

計測技術と統計解析を活用したエッチングシステムの改善

横河電機（株）半導体センター

小川 昭

1. はじめに

シリコンを材料とした圧力センサーには受圧部を周辺より薄くして感度を高める構造のものがある。この薄い部分を「ダイアフラム」と呼び、シリコン基板を「エッチング」して作る。ダイアフラムの厚さはセンサーの感度や耐圧等の設計仕様で決まるが数 10～数 100 μm 、規格幅は±数 μm である。シリコン基板のエッチングは大規模集積回路 (LSI) 製造工程では汎用技術である。そこで使用されるシリコン基板は円板状の「ウエハー」で、1枚のウエハー内に同一仕様のセンサーが多数存在する。製造の最終工程でウエハーを縦横に切断し数ミリ角の「チップ」に仕上げ、これを台座に実装して完成品（例えば差圧伝送機）に組み込む。その様子を Fig 1 に示す。

従来はウエハーが小口径でウエハー内チップ数も少なく、ウエハー内のエッチングばらつき（以後「ばらつき」）もそれほど問題にはならなかった。また小口径のため使用する治具も小型軽量で作業による手作業が可能であった。さらにエッチング作業を、複数枚同時の「荒加工」と、それに続くウエハー毎の「目標合せ」の2段階作業とすることで品質 (Q) コスト (C) 納期 (D) を確保していた。

近年ウエハーが大口径化するにつれウエハー内チップ数が増え、センサーの生産性は大きく向上したが、ウエハー内のばらつきの増大で良品率を維持することは困難になっている。また使用する治具も大型化して重量も重くなり、新たに自動搬送機を装備したエッチング装置が導入され機械作業が標準となった。このため以前のような2段階作業では生産性が低下する可能性もでてきた。さらに複数枚同時の「バッチ処理」では同一バッチ内でのウエハー間ばらつきがあり、バッチ間ばらつきも原因となって、工程能力を維持改善することが非常に困難になっている。

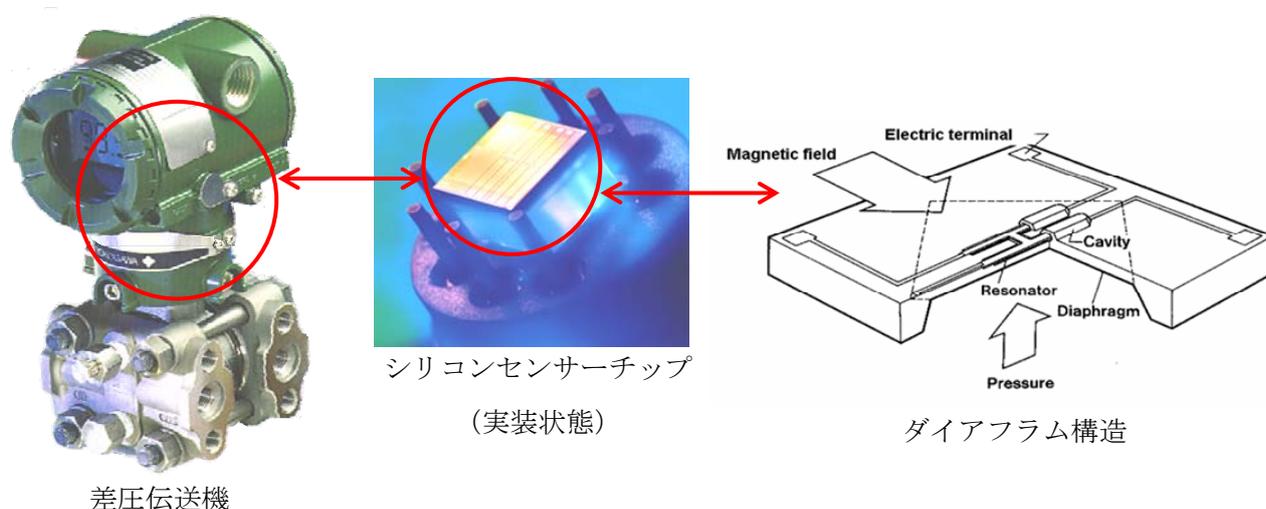


Fig1 差圧伝送機とダイアフラム構造のシリコンセンサーチップ

2. 解決すべき課題

解決すべき課題は、ばらつきの改善による工程能力の向上と QCD の確保の 2 点である。ばらつきは、ウエハー (Wf) 内, ウエハー (Wf) 間, バッチ (Bch) 間に分けて対応する。QCD の確保は、Q (ばらつきの改善) を行いながら作業方法含めた C (作業費) と D (リードタイム) を改善すること、少なくとも以前より悪化しないことが大前提となる。

3. 課題解決の方針

まず現状のダイアフラムエッチングのシステム構成を把握する。エッチングシステムはウエハーの処理システムとダイアフラム厚の測定システムから構成されている。処理システムでは新規導入されたエッチング装置に温度と濃度の計測・制御システムがある。

次に StatWorks を使用して工程分析を行う。まずは「統計的工程管理 (SPC)」で工程能力/工程性能の分析を行う。これは製品 (Product) 品質の確保だけでなく工程 (Process) 品質の確保も重視するもので、工程改善や新規装置立ち上げ時の評価ツールとして有効であるとされている。続いて、ダイアフラム厚の測定システムの健全性を「測定システム解析 (MSA)」で評価分析する。さらに新規導入されたエッチング装置の計測・制御システムを固有技術の視点で分析する。

その後、特性 Y (ダイアフラム厚) と複数の要因 X 間の関係把握のため実験計画法 (DOE)、品質工学のパラメータ設計、重回帰分析 (MRA) を活用する。その結果をエッチングシステムにフィードバックして改善を行い、QDC 確認後 SPC で改善効果を確認する。

4. 現状把握

4.1 エッチングシステム

エッチングシステムの全体を Fig2 に示す。エッチングシステムは、エッチング装置、Wf、治具を中心とした「処理システム」と、ダイアフラム厚を測定する「測定システム」から構成される。さらにエッチング装置内部には温度制御、濃度制御を行う「計測・制御システム」が含まれる。

4.1.1 処理システム

エッチング装置の内部には加熱ヒーター付のエッチング槽が設置され、槽内部のエッチング液は循環ポンプ(P)によって循環している。その温度、濃度、流量はそれぞれ温度計(T)、濃度計(C)、流量計(F)により計測されている。温度計の計測値は温度コントローラに入力され、設定値との差に応じた自動温度制御を行い、温度を一定に保つ。濃度計の計測値は濃度コントローラに入力され、濃度が設定値より低下した場合はエッチング液を、上昇した場合は純水をそれぞれ注入して濃度を一定に保つ。この機能は自動、手動いずれでも可能である。流量計は目視確認用で出力はない。循環ポンプの流量は多少の脈動はあるが一度設定すればエッチング中は大きく変化することはないため流量については積極的な制御は行っていない。エッチング槽から蒸発したエッチング液は冷却管により凝縮され再び循環配管に戻る構造になっている。

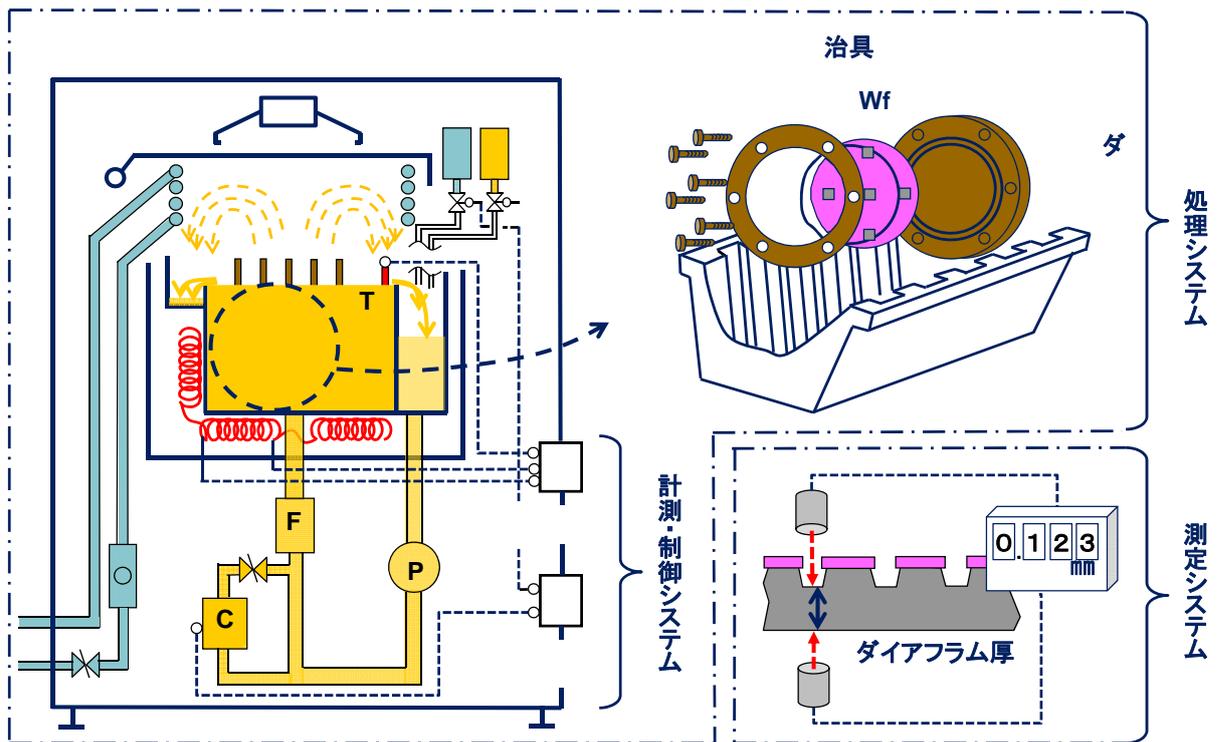


Fig2 エッチングシステム

Wf を保持するホルダはリング、ベース、ネジから構成されている。Wf はリングとネジでベースに固定され、キャリアにセットされる。これらは作業者の手作業となり C（作業費）と D（リードタイム）に影響する。キャリアのエッチング槽への出し入れは自動搬送機が行う。エッチングが終了すると Wf をホルダから取り外し、水洗、乾燥した後厚さ測定を行う。

エッチングは 2~3 回に分けて行われる。1 回目は目標の 9 割程度をエッチングする「荒加工」で 1 度に複数ホルダを同時処理する。その後各 Wf のダイアフラム厚を測定し、目標値との差を把握する。2 回目は「目標合せ」のエッチングを行うが、処理する Wf 数は状況に応じて決めることになる。2 回目エッチング後のダイアフラム厚が規格を満たせば終了、未達であれば 3 回目を行い、規格以上に「薄く」なった（オーバーエッチングした）場合は不良品となる。

4.1.2 測定システム

ウェハー内の測定点は、SPC では 15 点、DOE とパラメータ設計では 5 点、MRA ではウェハー内全数とした。MRA は「ウェハー外周部の詳細評価」と「生産開始前の最終確認」の 2 つの理由で特に全数測定した。15 点の位置はエッチング槽にセットした状態で十字の垂直方向 11 点、水平方向 5 点（中心点は重複）である。これは垂直方向が液流や温度勾配の方向で、水平方向よりばらつきが大きいと判断したことによる。5 点の位置は十字の「上下左右中」である (Fig2 参照)。

測定器は非接触光学式の厚さ測定器で、自動及び手動いずれの測定も可能である。自動測定時の測定精度はダイアフラム厚の規格に対して十分であることが確認されているが、作業者が目視で焦点を合わせその時の位置座標からダイアフラム厚を測定する手動測定では、精度の確認がされておらず測定システムの評価・分析が必要である。

5. 工程分析

5.1 工程能力/工程性能分析(SPC)

エッチング後の 12 枚のウエハーのダイアフラム厚さについて、ウエハー内 15 点の平均 (Xbar) と標準偏差 (s) を SPC 出力として Fig3 に示す。12 枚のウエハーはバッチ#1 から#4 の 4 回のバッチ作業で各バッチ 2~4 枚処理したものである。横軸の項目名はバッチ No - 処理 No を表す。

Xbar のグラフでは (規格中心値-測定値) が表示され、ウエハー間とバッチ間のばらつきを総合した「群間変動」が読み取れる。中心 0 より上がエッチング不足 (アンダーエッチ)、下がエッチング過剰 (オーバーエッチ) である。12 枚の平均が -0.9 であることより全体としてオーバーエッチの傾向にあるが、特に 4-2, 4-3 は明らかなオーバーエッチである。調査の結果、温度と濃度の僅かな変化に対応できなかったことが原因と判明した (詳細は省略)。また箱ひげ図とデータプロットからウエハー内の外れ値がアンダーエッチ側にある (レートが小さい) ことがわかる。調査の結果、レートの小さい場所はウエハー外周部であることも確認した。

s のグラフは「群内変動」を表しており、その平均値(CL)は 1.3 である。「管理図」の場合 s のデータ(CL)で Xbar の管理(UCL, LCL)を行うが、本件は「管理」ではなく「分析」であること、「群内」はウエハー内、「群間」はウエハー間とバッチ間の総合、と定義したことから UCL, LCL を「管理限界線」ではなく 1 つの「評価指標」と考えた。即ち、群内変動に比べ群間変動は非常に大きいと評価した。群間変動、即ちウエハー間とバッチ間ばらつきの改善が最優先課題となる。

次にヒストグラムを分析する。ここにはダイアフラム厚さの上限下限規格と全データの分布が示され、中心に偏り (-0.9) があり規格外れが多数ある。最後に偏りを考慮した工程能力指数 Cpk と工程性能指 Ppk を考察すると、Cpk=1.024, Ppk=0.407 である。Cpk はまずまずであるが Ppk は不十分である。両者は大きく異なり、このことから群間変動が大きいことがわかる。

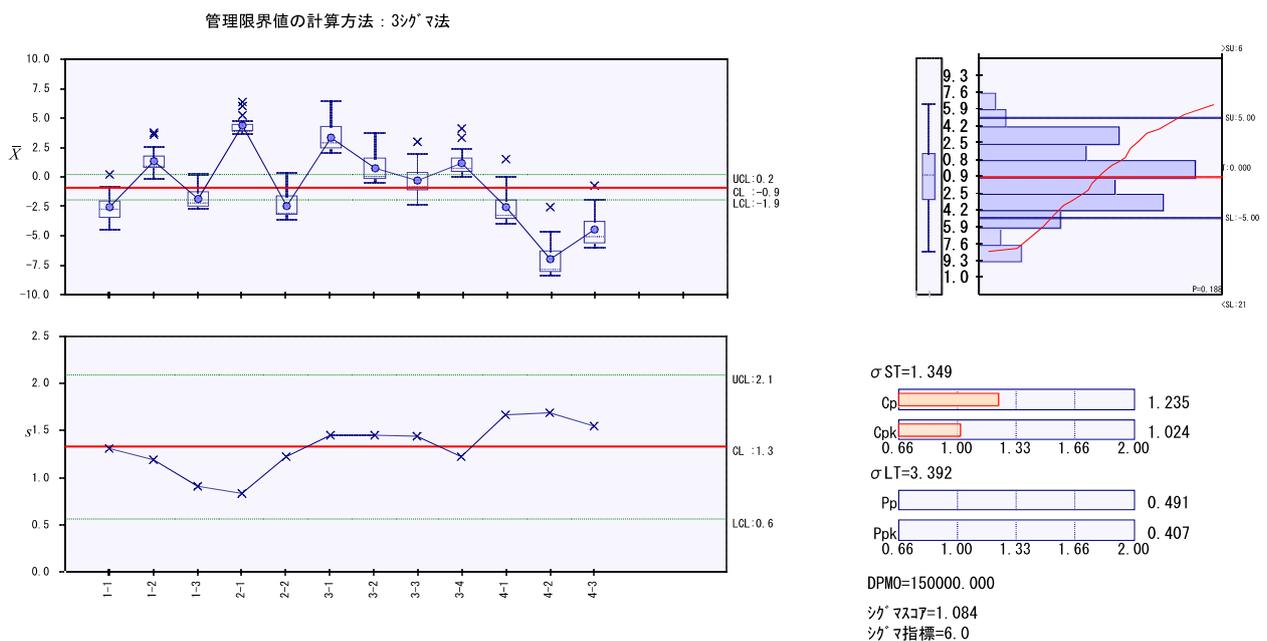


Fig3 工程改善前の SPC 出力

5.2 測定システム分析 (MSA)

ダイヤフラム厚測定器 (Gage) を手動測定で使用する場合の繰返し性 (Repeatability) と再現性 (Reproducibility) を MSA のゲージ R&R (GRR) で評価した。サンプル (パーツ) はチップを使用し、ダイヤフラム厚の規格下限, 中心, 上限付近から各 4 個, 計 12 個準備し, 2 人の評価者が 2 回ずつ測定した。結果を Fig4-1 から 4-3 に示す。繰返し性とパーツ×評価者の変動が大きく, ゲージ R&R は条件付き合格となった。手動測定は必要最小限にすべきことが確認できた。

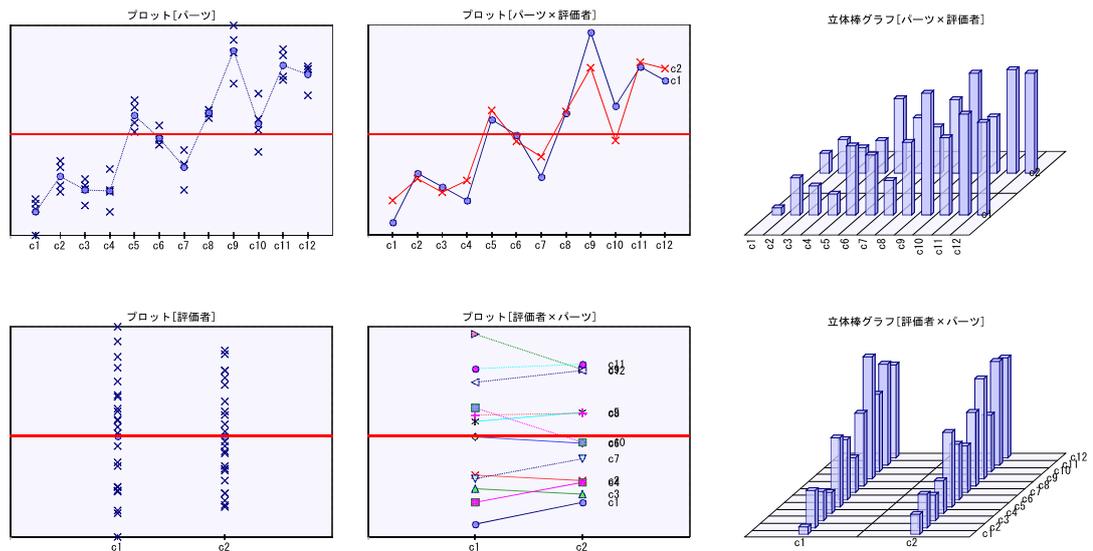


Fig4-1 12 個のパーツ, 2 人の評価者, 2 回測定でのデータプロット

	分散成分	標準偏差	90%信頼限界		%全変動	%寄与率
			下限値	上限値		
1	繰返し性	1.29	1.05	1.70	26.7	7.1
2	再現性	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0
3	パーツ×評価者	0.76	0.00	1.69	15.8	2.5
4	ゲージR&R	1.50	1.46	1.46	31.0	9.6
5	パーツ	4.60	2.66	7.81	95.1	90.4
6	合計	4.84			100.0	100.0

Fig4-2 ANOVA 法によるゲージ R&R

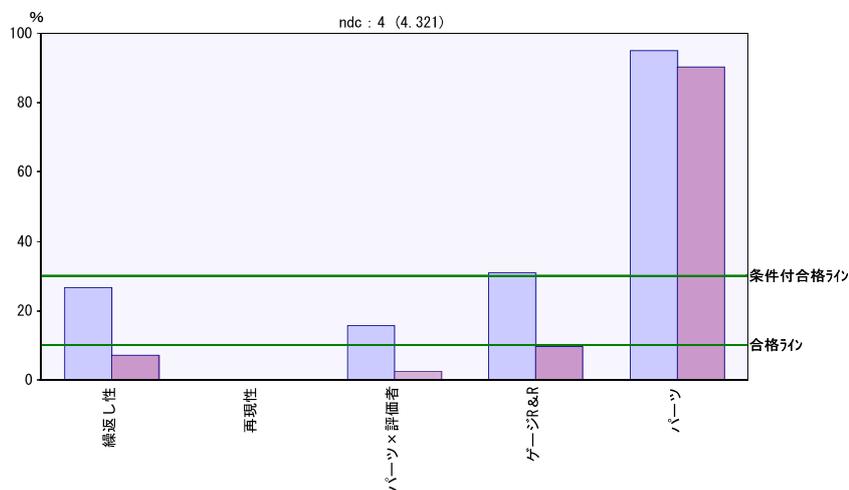


Fig4-3 ゲージ R&R グラフ

5.3 計測・制御システムの分析（固有技術）

エッチング装置内の計測・制御システムを Fig5-1 から 5-3 に示す。エッチング液はポンプ（P）により循環しており、温度（T）、濃度（C）、流量（F）が Fig5-1 の位置で計測されている。

エッチングレートは温度と濃度によって決まることが固有技術の知見から既知であり、温度と濃度の計測・制御システムが工程能力、特にバッチ間ばらつきの優劣を左右すると考えられる。これは SPC の分析からも既知である。流量は直接エッチングレートに関係しないが、ウエハー内とウエハー間のばらつきに影響を与える可能性がある。しかしポンプが安定しているという前提で現状では積極的な制御はしていない。流量がエッチングに与える影響を評価する必要がある。

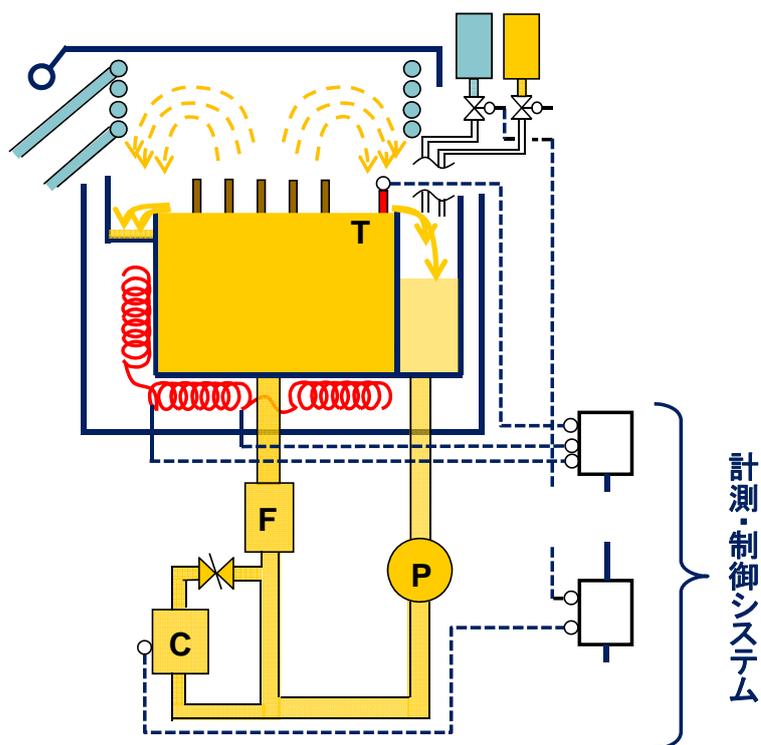


Fig5-1 エッチング装置内の計測・制御システム



Fig5-2 温度コントローラ



Fig5-3 濃度計

6. 実験計画法 (DOE) による要因の絞り込み

ウェハー内のエッチレートについて、温度(A)、濃度(B)、流量(C)を2水準、ウェハー内位置(D)を5水準とした要因配置実験を実施した。計画と結果を Fig6-1 から 6-5 に示す。温度、濃度、その交互作用が有意であり流量、位置の影響は小さいことから、流量については現状のシステムで問題なしと判断した。温度と濃度が有意であることは固有技術の見解とも一致している。5 点の位置は有意でないが、5 点のばらつきは温度、濃度、流量と関係があるか更に次項で分析する。

ラン	A	B	C	D	変数6
s1	1	1	1	1	-
s2	1	1	1	2	-
s3	1	1	1	3	-
s4	1	1	1	4	-
s5	1	1	1	5	-
s6	1	1	2	1	-
s7	1	1	2	2	-
s8	1	1	2	3	-
s9	1	1	2	4	-
s10	1	1	2	5	-
s11	1	2	1	1	-
s12	1	2	1	2	-
s13	1	2	1	3	-
s14	1	2	1	4	-
s15	1	2	1	5	-
s16	1	2	2	1	-
s17	1	2	2	2	-
s18	1	2	2	3	-
s19	1	2	2	4	-
s20	1	2	2	5	-
s21	2	1	1	1	-
s22	2	1	1	2	-
s23	2	1	1	3	-
s24	2	1	1	4	-
s25	2	1	1	5	-
s26	2	1	2	1	-
s27	2	1	2	2	-
s28	2	1	2	3	-
s29	2	1	2	4	-
s30	2	1	2	5	-
s31	2	2	1	1	-
s32	2	2	1	2	-
s33	2	2	1	3	-
s34	2	2	1	4	-
s35	2	2	1	5	-
s36	2	2	2	1	-
s37	2	2	2	2	-
s38	2	2	2	3	-
s39	2	2	2	4	-
s40	2	2	2	5	-

Fig6-1 要因配置実験計画

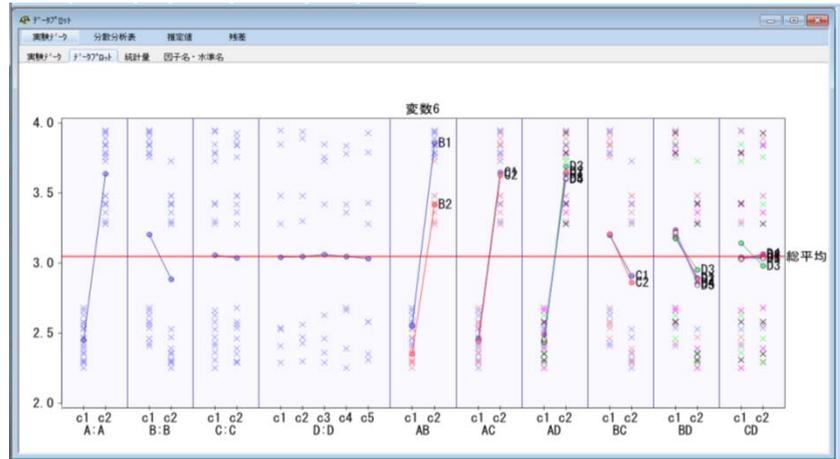


Fig6-2 データプロット

No	要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定 P値 (上側)	σ^2 点推定値	下限(90%)	上限(90%)
1	A:A	14.0304	1	14.0304	1062.708	**	0.000		
2	B:B	1.0208	1	1.0208	77.319	**	0.000		
3	AB	0.1452	1	0.1452	10.998	**	0.004		
4	C:C	0.0034	1	0.0034	0.259		0.617		
5	AC	0.0000	1	0.0000	0.000		0.989		
6	BC	0.0065	1	0.0065	0.493		0.482		
7	D:D	0.0041	4	0.0010	0.078		0.988		
8	AD	0.0265	4	0.0066	0.502		0.734		
9	BD	0.0346	4	0.0087	0.656		0.631		
10	CD	0.0521	4	0.0130	0.987		0.441		
11	誤差	0.2244	17	0.0132			0.0132	0.0081	0.0259
12	計	15.5482	39						

[検定結果] **: 1%有意 * : 5%有意 空白 : 有意差なし

Fig6-3 分散分析表

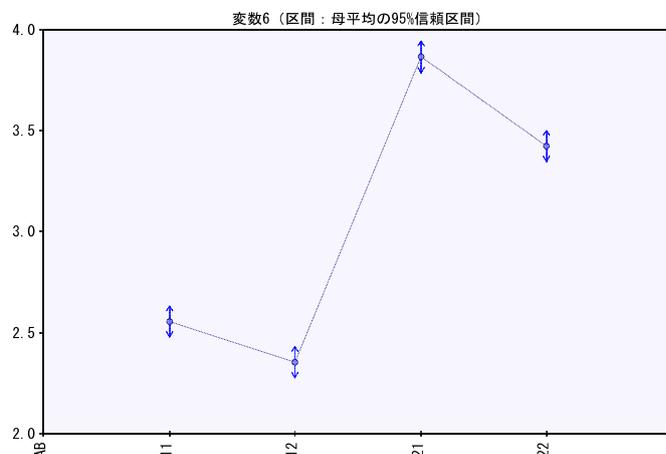


Fig6-4 温度(A)と濃度(B)の組合せとエッチレート

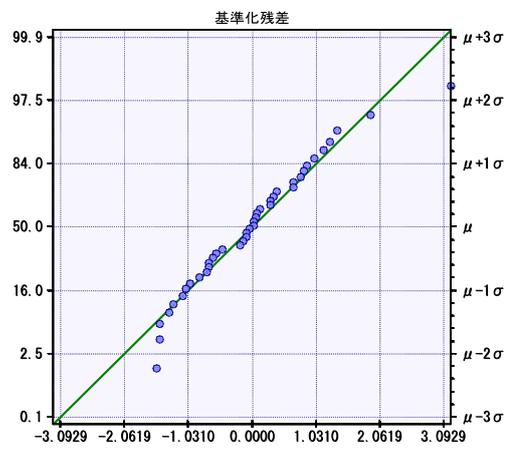


Fig6-5 残差の正規確率プロット

7. パラメータ設計（望目特性のSN比）による分析

6項のDOEデータを品質工学の視点からみると、温度(A)、濃度(B)、流量(C)の制御因子が誤差因子であるウェハー内位置のエッチレートの平均（感度；m）とばらつき（SN比）に与える影響を評価することになる。その結果を要因効果図としてFig7-1に示す。またSN比と感度の分散分析表を7-2、7-3に示す。感度についてはDOEの結果と一致し、温度と濃度の主効果と交互作用が有意であることが要因効果図と分散分析表からわかる。ばらつき（SN比）についてはDOEの分析結果はないが、パラメータ設計では、流量が大きく影響していることが判明した。また温度、濃度、その交互作用は感度、SN比いずれにも影響しているが、流量は感度には影響していないことも確認できた。以上の分析結果から、流量はエッチレートの平均（感度）に影響せず、それ故にバッチ間ばらつき（群間変動の一部）に影響を与えないため、計測・制御システムに加える必要はないとしたDOEの結論に変更はない。しかし、流量はウェハー内ばらつき（群内変動）に影響することから、ホルダやキャリアとの関係の中でさらに分析する必要がある。

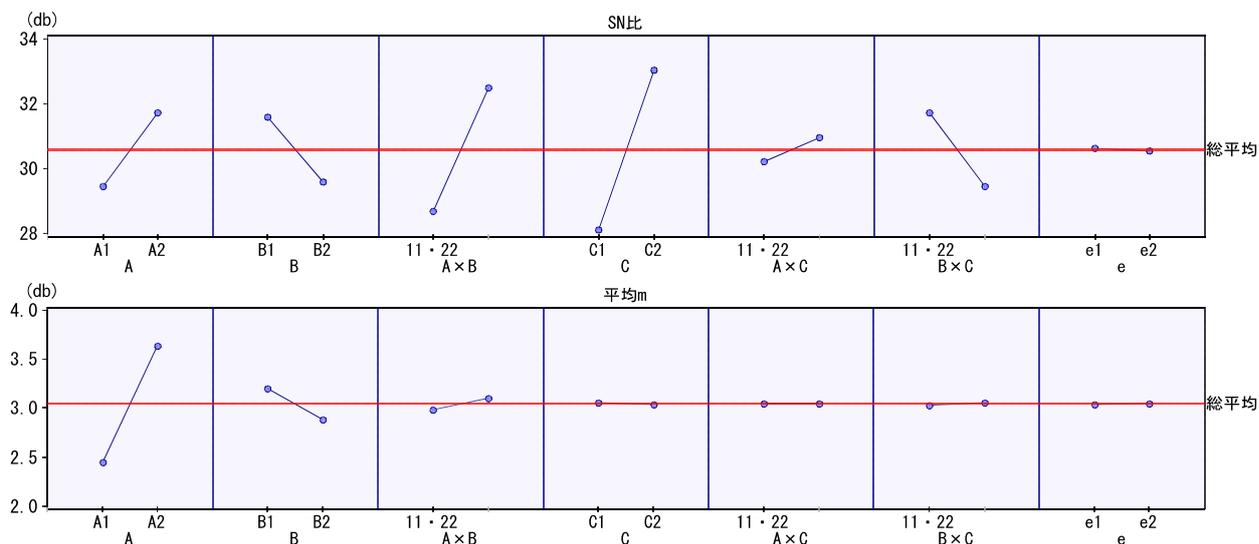


Fig7-1 SN比（上段）と感度（下段）の要因効果図

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値（上側）	寄与率
A	10.450	1	10.450	19.799	*	0.047	9.184
B	8.070	1	8.070	15.291		0.060	6.982
C	48.939	1	48.939	92.726	*	0.011	44.812
A×B	29.255	1	29.255	55.431	*	0.018	26.592
B×C	10.262	1	10.262	19.443	*	0.048	9.010
誤差	1.056	2	0.528				3.420
計	108.031	7	15.433				

Fig7-2 SN比の分散分析表（プーリング後）

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定	P値（上側）	寄与率
A	2.806	1	2.806	4551.631	**	0.000	92.232
B	0.204	1	0.204	331.161	**	0.000	6.692
A×B	0.029	1	0.029	47.105	**	0.002	0.934
誤差	0.002	4	0.001				0.142
計	3.042	7	0.435				

Fig7-3 感度の分散分析表（プーリング後）

8. 重回帰分析 (MRA) による治具の最適化

パラメータ設計の分析結果及び固有技術の視点から、ウエハー内とウエハー間のばらつきを押しやるためには、ホルダとキャリヤを改良し「液の流れ」を変える必要がある。ホルダが厚いとウエハー外周部の液流が乱れ、ばらつきが大きくなると予想したからである。またホルダを下から見た流路の断面積を流路断面積と呼ぶと、ホルダ数が多いと断面積は小さく、ホルダ数が少ないと断面積は大きくなる。断面積が大きいほど液の流れは整流化さればらつきは小さくなると考えた。概要を Fig7-1 に示す。そこでホルダの厚さ (Holder) と流路断面積 (F・Sect) がウエハー内のばらつき σ に与える影響を調査するため、Holder と F・Sect を変えてエッチングしたサンプルを 18 個用意し、その時の σ を測定した。結果を Fig8-2 から 8-4 に示す。 σ で解析した場合、寄与率(R^2)と自由度二重調整寄与率(R^{**2})はそれぞれ 0.506, 0.381 とやや小さい。この時 Holder と F・Sect の偏回帰係数はそれぞれ 0.021, -0.020 である(Fig8-5)。対数変換をして $\ln \sigma$ で解析すると R^2 と R^{**2} はそれぞれ .564, 0.454 に改善され、Holder と F・Sect の偏回帰係数はそれぞれ 0.020, -0.024 となる(Fig8-6)。Holder の厚さが薄い (小さい) ほど、また F・Sect が大きい (ホルダ数が少ない) ほど σ が小さくなるという仮説が検証された。この 3D グラフを Fig8-7 に示す。

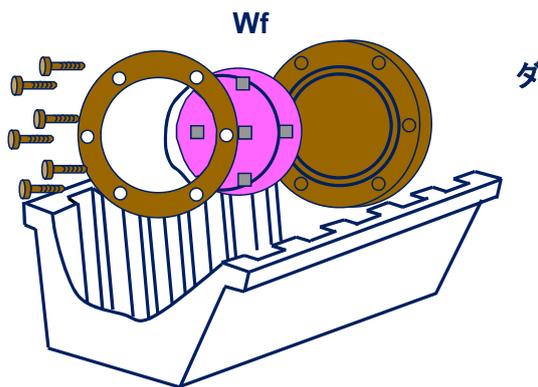


Fig8-1 ホルダとキャリヤの概要

サン	Holder	F・Sect	σ	$\ln \sigma$
s1	10.0	14.0	0.79	-0.236
s2	10.0	24.0	0.68	-0.386
s3	10.0	7.0	1.31	0.270
s4	10.0	12.0	1.03	0.030
s5	10.0	7.0	1.21	0.191
s6	10.0	12.0	0.78	-0.248
s7	3.0	14.0	0.73	-0.315
s8	3.0	24.0	0.75	-0.288
s9	3.0	7.0	1.08	0.077
s10	3.0	12.0	0.96	-0.041
s11	3.0	7.0	0.88	-0.128
s12	3.0	12.0	0.74	-0.301
s13	0.6	14.0	0.64	-0.446
s14	0.6	24.0	0.61	-0.494
s15	0.6	7.0	1.00	0.000
s16	0.6	12.0	0.75	-0.288
s17	0.6	7.0	0.60	-0.357
s18	0.6	12.0	0.96	-0.041

Fig8-2 Holder, F・Sect と σ , $\ln \sigma$ のデータ

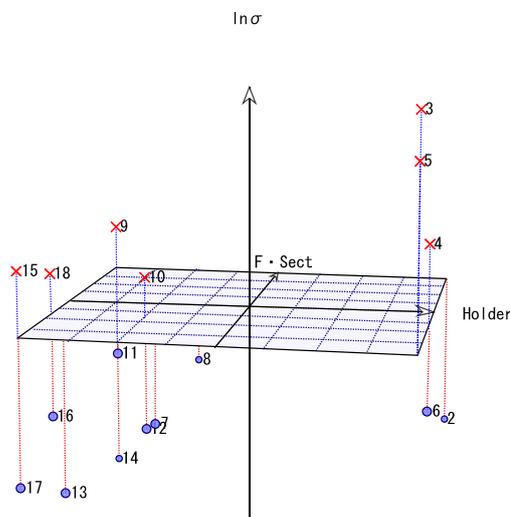


Fig8-3 Holder を主にした $\ln \sigma$ との関係

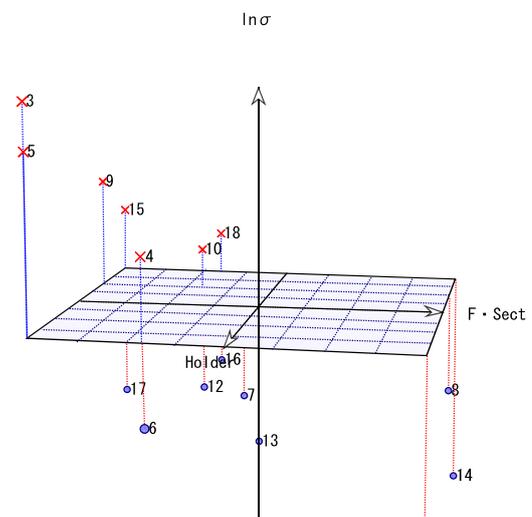


Fig8-4 F・Sect を主にした $\ln \sigma$ との関係

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R ²	R** ²		
σ	0.711	0.508	0.440	0.381		
	残差自由度	残差標準偏差				
	15	0.154				
vNo	説明変数名	分散比	P値 (上側)	偏回帰係数	標準偏回帰	トレランス
0	定数項	110.5854	0.000	1.026		
1	Holder	5.1085	0.039	0.021	0.410	1.000
2	F・Sect	10.2451	0.006	-0.020	-0.581	1.000

	定数項	Holder	F・Sect
回帰式	Y= 1.026	+0.021 X1	-0.020 X2

Fig8-5 目的変数 σ の重回帰分析結果

目的変数名	重相関係数	寄与率R ²	R ²	R** ²		
$\ln \sigma$	0.751	0.564	0.506	0.454		
	残差自由度	残差標準偏差				
	15	0.155				
vNo	説明変数名	分散比	P値 (上側)	偏回帰係数	標準偏回帰	トレランス
0	定数項	0.2508	0.624	0.049		
1	Holder	4.9648	0.042	0.020	0.380	1.000
2	F・Sect	14.4542	0.002	-0.024	-0.648	1.000

	定数項	Holder	F・Sect
回帰式	Y= 0.049	+0.020 X1	-0.024 X2

Fig8-6 目的変数 $\ln \sigma$ の重回帰分析結果

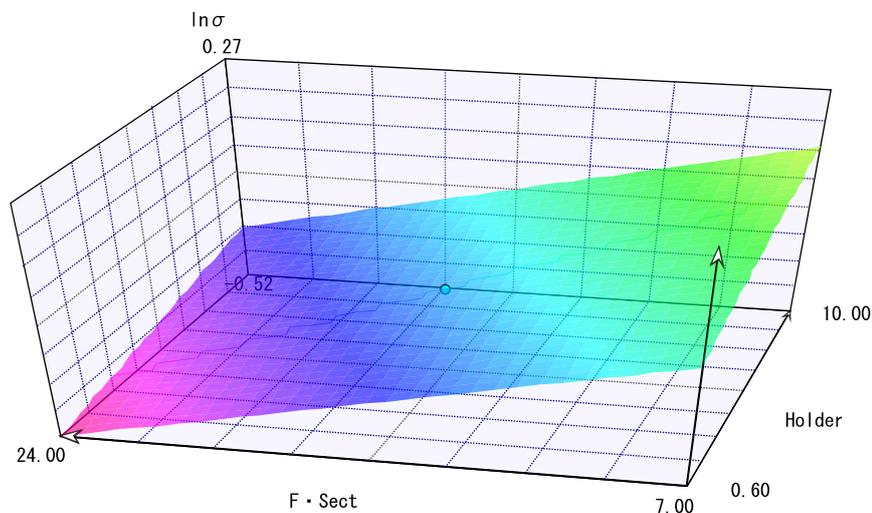


Fig8-7 Holder 及び F・Sect と $\ln \sigma$ との関係を示す 3D グラフ

9. 改善

バッチ間ばらつきを抑える目的で計測・制御システムによる温度と濃度の管理レベルを高め、ウエハー内、ウエハー間ばらつきを抑える目的でホルダの改善と処理数の最適化による流路の確保を実施した。主に前者の改善により目標合わせの精度が向上し、従来は2段階で実施していたエッチング作業を1回で行うことが可能となり QCD の C (作業費) と D (リードタイム) は大きく改善した。総合的な改善による Q (ばらつきの改善) の確認については次項で詳細を説明する。

10. 効果の確認

改善前後の SPC 出力を Fig9-1, 9-2 に示す. ばらつきの指標である σ ST が 1.349 から 0.627 に, σ LT が 3.392 から 1.355 に減少し, その結果 Cpk が 1.024 から 2.025 に Ppk が 0.407 から 0.937 に改善されたことがわかる. Cpk は十分に改善されたが, Ppk はまだ改善の必要がある.

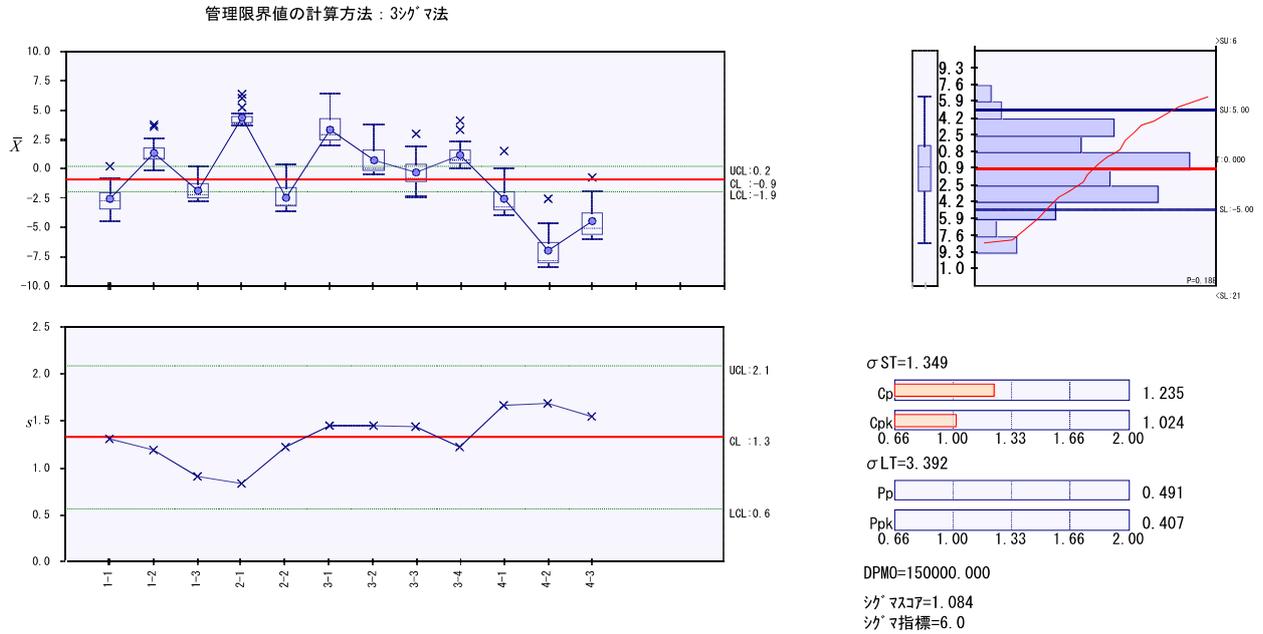


Fig9-1 改善前の SPC 出力

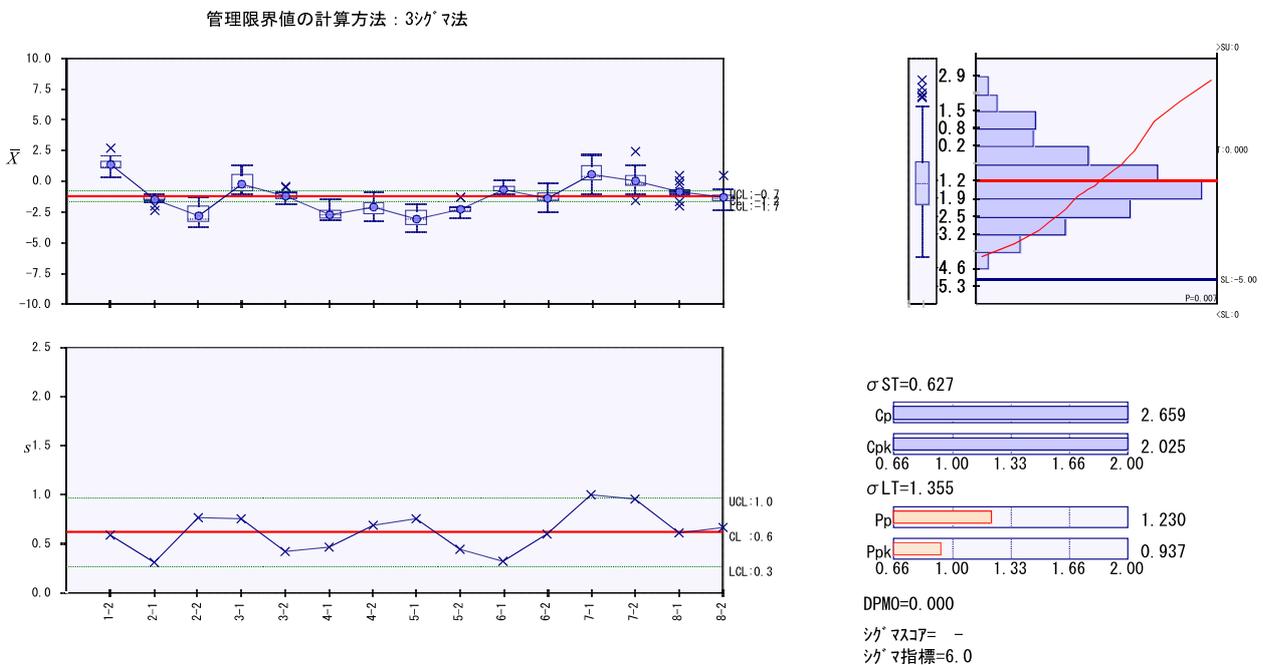


Fig9-2 改善後の SPC 出力

11. おわりに

ダイアフラムの厚さはセンサーの感度や耐圧等に大きな影響を与える重要な特性値であるが、そのばらつきを少なくすることが課題であった。本発表では、計測・制御技術と、統計手法を活用して、ウエハー内、ウエハー間、バッチ間ばらつきを低減させたこと、その結果として工程能力が向上したこと、作業性も向上したこと、総合的に QCD が改善したことを発表した。特にウエハー内ばらつきの改善は十分に達成できたと考えられる。今後の課題はウエハー間、バッチ間ばらつきの更なる改善、その結果として工程能力の更なる向上である。

今回の取組では統計解析ソフト StatWorks を活用した。改善に有効な各種手法が備わっており、理解し易い表やグラフ、解析に必要な統計量が出力されその有効性を確認できた。

最後に StatWorks の操作方法、解析手法について懇切丁寧にご指導頂いた（株）日本科学技術研修所数理事業部の犬伏氏に深く感謝致します。

本著作物は原著作者の許可を得て、株式会社日本科学技術研修所（以下弊社）が掲載しています。本著作物の著作権については、制作した原著作者に帰属します。

原著作者および弊社の許可なく営利・非営利・イントラネットを問わず、本著作物の複製・転用・販売等を禁止します。

所属および役職等は、公開当時のものです。

■公開資料ページ

弊社ウェブページで各種資料をご覧ください <http://www.i-juse.co.jp/statistics/jirei/>

■お問い合わせ先

(株)日科技研 数理事業部 パッケージサポート係 <http://www.i-juse.co.jp/statistics/support/contact.html>