

# 小型携帯機器用 DC-DC インダクタに関する研究

井浦 博男\* 片原 義浩\* 浜谷 剛\* 山田 義樹\* 吉野 武美\*\* 天城 和哉\*\* 星野 公明\*\*

A Study on an Inductor used for DC-DC Converter Circuit

IURA Hiroo\*, KATAHARA Yoshihiro\*, HAMAYA Takeshi\*, YAMADA Yoshiki\*,  
YOSHINO Takemi\*\*, AMAKI Kazuya\*\* and HOSHINO Kimiaki\*\*

## 抄 録

小型携帯機器用 DC-DC コンバータ回路に搭載されるインダクタの小型化を目的として開発を行う。

まず、インダクタの特性について電磁気学的考察を行った。磁気抵抗がインダクタの特性に関与しており、その値はコアの形状やギャップ幅に影響されることが理論的に説明できた。また、電磁界シミュレーションソフト (JMAG-Studio Ver7.2 (株)日本総研製) を用いてインダクタンス値を求めたところ、実測値とほぼ一致した。次に、コア形状やギャップ幅を変えたとき、インダクタンス値と直流重畳特性について解析した。試作することなくインダクタを評価できるので、シミュレーションは有効に活用できる。

## 1 緒言

携帯電話やデジタルカメラ等の小型携帯機器の電源部(図 1)には、DC-DC コンバータが使われており、昇圧・降圧用にインダクタが用いられている。近年これら機器の急速な普及により、使用されるインダクタの数量も飛躍的に増えている。また一方では、これらの機器は小型軽量化が進んでおり、インダクタについても必然的に小型・薄型化・高性能商品の開発が期待されている。

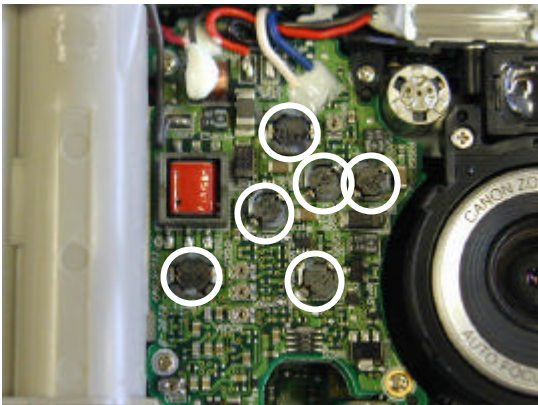


図 1. デジタルカメラに搭載されたインダクタ

本研究は、インダクタの小型・薄型化及び特性の向上を目的とし、インダクタの研究と製品開発を行った。その際に、設計開発を効率的に進めるために電磁界解析シミュレーションソフト JMAG-Studio Ver7.2(株)日本総研製を用いた。

ここでは、  
インダクタの電磁気学的考察  
シミュレーションを使った特性評価  
について報告する。

## 2 インダクタについて

まず、インダクタについて、その物理的構造と電氣的・電磁気学的特性について述べる。

### 2.1 インダクタの構造

インダクタは、大きく分類して、磁束が外部に漏れない閉磁路タイプと、磁束が外に漏れる開磁路タイプとに分けることができる。閉磁路タイプのインダクタには、さまざまな構造のものがあるが、主に図 2(a) のようにドラム型コアと、図 2(b) のポット型コアが用いられる。なお、図はインダクタの断面を表している。

\*新デンシ株式会社新潟工場

\*\*研究開発センター

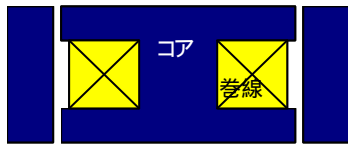


図 2(a). ドラム型インダクタ

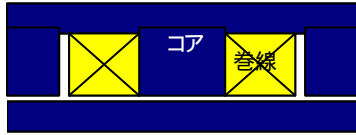


図 2(b). ポット型インダクタ

## 2.2 磁気回路について

図 3 のように、磁性体を満たした環状ソレノイドの巻線に  $I$  [A] の電流を流したとき、巻線内の磁界の強さ  $H$  [A/m]、及び磁性体内の磁束密度  $B$  [T] については、次式の関係が成立する。

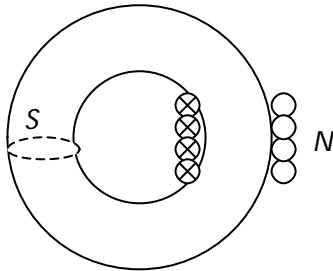


図 3 .環状ソレノイド

$$H = NI/l \quad (1)$$

$$B = \mu_s \mu_0 H \quad (2)$$

ただし、 $l$ : 磁路長[m]

$\mu_s$ : 比透磁率[H/m]

$\mu_0$ : 真空の透磁率[H/m]

$\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  [H/m]

磁性体の断面積を  $S$  [m<sup>2</sup>] とすると、磁束  $\Phi$  [Wb] は次式となる。

$$\Phi = BS = \mu_s \mu_0 \frac{NI}{l} S \quad (3)$$

(3) の  $NI$  を起磁力  $F$  [AT]、 $1/\mu_s$  を磁気抵抗  $R_m$  [AT/Wb] と名づける。

$$F = NI \quad (4)$$

$$R_m = l/\mu_s S \quad (5)$$

(4)、(5)より、

$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad (6)$$

となる。

この関係は、電気回路のオームの法則と似ており、磁気回路のオームの法則と呼ばれる。

表 1 にその関係をまとめる。

表 1. 磁気回路と電気回路

磁気回路		電気回路	
起磁力	$F=NI$ [A]	起電力	$E$ [V]
磁束	[Wb]	電流	$I$ [A]
磁気抵抗	$R_m=l/\mu_s S$ [AT/Wb]	電気抵抗	$R= l/S$ [ ]
透磁率	$\mu$ [H/m]	導電率	$=1/ [1/ m]$
磁気回路のオームの法則	$=F/R_m =NI/R_m$ [Wb]	電気回路のオームの法則	$I=E/R$ [A]
磁束密度	$B=\mu H$		

## 2.3 自己インダクタンス

コイルに電流  $I$  [A] を流したときに発生する磁束鎖交数  $\Phi$  [Wb] は次式となる。

$$\Phi = LI \quad (7)$$

この比例定数  $L$  をコイルの自己インダクタンスといい、単位は[H](=[Wb/A])である。

また、コイルの巻数を  $N$  とすると、磁束鎖交数  $\Phi$  [Wb] と磁束  $\Phi$  [Wb] は次の関係がある。

$$\Phi = N\phi \quad (8)$$

(3)(5)(7)(8)式をまとめると、

$$L = \frac{N^2 \mu_s \mu_0 S}{l} \quad (9)$$

となり、 $L$  は磁気抵抗  $R_m$  に反比例、巻数  $N$  の 2 乗に比例することがわかる。ここで、

$$AL = 1/R_m \quad (10)$$

で表される  $AL$  値は、コイルの性能を表すひとつの指標である。

また、(3)(9)式から電流  $I$  [A] との関係を求めると、

$$I = \frac{N\Phi}{L} = \frac{NBS}{L} \quad (11)$$

となる。インダクタの飽和電流  $I_{sat}$  は、コアの飽和磁束密度  $B_{sat}$  とすると、

$$I_{sat} = \frac{NB_{sat}S}{L} \quad (12)$$

となる。

## 2.4 インダクタの磁気回路考察

インダクタを設計する際には、磁束の流れを考慮する必要がある。図4のようなポット型コアを用いたインダクタの場合、巻線に電流を流すと矢印のように磁束が生じる。

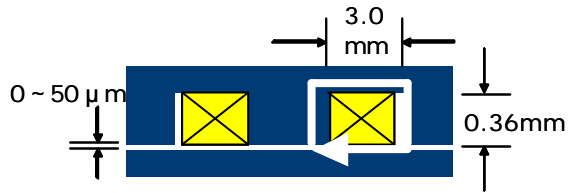


図4. ポット型インダクタ

このとき、フェライトコアの部分と空気層のギャップがあるので、磁気回路は等価的に図5のように表すことができる。

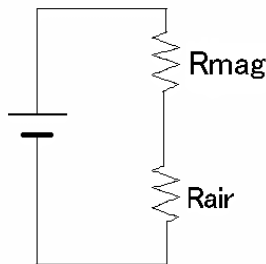


図5. 磁気回路

(5)式より、この場合Rmは、

$$R_m = R_{mag} + R_{air} \quad (13)$$

$$= \frac{1}{\mu_0 S} \left( \frac{l_{mag}}{\mu_r} + \frac{l_{air}}{\mu_{air}} \right)$$

ただし、Rmag: 磁性材料部の磁気抵抗

Rair: ギャップ部の磁気抵抗

l<sub>mag</sub>: 磁性材料部の磁路長

l<sub>air</sub>: ギャップ部の磁路長

μ<sub>r</sub>: 磁性材の透磁率

μ<sub>air</sub>: 空気の透磁率

となる。

## 2.5 インダクタの特性評価

インダクタの特性評価項目は、インダクタンス値、直流抵抗、定格電流である。定格電流は、

直流重畳特性と温度上昇特性により決定される。

直流重畳特性は、インダクタに直流電流を徐々に加え、ある電流値を超えると、磁気飽和によりインダクタンス値が小さくなる現象である。また、温度上昇特性はインダクタに直流電流を徐々に加えると、損失による自己発熱により、温度が上昇する現象である。一般的に、インダクタンス値の減少が-30%、あるいは温度上昇が40%となる電流値のうち、小さいほうの値を定格電流としている。

図6は直流重畳特性と温度上昇特性を測定した結果の例である。直流電流が約1Aでインダクタンス値の減少が-30%となり、約1.5Aで温度上昇が40%となっている。この場合の定格電流は、小さい方の値である1Aとなる。

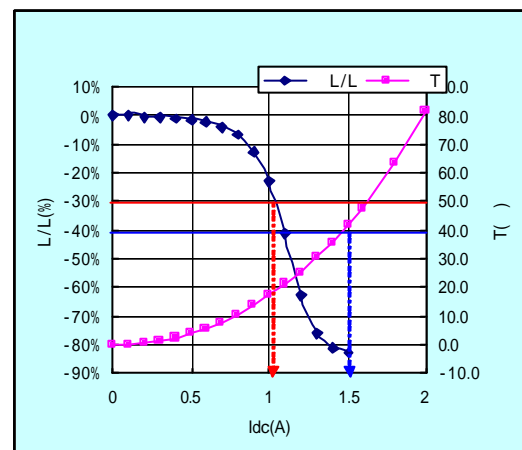


図6. 直流重畳特性と温度上昇特性

## 3 電磁界シミュレーション

インダクタのシミュレーションには、JMAG-Studio Ver7.2 (株)日本総研製)を使用した。DC-DCコンバータ用インダクタの評価で、JMAGでシミュレーションできる項目は、

- ・インダクタンス値
- ・直流重畳特性

である。

### 3.1 インダクタンス値

SR5018 シリーズを例にとり、インダクタンス値のシミュレーションを行った。同じ形状のコアを用い、巻数を変えることによりインダクタンス値を調整する。表2の巻数が端数になっているのは、巻き始めと巻き終わりが反対方向にあるためである。シミュレーションでは、端数の巻数は設定できないので、繰り上げた数値に設定した。図7はシミュレーション結果、コイル断面の磁束密度の表示で、色の違いにより磁束密度の強弱を表している。結果を表2と図8に示す。

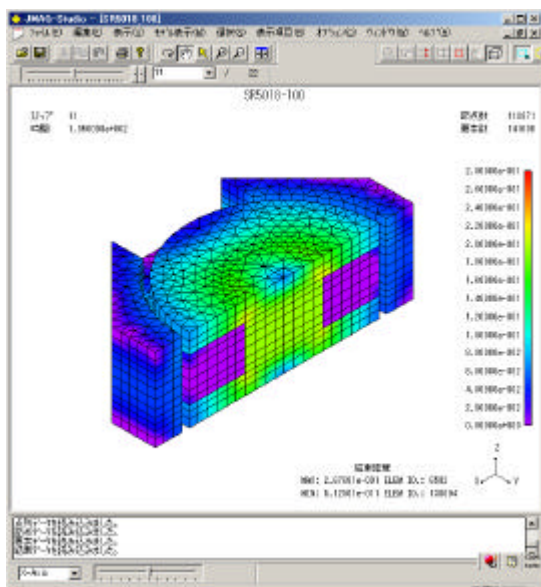


図7. シミュレーション結果の表示  
(磁束密度)

表2. シミュレーションと実測

MODEL	巻数 (t)	インダクタンス (μH)		
		設計	実測	シミュレーション
SR5018-2R2	7.5	2.2	1.99	1.95
SR5018-3R3	9.5	3.3	2.98	3.05
SR5018-4R7	11.5	4.7	4.68	4.39
SR5018-6R8	13.5	6.8	6.59	5.98
SR5018-100	16.5	10.0	10.50	8.82
SR5018-150	21.5	15.0	16.23	14.76
SR5018-220	24.5	22.0	21.24	19.06
SR5018-330	31.5	33.0	31.10	31.24

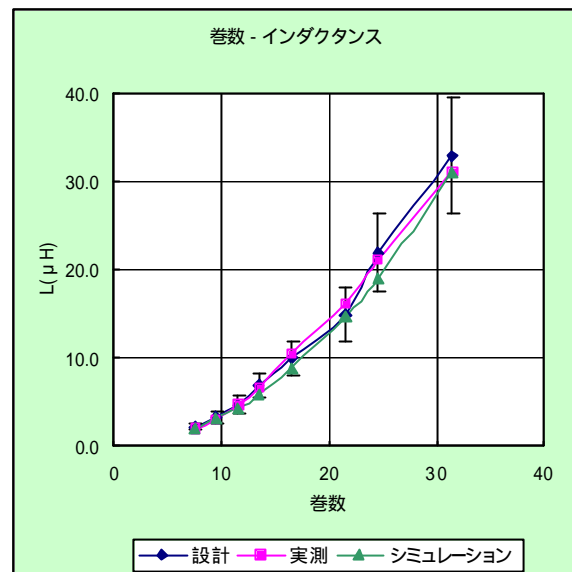


図8. シミュレーションと実測

結果を見ると、シミュレーション値は実測値と近い値となっている。また、インダクタの製品規格である設計値の±20%の範囲に入っており、JMAGが精度良くシミュレーションできていることがわかる。

### 3.2 コア形状とインダクタンス値

次に、コアの形状(芯径、巻線幅)を変えたとき、インダクタンス値がどのように変化するか、シミュレーションを行った。図9の寸法のコアで、芯径を1.5mm~2.5mmに変えたとき(巻線幅は0.3mm一定)、巻線幅を0.2~0.4mmに変えたとき(芯径は2.0mm一定)、それぞれのインダクタンス値をJMAGで求めた。

解析した結果、芯径とインダクタンス値の関係を図10(a)に、巻線幅とインダクタンス値の関係を図10(b)に示す。

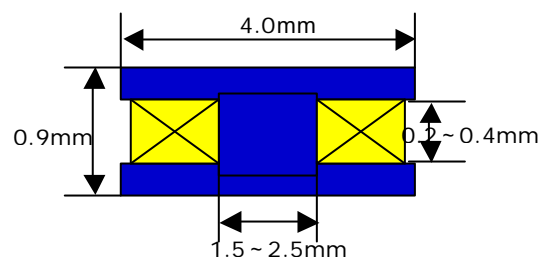


図9. コア形状とインダクタンス値

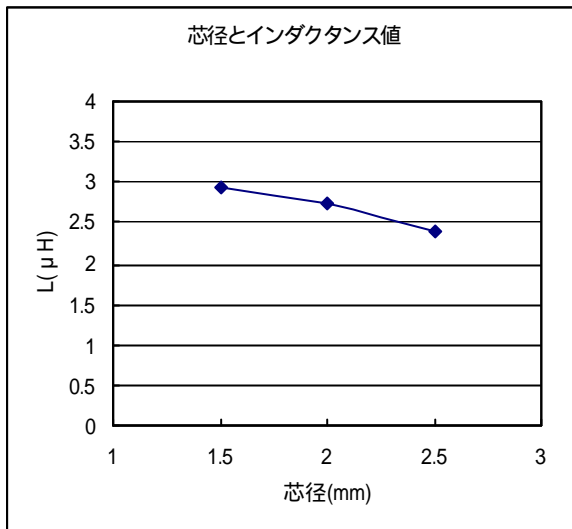


図 10(a). 芯径とインダクタンス値

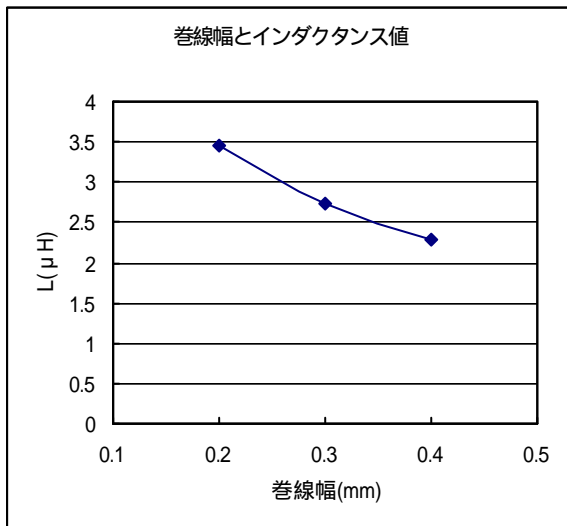


図 10(b). 巻線幅とインダクタンス値

グラフを見ると、芯径が大きくなると、また巻線幅が広がると、インダクタンス値が小さくなるのがわかる。

### 3.3 コア形状と直流重畳特性

図 9 の形状のインダクタについて、3.2 と同様に芯径を変えた場合、巻線幅を変えた場合について、直流重畳特性がどの様になるかシミュレーションを行った。なお、インダクタンス値については、約 10 μH となるような巻数設定とした。

解析した結果、芯径と直流重畳特性の関係を

図 11(a) に、巻線幅と直流重畳特性の関係を図 11(b) に示す。

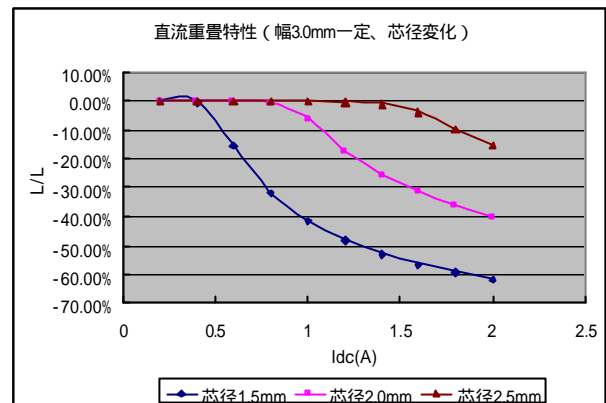


図 11(a). 芯径- 直流重畳特性

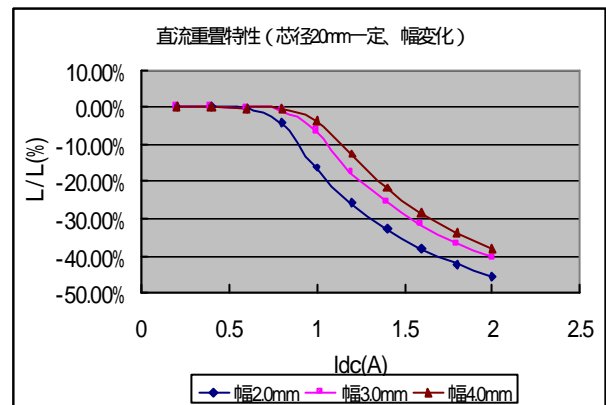


図 11(b). 巻線幅- 直流重畳特性

図 11(a)を見ると、芯径が大きくなるにつれて、電流増加によるインダクタンス値の減少 ( L/L) が小さくなる、すなわち、直流重畳特性が良くなることが分かる。また、図 11(b)を見ると、巻線幅が大きくなるにつれて、直流重畳特性が良くなることが分かる。

これは、芯径が小さいと、また、巻線幅が狭いと、コアに磁束密度が集中し易い部分ができ、その部分が磁気飽和を起こすことが原因であることが、シミュレーション結果の磁束密度表示より判明した。

しかし、3.2 の解析結果から、芯径が大きくなると、また、巻線幅が広がるとインダクタンス値が小さくなるので、所定のインダクタンス値を得るには巻数を増やさなければならず、直流抵抗の増加をまねくこととなる。

### 3.4 コアギャップと直流重畳特性

コアギャップと直流重畳特性について、シミュレーションを行った。図 12 のポット型インダクタについて、ギャップを 0~50  $\mu\text{m}$  に変えたとき、直流重畳特性がどの様になるかシミュレーションを行った。なお、インダクタンス値については、約 10  $\mu\text{H}$  となるような巻数設定とした。

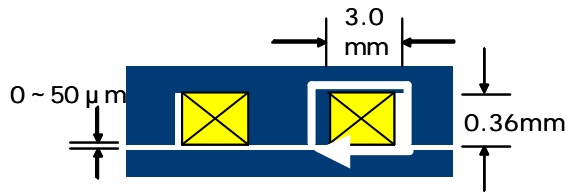


図 12. ポット型インダクタ

図 13 にシミュレーション結果を示す。ギャップが広くなるにつれて、電流増加によるインダクタンス値の減少 ( $L/L$ ) が小さくなる、すなわち、直流重畳特性が良くなることが分かる。

これは、ギャップの狭い方が磁気抵抗は小さくなり、少ない電流でも磁気飽和が起きてしまうからである。逆に言うと、ギャップが広いほうが磁気抵抗は大きくなり、磁気飽和を起こすまでには、大きな電流を必要とするためである。このことは、シミュレーションの磁束密度表示からも確認できた。

しかし、磁気抵抗が大きくなるとインダクタンス値が小さくなるので、所定のインダクタンス値を得るには巻数を増やさなければならず、直流抵抗の増加をまねくこととなる。

### 4 結言

- (1) インダクタについて磁気回路的に考察を行い、形状・ギャップがその特性に大きく影響していることを理論的に説明できた。
- (2) JMAG によりインダクタンス値を求めることができ、その値は実測値とよく一致した。
- (3) JMAG から求めた磁気抵抗値は、理論式から計算した磁気抵抗とよく一致した。
- (4) 芯径が大きくなるとインダクタンス値は小さくなるが、直流重畳特性は良くなる。
- (5) 巻線幅が広がるとインダクタンス値は小さくなるが、直流重畳特性は良くなる。
- (6) ギャップが大きくなるとインダクタンス値は小さくなるが、直流重畳特性は良くなる。
- (7) JMAG を活用することで、インダクタの特性を評価することができる。しかし、設計の際には、JMAG ではシミュレーションできない抵抗値、温度上昇特性、機械的強度等を考慮する必要がある。

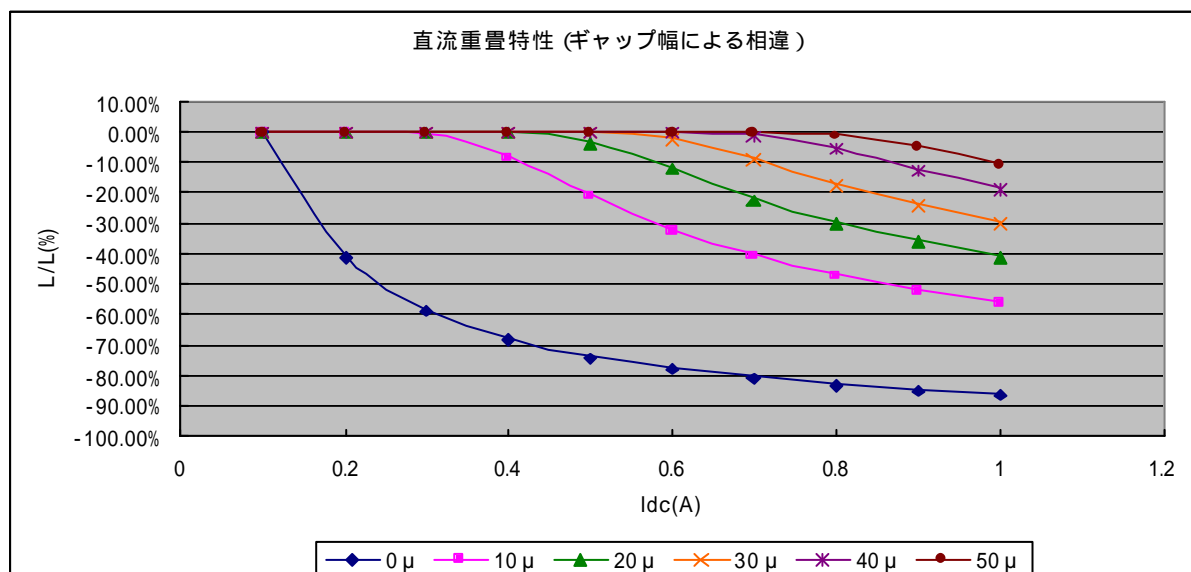


図 13. ギャップ-直流重畳特性