

新リニアソレノイド駆動ICの開発

Development of Linear Solenoid Driver IC

坂井 雄大 *Takehiro Sakai*
岡原 章雄 *Akio Okahara*
山川 靖弘 *Yasuhiro Yamakawa*
藤本 正彦 *Masahiko Fujimoto*



要 旨

近年、自動車の安全性，低燃費，低公害化に対する社会的意識の高まりから、カーエレクトロニクスの分野は急速に発達している。このような背景の中で、変速ショックが少ないオートマチック用トランスミッション，可変吸（排）気バルブの展開により、リニアソレノイド制御回路の採用が飛躍的に増加することが予想される。このニーズに応えるため、新リニアソレノイド駆動ICを開発した。

本ICではBCDプロセスを採用し、高機能なリニアソレノイド制御回路の1チップ化を実現した。同時に回路の部品点数，実装面積，コストを大幅削減し、生産性を向上させた。

Abstract

Recent demands for cars that is driving safely, low fuel consumption, low emission, and driving comfort have been drawing furnishing of electronic devices for automobile application. We developed a linear solenoid driver IC which can control shock-free automatic transmissions and variable timing valve systems to match such demands.

We have developed the ASIC with BCD process (Bipolar, CMOS, DMOS mixed process) and it cuts down number of components, work board size and cost, and increases the productivity simultaneously.

1. はじめに

今後、変速ショックが少ないオートマチック用トランスミッション、可変吸（排）気バルブの展開により、リニアソレノイド制御回路の採用が飛躍的に増加し、1 ECUあたり、3～4回路搭載が大部分になる。このような背景の中で、生産性の向上、高機能を実現するために、新リニアソレノイド駆動ICを開発した。

現行のカスタムICでは、ECU（電子制御ユニット）での調整が1回路あたり2箇所必要となり、製造のタクト時間に多大な影響を与えている。

そこで、本ICではチップ上でトリミングを実施し、ECUでの無調整化を実現した。また、BCDプロセスの採用により、ICの外付け部品点数、実装面積、システム価格を大幅削減した。

2. リニアソレノイドの概要

2.1 リニアソレノイド

図-1がリニアソレノイドと呼ばれるものであり、制御電流コネクタ、コイル、プランジャー等で構成されている。そして、制御電流に応じて油圧をリニアに制御することができる。

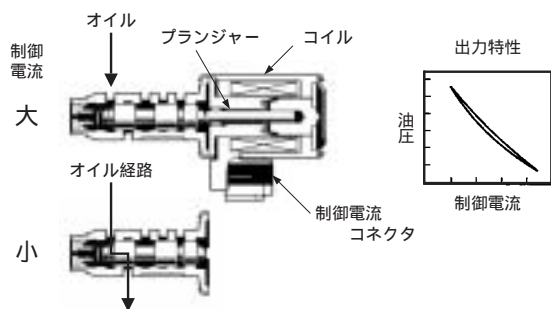


図-1 リニアソレノイド
Fig.1 Linear solenoid

2.2 リニアソレノイドの用途

2.2.1 用途

リニアソレノイドの主な用途を表-1に示す。

2.2.1 可変吸気バルブへの使用例

ここでは、連続可変吸気バルブタイミング機構への使用例について説明する。

(1) 概要

低中速時は低中速向きの、高速時は高速向きのバルブタイミングに連続的に変化させることにより、あらゆる

表-1 リニアソレノイドの用途

用途	制御部分	効果
トランスミッション	遊星ギア	・変速時のショック低減 ・燃費向上
	ロックアップクラッチ	
	ライン圧	
可変吸（排）気バルブ	可変吸（排）気バルブタイミング	・排気ガス清浄性 ・トルク、出力 ・燃費を向上

回転域であたかもその回転域専用のような高効率・高トルクを実現する。また、街中をゆったり走るような低負荷域では、吸入・排気効率を上げ燃費向上、排気ガスの清浄効果を発揮する。（図-2）

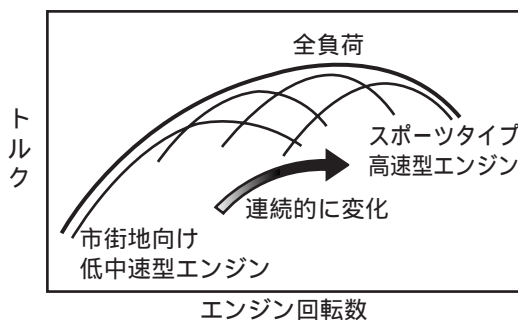


図-2 エンジン回転数に応じた最適トルク
Fig.2 Optimum torque curve

(2) 構成

図-3は、おもにECU、ECUの命令により油圧を制御するリニアソレノイド、油圧によって吸気バルブタイミングを連続的に変化させるVVTプーリーから構成されている。

(3) 動作

ECUは運転状況に応じて最適なバルブタイミングを決定するとVVTプーリーに送る油圧をリニアソレノイドで制御する。VVTプーリーはヘリカルスプライン（ねじれた縦溝）をもつ可動ピストンを送られてきた油圧によりカム軸方向に移動させ、ヘリカルスプラインによってカムシャフトを必要な角度だけ回転させる。このように吸気側カムシャフトとタイミングベルトプーリーの位相を変え、吸気バルブタイミングを連続的に変化させる。（図-3）

以上のことから、運転状況に応じた最適なバルブタイミングにより表-1のような効果を得る。

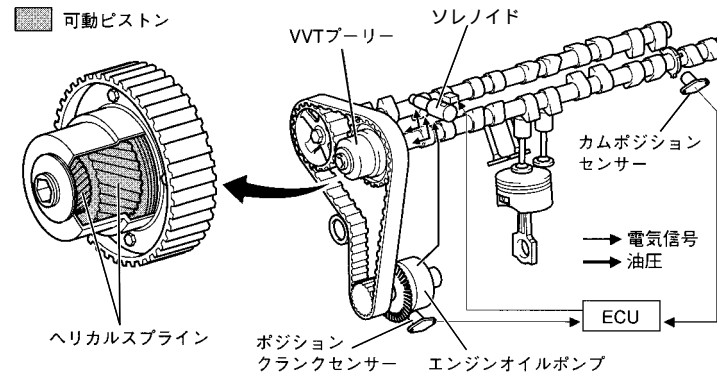


図-3 連続可変バルブタイミング機構
Fig.3 Variable valve timing control system

3. 開発の狙い

3.1 開発の狙いと方策

1章でも述べたように今後、リニアソレノイド駆動制御回路は1 ECUあたり、3～4回路搭載されることになる。当社では2000年以降、10万個 / 月以上の使用予定となり、製造ラインで1回路あたり2箇所調整が必要な現行のカスタムICでは、タクト時間が増大する。そこで、表-2の5項目を開発の狙いとし、新リニアソレノイド駆動IC（以下、開発品）の開発に着手した。

表-2 開発の狙いと方策

狙い	方策
出力電流の高分解能 (0.4mA/LSB)	高精度電流検出回路, 12bit D/A コンバータ採用
ECUでの無調整化 (1A設定で±4.5%)	IC内トリミング実施
ハイ/ローサイド 駆動共用	出力パワー素子内蔵, チャージポンプ内蔵
多チャンネル駆動	シリアル通信採用
外付け部品点数削減	BCDプロセス採用

3.2 開発品の仕様

表-2より電気的特性、内蔵機能の仕様を決定し、目標設定を行なった。

3.2.1 電気的特性

(出力電流精度) 1A設定時 $1A \pm 4.5\%$

(条件)

周囲温度: $-40 \sim 105$

+B (バッテリー電圧): $10 \sim 16V$

VCC (IC電源電圧): $5V \pm 1.5\%$

ソレノイド負荷: $5.3\Omega / 27.2mH$ (代表例)

電流検出抵抗: $0.33\Omega (\pm 1\%, 150ppm /)$

3.2.2 内蔵機能

ハイサイド/ローサイド駆動出力選択機能

16bit シリアル入力/出力の通信機能

(電流設定: 12bit)

自己診断機能

(過電流/過熱/制御異常/通信エラー)

IC保護機能(過電流保護, 過熱保護)

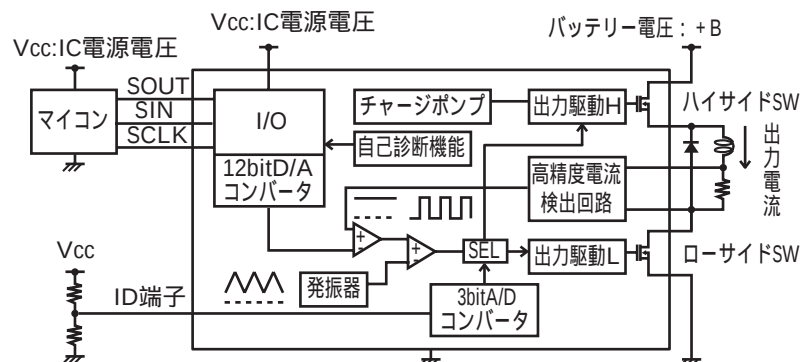


図-4 全体ブロック図
Fig.4 Block diagram of linear solenoid driver

4. 開発品の概要

4.1 開発品の構成

開発品の構成について、図-4を用いて簡単に説明する。

リニアソレノイドの出力電流値は、ECU上のマイコンで運転状況に応じて最適に設定され、マスタースレーブ型シリアル通信によって、ICに送られる。次に、12bit D/Aコンバータでは電流設定値に応じた電圧を出力し、これとフィードバックされた電圧（出力電流を電圧変換したもの）を差動増幅する。さらに、この差動増幅されたものと発振器の三角波は、コンパレータでPWM信号を形成し、ハイサイドSWまたはローサイドSWを制御することにより、出力電流を制御する。

また、ハイ/ローサイド駆動の選択は、ID端子に外部からDC電圧を与えることにより設定する。

4.2 高精度電流検出回路の構成

ここでは、図-5のローサイドSWをPWM制御することにより、出力電流を制御するローサイド駆動の例を用いて説明する。（このとき、ハイサイドSWは常時ON）

この場合、ソレノイドを流れる出力電流は図-5のようになる。この電流はローサイドSWのON/OFFに従い、検出抵抗によって電圧として検出され、SW：ON時にはGND付近の電位に、OFF時にはバッテリー電圧付近の電位になる。

ここで問題となるのは、一般に差動増幅回路はPNPまたはNPNのトランジスタで構成した場合、図-6上のような同相入力電圧範囲の制限ができることである。出力電流を目標特性どおり制御するためには、電流検出回路において、設定値全域で電流検出する必要がある。

そこで、2種類の差動増幅回路を組み合わせ、電流検出回路を構成した（図-5）。このようにして、広い入力電圧

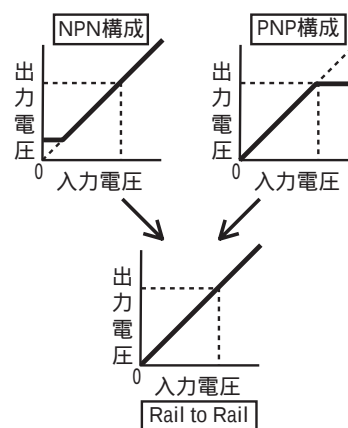


図-6 差動増幅回路の動作限界

Fig.6 Operation limit of operational amplifier

範囲において、高精度な電流検出が実現できるようになり、 $\text{SENSE}+, - < +B/2$ の場合はAMP1で、 $\text{SENSE}+, - > +B/2$ の場合はAMP2で電流を検出することで、高精度電流検出回路を実現した。

ちなみに、ハイサイド駆動時はローサイドSWがONしているため、SENSE電圧は常時、 $+B/2$ より低いため、AMP1のみで電流検出する。

4.3 12bit D/Aコンバータ

12bit D/Aコンバータは、8~12bitで汎用的に使用されているマスタースレーブ型のR-2R型を採用した。

4.4 チップ上トリミング

4.4.1 チップ上トリミングの有効性

3章でも述べたECU上での無調整化を図るため、今回採用したリニアソレノイド駆動制御方式の出力電流バラツキの主要因を解析し、無調整可否の検討を行なった。以下がバラツキの主要因である。

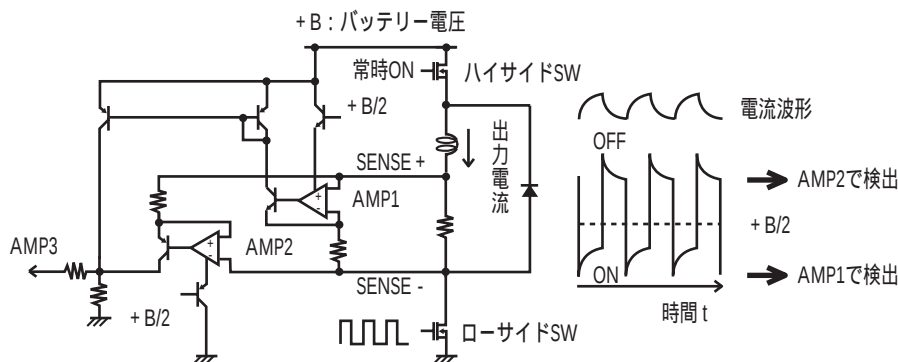


図-5 高精度電流検出回路（ローサイド駆動例）

Fig.5 Precise current detecting circuit

電流検知抵抗 (1%品)	: $\pm 1.0\%$
電流検知抵抗 (温度特性: 150ppm)	: $\pm 1.2\%$
電流検出回路	: $\pm 1.6\%$
基準電圧精度 (IC外部電源DC5V)	: $\pm 1.5\%$
D/Aコンバータ出力精度	: $\pm 0.1\%$

合計 (目標: $\pm 4.5\%$) : $\pm 5.4\%$

以上のことから、

IC外部のパラツキは、 $+ + = \pm 3.7\%$

IC内部のパラツキは、 $+ = \pm 1.7\%$

となり、ECUでの調整工程を不要にするためには、IC内部でのパラツキを (目標 - $>$) $\pm 0.8\%$ 以内に抑えなければならない。そこで、チップ上トリミングを実施し、2~3bit調整することで、IC外部調整不要を実現できると判断した。

4.4.2 出力電流誤差要因

設定値に対しての出力電流誤差要因はオフセットとゲインの2種類である (図-7)。

これらの調整方法と全温度で目標特性を得るために工夫したことを以下に記す。

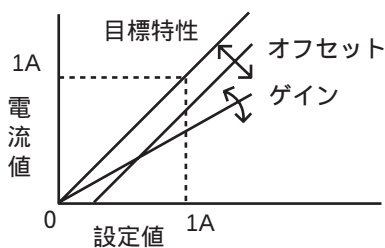


図-7 出力電流値の誤差

Fig.7 Offset and Span of current sensing circuit

4.4.3 AMP1, AMP2のオフセット調整

AMP1, 2は高温でのリーク電流により、0mA設定で電流が流れてしまうため、AMP1, 2は意図的にオフセット

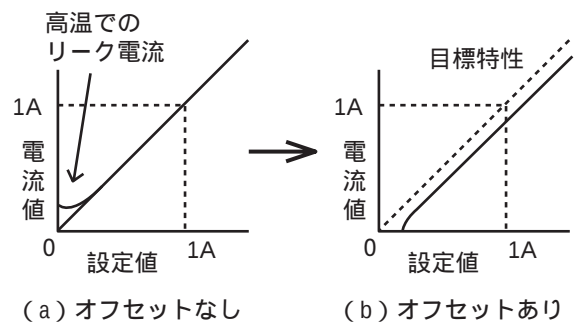


図-8 AMP1, 2におけるオフセット調整

Fig.8 Offset adjustment of AMP1 and AMP2

をつけ、0mA設定でAMP1, 2の出力電流が0になるようにした (図-8)。次の工程で全体のオフセットとゲインを調整する。

4.4.4 全体のオフセットとゲイン

出力電流精度規格が、一番きびしい1A設定でSENSE電圧を測定しながら、調整箇所を最適bit分調整した。ゲインはAMP1, 2の出力抵抗を2bit分調整し、オフセットについては、AMP3の定電流値を3bit分調整した (図-9)。

4.4.5 ツェナーザップトリミング

ツェナーザップトリミングとは、ウェーハ上で、ツェナーダイオードの両端に高電圧をかけて、ショートさせることにより、調整抵抗で抵抗値を調整する方法である (図-10)。開発品のトリミングは、全てこのツェナーザップトリミングで行なった。

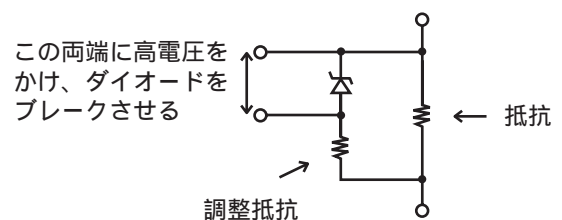


図-10 ツェナーザップトリミング

Fig.10 Zener diode zapping

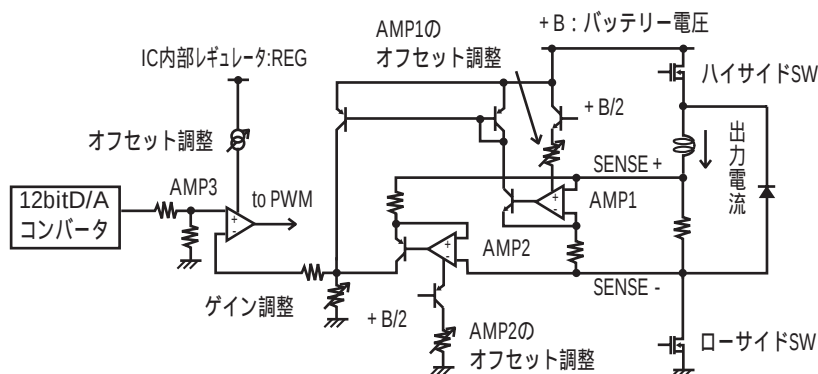


図-9 トータルトリミング

Fig.9 Total trimming

4.5 ハイ/ローサイド駆動の共用

現行カスタムICを使用したリニアソレノイド駆動制御回路は制御用途によって外付け部品の構成を変えてハイサイド駆動、ローサイド駆動を切り替えていた。(図-11左)

ローサイド駆動回路はフェイルセーフ強化のためにハイサイドSWと組み合わせで使う場合があり、出力パワー素子、電流検出抵抗が増えコスト高となる。しかし、ソレノイドの故障やハーネスの噛み込みなどによる短絡故障時の対応が可能のため、トランスミッションのライン油圧制御などの高いフェイルセーフ機能を必要とする制御用途に使用される。

今回の開発品では、ローサイド駆動機能を現行カスタムICを使用したハイサイド駆動機能よりローコストで構成出来るようにすることと、従来からの制御用途と駆動方式の組み合わせを踏襲することを目的とし、ハイ/ローサイドの2つの出力パワー素子の内蔵と、電流検出抵抗の挿入位置の変更、ハイ/ローサイド駆動を切り替える機能を内蔵した。(図-11右)

これにより、全く同じ回路構成でハイ/ローサイド駆動の共用と外付け部品共用によるローコストの両立を実現した。

4.6 多チャンネル駆動

今後、1 ECUあたりリニアソレノイド制御回路を3~4回路搭載することが必要となってくる。ここで、複数のリニアソレノイドを制御する上で問題となるのが、マイコン通信ポート、またはduty出力制御チャンネル数増加である。

開発品では、これを解決するためにマスタースレーブ型のシリアル通信を採用した。

4.6.1 開発品のID端子構成

開発品では、3bit A/Dコンバータを内蔵し、外部からDC電圧を与えることにより、ハイサイド、ローサイド駆動の選択、各ICのアドレスを付与する構成にしている。3bit A/Dにより、8つのステートが選択できるようにして、マイコンの1チャンネルの通信ポートで最大4個のICを制御可能とした。(表-3、図-12)

表-3 ID端子電圧 対 駆動選択、ICアドレス

ID端子電圧 (V)	アドレス	駆動選択
0 ~ 0.125Vcc	00	ローサイド
0.125Vcc ~ 0.250Vcc	01	
0.250Vcc ~ 0.375Vcc	10	
0.375Vcc ~ 0.500Vcc	11	
0.500Vcc ~ 0.625Vcc	00	ハイサイド
0.625Vcc ~ 0.750Vcc	01	
0.750Vcc ~ 0.875Vcc	10	
0.875Vcc ~ Vcc	11	

4.6.2 開発品のシリアルデータ構成

(1) シリアル入力

ID1	ID2	パリティ	A	電流設定 (12bit)
-----	-----	------	---	--------------

パリティ：奇数

ID1, ID2：ICのアドレス

A：電流制御強制カット (カット時：1, 通常：0)

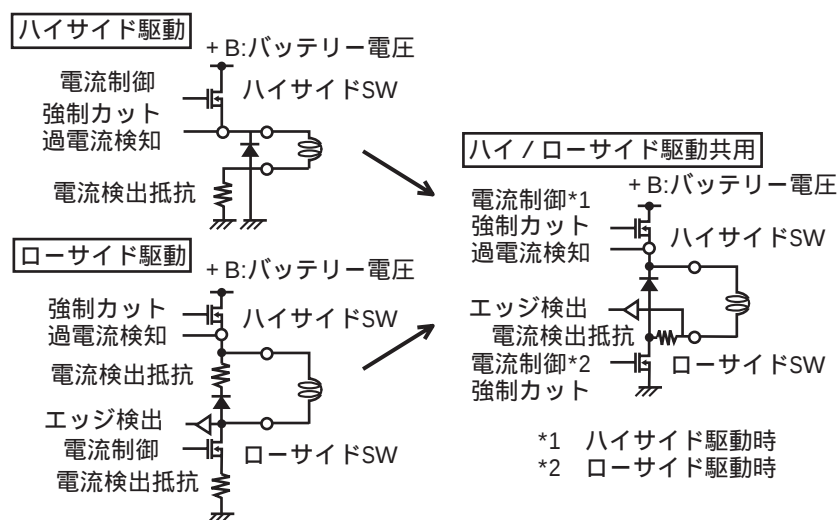


図-11 ハイ/ローサイド駆動共用

Fig.11 High and low side driver implementation

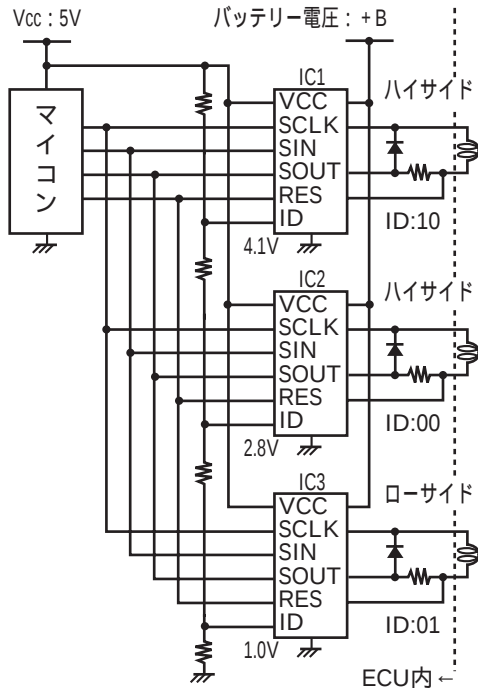


図-12 多チャンネル駆動使用例
Fig.12 Multi channel application

(2) シリアル出力

未定義 (1)	ID1	ID2	e	d	c	b	a

異常時 正常時

- a: 過熱ダイアグ 1 0
- b: 前回通信エラーダイアグ 1 0
- c: 過電流ダイアグ 1 0
- d: 制御領域監視ダイアグ 1 0
- e: 前回電流設定値あり (あり: 1, なし: 0)

4.7 半導体プロセス

4.7.1 プロセス

開発品で使用了チップの断面構造を、図-13に示す。
出力パワー素子には低ON抵抗のDMOSFET (Double diffused MOSFET) を使用した。制御回路には、Bi-CMOS によるデジタルアナログ混載回路を使用しており、ウェナザップによるオンチップトリミングの実施により、高精度な制御をワンチップで実現した。

4.7.2 チップレイアウト

出力素子は、最大1A以上の電流が流れるため、チップの表面温度が一番高くなる。12bit D/Aコンバータ, 3bit A/Dコンバータ等、高精度な制御が要求される回路については、熱的な影響を避けることを考慮に入れ配置した。

また、チップをモールドする際、チップの四隅に機械的なストレスがかかる。特に高精度が要求される12bit D/Aコンバータはストレス最小の位置に配置した。

このように、チップの表面温度、基板の機械的なストレスを考慮に入れてチップレイアウトを実施した。(図-14)

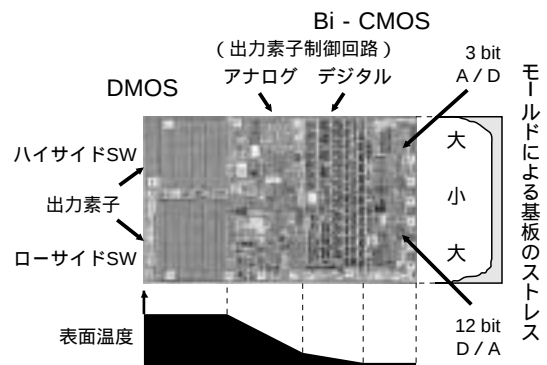


図-14 チップレイアウト
Fig.14 Chip layout pattern

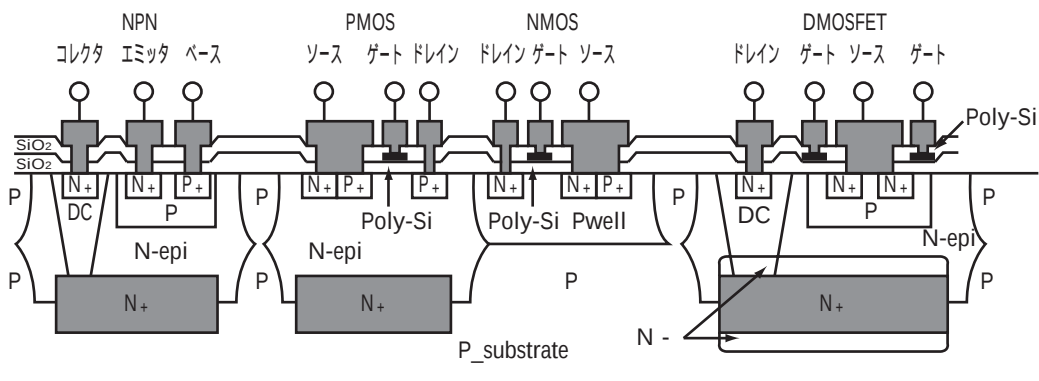


図-13 プロセス断面図
Fig.13 Device structure of BCD process

5. 開発効果

開発品の成果として、現行カスタムICと比較すると従来同等の出力電流精度を製造ラインでの調整なしで実現できた。さらに、図-15の効果を達成した。

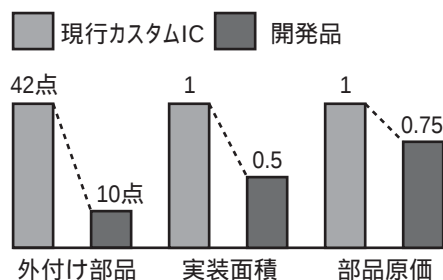


図-15 開発効果
Fig.15 Effect of development

6. 今後の展開

現在のECUは面実装部品とそうでない部品が混在しており、多くの製造工程を必要とする。当社では生産性の向上を図るために部品の面実装化を推進し、製造工程の削減と同時に、小型化、コストダウンを目指している。

開発品ではZIPパッケージを採用したが、次期リニアソレノイド駆動ICでは低熱抵抗SOPパッケージを採用することで、リフローのみでの実装を可能とし、上記を達成する。(図-16)

筆者紹介



坂井 雄大(さかい たけひろ)

1996年入社。以来自動車用電子機器のLSI開発に従事。現在LSI開発部在籍。



山川 靖弘(やまかわ やすひろ)

1982年入社。以来自動車用電子機器のLSI開発に従事。現在技術情報システム部CAD課長。

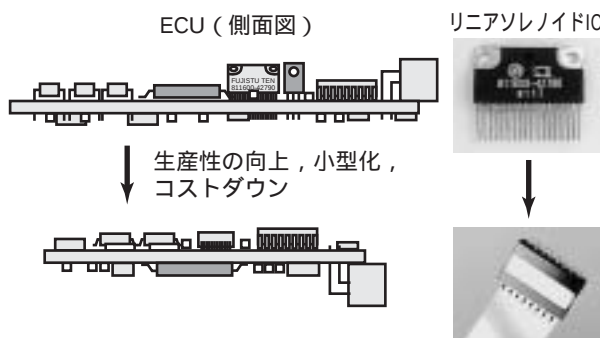


図-16 ECU側面図
Fig.16 Side view of electronic control unit PCB

7. おわりに

開発品は、リニアソレノイド駆動制御回路を1チップ化し、外付け部品点数、実装面積、システムコストの削減だけではなく、ECU製造工程における無調整化を実現しており、生産性をも大きく向上させた。

最後に、多大な協力を頂いた関連部門に改めて感謝いたします。

参考文献

- トヨタ自動車株式会社：「カルディア新型車解説書」
「アリスト新型車解説書」
- サンケン電気株式会社：「サンケン技報」
1997. 11, vol.29, No.1



岡原 章雄(おかはら あきお)

1986年入社。以来エンジン及びトランスミッション制御ECUの開発に従事。現在モータロニクス本部第一技術部第11技術課在籍。



藤本 正彦(ふじもと まさひこ)

1982年入社。以来モータロニクス機器の開発に従事。現在LSI開発部設計プロジェクト課長。