

電源ノイズの低減に関する 理論的考察

—ノイズを物理にする—

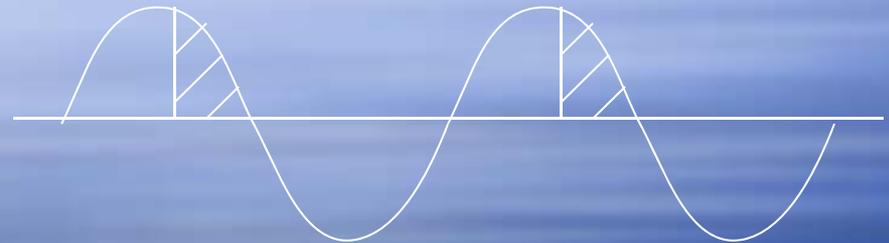
土岐博(RCNP/Osaka)

佐藤健次(NIRS/Chiba)

直流で大電力の電源

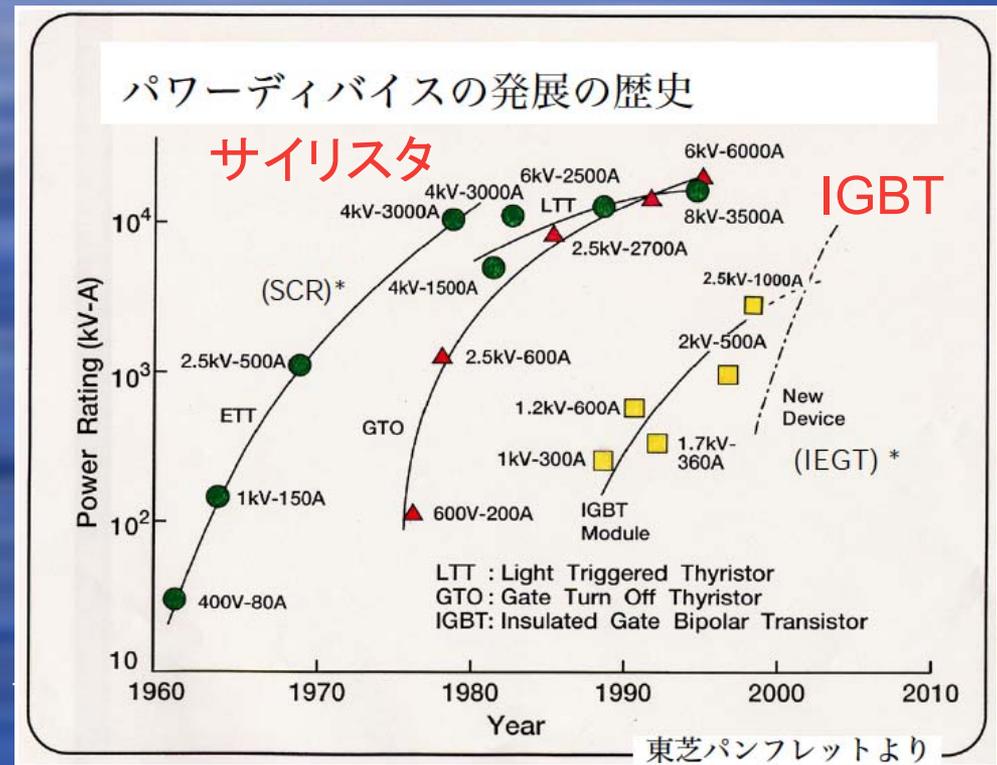
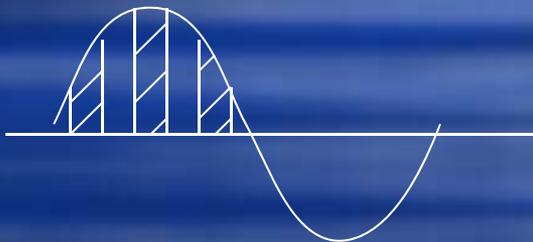
◆ サイリスタ電源

無効電力が大きい



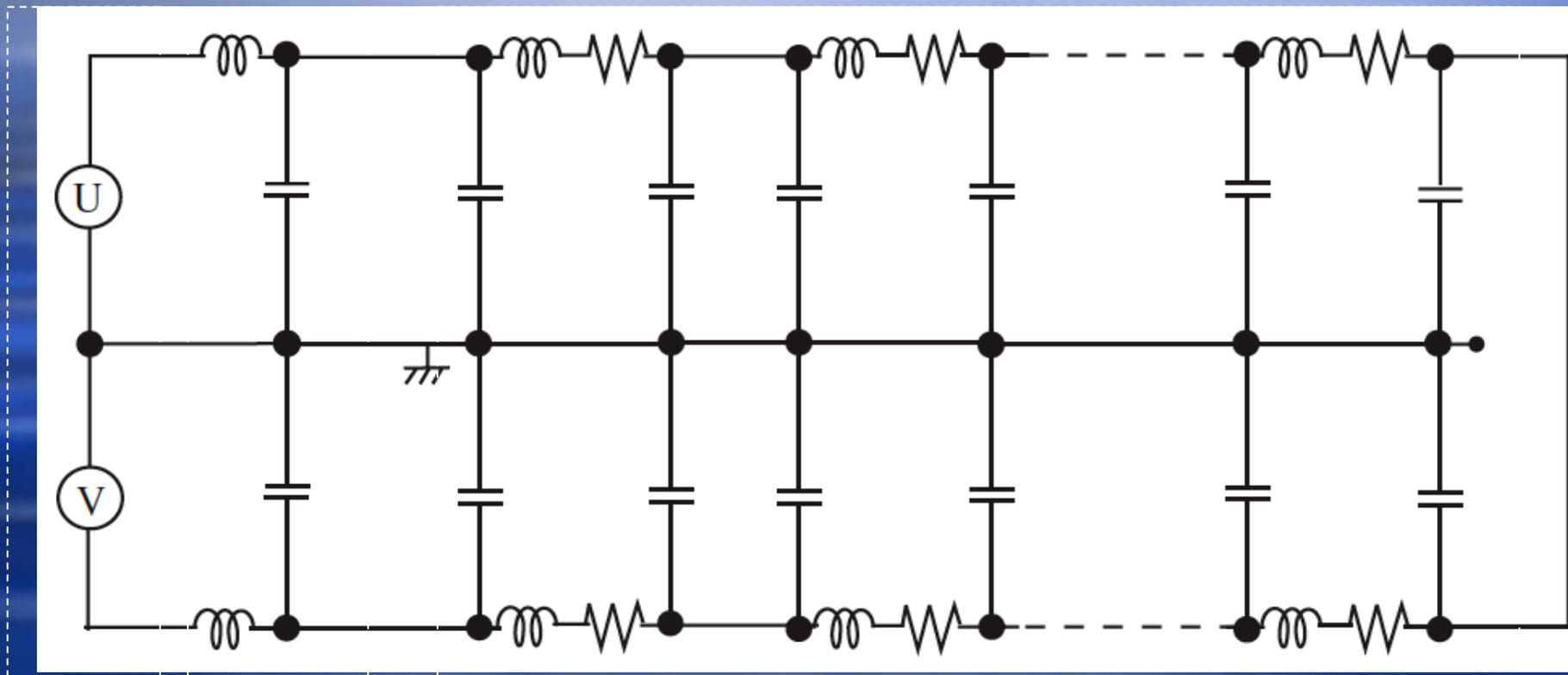
◆ IGBT電源

高周波ノイズ



HIMAC方式(佐藤電源加速器回路)

対称にすれば良い



電源

ノイズフィルター

磁石(負荷)

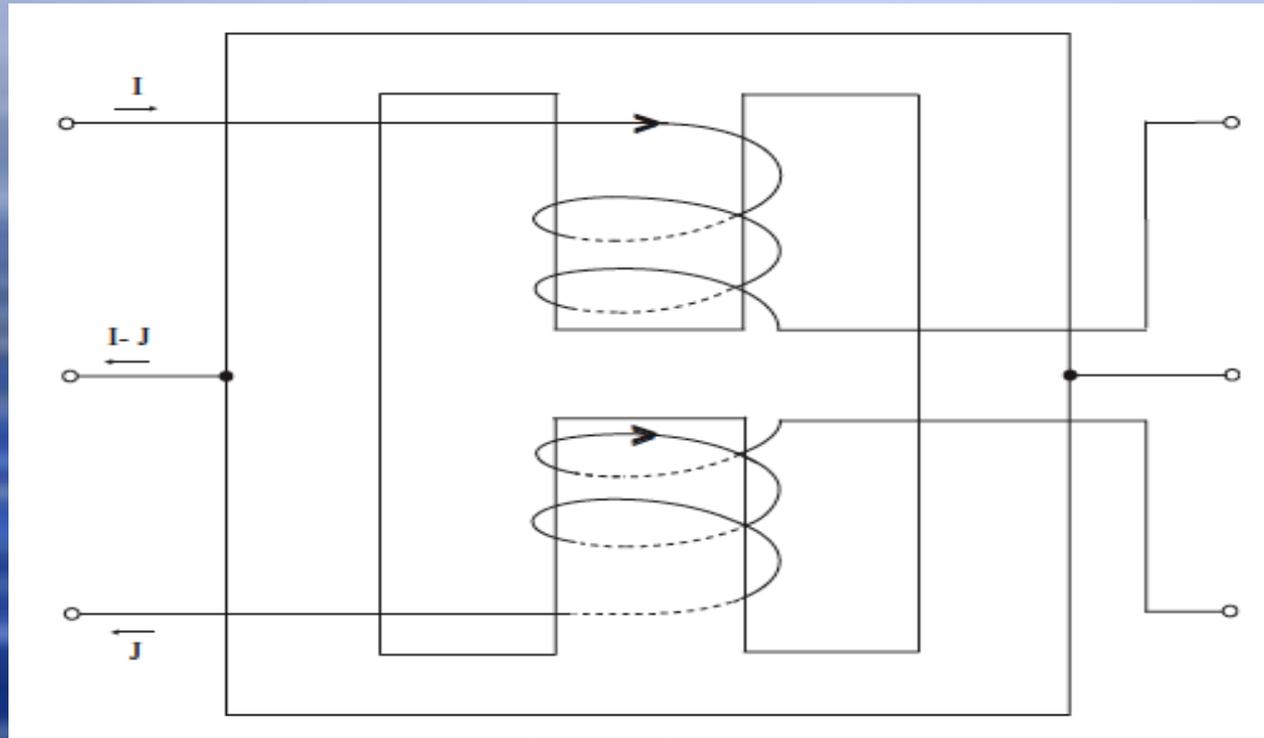
$10^{-5} \sim 10^{-6}$

2009/8/18

toki@icnp

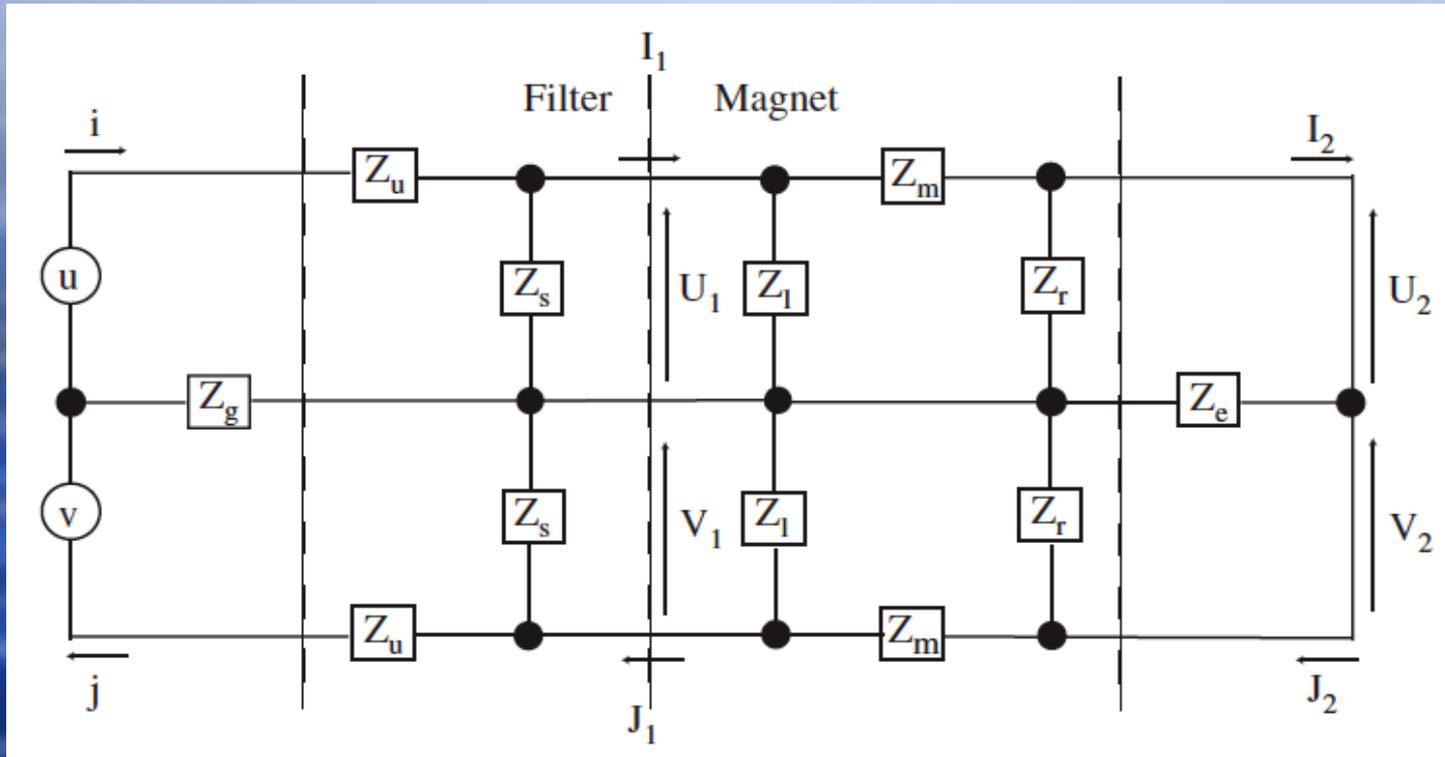
3

ノーマルモード($I+J$)のみの電流を使った磁石



コモンモード($I-J$)を使わない

何故，佐藤電源回路は良いのか

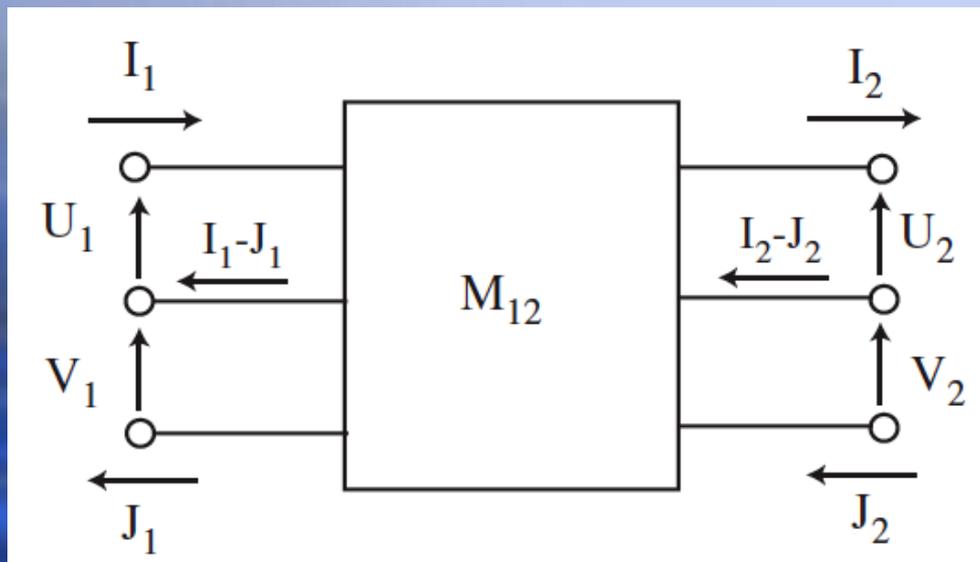


- ・対称性は何を意味するか
- ・中心線は何を意味するか
- ・電源の中心点は何を意味するか

$$U_2 = V_2 = 0$$

対称集中回路理論

K.Sato and H.Toki, NIM A565 (2006) 351



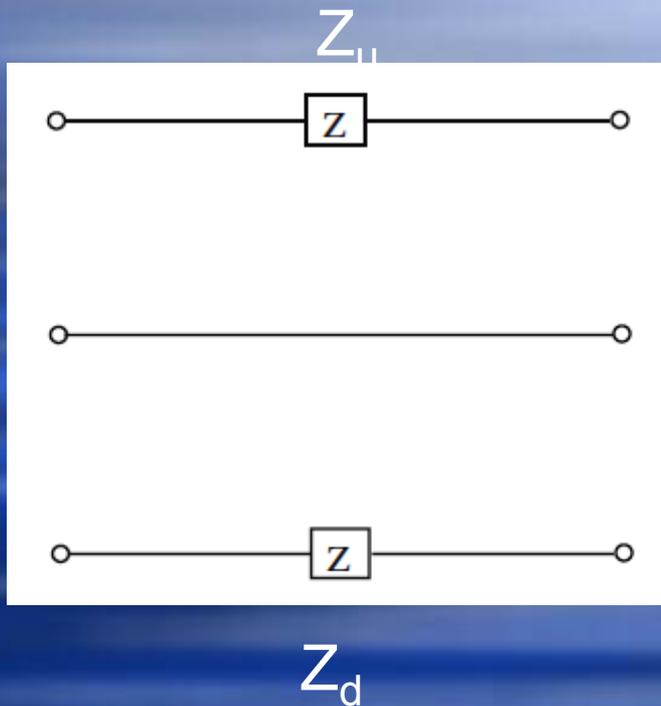
$$\begin{pmatrix} U_1 \\ V_1 \\ I_1 \\ J_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ V_2 \\ I_2 \\ J_2 \end{pmatrix}.$$

和の量: ノーマルモード (使う部分)

差の量: コモンモード (使わない部分) - 悪の根源

$$\begin{pmatrix} U_1 + V_1 \\ I_1 + J_1 \\ U_1 - V_1 \\ I_1 - J_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 + V_2 \\ I_2 + J_2 \\ U_2 - V_2 \\ I_2 - J_2 \end{pmatrix}.$$

非対称の場合はノーマルモードと コモンモードが結合



$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & (Z_u + Z_d)/2 & 0 & (Z_u - Z_d)/2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & (Z_u - Z_d)/2 & 1 & (Z_u + Z_d)/2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$Z_u = Z_d$ の時は非対角要素は0

佐藤電源回路を簡単に計算出来る (2x2の行列の計算)

- ◆ 負荷を**対称の位置に配置**する
- ◆ 電源の**中点に中心線を繋ぐ**ことで**コモンモード**の流れを確保する
- ◆ フィルターは**ノーマルモード**にも**コモンモード**にも同じように働く

$$U_1 + V_1 \sim (1 - \omega^2 CL)^{-1} (u + v) \quad \text{ノーマルモード}$$

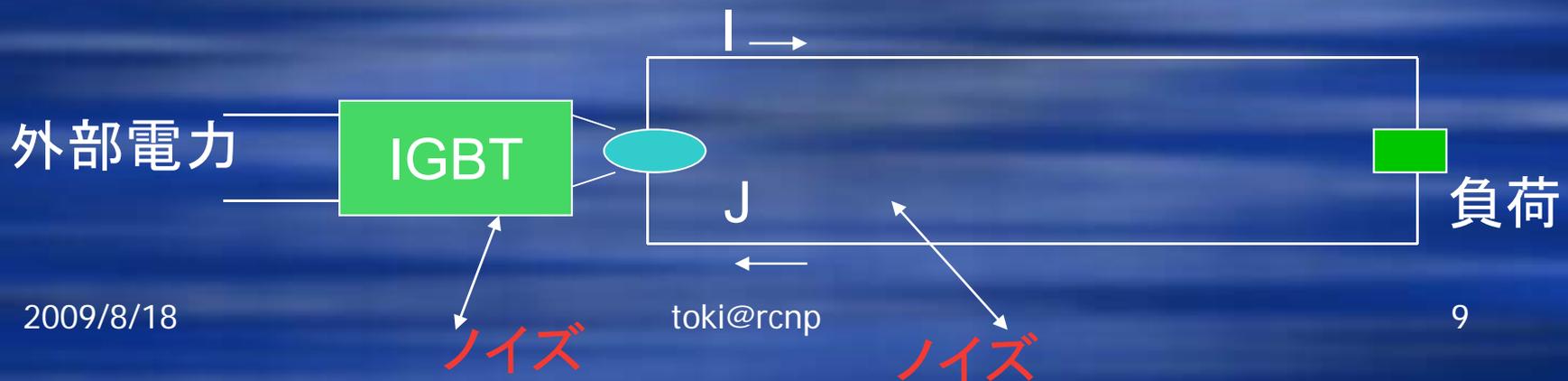
$$U_1 - V_1 \sim (1 - \omega^2 CL)^{-1} (u - v) \quad \text{コモンモード}$$

- ◆ **何故、佐藤回路がベストなのかは不明**
- ◆ **何故、わざわざ三本線にするのかは不明**

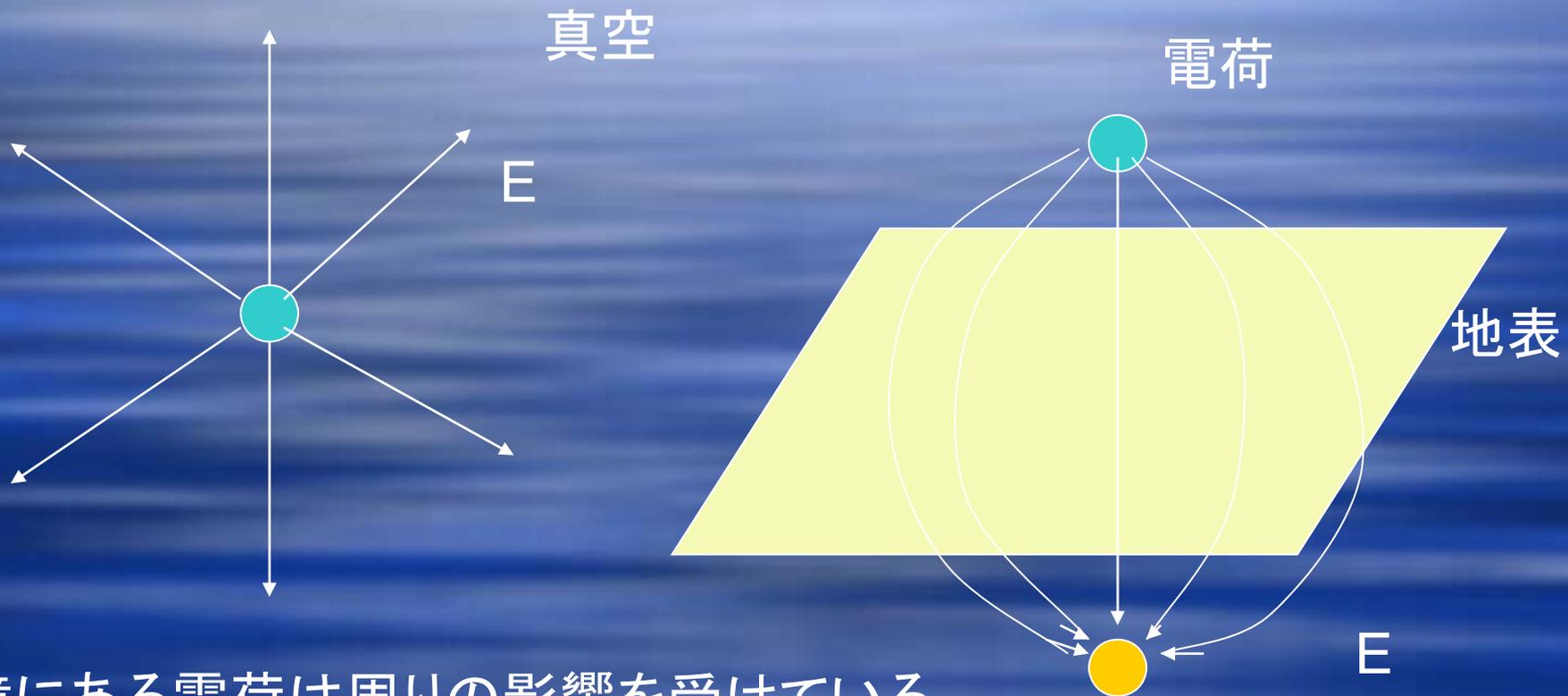
伝送理論の構築(ノイズを物理にする)

- ◆ J-PARCの電磁ノイズは何が原因なのか
- ◆ IGBTは高周波ノイズを発生する
- ◆ どこから電磁ノイズが発生するのか
- ◆ IGBT電源を加速器で使うにはどうするのか
- ◆ 電磁ノイズのない環境の構築はできるのか
- ◆ ○○○

コモンモードが存在する？



環境にある電荷



環境にある電荷は周りの影響を受けている

'最も' 簡単な回路



3 導体伝送線路理論



静電容量 C C.R. Paul 'Multiconductor transmission-line theory' 連続方程式

$$Q_i(x, t) = \sum_j^N C_{ij} V_j(x, t)$$

$$\frac{\partial I_i(x, t)}{\partial x} = - \sum_j^N C_{ij} \frac{\partial V_j(x, t)}{\partial t}$$

インダクタンス L

ファラデーの法則

$$\Phi_i(x, t) = \sum_j^N L_{ij} I_j(x, t)$$

$$\frac{\partial V_i(x, t)}{\partial x} = - \sum_j^N L_{ij} \frac{\partial I_j(x, t)}{\partial t}$$

ノーマルモードとコモンモード

$$\frac{\partial V_i(x, t)}{\partial t} = - \sum_j^N P_{ij} \frac{\partial I_j(x, t)}{\partial x}$$

電位係数 P $P = C^{-1}$

ノーマルモード

$$V_n = V_1 - V_2$$

$$I_n = \frac{1}{2}(I_1 - I_2)$$

コモンモード

$$V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) - V_3$$

$$I_c = I_1 + I_2 = -I_3$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial t} - \frac{\partial V_2}{\partial t} = -(P_{11} - P_{21}) \frac{\partial I_1}{\partial x} - (P_{12} - P_{22}) \frac{\partial I_2}{\partial x} - (P_{13} - P_{23}) \frac{\partial I_3}{\partial x}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial t} - \frac{\partial V_2}{\partial t} &= -\frac{1}{2}((P_{11} - P_{21}) - (P_{12} - P_{22})) \frac{\partial(I_1 - I_2)}{\partial x} \\ &\quad -\frac{1}{2}((P_{11} - P_{21}) + (P_{12} - P_{22})) \frac{\partial(I_1 + I_2)}{\partial x} + (P_{13} - P_{23}) \frac{\partial(I_1 + I_2)}{\partial x} \end{aligned}$$

新しい伝送線路理論で分ったこと

- ◆ **伝送線の信号は電磁波で伝わる**
- ◆ 伝送線はアンテナ(送信)でありレシーバー(受信)である
- ◆ **コモンモードは環境と結合する**
- ◆ 地表に誘導起電力を生じる
- ◆ 環境にあるあらゆる電荷・電流とカップルする
- ◆ これが電磁ノイズとなる
- ◆ このノイズのフィードバックで自らもノイズを拾う

ノイズの原因

コモンモードは悪の根源



$I \neq J$

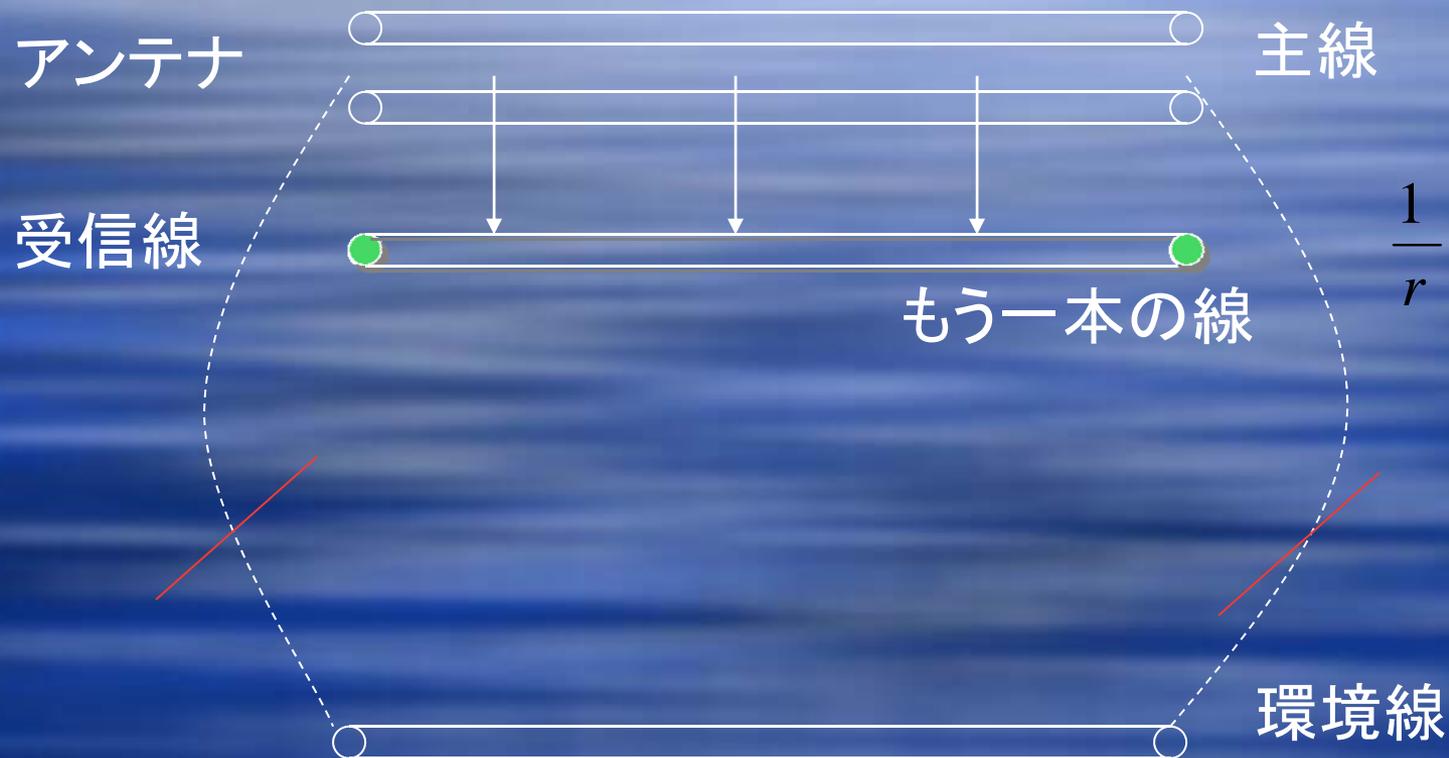


周辺の回路



映像線を流れる

もう一本の伝導線路を挿入する



それではいかにして電磁ノイズを無くすか

- ◆ 3本目の線を電源と繋いでいる2本の線のすぐ近くに持っていく
- ◆ 3本目の線との間でコモンモードはほぼ閉じる
- ◆ 3本目の線を回路の中の中心線として取り扱う
- ◆ 3本目の線は主たる2本線で発生するコモンモード電流を流す

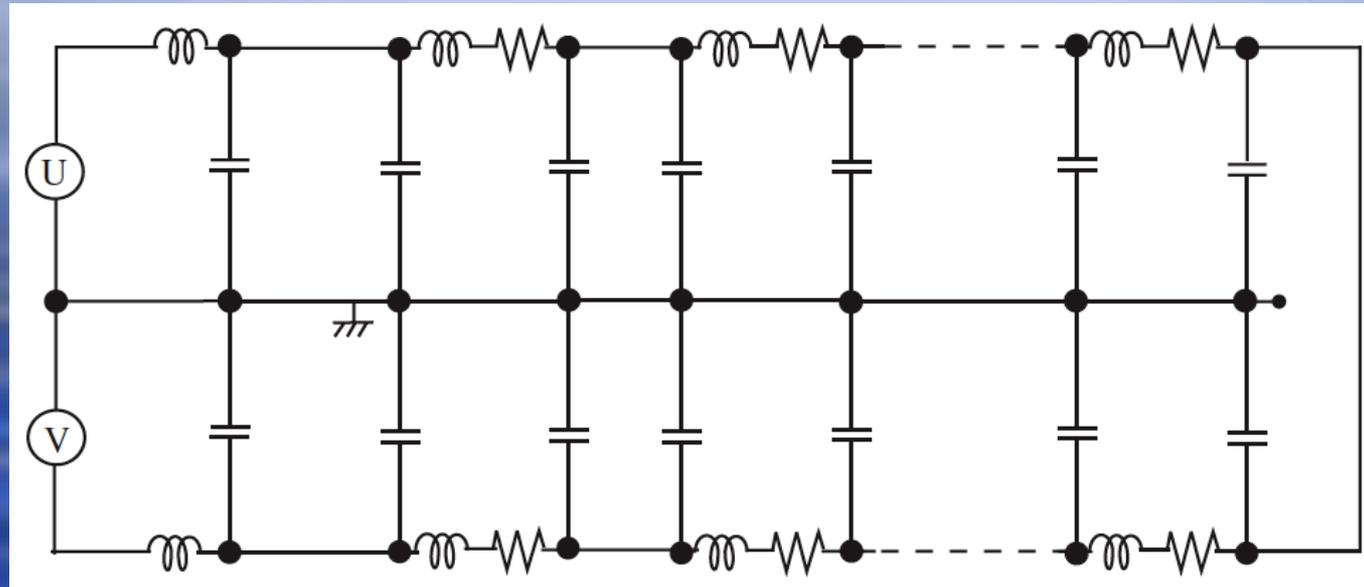
電磁波を回路内に閉じ込める



そして負荷を対称の位置に配置する (コモンモードとノーマルモードの結合を切る)

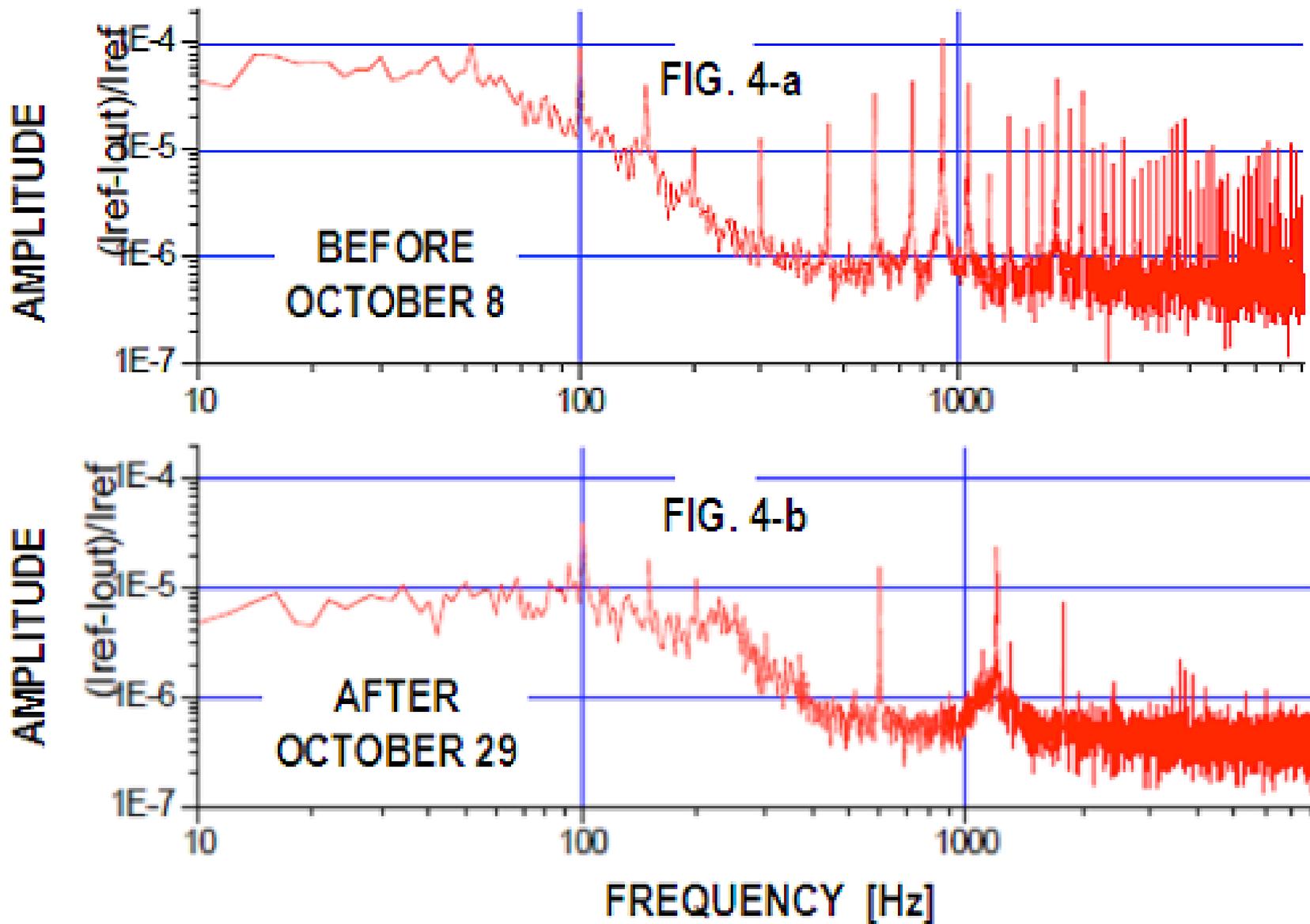
高周波成分を小さい空間に閉じ込めるためにフィルターを付ける

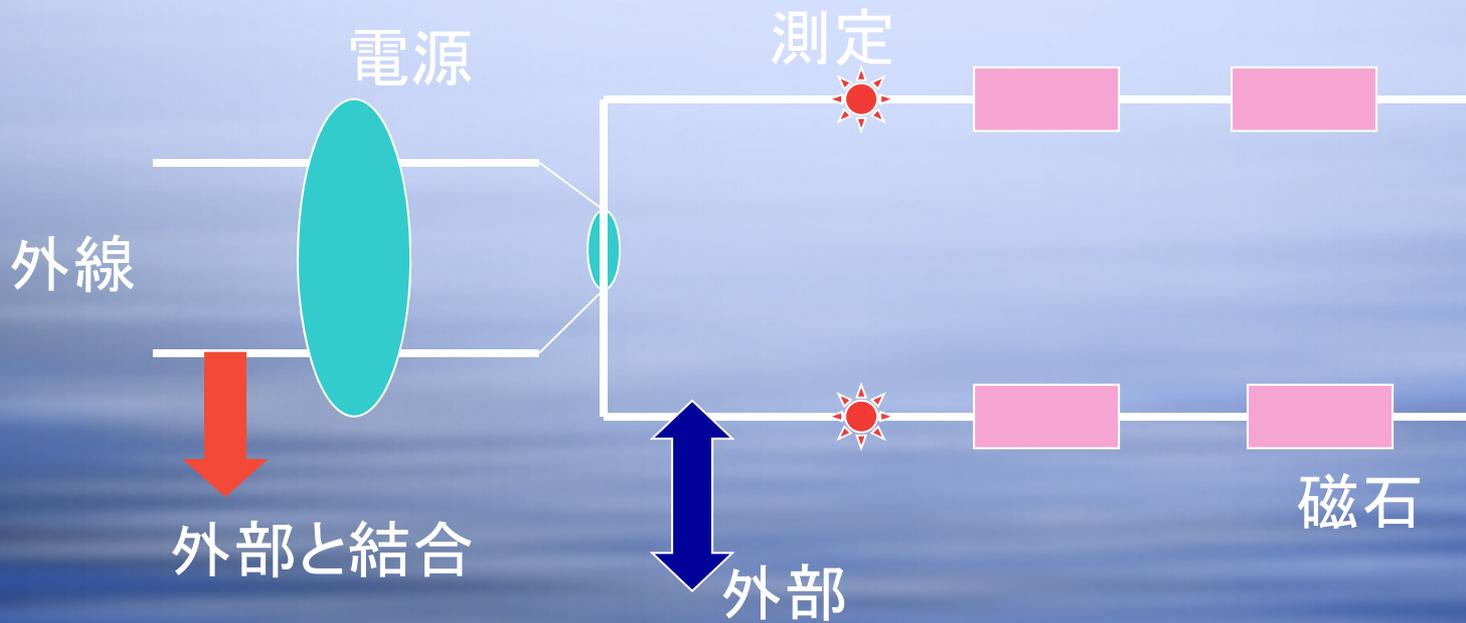
理想的な回路(佐藤回路)



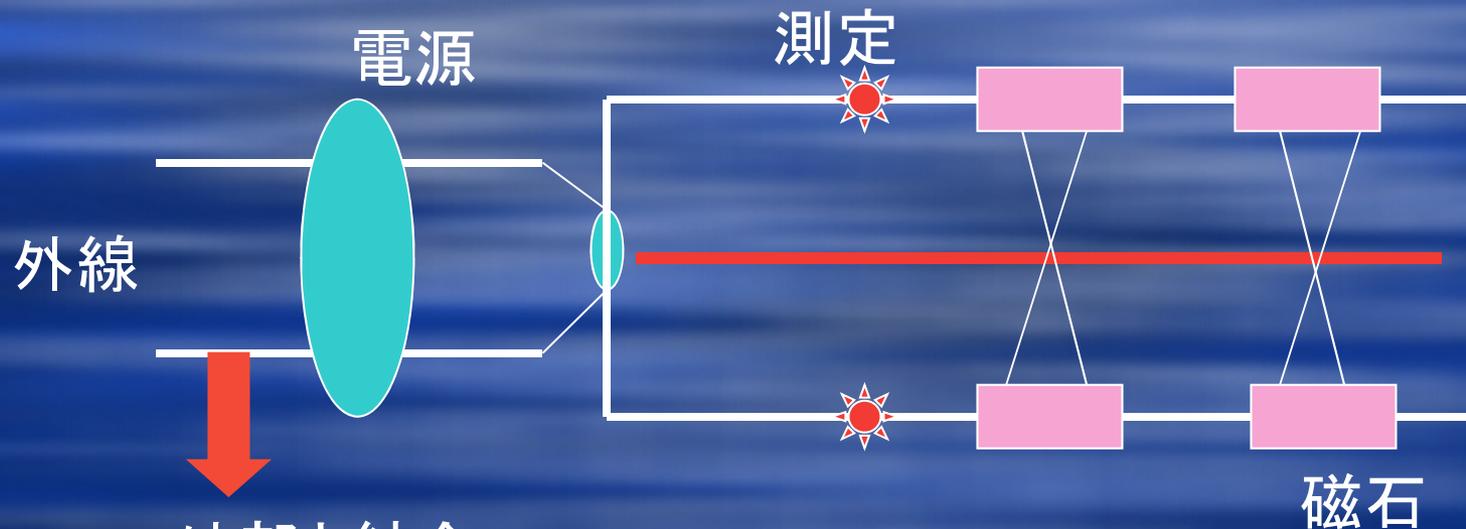
中心線を入れることでコモンモードがこの線と結合して回路が閉じる
負荷等を上下対称の位置に入れることによりコモンモードが独立する
フィルターを電源の近くに入れて高周波ノイズを閉じ込める

J-PARCでの対称化前と対称化後のノイズレベルの比較





改良前



対称化

神の線



結論

- ◆ **3導体伝送線路理論を完成させた**
- ◆ 偏微分方程式の係数の全てを**電位係数**を使って計算した(Cでは計算出来ずPが重要であることに気がついた)
- ◆ 2本線回路は**必ず**環境線と結合する
- ◆ 3本めの線(神の線)が回路を閉じ、他の世界との結合を切る。
- ◆ その上で自らの高周波ノイズをコントロールする

