

「ヒューリスティックによる免震装置の 最適選択システム」

信州大学工学部

田守伸一郎

ヒューリスティックによる免震装置の 最適選択システム

目的

免震構造物の制約条件・設計条件を満足するような免震装置の選択・配置を得るシステム

背景

免震建物の設計における制約条件, 設計条件

積層ゴム軸力(長期・短期), 偏心率, 応答変位, 構造躯体の層せん断力



繰り返し応答計算

経験が必要

効果

設計の省力化

免震建物の時刻歴応答計算繰り返ししなくてよい

設計の自由度の拡大 → 平面・立面形状

経験が少なくても自由な形状の建物を設計できる

ヒューリスティック

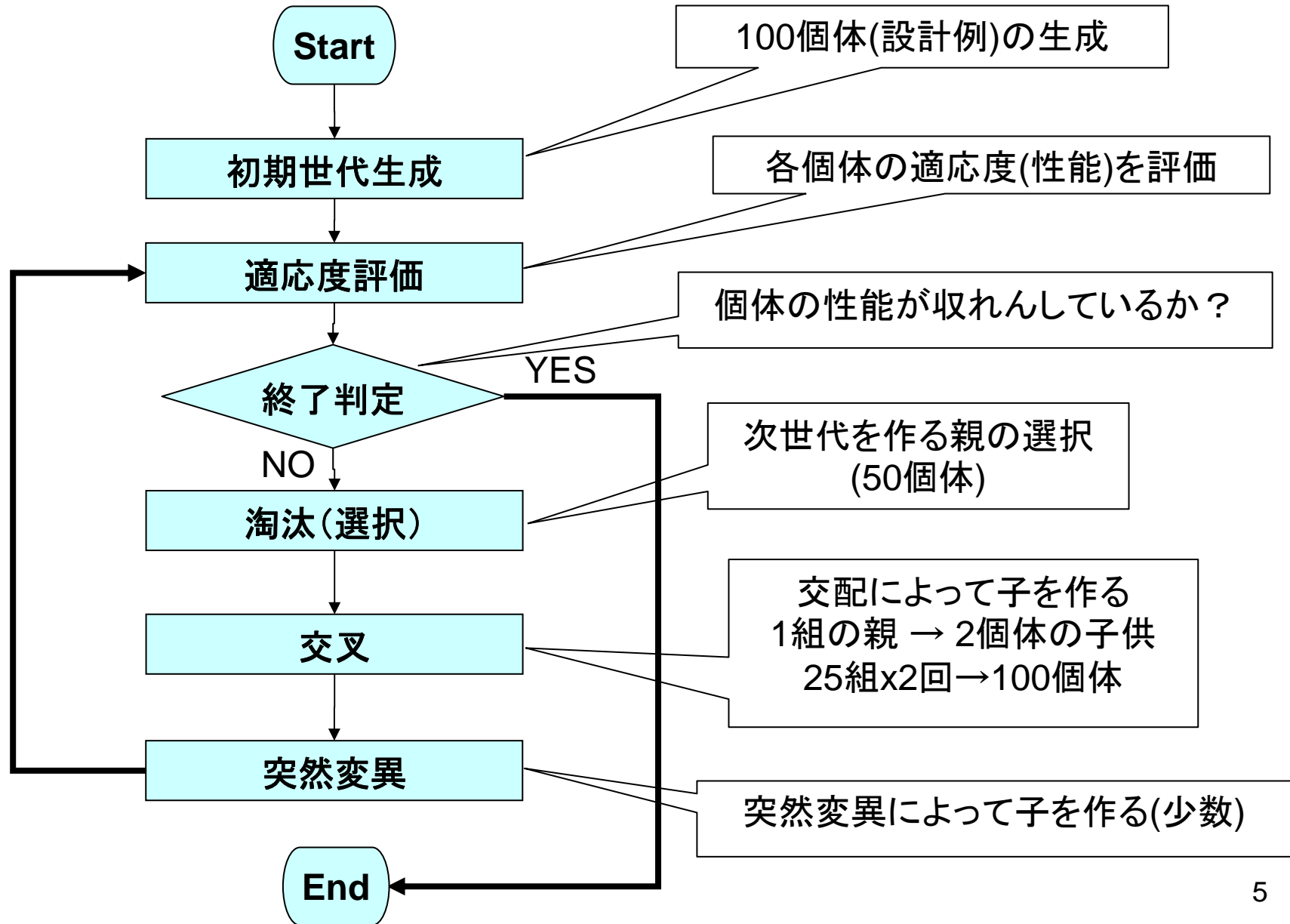
- 必ず正しい答えが導けるわけではないが、ある程度のレベルで正解に近い解を得ることが出来る方法
 - 遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm)
 - 生命の進化を模した方法(交配, 淘汰, 突然変異)
 - 性能のよい個体が生き残る
 - 焼きなまし法(Simulated Annealing)
 - 突然変異で新しい個体を生成
 - 個体の選択確率が温度と性能の関数
 - 温度が高い(世代が若い)では性能の変化の幅が大きい
 - タブーサーチ(Taboo Search)
 - 突然変異で新しい個体を複数生成→よりよいものを選ぶ
 - 繰り返し同じ個体を選ぶ行為を禁止(タブー)

遺伝的アルゴリズムの特徴

GA: Genetic Algorithm

- 最適化問題を解く方法のひとつ
- 生物界で交配・突然変異によって親の特性を引き継ぎつつも、新しい性質を持った個体が生まれることを利用する。
- 交配・突然変異を繰り返し、よりよい性質を持った個体を作り出す。

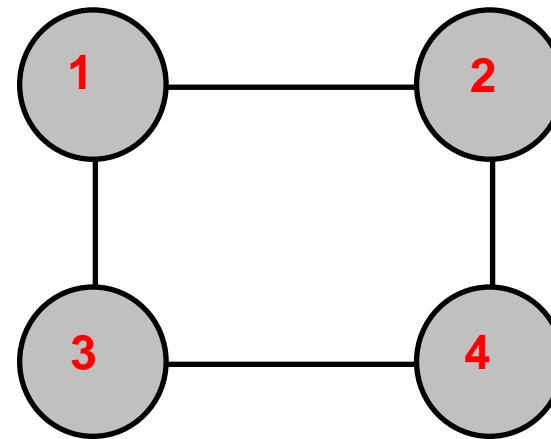
GAの流れ



GAの要素

- 遺伝子の生成と「免震装置の配置計画」への割り当て
(1)(0)のビットで装置を表す

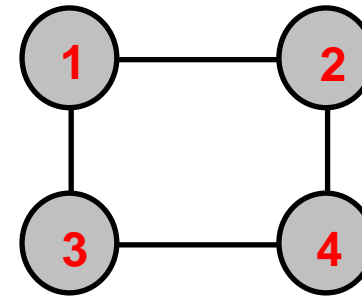
装置種別	遺伝子
600φ	00
700φ	01
800φ	10
900φ	11



装置位置	1	2	3	4
遺伝子	00	01	11	00
装置種別	600φ	700φ	900φ	600φ

GAの要素: 交叉

交叉位置(ランダムに定める)



遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		600		800	
位置	1	2	3	4				

1	1	0	1	1	1	1	0
900	700	900	800				
1	2	3	4				



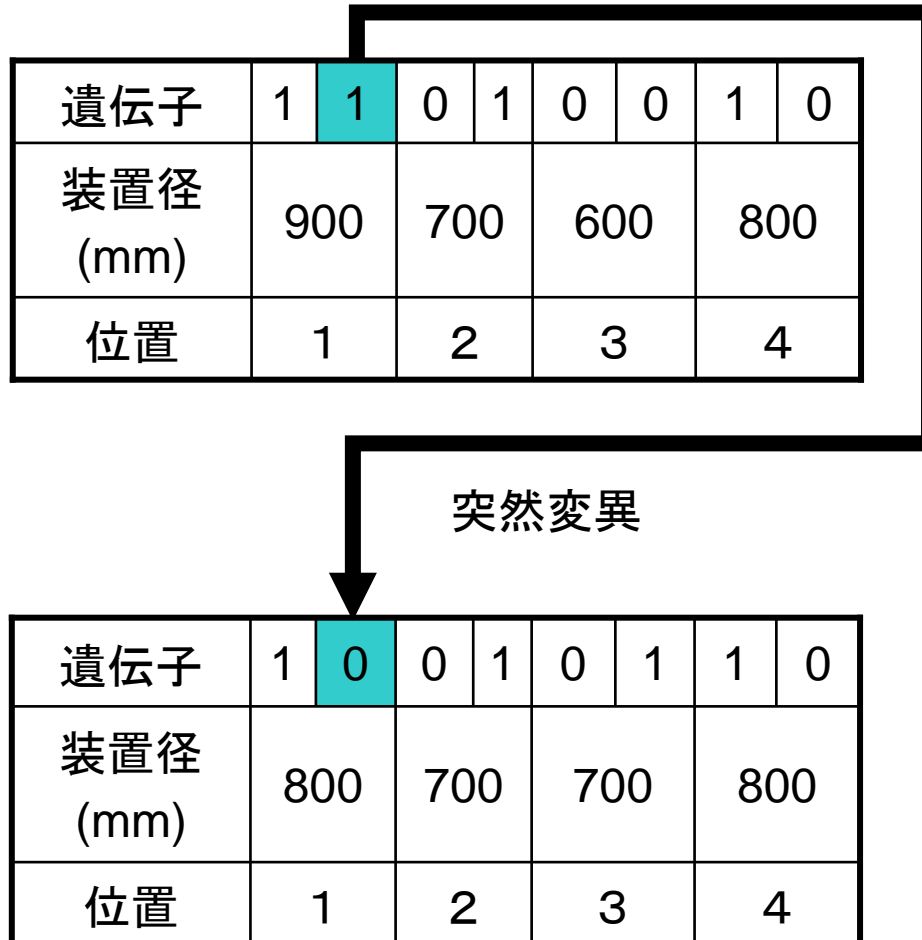
遺伝子	0	1	1	1	1	1	1	0
装置径 (mm)	700		900		900		800	
位置	1	2	3	4				

0	1	1	1	0	0	1	0
700	900	600	800				
1	2	3	4				

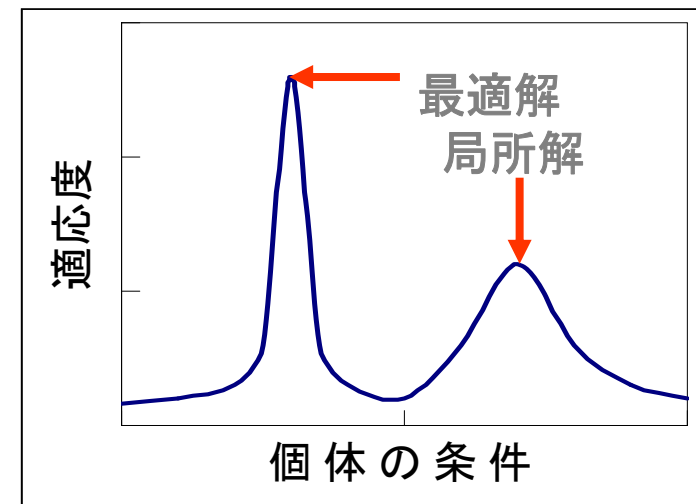
- 交叉位置はビットのどこでもよい
- 一点交叉, 二点交叉を適当に組み合わせる

1点交叉: 交叉点が一カ所
2点交叉: 交叉点が二カ所

GAの要素：突然変異



- ある遺伝子の0,1を強制的に入れ替える。
- 親の世代に無かった特性を持つ個体を作り出せる可能性がある。
- 局所解から脱出し、探索範囲を広げられる。



GAの要素：選択・淘汰

- 次世代の親となる個体を選ぶ
 - エリート選択
 - 適応度の高い個体を残す。探索能力に優れているが、探索が局所解に陥る場合がある。
 - ルーレット選択
 - 適応度に比例した確率で子孫を残す方法
 - ランク選択
 - 適応度によって各個体をランクづけし、あらかじめ各ランクに対する確率で子孫を残す。

GAの要素：選択・淘汰

- ルーレット選択
 - 適応度に比例した確率で選択

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$$

P_i : i 番目の個体の選択確率

f_i : i 番目の個体の適応度

GAの要素：選択・淘汰

- ランク選択
 - 各個体はその適応度ごとにランキングされている。
 - 選択確率は、ランクに依存する。
 - 適応度の高い順に個体を並べ、いくつかのグループ分けをしてランキングしてもよい。

ランク	個体 #	適応度(0~3)	選択確率
1	1	2.5以上	0.329
2	3	2.5未満~1.2	0.276
3	4	1.2未満~1.0	0.158
4	2	1.0未満~0.8	0.132
5	5	0.8未満	0.105

GAのポイント

- 選択と突然変異の設定方法がGAの効率にとって重要。
- エリート選択だけでは局所解に陥りやすい。
- 突然変異する個体の割合を増やしすぎると、ランダムに条件を選んでいるのと同じになってしまうので、最適解を得るために膨大な計算をすることになる。
- 適応度の高い個体を残しつつ、探索範囲をできるだけ広く保った方がよい。

GAの免震構造物への適用

免震装置の組み合わせ

- 積層ゴム＋履歴系ダンパー
 - RB, LRB, HRB, 鋼棒ダンパー, 鉛ダンパー
- 積層ゴム支承＋粘性系ダンパー
 - オイルダンパー
- 滑り支承＋積層ゴム支承
 - RB, LRB, SL

構造形式

- 基礎免震：
 - 上部構造を剛体と見なせる
- 上部構造の剛性が低い基礎免震, 中間層免震
 - 多質点系による解析

これまでの解析対象

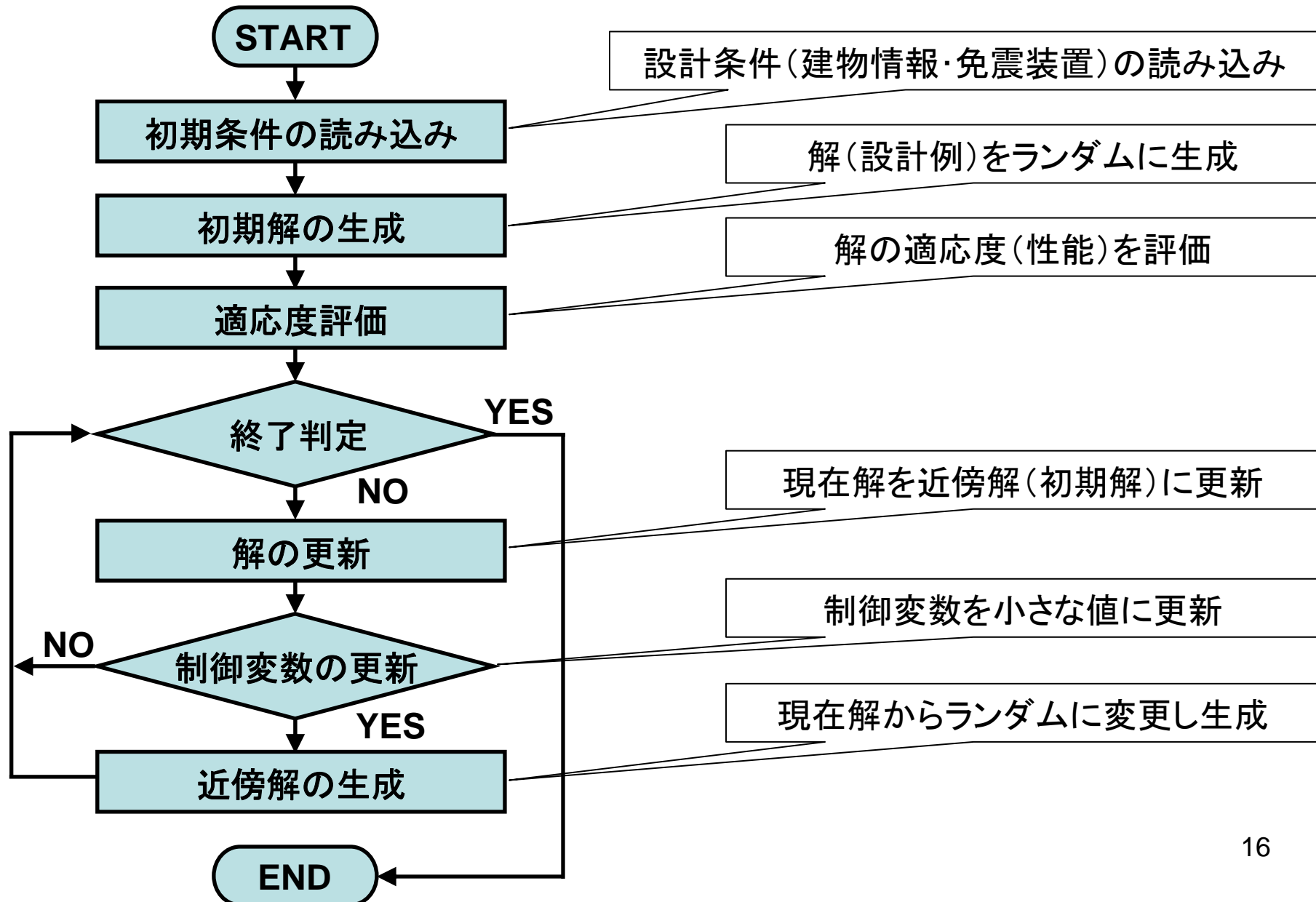
特定の設計条件への適応

- 免震装置のコストを評価
- 水平動・上下動による変動軸力を評価
- 建物外周に剛性の高い装置を配置し、ねじりを抑制する。
- 上部構造の層間変位を評価
- 上部構造の部材の選択

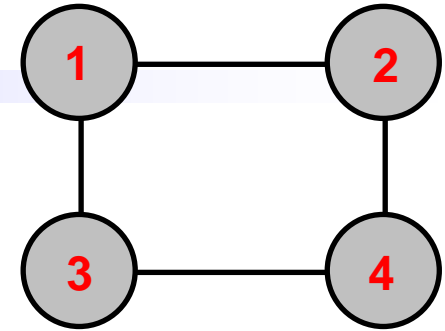
焼きなまし法の特徴

- SA: Simulated Annealing
- 現在解から近傍解へ繰り返し移動し、より良い解を探索する手法。
- 改善された解を受け入れる。
- 改悪された解は制御変数に基づいた確率で更新する。
- 探索の進行に応じて、制御変数を減少させ、探索範囲を調整。

SAの流れ



SA: 近傍解



現在解

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		600		800	
位置	1		2		3		4	

変更する装置(ランダムに選択)

ランダムに変更

近傍解

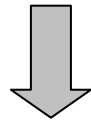
遺伝子	1	1	0	1	1	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		800		800	
位置	1		2		3		4	

- 現在解の装置をランダムに変更し、近傍解を生成。
- 変更する装置の数を探索の進行とともに減らす。
- 現在解に似た特性を持つ近傍解を生成する。

SA: 解の更新

現在解 (適応度: 14)

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		600		800	
位置	1		2		3		4	



近傍解 (適応度: 11)

遺伝子	1	1	0	1	1	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		800		800	
位置	1		2		3		4	

解を更新する条件

- ① 解が改善された場合
- ② 解が改悪され、更新確率を満たした場合

改悪解の更新確率:

$$\frac{\exp(-(\text{改悪量})/(\text{制御変数}))}{1}$$

改悪解

$$\begin{aligned} (\text{更新確率}) &= \exp(-(14-11)/(10)) \\ &= \underline{0.74} \end{aligned}$$

※制御変数 10

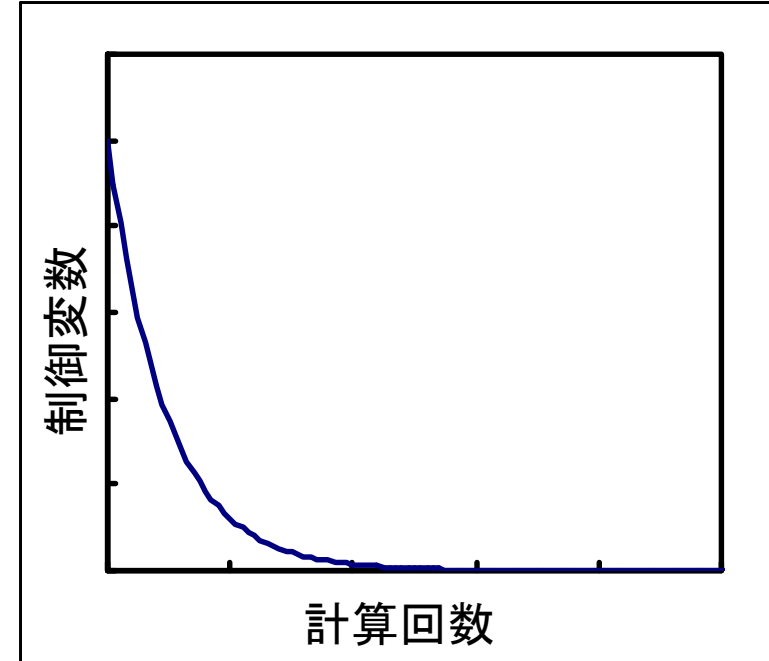
SA: 確率制御関数

制御変数

- ・改悪解の更新確率を制御する変数
- ・確率制御関数に管理される
- ・探索の進行とともに、徐々に小さな値に変更

確率制御関数

$$\text{(次の制御変数)} = 0.9 \times \text{(現在の制御変数)}$$



現在解の適応度	近傍解の適応度	制御変数	改悪解の更新確率
14	11	10	0.74
		1	0.05

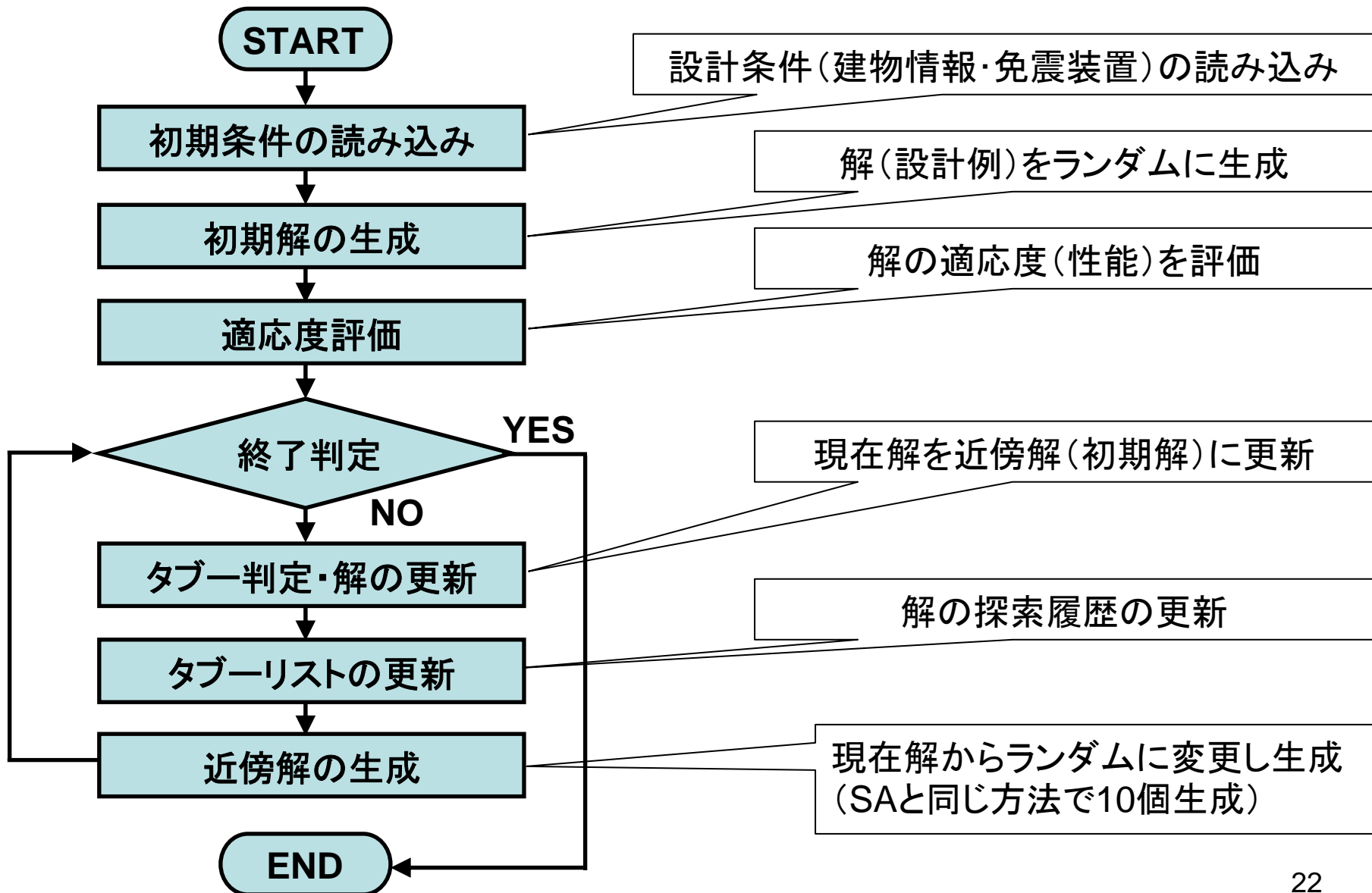
SAのポイント

- 探索序盤は広範囲、探索終盤は狭い範囲を探索するように制御変数の調整をすることがSAで効率的に探索するために重要となる。
- 制御変数の初期値や確率制御関数は、対象とする問題により異なるため、予備計算が必要となる。

タブー検索の特徴

- TS: Taboo Search
- 現在解から近傍解へ繰り返し移動し、より良い解を探索する手法
- 現在解の更新という解探索の履歴による制約のもと、解を更新
- 制約により、改悪解への移動を許し、同じ範囲の解を繰り返し探索することを防ぐため、大域的な探索が可能

TSの流れ



TS: タブー判定

現在解

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900		700		600		800	
位置	1		2		3		4	

解を更新する条件

- ① 適応度の高い解
- ② 制約されていない解

タブーリスト

制約	期間
1: 900→600	11
4: 800→700	6
2: 700→600	18



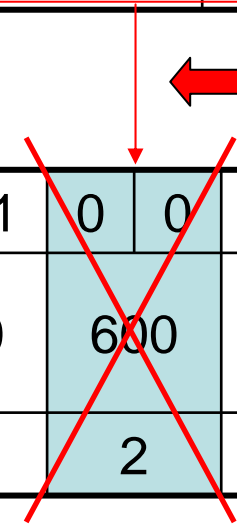
近傍解A

遺伝子	1	0	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	800		700		600		800	
位置	1		2		3		4	

近傍解B

遺伝子	1	1	0	0	0	0	1	0
装置径 (mm)	900		600		600		800	
位置	1		2		3		4	

タブー



TS: タブーリスト

現在解

遺伝子	1	1	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	900	700	600	800				
位置	1	2	3	4				

制約(タブー)

「元に戻す変更をある期間禁止」

ランダム(最大値30、最小値1)

元に戻す変更は禁止
“1”の装置900から
800

近傍解A

遺伝子	1	0	0	1	0	0	1	0
装置径 (mm)	800	700	600	800				
位置	1	2	3	4				

タブーリスト

制約	期間
1: 900→600	10
4: 800→700	5
2: 600→700	17
1: 800→900	21

記録

TSのポイント

- 同じ範囲の解を繰り返し探索することを防ぐようにタブー期間を与えることが、TSで効率的に探索するために重要となる。
- タブー期間を適切に設定することで、広範囲の探索が可能となるが、適切なタブー期間の値は対象とする問題により異なるため、予備計算が必要となる。

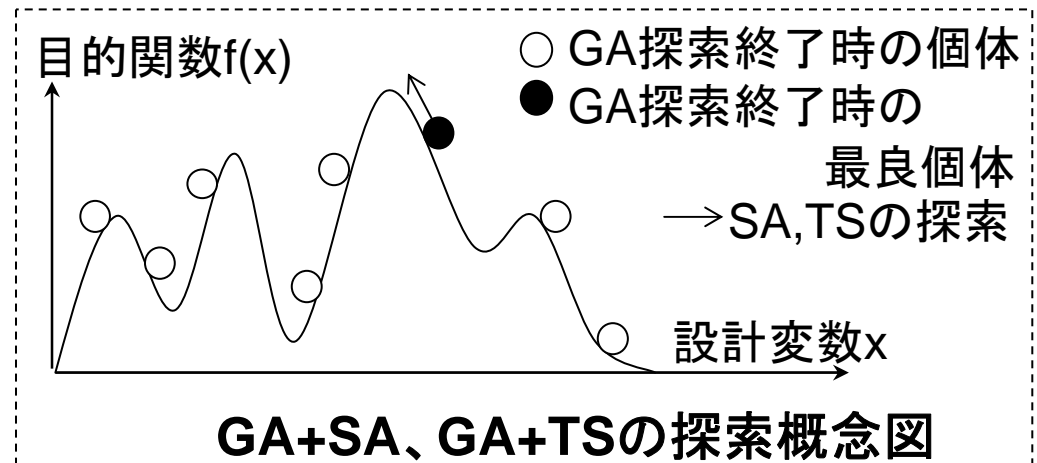
**遺伝的アルゴリズム, 焼きなまし法,
タブー検索
による免震装置配置計画の検討例**

探索方法

・GA、SA、TS の単独探索

・GA+SA、GA+TS

GAで序盤の大域的な探索を行ない
効率が低下したところで、SAやTS
に解を渡す手法



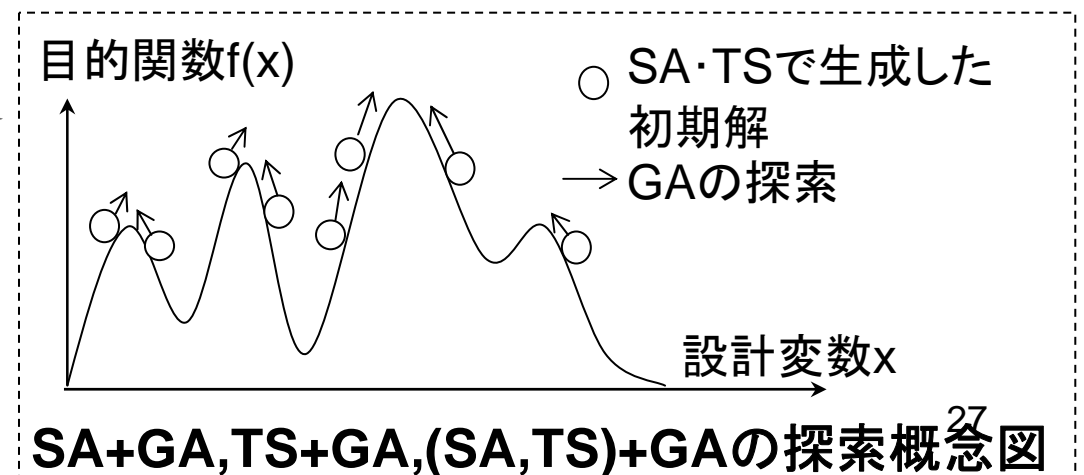
・TS+SA TSで探索をおこなった結果をSAの初期解とする手法

常に1個体のみを保持する

・SA+GA、TS+GA、

(SA, TS)+GA

SAやTSでGAの初期解を作り、
GAでの探索を早く収束させよう
とした手法



適応度の計算

共通の評価項目

- 免震層の偏心率
- 免震装置が負担する長期軸力
- 変動軸力を考慮した短期軸力

+

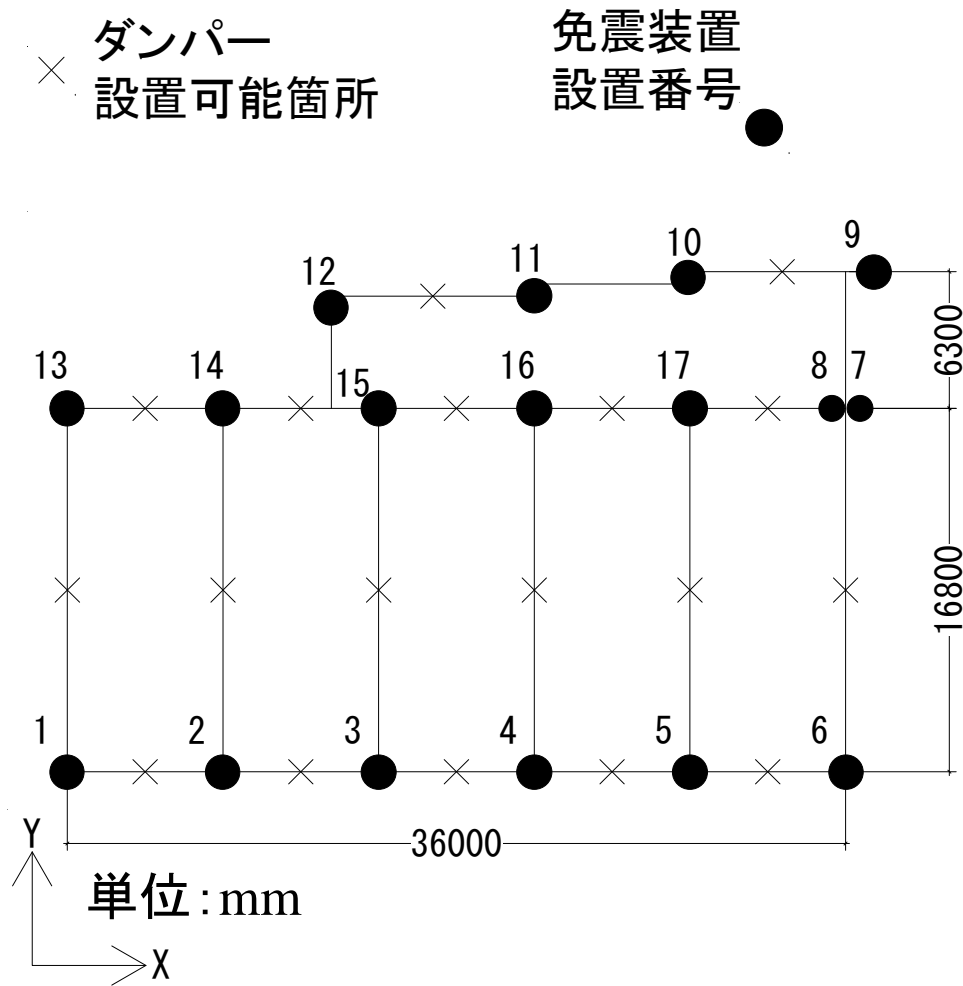
評価方法1: 免震層の特性

- 免震層の降伏せん断力係数
- 免震層の固有周期
- 免震層の応答予測式を利用

評価方法2: 免震層+上部構造の特性

- 上部構造の層せん断力係数
- 上部構造の層せん断力をおさえる
- 免震装置の最大応答水平変位
- 安定変形以内におさまる

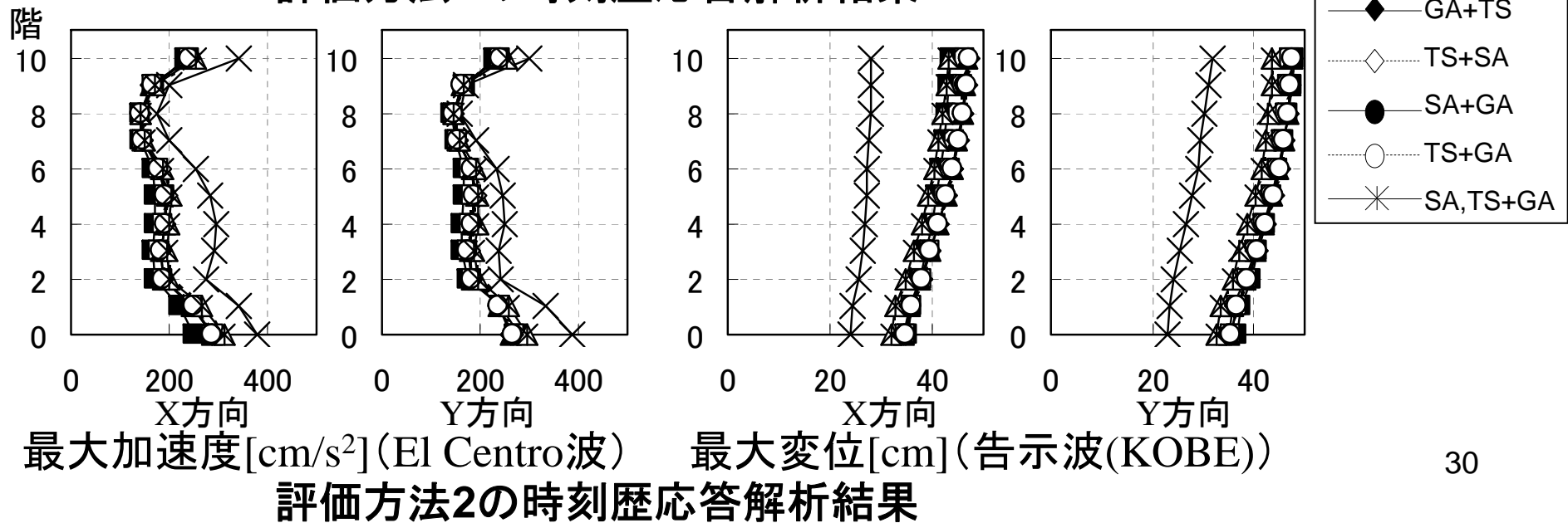
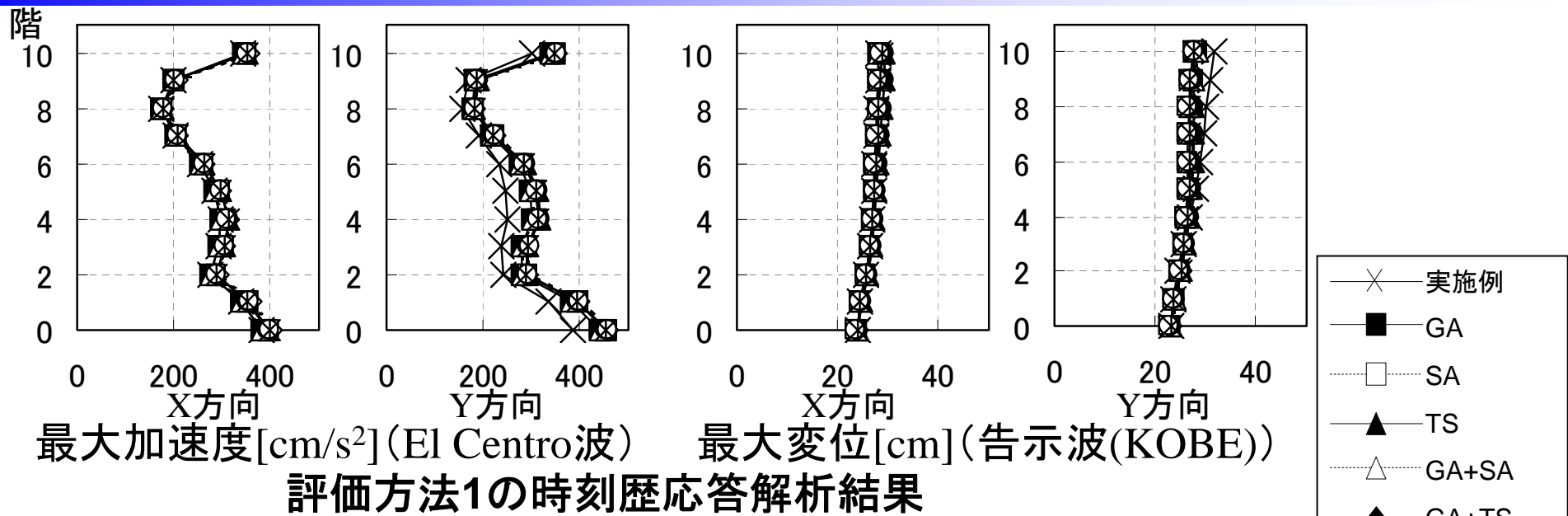
対象建物1



- 地上9階、地下1階、塔屋1階建て
- 鉄骨造事務所
- 基礎免震構造
- 免震層固定時の固有周期
X方向:1.81秒
Y方向:1.88秒
- 免震装置
天然ゴム系積層ゴム支承(RB)17基
鉛ダンパー14基
- 最適選択で選択可能な装置
RB:12種類
鉛ダンパー

平面図と免震装置設置箇所

対象建物1 時刻歴応答解析



対象建物1 得られた配置による建物の特性値

評価方法1の最適配置の結果

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA
偏心率(%)	2.90	0.57	0.19	0.13	0.71	0.10	0.25	0.29	0.21	0.18
1次固有周期(s)	3.58	3.35	3.32	3.31	3.34	3.33	3.34	3.34	3.34	3.34
減衰定数(%)	24.0	26.0	26.7	25.4	26.0	26.2	26.8	25.4	26.6	26.1
降伏せん断力係数	0.030	0.037	0.039	0.040	0.037	0.039	0.039	0.040	0.039	0.039
免震層の最大水平変位(cm)	23.8	23.8	23.7	23.9	23.8	23.8	23.7	23.9	23.7	23.8
鉛ダンパー設置数	14	17	18	18	17	18	18	18	18	18

評価方法2の最適配置の結果

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA
偏心率(%)	2.90	1.00	0.87	0.92	0.36	0.80	0.86	0.88	0.98	0.45
1次固有周期(s)	3.58	3.68	3.70	3.67	3.68	3.66	3.68	3.63	3.68	3.73
減衰定数(%)	24.0	17.2	17.3	17.0	18.5	17.1	17.3	17.3	17.1	18.6
降伏せん断力係数	0.030	0.021	0.021	0.021	0.023	0.021	0.021	0.021	0.021	0.023
免震層の最大水平変位(cm)	23.8	35.3	34.9	34.3	32.0	34.8	34.5	34.8	34.8	32.0
鉛ダンパー設置数	14	9	9	9	10	9	9	9	9	10

- ・偏心率は1%以下
- ・1次固有周期、減衰定数、降伏せん断力係数は同程度
- ・最大水平変位は積層ゴムの安定変形以内

対象建物1 評価方法2 免震装置の配置

免震装置の外径の比較

実施例 > 最適配置
 実施例 < 最適配置

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA	
アイソレータ設置番号	1	RB900	RB1400	RB1400	RB1400	RB1400	RB1300	RB1400	RB1300	RB1300	RB1400
	2	RB800	RB1100	RB1200	RB800	RB1200	RB1100	RB950	RB1200	RB1200	RB1100
	3	RB800	RB900	RB850	RB1200	RB850	RB1100	RB850	RB850	RB900	RB900
	4	RB800	RB850	RB800	RB1100	RB750	RB900	RB1200	RB1000	RB1000	RB900
	5	RB800	RB850	RB750	RB800	RB950	RB750	RB800	RB850	RB850	RB750
	6	RB900	RB1000	RB1100	RB900	RB950	RB1000	RB900	RB900	RB900	RB1000
	7	RB800	RB700	RB700	RB750	RB750	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700
	8	RB800	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB750	RB700
	9	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700
	10	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700
	11	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700
	12	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700	RB700
	13	RB900	RB900	RB900	RB1000	RB900	RB900	RB900	RB900	RB950	RB900
	14	RB900	RB850	RB850	RB900	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850
	15	RB900	RB900	RB850	RB850	RB850	RB900	RB850	RB850	RB850	RB850
	16	RB900	RB900	RB900	RB900	RB900	RB950	RB900	RB900	RB900	RB900
	17	RB900	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850	RB850

※RBは天然ゴム系積層ゴムを表し、後の数字は積層ゴムの外径(mm)を表す

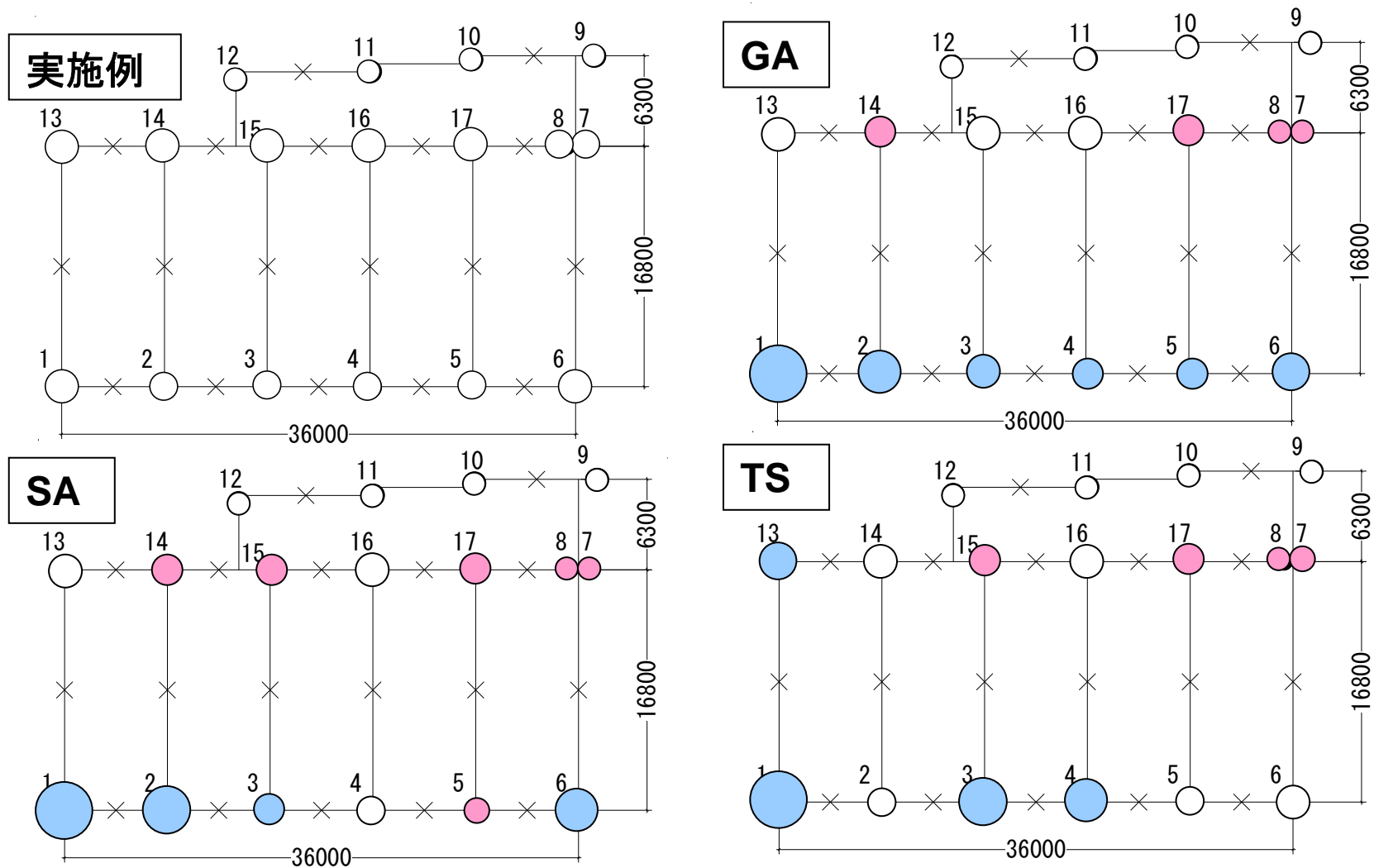
対象建物1 評価方法2 免震装置の配置例

免震装置の外径の比較

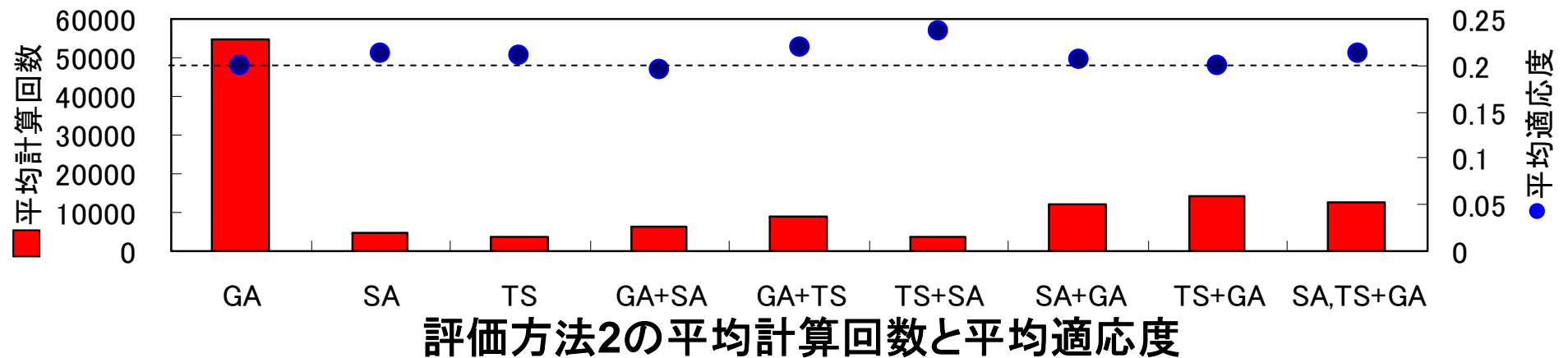
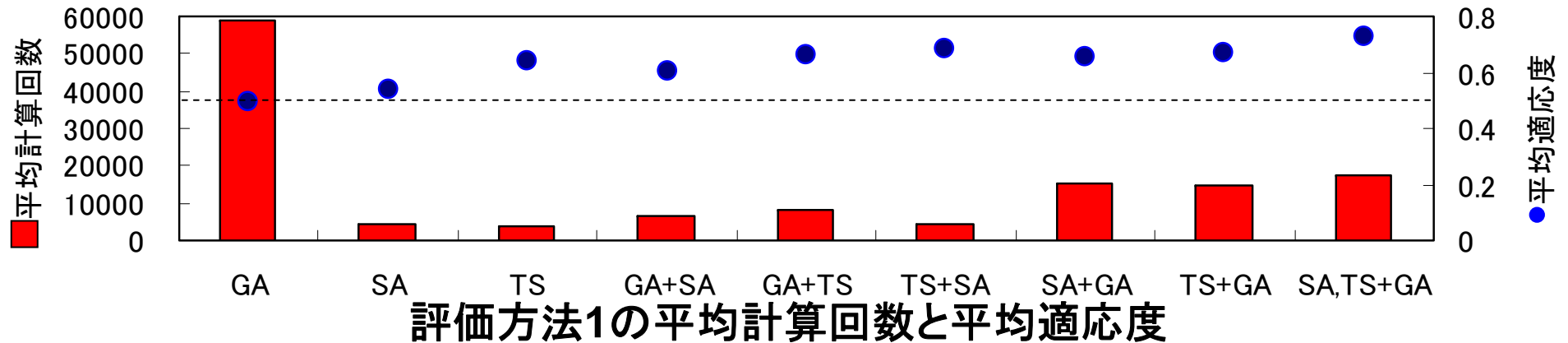
(GA・SA・TSの場合)

● 実施例 > 最適配置 ● 実施例 < 最適配置

※○の大きさは装置の外径の大きさを表す

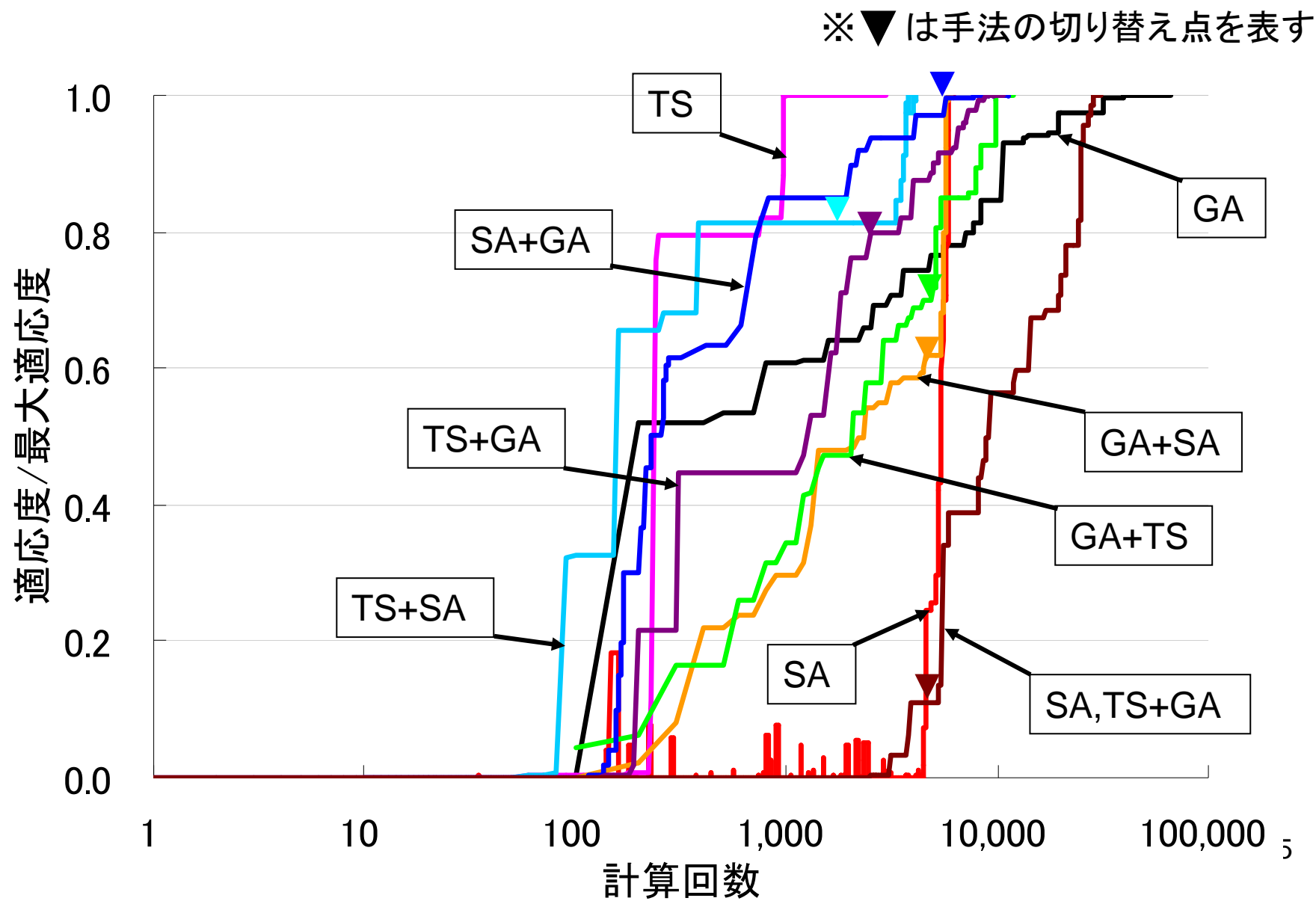


対象建物1 探索能力と計算回数の比較

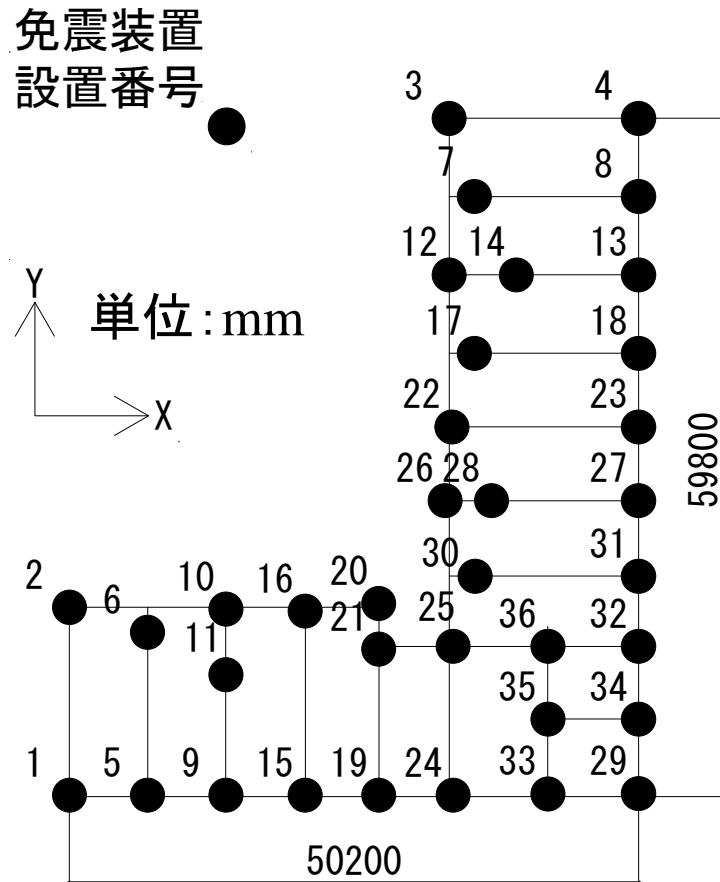


- ・探索能力・・・評価方法1ではGAよりその他の手法の方が高い
評価方法2ではGAとその他の手法は同程度
- ・計算回数・・・どちらの評価方法を用いた場合も、GA以外のすべての手法で³⁴低減

対象建物1 評価方法2 適応度推移グラフ



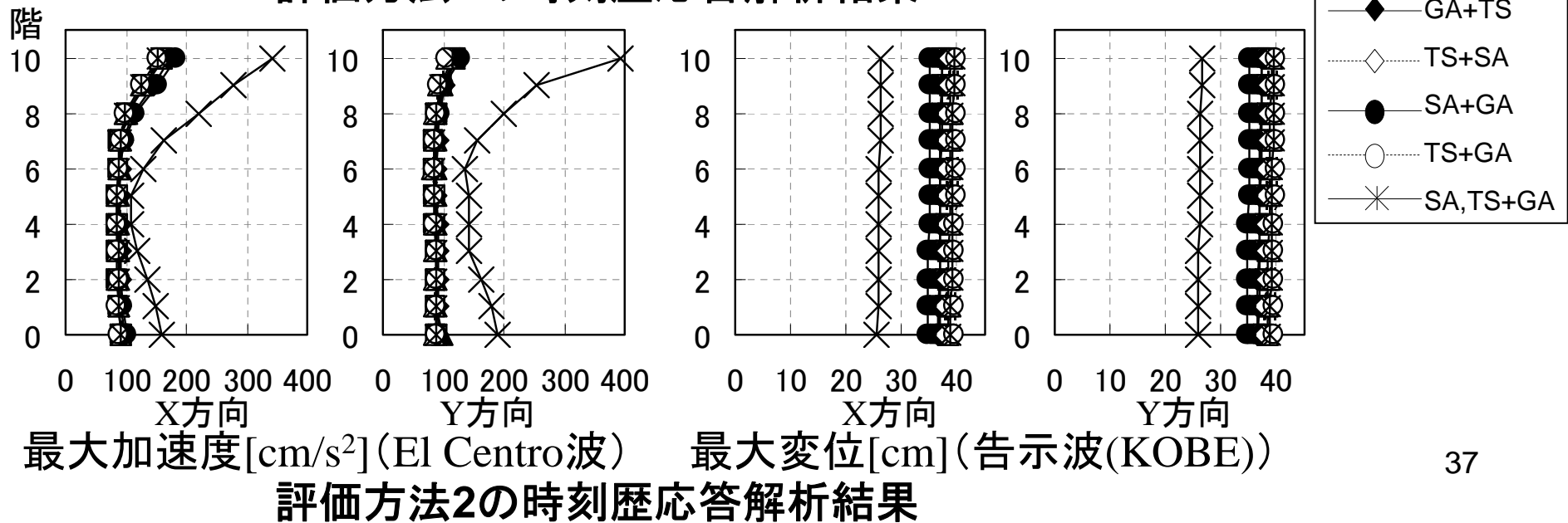
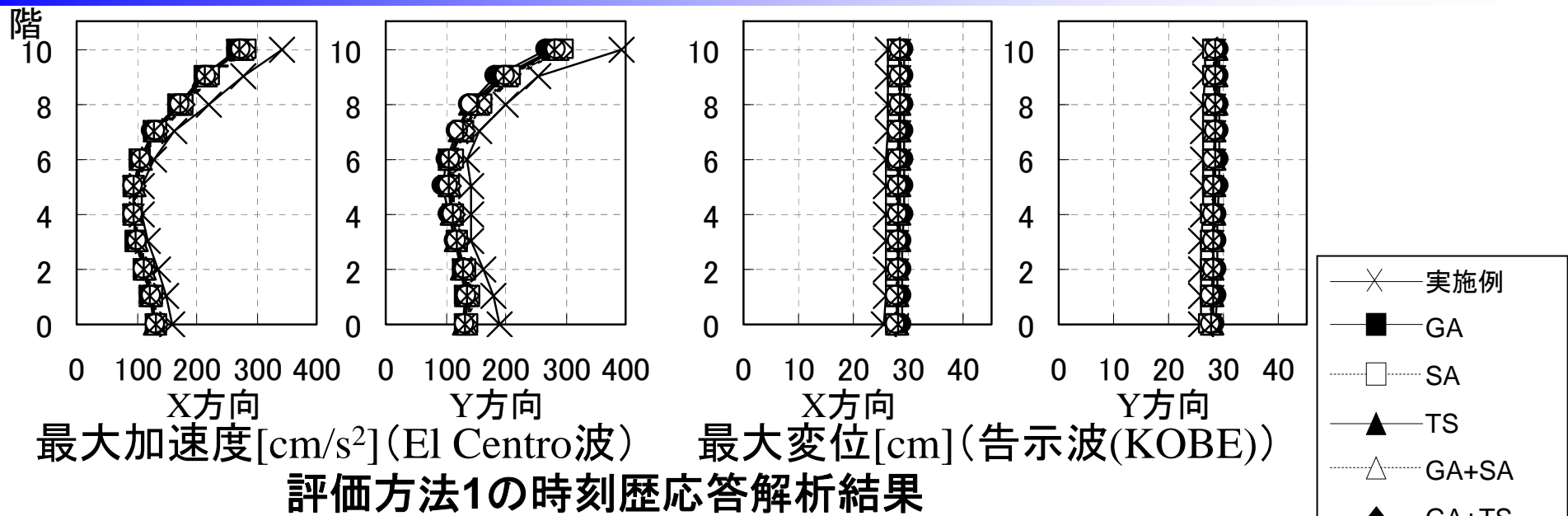
対象建物2 概要



- ・地上10階
- ・RC造共同住宅
- ・基礎免震構造
- ・免震層固定時の固有周期
X方向:0.37秒
Y方向:0.42秒
- ・免震装置
鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)36基
- ・最適選択で選択可能な装置
LRB:8種類
RB:8種類

平面図と免震装置設置箇所

対象建物2 時刻歴応答解析結果



対象建物2 得られた配置による建物の特性値

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA
偏心率(%)	2.80	0.03	0.02	0.11	0.20	0.20	0.10	0.06	0.01	0.18
1次固有周期(s)	2.86	2.97	2.96	2.98	2.97	2.97	2.97	2.98	2.97	2.98
減衰定数(%)	24.3	22.3	22.8	22.0	22.5	22.3	22.7	21.0	22.4	22.2
降伏せん断力係数	0.046	0.043	0.044	0.043	0.044	0.043	0.044	0.041	0.043	0.043
免震層の最大水平変位(cm)	25.6	27.8	27.5	28.0	27.7	27.8	27.5	28.7	27.8	27.9
RB設置数	0	6	4	6	5	5	4	8	5	5
LRB設置数	36	30	32	30	31	31	32	28	31	31

評価方法1の最適配置の結果

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA
偏心率(%)	2.80	0.19	0.02	0.11	0.20	0.20	0.10	0.06	0.01	0.18
1次固有周期(s)	2.86	3.41	3.41	3.40	3.44	3.38	3.42	3.37	3.44	3.43
減衰定数(%)	24.3	16.4	15.8	15.4	15.8	16.0	15.9	17.2	15.3	15.4
降伏せん断力係数	0.046	0.026	0.026	0.025	0.025	0.027	0.026	0.028	0.025	0.025
免震層の最大水平変位(cm)	25.6	36.7	37.8	38.3	38.5	36.6	37.7	34.6	39.4	38.8
RB設置数	0	17	18	18	18	17	18	16	18	18
LRB設置数	36	19	18	18	18	19	18	20	18	18

評価方法2の最適配置の結果

どちらの評価方法を用いた場合も

- ・偏心率は1%以下
- ・1次固有周期、減衰定数、降伏せん断力係数は同程度
- ・最大水平変位は積層ゴムの安定変形以内

対象建物2 評価方法2 免震装置の配置

免震装置 の外径の 比較

実施例 > 最適配置

実施例 < 最適配置

RB使用箇所

※
RB:天然ゴム
系積層ゴム
LRB:鉛プラグ
入り積層ゴム

数字は積層ゴ
ムの外径(mm)
を表す

	実施例	GA	SA	TS	GA+SA	GA+TS	TS+SA	SA+GA	TS+GA	SA,TS+GA
1	LRB900-160	RB750	RB750	RB750	LRB750	LRB750	RB750	LRB750	LRB750	LRB750
2	LRB900-160	LRB750	LRB750	RB750	LRB750	LRB750	RB750	RB750	LRB750	RB750
3	LRB900-180	LRB850	LRB900	RB950	RB800	RB950	LRB850	LRB850	RB900	LRB850
4	LRB900-180	RB900	RB900	LRB950	RB850	LRB800	RB900	RB900	LRB950	LRB800
5	LRB900-160	RB750	RB750	LRB800	RB750	RB750	LRB800	RB750	RB750	RB750
6	LRB900-160	LRB800	LRB800	RB800	LRB800	LRB800	LRB800	RB800	RB800	LRB800
7	LRB1000	LRB950	RB950	RB950	RB950	RB1000	LRB950	LRB1000	LRB1000	LRB1000
8	LRB950	LRB1100	LRB1000	RB1100	LRB1100	LRB900	LRB1100	RB1000	LRB900	RB1000
9	LRB900-160	LRB800	RB800	LRB850	LRB800	LRB800	LRB800	LRB800	LRB850	LRB800
10	LRB900-160	RB750	RB750	LRB800	RB750	RB750	RB750	RB750	RB750	RB750
11	LRB900-160	RB800	LRB850	RB800	RB800	RB800	LRB850	LRB800	RB800	LRB800
12	LRB900-180	LRB850	RB850	RB800	LRB850	LRB1000	RB850	LRB850	RB800	LRB900
13	LRB950	RB1000	LRB850	LRB850	RB950	LRB950	RB850	RB900	RB1000	LRB1000
14	LRB1000	RB950	RB950	LRB1100	LRB1100	RB1100	RB1000	RB950	LRB1000	RB1000
15	LRB900-160	LRB900	RB850	LRB900	RB850	RB850	RB850	RB850	LRB900	RB850
16	LRB900-160	RB850	LRB900	RB850	LRB900	LRB900	RB850	RB850	RB850	RB850
17	LRB1000	RB950	LRB1000	RB950	RB950	RB950	RB950	LRB1000	RB950	RB1000
18	LRB950	RB900	RB1100	LRB1000	LRB1000	LRB950	LRB1100	LRB1100	RB1100	LRB1000
19	LRB900-160	RB850	RB850	RB850	LRB900	LRB900	RB850	LRB900	RB850	RB850
20	LRB900-160	RB800	LRB800	LRB850	RB800	RB800	LRB800	LRB800	LRB800	LRB800
21	LRB900-160	LRB850	LRB850	LRB850	LRB850	LRB850	LRB850	LRB850	LRB850	RB850
22	LRB1000	RB950	LRB1000	LRB950	LRB950	LRB950	RB950	LRB950	LRB950	RB950
23	LRB1000	LRB1000	LRB1100	LRB950	LRB950	LRB1000	RB900	RB900	LRB950	RB950
24	LRB950	LRB950	LRB950	LRB950	RB900	RB950	LRB950	RB900	RB900	LRB950
25	LRB1000	LRB1000	RB1000	RB1000	RB1000	LRB1000	LRB1000	LRB1000	LRB1000	LRB1000
26	LRB900-160	LRB800	RB800	LRB800	RB800	RB800	LRB800	RB800	LRB800	RB800
27	LRB950	LRB1000	RB850	RB950	RB850	RB1000	LRB1100	LRB1000	RB850	RB1000
28	LRB950	LRB900	RB900	LRB950	RB900	LRB950	LRB900	LRB900	RB950	RB900
29	LRB900-180	RB750	RB750	RB800	LRB850	LRB800	RB750	LRB800	LRB800	LRB850
30	LRB1000	LRB950	LRB950	LRB950	LRB950	RB950	RB950	LRB950	RB950	LRB1000
31	LRB950	RB900	RB900	RB950	LRB900	LRB1100	LRB900	LRB950	RB950	RB1000
32	LRB900-180	LRB900	LRB950	RB950	LRB900	RB850	RB850	RB850	LRB900	RB800
33	LRB900-180	LRB850	LRB900	RB850	RB800	LRB850	LRB850	RB800	RB800	RB800
34	LRB900-180	RB800	LRB850	LRB800	LRB850	RB800	RB800	RB800	LRB900	LRB850
35	LRB900-180	RB850	RB850	RB850	RB850	RB950	RB850	LRB900	LRB900	LRB900
36	LRB900-180	LRB850	LRB850	LRB900	RB800	RB800	LRB850	LRB900	RB850	LRB900

アイソ
レーター
設置番号

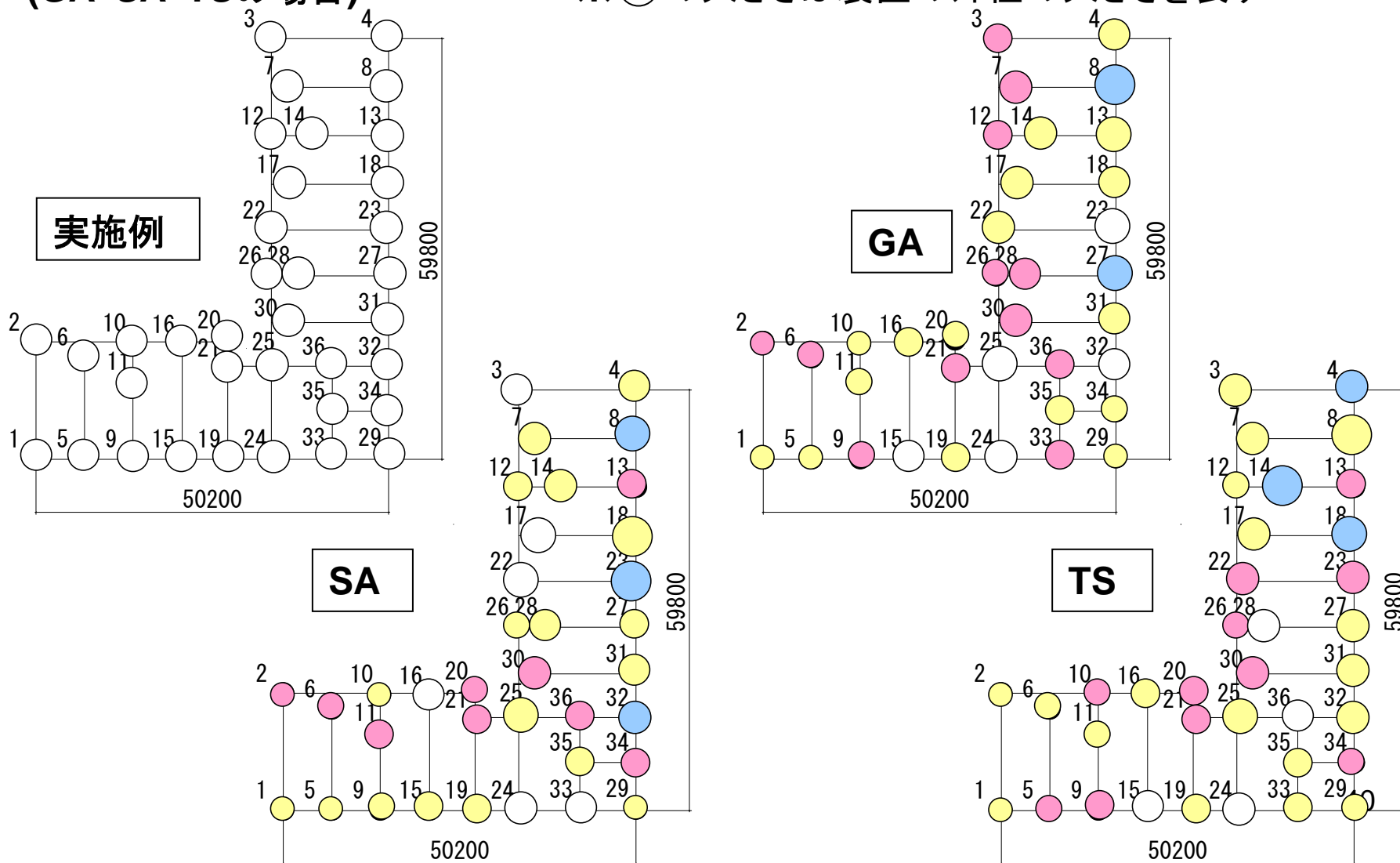
対象建物2 評価方法2 免震装置の配置例

免震装置の外径の比較

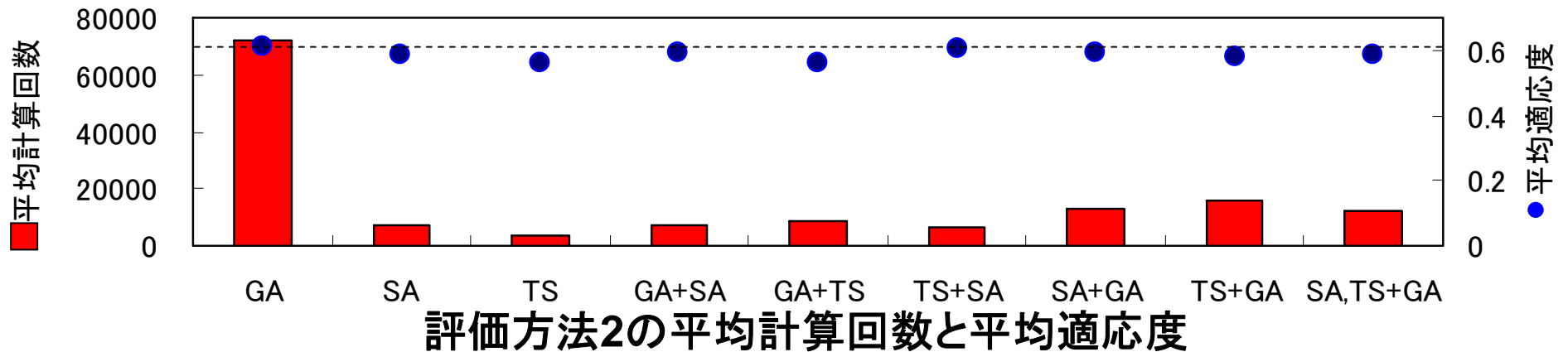
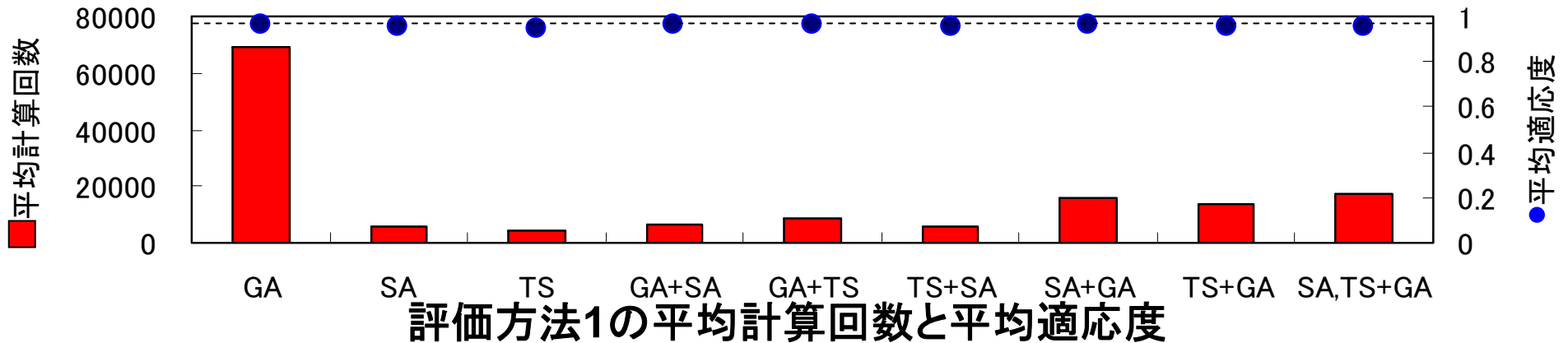
● 実施例 > 最適配置 ● 実施例 < 最適配置 ● RB

(GA・SA・TSの場合)

※○の大きさは装置の外径の大きさを表す

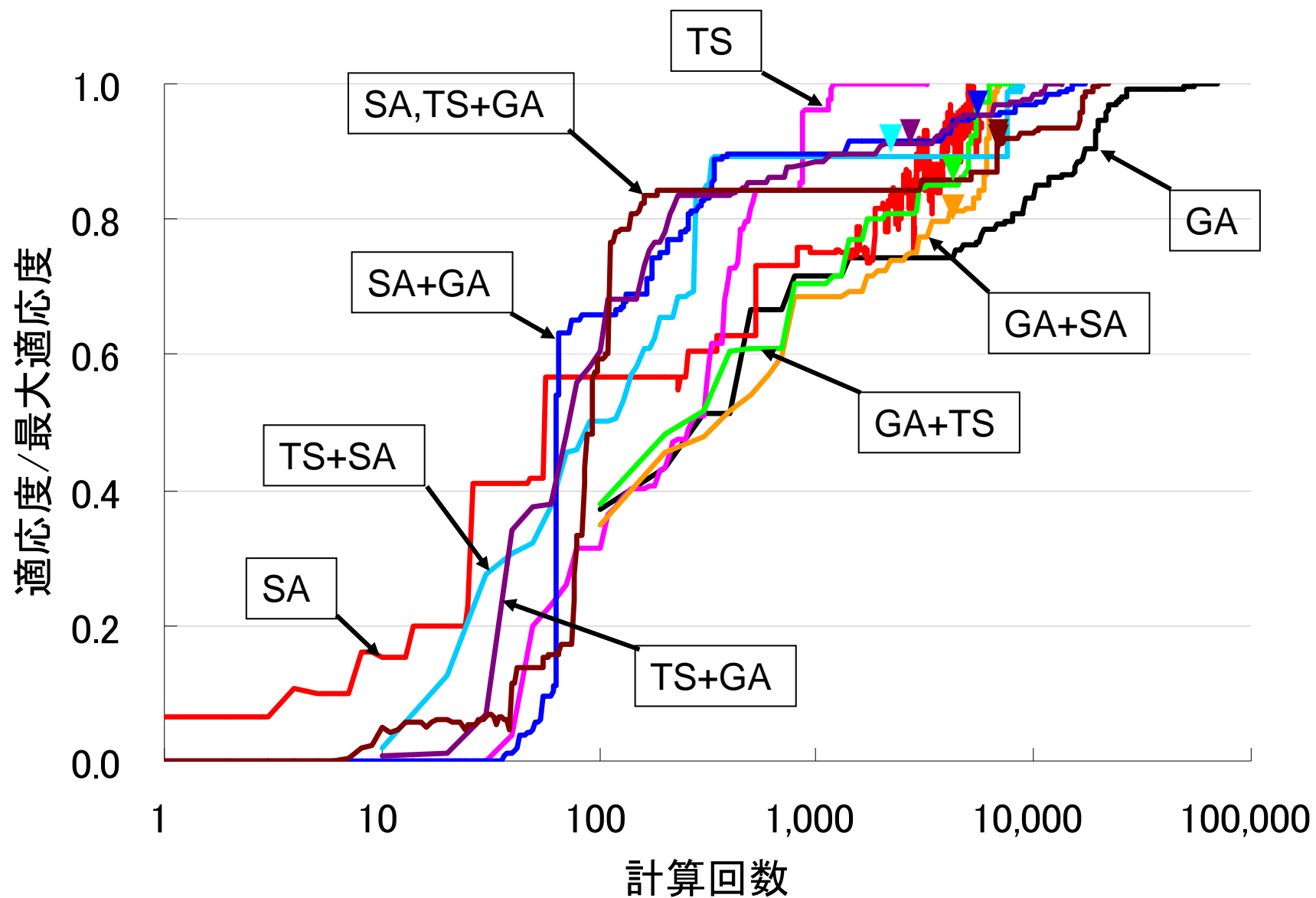


対象建物2 探索能力と計算回数の比較



- ・探索能力・・・どちらの評価方法を用いた場合も、GAとその他の手法は同程度
- ・計算回数・・・どちらの評価方法を用いた場合も、GA以外のすべての手法で低減

対象建物2 評価方法2 適応度推移グラフ



まとめ

- 上部構造の応答を評価
 - 上屋最大応答加速度の低減
最大大応答変位は増加
- SA, TSとこれらとGAに複合手法
 - GAと同程度の探索能力
計算回数の点でGAよりも有利
- SA, TSは計算回数が最も少なく適応度も高い