

「海外における科学的手法の現状と展望」

タグチメソッドによる機能のロバストネスの最適化

エポックメイキング事例を通して・・・



TRIZ Symposium

2014年 9月12日(金)

Shin Taguchi (田口伸)

CTO, ASI Consulting Group LLC

President, American Supplier Institute, Inc.

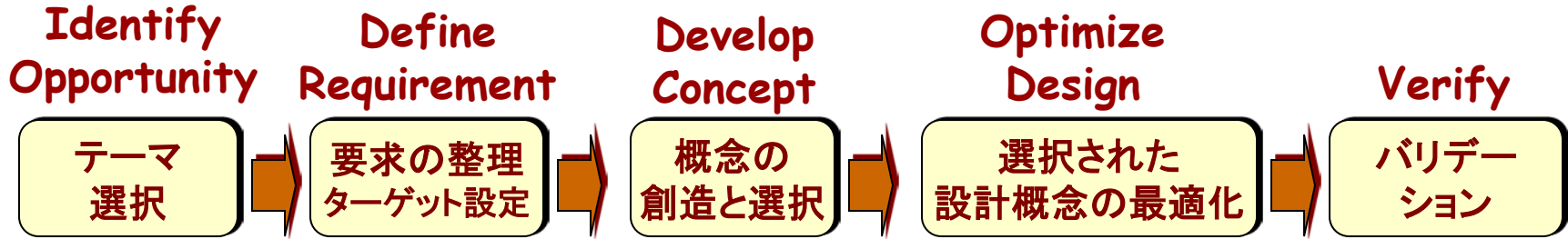
Bingham Farm, Michigan USA

shin.taguchi@asiusa.com

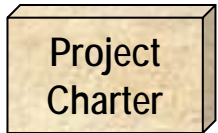


DFSS (Design for Six Sigma) のIDDOVプロセスのイメージ

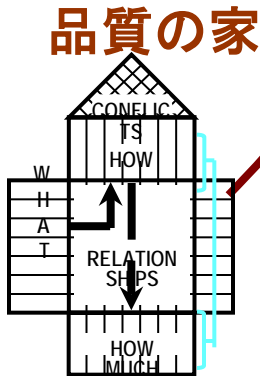
テーマごとに戦略をたてて必要なステップとツールを明確にし、プロジェクトマップを作成する。



テーマ選択



イノベーション!



戦略的ターゲット

Pugh (ピュー)

	C	A	2	4	6	8	10	M
C								
O								
D								
A								
T								
U								
I								
T								
D								
A								
T								
O								
B								
S								
T								
D								
A								
T								
O								
B								
S								
T								

TRIZ Axiomatic Design

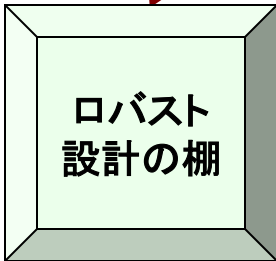
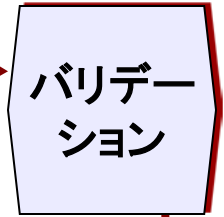
パラメータ設計 許容差設計

ロバストネスのアセスメントと最適化

- 理想機能とノイズの戦略による機能のロバストネスのアセスメント
- 直交表によるロバストネスの最適化

許容差の最適化

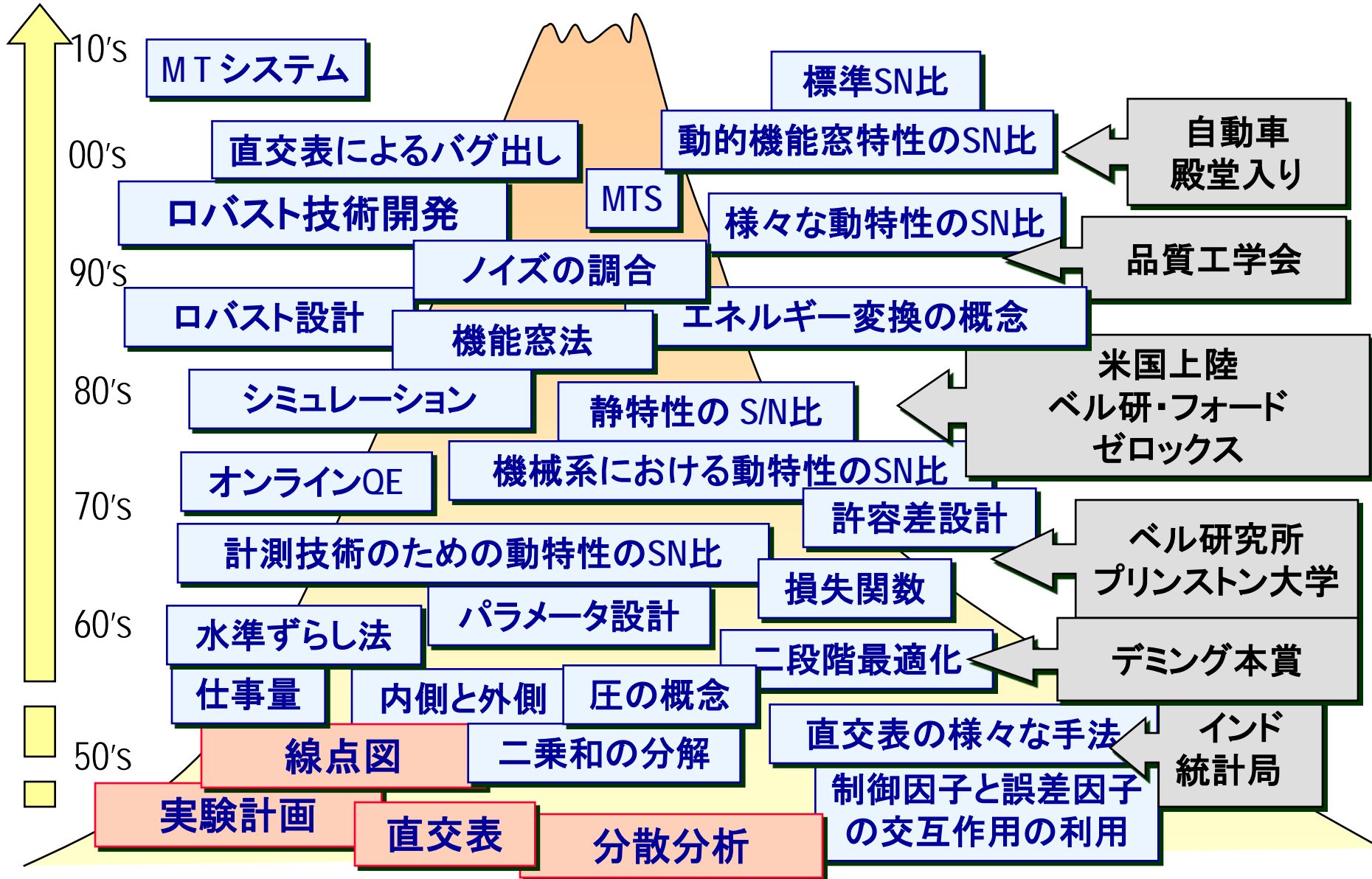
- 損失関数によるトレードオフ



品質工学のMTシステム、実験計画や Kriging (クリギング) などの様々な統計手法も目的に応じて使われている。



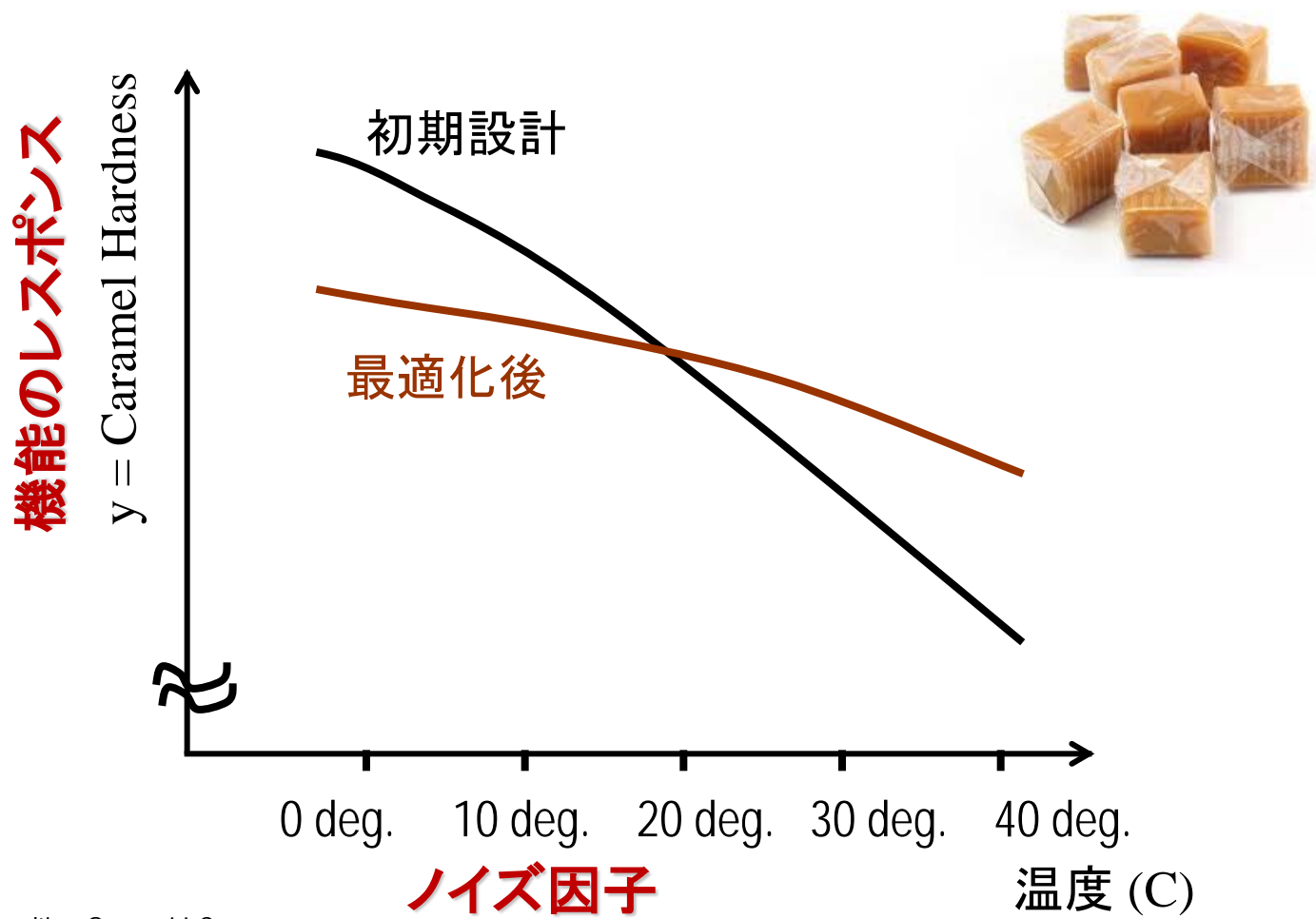
タグチメソッドの歴史





1948 Morinaga Company - Caramel Candy Hardness

制御因子とノイズ因子の交互作用を利用する。





ノイズが大問題

→ ノイズに対する対策は4種類しかない！

I. 無視する。

II. ノイズそのものを制御する。

Example: 標準化、管理図による工程管理、ポカヨケ、
従来の品質保証活動、許容差設計 Etc.

III. ノイズの影響を補正する。

Example: フィードバック制御、アダプティブ制御、
エンジン・コントロール、ABS、Etc.

IV. ノイズの影響を最小化

Example: **ロバストな設計概念の創造**
ロバストネスの最適化(パラメータ設計)

1950年代の電気通信研究所(ECL)

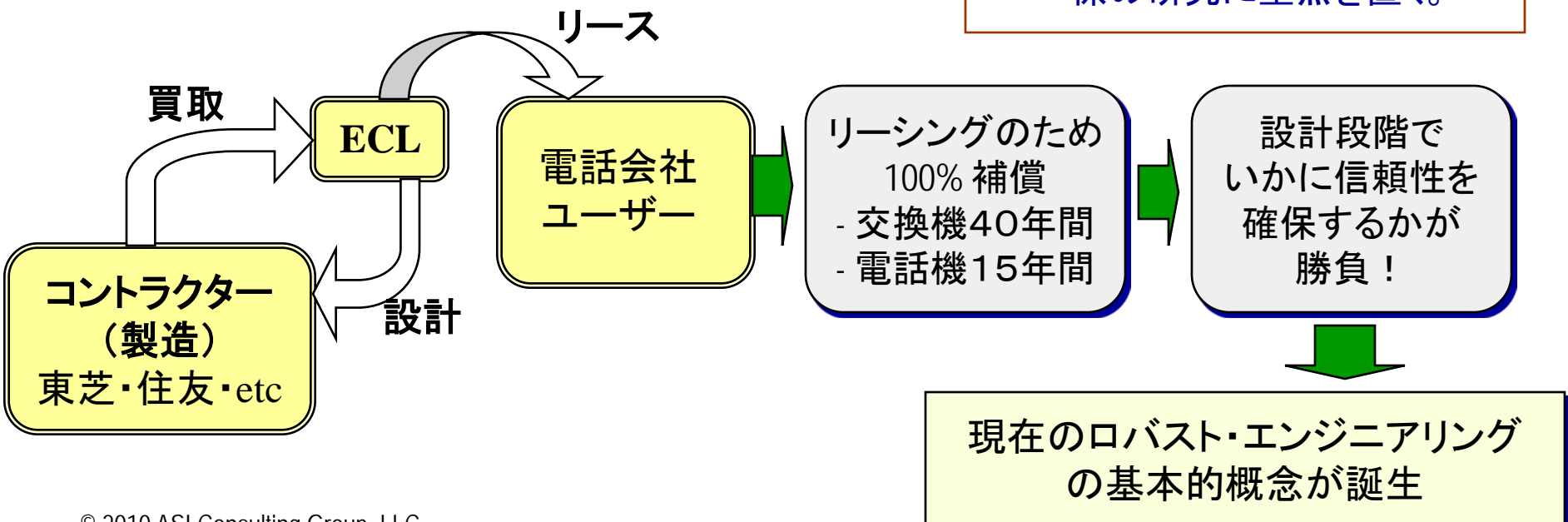
1950年電気通信研究所では、ベル研究所と競合してクロスバー交換機の開発を決める。ドクター・タグチはその年に入所。



クロス・バー交換機システムの開発

	予算	人員	期間	結果
ベル研	50	5	7年	開発失敗
通研	1	1	6年	要求満たす

- ECLはタグチメソッドの基礎的なアイデアを応用。これが現在ロバスト・エンジニアリング(品質工学)として身を結んでいる。
- ベル研究所は精密なモデルの追求と故障・不具合の因果関係の研究に重点を置く。

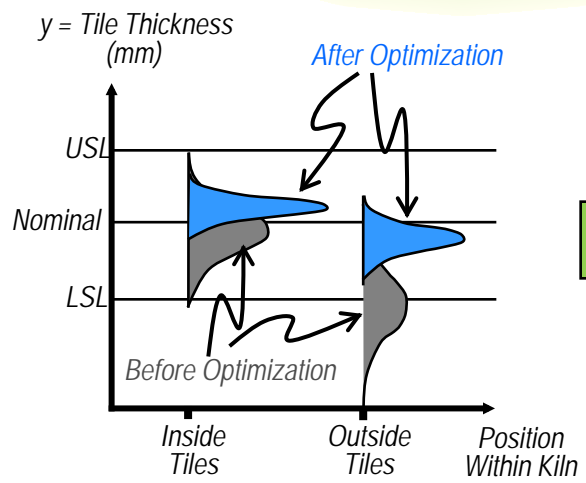
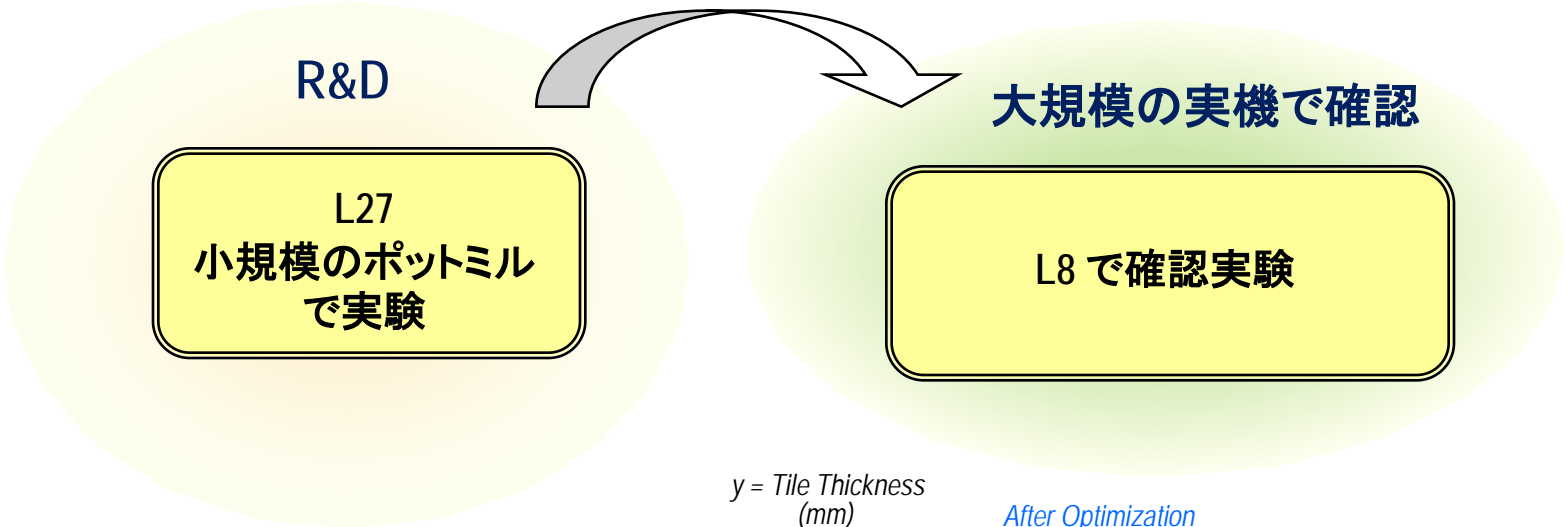




1953 伊奈製陶 (INAX) Tile Manufacturing Tunnel Kiln

小規模実験で再現性を得る

バラつきを減らせばスピードアップができる

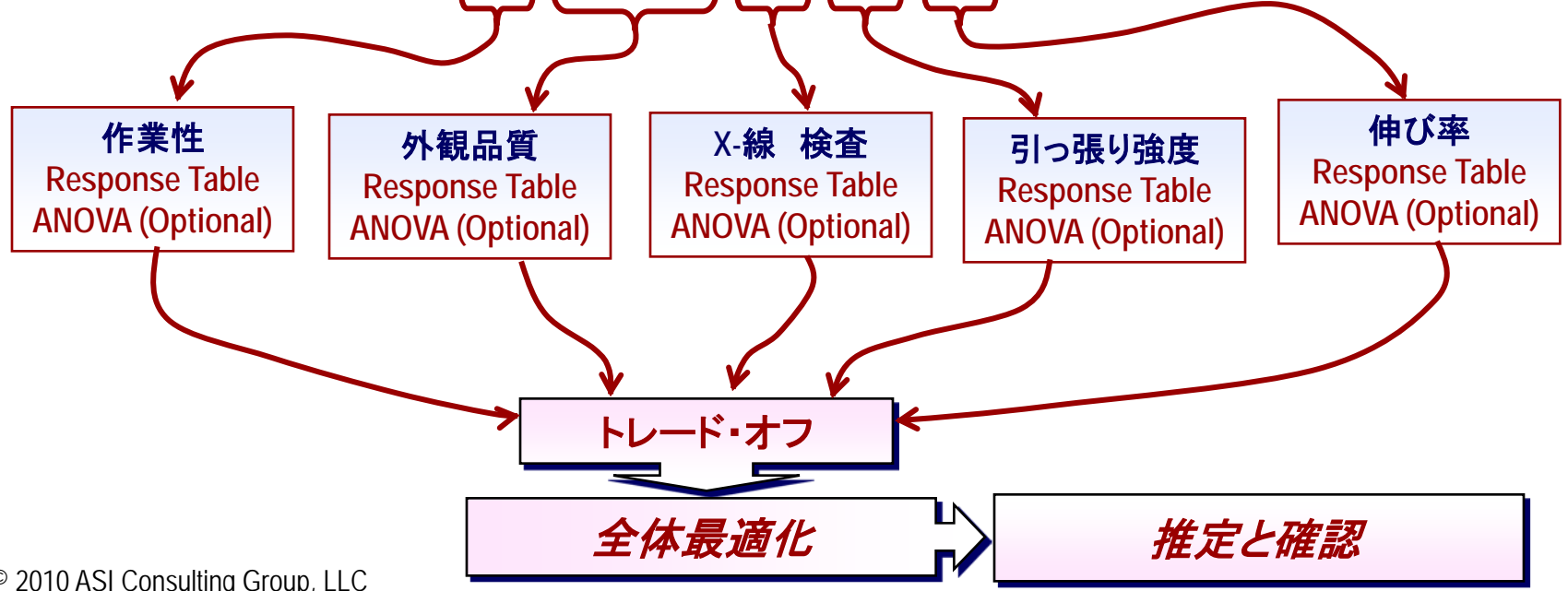


カートのスピードアップを達成！

L16 の実験計画で複数の要求を測りトレードオフによるバランスのとれた最適化

L16	A		A G		A											Work-ability	Appearance				X-Ray		Tensile Strength Kg/mm ²	Elongation %						
	x		x x		x												Face		Reverse											
	A	G	G	H	H	H	B	D	E	F	I	e	e	C	C		E	N	D	G	F	B			G	F	B	G	F	B
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	3	1	0	43.7	33.6	
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	3	1	0	40.2	40.2	
3	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	0	0	1	0	4	0	0	42.4	30.5	
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	0	1	0	0	2	2	0	44.7	23.7	
5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	2	2	0	42.4	34.7	
6	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	2	2	0	45.9	21.8	
7	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	0	0	0	1	2	2	0	42.4	24.8	
8	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	1	0	0	0	1	2	2	0	42.4	29.8	
9	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	1	0	0	3	0	1	42.4	33.7	
10	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	0	0	1	0	0	3	0	1	42.4	25.5	
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	0	0	1	0	0	1	3	0	42.4	36.9
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	0	1	0	0	0	1	3	0	42.4	29.0	
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	1	0	0	0	1	3	0	1	42.4	30.3	
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	0	0	1	0	0	1	3	0	1	39.0	39.0
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	0	1	0	0	1	0	1	3	0	42.5	27.9
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	0	1	0	0	1	0	4	0	0	46.5	40.8

勿論 現在ではこのやり方は奨励されない! 何故?



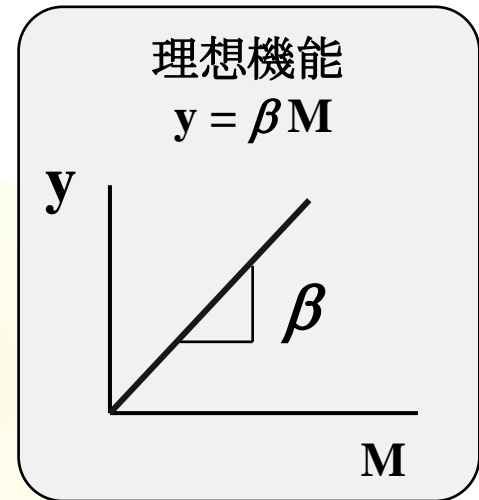
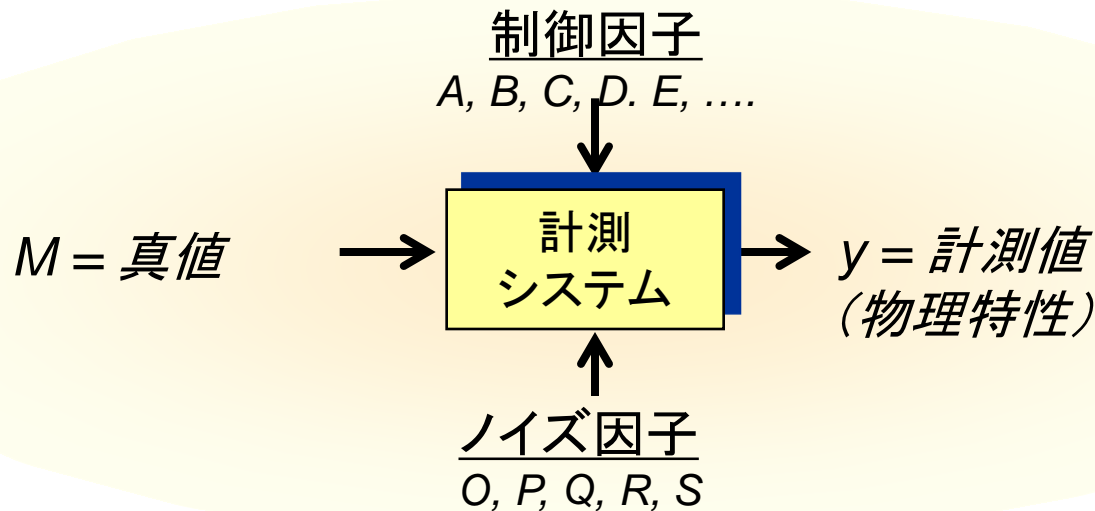
1960年代から 計量研究所、他

通商産業省工業技術院 計量研究所 (当時)



計測機能の理想機能

2 段階最適化



2 段階最適化

Step-1: 機能のバラツキの最小化

Step-2: β を1.000 に調整



ここでクイズを一つ！

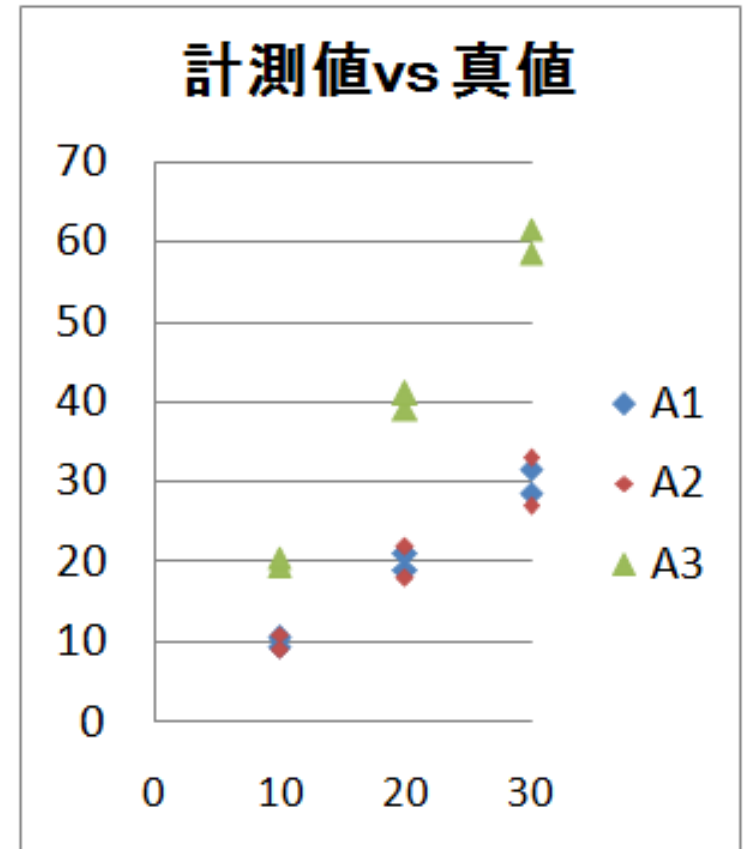
ヘルスメータの開発中の機能性評価で以下のデータを得た

信号M は真値、Nは調合誤差因子、

A1, A2, A3 でどれが一番ロバストか示せ、またその理由を述べよ。

	M1=10 Kg		M2=20Kg		M3=30Kg	
	N1	N2	N1	N2	N1	N2
A1	9.9	10.1	19.8	20.2	29.7	30.3
A2	9.8	10.2	19.6	20.4	29.4	30.6
A3	19.9	20.1	39.8	40.2	59.7	60.3

答 _____





機能を測る

マルバツ試験

SN比は機能の
ロバストネスのモノサシ

Aさんの回答

正解

	True	False
True	100%	0%
False	0%	100%

$$S / N = +\infty \text{ dB}$$

100点

Bさんの回答

正解

	True	False
True	50%	50%
False	50%	50%

$$S / N = -\infty \text{ dB}$$

0点

Cさんの回答

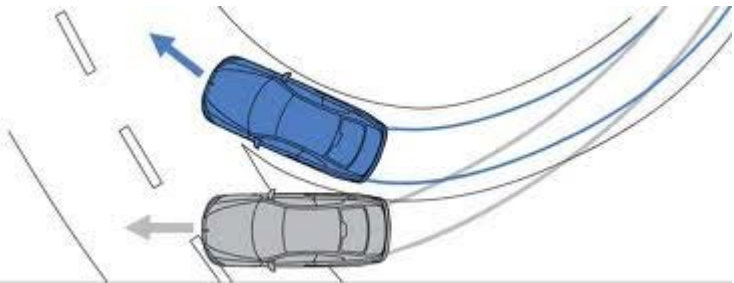
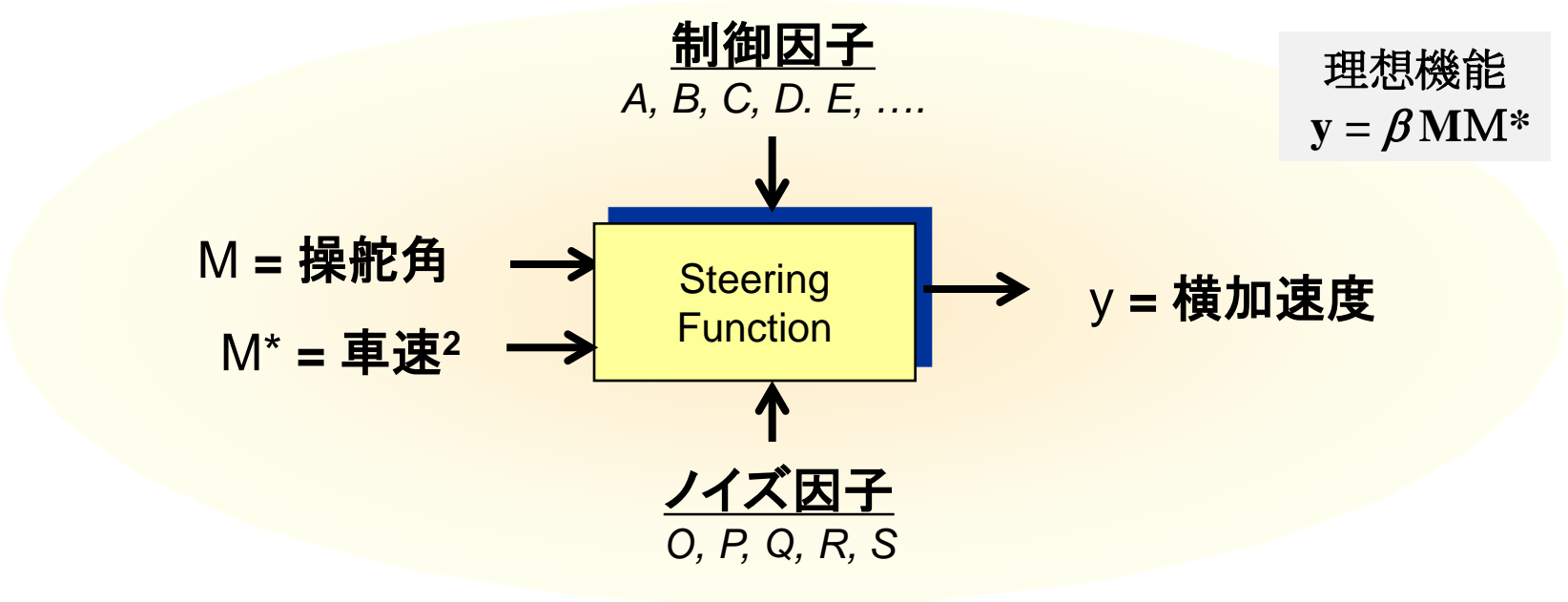
正解

	True	False
True	0%	100%
False	100%	0%

$$S / N = +\infty \text{ dB}$$

100点

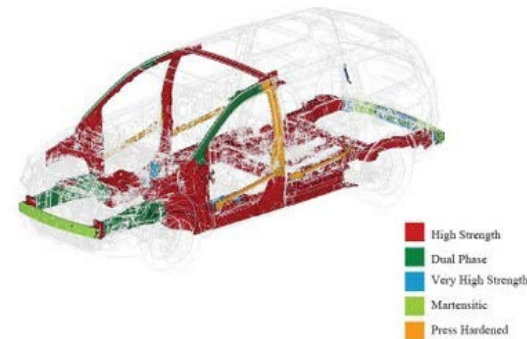
機械系における最初の理想機能によるSN比



当時は旋回半径を出力特性とし、
車速は標示因子にしていた。



1979 トヨタ車体 ーバンボディ

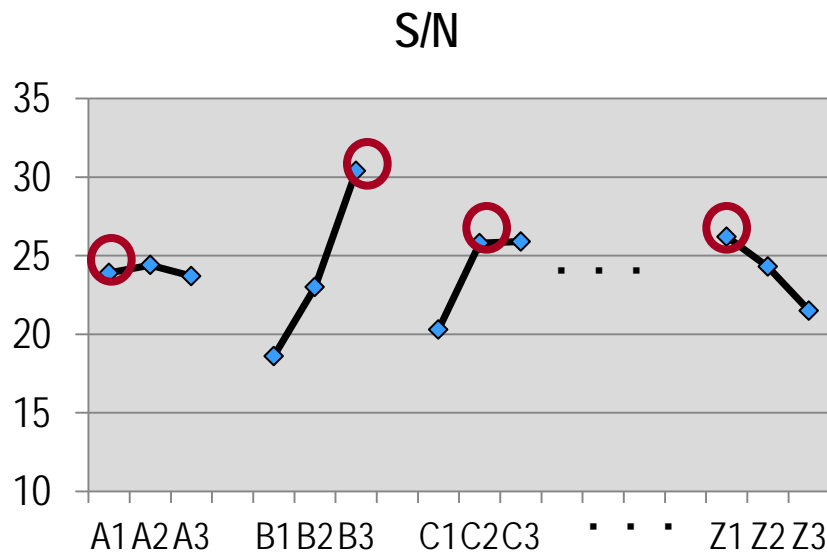


機能の最適化でコスト・重量の低減

制御因子を戦略的に使う

制御因子と水準

	Level-1	Level-2	Level-3
部品-A	薄い	現行	厚い
部品-B	軽い	現行	重い
部品C	薄い	現行	厚い
::	::	::	::
部品-Z	安価	現行	高価



機能(衝突性能)の理想機能の
SN比



性能・コスト・重量すべての改善にチャレンジ!

内側の直交表に設計スペース、 外側でノイズを振って機能を測る

制御因子を直交表に割り付け、直交表の設計条件それぞれで、
ノイズを振って理想機能を測りロバストネスをSN比で評価する！

設計

	A	B	C	D	E	e	e	e	Outer Array
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	
4	1	2	1	1	2	2	2	3	
5	1	2	2	2	1	1	1	1	
6	1	2	3	3	2	2	2	2	
7	1	3	1	1	3	3	3	3	
8	1	3	2	2	1	1	1	1	
9	1	3	3	3	2	2	2	2	
10	2	1	1	1	1	1	1	1	
11	2	1	2	2	1	1	1	1	
12	2	1	3	3	2	2	2	2	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	

内側直交表
設計スペースを網羅したい

機能

外側配置
理想機能とノイズ

		V1	V2	V3	V4	V5
N1	P1	y1	y2	y3	y4	y5
	P2	y6	y7	y8	y9	y10
	P3	y11	y12	y13	y14	y15
	P4	y16	y17	y18	y19	y20
N2	P1	y21	y22	y23	y24	y25
	P2	y26	y27	y28	y29	y30
	P3	y31	y32	y33	y34	y35
	P4	y36	y37	y38	y39	y40

1980 米国上陸

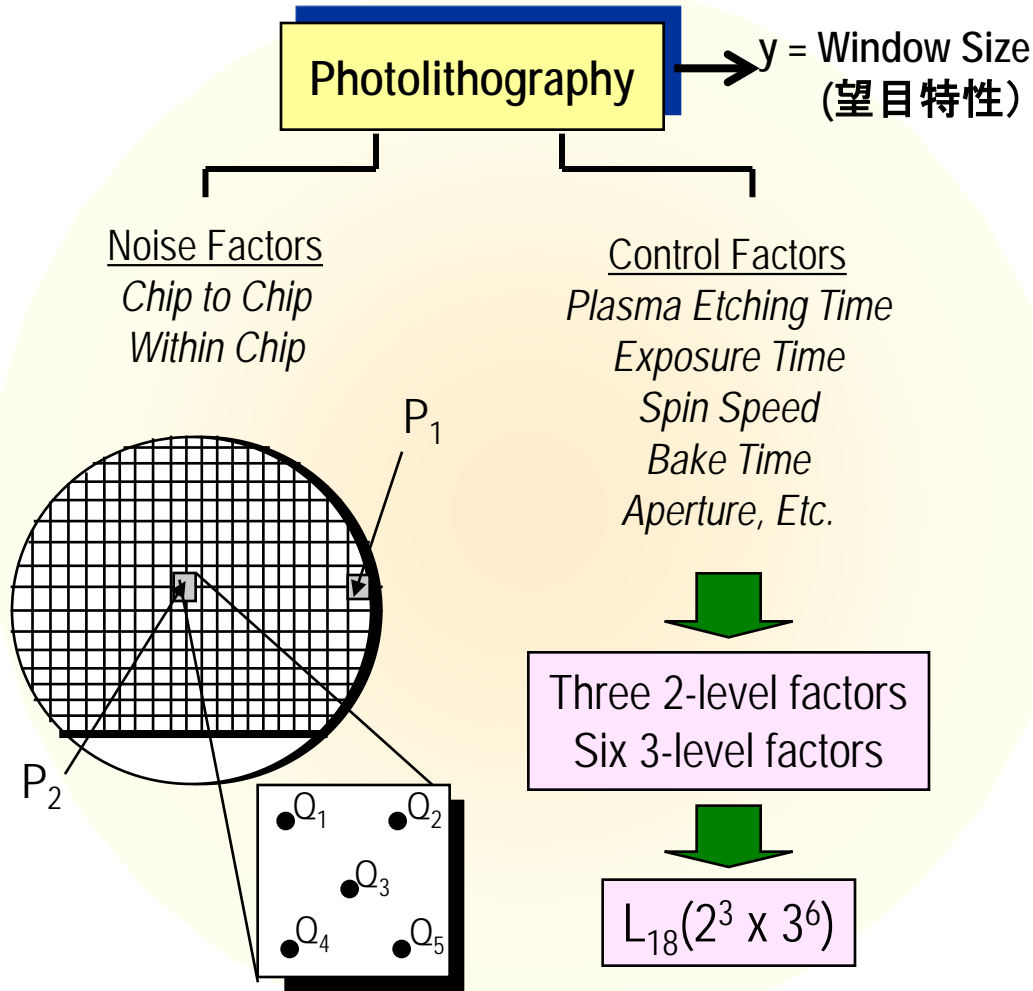


デミング博士 吳玉印氏 田口玄一博士
1979年デミング博士の自宅にて、撮影

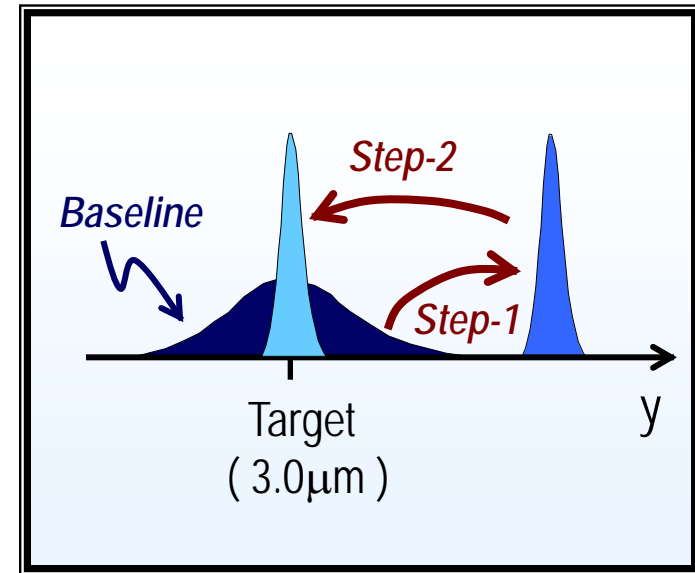
1980 年ベル研究所の256kのフォトリソグラフィ

最適化 VS. モデリング

2 段階最適化



Apply
2-step Optimization

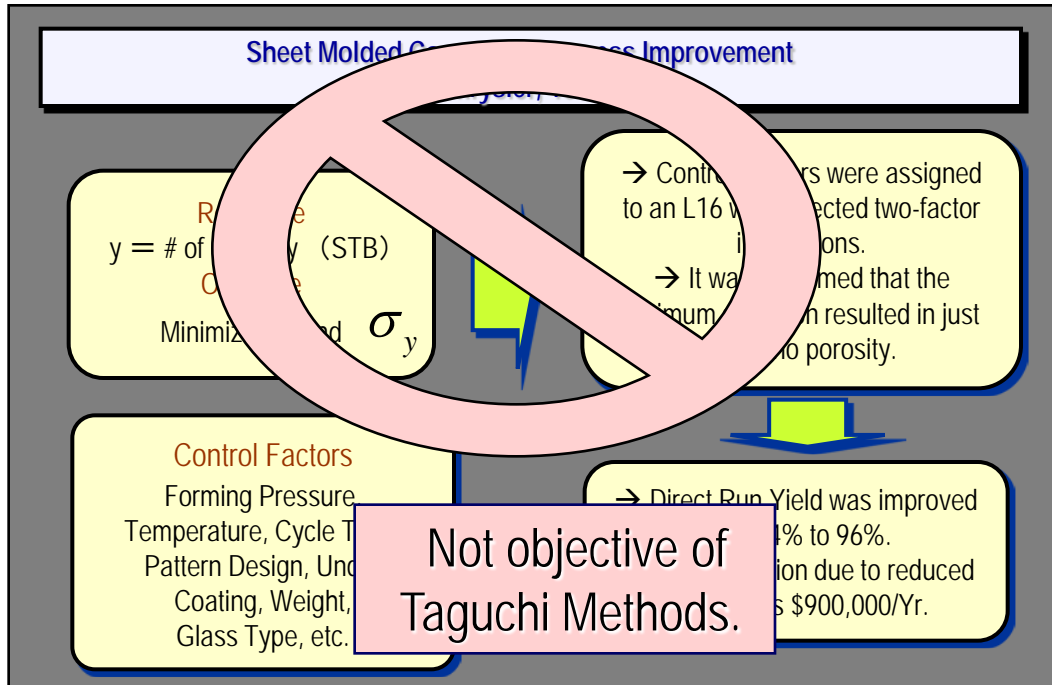


Yield: 33% → **87%**



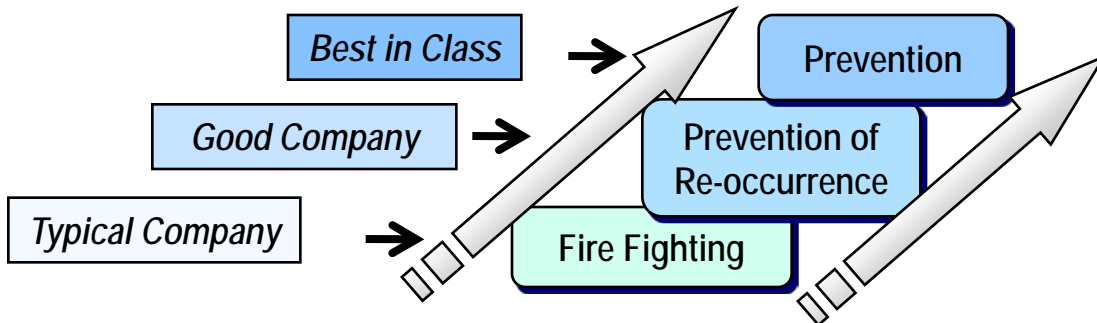
1985 クライスラーの内装シートモールド 手直しコスト低減 \$900k/年 達成

火消し活動から未然防止へ...



I have a big problem with my son, Shin. He helps his clients to fire fight. I am not interested in Fire-Fighting. Please do not use Taguchi Methods for Fire Fighting

G. Taguchi, 1988





1988 ASI Symposium のテーマ:

**TO GET “QUALITY”,
DON'T MEASURE “QUALITY”!**



要求や品質を測るのではなく、
機能を測って最適化をする！



アセスメント = 機能のロバストネスの評価

“アセスメント”と“バリデーション”の違い

を認識することが重要！

まずは“Robust Assessment”最後に“Validate”

たかだか2時間から1日
で結果がでるテスト

その技術要素や設計概念の機能のロバストネスを評価する。

ノイズを振って理想機能を測りSN比でロバストネスのアセスメントする。
アセスメントは時間がかからないため、開発期間が短縮できる。
その上に、ロバストネスを評価し最適化しているため、信頼性に自信が持てる。
バリデーションは一回が理想。

心配だから、できるなら
時間をかけたい

- 開発された製品が様々な要求を満たしているかチェックするための試験。
- 何か見逃していないか、とことんチェック。
 - さらなる改善も試みる



企業の戦略 (技略) としての品質工学

B

先行技術開発テーマ

Decoupled Development

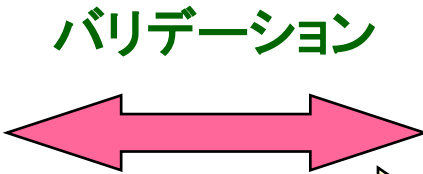
- イノベーション
- 新技術・新材料
- 新しい設計コンセプト
- 共通化
- 再利用
- ベスト・プラクティス
- -デザイン・ガイドライン
- 製造技術開発

グローバルな顧客・世の中の声

テーマ選択

戦略的ターゲット

企画



Launch

Step-2

ロバスト技術の棚

ロバストアジャスタブルスケーラブル

Step-1

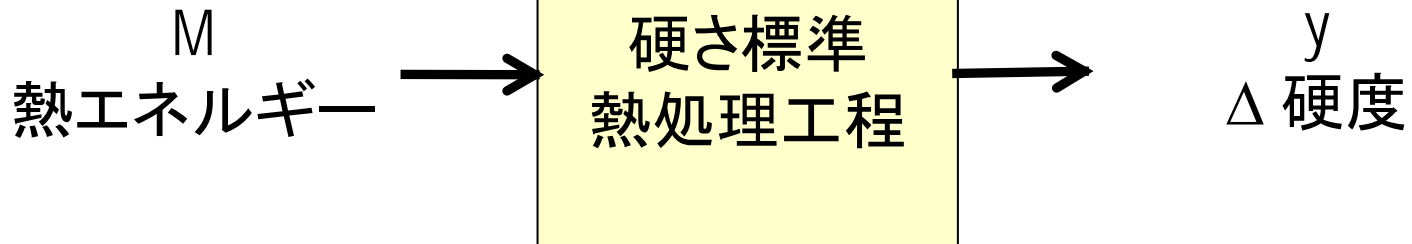
Note:

品質工学やDFSSは、A: 商品開発では30%、B: 先行技術開発で70% ぐらいが理想

目的は開発期間の大幅な短縮。商品開発でやっていると開発期間短縮には無理がある。そのためには、必要なら組織替えをする。

1990 硬さ標準の開発 アサヒ技研

小企業が
業界最高レベルを達成





80年代のゼロックスの紙送り機構

2時間で行えるロバストネスのアセスメント

機能窓特性

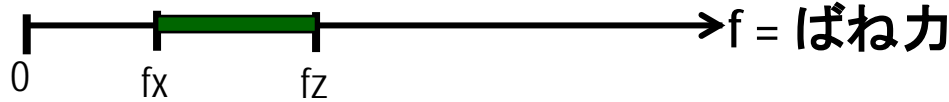
モグラ叩きからの脱却

ノイズの調査

制御因子

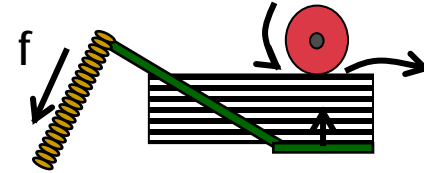
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	Result-1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	Result-2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	Result-3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	Result-4
5	1	2	2	2	3	3	1	1	Result-5
6	1	2	3	3	1	1	2	2	Result-6
7	1	3	1	2	1	3	2	3	Result-7
8	1	3	2	3	2	1	3	1	Result-8
9	1	3	3	1	3	2	1	2	Result-9
10	2	1	1	3	3	2	2	1	Result-10
11	2	1	2	1	1	3	3	2	Result-11
12	2	1	3	2	2	1	1	3	Result-12
13	2	2	1	2	3	1	3	2	Result-13
14	2	2	2	3	1	2	1	3	Result-14
15	2	2	3	1	2	3	2	1	Result-15
16	2	3	1	3	2	3	1	2	Result-16
17	2	3	2	1	3	1	2	3	Result-17
18	2	3	3	2	1	2	3	1	Result-18

→ ロバストネスのアセスメント



fx = 3枚続けて1枚ずつ送る最小ばね力

fz = 重送などばねが強すぎて起きる不具合を始める最小ばね力

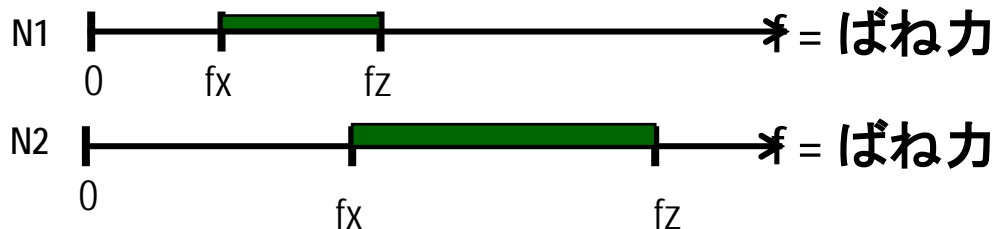


ノイズの調査

N1 = ミスフィードしやすいノイズ条件 = ツルツルで重い紙 + 磨耗したローラ + 高湿度

N2 = 重送しやすいノイズ条件 = 粗い表面で軽い紙 + 新しいローラ + 低湿度

ノイズを振った機能窓特性



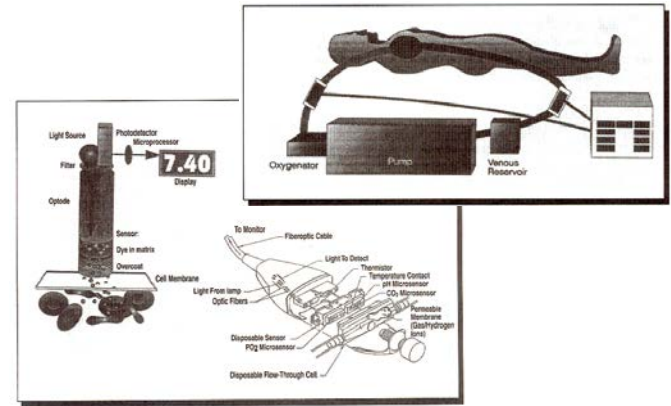
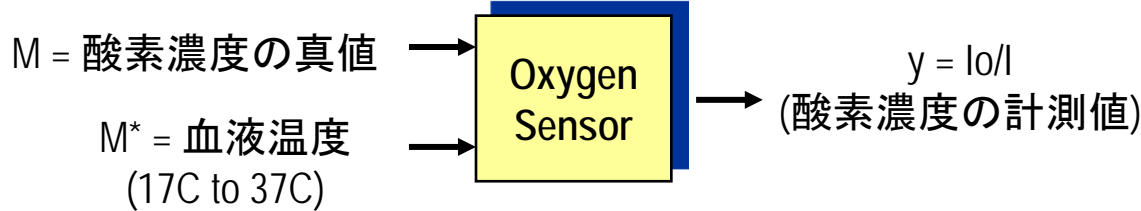
2段階最適化

Step-1: 窓の最大化

Step-2: ばね力調整

1993 3Mの酸素センサー

理想機能と補正の機能の同時最適化

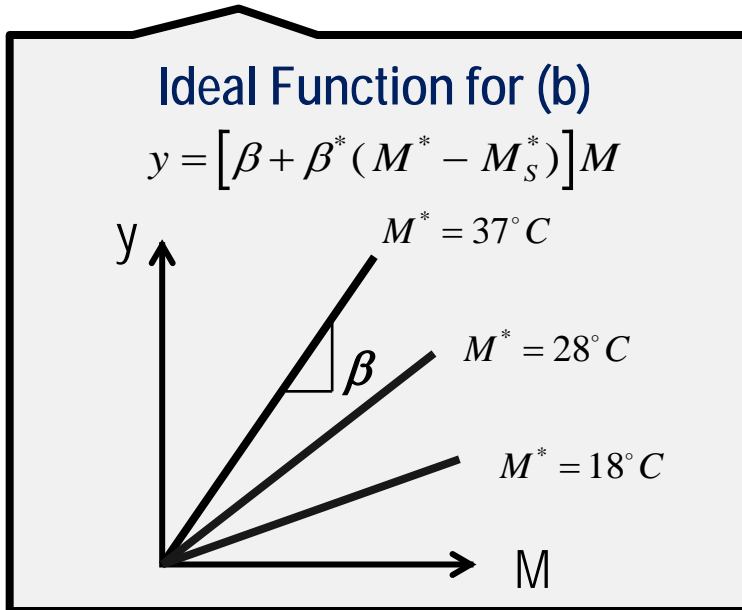


(a) M^* をノイズとする

(b) M^* は信号因子

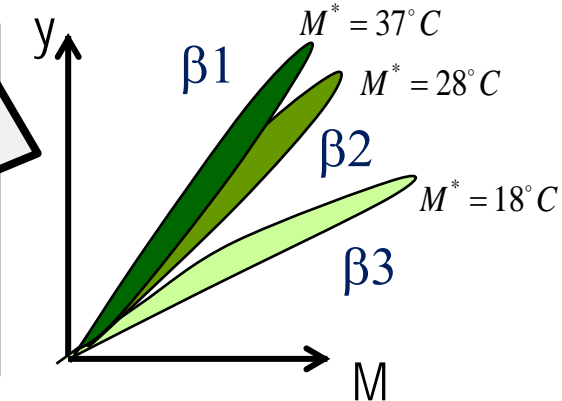
補正ができる上に温度の影響の物理が解っている

(c) M^* は標示因子 補正ができるが温度の影響の物理は不明だが、各温度における β がわかれば補正のためのルックアップテーブルを作成できる。



Ideal Function for (c)

As long as values of $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ are known, the effect of temperature can be compensate.

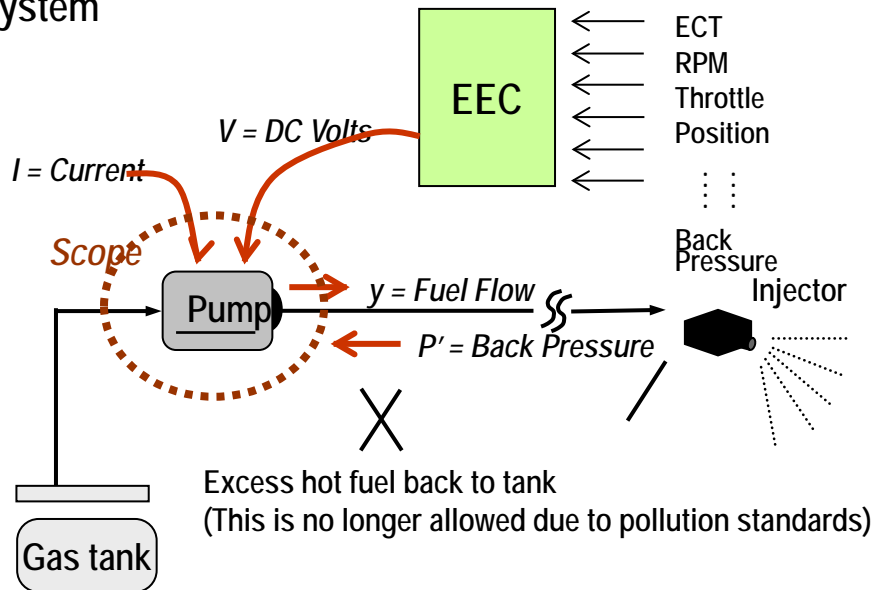


1993 Ford 燃料ポンプ

理想機能と補正の機能の同時最適化



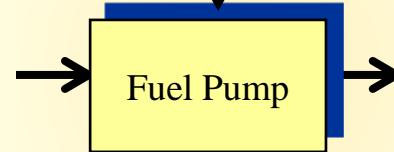
System



Control Factors

Modulation Freq., Assembly Type
Motor Design, Valve Design
Mounting Angle, Etc.

Signal
 $M = I / V / P$

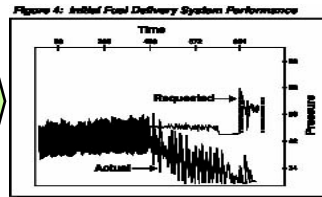
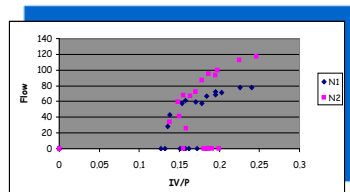


Response
 $y = \text{Fuel Flow}$

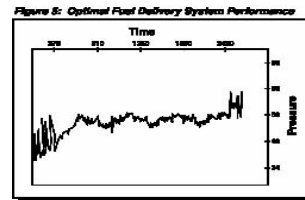
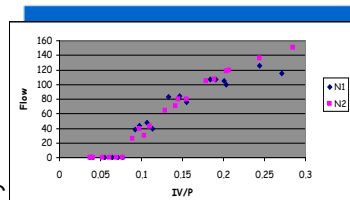
Noise Factors

Fuel Temperature, Fuel Type
Tank Pressure, Pump Wear
Driving Conditions, Mfg. Variation, Etc.

Baseline Design



Optimum Design

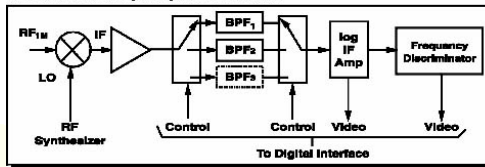




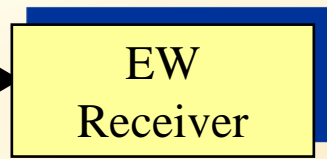
1988 ITT EW レシーバー

ソフトのアルゴリズムの最適化

Figure 1: Functional Block Diagram of a Generic Swept Superhet Receiver



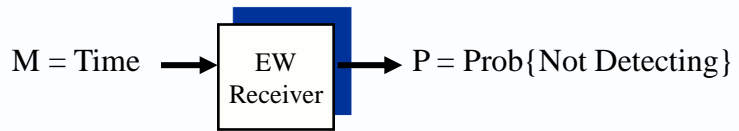
Signal
時間



Response
敵飛行物発見失敗
の確率

理想機能: $P = e^{-\beta T}$

FORMULATION OF ROBUST OPTIMIZATION

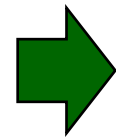


Noise Factors

Control Factors

Noise Factors and Levels			
	1	2	3
G: # of LPI Threats	g	g+5	g+10
H: LPI Starting Time	Low	Med	High
I: LPI Amplitude	Low	Med	High
J: # of PR Threats	m	m+5	m+10
K: PR Starting Time -1	Low	Med	High
L: PR Starting Time -2	Low	Med	High

Control Factors and Levels			
	1	2	3
A: LPI Scanning	Std	+9	+19
B: # of Priority Scan	Std	+4	+9
C: PR Scanning	Std	+9	+39
D: Additional Dwell LPI	Std	+7	+15
E: Additional Dwell PR	Std	+7	+15
F: Receiver Threshold	Std	+0.1	+0.2



	G H I J K L								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	1	2	3	4	5	6	7	8																			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
7	1	3	1	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
8	1	3	2	3	2	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
9	1	3	3	1	3	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
10	2	1	1	3	3	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
13	2	2	1	2	3	1	3	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
14	2	2	2	3	1	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
15	2	2	3	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2	1	2	3	2
16	2	3	1	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
17	2	3	2	1	3	1	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
18	2	3	3	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2

Result & Benefit:
Achieved a remarkable 57% reduction in detecting time under a dynamic EW environment.



1999 UTA 多機能クラッチの最適化



理想機能: $y = \beta M$

M = ばね力

y = エンゲージトルク

ノイズ因子は新品が W1
4 段階の劣化が W2 ~ W5

制御因子:

$6^1 \times 3^5 \rightarrow L18(6^1 \times 3^6)$

L18 の 第 2 列が空列

開発チームを説得して
計画し実行した結果が
このようだった。

→ No.1 から No.6 は新品
でも機能せず!!

→ - はサンプルがもと
から無いので欠測値

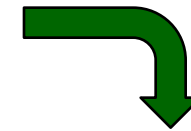
→ 0 は劣化でサンプル
が機能しなくなった

FACTORS & LEVELS

Signal Factor	Level-1	Level-2	Level-3
M: Spring Force	-30%	Nominal	+30%

Noise Fcator	Level-1	Level-2	Level-3	Level-4	Level-5
W: Aging	Initial	Ambient	Cold	Hot	Final

y = Torque to Engage															
L18	W1			W2			W3			W4			W5		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
1	No engagement														
2	No engagement														
3	No engagement														
4	No engagement														
5	No engagement														
6	No engagement														
7	80	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
8	41	40	34	42	0	42	47	0	40	41	0	31	44	0	0
9	52	44	50	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-	56	-	-	102	-	-	60	-	-	51	-	-	56	-
11	57	61	46	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	52	33	57	60	26	38	85	73	48	35	33	28	52	35	33
13	54	-	51	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0
14	57	-	40	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0
15	42	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
16	38	42	42	44	0	36	29	0	36	21	0	0	24	0	0
17	45	42	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	56	56	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	0	-



SN比を計算し
て最適条件を求
めよ!!

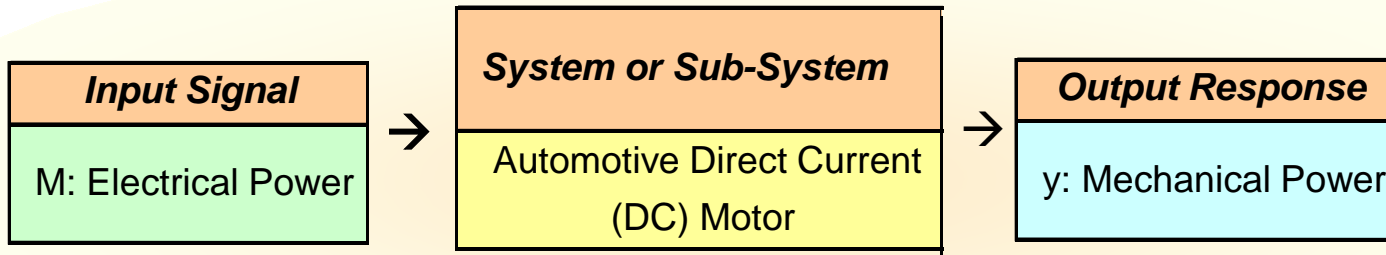
この実験の
データは
悪くない!!



2002 Nissan ウィンドーレギュレータのモーター

品質が欲しければ品質を測るな！

クリエイティブなノイズの戦略



理想機能の計測

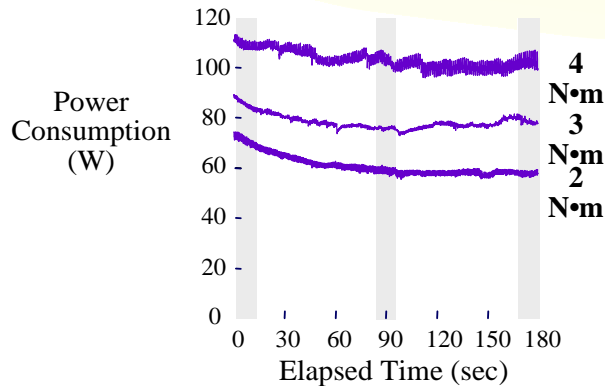
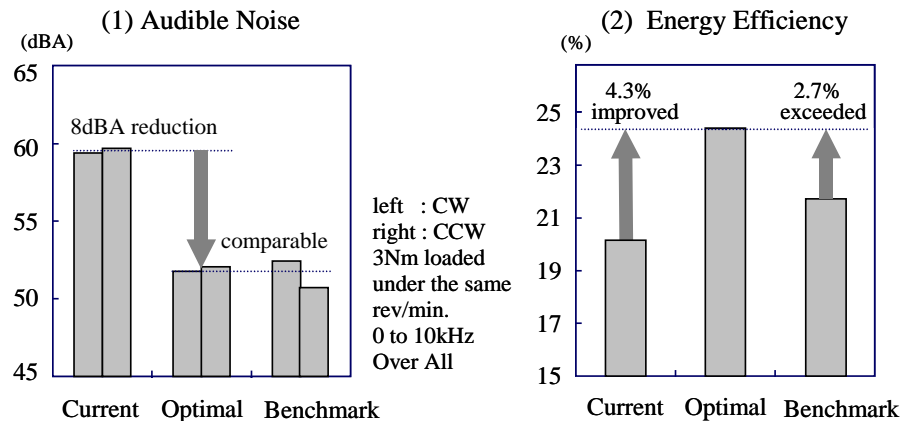


Figure6. Performance Comparison with Benchmark Product



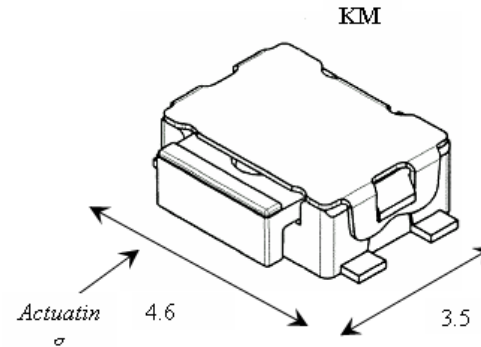
Noise Strategy

	N1	N2
Motor-On Time	0 sec	180 sec

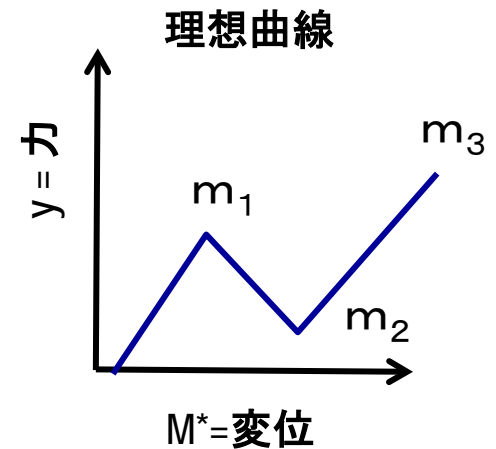
2000 ITT マイクロスイッチの操作感

ダブル望目特性

標準SN比の登場



- L18によるシミュレーションを使った最適化
- 最初はダブル望目 (m_1 と m_2 が望目) として28dbのゲインを確認。
- ドクター・タグチはゲインが大きすぎるのがおかしいと言う意見で、半年後に標準SNを提案した。解析をし直したら最適条件は同じでゲインは12db程になった。
- 解析しなおした結果は発表はされていない。

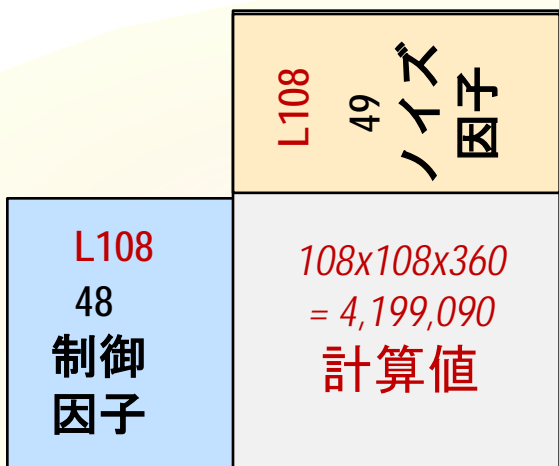
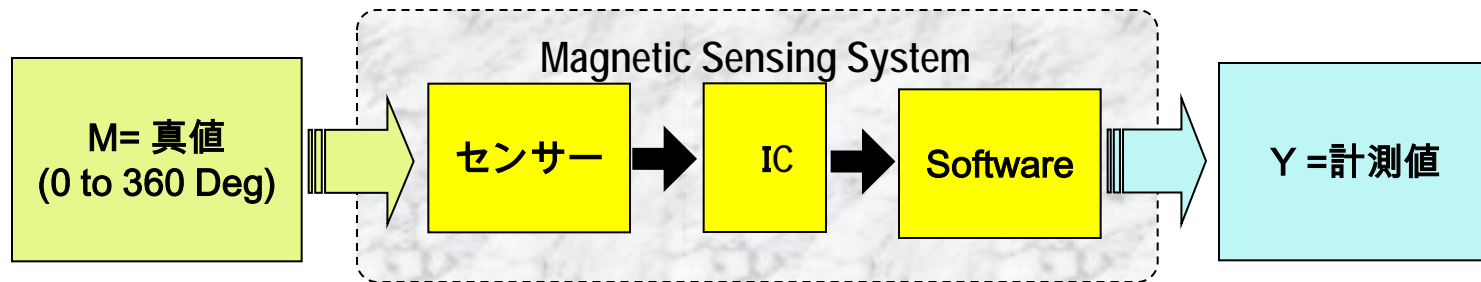
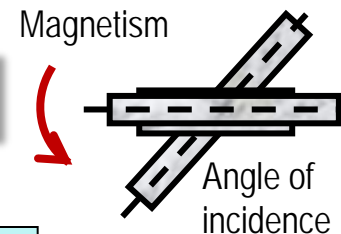




2006 アルプス電気の角度センサーシステム

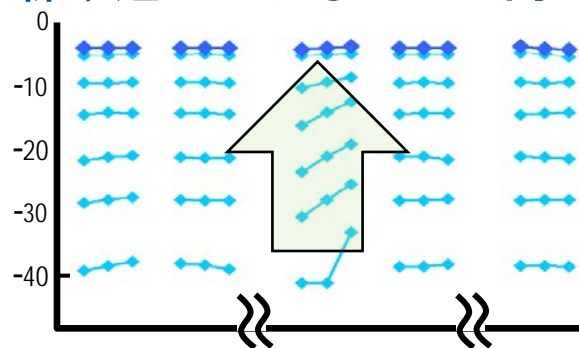
大きなスコープ

シミュレーションエンジンによる機能の計測

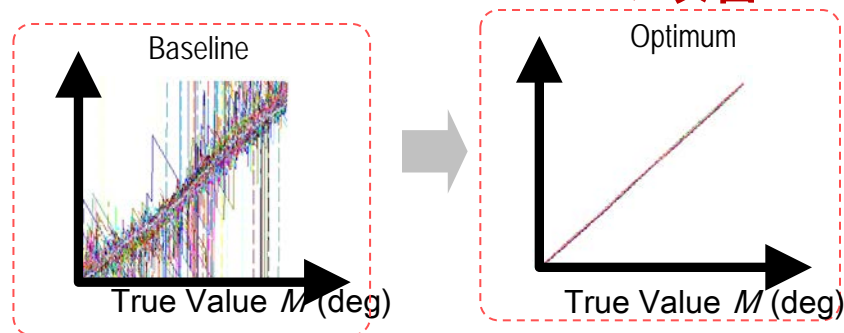


11回 繰り返し

繰り返しによる S/N の向上



38.7 dB の改善



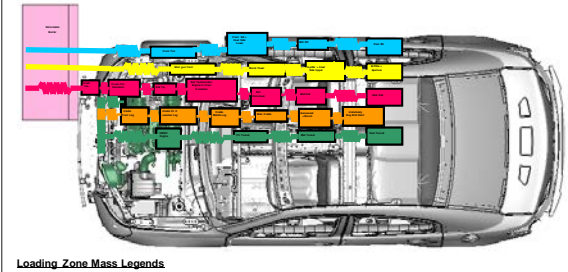
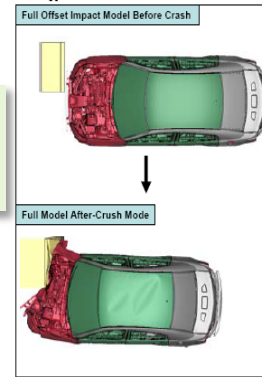
網羅した設計スペースの大きさ

$3^{48} \times 11 = 877,430,873,845,598,000,000,000$
 $= 0.88 \text{ Septillion (10の24乗)}$

2008 Chrysler Frontal Crash

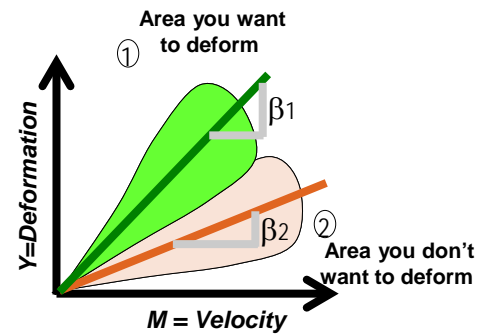
3次元フルCAE は30時間かかる
バネマスモデルを作成 → 計算が10分

動的機能窓特性

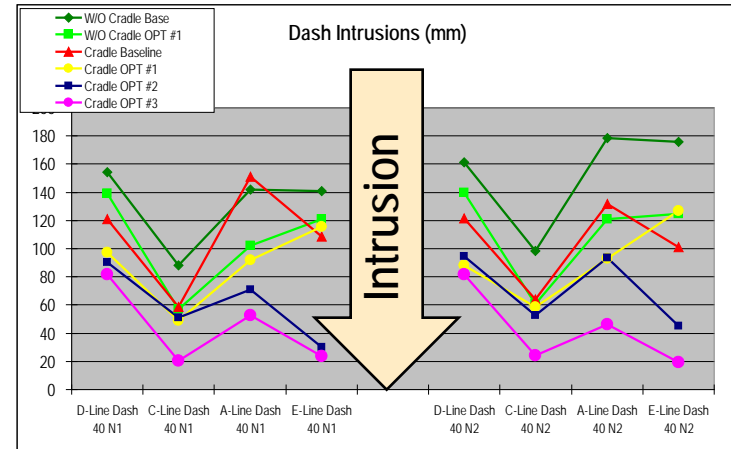
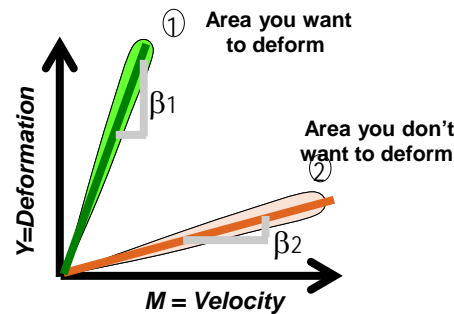


動的機能窓特性の概念

Before Optimization



After Optimization



揺り籠型設計概念 → L54 iterated 5 times
 K-メンバー型設計概念 → L54 iterated 5 times
 カムリ型設計概念 → L54 iterated 5 times

網羅した設計スペース = $3^{23} \times 3 \times 5$ iterations > 1,400,000,000,000



技術開発の戦略とは

▲ 先行性

製品企画前に顧客の**要求機能の安定性**を確保して、技術開発を先行させる。

▲ 汎用性

特定の技術や製品ではなく、**次の製品開発や同種の機能の技術や製品**にも適用可能である。

▲ 再現性

テストピースやCAEの活用で、**大規模生産や市場における結果との一致性**を高める。



戦略としての品質工学

- フォードは1994年、入力信号がガソリンの量で、出力がクランクシャフトをまわすトルクとして研究したが、それでは全品質問題には駄目である、それには公害の一つNOXが入っていないからである
- エンジンの機能は化学反応である。品質工学はどんな機能でも只一つの機能でSN比と感度の研究をやることで全品質項目をよくし、しかも大幅に開発のスピードを高める方法である
- すなわち品質工学は専門技術ではなく、技術の戦略、すなわち技略であるR&D部門の長が責任を持っていることはR&Dのすべての人の技術開発の能率化である
 - その責任はすべての開発に共通的な能率化で、専門技術ではなく広範な技術分野に有用な汎用的技術でなくてはならない
 - 品質工学は消費者が分かる多くの品質問題を機能毎に研究室で得られる一つの評価特性で解くことである