

**固有値解析を用いた
エネルギー関数法に関する研究**

MC2 松本 暁

(先端電力工学(東北電力)寄附講座)

研究の背景

電力需要の増加

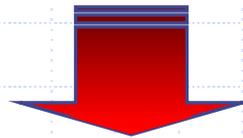


電力系統の大規模化・複雑化



- ・解析ケースの増加
- ・モデル系統の大規模化・複雑化

電力の安定供給を行うためには高速・高精度な電力系統安定度解析が必要



過渡安定度解析

解決策

計算労力が膨大

エネルギー関数法

古典的なエネルギー関数法

●等面積法

Xd' 背後電圧一定の発電機モデル(古典モデル)対象

安定判別

運動エネルギー V_k

=
>
<

ポテンシャルエネルギー V_{pmax}

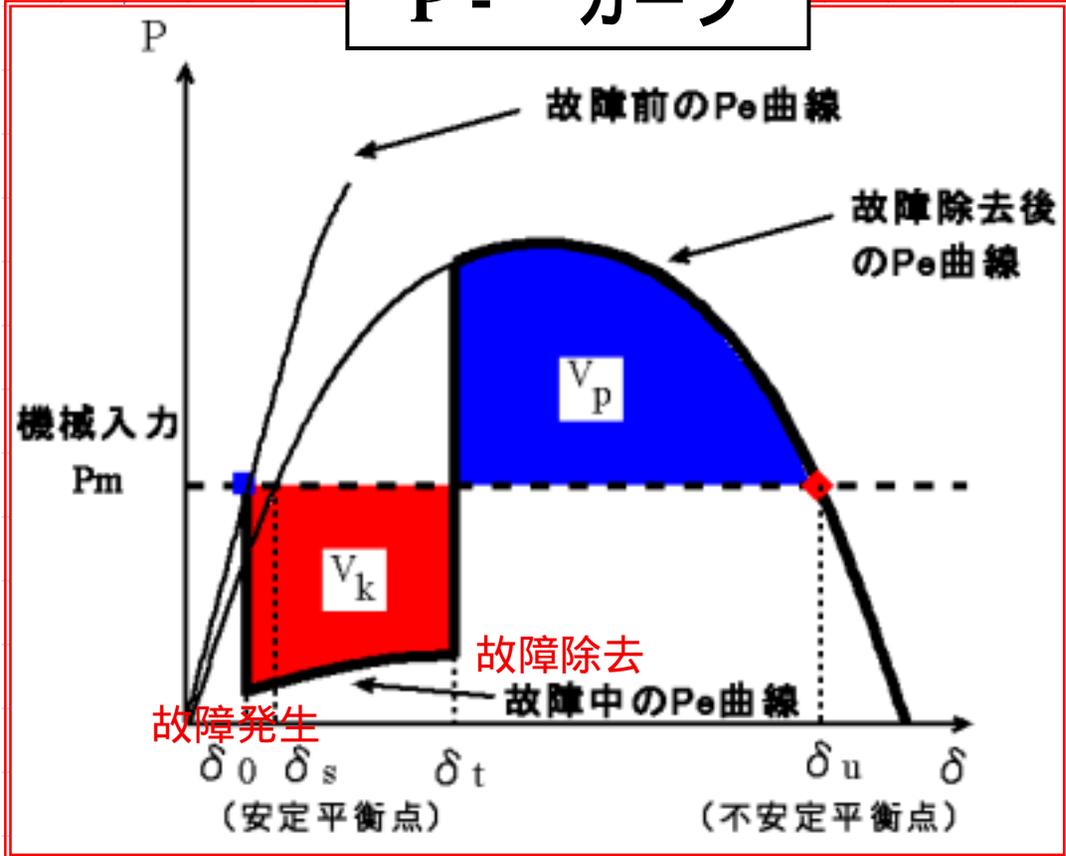
$$V_k = \frac{1}{2} M \dot{\delta}^2$$

$$V_p = \int_t (P_e - P_m) d\delta$$

問題点

- 詳細な発電機モデルに対応していない
- 多機系統では不安定平衡点(UEP)が分からない

P - カーブ

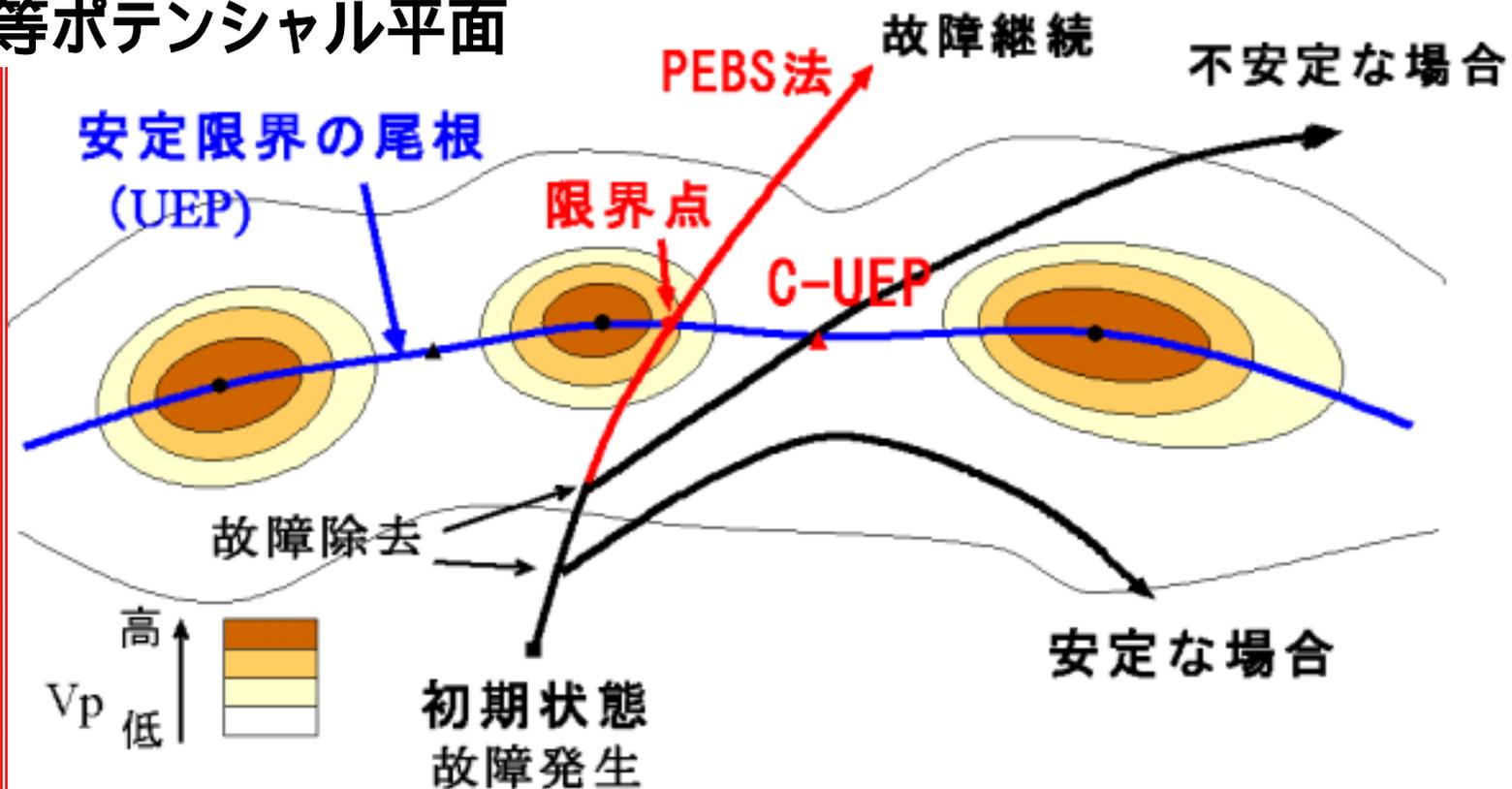


現在のエネルギー関数法

PEBS法

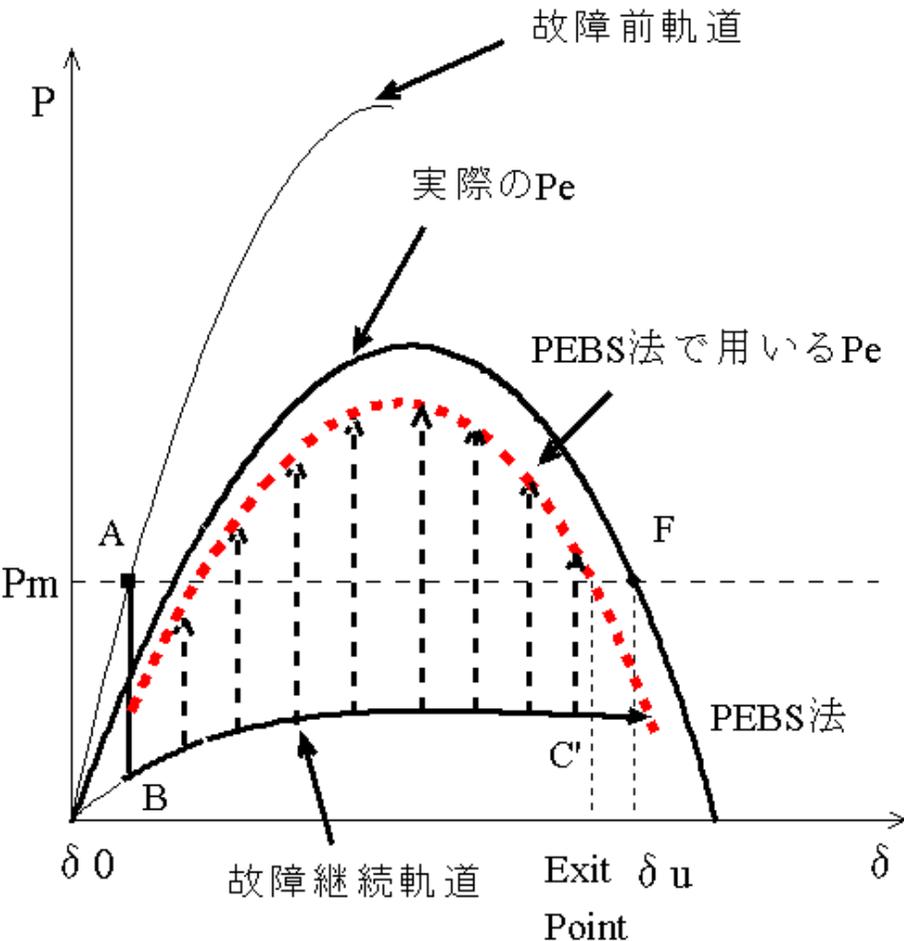
故障を継続させることで、系統の故障後の軌道が安定限界を越える限界点を求める手法

等ポテンシャル平面



PEBS法の問題点

故障継続



- ・発電機の背後電圧が低下
- ・発電機の制御系の効果が反映されない

安定判別精度が悪化

高精度なエネルギー関数法

提案手法

(固有値解析を用いたエネルギー関数法)

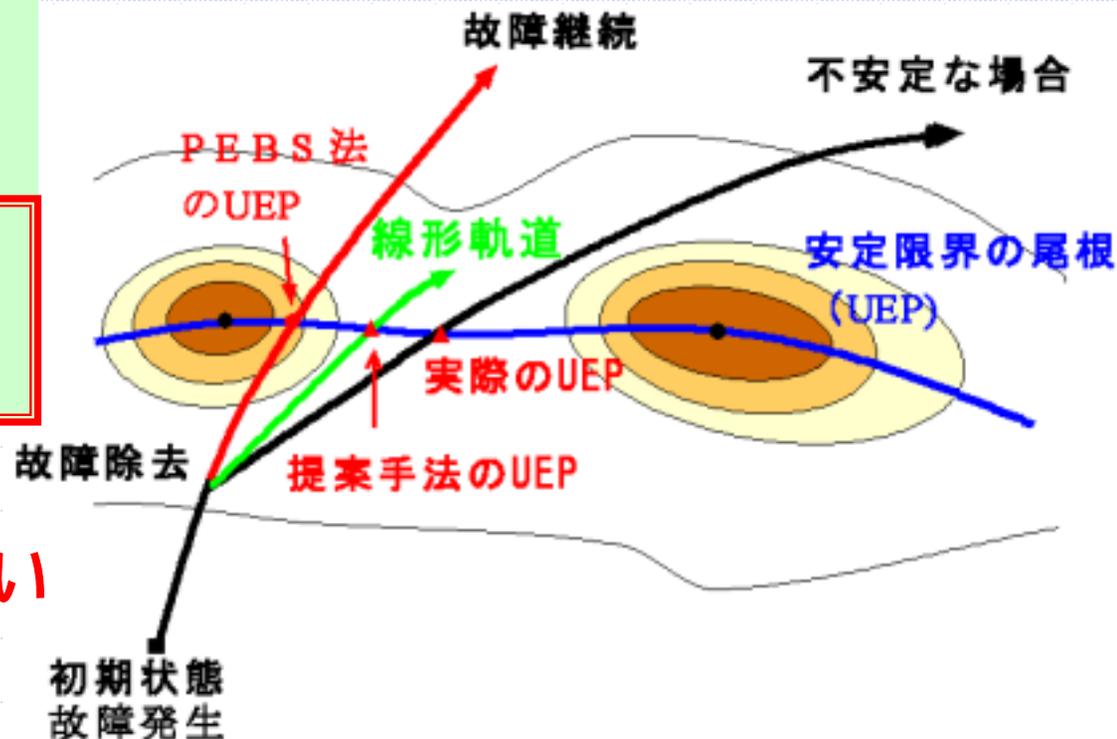
固有値解析を用いて故障除去後系統が辿る軌道を線形近似し、その軌道をもとに V_{pmax} を算出する手法

特徴

- 使用モデルに制約がない
- 計算時間短縮の可能性
- 発電機出力の低下を防ぐ
- 発電機の制御系を考慮

PEBS法より近似精度が高い

軌道延長法の併用



提案手法1 (加速法)

(0)を増加させることで故障による擾乱を人為的に拡大しUEPへ到達させる手法

故障除去直前
の $x(0)$

故障除去後

固有値法による系統軌道計算

$$\begin{aligned} c &= P^{-1} x(0) \\ &= P^{-1} \begin{bmatrix} (0) \\ (0) \\ (0) \\ \vdots \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n c_i p_i e^{\lambda_i t}$$

擬似的に実際の故障による発電機の加速を促進

Cが変化

(0)増加

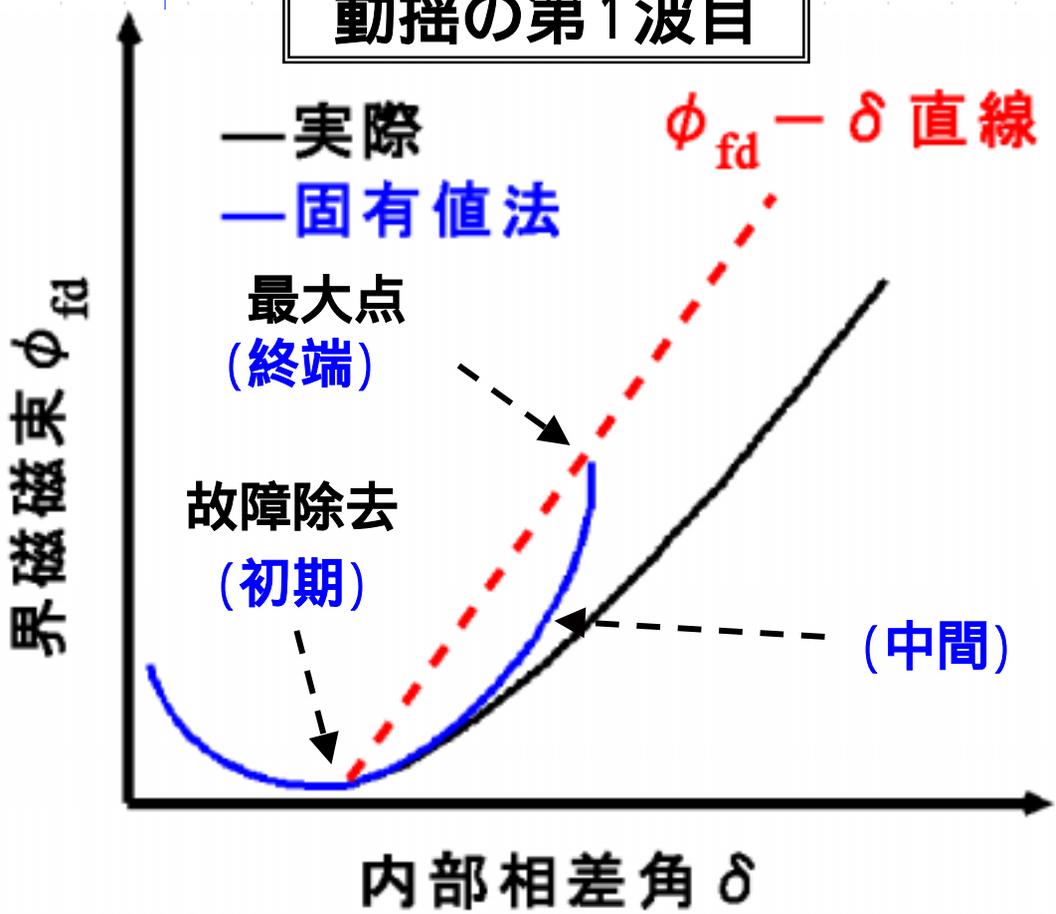
UEP到達

$$(0) = (0) \times C$$

提案手法2 (f_d 延長法)

発電機の f_d 特性を線形化軌道より算出し
その特性に従って軌道を延長する手法

動揺の第1波目



最大点まで軌道計算

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n c_i p_i e^{\lambda_i t}$$

傾きk算出

$$k = \frac{fd_n - fd_0}{n - 0}$$

f_d 増加

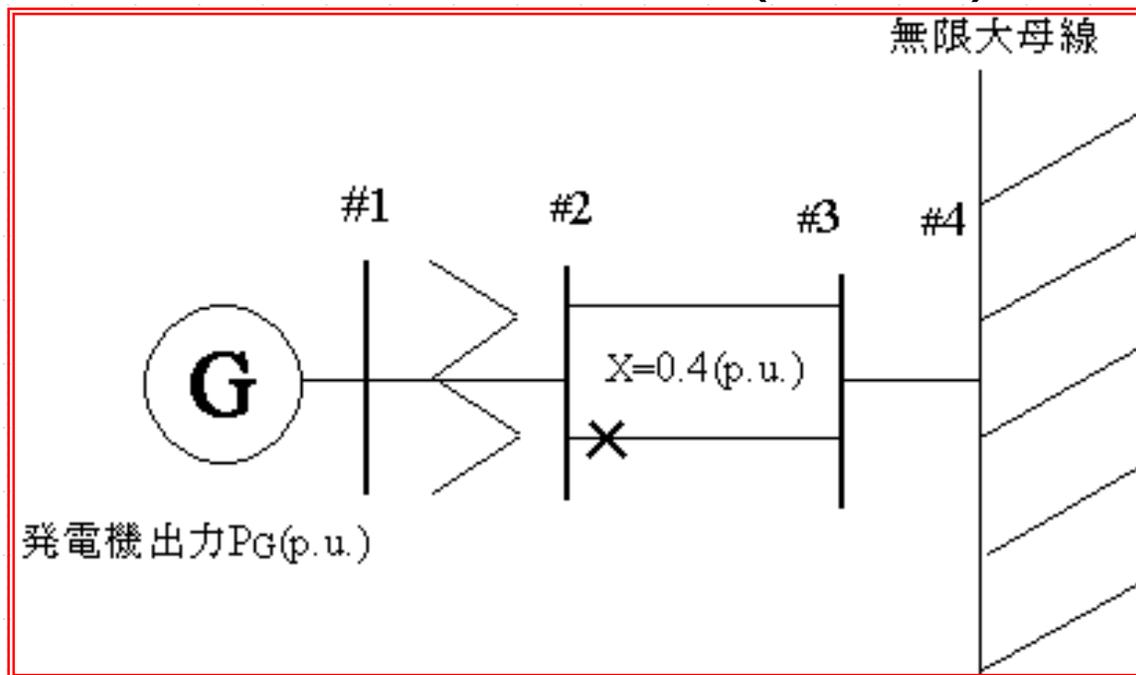
$$fd = k$$

Pe算出

UEP到達

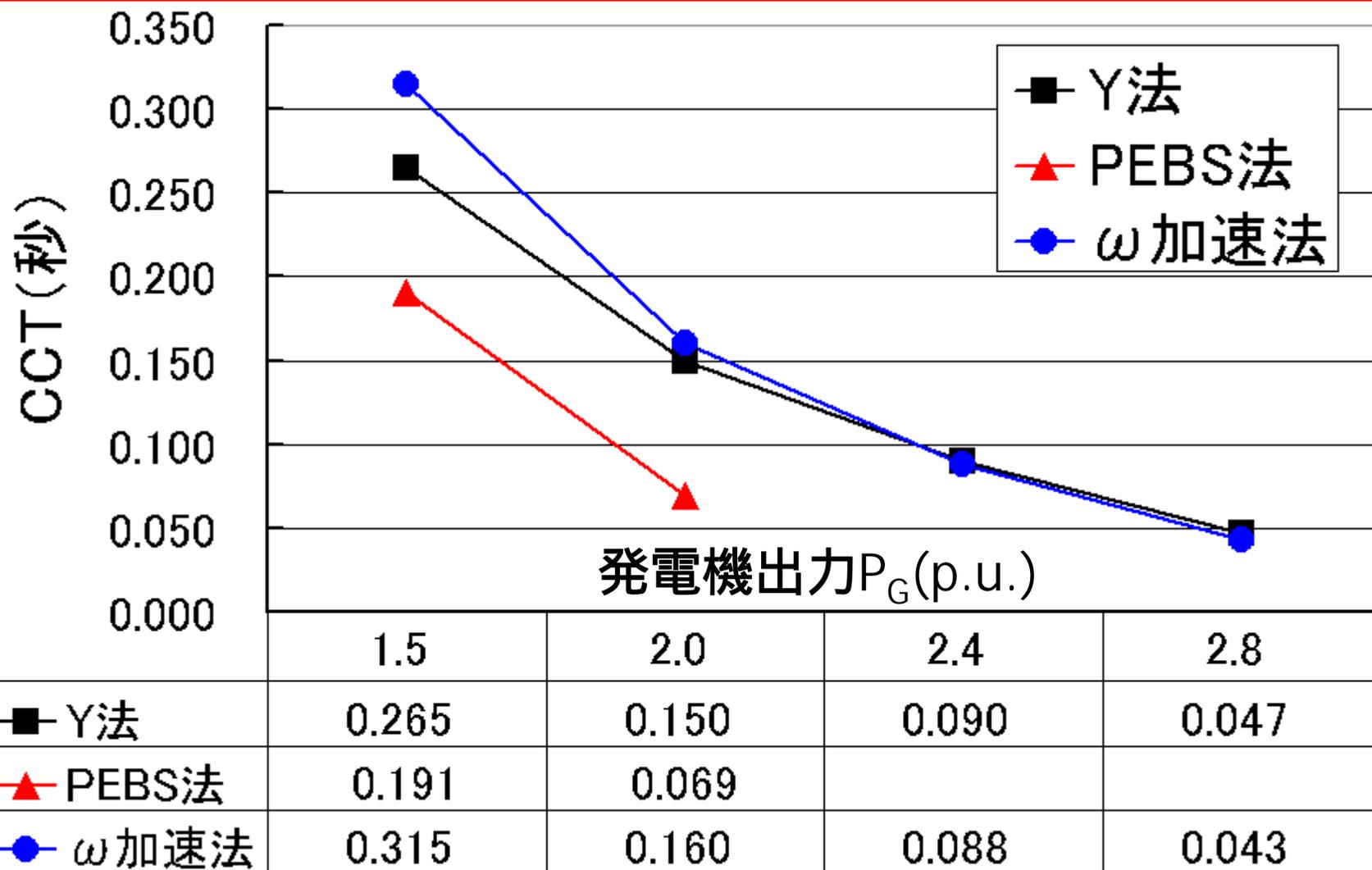
シミュレーションによる検討 (一機無限大母線系統モデル)

一機無限大母線系統(無負荷)

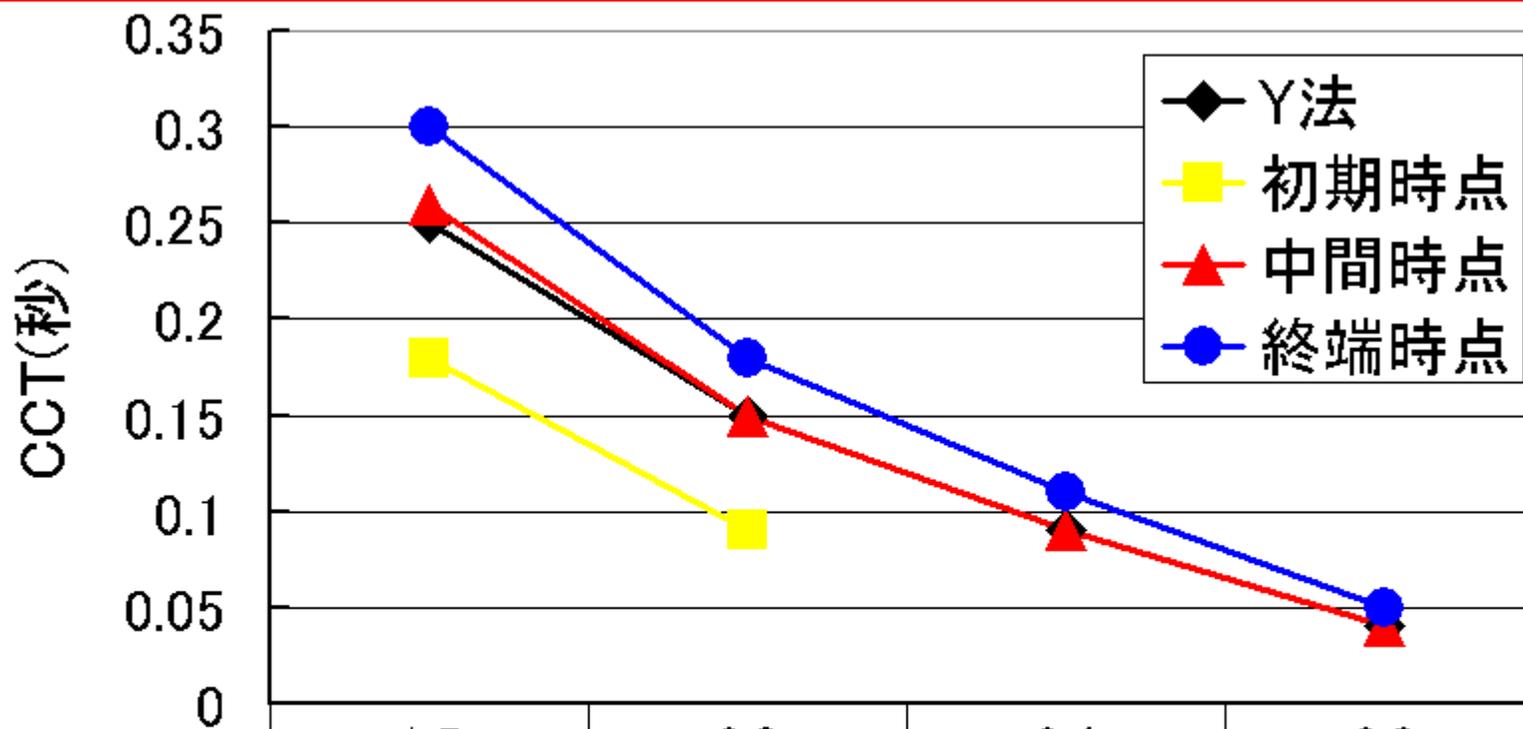


- 送電線インピーダンス 0.4 p.u./回線
- 系統容量 1000 MVA
- 発電機出力 P_G 1.5 / 2.0 / 2.4 / 2.8 p.u.
- 故障除去 1回線3LG - 3LC(人工故障試験)

CCT (臨界故障除去時間) による評価



CCTによる評価 (- f_d 延長法)



	1.5	2.0	2.4	2.8
Y法	0.25	0.15	0.09	0.04
初期時点	0.18	0.09		
中間時点	0.26	0.15	0.09	0.04
終端時点	0.3	0.18	0.11	0.05

発電機出力PG(p.u.)

1 機系におけるまとめ

加速法

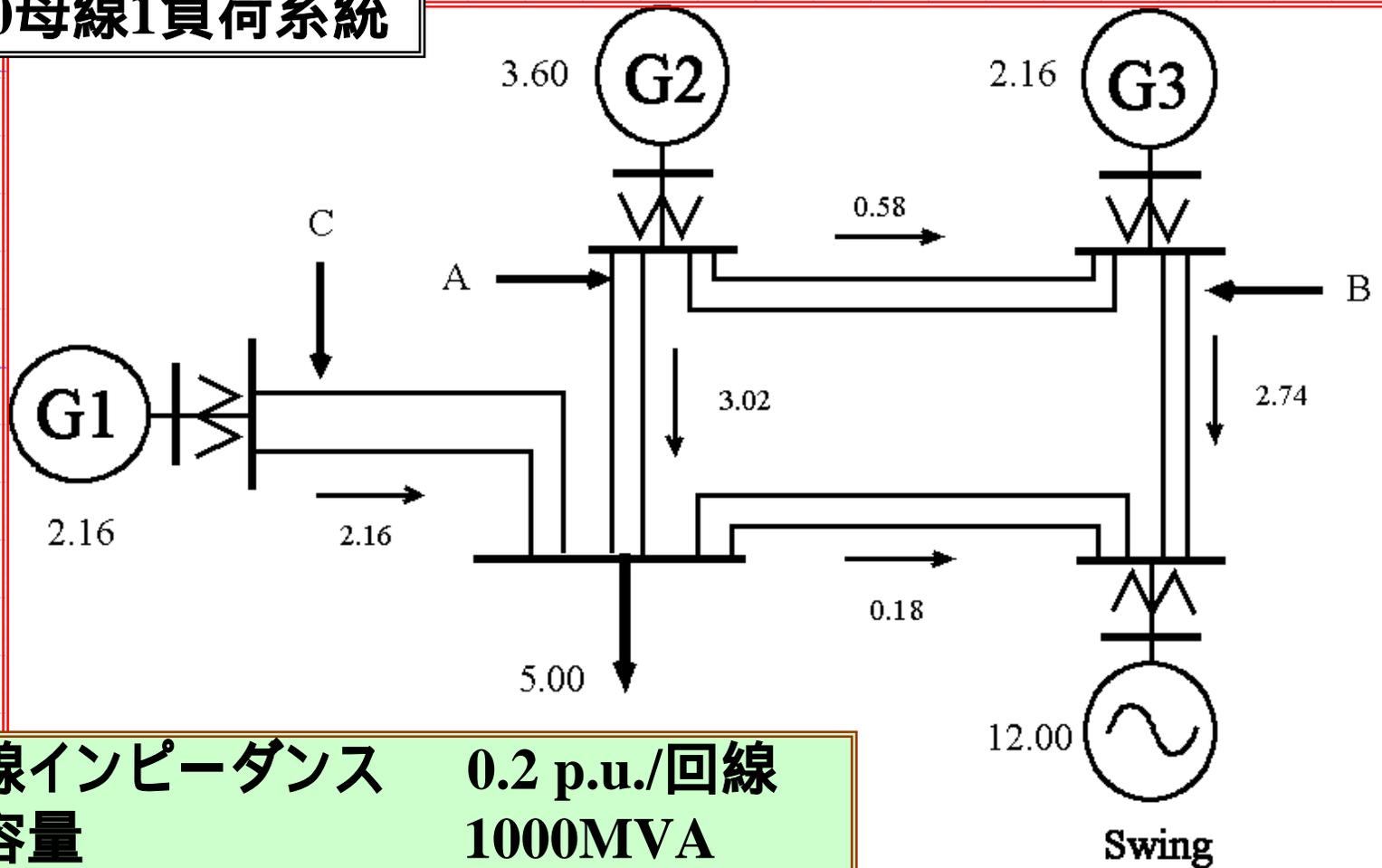
- ◆ 全体的にPEBS法より安定判別精度向上
- ◆ 厳しい系統状態になるほど精度向上

— f_d 延長法

- ◆ 全体的にPEBS法より安定判別精度向上
- ◆ 中間時点での延長法適用時の精度が良好
- ◆ 精度が延長法を適用するタイミングに大きく依存

多機系統における検証

4機10母線1負荷系統



● 送電線インピーダンス	0.2 p.u./回線
● 系統容量	1000MVA
● CCT	A地点 0.10(秒)
3LG - 3LC時	B地点 0.11(秒)
	C地点 0.16(秒)

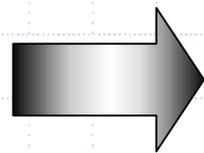
多機系統への適用 (加速法)

多機系統では 加速法による
安定判別精度が悪化



モード数の増加による
系統動揺の複雑化

$$\Delta x = \sum_{i=1}^n c_i p_i e^{\lambda_i t}$$



モード分解

• 電力モード

• 電圧モード

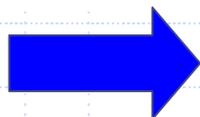
・ の動揺に支配的
の動揺に支配的

ベクトル加速法

電力モードの動揺特性を強調することで
実際のUEPへと軌道方向を修正する手法

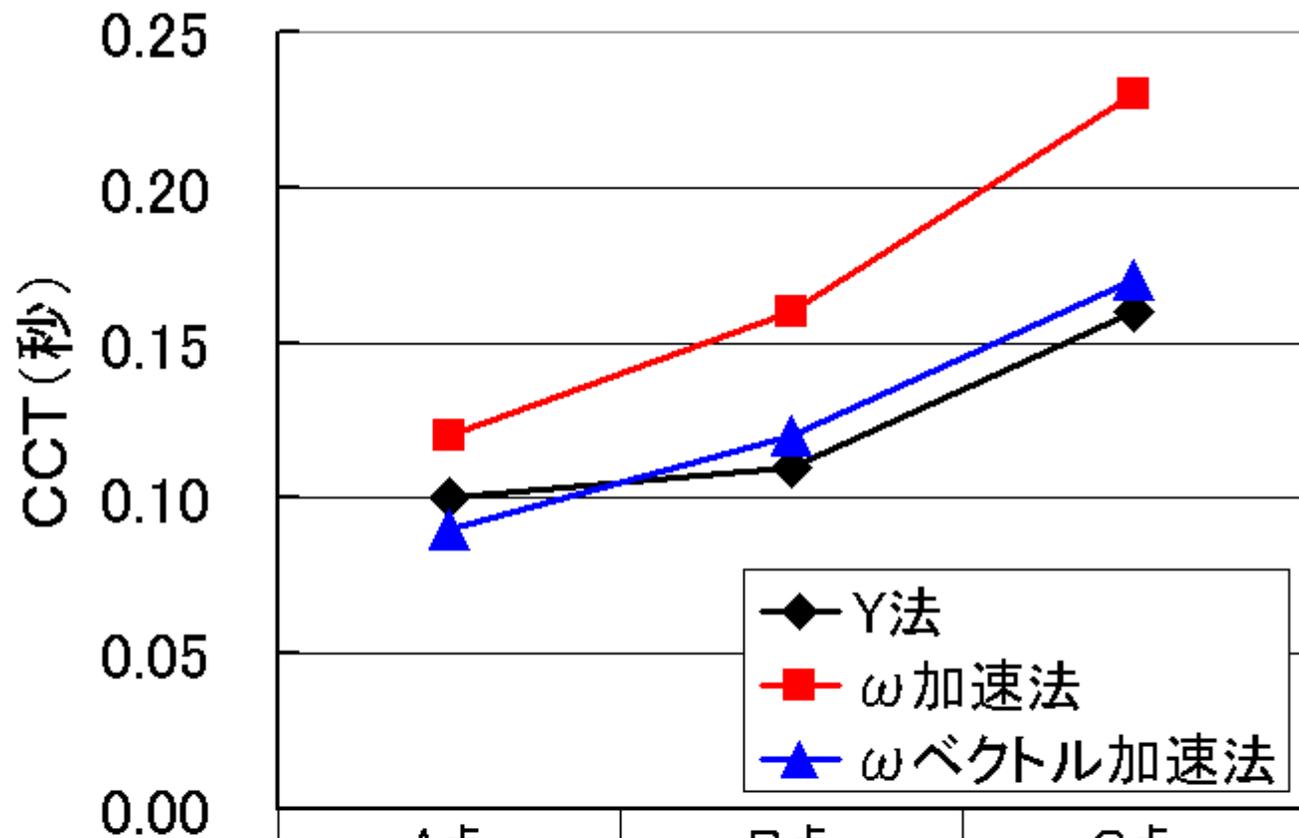
電力モードの
 $(0)_{\text{mod}}$ を抽出

(0)増加



$$(0)' = (0) + (0)_{\text{mod}} \times K$$

CCTによる評価



◆ Y法	0.10	0.11	0.16
■ ω 加速法	0.12	0.16	0.23
▲ ω ベクトル加速法	0.09	0.12	0.17

多機系統への適用 ($- f_d$ 延長法)

多機系統では $- f_d$ 延長法
による安定判別精度が悪化

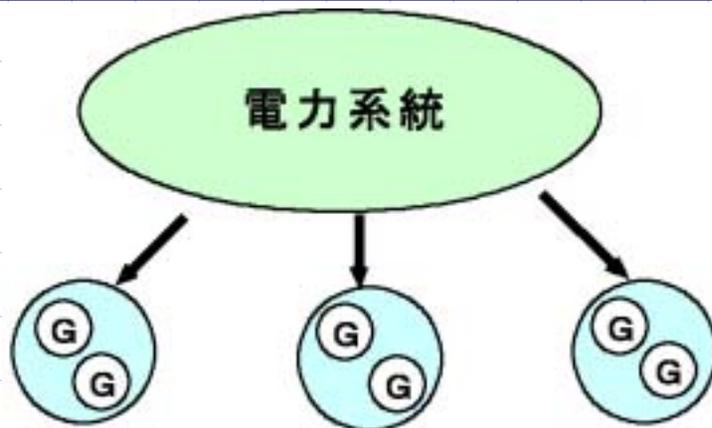


延長法適用発電機のみ変化
 f_d'

$- f_d$ 同期延長法

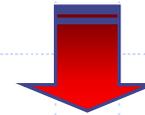
系統内で形成される発電機のコヒーレンシーを模
擬することで軌道の近似精度を向上する手法

延長法適用発電機を選択



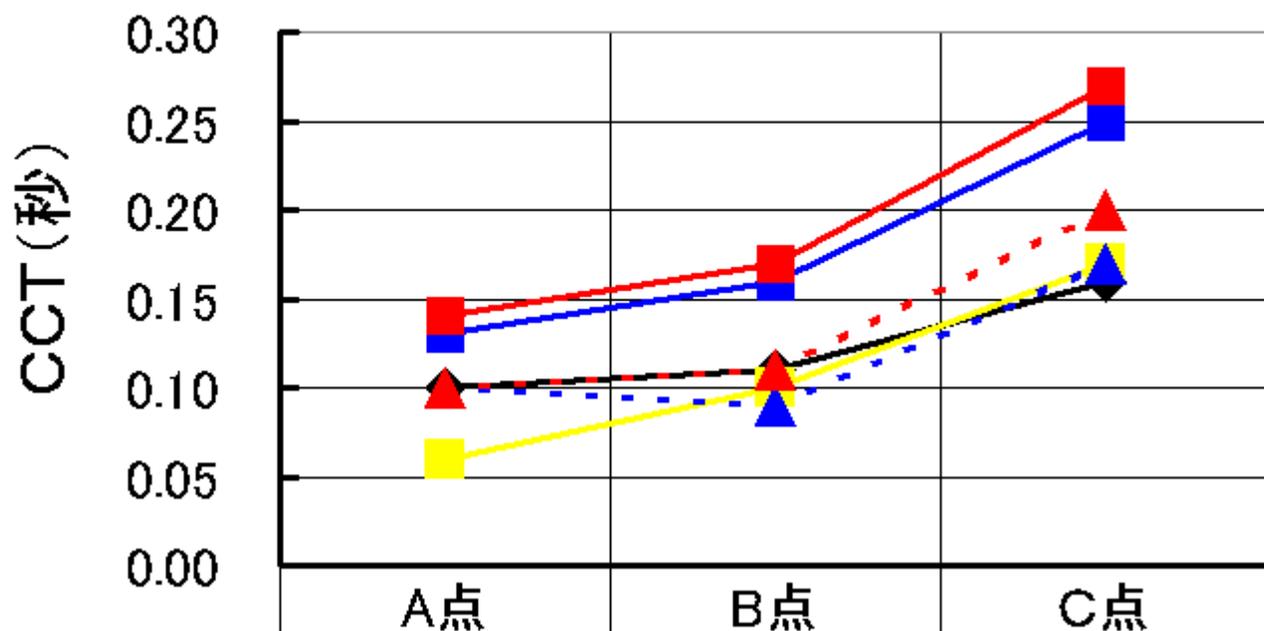
コヒーレント
グループ

$- f_d$ 延長法



コヒーレントな発電機
群単位で適用

CCTによる評価



◆ Y法	0.10	0.11	0.16
■ 延長 初期	0.06	0.10	0.17
■ 延長 中間	0.13	0.16	0.25
■ 延長 終端	0.14	0.17	0.27
▲ 延長同期 中間	0.10	0.09	0.17
▲ 延長同期 終端	0.10	0.11	0.20

多機系統におけるまとめ

(ベクトル加速法・ f_d 同期延長法)

ベクトル加速法

- ◆ 安定判別精度が高い
- ◆ 他モードの影響に関する検討が必要

電力モードの特性を考慮することで結果が改善

f_d 同期延長法

- ◆ 中間時点での延長法適用時の精度が良好
- ◆ 精度が延長法を適用するタイミングに大きく依存
- ◆ 同期した発電機群の選別

発電機の連動した動きを模擬することで結果が改善

結論

- ◆ 固有値解析を用いたエネルギー関数法を提案した
- ◆ 2つの固有値解析を用いた系統軌道延長手法(加速法・
- f_d 延長法)を提案した
- ◆ 上記の手法を多機系統での適用を目的として改良した ベ
クトル加速法・ - f_d 同期延長法を提案した
- ◆ 提案手法により、適当な条件設定をすることで高精度な安定判別を行えることを検証した