

# SOTB で実装された CPU の電力評価と動的ボディバイアス制御

大城 研治† 濱田 慎亮†  
小柴 篤史† 並木 美太郎†

## 1. はじめに

LSI の省電力には電源電圧を低下させることが効果的である [1]. Silicon on Thin BOX (SOTB) はボディバイアスを用いることで超低電力を実現できる [2, 3]. ボディバイアス制御は、リーク電流と動作周波数のトレードオフを取ることができ、その最適なボディバイアス電圧は実行中のアプリケーションに依存している。そのため、OS/アプリケーション実行中の SOTB チップの電力特性を明らかにすることは、効果的なボディバイアス制御に向けて重要である。本研究では、OS/アプリケーションからボディバイアス制御を行うことのできる評価環境を用いて、SOTB で実装された CPU である GC-SOTB の電力評価を行った。また、アプリケーション実行中にボディバイアス制御を実行した際の GC-SOTB の挙動の検証を行った。

## 2. Silicon on Thin BOX (SOTB)

Silicon on thin box (SOTB) は、電源電圧を低電圧化させることができ、ボディバイアス制御により、製造後の性能及び電力の両方の最適化を実現することができる。

### 2.1 ボディバイアス制御

ウェル部の電圧を変更することで閾値電圧を変更することができ、これをボディバイアス制御と呼ぶ。nMOSFET のソース電圧を  $V_{sn}$ 、ボディ端子の電圧を  $V_{BN}$  と表記し、同様に pMOSFET のソース電圧を  $V_{sp}$ 、ボディ端子の電圧を  $V_{BP}$  と表記する。  $V_{sn} > V_{BN}$ ,  $V_{pn} < V_{BP}$  が成立するとき、これをリバースバイアスと呼ぶ。リバースバイアス時には MOSFET の閾値電圧が上昇し、リーク電流が削減されるが、遅延時間が増大する。一方で、  $V_{sn} < V_{BN}$ ,  $V_{pn} > V_{BP}$  が成立するとき、これをフォワードバイアスと呼ぶ。フォワードバイアス時は閾値電圧が減少し、遅延時間が減少する代わりにリーク電流が増大する。また、ボディとソースの電圧が等しいとき、これをゼロバイアスと呼ぶ。ボディバイアスを適切に変更することで遅延時間とリーク電流の最適化を行うことができ、高い

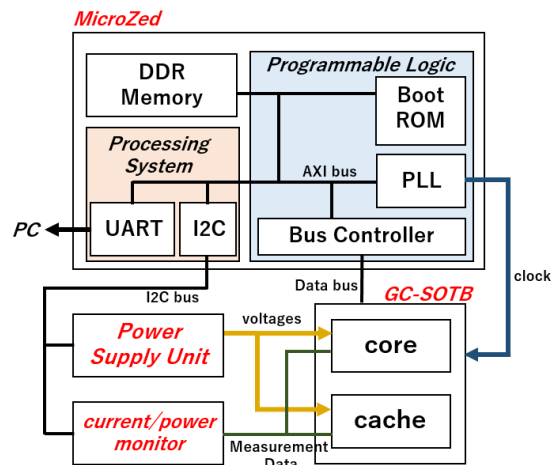


図 1 評価環境の構成

エネルギー効率を実現することが可能となっている。

## 3. 評価環境

本研究において実装した評価環境では、SOTB チップのボディバイアス制御に必要な、電源電圧、ボディバイアス電圧、動作周波数を SOTB チップ上で動作する OS/アプリケーションから制御することができる。図 1 に評価環境の構成を示す。SOTB チップの電源電圧 (VDD) およびボディバイアス電圧は、Power Supply Unit (PSU) によって供給される。PSU は SOTB チップから I2C を経由して制御することができ、供給する電圧を動的に変更することができる。同様に MicroZed が提供する PLL はリコンフィグレーション可能となっており、動的に SOTB チップに供給するクロックの周波数を変更することができる。OS/アプリケーションを動作させるために必要な RAM, ROM などの周辺機能は MicroZed が提供する。SOTB チップの評価に必要な電流データ、電圧データは I2C で接続された電流・電圧計から取得することができる。

## 4. 電力評価結果

実装した評価環境において、MiBench の bitcount を用いて GC-SOTB の電力評価を行った。評価結果

† 東京農工大学  
Tokyo University of Agriculture and Technology

表 1 bitcount 実行時の電流値と消費エネルギー

VDD (V)	電流値 (mA)		消費エネルギー (mJ)		
	core	cache	core	cache	core+cache
0.7 (30MHz)	7.1	33.9	5.6	26.5	32.1
0.7 (25MHz)	6.0	27.9	5.6	26.5	32.1
0.6 (20MHz)	4.1	19.6	4.2	19.8	24.0
0.6 (15MHz)	3.1	14.7	4.3	19.7	24.0
0.5 (10MHz)	1.7	8.4	3.0	14.1	17.1
*0.6 (15MHz)	2.9	14.4	3.8	19.2	23.0
**0.6 (15MHz)	2.9	14.3	3.8	19.2	23.0
***0.5 (15MHz)	5.5	20.7	6.3	23.3	29.6

\*VBP=0.7V, VBN=-0.1V

\*\*VBP=0.8V, VBN=-0.2V

\*\*\*VBP=0.0V, VBN= 0.5V

を表 1 に示す。電流値は bitcount 実行中に 100ms 間隔で計測したものの平均となっている。表 1 の消費エネルギーは、bitcount を実行するのに必要な消費エネルギーとなっている。

表 1 の結果から、電源電圧を低下させることで、消費エネルギーが減少していることが確認できる。VDD=0.7V 時の消費エネルギーと比較すると、VDD=0.6V では 25.3%、VDD=0.5V では 46.7% の消費エネルギー削減となっている。一方で、同じ VDD において動作周波数を変更したときは、電流値は減少しているが、消費エネルギーで見ると変化はないことが確認できる。動作周波数を低下させると消費電力は減少するが実行時間が増加するので、消費エネルギーに変化がなかったと考えられる。VDD=0.6V, 15MHz, VBP=0.7V, VBN=-0.1V のリバースバイアスをかけた時は、ゼロバイアスと比較して、4.2% の消費エネルギーの削減となっている。VBP=0.8V, VBN=-0.2V として、より強いリバースバイアスかけてもそれ以上の消費エネルギー削減とはならなかった。次に、VDD=0.5V, 15MHz, VBP=0.0V, VBN=0.5V のフォワードバイアスをかけた時は、VDD=0.5V のゼロバイアス時と比べ消費エネルギーが 73.1%増加している、同じ周波数である VDD=0.6V, 15MHz のゼロバイアスと比べ 23.3%増加している。

以上の結果から、VDD を低下させることが最も消費エネルギーを削減するのに効果的であり、リバースバイアスを併用することでより多くの消費エネルギーを削減できることが確認できた。一方で、フォワードバイアスは最大動作周波数を引き上げる効果があるが、VDD を上げて最大動作周波数を上げる方がエネルギー効率が良くなることが確認できた。

## 5. 動的ボディバイアス

OS/アプリケーションからボディバイアス制御を考えると、アプリケーション実行中のボディバイアス制御を行ったときの挙動を検証することは重要である。

そのため、アプリケーション実行中にボディバイアス制御を行ったときの挙動について検証を行った。

### 5.1 VDD, ボディバイアス電圧の変更

bitcount を実行中に VDD, ボディバイアス電圧を変更する。動作周波数を 10MHz として VDD を 0.7V から 0.5V に変更した時は、アプリケーションは正常に動作していた。同様に、VDD=0.6V, 15MHz 時にゼロバイアスから VBP=0.8V, VBN=-0.2V のリバースバイアスをかけた場合も、アプリケーションは正常に動作した。VDD を増加させる場合、フォワードバイアスをかける場合も同様に検証し正常に動作することを確認した。

### 5.2 動作周波数の変更

電圧同様に動作周波数を変更した時の挙動についても検証した。VDD=0.7V で動作周波数を 30MHz から 10MHz に変更した場合、キャッシュへアクセスが行われている時はアプリケーションが停止した。一方で、キャッシュアクセスが行われていない場合は正常に動作をし続けていた。VDD=0.7V で 10MHz から 15MHz に変更する場合は、キャッシュアクセスが行われていない場合は成功したが、その他の周波数の変更ではアプリケーションが停止した。これらの結果から、動作周波数の変更は、キャッシュアクセスが行われていないときにする必要がある。特に、動作周波数を上げる場合はそれ以外の条件が必要である。その条件については検証を重ねて明らかにする必要がある。

## 6. おわりに

本研究では、SOTB チップの評価環境を用いて、GC-SOTB の電力評価を行った。また、動的ボディバイアス制御に関する検証も行った。今後の課題として、動的ボディバイアス制御を用いた省電力手法の提案および動作周波数制御方法の確立があげられる。

## 参考文献

- 1) Ronald G. Dreslinski, et. al. "Reclaiming Moore's Law Through Energy Efficient Integrated Circuits", Proceedings of the IEEE, Vol.98, No.2 pp.253-266 Feb. 2010.
- 2) CCC. torres, et. al. "Analysis of Body Bias Control Using Overhead Conditions for Real Time Systems: A Practical Approach", IE-ICE Transactions on Information and Systems, Vol.E101.D, No.4, pp.1116-1125, 2018
- 3) H. Okuhara, et. al. "An optimal power supply and body bias voltage for a ultra low power micro-controller with silicon on thin box MOSFET", IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), July 2015