

LC型電圧制御発振器のQ値に 対するレイアウト時の寄生成分 の影響についての検討

◎山口 達也, 村上 壘, 岡田 健一, 松澤 昭

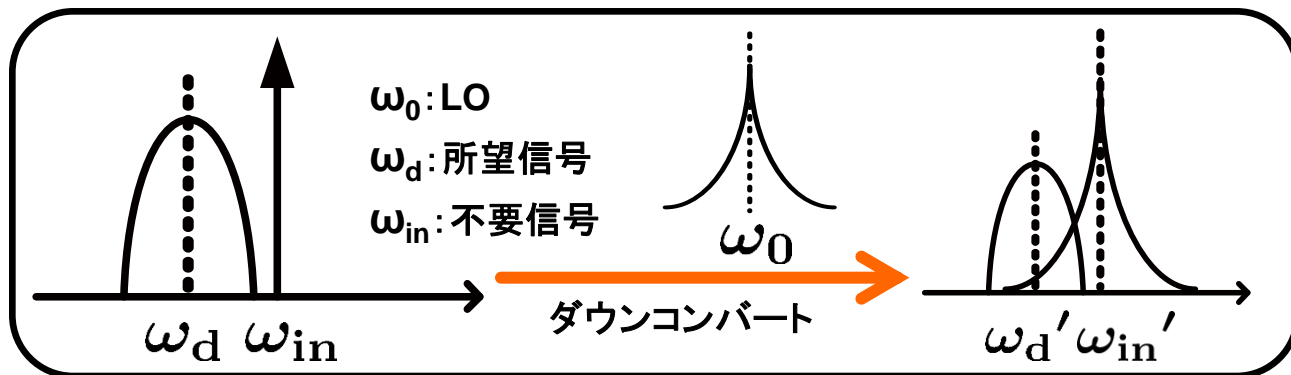
東京工業大学 大学院理工学研究科

- 背景・目的
- レイアウトによる寄生成分を考慮した等価回路のモデリングおよびそのQ値の解析手法
- 解析結果
- まとめ・今後の課題

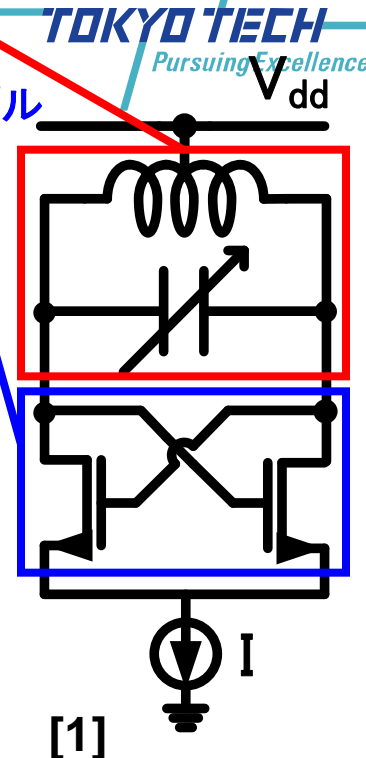
LC-VCOに求められる性能

位相雑音 [dBc/Hz]

- 1[Hz] あたりの信号電力に対する雑音電力の比



LC共振器
クロスカップル
トランジスタ



$$\mathcal{L}(\Delta f) = 10 \log_{10} \left[\frac{2kT}{P_{sig}} \left(\frac{f_0}{2Q_{tank} \Delta f} \right)^2 \right]$$

位相雑音

k: ボルツマン定数

P_{sig}: 出力電力

Q_{tank}: LC共振器のQ値

T: 絶対温度

f₀: 発振周波数

Δf: オフセット周波数

[1] Ali Hajimiri, et al.,
IEEE JSSC, Feb. 1998.

LC共振器のQ値を大きくすることで
位相雑音特性が改善できる

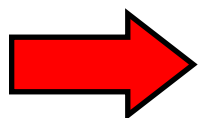
- **FoM (Figure of Merit) [dBc/Hz]**

- 位相雑音特性を発振周波数、消費電力で規格化
- 共振器のQ値を用いて立式できる

$$FoM = 10 \log_{10} \left(\frac{10^3 \pi F k T}{4Q^2} \right) [2]$$

[2] P. Kinget, et al.,
Kluwer, 1999.

F:ノイズファクター k [J·K⁻¹]:ボルツマン定数 T [K]:絶対温度 Q:共振器のQ値



共振器のQ値を大きくすることで
FoMの小さな発振器が実現可能

- ✗ 高周波における誘電体損、表皮効果など
- ✗ オンチップインダクタのQ値の限界

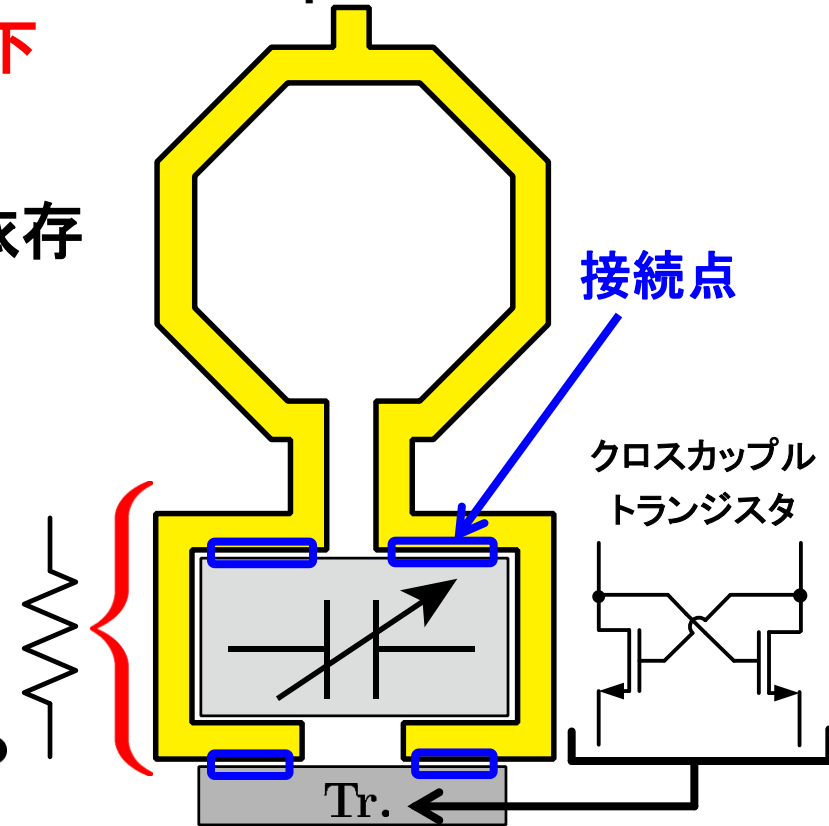
LC共振器のQ値をできるだけ大きくすることが
LC-VCO設計のキーポイント

- 配線長が大きくなる部分で寄生抵抗 R_p がつく
 - これにより共振器のQ値が低下
 - 位相雑音特性、FoMの悪化
 - R_p のつく位置はレイアウトに依存

◇ LC-VCOのレイアウトパターン

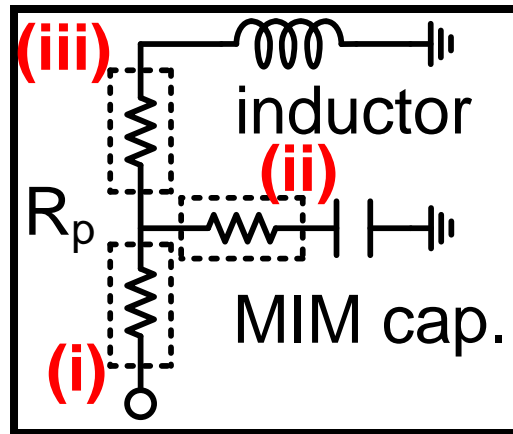
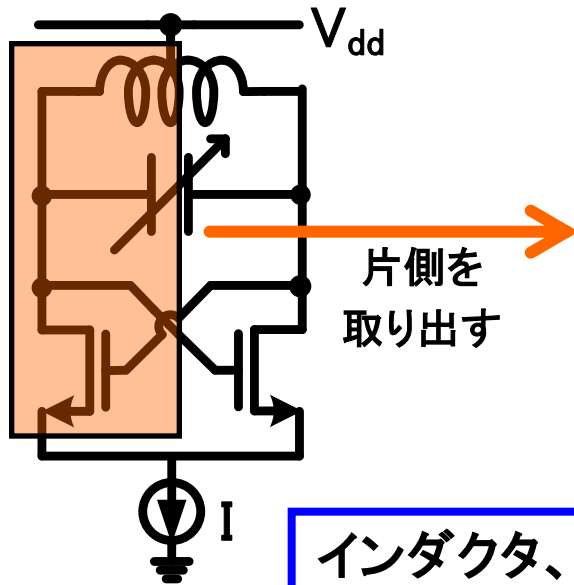
- インダクタの直近に容量
- インダクタの直近にトランジスタ
- 容量の直近にトランジスタ

寄生抵抗 R_p



レイアウトによって異なる
「寄生成分がQ値に与える影響」を定量的に評価

レイアウトを考慮した等価回路モデル

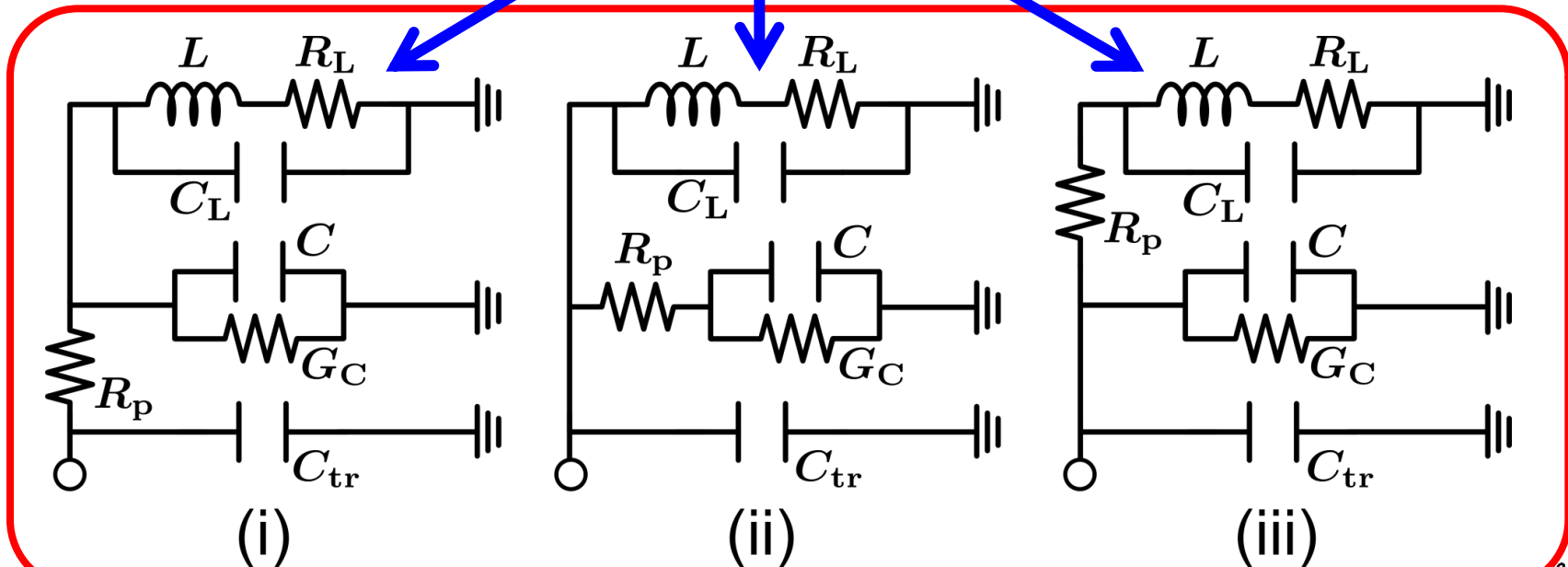


◇ レイアウトパターン

- (i) Lの直近にC
- (ii) Lの直近にTr.
- (iii) Cの直近にTr.

R_pの付く位置がレイアウトによって変化

インダクタ、容量、トランジスタでの寄生成分を織り込む

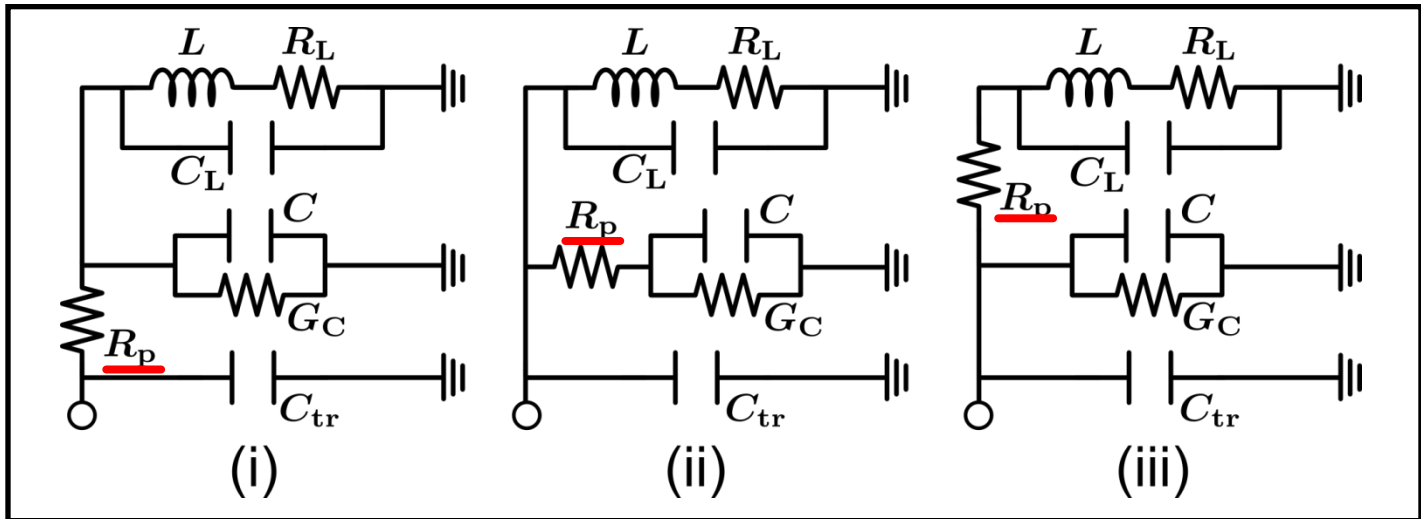
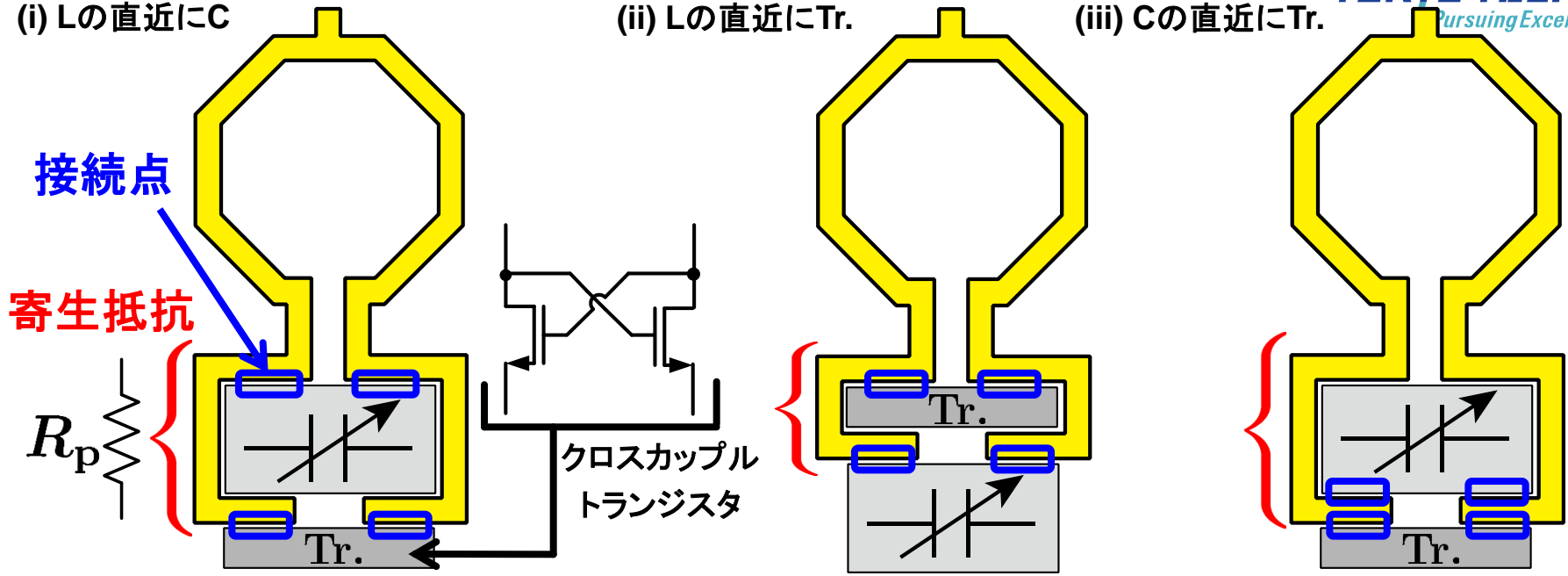


レイアウト概略と等価回路モデル

(i) Lの直近にC

(ii) Lの直近にTr.

(iii) Cの直近にTr.



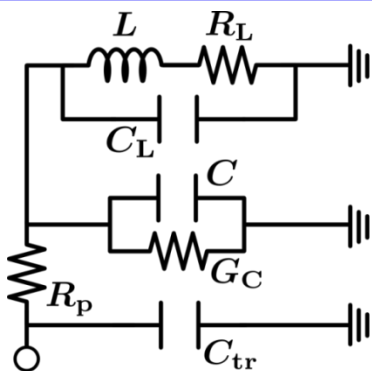
- 等価回路モデルに対し、Q値を2通りの方法で求める

・ 数式的な解析 (Q^{calc})

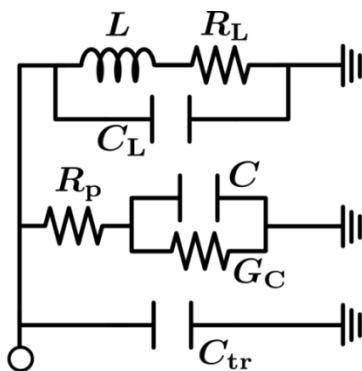
$$\begin{cases} Q^{\text{calc}} &= \frac{Q_L \cdot Q_C}{Q_L + Q_C} \\ Q_L &= \frac{\omega L}{R_L} \end{cases}$$

・ シミュレーション (Q^{PDK})

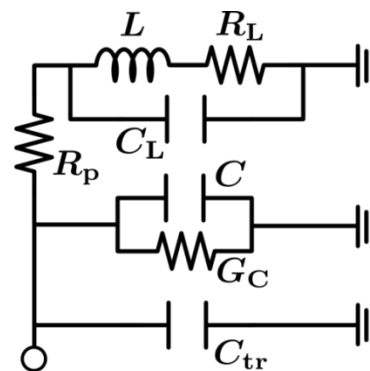
$$Q^{\text{PDK}} = \frac{\omega}{2} \left| \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \quad [3]$$



(i)



(ii)

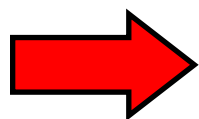


(iii)

[3] T.Ohira, et al.,
IEEE TCAS-II,
Dec. 2005.

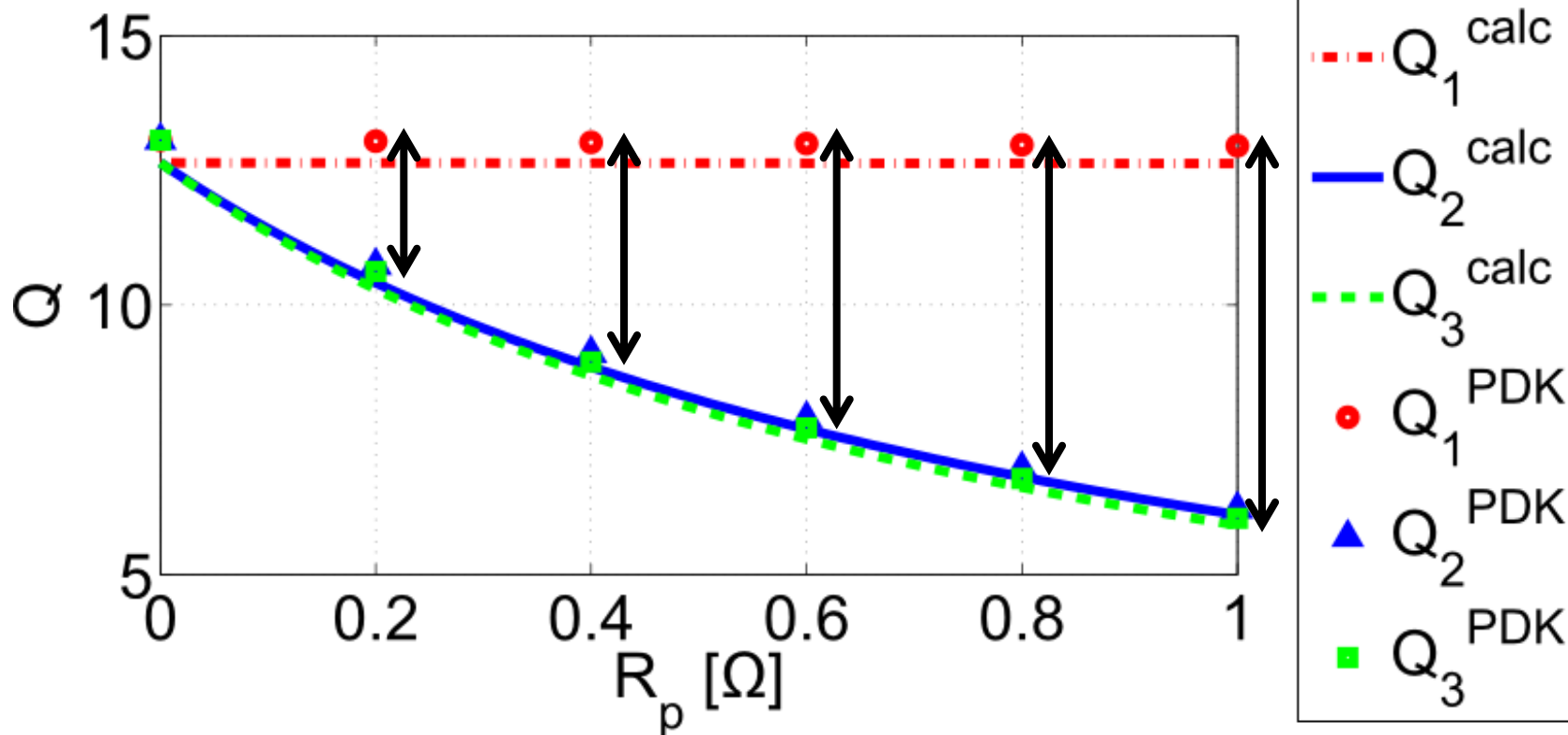
発振周波数を
5[GHz]と想定

パラメータ	L [pH]	R_L [Ω]	C_L [fF]	C [pF]	G_c [S]	C_{tr} [fF]
値	165	0.65	18.0	1.29	0.002	40



R_p の変化に対するQ値の変化をみる

寄生抵抗成分 R_p によるQ値の変化



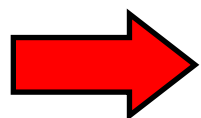
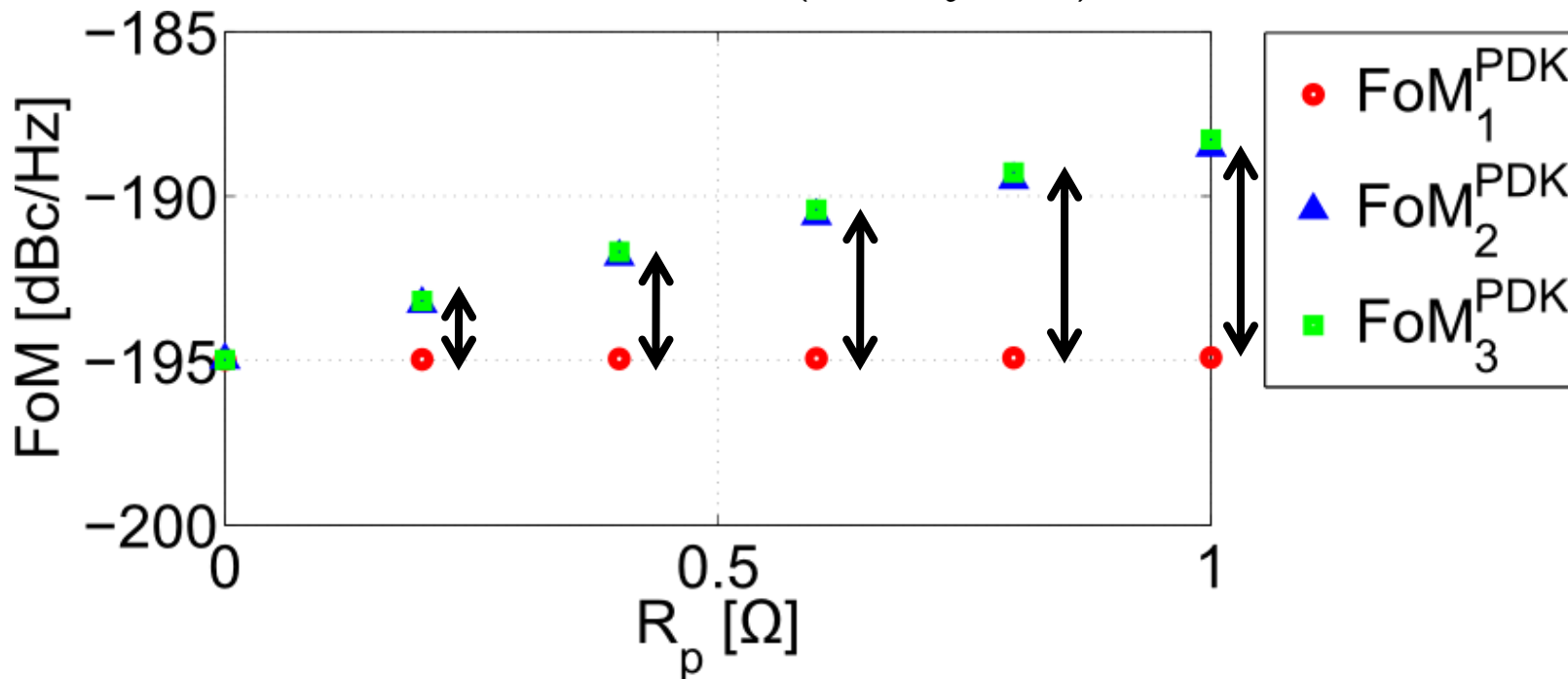
レイアウト(i)のモデルで最もQ値が大きい

Q値の差 約 2.4 @ $R_p=0.2[\Omega]$

約 4.0 @ $R_p=0.4[\Omega]$

寄生抵抗成分 R_p によるFoMの変化

$$FoM = 10 \log_{10} \left(\frac{10^3 \pi F k T}{4Q^2} \right)$$



FoMの差 約 **1.7[dBc/Hz]** @ $R_p=0.2[\Omega]$

約 **3.1[dBc/Hz]** @ $R_p=0.4[\Omega]$

→ 消費電力換算で約半分の差

- LC-VCOのレイアウトにおいて、配線長が大きくなることに起因する寄生抵抗成分がQ値に与える影響について検討
- 考えられる3種類のレイアウトのうち、インダクタの直近に容量を配するレイアウトが最もQ値を大きくすることを計算および回路シミュレーションから定量的に示した

- **等価回路モデルの精度向上**
 - レイアウトによる寄生インダクタ成分、容量成分
 - より高精度に各要素を等価回路モデル化

- **寄生成分がQ値以外に与える影響**
 - 発振周波数
 - 周波数の可変範囲 など

