

同軸誘電体共振器と分散キャパシタにより高効率化を図った マイクロ波帯レクテナ

山下 知紘 本田 和博 小川 晃一

富山大学 大学院理工学研究部
〒930-8555 富山市五福 3190

m1271026@ems.u-toyama.ac.jp

あらまし 長距離伝送レクテナの高効率化のためには、ダイオードに印加される高周波の振幅を大きくすることが有効である。信号振幅は、ダイオードに接続される共振器の共振周波数、誘導性・容量性リアクタンスの配分、さらには共振器の Q ファクターに依存することが報告されている。そこで、本論文では高い Q ファクターを有する同軸誘電体共振器と分散キャパシタによりレクテナの高効率化を図った。さらに、開発したレクテナを用いて低電力(-10dBm)においてスーパーキャパシターへの充電実験を行い、LCD Clock を動作させた。開発したレクテナを用いることによって従来の LC 共振器を用いたレクテナと比較して約 2.5 倍の長時間動作が可能であることを示した。

キーワード レクテナ, 検波回路, 誘電体共振器, Q ファクター

High Efficiency MW-Band Rectenna Using a Coaxial Dielectric Resonator and Distributed Capacitors

Tomohiro YAMASHITA Kazuhiro HONDA Koichi OGAWA

Graduate School of Engineering, Toyama University
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

Abstract To realize a high efficiency rectenna for long distance transmission, it is effective to increase the amplitude of high frequency signals applied to the diode. It is reported that the signal amplitude depends on Q-factor and the resonance frequency of a resonator as well as the ratio of inductive to capacitive reactance. This paper presents experimental studies on the improvement of RF-DC conversion efficiency of rectenna using coaxial dielectric resonator having high-Q and distributed capacitors. Furthermore, using the developed rectenna, charge-up experiments to a super-capacitor at -10dBm were performed, and its ability to supply power to an LCD clock device was confirmed.

Keyword Rectenna, Rectifying circuit, Dielectric resonator, Quality factor

1. はじめに

ウェアラブル無線通信および RF-ID システムの分野において、無線電力伝送 (Wireless Power Transmission: WPT) に大きな関心が集まっている。高周波を直流に変換する検波回路 (本論文では“レクテナ”と呼ぶ) は上記システムを実現するキーデバイスである。

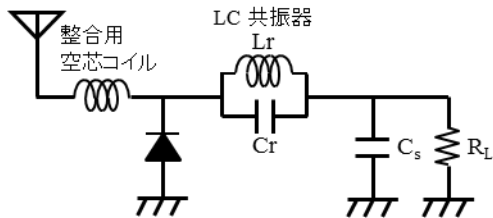
レクテナの効率を向上させるためには、RF 信号を検波するダイオードに印加させる信号の振幅を増加させることが有効である。低電力動作 (0dBm) において、50% 以上の RF-DC 変換効率を有するレクテナが LC 共振器を用いて開発されている [1]。LC 共振器は適切な L と C を選択することにより様々な共振周波数に対応したレクテナを製作できるという利点がある。しかしながら、

LC 共振器の Q ファクターは最適な L と C の組み合わせにおいて 200 程度であり、これ以上高い Q ファクターを得ることは期待できない。そのため本論文では、850MHz 帯において LC 共振器よりも高い Q ファクターを有する $\lambda/4$ 同軸誘電体共振器を用いた。また従来の LC 共振器レクテナはシヤントキャパシターによる抵抗損失が存在する。そのため、誘電体フィルムを用いることにより電流を分散させ、抵抗損失の影響を最小限に抑えた。誘電体共振器による高 Q 化、および分散キャパシターによる電流分散効果によって、10mW の入力電力において、89.1% の変換効率を得た。さらに、入力電力が 1mW および 0.1mW の低電力領域において、77.3% および 44.1% の高い変換効率を得た。開発したレクテナを用いて低電力 (-10dBm)

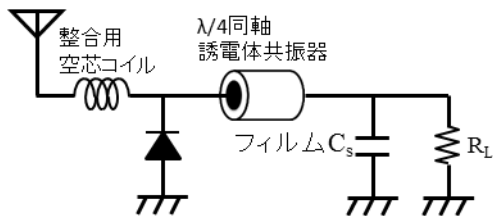
においてスーパーキャパシターへの充電を行い、実際のモジュール (LCD Clock) への給電が可能であることを示した。

2. レクテナの構造

図 1(a)は LC 共振器を用いた従来のレクテナ構造である[1]。LC 共振器の端部に接続された容量 C_s は LC 共振器の特性インピーダンスと比較して小さなりアクタンスを有しているので LC 共振器の端部はグランドに短絡接続されていると考えることができる。従って、図 1(a)において、ダイオードと LC 共振器の接続点は開放状態となり、その結果、ダイオードに印加される RF 信号の振幅は大きくなる。図 1(a)では、アンテナとダイオード回路の整合は、入力端に接続された整合用コイルによって図られている。



(a) LC共振器を用いたレクテナ

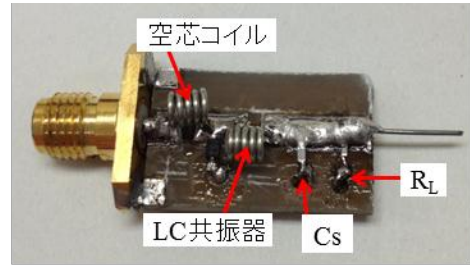


(b) $\lambda/4$ 同軸誘電体共振器を用いたレクテナ

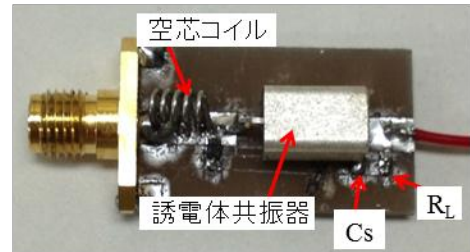
図1 レクテナの構造

図 1(b)は提案する誘電体共振器を用いたレクテナの構造である。図のように、LC 共振器を誘電体共振器に置き換えている。誘電体共振器は LC 共振器と比べ高い Q ファクターを有する。従って、ダイオードに加わる信号の振幅は、LC 共振器の場合よりも大きくなり、レクテナの変換効率向上が期待される。

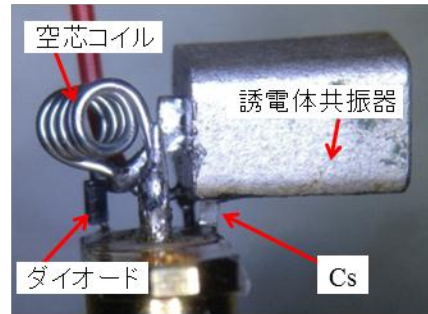
図 1(b)では、図 1 (a)で C_s に用いたチップキャパシターを誘電体フィルムを用いたキャパシターに置き換えている。これにより、 C_s に流れる電流が分散され C_s での抵抗損失が低減されるため、誘電体共振器の採用に加えてさらに効率の向上が図られる。



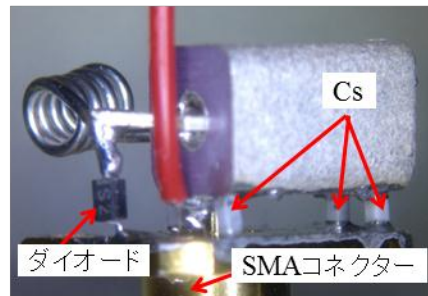
(a) 850MHz LC共振器レクテナ



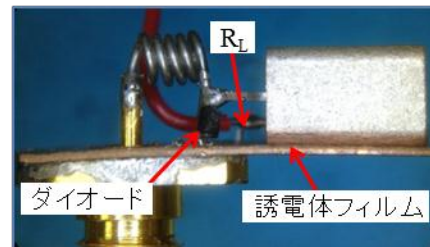
(b) 850MHz 誘電体共振器レクテナ



(c) ショントCを1つ用いた誘電体共振器レクテナ



(d) ショントCを4つ用いた誘電体共振器レクテナ



(e) 誘電体フィルムを用いた誘電体共振器レクテナ

図2 製作した5種類のレクテナ

図2に製作した5種類のレクテナを示す。図2(a)は、LC共振器と C_s にチップコンデンサをマイクロストリップライン上に実装したレクテナであり、従来構造を示している。図2(b)では、図2(a)のLC共振器を誘電体共振器に置き換えており、誘電体共振器の有効性を調べるため製作した。図2(c)は図2(b)と同じ素子を用いて、SMAコネクタに直接実装したレクテナであり、マイクロストリップライン除去による損失低減効果を確認するために製作した。さらに、図2(d)および図2(e)は、キャパシターに流れる電流を分散させることによる変換効率向上を調べるため製作した。図2(d)ではチップキャパシター4つを誘電体共振器底面の四隅に配置した。また図2(e)では、誘電体共振器の底面とSMAコネクタに半田付けされた銅版の間に誘電体フィルムを敷いたレクテナであり、フィルムキャパシターによる最終的な効率向上を図ることを目的に製作した。

3. 誘電体共振器の有効性検証

図3はネットワークアナライザによってインピーダンス特性を測定するために、SMAコネクタに実装した誘電体共振器の写真である。図3のように、誘電体共振器と1つの容量結合用のキャパシターから構成されている。なお使用した誘電体共振器は宇部 YCZ150B（長さ9mm×縦5.9mm×横5.9mm 内径2.1mm）、比誘電率 ϵ_r は92.5である。

図4は、容量結合用のキャパシターを0.3pFとしたときのインピーダンス特性の測定結果である。図4から共振周波数 f_r は850MHzであることがわかる。LC共振器の無負荷 Q (Q_u)は次式によって計算される。

$$Q_u = \frac{f_r}{f_h - f_l} \quad (1)$$

ここで、 f_h および f_l は図4のスミスチャート上に描かれた目の形をした曲線と共振曲線の交点にある2つのマーカーの周波数である。式(1)から、LC共振器の無負荷 Q は523であることがわかる。

比較のため、LC共振器(空芯コイルとチップキャパシター)を製作し、上記と同じ方法で無負荷 Q を測定したところ、950MHzにおいて約242であった。このことから、誘電体共振器はLC共振器の2倍以上の無負荷 Q を有することが明らかになった。



図3 $\lambda/4$ 同軸誘電体共振器

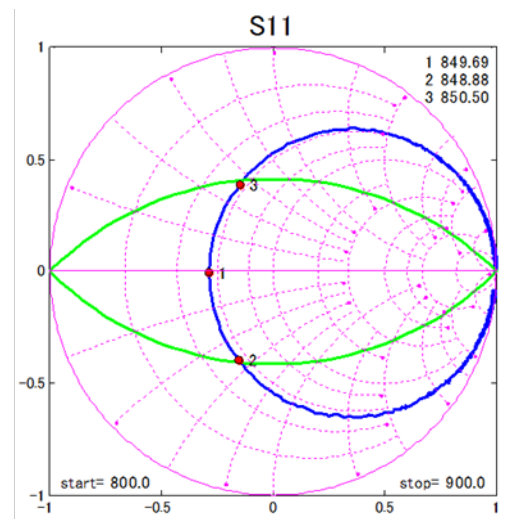


図4 $\lambda/4$ 同軸誘電体共振器のインピーダンス特性

誘電体共振器の有効性を検証するため、まず最初に図2(a)に示した850MHz LC共振器レクテナのLC共振器部分を誘電体共振器に置き換え特性を調べた。回路基板として厚さ1.6mmのガラスエポキシ基板(FR4)を用いた。検波用ダイオードは1SS315(東芝)である。測定は850MHz及び864MHzにおいて行った。ストリップラインの特性インピーダンスは50 Ω 、シヤント容量 C_s は820pFである。

図5は入力電力を-10dBm(0.1mW)から10dBm(10mW)まで1dBmずつ変化させたときのLC共振器レクテナ図2(a)と誘電体共振レクテナ図2(b)のRF-DC変換効率の関係である。RF-DC変換効率 η は次式によって定義した。

$$\eta = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{P_{in}} \quad (2)$$

ここで、 P_{in} はレクテナへ入力する高周波信号の電力、 V_{DC} は負荷抵抗 R_L の両端に発生する直流電圧である。

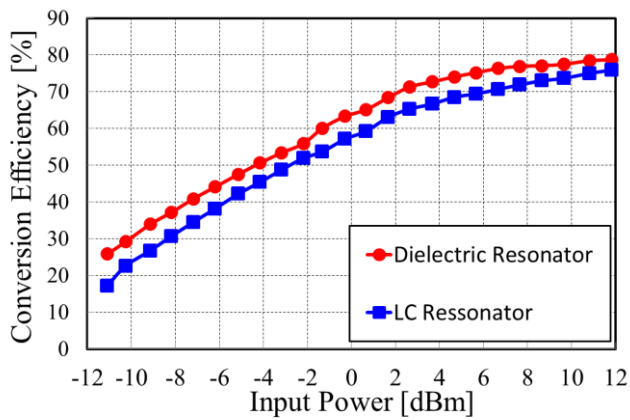


図5 入力電力と変換効率の関係

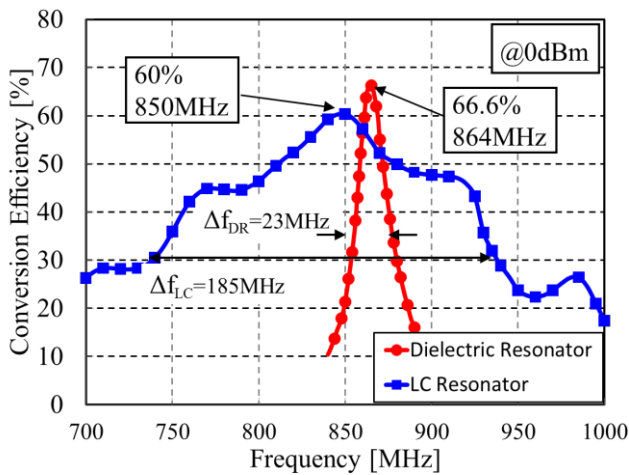


図6 周波数と変換効率の関係

850MHz における入力インピーダンスは整合用空芯コイルによって調整し、それぞれ共振周波数において VSWR が 2 以下になるようにした。

LC 共振器レクテナ (■) は共振周波数 850MHz で測定し、誘電体共振器レクテナ (●) は共振周波数 864MHz で測定した。誘電体共振器レクテナの場合、入力電力 -10dBm (0.1mW) では 29.4%、LC 共振器レクテナからの改善率 7.1%、入力電力 10dBm (10mW) では 77.6%、改善率 4.3% の効率改善が確認された。このことは、誘電体共振器の共振現象によってダイオードの入力端が開放状態となり、さらに、高 Q ファクターを有する誘電体共振器によりダイオードに印加される RF 信号の振幅が増大し、高い RF-DC 変換効率が達成されたと解釈することができる。

図 6 は入力電力 0dBm (1mW) における、周波数と変換効率の関係である。LC 共振器レクテナ

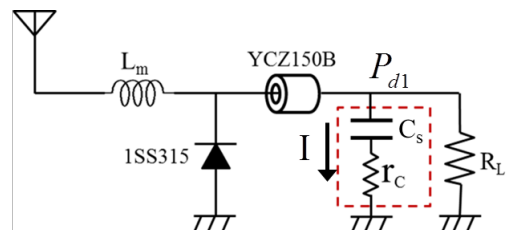
(■) では共振周波数 850MHz 付近において最大値 60%を示し、誘電体共振器レクテナ (●) では共振周波数 864MHz において最大値 66.6%を示した。また最大効率の半分の効率を示す周波数幅 (半値幅 Δf) は誘電体共振器レクテナで $\Delta f_{DR} = 26\text{MHz}$ 、LC 共振器レクテナでは $\Delta f_{LC} = 195\text{MHz}$ である。2つの比較より誘電体共振器レクテナは非常に狭帯域であることがわかる。これは高い Q ファクターによるものであり、変換効率と帯域幅はトレードオフの関係にあると言える。

4. 分散キャパシターを用いたレクテナ

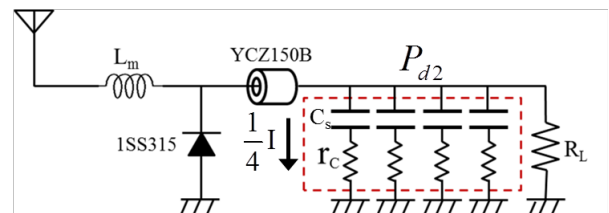
図 7 の(a)および(b)は、図 2 の(c)および(d)の回路図を示しており、シャントキャパシターの抵抗を等価的に表している。図 7(a)のようにシャントキャパシターが 1 つ場合における抵抗損失を P_{d1} とし、図 7(b)のようにシャントキャパシターが 4 つ場合における抵抗損失を P_{d2} とするとそれぞれの(3)、(4)式で表される。キャパシターが 1 つから 4 つに増えることによって電流が分散され、キャパシターでの損失が 4 分の 1 になることがわかる。そのため、キャパシターの数が十分に大きい場合を想定して、誘電体フィルムを用いて誘電体共振器の底面全体をキャパシターとすることにした。

$$P_{d1} = I^2 r_c \quad (3)$$

$$P_{d2} = 4 \left\{ \left(\frac{1}{4} I \right)^2 r_c \right\} = \frac{1}{4} I^2 r_c = \frac{1}{4} P_{d1} \quad (4)$$



(a) シャントCを1つ用いた誘電体共振器レクテナ



(b) シャントCを4つ用いた誘電体共振器レクテナ

図7 シャントCの抵抗を考慮した回路図

図8は製作した誘電体フィルムキャパシターを用いた誘電体共振器レクテナを示す。SMAコネクタに半田付けした銅版と誘電体共振器との間に誘電体フィルムを挟み、アクリル板とプラスチックネジを用いて圧着した。誘電体フィルムの素材はポリ塩化ビニリデン(食品包装用ラップ)であり、比誘電率 4.5, 厚さ 10 μ m のものを使用した。容量 C_f 次式で計算される。

$$C_f = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s ab}{t} \quad (5)$$

ここで ab は誘電体共振器の底面積 9mm \times 6mm=54mm²である。式(5)より $C_f=211$ pF であることがわかる。図9は、図8で示した誘電体レクテナのインピーダンス特性である。867MHzにおいて、VSWRは1.08であり極めて良好な整合状態が得られている。VSWRが2以下の周波数帯域は約10MHzである。

図10は、入力電力を-10dBm(0.1mW)の一定値としたときのRF-DC変換効率とシャントキャパシター数の関係である。◆はチップキャパシターを用いたレクテナであり、図10の2種類の値(チップCが1つ、チップCが4つ)はそれぞれ、図2に示した(c), (d)のレクテナの測定結果である。●は誘電体フィルムを用いたレクテナである。チップキャパシターを用いたレクテナは共振周波数864MHzで測定し、フィルムキャパシターを用いたレクテナは共振周波数867MHzで測定した。図から、キャパシターの数を増加するにつれて変換効率が向上していることがわかる。さらにフィルムキャパシターを用いたレクテナは、チップキャパシターを用いた場合と比較して極めて高い変換効率を示している。

図11に4種類のレクテナ変換効率を示す。フィルムキャパシターを用いた誘電体共振器レクテナは、入力電力10mWにおいて89.1%の変換効率を得られていることがわかる。さらに、入力電力が1mWおよび0.1mWの低電力領域において76.2%および44.1%の高い変換効率を達成している。

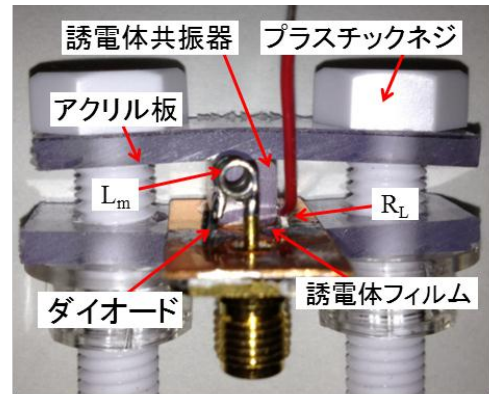


図8フィルムCを用いた誘電体共振器レクテナ

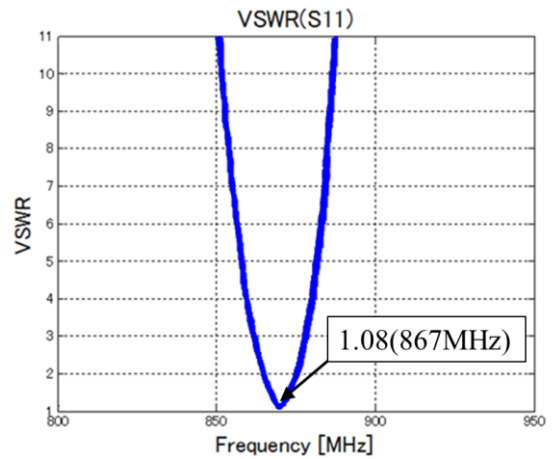


図9 誘電体フィルムレクテナのインピーダンス特性

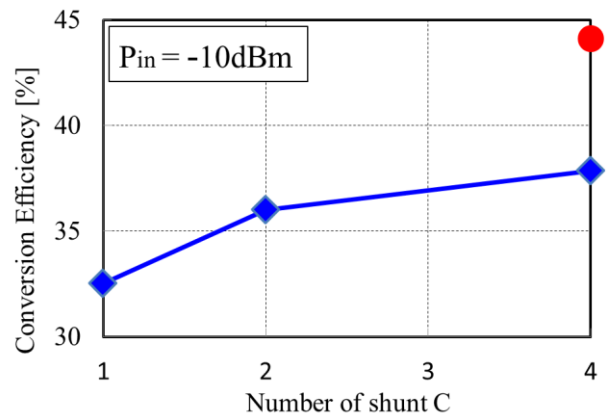


図10 シャントCの数と変換効率の関係

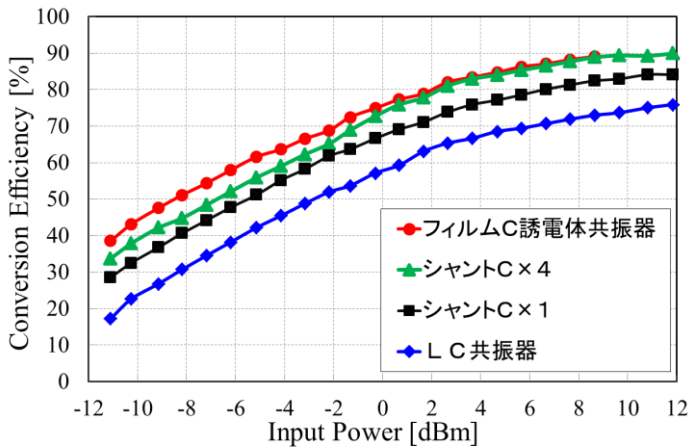


図11 入力電力と変換効率の関係

5. スーパーキャパシター充電実験

開発した誘電体共振器レクテナを用いて、スーパーキャパシターへ充電し、LCD CLOCK(1.5V, 2.5 μ A 動作)へ給電を行った。図 12 に実験セットアップを示す。図 13 のように、SG の出力電力をレクテナによって RF-DC 変換し、スーパーキャパシターで蓄積している。さらに、キャパシターで蓄積した電力を DC-DC 変換を行うことで LCD Clock を動作させている。キャパシターは Panasonic EECF5R5H10 容量 1F, DC-DC コンバーターは LINEAR TECHNOLOGY LTC3108 を使用した。図 14 は図 2(a)の LC 共振器レクテナ (■) と図 8 の誘電体共振器レクテナ (●) の -10dBm における蓄積電圧と充電時間の関係を示している。2つの比較により、どの充電時間においても誘電体共振器レクテナの方が高い蓄積電圧であることがわかる。そのため、キャパシターに蓄えられる電荷も誘電体共振器レクテナの方が大きいことが期待できる。表 1 は入力電力-10dBm においてキャパシターへ充電を 30 分間行った場合の LCD Clock 動作時間を示している。結果より、開発したレクテナを用いることによって、約 2.5 倍の長時間動作が可能であることが確認された。

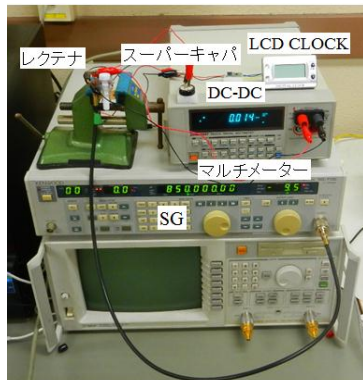


図12 実験セットアップ

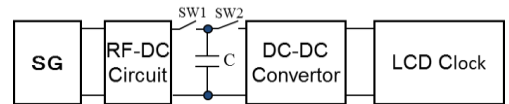


図13 実験回路図

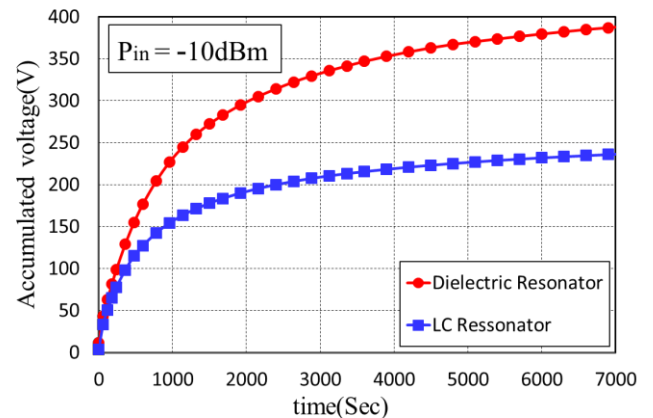


図14 蓄積電圧と充電時間の関係

表 1 LCD Clockの動作時間

	LC共振器 レクテナ	誘電体共振器 レクテナ
動作時間(Sec)	13	32

$P_{in} = -10\text{dBm}$, 充電時間 30min

6. まとめ

本論文では、850MHz 帯において LC 共振器よりも高い Q 値を有する誘電体共振器と分散キャパシターを用いることによって、高い RF-DC 変換効率を達成したレクテナの実験的検討結果について述べた。10mW の入力電力において、89.1% の変換効率を得られること、さらに、入力電力が 0mW および 0.1mW の低電力領域において、76.2% および 44.1% の高い変換効率を得られることを示した。また変換した電力をスーパーキャパシターに充電し、DC-DC 変換することによって実際のモジュールへの給電が可能であることを示した。

参考文献

- [1] K. Ogawa, K. Ozaki, M. Yamada, and K. Honda: "High Efficiency Small-Sized Rectenna Using a High-Q LC Resonator for Long Distance WPT at 950 MHz," IMWS-IWPT2012, Kyoto, FRI-J-1, May 2012.
- [2] S. Kitazawa, H. Ban, and K. Kobayashi "Energy Harvesting from Ambient RF Sources" IMWS-IWPT2012, Kyoto, THU-B-2, May 2012.