4 最適放電とバッテリ充電理論

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、バッテリには穏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} 、拡散等を表す RC 支線 (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} は一次遅れで従う。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

実務の最適は 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 に応じてテーパする。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 的に自然減衰へ移る挙動を実現しやすい。

5 シミュレーション枠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。

- ・ スーパーキャパ充電： $V_c(t)$ と $T(t)$ の微分方程式を数値積分。定電流 vs 段階電流を比較し、初期低電圧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、単発タップでの SOC 増分、キャパ電圧の時間変化、温度上昇を確認。複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、送信電力を増強など、定量根拠に基づく設計判断を行う。

6 実現性と推奨事項

理論を現実に近づけるポイント：

- ・ 高性能部材の採用： 6.78 MHz で $Q > 200$ を狙うリツツ線や表面処理導体、 $\text{m}\Omega$ 級 ESR のスーパーキャパ（セル並列）を選定。整合網は低損失で可変同調（バラクタ・スイッチド C）に対応。
- ・ 安全・適合性： ISM 帯の短時間 100 W バーストでも規制適合と近傍場の閉じ込め（フェライト・シールド）を確保。金属異物検知・近接判定によるインタロック必須。大電流配線の熱と力学（ループ反力）に配慮。
- ・ アライメント支援： 機構ガイド／磁気吸着／浅いドックで再現性ある結合を担保。
- ・ スケーリングの現実： 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。
- ・ 並列・再構成：充電時は並列で低 ESR 吸収、放電時はシリーズ再構成で高電圧供給などの可変接続も検討価値あり（要高信頼スイッチ）。
- ・ 適応制御：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。用途別に「ブースト／エコ」モードを用意し、効率・エネルギー・寿命の重み付けを切替。

最終判断（“決めてほしい”への回答）。 上記の解析より、DORAEMON のタップ・アンド・チャージは物理的に健全で実現可能である。共振結合で短時間・高効率の電力移送ができ、スーパーキャパは最適電流制御により高い取り込み効率を達成し、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、既存技術で対処可能である。実システムの類例（フラッシュ充電バス、スーパーキャパ応用）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・コンバータ定格）に落とし込み、コード上で反復検証する。想定どおりの効率と充電量が得られるなら、50 ms タップでスーパーキャパに充電 → LED 駆動やスマホ数% 充電を示すデモ機を構築する。“瞬時無線充電”の体験価値は大きく、速さと効率を両立する本枠組みは、その実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). (強結合共振型 WPT の古典的実証)
- Wang, X. *et al.*, “Time-varying systems to improve the efficiency of wireless power transfer,” *Phys. Rev. Applied*, 21, 054027 (2024). (変調により効率–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. (スーパーキャパと無線給電の相性・事例)
- ABB Press Release, “ABB demonstrates flash charging electric bus in 15 seconds,” June 3, 2013. (400 kW 級の短時間充電の実例)
- 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”に帰着することの解析)