

[特別講演] ワイヤレス電力伝送における効率向上 — 電磁誘導 (LC ブースター) 方式を例に —

松木 英敏[†] 田倉 哲也[‡] 佐藤 文博[‡]

[†] 東北大学大学院医工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

[‡] 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†] matsuki@ecei.tohoku.ac.jp, [‡] {takura, fsato}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 現在, ワイヤレス電力伝送技術は標準化及び規格化に向けて多くの企業の協力のもとで取り組みがなされている。様々な方法がある中で, マイクロ波, 磁界共鳴, 電界共鳴, そして電磁誘導が主なワイヤレス伝送方式として挙げられる。我々はその中で電磁誘導方式について長年研究を進めてきた結果, 単なる変圧器の延長とは異なる設計思想を手に入れた。変圧器の設計思想では漏れ磁束を低減する必要があり, 必然的に磁心の形状を工夫することになる。しかし, それでは伝送距離を広げるという発想には至らないため, 電磁誘導方式の伝送距離は短いという印象を与える結果となった。我々は漏れ磁束による影響を, コンデンサを巧みに用いることで低減し, 電磁誘導方式において, 高い伝送効率と広い伝送距離を実現している。

本講演では, ワイヤレス給電技術としての電磁誘導方式の効率に対する考え方について述べる。結合係数と Q 値で定義される性能指標によって電磁誘導方式も最大伝送効率が決まることを示す。さらに, LC 共振器を組み合わせた LC ブースター方式について述べる。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 電磁誘導, LC ブースター

[Invited] Improvement of Transmission Efficiency for Wireless Power Transfer — Ex. Electromagnetic Induction (Including LC-booster Method) —

Hidetoshi MATSUKI[†] Tetsuya TAKURA[‡] and Fumihito SATO[‡]

[†] Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aramaki-Aoba, Aoba, Sendai, 980-8579 Japan

[‡] Graduate School of Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aramaki-Aoba, Aoba, Sendai, 980-8579 Japan

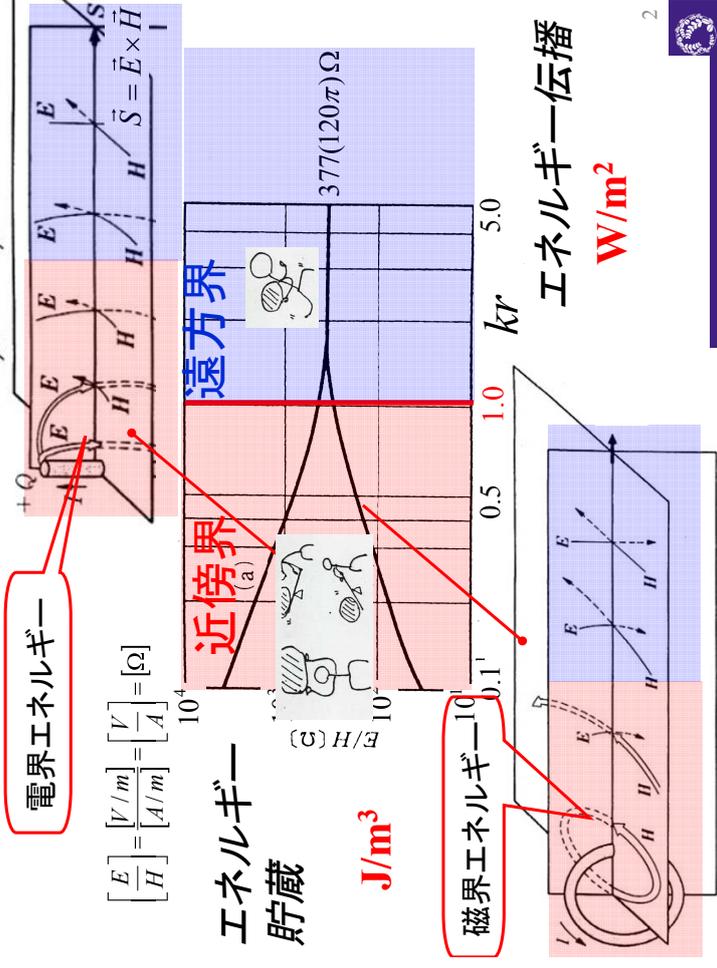
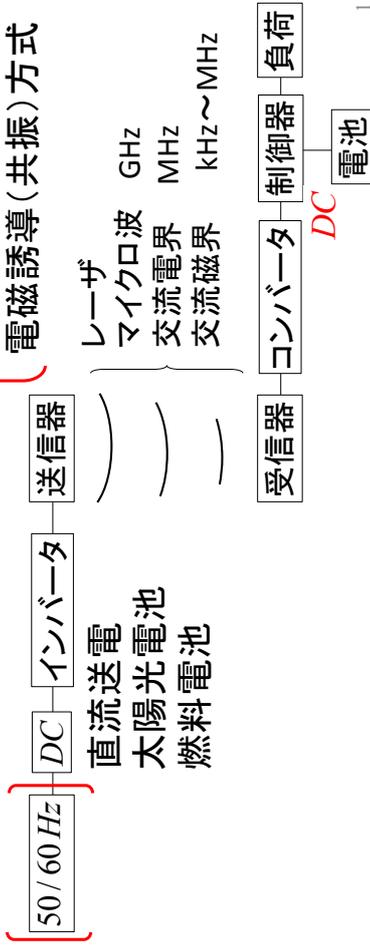
E-mail: [†] matsuki@ecei.tohoku.ac.jp, [‡] {takura, fsato}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Currently, the wireless power transmission technology effort has been made in cooperation with many companies towards the standardization and normalization. There are various forms for wireless power transfer. Microwave, magnetic resonance, electric resonance, and electromagnetic induction are main wireless techniques. We have been studying electromagnetic induction method for many years. As a result, we got a design philosophy that is different from the mere extension of the transformer designing. In the design concept of the transformer, it is necessary to reduce the leakage flux, so that you need to devise the shape of the core inevitably. However, thinking transformer design does not lead to the idea of expanding the transmission distance. Therefore, electromagnetic induction system has given people the impression that the transmission distance is short. We have achieved high transmission efficiency and wide transmission distance because of decreasing the effect of leakage flux in the electromagnetic induction system by using a capacitor skillfully.

In this paper, we describe the approach to the transmission efficiency of electromagnetic induction method as wireless power transfer technology. And, we outline that the maximum transmission efficiency is determined by the figure of merit that are defined by the coupling coefficient and quality factor. Furthermore, we introduce a method that combines LC resonators, called LC-booster method.

Keyword Wireless power transfer, Electromagnetic induction, LC-booster

非接触電力伝送方式
(非接触充電技術)



電磁誘導方式

○非接触電力伝送方式

1. マイクロ波伝送方式
 2. エバネッセント波方式
 3. 磁界共鳴方式
 4. 電界共鳴方式
 5. **電磁誘導方式**
- 遠方界 無線
- 近傍界 「無線」

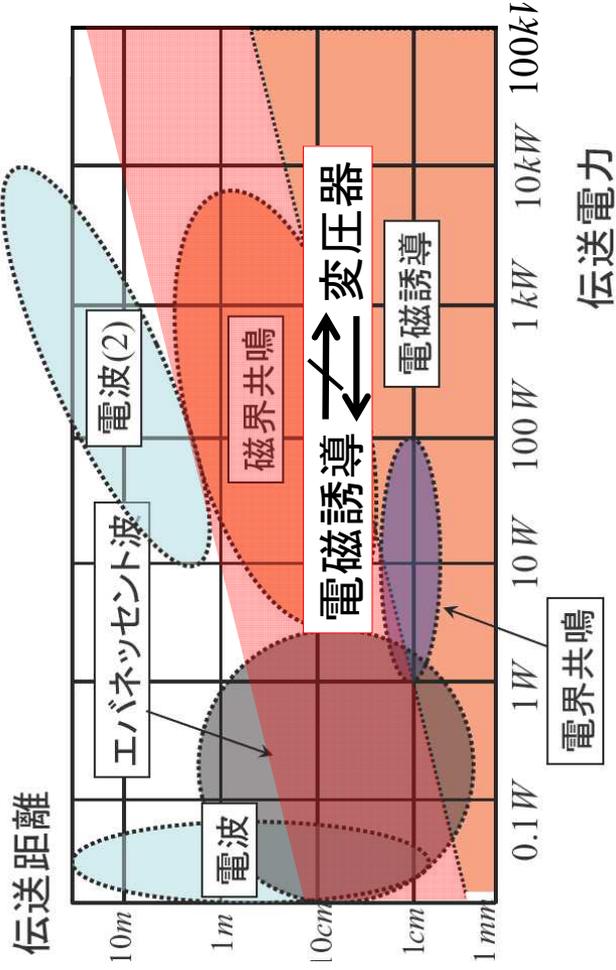
○○○ 伝送距離

電磁誘導方式



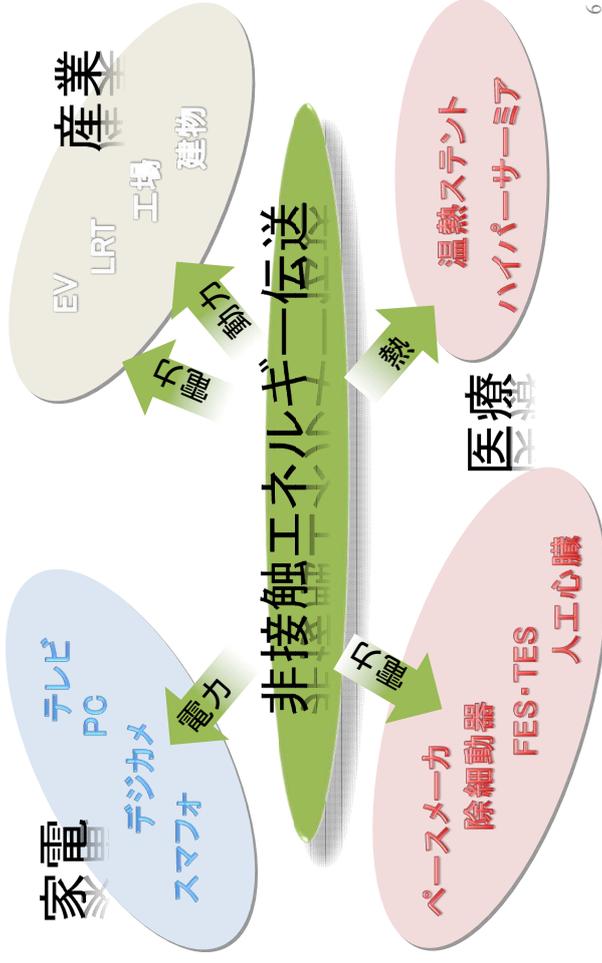
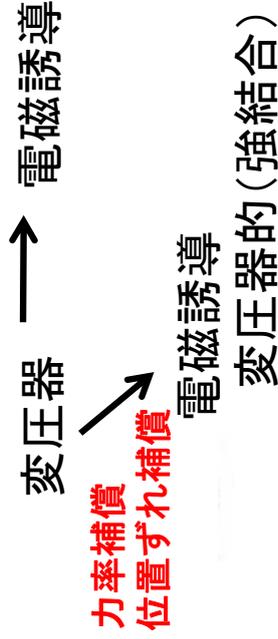
伝送電力



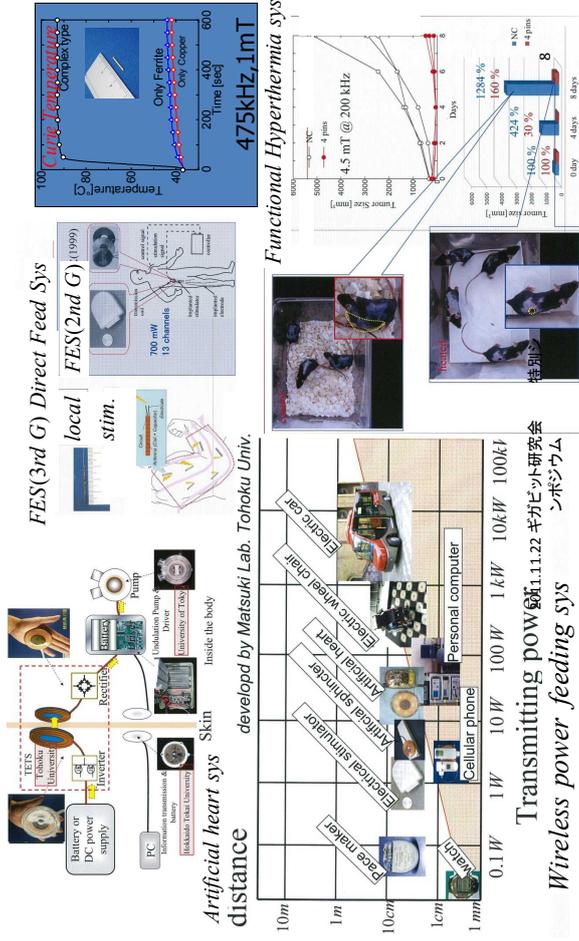


電磁誘導とは

基本は
ファラデーの電磁誘導則



ワイヤレス給電・医療応用



磁心の等価回路
電圧源駆動 → 磁束は正弦波で
変化!

$$\Phi = N\phi = Li$$

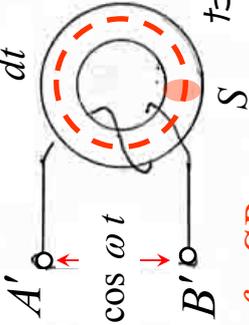
$$v = N \frac{d\phi}{dt} \quad \phi = \int d\phi = \int \frac{v}{N} dt$$

$$v = \sqrt{2}V \cos \omega t \quad = \frac{\sqrt{2}V}{N\omega} \sin \omega t$$

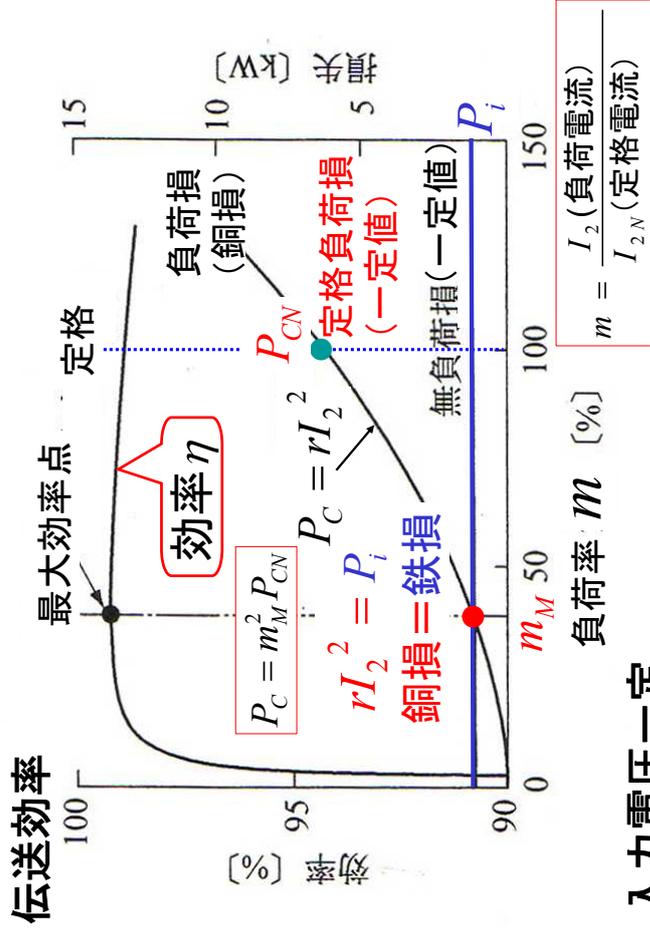
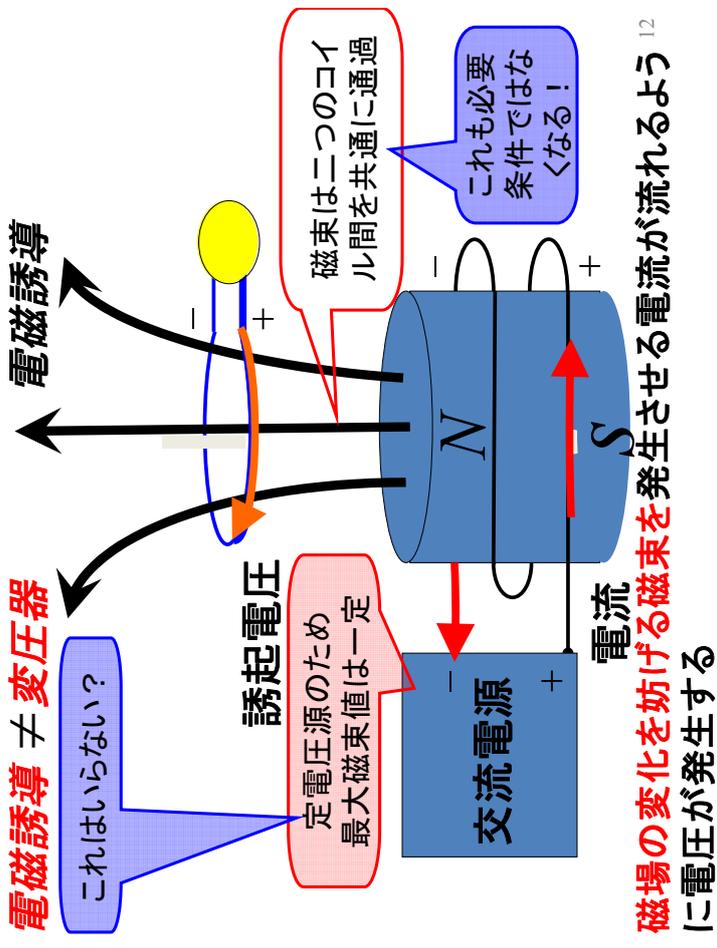
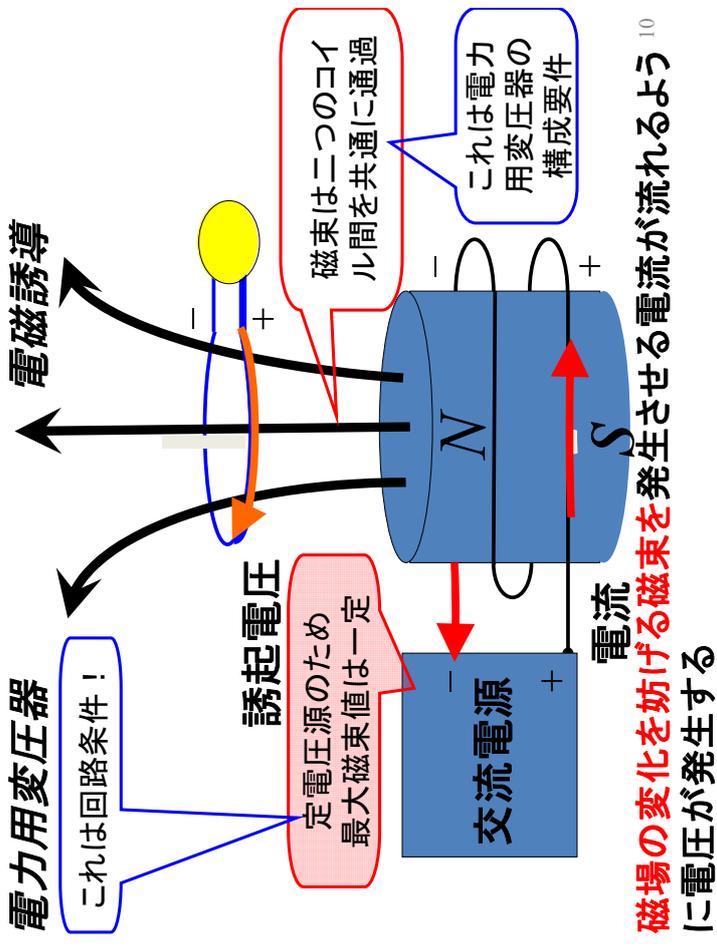
$$= \phi_m \sin \omega t$$

ただし $\phi_m = \sqrt{2}V / N\omega$

$\therefore V_{rms} = 4.44 f nSB_m$



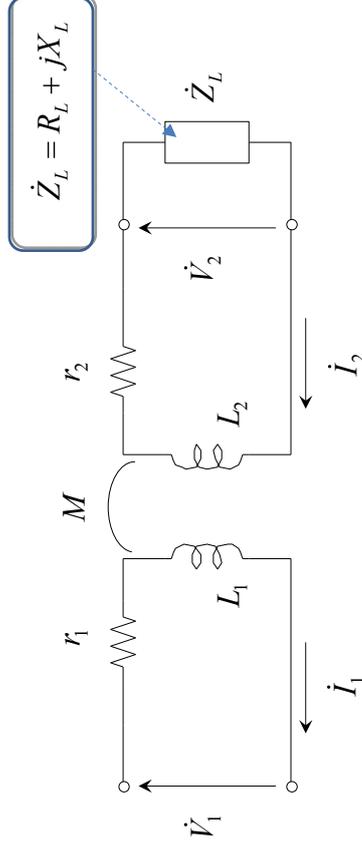
- たとえ磁心のBH曲線がヒステリシスをもついても
磁束は正弦波で変化!
- 電圧実効値一定なら最大磁束値も一定



入力電圧一定
(最大磁束一定)

任意負荷を接続した場合の伝送特性

伝送効率算定 (効率重視)



13

14

二次直列Cによるリアクタンス補償

最大効率負荷抵抗

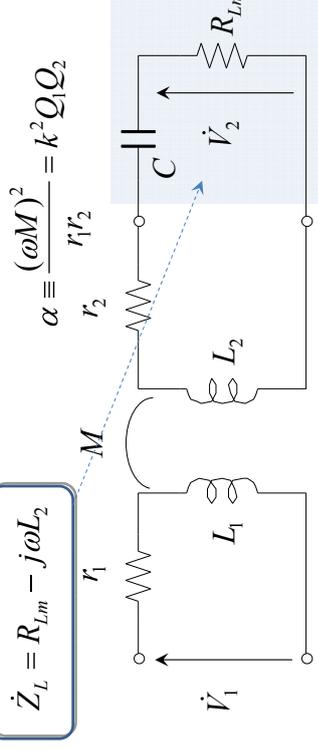
$$R_{Lm} = \sqrt{r_2^2 + \frac{r_2^2}{r_1} (\omega M)^2} = r_2 \sqrt{1 + \alpha}$$

最大効率負荷リアクタンス

$$X_{Lm} = -\omega L_2 \quad C = 1/\omega^2 L_2$$

最適負荷時の最大効率

$$\eta_{max} = \left[1 + \frac{2(1 + \sqrt{1 + \alpha})}{\alpha} \right]^{-1}$$

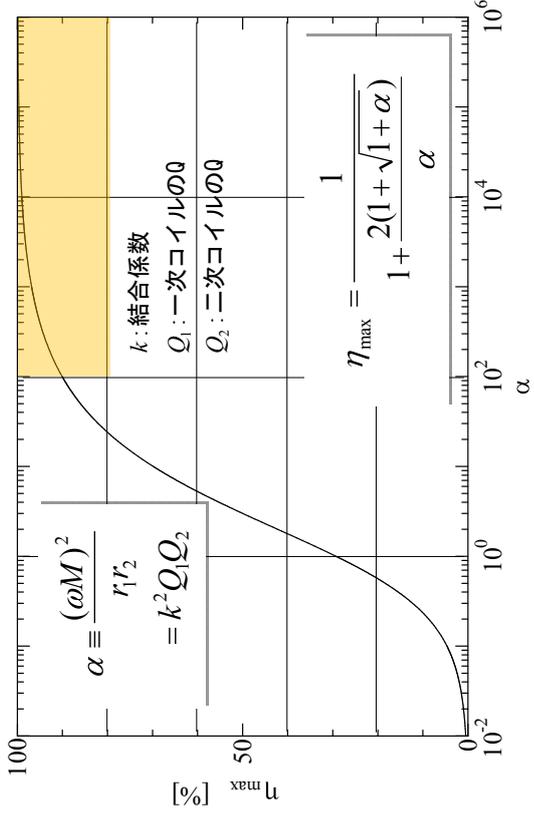


14

51

電磁誘導の性能指標

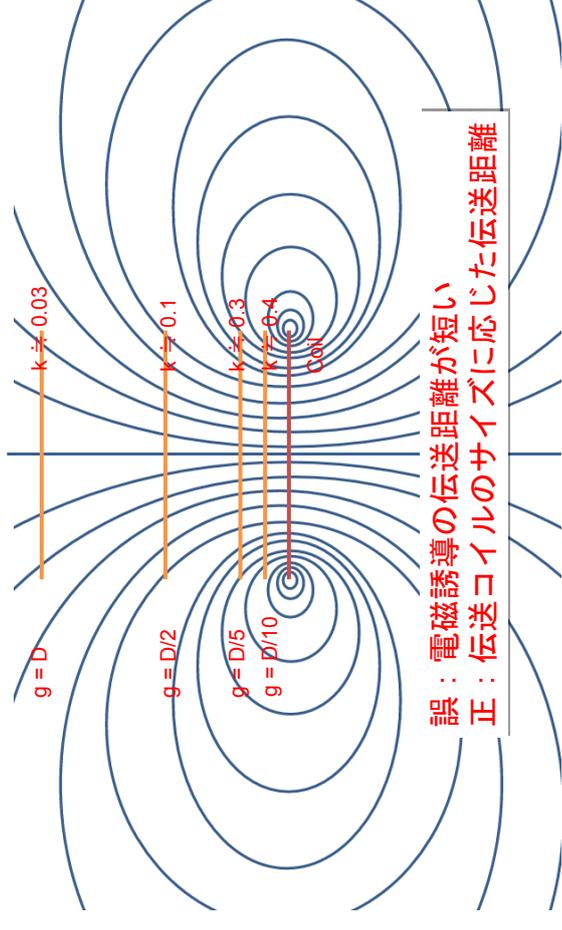
最大伝送効率 (二次側共振)



15

ワンターンコイルの結合係数

g: Gap, D: Diameter of coil



誤: 電磁誘導の伝送距離が短い
正: 伝送コイルのサイズに応じた伝送距離

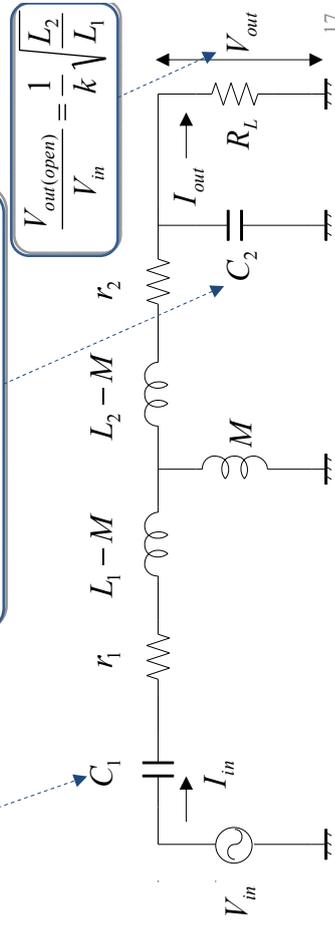
16

一次直列・二次並列

電圧安定化条件 伝送効率最大条件 (固定負荷)

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2(1-k^2)L_1}$$

$$C_2 = \frac{R_L + r_2}{k\sqrt{L_1L_2}} \cdot \frac{1}{R_L\omega^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{k^2L_1L_2} \cdot \frac{r_2}{r_1 + \frac{r_2}{\sqrt{k^2L_1L_2}}}}$$

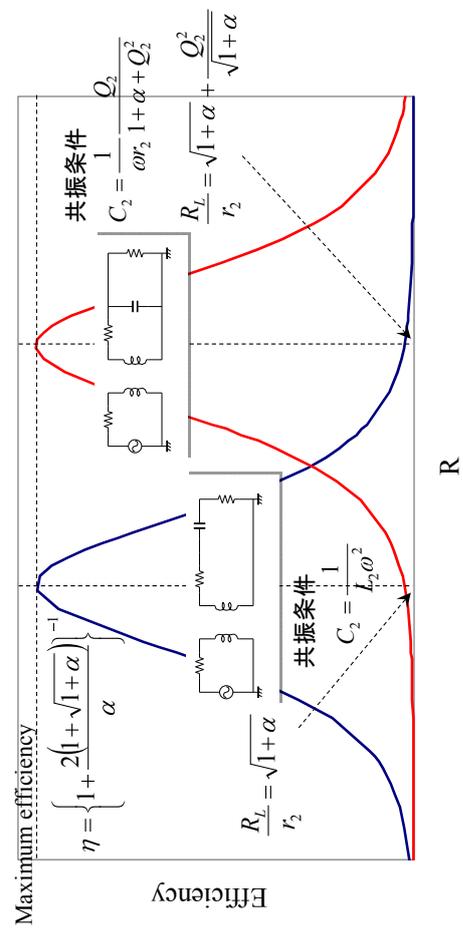


Circuits	Best efficiency	Optimum load
no resonance 	$\eta = \left\{ 1 + \frac{2(1 + \sqrt{1 + \alpha + Q_2^2})}{\alpha} \right\}^{-1}$	$\frac{R_L}{r_2} = \sqrt{1 + \alpha + Q_2^2}$
series resonance 	$\eta = \left\{ 1 + \frac{2(1 + \sqrt{1 + \alpha})}{\alpha} \right\}^{-1}$	$\frac{R_L}{r_2} = \sqrt{1 + \alpha}$
parallel resonance 	$\eta = \left\{ 1 + \frac{2(1 + \sqrt{1 + \alpha})}{\alpha} \right\}^{-1}$	$\frac{R_L}{r_2} = \sqrt{1 + \alpha + \frac{Q_2^2}{1 + \alpha}}$

*H. Matsuki, et al.: J. Magn. Soc. Japan, Vol.18, No.2, pp.663-666 (1994).
*M. Inoue, H. Matsuki, et al.: J. Magn. Soc. Japan, Vol.25, pp.1011-1014 (2001).

負荷特性

- Series-resonance
- Parallel-resonance

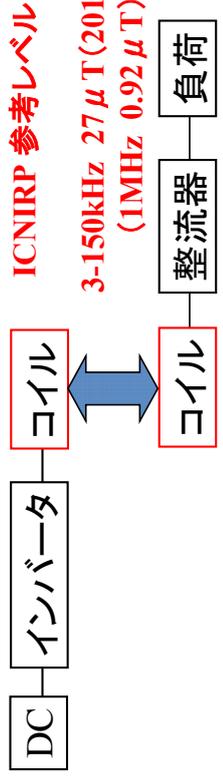


電磁誘導方式も低結合領域へ

電磁誘導方式

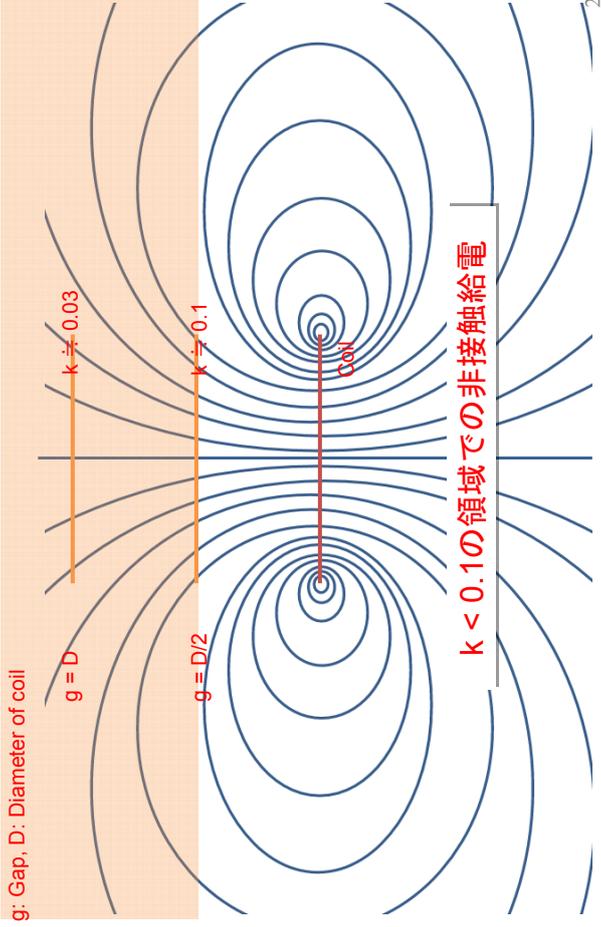
- ・高結合の変圧器構造から
- 低結合の共振器構造へ

ヒトが介在すれば....



ICNIRP 参考レベル
3-150kHz 27μT (2010改)
(1MHz 0.92μT)

課題: 重量、(伝送距離)



基本は

フレアデーの電磁誘導則

- ・高結合の変圧器構造から
- 低結合の共振器構造へ



力率補償
位置ずれ補償

電磁誘導

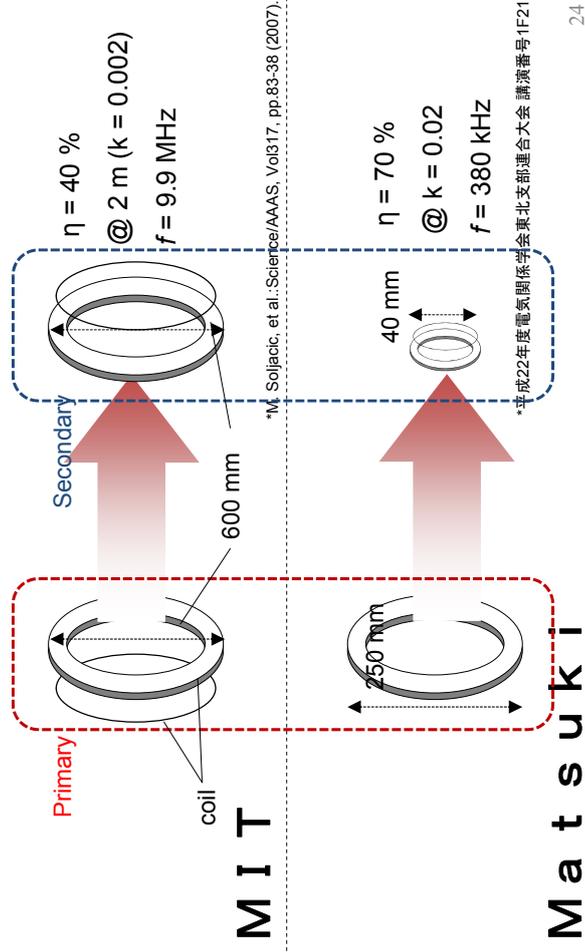
変圧器的(強結合)

積極的共振

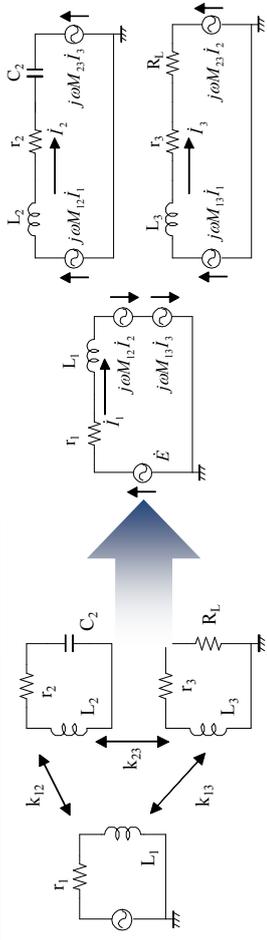
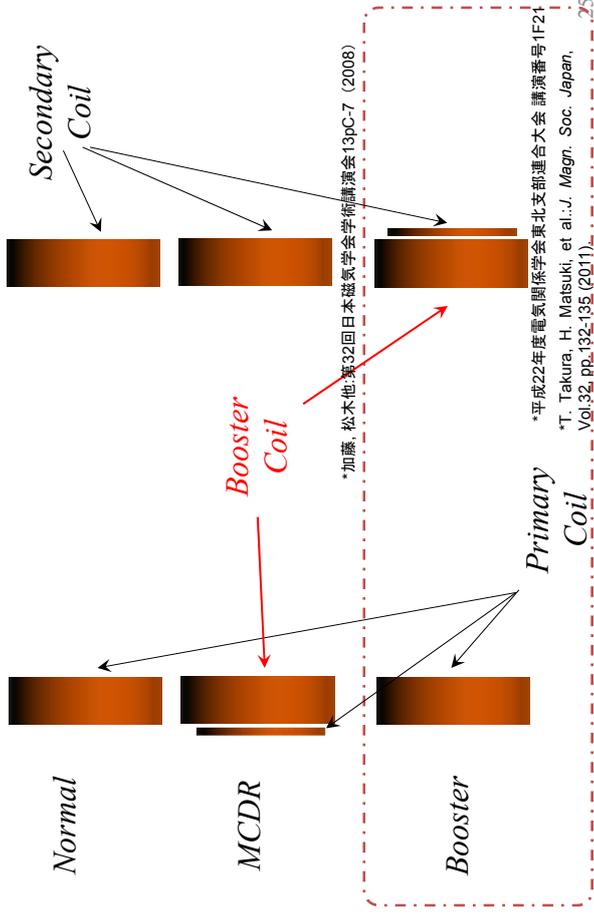
LCブースター(弱結合)²²

高Q、波長依存なし

参考



Mat s u k i



相互インダクタンスを電圧源と考えることにより電気回路を變形

【近似 $M_{12}, M_{23} \gg M_{13}$ 】

$$\eta = \frac{1}{2(1+\alpha+\beta) + \sqrt{(1+\alpha)(1+\beta)} + \alpha + \beta + \left(\frac{1+\alpha}{1+\beta}\right) Q_2^2}$$

$$R_L = r_1 \sqrt{\frac{1+\beta}{1+\alpha}}$$

・・・最大効率

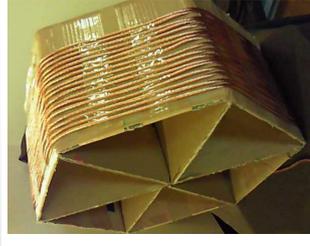
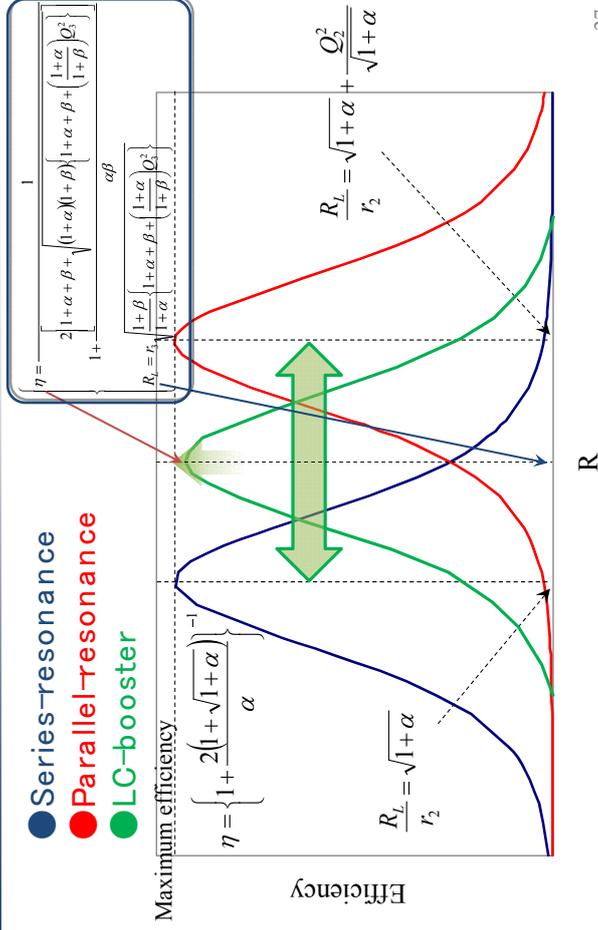
・・・最適負荷

$$\alpha = k_{12}^2 Q_2 Q_3$$

$$\beta = k_{23}^2 Q_2 Q_3$$

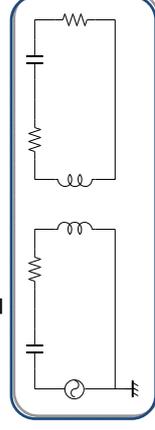
Quality factor of coils: Q_2, Q_3

*平成22年度電気関係学会東北支部連合大会 講演番号1F21
*T. Takura, H. Matsuki, et al.: J. Magn. Soc. Japan, Vol.35, pp.132-135 (2011), 26

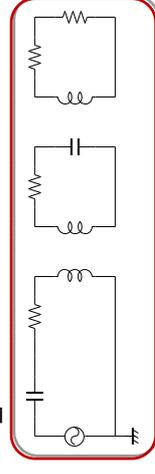


Type	ソレノイド
D_o [mm]	600
Number of Turns	17
Litz Wire (a [mm]) / Number of Strands	0.1 / 1120
Frequency range [kHz]	301

二次直列_Ver.



LC_Ver.



電球負荷による効率比較

*田倉, 佐藤, 松本, 自動車技術会2012年春季大会 4-12, ワイヤレス給電技術, 16

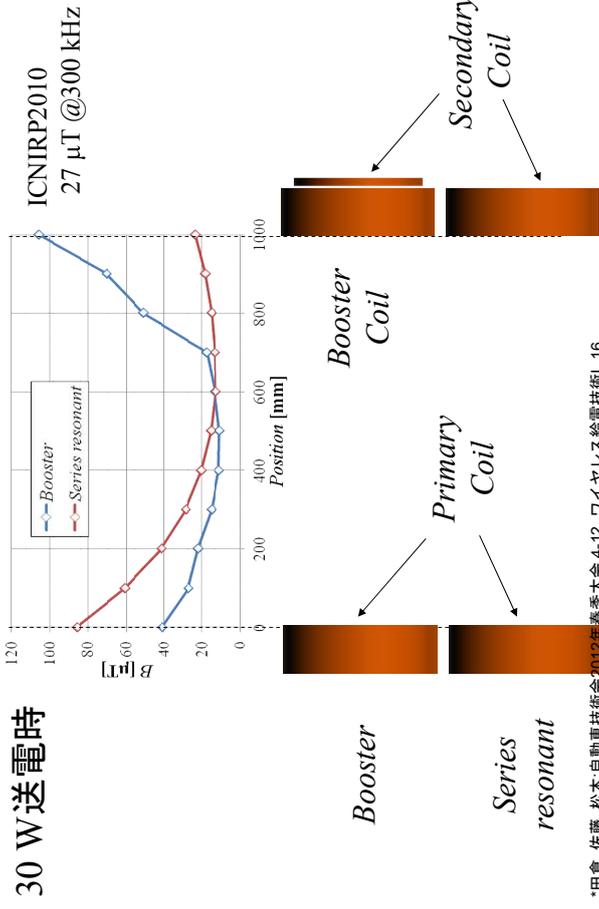
二次直列Ver. (Gap: 1 m)



29



コイル間磁束密度分布

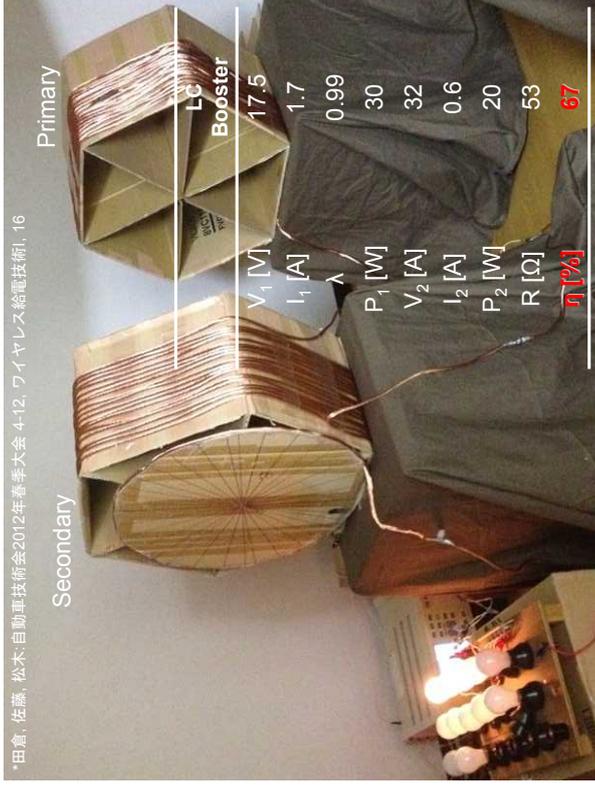


*田倉, 佐藤, 松本:自動車技術会2012年春季大会 4-12, ワイヤレス給電技術, 16

31



LC Ver. (Gap: 1 m)



30



まとめ

