

“ばらつき”とコンピュータ・ シミュレーション EDAプラットフォーム

飯野 由久
シルバコ・ジャパン

*2007 IEEE EDS Japan chapter workshop
July 12, 2007, Hiroshima university, Japan*

SILVACO

概要

- ばらつき原因を制御せずに対象特性のばらつきを減らす手法の可能性

- Silvaco、Simucad社EDAプラットフォーム

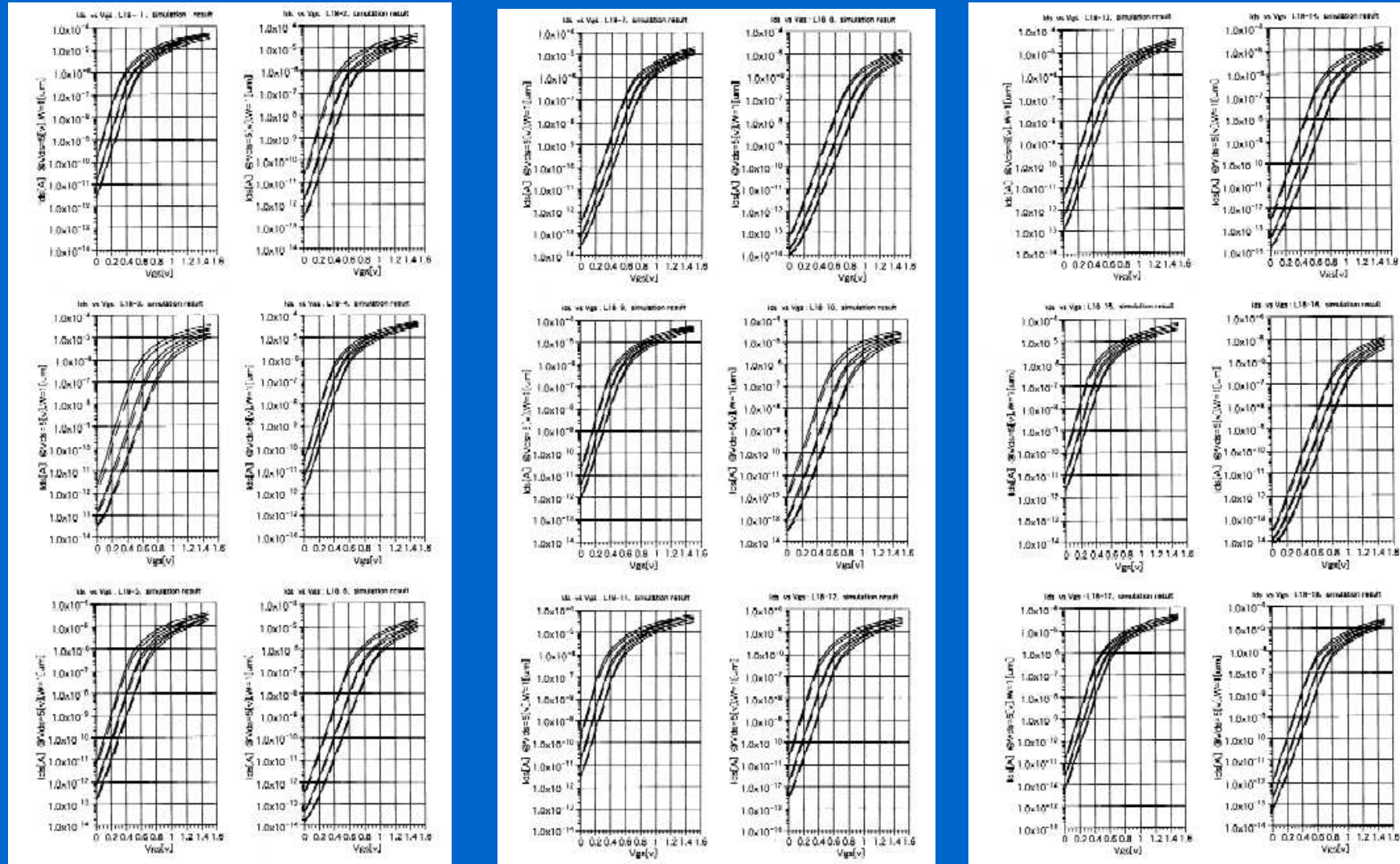
概要

- ばらつき原因を制御せずに対象特性のばらつきを減らす手法の可能性

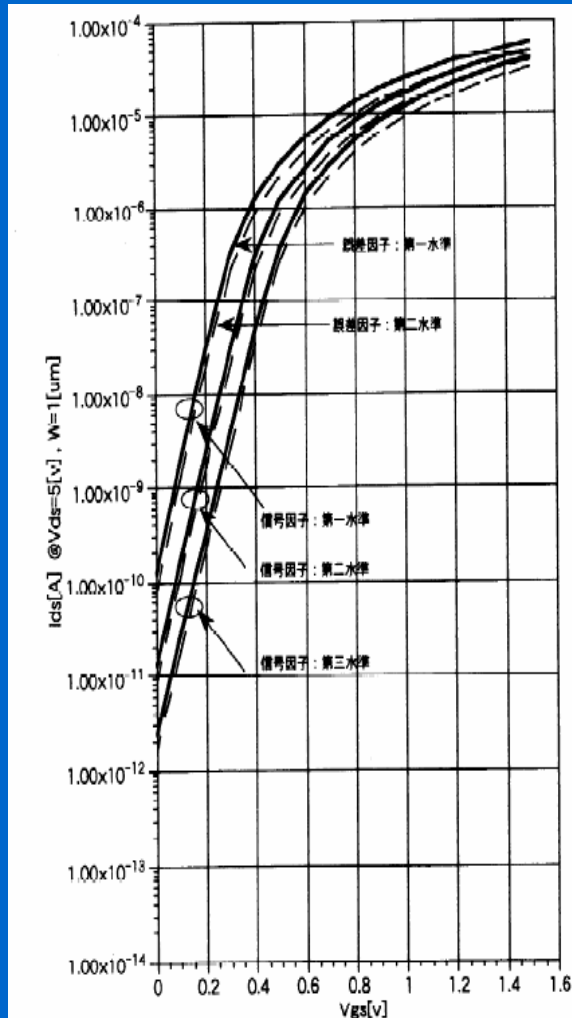
品質工学会 <http://www.qes.gr.jp/top.html>
ばらつきのモデル化は不要

- Silvaco、Simucad社EDAプラットフォーム**

対象特性のばらつき



安定性評価の指標：SN比



半導体製造の技術開発(1994年)
(品質工学応用講座)

2007/7/12 Y. Iino

表 4.2 MOSトランジスタの L_{18} 直交表の

1行目のデータ

信号	M_1	M_2	M_3
誤差	-3.5	0	3.5
N_1	0.485 0	0.854 0	1.224 0
N_2	0.540 0	0.912 0	1.144 5
T 計	1.025 0	1.766 0	2.368 5

単位 V

$$S_T = y_{11}^2 + \dots + y_{22}^2 + \dots + y_{32}^2$$

$$= 0.485^2 + \dots + 0.912^2 + \dots + 1.1445^2 = 4.895\ 941\ 25 \quad (f=6) \quad (4.1)$$

$$S_m = \frac{(y_{11} + \dots + y_{22} + \dots + y_{32})^2}{3 \times 2}$$

$$= \frac{(0.485 + \dots + 0.912 + \dots + 1.1445)^2}{6} = 4.436\ 740\ 04 \quad (f-1) \quad (4.2)$$

$$r = r_0 [M_1^2 + M_2^2 + M_3^2]$$

$$= 2[(-3.5)^2 + 3.5^2] = 49.0 \quad (4.3)$$

$$S_s = \frac{(M_1^2 Y_1 + M_2^2 Y_2 + M_3^2 Y_3)^2}{r}$$

$$= \frac{[(-3.5) \times 1.025 + 3.5 \times 2.368\ 5]^2}{49} = 0.451\ 248\ 06 \quad (f=1) \quad (4.4)$$

$$S_e = S_T - S_m - S_s$$

$$= 4.895\ 941\ 25 - 4.436\ 740\ 04 - 0.451\ 248\ 06 = 0.007\ 953\ 15$$

$$(f-4) \quad (4.5)$$

$$V_s = \frac{S_e}{k \times r_0 - 2}$$

$$= \frac{0.007\ 953\ 15}{4} = 0.001\ 988\ 29 \quad (4.6)$$

$$\eta = 10 \times \log \frac{1}{r} \frac{(S_e - V_s)}{V_s} = 6.64 \quad (\text{db}) \quad (4.7)$$

表 4.3 MOSトランジスタのSN比と感度

因子 列 No.	A B C D E F G H								η (db)	S(db)
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	6.64	-20.38
2	1	1	2	2	2	2	2	2	8.87	-15.84
3	1	1	3	3	3	3	3	3	6.14	-12.02
4	1	2	1	1	2	2	3	3	7.24	-19.90
5	1	2	2	2	3	3	1	1	5.28	-16.52
6	1	2	3	3	1	1	2	2	9.66	-12.81
7	1	3	1	2	1	3	2	3	7.38	-16.48
8	1	3	2	3	2	1	3	1	5.91	-14.40
9	1	3	3	1	3	2	1	2	6.58	20.05
10	2	1	1	3	3	2	2	1	6.28	-13.11
11	2	1	2	1	1	3	3	2	8.39	-19.22
12	2	1	3	2	2	1	1	3	8.96	-16.05
13	2	2	1	2	3	1	3	2	7.56	-16.47
14	2	2	2	3	1	2	1	3	9.24	-12.90
15	2	2	3	1	2	3	2	1	7.09	-20.67
16	2	3	1	3	2	3	1	2	6.73	-15.81
17	2	3	2	1	3	1	2	3	6.76	-19.95
18	2	3	3	2	1	2	3	1	8.53	-16.42

安定性評価の指標：SN比

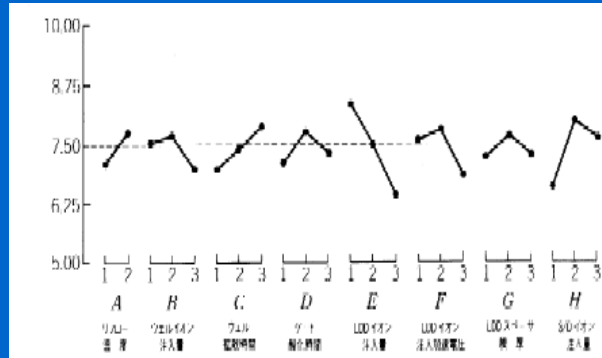


図 4.5 要因効果図 1次式 $\langle 10^* \log(b^{**2}/U_0) \rangle$ (db)

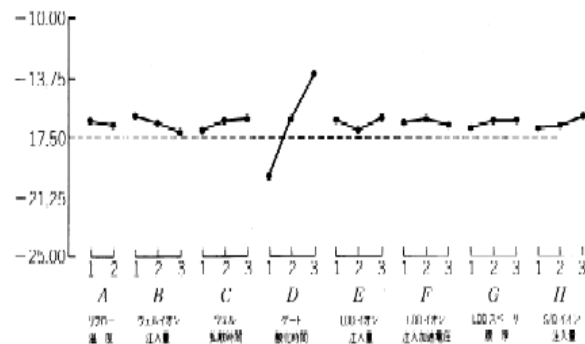


図 4.6 要因効果図—1次式 $\langle b^{**2} \rangle$ (db)

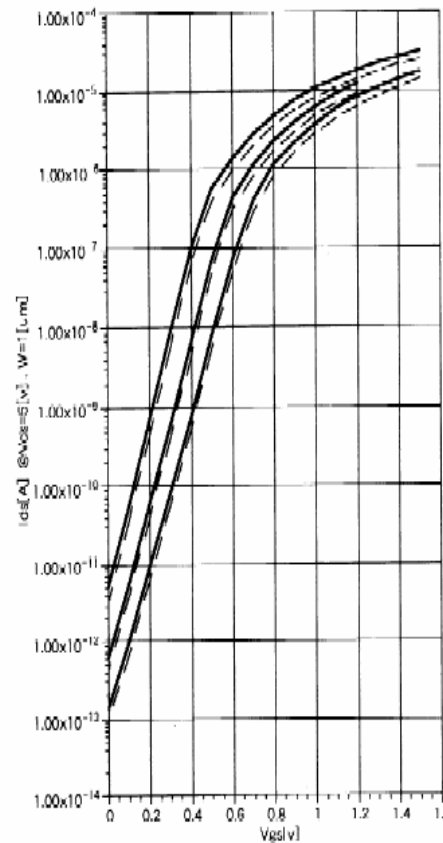


図 4.7 SN比最大の条件での $\log(I_{DS})$ vs V_{GS} 特性

表 4.1 MOS トランジスタの制御因子と水準

因子	水準	水準		
		1	2	3
A	リフロー温度 (°C)	高	低	
B	ウェルイオン注入量 (ions/cm ²)	少	中	多
C	ウェル拡散時間 (min)	短	中	長
D	ゲート酸化時間 (min)	短	中	長
E	LDD イオン注入量 (ions/cm ²)	少	中	多
F	LDD イオン注入加速電圧 (keV)	小	中	高
G	LDD スペーサ膜厚 (μm)	薄	中	厚
H	S/D イオン注入量 (ions/cm ²)	少	中	多

信号因子 (M) : V_{th} アジャスト量

誤差因子 (N) : MOS トランジスタのチャンネル長

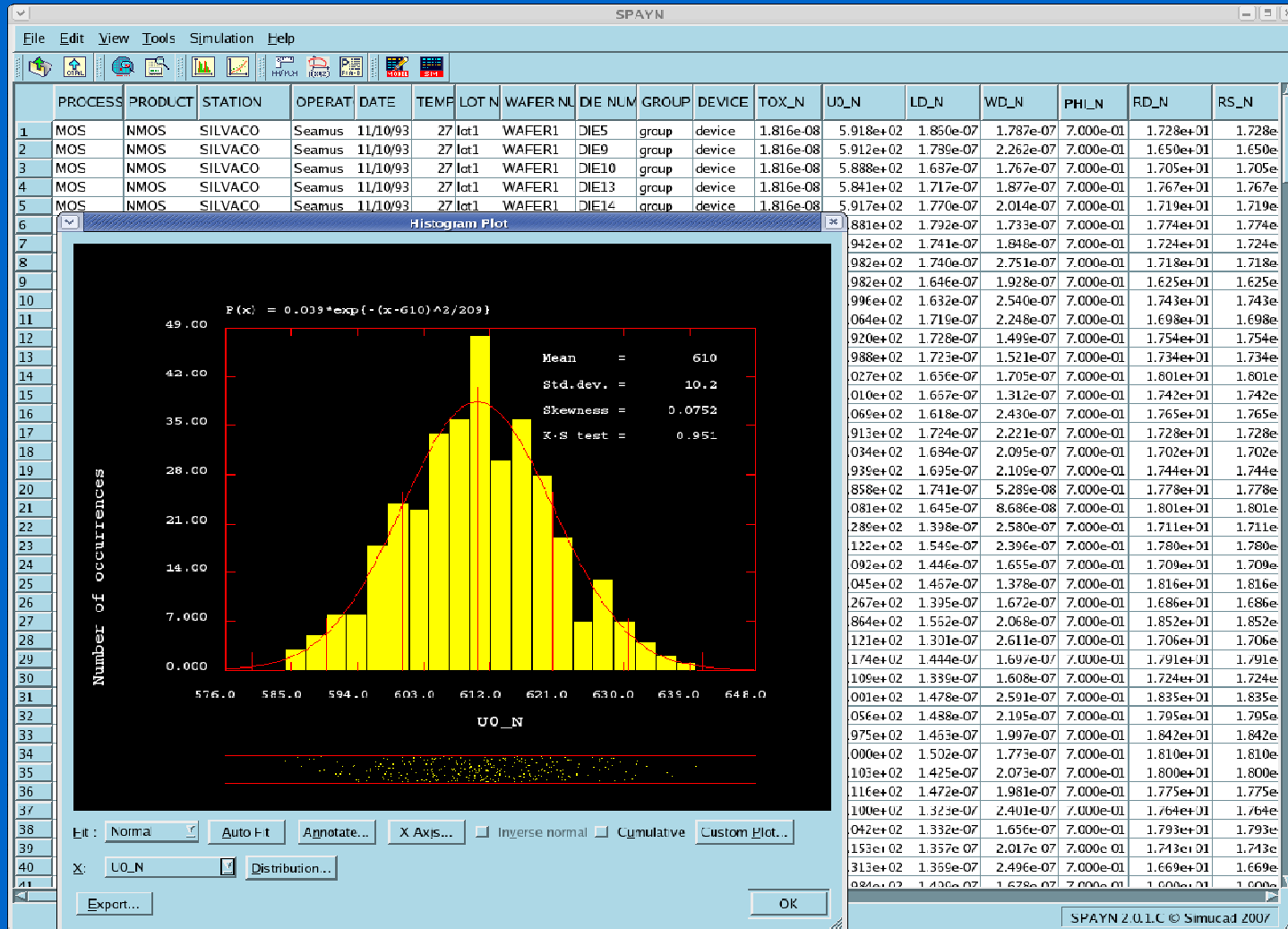
品質工学のLSI応用における課題

- 超大規模なシステム (LSI) におけるシステム分割
- 多数の入出力に対する評価関数の定義

概要

- ばらつき原因を制御せずに対象特性のばらつきを減らす手法の可能性
- Silvaco、Simucad社EDAプラットフォーム
ばらつきのモデル化必須

SPAYN統計処理プログラム



SPAYN: PCA多項式

Equations

```

TOX_N = $1
RD_N = 7.58e+08*$1+2.992
RS_N = 7.58e+08*$1+2.992
THETA_N = -7.5046e+05*$1+0.067015
GAMMA_N = 5.5639e+07*$1-0.061302
NFS_N = -5.5081e+18*$1+3.0907e+11
VTO_N = 3.7921e+07*$1-0.050657
TOX_P = 1*$1+8.6027e-23
RD_P = 2.1977e+09*$1-6.8973
RS_P = 2.1977e+09*$1-6.8973
THETA_P = -3.1196e+06*$1+0.16563
GAMMA_P = 1.4397e+07*$1+0.085529
NFS_P = -9.2739e+18*$1+3.8366e+11

LD_N = $2
U0_N = -3.9356e+08+$2+666.38
VMAX_N = -1.021e+11*$2+1.9751e+05
KAPPA_N = 9.6173e+05*$2+0.24049
ETA_N = 5.5736e+05*$2-0.032792
LD_P = 0.92722*$2+4.0562e-09
ETA_P = 1.9462e+06*$2-0.04314

U0_P = $3
VMAX_P = 1440.6*$3-2.5827e+05
KAPPA_P = -0.022118*$3+6.7258
VTO_P = 0.0057656*$3-2.3105

WD_N = $4
WD_P = 0.5682*$4+1.1466e-07
    
```

Percentage Variance Explained

Total	TOX_N	U0_N	LD_N	WD_N	RD_N	RS_N	THETA_N	VMAX_N	KAPPA_N	ETA_N	GAMMA_N
64.21	100.00	36.63	100.00	100.00	65.25	65.25	45.02	19.03	31.39	75.44	92.34

Equations in terms of

Dominant Parameters
 Factors
 User
 All
 Single

Regression Terms (for All)

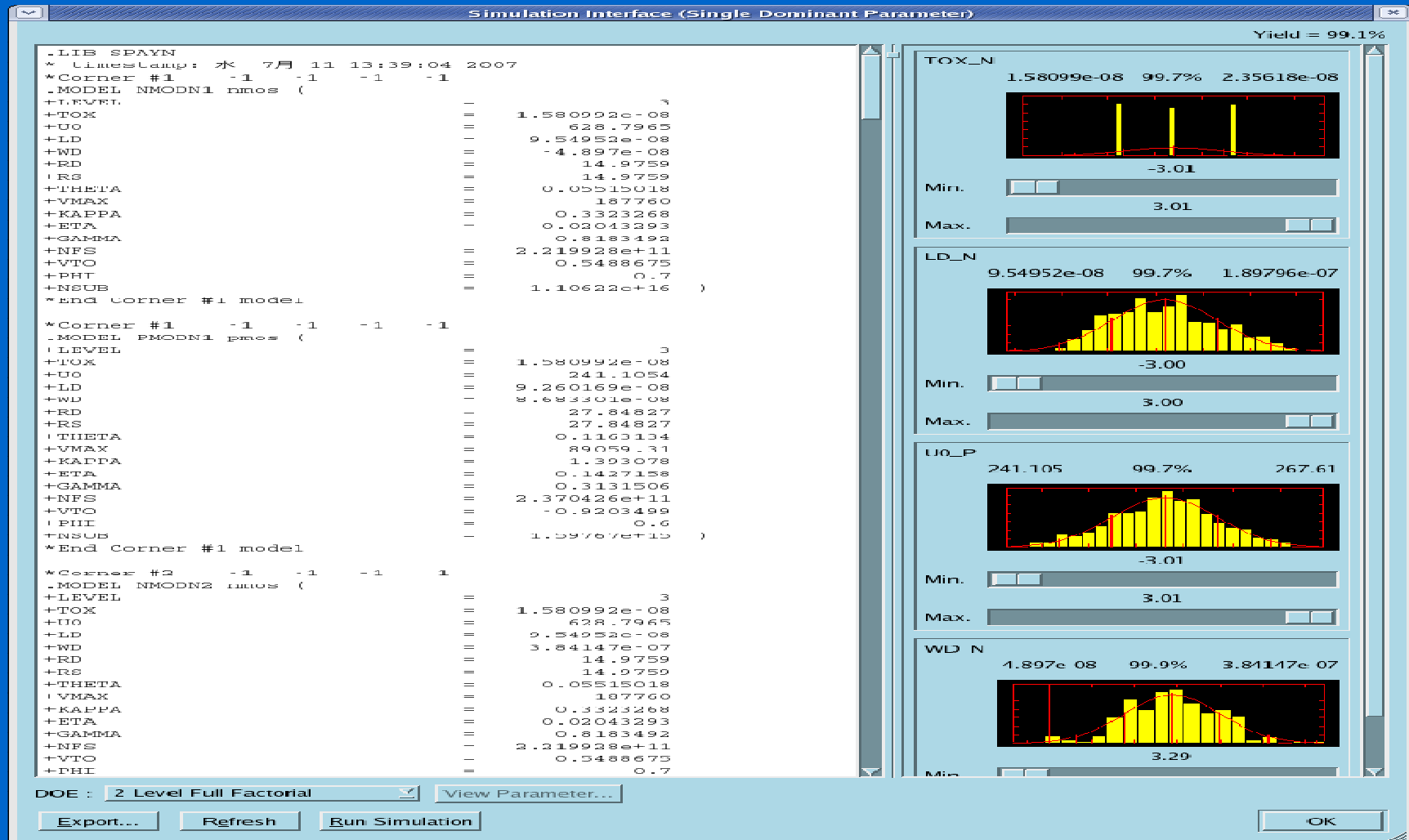
Linear (x)
 Interactions (xyz)
 Interactions (xy)
 Interactions (x^2y)
 Quadratic (x^2)
 Cubic (x^3)

Fit Policy (for Single)

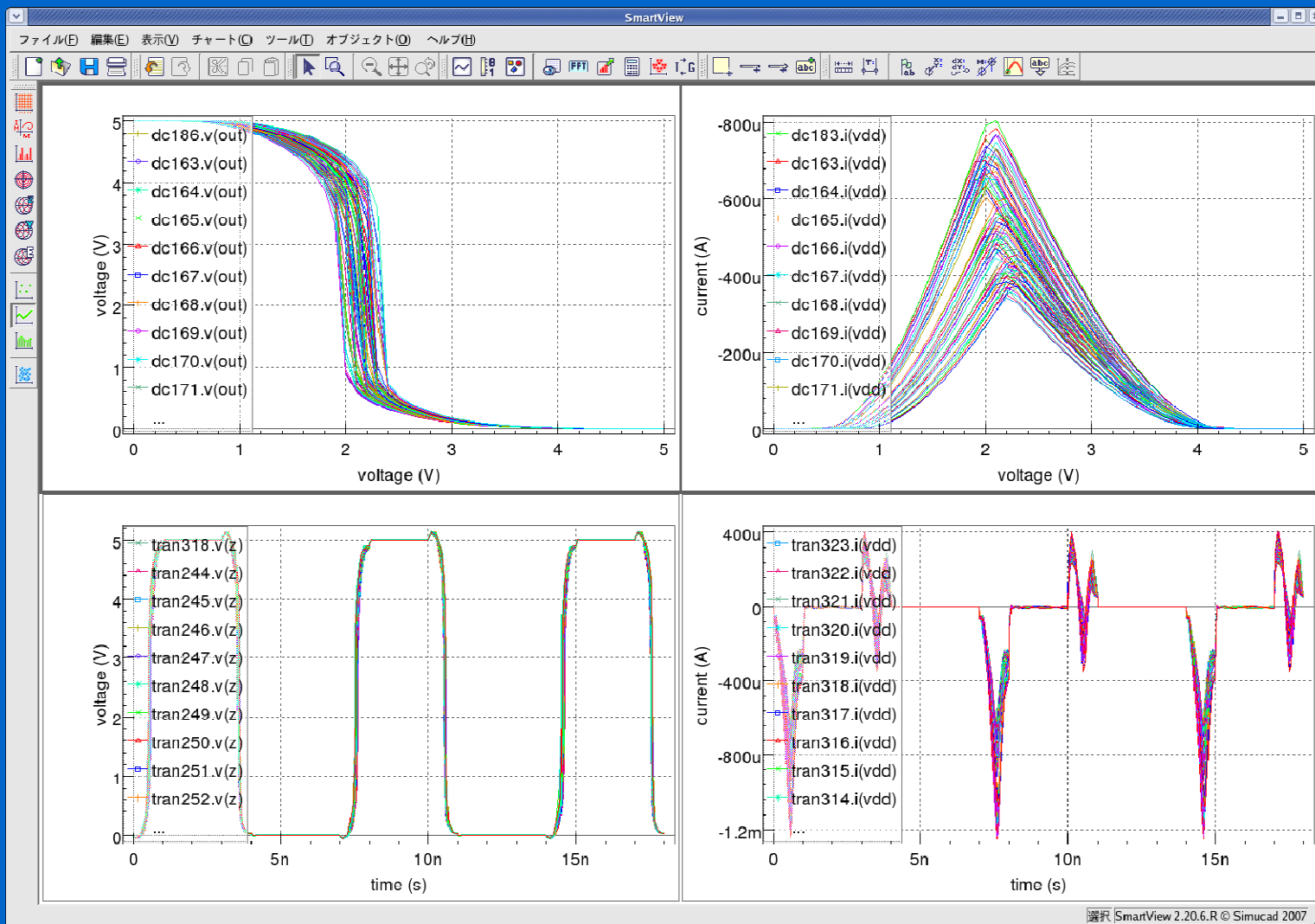
Linear
 Automatic
 From Scattergram

Export... Save PM model... OK Cancel Apply

SPAYN: PCAによるSpiceモデル生成



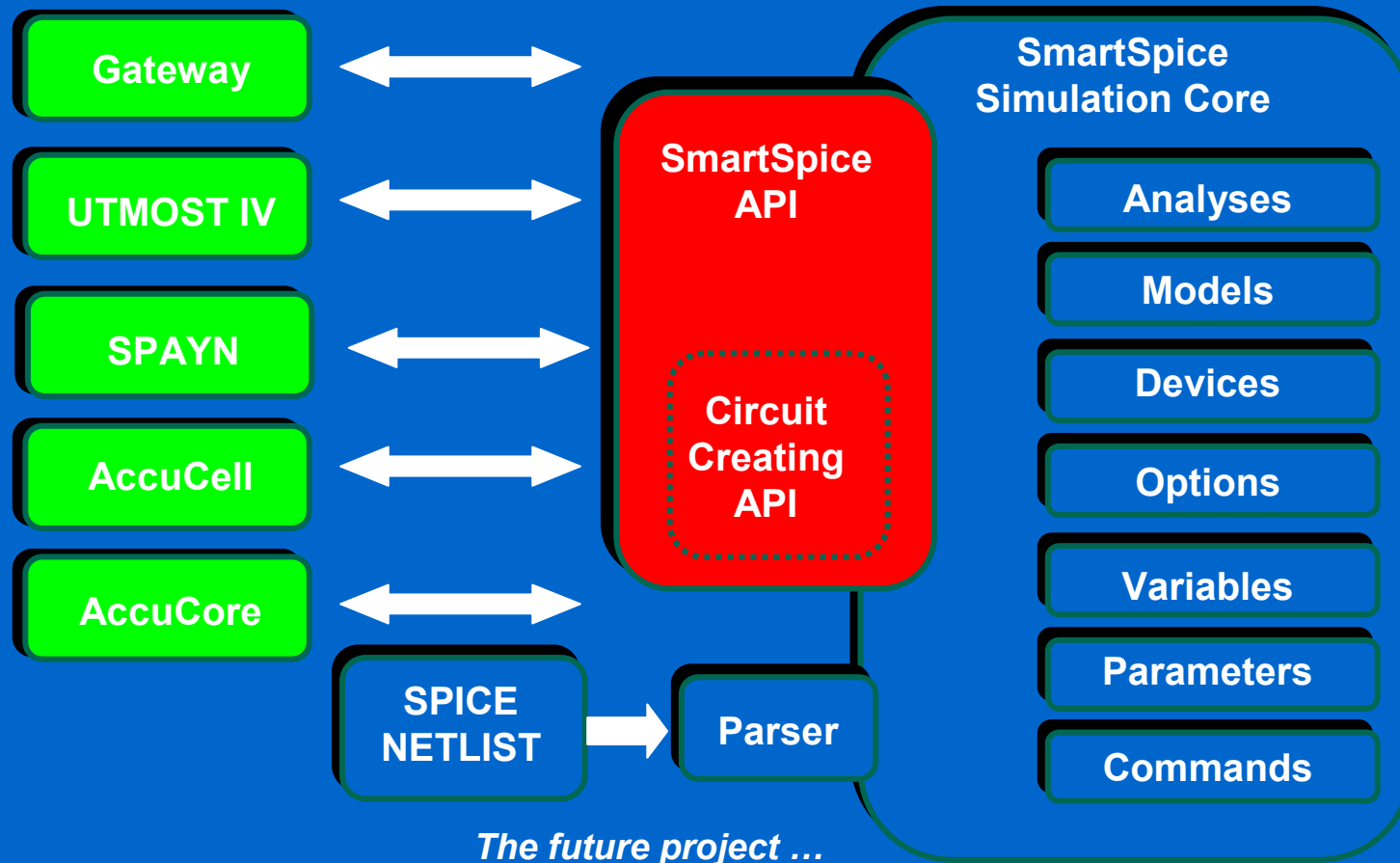
SPAYN: 3水準4元配置のインバータ特性 SmartSpice



SPAYN: 多元配置実行時間

- SPAYN-SmartSpice従来手法: 約 0.5(秒)/回
11.43(総所要時間) – 7.16(GUIロード) = 4.3(秒)/DC解析81回
- SPAYN-SmartSpice API: 1-2秒/DC解析81回

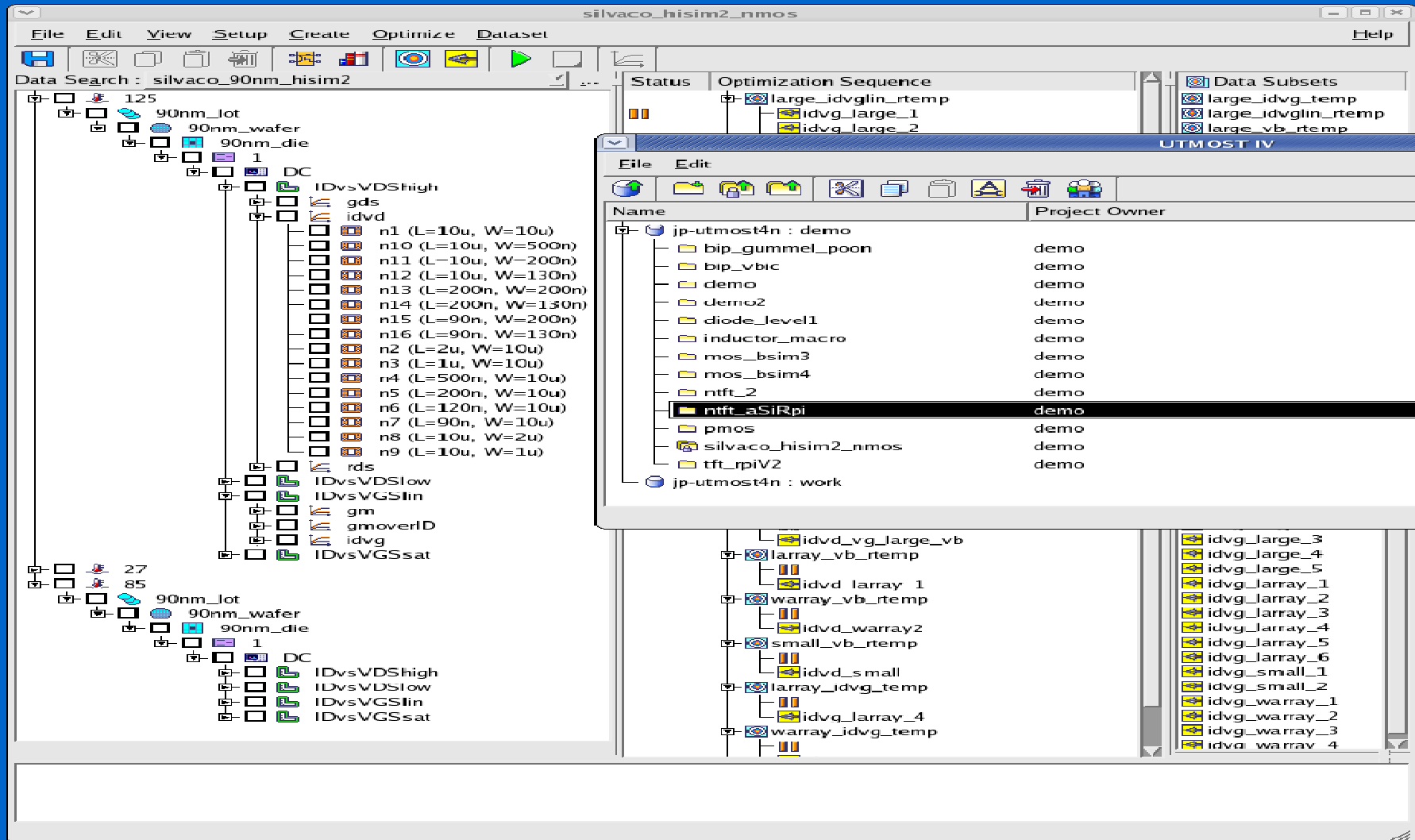
SmartSpice API



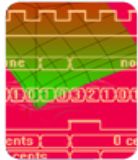
SmartSpice API

- Gateway、AccuCell、UTMOST IV、SPAYNはオーバヘッドなしにSmartSpice各機能（解析、デバイス、モデル、回路パラメータ、階層識別構造）に直接アクセス
- 回路、およびシミュレーションに要するパラメータの変更を実行中に行う
- Cellキャラクタライズでの所要時間を大幅に短縮
- オブジェクト再利用テクニックの採用により使用メモリが削減。オブジェクト（計算式、デバイス、モデル）は、いったん生成されるとSmartSpiceセッション中は常駐
- Simucad プロセス間通信（SIPC）を利用する製品間に標準データフォーマットを提供

UTMOST IV: データベースを持ったSpice パラメータ抽出



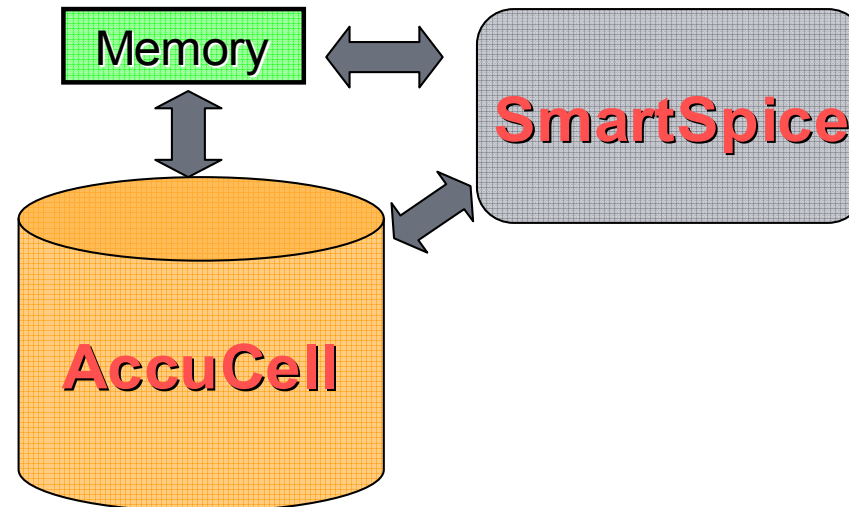
SmartSpice API: Cellキャラクタライズへの展開



AccuCell デザイン・フロー SmartSpice API 機能

SmartSpice API機能

- SmartSpice API機能を使用して、パラメータの変更を直接メモリー上で実行
- 再読み込みの時間が短縮され、さらなるスピードアップを実現！



34

SILVACO

SILVACO

17

SmartSpice API: AccuCell

Cellキャラクタライズ所要時間の大幅な短縮

入力の傾き {0.1 0.2} (ns)
出力の負荷 {0.01 0.05} (pf)
USE_SMARTSPICE_API 0
(コメントアウトでAPIの実行)

SmartSpice API 非実行時:

Model generation completed for pad.
Total simulation time 159.672 seconds
Library generation completed.

SmartSpice API 実行時:

Model generation completed for pad.
Total simulation time 16.298 seconds
Library generation completed.

Cell libraryへの統計情報設定の可能性？

セルinv (Inverter) の Liberty^R format: part-1

```
cell (inv) {
  area : 0;
  pin (a) {
    direction : input ;
    capacitance : 0.01146;
    clock : false;
  }
  pin (y) {
    direction : output;
    function : "!a";
    internal_power () {
      related_pin : "a";
    }
  }
  rise_power (pwr_template2x2) {
    index_1 ("0.10000, 0.20000");
    index_2 ("0.01000, 0.05000");
    values ("0.08991, 0.21388", ¥
           "0.11038, 0.22391");
  }
  fall_power (pwr_template2x2) {
    index_1 ("0.10000, 0.20000");
    index_2 ("0.01000, 0.05000");
    values ("-0.01988, -0.14139", ¥
           "-0.02664, -0.15009");
  }
}
```

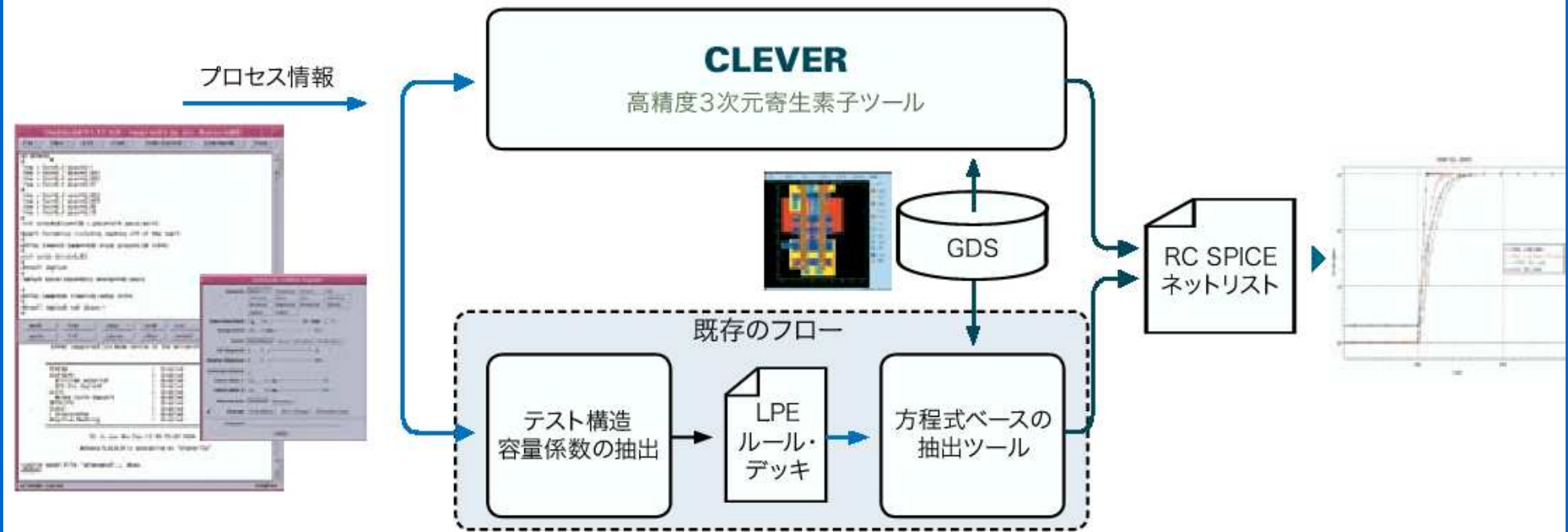
Cell libraryへの統計情報設定の可能性？

セルinv (Invertor) の Liberty format: part-2

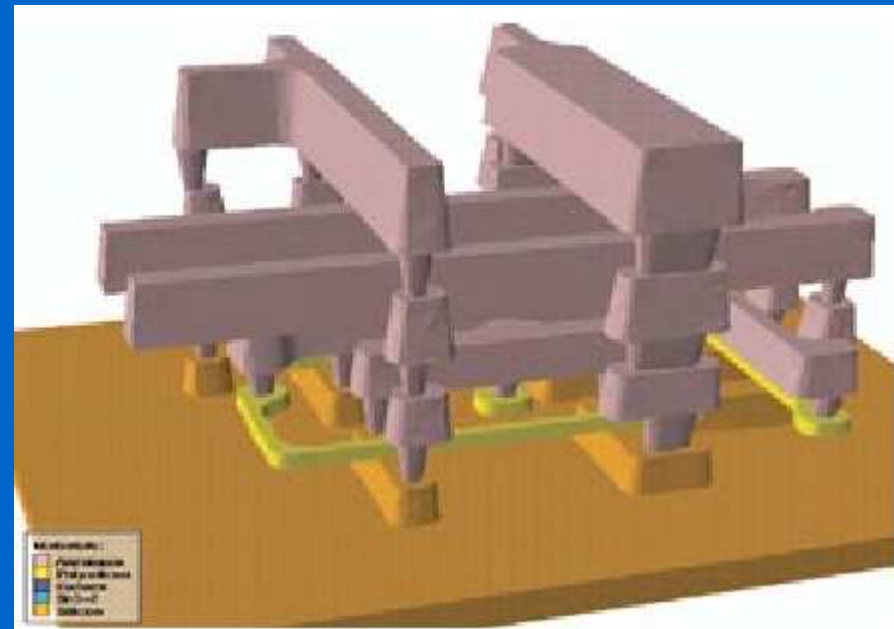
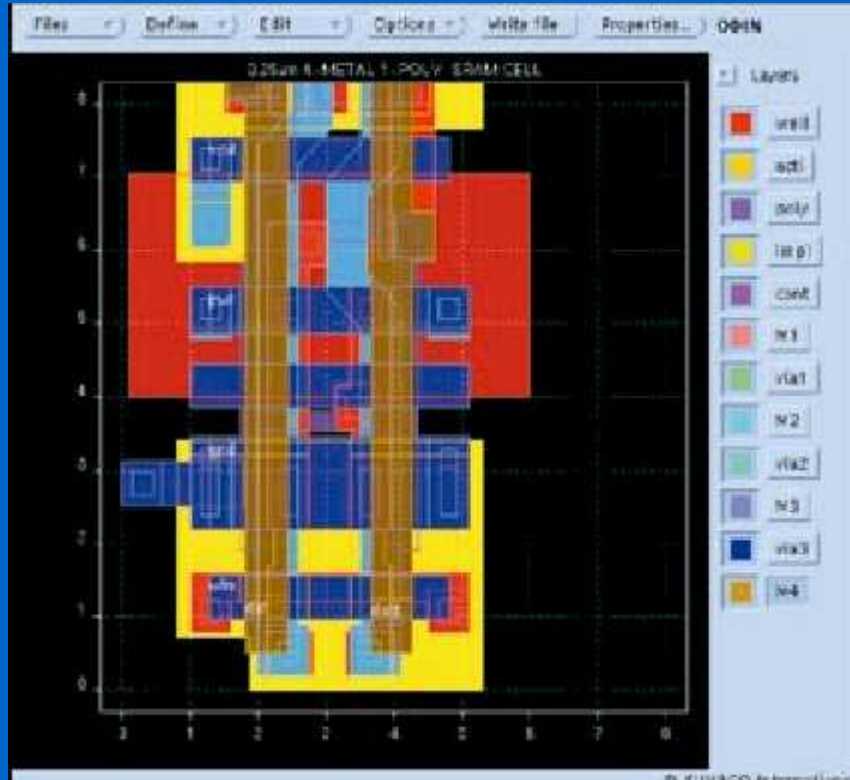
```
        timing () {
            related_pin : "a";
            timing_sense : negative_unate;
            cell_rise (delay_template2x2) {
                index_1 ("0.10000, 0.20000");
                index_2 ("0.01000, 0.05000");
                values ("0.06774, 0.16861", ¥
                    "0.09883, 0.19770");
            }
            rise_transition (delay_template2x2) {
                index_1 ("0.10000, 0.20000");
                index_2 ("0.01000, 0.05000");
                values ("0.09371, 0.31631", ¥
                    "0.11797, 0.32794");
            }
            cell_fall (delay_template2x2) {
                index_1 ("0.10000, 0.20000");
                index_2 ("0.01000, 0.05000");
                values ("0.02340, 0.08096", ¥
                    "0.01212, 0.08635");
            }
            _fall_transition (delay_template2x2) {
                index_1 ("0.10000, 0.20000");
                index_2 ("0.01000, 0.05000");
                values ("0.06570, 0.15570", ¥
                    "0.09376, 0.18664");
            }
            cell_leakage_power : "0.22412";
        }
```

配線RCの影響

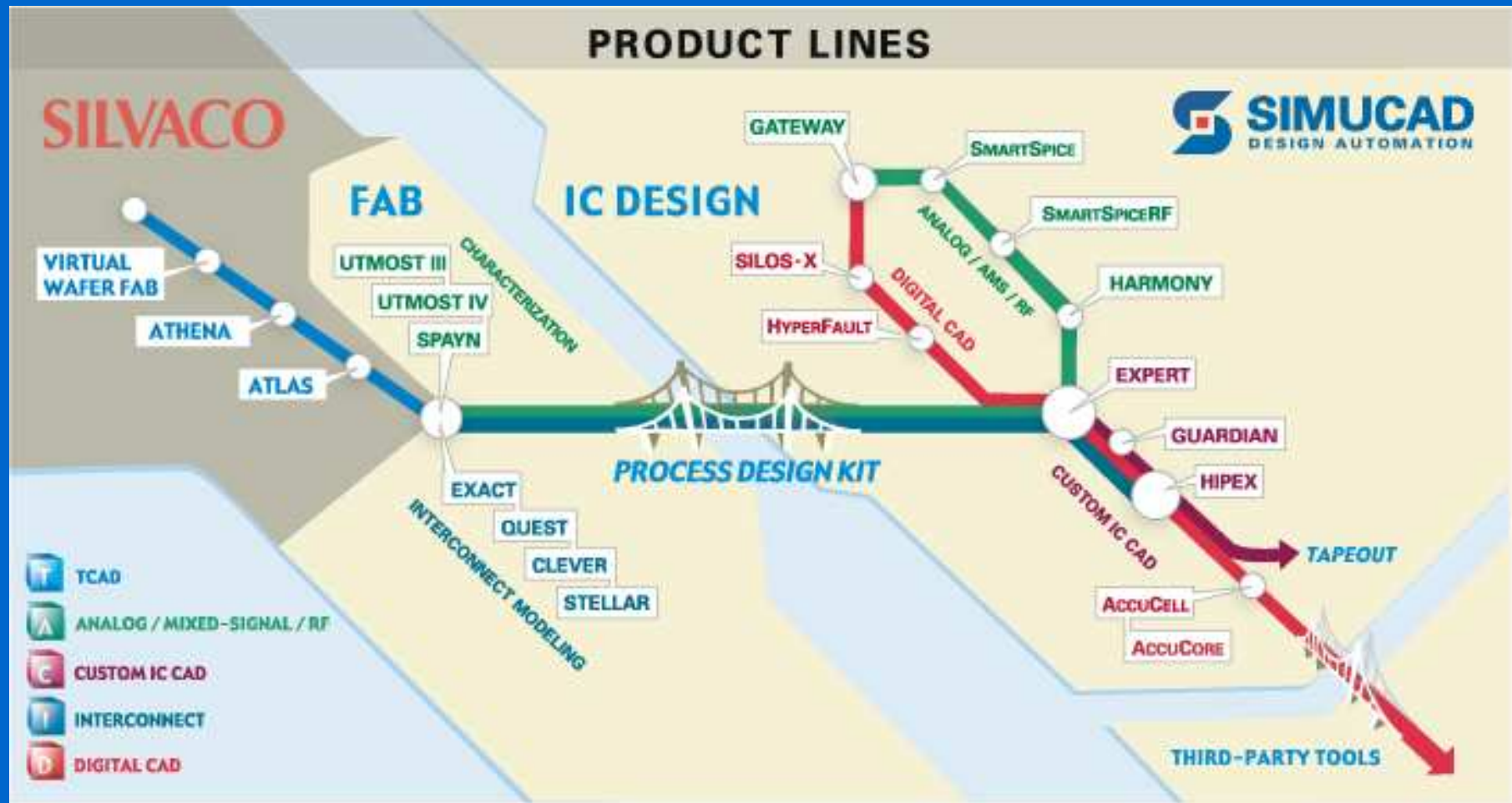
CLEVER のデザイン・フローと既存のフロー



配線RC : Clever



SILVACO & SIMUCAD EDA Tools



まとめ

- ばらつきモデルを不要とする手法(品質工学)紹介とその課題
- Silvaco、Simucad EDAプラットフォーム:
SmartSpice回路シミュレータの高速APIがもたらす、
回路特性ばらつきへの取り組みの可能性
- ばらつきのモデル化、LSIへの対応は広範囲に渡り
コラボレーションが不可欠

References

- 品質工学応用講座（日本規格協会）
半導体製造の技術開発（1994年刊）
- (株)シルバコ・ジャパン: <http://www.silvaco.co.jp>
- Simucad Design Automation : <http://www.simucad.com>
- Silvaco International: <http://www.silvaco.com>