

ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントの 高速起動技術に関する研究

吉田, 泰浩

<https://hdl.handle.net/2324/4110490>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

ガスタービンコンバインドサイクル発電プラントの
高速起動技術に関する研究

吉田泰浩

目 次

1. 緒言	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 コンバインドサイクルの装置構成	4
1.1.2 コンバインドサイクルの起動方法	7
1.2 既往の研究	13
1.2.1 構成機器の改良	13
1.2.2 制御方式の改良	13
1.3 本研究の目的	14
1.4 本論文の構成	16
2. 予測制御に基づく起動技術の開発	18
2.1 制御コンセプト	18
2.1.1 ガスタービン制御方法	20
2.1.2 蒸気タービン制御方法	20
2.2 熱応力計算モデルの開発	22
2.3 制御方式の開発	26
2.4 シミュレーションによる評価	31
2.5 結言	37
3. 多目的進化的アルゴリズムによる起動技術の開発	38
3.1 起動曲線生成技術の開発	38
3.2 最適化プログラム	40
3.3 シミュレーションによる起動改善効果の検証	44
3.3.1 対象プラント	44
3.3.2 最適化条件	45
3.3.3 パレートフロント生成の評価結果	47
3.3.4 生成起動曲線の評価	48
3.3.5 起動初期条件に応じたパレートフロントの評価	56
3.4 結言	56
4. 商用プラントへの適用試験	58
4.1 対象プラント	58
4.2 起動曲線生成	60
4.2.1 動特性シミュレータの構築	60
4.2.2 最適化条件	61
4.2.3 最適化計算	62
4.3 試験結果	67
4.4 結言	71

5. モードレス起動技術の開発	72
5.1 起動コンセプト	72
5.2 モードレス起動曲線の生成方法	73
5.2.1 起動曲線生成システム	73
5.2.2 最適化プログラム	74
5.2.3 動特性シミュレータ	79
5.2.4 パラメータ推定器	79
5.3 モードレス起動曲線の生成方法	82
5.3.1 最適化計算結果	82
5.3.2 パラメータ線図の生成結果	84
5.3.3 初期メタル温度に応じた起動時間の評価	86
5.4 結言	88
6. 結論	93
参考文献	96
記号	99
謝辞	101

1. 緒言

1.1 研究背景

気候変動の主要因とされる CO2 の排出削減が重要な社会課題となっている。このため、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが国や企業で提唱され、エネルギー分野においては風力発電や太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入やこの技術開発が進められている。しかし、再生可能エネルギーを大量に導入するには、火力や原子力とは異なる発電立地となるために送電網の増強投資を通じた送配電ネットワーク全体の再設計、出力の調整力を確保するための蓄電池の価格低減など課題が多い[1]。特に出力の調整に関して、電力システムの安定性低下により電力の周波数が変動した場合、産業用機器などの不安定動作による品質低下、生産ラインの停止など製造品の不具合発生リスクがあるだけでなく、一定値以上に周波数が変動すると発電機の保護機能が働き、系統から発電機が解列されることにより大停電を引き起こす。このため、太陽光発電や風力発電などのような気象条件で出力が変動する電源については導入量が制限され、出力変動の抑制には火力発電や揚水発電などによる調整が必須となっているのが実態である。

再生可能エネルギーの出力変動対応として、火力発電では比較的短い時間でプラントを起動・停止可能であり発電効率の高いガスタービンコンバインドサイクル発電プラント(以下、「コンバインドサイクル」と言う。)が世界的に活用されている。コンバインドサイクル発電はガスタービンと、排熱回収ボイラ、蒸気タービンの組み合わせから構成され、国内の2030年のエネルギーミックスの計画においても出力調整用の中心的役割を果たすミドル電源として位置づけられている[2]。更なる出力調整能力の強化に向けて、出力変化率の増加・最低出力の低減・起動時間の短縮などの技術開発が進められている。

また、このような再生可能エネルギーの発電量変動に対応するため、一日前までに電力の売電取引が成立する従来の前日市場に加え、当日の需給数時間前に取引が成立する時間前市場が世界的に拡大している。こうした売電取引を有利に進めるため、コンバインドサイクルを保有する電力事業者にとっても起動時間の短縮が急務となっている。

さらに、電力の需給バランスを調整するため、従来は週末停止であった運用が夜間にプラントを停止して翌日朝に再起動する日間起動停止や、さらには1日に2回起動停止を繰り返すなど起動・停止回数が増加している。この起動停止では機器の寿命を消費し、従来通りの

機器運用ではプラントの耐用年数が短縮することとなる。このため、一回の起動当たりの寿命消費量の低減が重要となる。これに加え、再生可能エネルギーの増加により、コンバインドサイクルのトータルの発電時間は減少傾向にあり、運転収益を向上させるため起動に要する燃料消費量の低減も重要となる。このように、コンバインドサイクルの起動に際しては起動時間の短縮、機器寿命消費量の低減、燃料消費量の低減など、発電事業者からの要望が多様化している。

1.1.1 コンバインドサイクルの装置構成

コンバインドサイクルは、ガスタービンと蒸気タービンの2種のタービンを組み合わせて発電する方法であり、ガスタービンの排ガスを排熱回収ボイラで熱回収し、発生した蒸気により蒸気タービンを駆動する。コンバインドサイクルの構成はガスタービンと蒸気タービンの組み合わせ方法に応じて一軸式と多軸式に分類される。ガスタービンと蒸気タービンが同軸で連結される一軸式の構成を図 1.1 に示す。

ガスタービンは、大気を吸気して圧縮する圧縮機と、圧縮した高压の空気と LNG などの燃料を混合して燃焼する燃焼器と、高温高压の燃焼ガスを膨張させて仕事をするタービンの3要素より構成される。ガスタービンの回転軸は、薄い複数のディスクをボルトで繋げた組み立て式ロータであり、熱容量が小さい。また、ロータを格納するケーシングにおいても、圧縮機の吐出圧が 2MPa 前後と後に説明する蒸気タービンと比較して低圧であるため、肉厚が薄く熱容量が小さい。このため、起動時の構造体の温度変化による熱応力や構造体間の熱伸びの差の影響が少なく起動特性に優れている[3]。

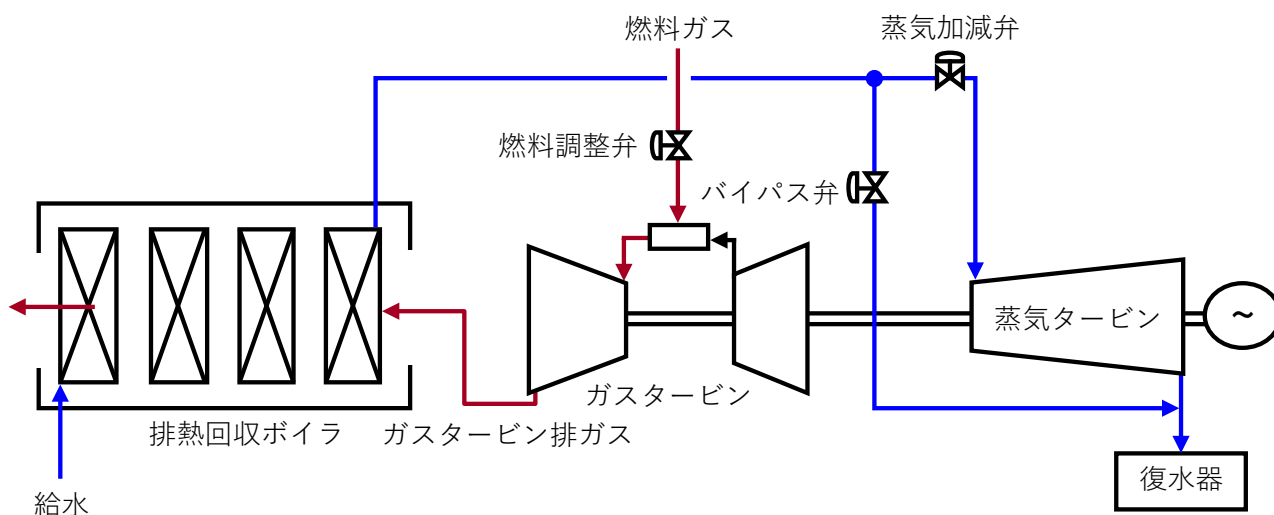


図 1.1 一軸式コンバインドサイクルの構成

排熱回収ボイラは、ガスタービンの排ガスから熱を回収する伝熱管が内部に配置され、熱回収を効率化するため生成する蒸気を高圧、中圧、低圧といった複圧化する方式が主流となっている。さらに、これら高圧、中圧、低圧の伝熱管群は、給水を加熱する節炭器と、加熱された温水を蒸発させて飽和蒸気を作る蒸発器と、飽和蒸気を加熱し過熱蒸気とする過熱器に分類される[4]。節炭器、蒸発器、過熱器などの伝熱管は多数の細管から構成され、蒸発器で蒸発した蒸気はドラムに集められ、過熱器で過熱された蒸気はヘッドに集められる。また、過熱器には蒸気タービン入口の蒸気温度を一定に保つための減温器が備えられている。

排熱回収ボイラ内の構造体の模式図を図 1.2 に示す。排熱回収ボイラの起動では、熱容量の異なる構造体の接続部位に熱応力が集中することによる疲労破壊が懸念される。このような応力集中が発生する箇所としては、過熱器とヘッドの接合部や、蒸発器とドラムの接合部が挙げられる[5]。起動過程において熱容量の小さい過熱器や蒸発器などの伝熱管が高温のガスタービンの排ガスにより加熱され、それらと接続される肉厚なヘッドやドラムとの間に温度差が生じる。これにより発生する熱応力が許容値内となるようガスタービン排ガスの流量増加率や温度上昇率を制御する必要がある。

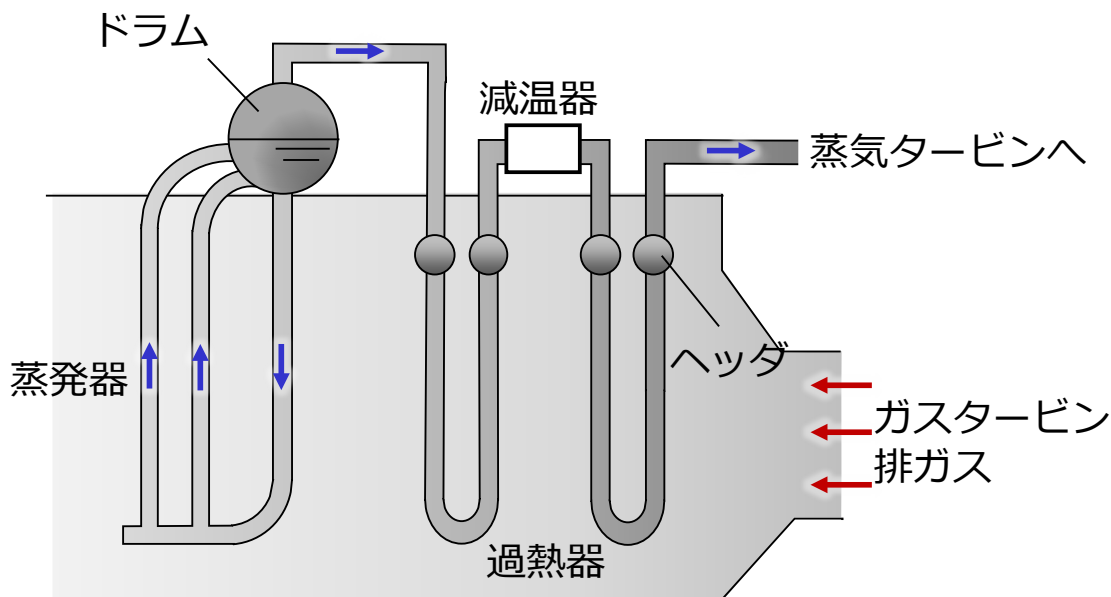


図 1.2 排熱回収ボイラの模式図

蒸気タービンは、排熱回収ボイラで生成された高圧、中圧、低圧それぞれの蒸気を用いて仕事をする高圧タービン、中圧タービン、低圧タービンから一般に構成される。高圧タービンで仕事をした蒸気は排熱回収ボイラで再熱し、中圧蒸気と合わせて中圧タービンを駆動する。中圧タービンで仕事をした蒸気は低圧蒸気と合流し、低圧タービンを駆動する。低圧タービンで仕事をした蒸気は復水器にて海水などとの熱交換により冷却され、再び排熱回収ボイラへの給水として利用する。このように熱サイクルを最適化することで効率の向上が図られている。

蒸気タービンの模式図を図 1.3 に示す。蒸気タービンの起動に際しては、停止中の大気への放熱により温度が低下していたロータが高温高圧の蒸気にさらされ表面と内部に温度差が生じる。これによりロータ内に熱応力が発生し、低サイクル疲労により機器寿命を消費する[6]。また、効率向上に向けて蒸気タービンに供給される蒸気は高温・高圧化の方向にあり、これに耐えられるよう蒸気タービンのケーシングはガスタービンと比較して肉厚となっている。ケーシングを二重とすることでタービン内部に作用する温度・圧力を内側と外側の両ケーシングで分担させる[7]ことなどで薄肉化が図られているものの、一般的にロータと比較してケーシングの膨張伸縮が遅く、両者の間で熱伸びに差が生じる。この熱伸び差によりロータに取り付けられたブレードとケーシング間のクリアランスが狭まり接触するとタービンを損傷することとなるため、熱伸び差が制限値内に収まるよう蒸気温度や蒸気流量を制御する必要がある。蒸気温度はガスタービンの出力や排熱回収ボイラにおける減温器で、蒸気流量は蒸気タービン入口の蒸気加減弁で制御するのが一般的である。

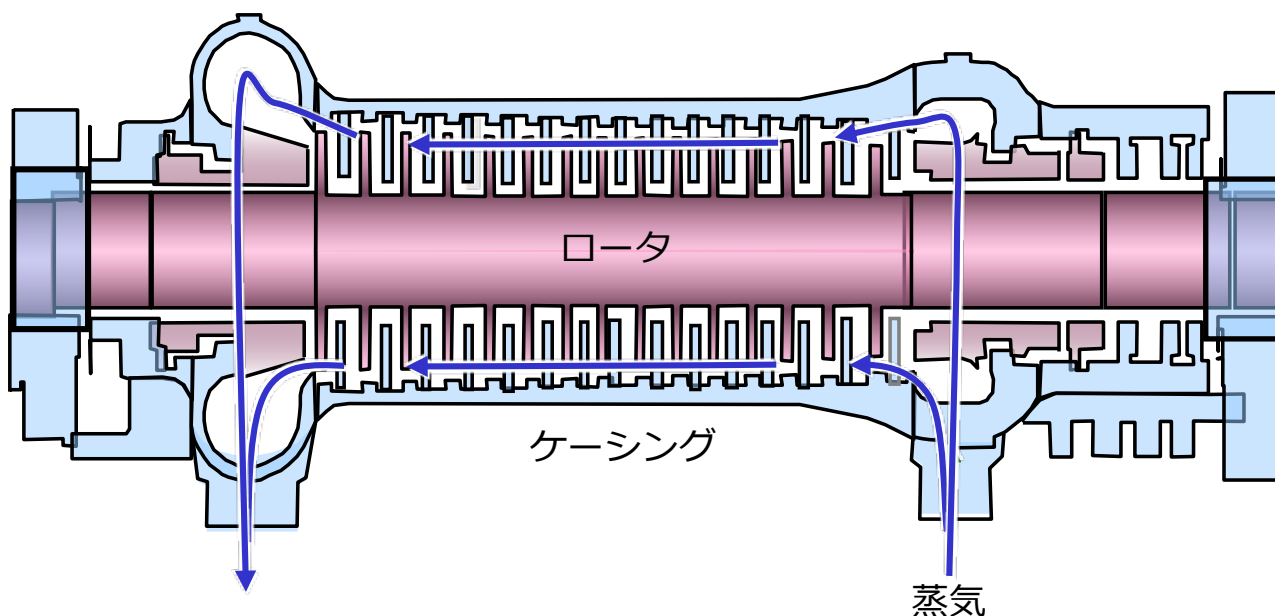


図 1.3 蒸気タービン模式図

1.1.2 コンバインドサイクルの起動方法

ガスタービンと蒸気タービンのロータが同軸で連結された一軸式コンバインドサイクルの起動方法の例を図 1.4 に示す。まず、ガスタービンの圧縮機を駆動し、プラント停止中に構成機器内に漏洩の可能性がある燃料ガスを系外に排出するパーズ運転を実施する。規定のパーズ量到達後、ガスタービンに点火して軸の回転数を上昇させる。回転数が定格に到達後、発電機を電力系統に並列して電力を外部に供給する。このガスタービンの起動に伴い、高温の排ガスが発生し、排熱回収ボイラでは蒸気が発生する。この発生蒸気の圧力は蒸気タービンをバイパスする系統に備えられたバイパス弁を用いて制御し、バイパスした蒸気は復水器へ排出する。発生蒸気の温度・圧力が規定値を超えた時点（通気条件成立）で蒸気加減弁を開き蒸気タービンに蒸気を供給する。蒸気タービン通気後は、ガスタービン負荷と蒸気加減弁開度をそれぞれ定格まで上昇させて起動完了となる。この起動制御のうち、蒸気タービンに流入する蒸気条件の制御にかかる起動手順について、一軸式のコンバインドサイクルを例に順に説明する。

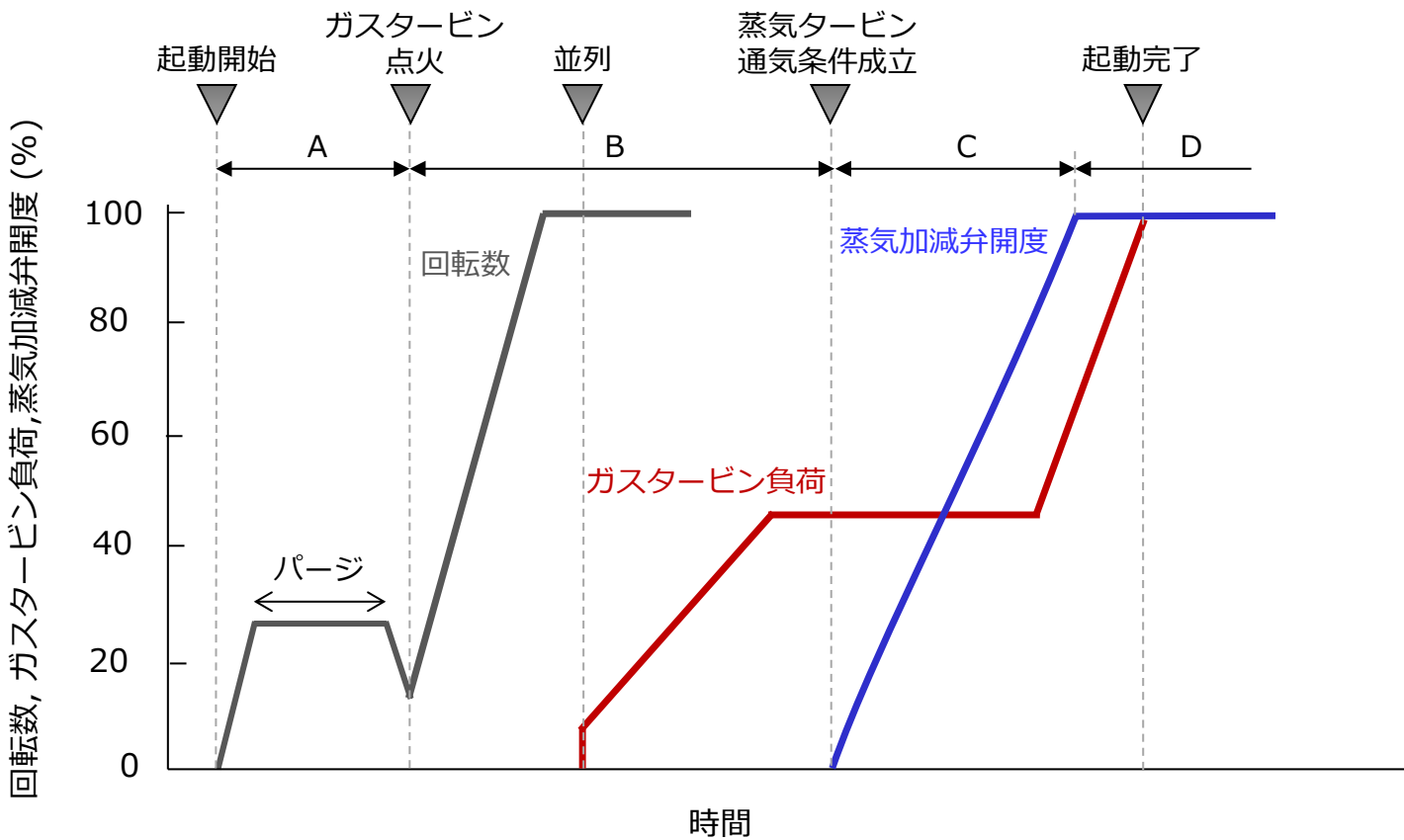


図 1.4 一軸式コンバインドサイクルの起動方法例

・ガスタービン点火前

図 1.4 における期間 A のガスタービン点火前のプラント主機および主要弁の制御動作を表 1.1 に、その時のガス・蒸気の流れを図 1.5 に示す。ガスタービンの回転数を一定に保持し、パージ運転を実施する。この間、排熱回収ボイラには給水し、節炭器やドラムなどの機器に水張りをしておく。蒸気加減弁は全閉、バイパス弁も圧力制御の結果全閉となっている。

表 1.1 プラント主機および主要弁の制御動作（ガスタービン点火前）

機器	制御
回転数	シーケンス制御
ガスタービン負荷	無負荷
蒸気タービン負荷	無負荷
蒸気加減弁	全閉
バイパス弁	圧力制御（全閉）

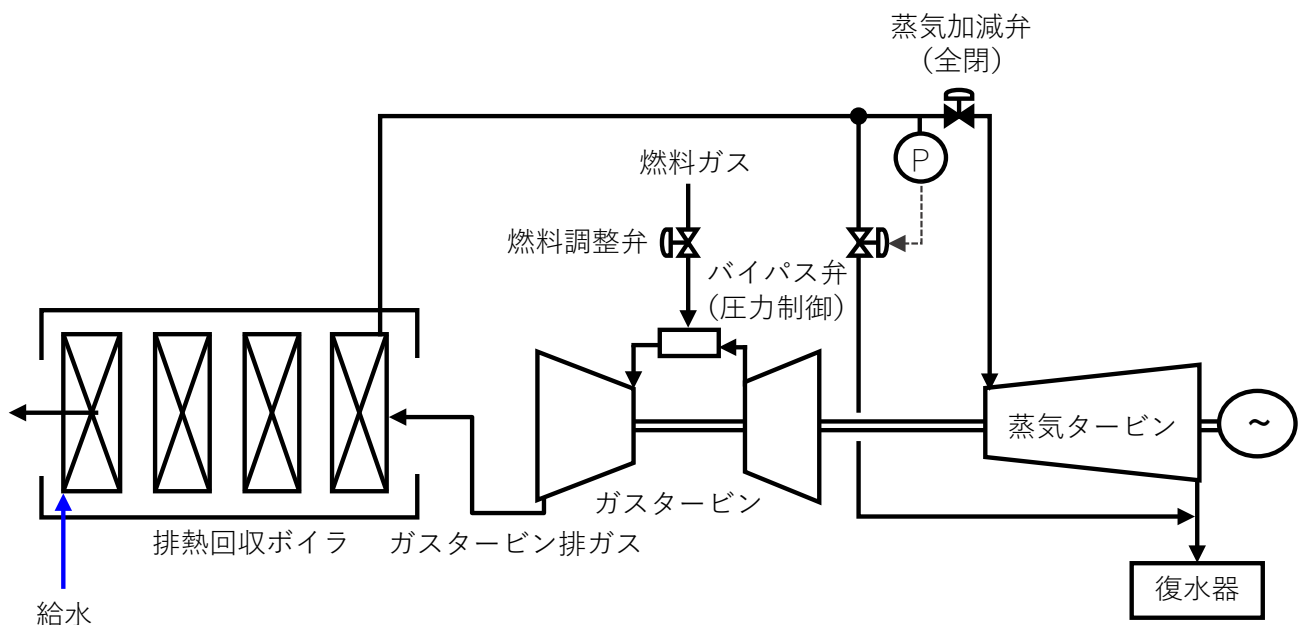


図 1.5 ガス・蒸気の流れ（ガスタービン点火前）

・蒸気タービン通気前

図 1.4 における期間 B のガスタービン点火後から蒸気タービン通気前までのプラント主機および主要弁の制御動作を表 1.2 に、その時のガス・蒸気の流れを図 1.6 に示す。ガスタービン点火後の回転数上昇にともない排熱回収ボイラに供給される排ガス熱量が増加し、蒸気発生が開始する。蒸気タービンの起動では過熱度が十分でない蒸気が蒸気タービンに供給されることで、プラント停止中に大気への放熱により温度が低下した構造体に熱が奪われて蒸気タービン内部で蒸気が凝縮するのを防止するため、蒸気温度や圧力に通気条件があらかじめ定められている。この通気条件成立までは蒸気加減弁は全閉とし、発生した蒸気は復水器にすべてバイパスする。

表 1.2 プラント主機および主要弁の制御動作（蒸気タービン通気前）

機器	制御
回転数	シーケンス制御 → 定格回転数
ガスタービン負荷	無負荷 → シーケンス制御
蒸気タービン負荷	無負荷
蒸気加減弁	全閉
バイパス弁	圧力制御

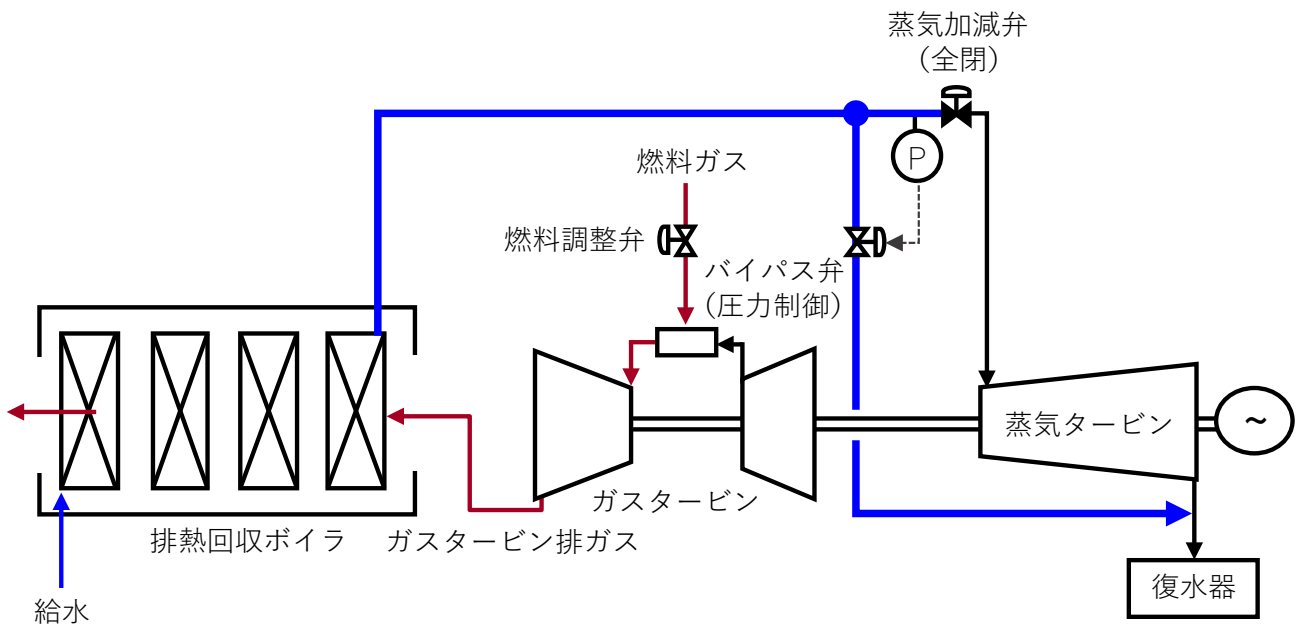


図 1.6 ガス・蒸気の流れ（蒸気タービン通気前）

・蒸気加減弁部分開度

図 1.4 における期間 C の蒸気タービン通気後から蒸気加減弁全開までのプラント主機および主要弁の制御動作を表 1.3 に、その時のガス・蒸気の流れを図 1.7 に示す。ガスタービンの負荷増加に伴う蒸気タービン入口蒸気条件の成立後、蒸気加減弁を開いて蒸気タービンへの蒸気供給を開始する。この蒸気タービン通気後、蒸気加減弁はシーケンス制御によって開度を増加させる。蒸気タービンへの蒸気供給にともないバイパス弁は圧力制御により徐々に閉じられる。蒸気タービン負荷は、これらガスタービン負荷や弁操作の結果流入した蒸気の温度・流量に追従して自動的に上昇する。

表 1.3 プラント主機および主要弁の制御動作（蒸気加減弁部分開度）

機器	制御
回転数	定格回転数
ガスタービン負荷	シーケンス制御
蒸気タービン負荷	なし（流入する蒸気温度・流量に追従）
蒸気加減弁	シーケンス制御
バイパス弁	圧力制御

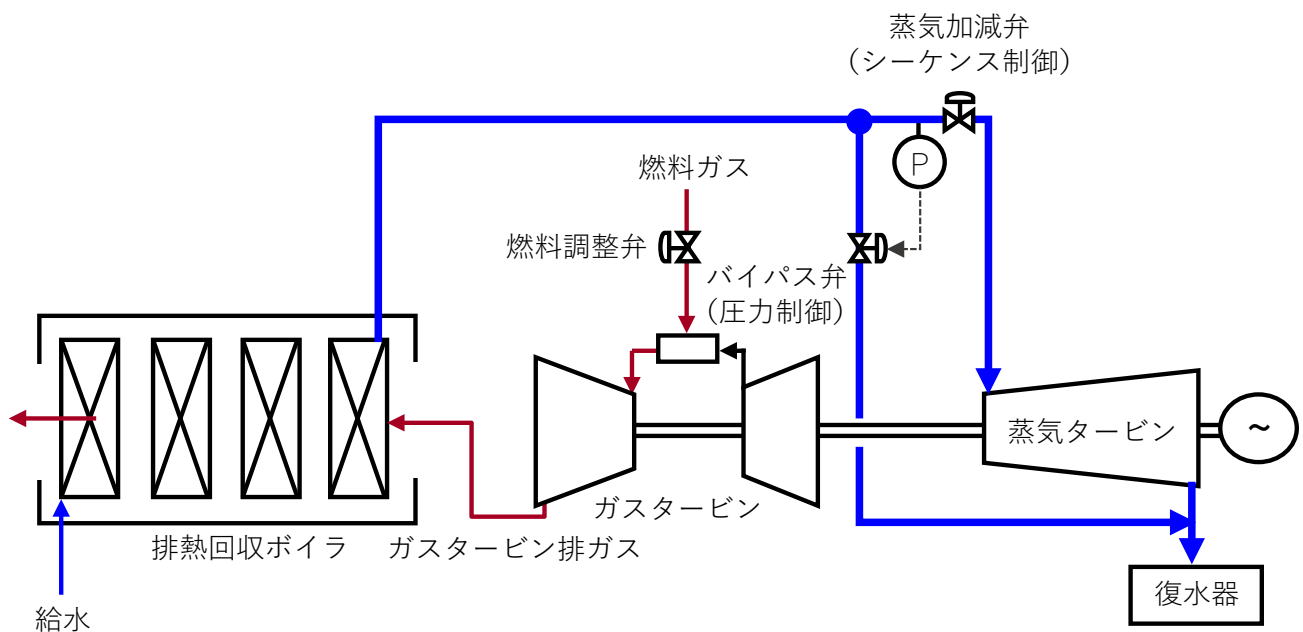


図 1.7 蒸気タービン入口の弁制御（蒸気加減弁部分開度）

・蒸気タービン加減弁全開

図 1.4 における期間 D の蒸気加減弁全開後のプラント主機および主要弁の制御動作を表 1.4 に、その時のガス・蒸気の流れを図 1.8 に示す。ガスタービン負荷および蒸気加減弁開度はあらかじめ設定された起動曲線に従い制御され、それぞれ定格出力、全開となる。バイパス弁も圧力制御の結果全閉し、その後も機器の異常などによる急な圧力変動がない限り全閉の状態が維持され、発生した蒸気は全量が蒸気タービンに供給される。一般的に、起動完了条件はこのガスタービン負荷の定格出力到達と、蒸気加減弁全開、バイパス弁全閉となる。これらのタイミングは必ずしも一致せず、作成された起動曲線に依存する。

表 1.4 プラント主機および主要弁の制御動作（蒸気加減弁全開）

機器	制御
回転数	定格回転数
ガスタービン負荷	シーケンス制御
蒸気タービン負荷	なし（流入する蒸気温度・流量に追従）
蒸気加減弁	全開
バイパス弁	圧力制御（全閉）

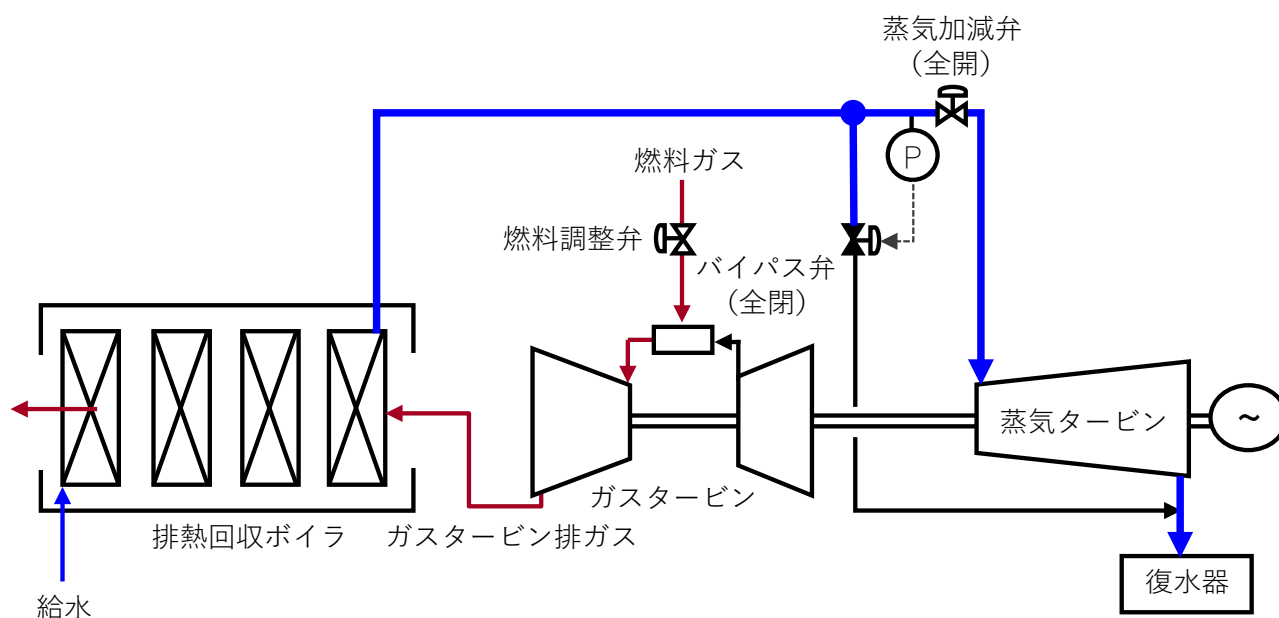


図 1.8 蒸気タービン入口の弁制御（蒸気加減弁全開）

コンバインドサイクルの起動では、前節で説明した排熱回収ボイラ内の構造体間の接合部に生じる熱応力、蒸気タービンのロータに生じる熱応力やロータ-ケーシング間の熱伸び差など多くの制約条件が存在する。これら制約条件を満足するよう、ガスタービン負荷の変化率や保持時間、蒸気加減弁開度の変化率などのプラント操作の手順（起動曲線）が予め策定され、この起動曲線に従いプラントを起動制御する[8]。

さらにコンバインドサイクルの起動では、プラントを停止後の時間が経過するにともない大気への放熱によって構造体温度が低下する。起動開始時のプラント構造体の温度状態を表す指標として初期メタル温度が定義されており、一般的に熱負荷で最もボトルネックとなる高圧蒸気タービンの蒸気流入部付近の構造体温度が用いられる。この初期メタル温度に応じて、起動モードが図 1.9 のように設定されており、この各起動モード（HOT 起動、WARM 起動、COLD 起動）ごとに熱応力の制限値や、それを満足するための起動曲線が用意される。

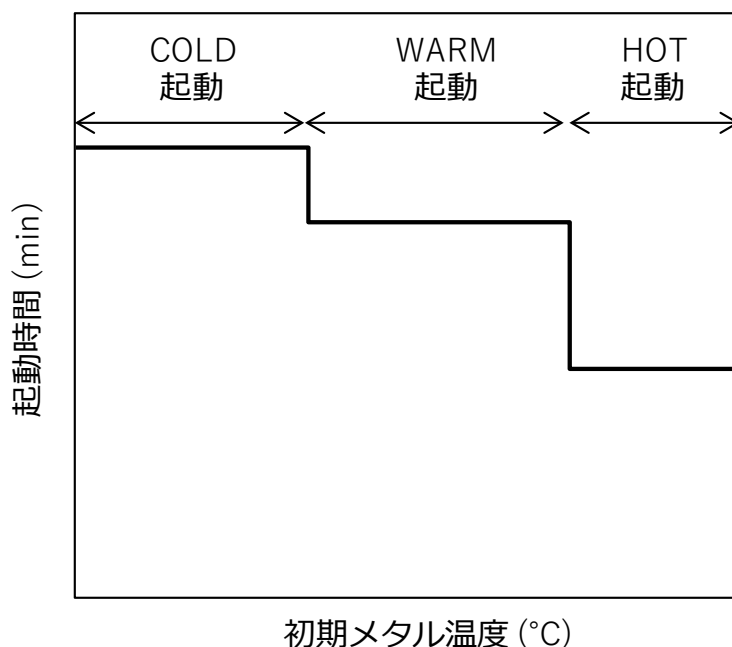


図 1.9 起動モードの設定方法

1.2 既往の研究

1.2.1 構成機器の改良

起動時間の短縮に向けて、図 1.4 の起動曲線中の各シーケンスに対する様々な技術開発が報告されている。前項で述べたように、コンバインドサイクルの起動では、まずプラント停止中に機器内に滞留した燃料ガスを系外に排出するパージ運転を実施する。このパージ時間の短縮方法として、米国防火協会からパージクレジットの考えが提案されている[9]。パージクレジットとは、プラント機器内のパージはプラント停止のプロセスで通過する空気量で十分とし、燃料供給系からの燃料ガスの漏洩を防止することで、起動時のパージ運転を不要にするというものである。燃料ガスの漏洩防止機構として、燃料ガスの供給系統を弁で3重に防止し、常時これらの弁開度と圧力を監視するとともにベント弁を備えることで燃料ガスがガスタービンの機器側へ漏洩するのを防止する。パージ運転では、大気と同等の低温空気が、プラント運転中に昇温された排熱回収ボイラ内を通過することとなるため伝熱管群が冷却され、起動時の熱応力増大の一因となる。パージクレジットにより、起動時間を短縮できるだけでなく、この熱応力の低減も可能となる。

コンバインドサイクルの起動では、排熱回収ボイラや蒸気タービンなどの蒸気系で生じる熱応力や熱伸び差を低減するため、ガスタービンの負荷変化率が制限され、起動時間短縮の律速となっている。これら熱負荷を低減するため、排熱回収ボイラ内の蒸発器に貫流式を採用することで肉厚であった蒸気ドラムの排除[10]や、構造の最適化による過熱器ヘッダの減肉化[11]が図られている。また、排熱回収ボイラ内の減温器を大型化することで蒸気タービンに供給する蒸気温度を低減し、発生する熱応力を低く維持したままガスタービンの負荷変化率を上昇させて起動時間を短縮する方法が報告されている[12-14]。減温器では、冷却水を過熱された蒸気中に噴霧して蒸気温度を低減させているが、噴霧量を増やすことで冷却水が蒸発しきらず蒸気タービンに混入するとエロージョンなど機器損傷の原因となる。このため、過熱された蒸気と噴霧された冷却水がよく混合するよう構造の改良がなされている。

1.2.2 制御方式の改良

このような構成機器の改良に加え、制御方法の改善に関する技術が多数報告されている。例えば、機器の損傷が懸念されるプラント構造体の温度を計測あるいは計算し、この構造体温度の変化率が予め設定された値以下となるようプラントを制御する技術が報告されている[15]。この際、ガスタービン負荷変化率は許容される最大変化率で上昇させ、前述した減

温器で蒸気温度を低減させている[16, 17]。

また、起動の速いガスタービンを蒸気系の構成機器がないシンプルサイクルと同等の速度で先行して起動する技術が報告されている[18]。このとき、発生する蒸気は全て復水器にバイパスされる。従来の起動と比較して、復水器にバイパスされる蒸気の熱量が増加することから、バイパス系統にも蒸気温度を低減するための減温器が追設される。排熱回収ボイラで発生する蒸気温度と蒸気タービンの構造体温度の差が規定値以下となったら蒸気タービンに通気し、モデルベース制御によりロータに発生する熱応力が制限値を超過しない範囲で供給する蒸気温度や蒸気流量を制御する。

この蒸気タービンに供給する蒸気温度、蒸気流量の制御は、ロータに発生する熱応力の将来値をリアルタイムで予測することで精度を向上することができる。熱応力は蒸気の温度・流量に対して十数分オーダーの時間遅れを持っており、現在値のみに基づく制御では許容値を逸脱する危険がある。起動の全過程にわたって熱応力を逐次予測し、蒸気加減弁を用いて蒸気タービンの回転数や負荷を制御することで熱応力を制限範囲に抑えながら起動時間を短縮する技術が報告されている[19, 20]。

また、前述したように近年、コンバインドサイクルの起動では起動時間の短縮の他、機器寿命消費量の低減、燃料消費量の低減など、発電事業者からの要望が多様化している。これら起動時間の短縮と寿命消費量の低減、および燃料消費量の低減と寿命消費量の低減はトレードオフ関係にある。このトレードオフ関係を最適化するため、進化計算を用いる技術[21-23]や、予め起動時間短縮と寿命消費量の低減を優先する運転モードを用意しておき運転員が状況に応じてどちらかを選択可能とする起動方法[24]が提案されている。

1.3 本研究の目的

コンバインドサイクル起動時間を短縮するには、以上で述べたようにプラント構成機器を含むシステム全体に対して取り組むのが効果的である。特に、起動短縮に向けてガスタービンの負荷変化率を上昇させると、排ガスや蒸気を大気には開放しない限り、増加した熱量を排熱回収ボイラ、蒸気タービン、復水器のどこかで仕事をして消費するか熱として吸収する必要がある。つまり、どこかの機器の熱負荷を低減しようとする、他の機器の熱負荷が増加する。例えば、蒸気タービンの熱応力を下げようとして蒸気タービンをバイパスすると、蒸気を受け入れる先の復水器の熱負荷が増加する。このため、全ての機器で損傷の危険がないよう、プラントシステム全体を最適化して起動時間を短縮する必要がある。既往の技術では、

個別の機器の構造改造はもちろんであるが、ガスタービンを先行起動する制御技術などについても、高速起動用にカスタマイズされたガスタービン、排熱回収ボイラやその他補器を使用することを前提としたものであり、適用には多額の初期コストが生じる。

このため、本研究では既存の設備を変更することなく制御の改善により起動時間を短縮する技術を開発する。これにより、実機への適用が比較的容易となり、新設の発電プラントのみならず既設の発電プラントにおいても広く適用が可能となる。また、一般的に蒸気系の熱負荷に関する制約条件のうち、蒸気タービンの特に高圧タービンにかかる熱応力が最もボトルネックとなる。このため、本研究では起動時において考慮すべき制約条件として、この蒸気タービンロータの熱応力を対象とする。

本研究ではまず、ガスタービンと蒸気タービンを協調制御してプラントを高速起動する技術を開発する。先に述べた既往の研究では、蒸気の温度や流量を操作して蒸気タービンの熱応力を制御する技術が複数報告されている。この場合、蒸気温度はガスタービン負荷や減温器で制御され、蒸気流量は蒸気加減弁やバイパス弁を用いて制御される。しかしながら、ロータ内部への伝熱遅れのため、起動の段階に応じて発生する熱応力の蒸気温度と蒸気流量へのそれぞれへの感度は異なる。このような伝熱遅れを考慮して効率的に熱応力を制御して起動時間を短縮する手法を開発する。

また、起動時間短縮や寿命消費量低減はトレードオフ関係にあり、さらにこのトレードオフの特性は起動開始時の初期メタル温度に応じて異なるものとなるが、先に提案された種々の起動方法は起動時間短縮のみを目的としたものや、初期メタル温度によらず一律の熱応力制限値が設定されるなど、発電事業者からの複数の要望を考慮した柔軟な起動曲線の設計に制限があった。複数の顧客要望を考慮可能な方法として多目的最適化による起動最適化方法が提案されているが、ほとんどがシミュレーションによるアルゴリズムの機能検証に留まっており、生成された解の実現性・信頼性については多く述べられていない。本研究では、プラント挙動を模擬した動特性シミュレータと多目的最適化プログラムを組み合わせることで、起動短縮や寿命消費低減、燃料削減などの複数の要望に基づく最適な起動曲線を自動生成する方法を開発し、一軸式コンバインドサイクルの燃料消費量と蒸気タービンロータ熱応力を目的関数とした起動曲線を生成する。この生成した起動曲線を商用プラントに適用し、プラントのプロセス値が各クライテリアを超過することなく起動を改善する効果を検証する。

さらに、既往の研究におけるモデルベースによるリアルタイム制御は起動中の計測データ

に基づき逐次的にプラント操作量を計算するものであり、構造体の温度分布などプラントの状態に応じて高速で起動制御できるものの起動時間が予め定まらず、電力系統からの発電要求に対して正確な起動開始時間の逆算が困難であるという課題があった。そのため本研究では、起動時間と初期メタル温度の関係を最適化問題としてパラメータ化した起動曲線を最適化することで、初期メタル温度に応じて連続的に変化する起動曲線を予め生成する。これにより、従来の起動モードを排した高速起動(モードレス起動)を実現し、かつ起動時間と初期メタル温度の関係を可視化することで起動開始時間決定などの起動計画策定を容易にするものである。

1.4 本論文の構成

本論文は全6章で構成する。

第1章では、研究の背景としてCO₂排出削減に向けた風力発電や太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入量の増加と、その発電量の変動を抑制するためコンバインドサイクルの起動時間短縮の必要性について説明する。また、コンバインドサイクルの一般的な起動方法として、起動時の代表メタル温度(初期メタル温度)に応じた起動モードを定義し、起動モードごとに作成した起動曲線に基づくガスタービンや主要弁の制御方法を説明する。さらに、起動時間短縮に向けた機器改良やプラントシステム改善などの取り組みを説明し、これら既往の研究に対する本研究の位置づけを明確にする。

第2章では、コンバインドサイクルの起動時間短縮に向けて、起動時の制約条件の1つである蒸気タービンロータ熱応力を予測計算し、この予測結果に基づきガスタービンと蒸気タービンを協調制御する方式を提案する。本方式では、蒸気タービンロータのメタル温度の上昇度合いに応じて起動過程を前後半に二分割し、起動前半では蒸気タービンの回転数・出力を操作して蒸気流量を調整し、起動後半ではガスタービン出力を操作して蒸気温度を調整することで、熱応力の蒸気温度や蒸気流量に対する感度に合わせて操作項目を切り替えることを特徴とする。多軸式コンバインドサイクルを対象としたシミュレーションにより提案した制御方式の効果を検証する。

第3章では、起動時間短縮に加え、寿命消費量や燃料消費量の低減など、多様化する顧客要望に対応するため、多目的進化的アルゴリズムを用いてプラントの起動方法を最適化する技術を提案する。本技術では、最適化プログラムによるガスタービン負荷変化率や蒸気加減弁開度レートなどの起動パラメータ値の探索と、動特性シミュレータによる目的関数の評価を繰り返すことで最適な起動曲線を自動生成する。本技術では、最適化過程において計算された解から隣り合う距離の近いものを排除することで多様性を維持して広範囲に広がる解を得ることができる NSGA-II を起動パラメータ値の探索手法に用いる。一軸式コンバインドサイクルを対象に起動時間とロータ熱応力(寿命消費量)を目的関数とした起動曲線を試作し、提案した多目的進化的アルゴリズムによる起動曲線の生成機能と、生成された起動曲線の妥当性を評価する。

第4章では、第3章で提案した起動曲線の最適化技術による起動プロセスの運用改善効果を検証するため、欧州の商用プラントにて起動試験を実施した結果を報告する。本試験の実施にあたり、対象プラントの構成や起動制御方式に合わせて動特性シミュレータを構築および最適化する起動パラメータを選定し、顧客要望である起動時の燃料消費量の低減を目的関数として起動曲線を生成する。

第5章では、従来の起動モードを排して初期メタル温度に応じてプラントを最速で起動するモードレス起動を実現する制御技術を提案する。本技術では、第3章、第4章で開発した最適化手法を拡張して、初期メタル温度と起動時間を目的関数として探索された起動パラメータに基づき、初期メタル温度に応じた起動パラメータのパラメータ線図を作成し、このパラメータ線図を起動のたびに参照することで起動曲線を作成する。第4章の実機試験で対象としたプラントについて最適化計算を実施し、シミュレーションにて開発方式の妥当性を検証する。

第6章では本研究で得られた成果を総括する。

2. 予測制御に基づく起動技術の開発

2.1 制御コンセプト

ガスタービンと蒸気タービンの回転数と負荷に関する従来の起動曲線を図 2.1 に示す。本図では、前章の図 1.4 における蒸気加減弁の代わりに蒸気タービンの回転数と負荷を図示している。なお、一軸式のコンバインドサイクルではガスタービンの回転数上昇と同時に同軸の蒸気タービンの回転数も上昇するが、これらが別軸の場合には図に示すようにそれぞれ個別の制御が必要となる。従来の起動制御ではこのような起動曲線通りにプラントがシーケンス制御により起動されており、この起動曲線は設計者の手動調整により各種制限値に対して十分な余裕をもつよう作成されていたため起動時間の短縮には限界があった。

本研究では、起動時間の短縮を目的に、起動中の蒸気タービンロータ熱応力を予測計算し、この予測結果に基づきガスタービンと蒸気タービンを協調制御する方式を開発する。開発方式の制御コンセプトを図 2.2 に示す。本方式では、蒸気タービンロータのメタル温度の上昇度合いに応じて起動過程を前後半に二分割し、起動前半ではガスタービン負荷を一定として蒸気温度を抑制し、蒸気タービンの回転数・出力を操作して蒸気流量を調整することで熱応力を制御する。起動後半では、発生蒸気の全量を蒸気タービンに供給し、ガスタービン出力を操作して蒸気温度を調整することで熱応力を制御することを特徴としている。本方式では、メタル温度が低い起動前半では蒸気タービンに流入する蒸気流量を増加させてロータへの伝熱を促進させる。これにより、起動後半のガスタービン負荷の急上昇を可能とすることで、起動時間の短縮を図る。なお、蒸気タービン通気前では熱応力制御は不要であるため、従来通りシーケンス制御とする。蒸気タービン通気後のガスタービンと蒸気タービンの制御方法について、以下に説明する。

ガスタービン制御	シーケンス制御
蒸気タービン制御	シーケンス制御

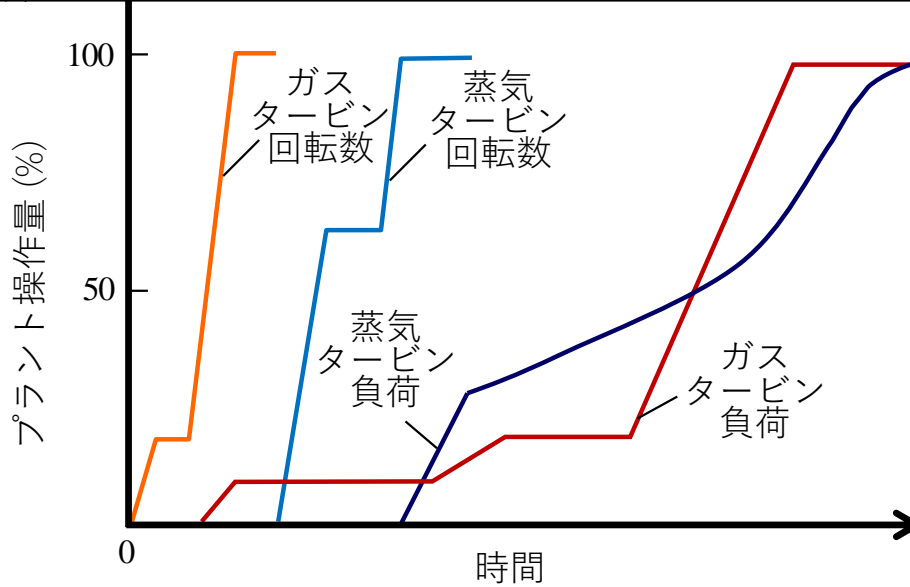


図 2.1 従来の起動方法

	—	第1フェーズ	第2フェーズ
ガスタービン制御	シーケンス制御	シーケンス制御	熱応力予測制御
蒸気タービン制御	シーケンス制御	熱応力予測制御	シーケンス制御

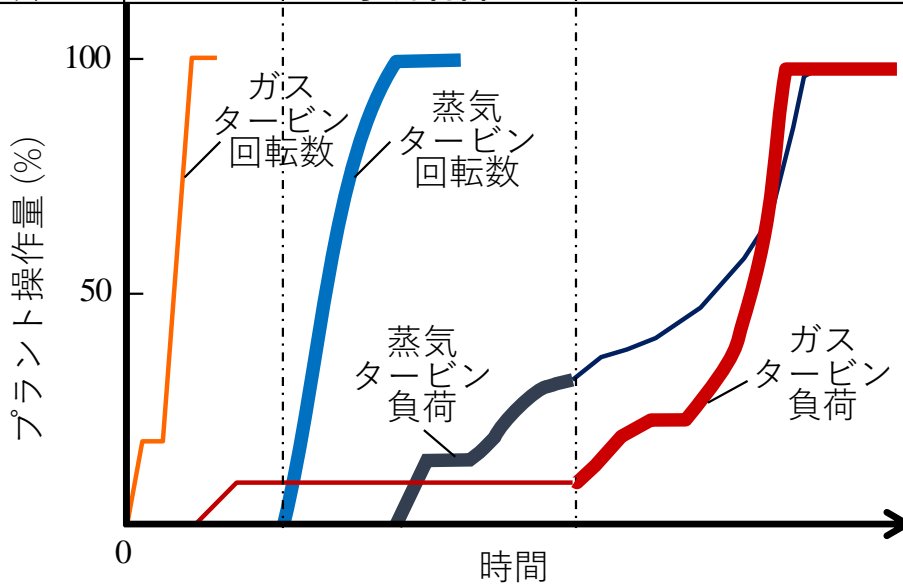


図 2.2 ガスタービンと蒸気タービンの協調制御方法

2.1.1 ガスタービン制御方法

提案するガスタービンと蒸気タービンの協調制御方法を図 2.3 に示す。ガスタービン負荷制御ではバイパス弁の開閉状態をトリガーとして、起動前半のバイパス弁が開いている間はガスタービン負荷を予め定められたシーケンスで操作し、起動後半のバイパス弁閉後は熱応力の予測値に基づき熱応力の超過がないようガスタービン負荷を調整する。

まず、ガスタービンに接続された発電機を電力系統に並列後、ガスタービンを目標となる負荷まで上昇させ、一定に保持する。その後、蒸気温度が所定の温度に到達後、蒸気タービンに通気し、蒸気加減弁を用いて蒸気タービンの回転数、負荷の制御を開始する。この保持負荷の目標値が低く、蒸気温度の上昇が不十分であると、蒸気タービンに蒸気を通気してもロータへの入熱が少なくロータの温度上昇が遅れて起動時間が長くなる。一方で、保持負荷の目標値が高く、蒸気温度がロータ温度に対して高すぎると蒸気タービンに通気して回転数を増加させる際に、熱応力が制限値を超過する危険がある。このため、このガスタービンを保持する目標負荷は、発生蒸気の温度や圧力など蒸気タービンへの通気条件成立を早めつつ、通気直後に発生する熱応力の過度な上昇を防止するよう蒸気タービンロータの初期メタル温度に応じて設定する。

その後、蒸気タービンの負荷上昇に伴う蒸気加減弁の開操作により、バイパス弁が全閉となったら、蒸気タービンロータ熱応力の予測値に基づき熱応力が制限値を超過しない最大の変化率でガスタービン負荷を上昇させる。この熱応力予測値の計算方法と、ガスタービン負荷の決定方法については 2.2 節、2.3 節にて後述する。この起動後半のフェーズでは、排熱回収ボイラや蒸気配管などのプラント構造体が温まったことからガスタービン排ガス温度変化に対する蒸気温度の遅れが緩和されるため、ガスタービン負荷で熱応力を安定的に制御することができる。

2.1.2 蒸気タービン制御方法

蒸気タービン制御ではバイパス弁の開閉状態をトリガーとして、起動前半のバイパス弁が開いている間は予測した熱応力値に基づき蒸気タービンの回転数や負荷を調整する。起動後半のバイパス弁閉後は蒸気圧力を調整するよう主蒸気加減弁を調整する。

まず、ガスタービン負荷保持中に蒸気が所定の温度・圧力以上となったら、蒸気加減弁を開き蒸気タービンへの蒸気流入を開始し、回転数を上昇させる。回転数が定格となった後に、負荷を上昇する。この蒸気タービンの回転数と負荷の操作量は、熱応力の予測値に

に基づき計算する。このような蒸気タービン制御によって、蒸気流量が優先的に増加されるため、ロータ内部への伝熱が促進される。これにより、ロータ内外部の温度差が減少し、起動後半の急激なガスタービン負荷変化が可能となる。

バイパス弁全閉後では、これまで圧力制御をしていたバイパス弁に代わって蒸気加減弁で蒸気圧力を制御する。このとき、バイパス弁全閉後では、排熱回収ボイラで発生した蒸気を蒸気タービンでは全量受け入れることになるため、蒸気加減弁開度の操作が熱応力に与える影響は無い。そのため、バイパス弁閉後では、ガスタービン負荷で熱応力を全て制御することとなる。ガスタービン負荷が上昇するに伴い、蒸気加減弁は圧力制御の結果自動的に全開する。

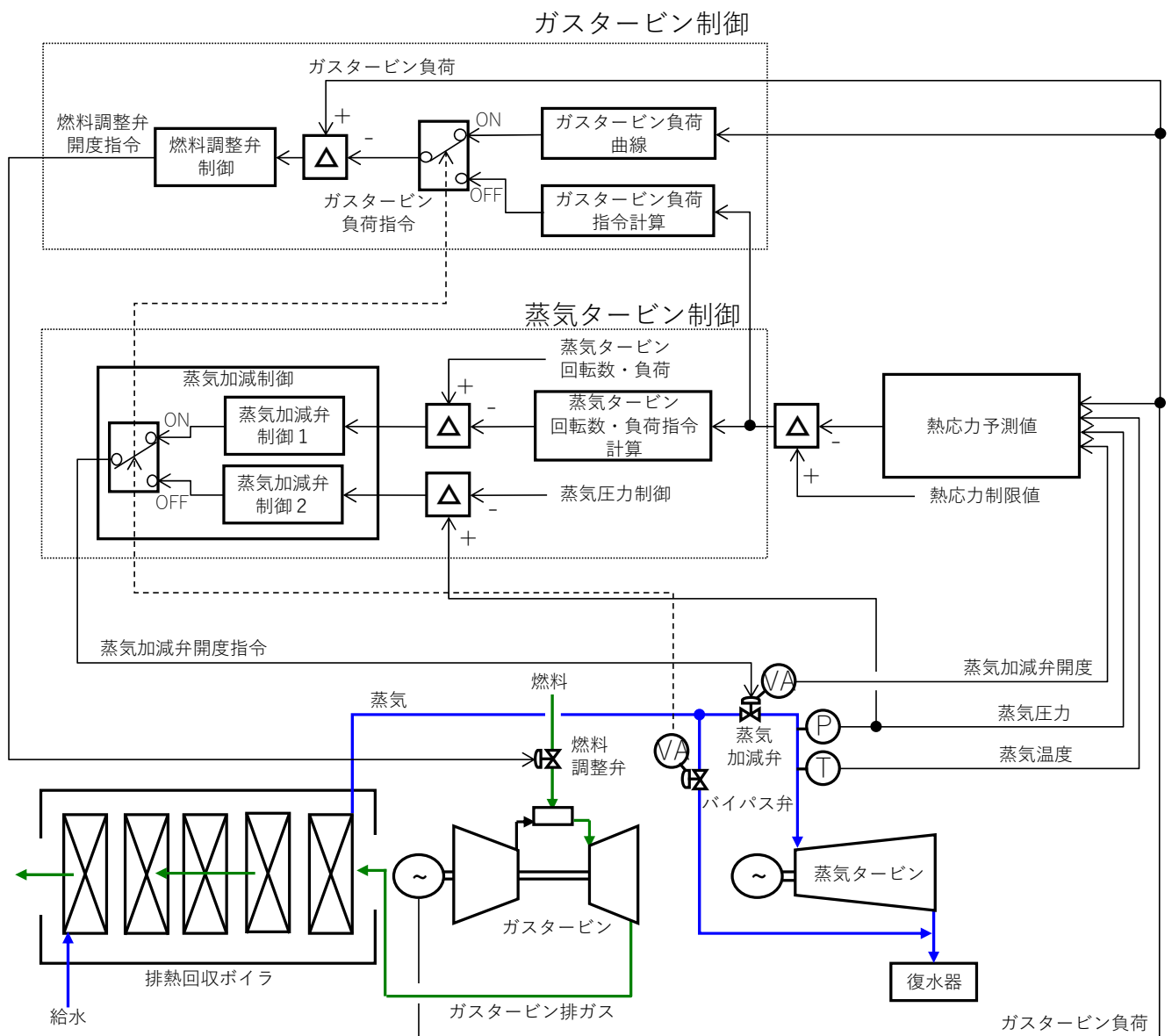


図 2.3 ガスタービンと蒸気タービンの協同制御のブロック図

2.2 熱応力計算モデルの開発

ガスタービン負荷や蒸気タービンの回転数・負荷の時系列データを入力として、将来の熱応力を予測するための動特性シミュレータを構築する。本研究では熱応力が集中しやすいとされる蒸気タービン初段後ロータの表面側および中心側の応力を計算する。以降、蒸気タービン初段後ロータ表面熱応力を蒸気タービンロータ熱応力と記す。提案する予測制御手法では、熱応力の将来値計算をガスタービンや蒸気タービンの操作量を更新する度に繰り返すため、計算負荷を低減するようシミュレータの模擬範囲を必要最小範囲に限定し、排熱回収ボイラ出口(蒸気温度, 流量, 圧力)から蒸気タービン初段後ロータ(温度分布, 熱応力)までとした。模擬範囲とその計算点を図 2.4 に示す。

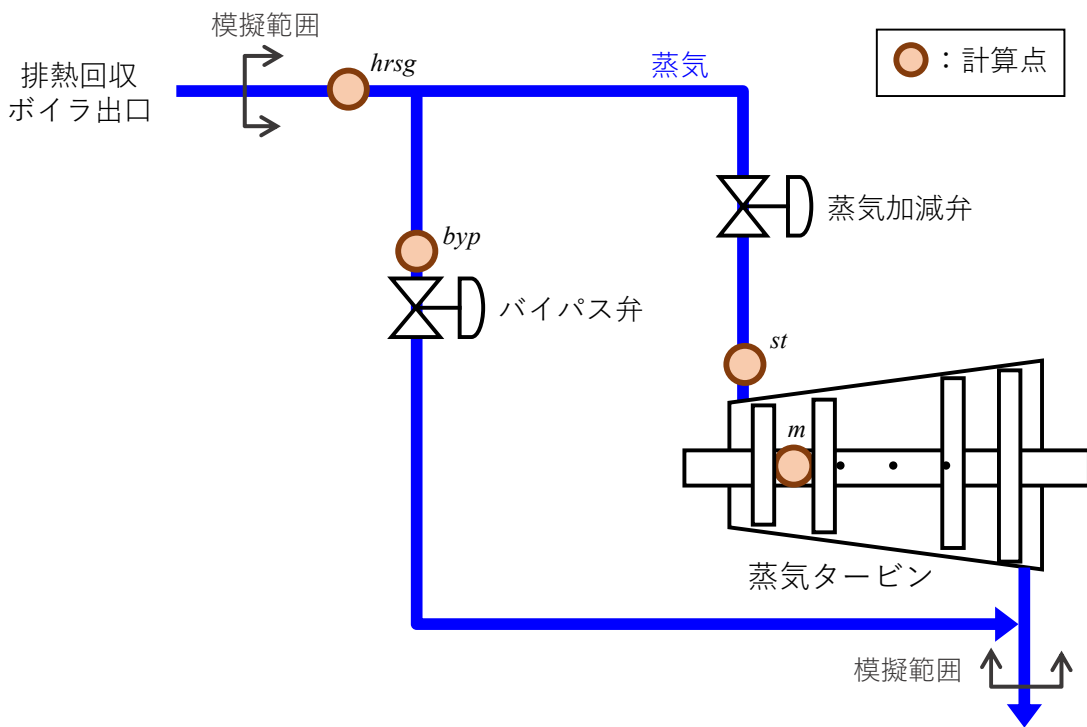


図 2.4 熱応力予測モデルの模擬範囲

排熱回収ボイラ出口の蒸気温度 T_{hrsg} はガスタービン排ガスの保有熱量から一意に決まることに着目し、ガスタービン負荷 L_{GT} と蒸気温度(整定値) $T_{hrsg, steady}$ のテーブルを参照した値を大気温度に応じて補正し、排熱回収ボイラ構造体の熱容量による時間遅れや蒸気配管長による流れの応答遅れに応じた一次遅れをかけて式(2.1), (2.2)から計算した。このガスタービン負荷と蒸気温度(整定値)のテーブルは、ガスタービンの排ガス特性に基づき図 2.5 のよう

に定義した。排熱回収ボイラ出口の蒸気流量 G_{hrsg} は、蒸気温度と同様にガスタービン負荷とのテーブルに基づき式(2.3), (2.4)から計算した。なお、右肩添字の t や $t+1$ は時間のステップ、変数 Δt は計算刻み時間、 τ_T , τ_G はそれぞれ蒸気温度、蒸気流量の時定数を表す。さらに、排熱回収ボイラ出口圧力 P_{hrsg} は、バイパス弁開度 VA_{byp} が 100%未満でありバイパス弁で圧力制御中の場合では、圧力指令値 P_{dmd} 値と、音速流れを仮定した質量流量の変形式に基づき定格圧力 $P_{hrsg,r}$ を蒸気温度と蒸気流量で補正した値の低値を選択することとする。バイパス弁全閉以降では、後述する蒸気タービン入口圧力 P_{ST} に排熱回収ボイラから蒸気タービンまでの蒸気配管や蒸気加減弁での圧損 ΔP を加算することで式(2.5)から計算する。得られた蒸気温度と蒸気圧力から、蒸気表 f_{s_tbl} を参照してエンタルピ h_{hrsg} 計算する。

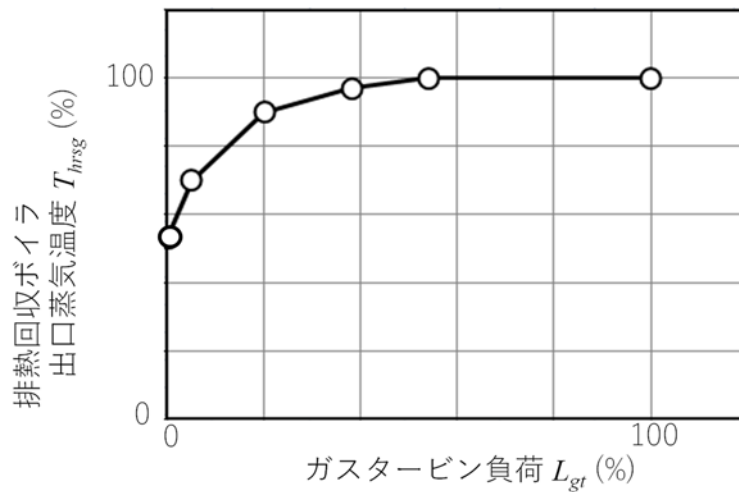


図 2.5 ガスタービン負荷と排熱回収ボイラ出口蒸気温度の関数 f_{T_tbl}

$$T_{hrsg,steady} = f_{gt_t_tbl}(L_{gt}) \quad (2.1)$$

$$T_{hrsg}^t = (T_{hrsg,steady} - T_{hrsg,steady}^{t-1})(1 - e^{-\Delta t/\tau_T}) + T_{hrsg,steady}^{t-1} \quad (2.2)$$

$$G_{hrsg,steady} = f_{gt_g_tbl}(L_{gt}) \quad (2.3)$$

$$G_{hrsg}^t = (G_{hrsg,steady} - G_{hrsg,steady}^{t-1})(1 - e^{-\Delta t/\tau_G}) + G_{hrsg,steady}^{t-1} \quad (2.4)$$

$$P_{hrsg} = \begin{cases} \text{MIN} \left(P_{dmd}, P_{hrsg,r} \frac{G_{hrsg,r}}{G_{hrsg}} \sqrt{\frac{T_{hrsg}}{T_{hrsg,r}}} \right), & \text{if } VA_{byp} > 0 \\ P_{st} + \Delta P, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (2.5)$$

$$h_{hrsg} = f_{s_tbl}(T_{hrsg}, P_{hrsg}) \quad (2.6)$$

これら排熱回収ボイラ出口の蒸気温度、蒸気流量から、円管内の発達した流れによる熱伝達計算に基づき配管や弁、蒸気タービンケーシングなどのプラント構造体メタルと蒸気間の伝熱量を求め、蒸気タービン入口の比エンタルピ h_{st} を計算する。また、蒸気流量を(2.7)式に示すように、事前のプラントヒートバランスに基づく蒸気タービンの回転数 RPM_{st} 、負荷 L_{st} の関数から計算する。バイパス流量 G_{byp} は、排熱回収ボイラ出口流量 G_{hrsg} から蒸気タービン入口流量 G_{st} を差し引いて求めることとする。さらに、蒸気タービン入口の蒸気圧力 P_{st} は、式(2.5)とは反対にバイパス弁で圧力制御中では HRSG 出口圧力 P_{hrsg} を基準としてそこから差圧を差し引くことで計算し、バイパス弁全閉後では音速流れを仮定した質量流量の式を変形した式(2.9)により、定格圧力を質量流量、温度で補正して計算する。求めた蒸気圧力と比エンタルピから、蒸気表 f_{s_tbl} を参照して、蒸気タービン入口の蒸気温度を式(2.10)にて計算する。

$$G_{st} = f_{st_g_tbl}(RPM_{st}, L_{st}) \quad (2.7)$$

$$G_{byp} = G_{hrsg} - G_{st} \quad (2.8)$$

$$P_{st} = \begin{cases} P_{hrsg} - \Delta P, & \text{if } VA_{byp} > 0 \\ P_{st,r} \frac{G_{st}}{G_{st,r}} \sqrt{\frac{T_{st,r}}{T_{st}}}, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$T_{st} = f_{s_tbl}(h_{st}, P_{st}) \quad (2.10)$$

こうして得られた蒸気タービン入口の蒸気条件を用いて、蒸気圧力やロータ回転数に関する経験式から蒸気タービン入口蒸気とロータ表面間の熱伝達率を計算し、一次元非定常円筒温度分布の熱伝導方程式を解くことで半径方向のロータ温度分布を計算する。得られた温度分布より、式(2.11), (2.12)から表面熱応力 σ_s 、中心熱応力 σ_b を計算する。ここで、 α は線膨張率、 E はヤング率、 ν はポアソン比、 T_{m_ave} はロータ体積平均温度、 T_{m_s} はロータ表面温度、 T_{m_b} はロータ中心温度を表す。

$$\sigma_s = \frac{\alpha E}{1 - \nu} (T_{m_ave} - T_{m_s}) \quad (2.11)$$

$$\sigma_b = \frac{\alpha E}{1 - \nu} (T_{m_ave} - T_{m_b}) \quad (2.12)$$

開発したシミュレータの妥当性を評価するため既設のプラントを対象にシミュレーションを実施し、計算結果を運転データと比較検証した。

検証に際し、図 2.5 に示すガスタービン負荷に応じた排熱回収ボイラ出口の蒸気温度・流量に関するテーブルを実機データの整定値に基づき作成し、それぞれの過渡特性が運転データと一致するよう式(2.2), (2.4)に示す各時定数 τ_T , τ_G を調整した。また、蒸気タービン入口温度については、理論式から計算したプラント構造体メタル間との熱伝達率に乘算する係数を、計算結果と運転データの値が一致するよう調整した。排熱回収ボイラ出口の蒸気温度と蒸気圧力の運転データと計算値の比較を図 2.6 に示す。なお、グラフにおいて縦軸はそれぞれの定格値を 100%として示し、横軸は蒸気タービン通気からガスタービンの最低負荷到達までの時間を 1 として正規化している。蒸気の温度と圧力の最大誤差はそれぞれ 2.3%, 4.9% と実機応答を再現し、開発したシミュレータを熱応力の予測制御に適用可能であることを確認した。

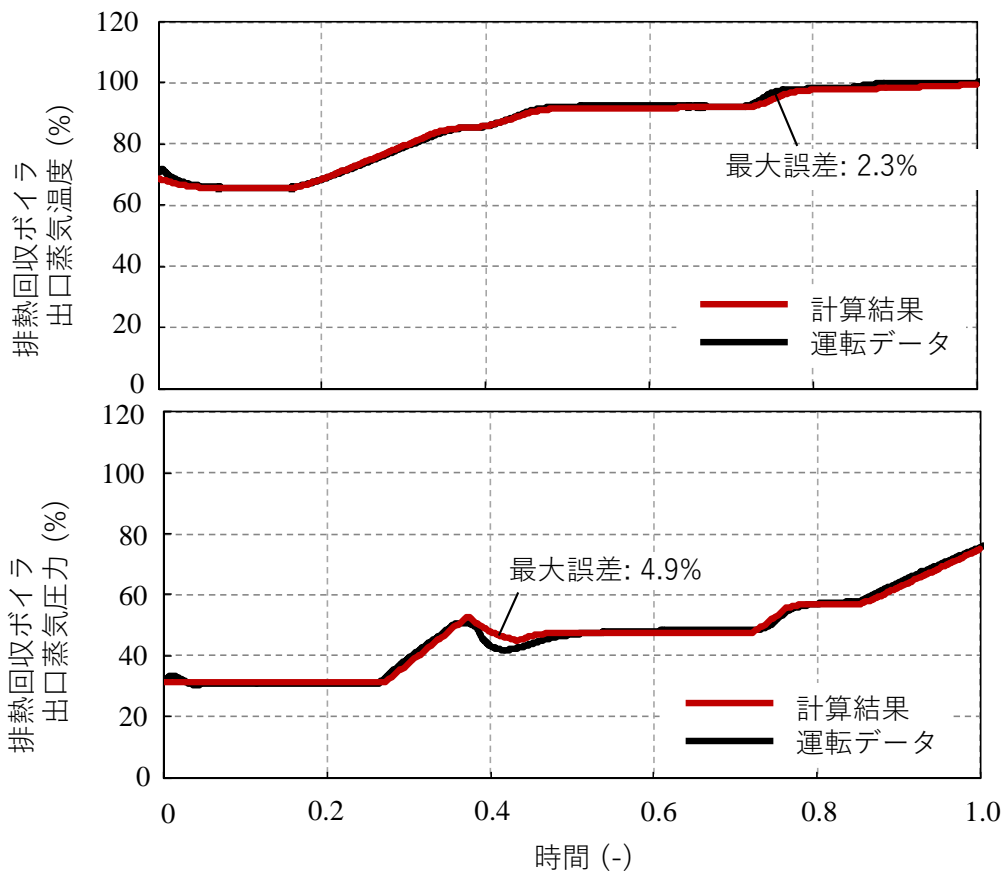


図 2.6 排熱回収ボイラ出口蒸気温度・蒸気圧力の計算結果と計測値の比較

2.3 制御方式の開発

熱応力の予測方法と、その予測結果に基づくガスタービンや蒸気タービンの操作量の計算方法を、ガスタービンの負荷変化率と負荷保持時間の計算を例に図 2.7 および図 2.9 に示す。本研究では、予測期間を 15min、予測に基づくプラント操作量の更新周期を 1min とした。図 2.7 のガスタービン負荷変化率の更新では、まず現時刻におけるプラント操作量(ガスタービン負荷変化率、蒸気タービン回転数上昇率・蒸気タービン負荷変化率など)などを予測期間にわたり外挿し、前述した実機の挙動を模擬した動特性シミュレータにて熱応力の予測値を計算する。次に、予測期間における熱応力ピーク値の制限値までの余裕に基づき、ガスタービン負荷変化率 a の修正量を計算する。この修正量は図 2.8 に示すような予測期間における熱応力ピーク値の制限値までの余裕に基づくルックアップテーブルを参照することで決定する。このテーブルは、余裕が小さければ負荷変化率を減少するように、余裕が大きければ負荷変化率を増加するように作成する。これらの操作を起動過程にわたり繰り返すことで熱応力を制御する。蒸気タービン回転数の上昇率、蒸気タービン負荷の変化率についても、図 2.7 のガスタービン負荷の変化率と同様の手法を適用する。

ガスタービン負荷保持時間の計算方法を図 2.9 に示す。まず、図 2.7 と同様に、将来の熱応力を現時刻におけるプラント操作量を外挿することで計算する。次に、予測期間における熱応力ピーク値の制限値までの余裕に基づき、ピーク値発生時刻からのガスタービン保持時間の延長量 t_{hold} を決定する。この延長量 t_{hold} についても、図 2.10 のようなルックアップテーブルを用いて計算する。ガスタービンは燃焼安定性の理由から負荷変化率に最小値が存在する。このため、状態が負荷変化に移行後では予測計算により制限値超過が分かってもガスタービン負荷変化率をこの最小値以下にできず、ガスタービン負荷保持時間を十分に確保する必要がある。このため、ガスタービン負荷保持中の予測計算において熱応力のピーク値発生を検知し、このピーク発生時刻からの負荷保持延長量を逐次計算するとした。

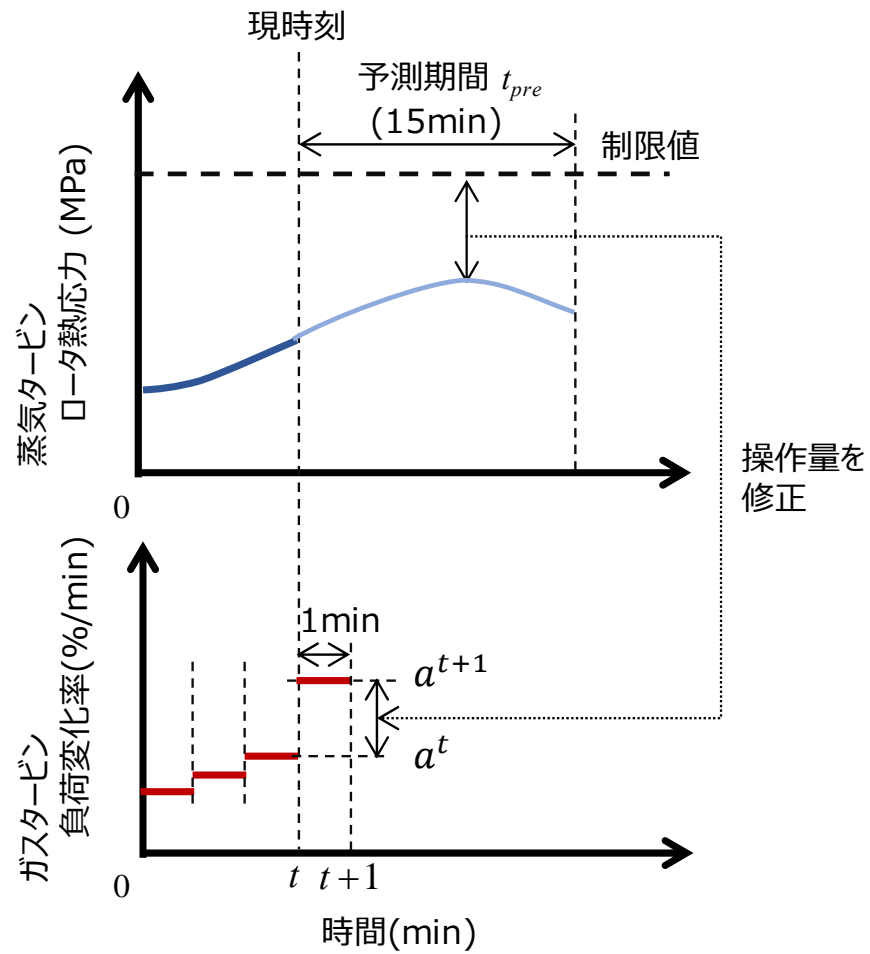


図 2.7 熱応力予測に基づくガスタービン負荷変化率の計算方法

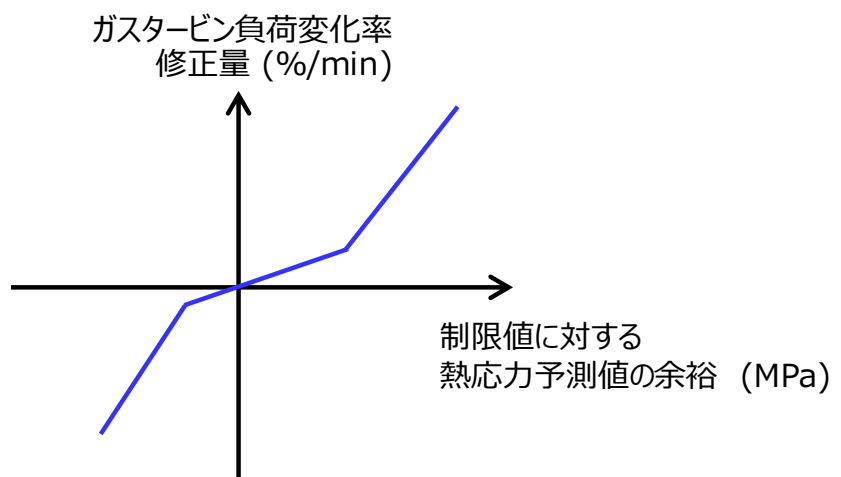


図 2.8 熱応力予測に基づくガスタービン負荷変化率の修正量

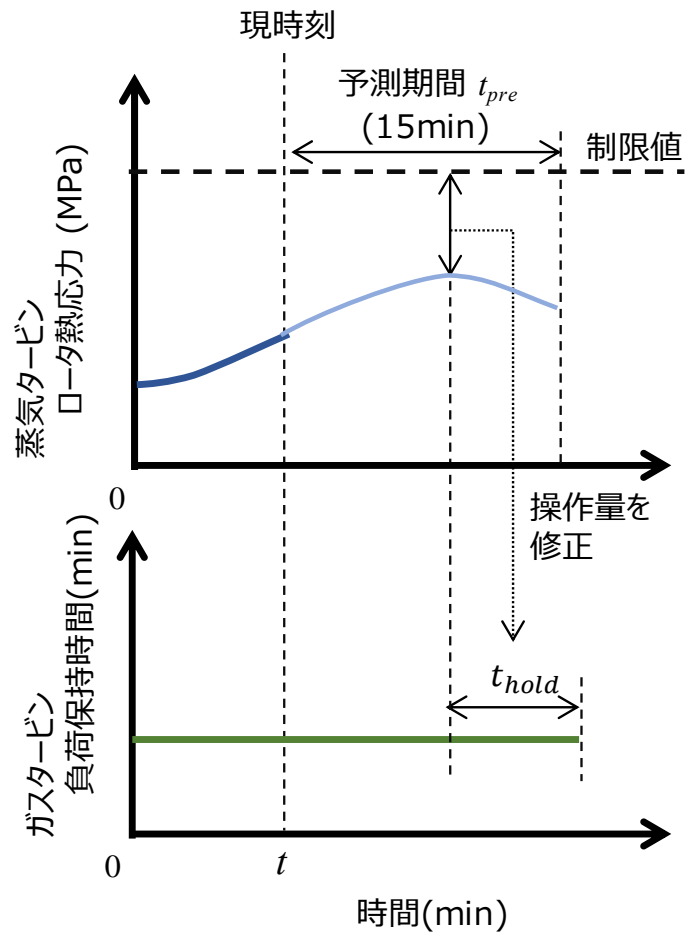


図 2.9 熱応力予測に基づくガスタービン負荷保持時間の計算方法

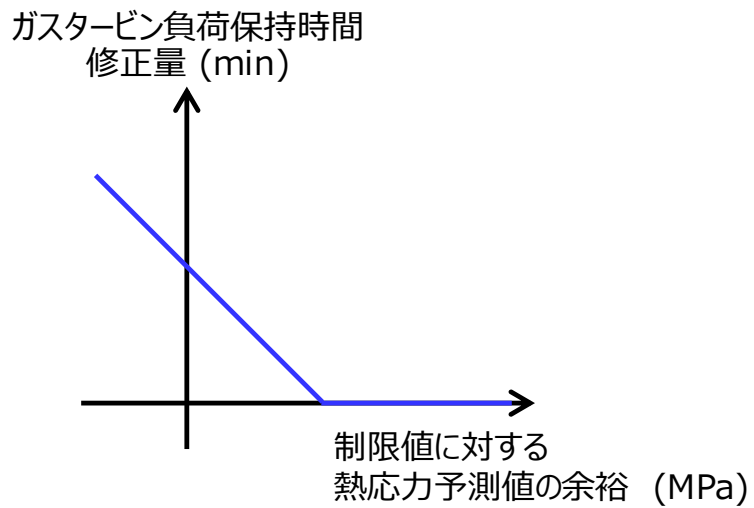


図 2.10 熱応力予測に基づくガスタービン負荷保持時間の計算方法

また、制限値に対する熱応力の余裕量が同じでも、予測時点における蒸気温度—ロータ表面温度—ロータ中心温度のバランスや蒸気流量に応じて、ガスタービン負荷などのプラント操作量に対する熱応力上昇の感度は異なる。このため、図 2.8 や図 2.10 のような起動にわたって一律の修正量のテーブル適用では、例えば図 2.11 に示すようにプラント操作量に対して感度の高い熱応力上昇時では制限値を超過し、反対に感度の低い下降時では制限値に対して大きく余裕を持った起動曲線となる。

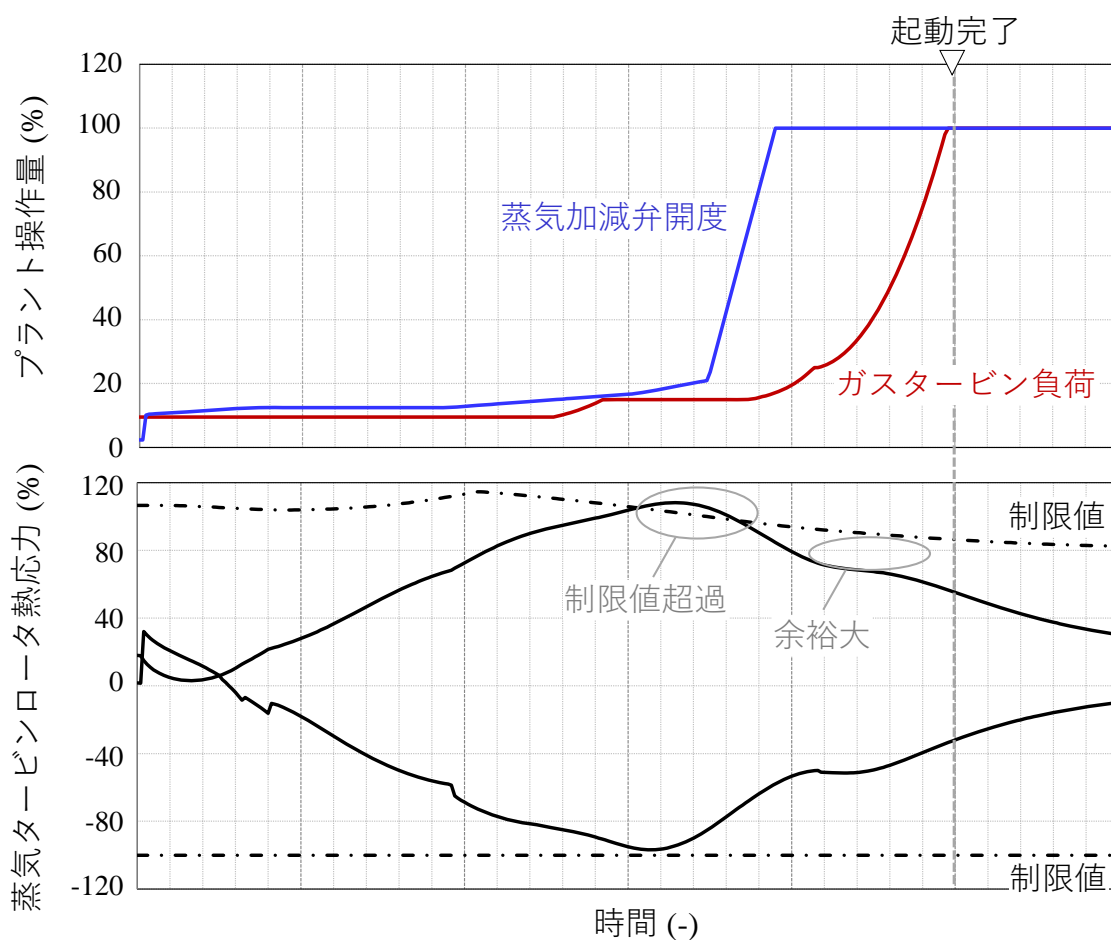


図 2.11 熱応力予測制御における失敗例

これに対応するため、熱応力値に対するプラント操作量の感度の指標として予測期間中の熱応力の上昇速度を用い、図 2.12 に示すようにこの上昇速度に応じてプラント操作量の修正量を補正することとした。熱応力の上昇速度 v_σ の計算方法としては、式(2.13)に示すように、予測開始時刻の熱応力 σ_t と、予測完了時刻の熱応力 $\sigma_{t+t_{pre}}$ の差を予測期間 t_{pre} で除算することで求めた。

$$v_\sigma = \frac{(\sigma_{t+t_{pre}} - \sigma_t)}{t_{pre}} \quad (2.13)$$

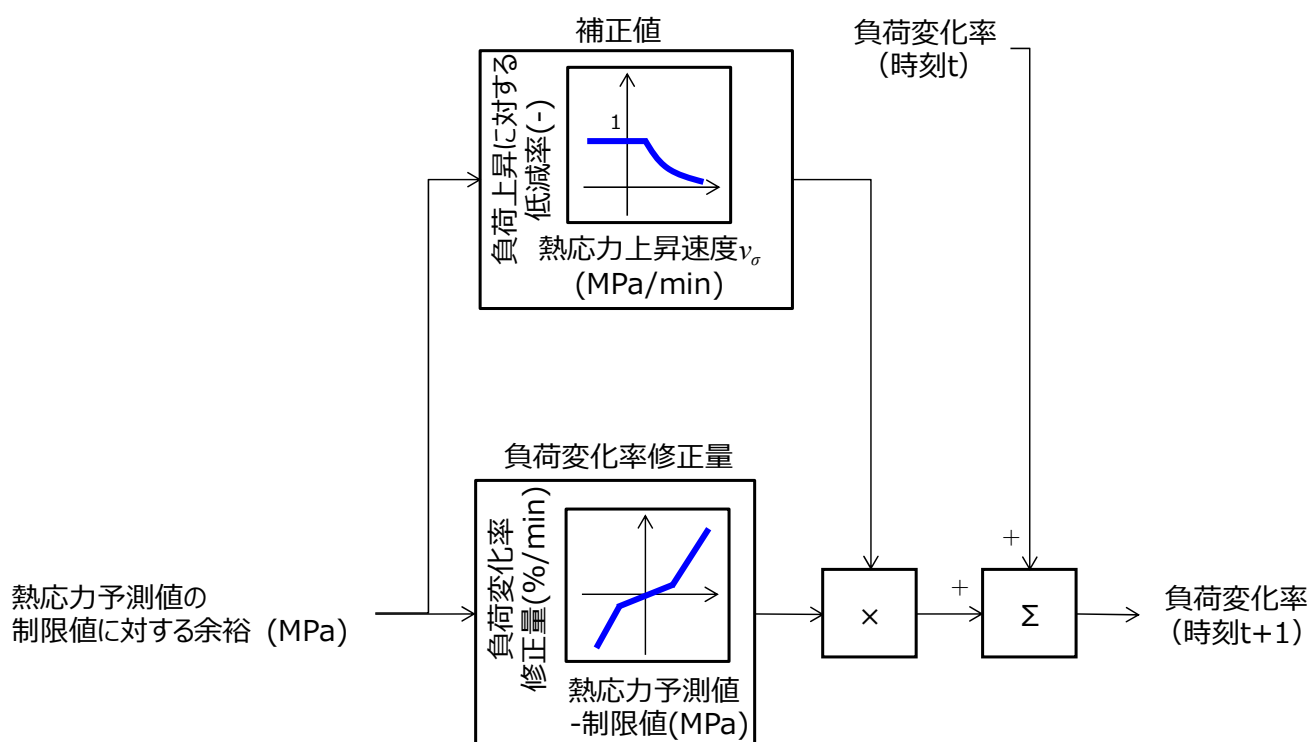


図 2.12 熱応力予測に基づくプラント操作量の補正方法

2.4 シミュレーションによる評価

本制御方法の効果を検証するためシミュレーションを実施した。対象とするプラント仕様を表 2.1 に、プラント模式図を図 2.13 に示す。ガスタービン 2 台とそれぞれのガスタービン排ガスから熱を回収する排熱回収ボイラの蒸気を合わせて 1 台の蒸気タービンを駆動する多軸式の構成とした。本評価では、起動時間の定義を、蒸気タービン通気からガスタービン負荷 100%および蒸気発生が遅れを考慮して蒸気タービン負荷 98%到達までとした。

表 2.1 対象プラント仕様

項目	仕様
プラント構成	多軸式 2 on 1 コンバインドサイクル
燃料	天然ガス
プラント出力	500MW 級
回転数	3000rpm
蒸気サイクル	再熱式三重圧（高圧：12.5MPaA, 中圧：2.7MPaA, 低圧：0.6MPaA）
起動完了条件	ガスタービン定格出力到達 蒸気タービン負荷 98%到達

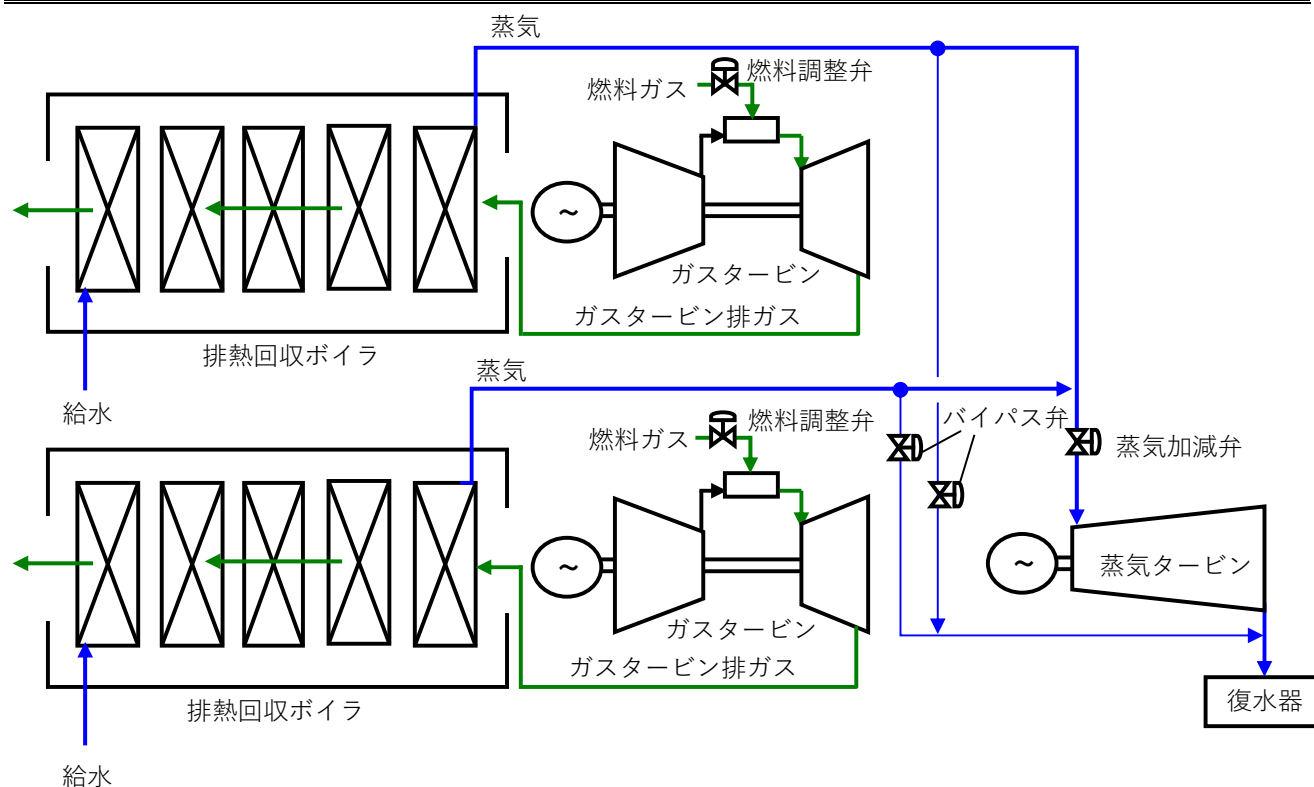


図 2.13 シミュレーションで対象とする多軸式コンバインドサイクルのプラント構成

停止後経過時間の異なる起動（16h（HOT 起動）, 70h（WARM 起動）, 180h（COLD 起動））において、提案したガスタービンと蒸気タービンの協調制御による熱応力の制御結果を、順に図 2.14、図 2.15、図 2.16 に示す。コンバインドサイクルではプラント停止に伴い大気への放熱により構造体温度が低下するため、プラント停止時間が長いほど構造体温度が低下し、起動時間が長くなる傾向にある。また、熱応力の制限値も、プラント停止時間が長いほど高く設定される。図において、横軸の時間は停止後経過時間が 180h の COLD 起動における起動完了時間を 1.0 として正規化し、縦軸の熱応力は停止後経過時間が 180h の起動の最大熱応力を 100% として示した。熱応力の負側の表面熱応力についての制限値は、プラントの耐用年数を考慮して起動一回あたりに許容される寿命消費量に基づき設定した。正側の熱応力制限値は、構造体の 0.2% 耐力に基づき設定し、蒸気タービンのロータ温度に応じて制限値も変化する。

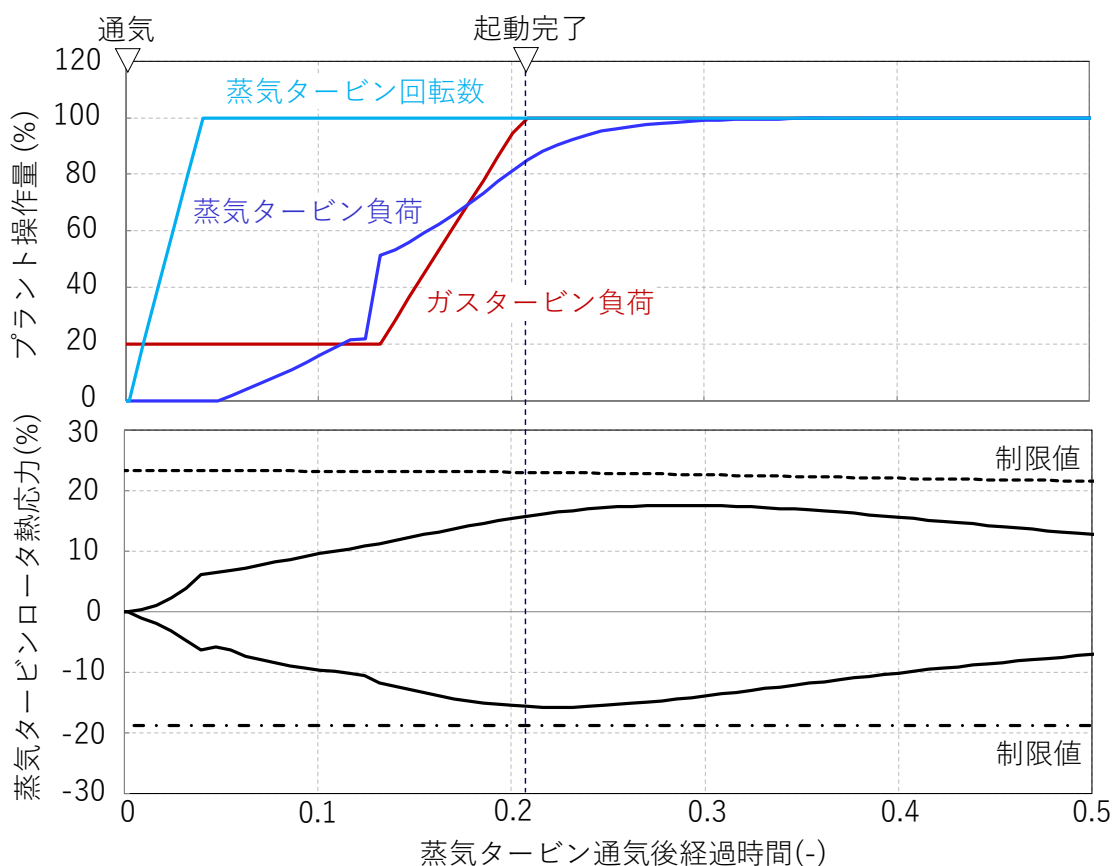


図 2.14 プラント停止後経過時間に応じた熱応力制御の計算結果（HOT 起動）

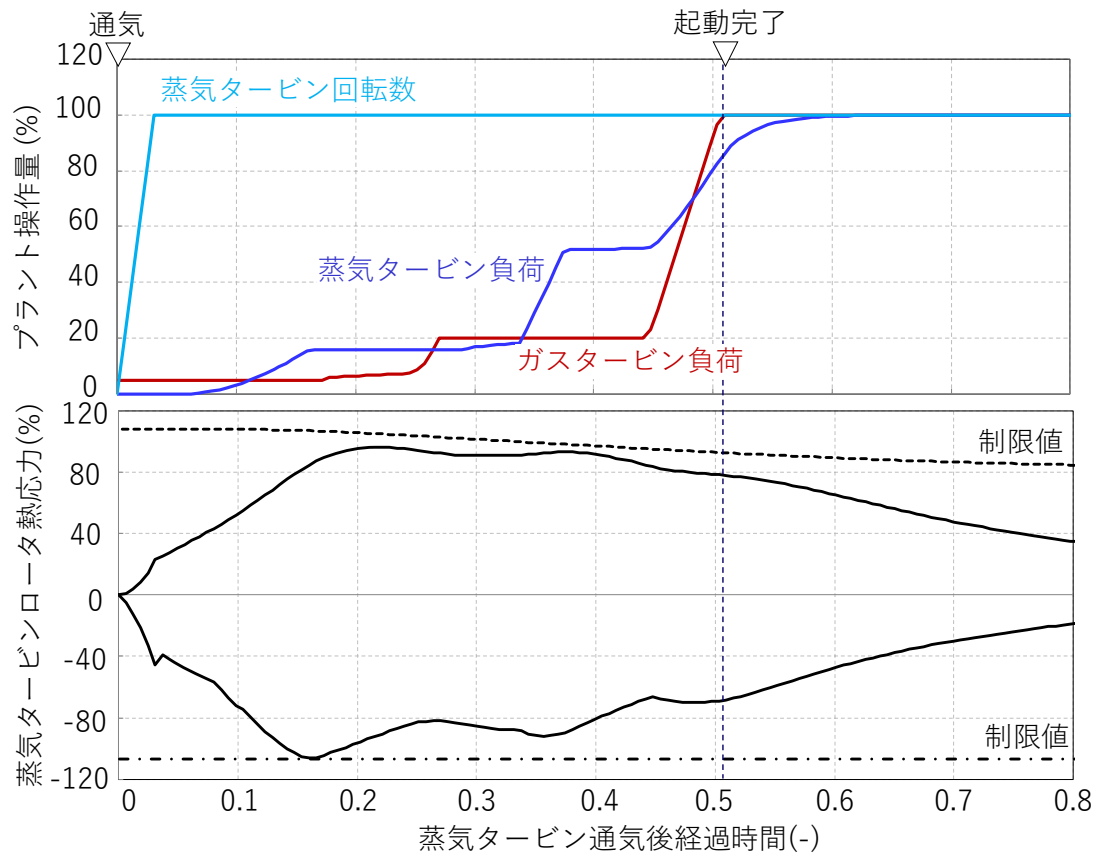


図 2.15 プラント停止後経過時間に応じた熱応力制御の計算結果 (WARM 起動)

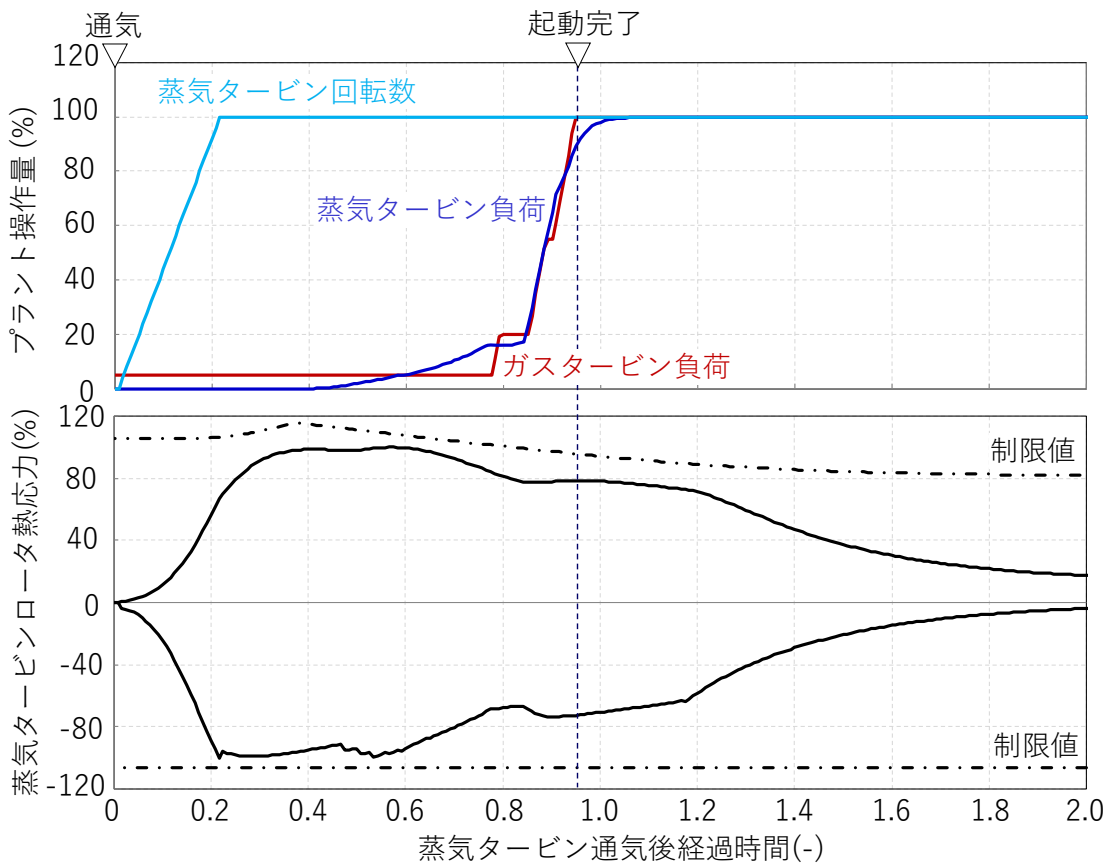


図 2.16 プラント停止後経過時間に応じた熱応力制御の計算結果 (COLD 起動)

図より、各起動条件においてそれぞれに設定された制限値の超過なく熱応力が制御されたことが分かる。図 2.14 の HOT 起動では起動完了後に熱応力のピークを迎えているが、予測制御により事前の蒸気タービンやガスタービン負荷を調整することで制限値を超過することなく制御することができている。図 2.15、図 2.16 の WARM 起動、COLD 起動では、ガスタービンや蒸気タービン負荷が細やかに制御され、ロータに作用する正側の熱応力と負側の熱応力の少なくともどちらかが制限値に漸近するよう制御されており、起動時間を短縮するよう熱応力が制限値を超過しない範囲で各タービンの負荷を上昇させていることが確認できた。

このガスタービンと蒸気タービンの協調制御による起動短縮効果を評価するため、図 2.16 の COLD 起動の制御結果と、ガスタービンの負荷曲線を従来の起動制御手法に基づき予め作成し、蒸気タービンの回転数と負荷制御のみに熱応力予測制御を適用した結果を比較したものを図 2.17 に示す。図において、実線は本開発のガスタービンと蒸気タービンの協調制御方式により熱応力を制御した結果、破線は蒸気タービンの回転数と負荷のみ熱応力の予測制御を適用した結果である。この破線のガスタービンの負荷曲線は 1 回の負荷保持と 2 種の負荷変化率の範囲内で熱応力の制限値超過がないよう手動にて調整した。また、縦軸のプラント操作量、蒸気温度、蒸気流量は定格値で、熱応力については協調制御における最大値 100%として正規化した。

図の最上段は、プラント操作量である蒸気タービン回転数、蒸気タービン負荷、ガスタービン負荷を示しており、協調制御では蒸気タービンのみで熱応力制御した場合と比較して 28%早く起動完了していることが分かる。蒸気タービンだけの制御ではガスタービン負荷上昇の後に続いて蒸気タービンの負荷が上昇しているのに対して、開発した協調制御では時間 $t_a - t_b$ において蒸気タービン負荷が先行的に上昇している。

図の 2 段目以降には、それぞれの起動における蒸気温度、蒸気流量、熱応力の時間推移を示す。協調制御では、ガスタービン負荷よりも蒸気タービン負荷を先行して上昇させたことで、蒸気温度の上昇は遅れるものの、時間 $t_a - t_b$ において蒸気流量の増加幅が蒸気タービンのみによる制御と比較して大きくなっている。このように蒸気タービンに流入する蒸気流量が優先的に増加させた結果、ロータメタルへの伝熱が促進されて内外温度差が低下することで熱応力が低下し、時間 t_b 以降の急速なガスタービン負荷の上昇が可能となっている。このように、熱応力を効率よく制御するようガスタービンと蒸気タービンが動作し起動時間を短縮したことから、開発した協調制御方式の妥当性を確認することができた。

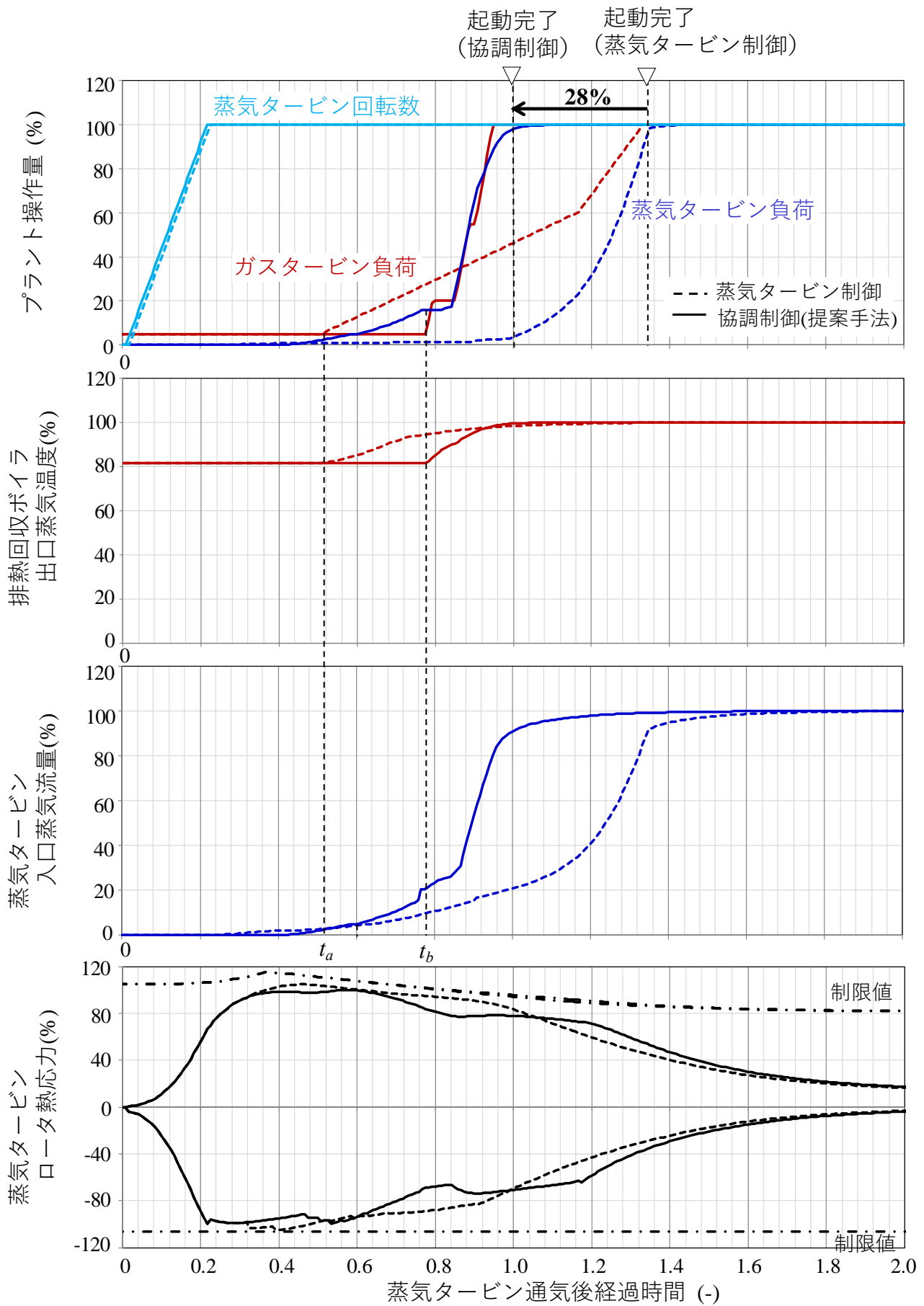


図 2.17 ガスタービン・蒸気タービン協調制御と蒸気タービン制御の比較

さらに、協調制御による停止後経過時間に応じた起動時間を図 2.18 に示す。図において、停止後経過時間 180h における起動時間を 100 として正規化した。また、黒い四角は協調制御を適用した結果、白い四角は蒸気タービン制御のみに予測制御を適用した結果である。図より、全ての停止後経過時間の範囲において、提案した協調制御方式の方が蒸気タービン制御のみの起動よりも起動時間が短縮できることが分かる。その効果は COLD 起動になるほど顕著である。これは、COLD 起動の方が初期のメタル温度が低く、蒸気流量を増加させて入熱を促進する恩恵が大きいためである。また、停止後経過時間の変更に対する起動時間の変化は連続的となっており、本制御により HOT 起動、WARM 起動、COLD 起動などの起動モードを定義することなく、プラントの初期状態に応じて高速にプラントを起動できる見通しを得た。

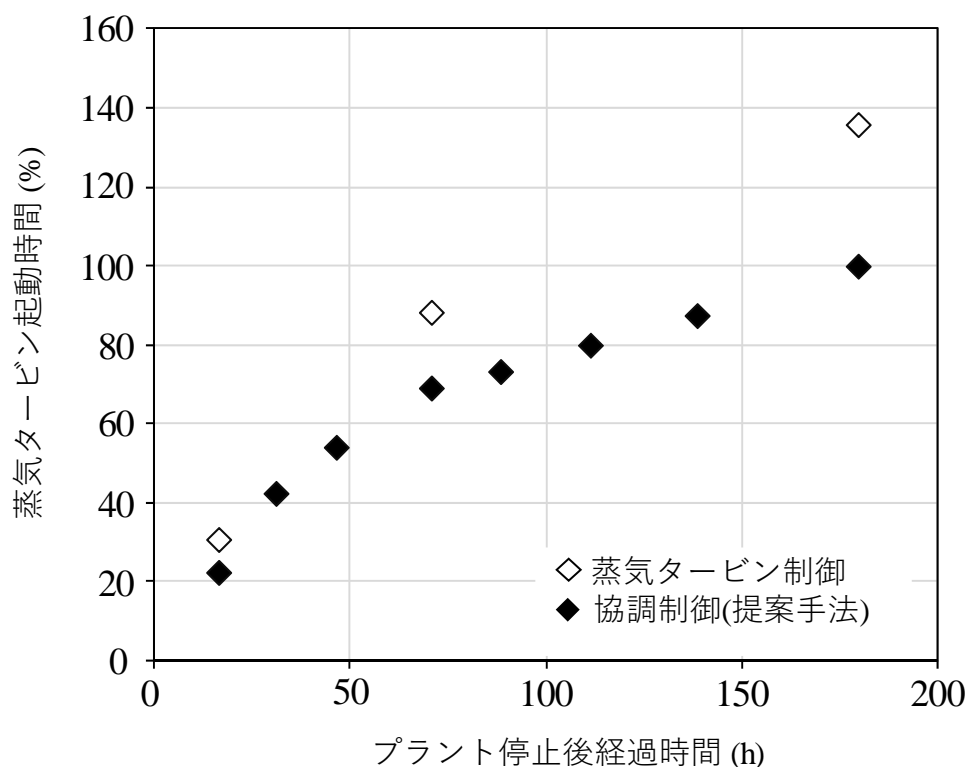


図 2.18 提案した協調制御方式によるプラント停止後経過時間に応じた蒸気タービン起動時間

2.5 結言

コンバインドサイクルの起動時間短縮に向けて、起動時制約条件の1つである蒸気タービンロータ熱応力を予測計算し、この予測結果に基づきガスタービンと蒸気タービンを協調制御する方式を開発した。本方式では、蒸気タービンロータのメタル温度の上昇度合いに応じて起動過程を前後半に二分割し、起動前半では蒸気タービンの回転数・出力を操作して蒸気流量を調整し、起動後半ではガスタービン出力を操作して蒸気温度を調整することで、熱応力の蒸気温度や蒸気流量に対する感度に合わせて操作項目を切り替えることを特徴としている。

まず、熱応力を予測計算するための動特性シミュレータを開発した。本シミュレータでは、模擬範囲を排熱回収ボイラ出口から蒸気タービン初段後ロータでとし、ガスタービンや蒸気加減弁開度などのプラント操作量を入力として蒸気タービンロータ熱応力を計算する。開発シミュレータの計算値と既設プラントの蒸気の温度と圧力の最大誤差はそれぞれ2.3%、4.9%と実機応答を再現し、熱応力の予測制御に適用可能であることを確認した。

次に、予測した熱応力値に基づきガスタービン負荷変化率や保持時間を逐次修正する方式を開発した。予測期間中の熱応力ピーク値と制限値との偏差や、熱応力の変化率に応じてこれらプラント操作量の修正量を計算する。開発した協調制御方式をHOT起動、WARM起動、COLD起動の異なる初期メタル温度の条件に適用し、熱応力が制限値以下に安定的に制御されることを確認した。

さらに、開発した制御方式と蒸気タービンのみを予測制御したケースと比較し、起動時間を最大28%削減できたことから、開発した協調制御によって蒸気タービンロータに発生する熱応力を安定的に制御しつつコンバインドサイクルの起動時間を短縮できる効果を確認した。

3. 多目的進化的アルゴリズムによる起動技術の開発

3.1 起動曲線生成技術の開発

前章ではガスタービンと蒸気タービンを協調して操作し、蒸気タービンロータに発生する熱応力を予測制御することで起動時間を短縮する技術を開発した。しかし、起動時間短縮に加え、近年では寿命消費量や燃料消費量の低減など、顧客からの要望が多様化している。このような複数要望を満足する起動曲線の策定を目的に、多目的進化的アルゴリズムを用いてプラントの起動方法を最適化するシステムを開発する。

本章で提案する起動曲線生成システムを図 3.1 に示す。まず、起動時間短縮や寿命消費低

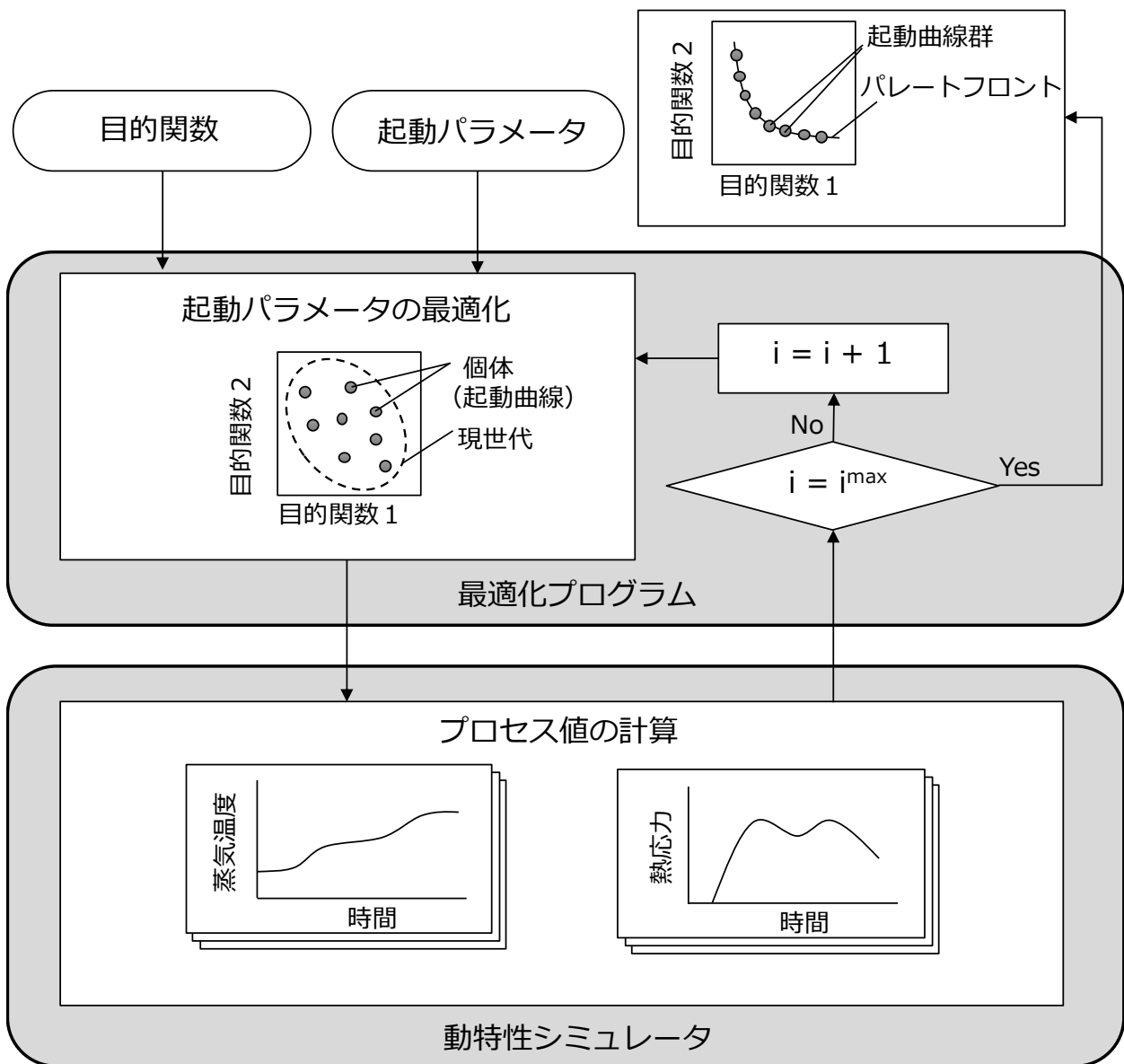


図 3.1 起動曲線生成システム

減などの発電事業者からの要望を計算式として定義した目的関数や、ガスタービン負荷変化率や蒸気加減弁開度などの最適化対象とする起動パラメータを入力する。起動曲線生成システムは最適化プログラムと動特性シミュレータで構成され、最適化プログラムでは目的関数の値を最小にするような起動パラメータの組み合わせを探索し、動特性シミュレータでは探索された起動パラメータの値を用いて生成した起動曲線によるプラントのプロセス値や目的関数の値を計算する。この起動パラメータ探索と目的関数評価を繰り返すことで最適な起動曲線を自動生成する。

ここで、入力される目的関数が複数であり、かつその目的関数がトレードオフ関係にある場合、すべての目的関数を最小にする単一解は存在せず、少なくともどちらか一方が最小となるような解集合であるパレートフロント上の起動曲線を図 3.2 のように求めることとなる。図において、プロットした各点が生成された1つの起動曲線に対応する。本手法では、このように起動曲線の集合（起動曲線群）をパレートフロント上に網羅的に生成することを目的としている。このような運用目的に応じたトレードオフ関係を可視化することで発電事業者が対話的に起動曲線を選定可能となる。なお、動特性シミュレータは前章で説明した排熱回収ボイラ出口の蒸気条件から蒸気タービンロータ熱応力までを計算するものと同様の手法で構築する。

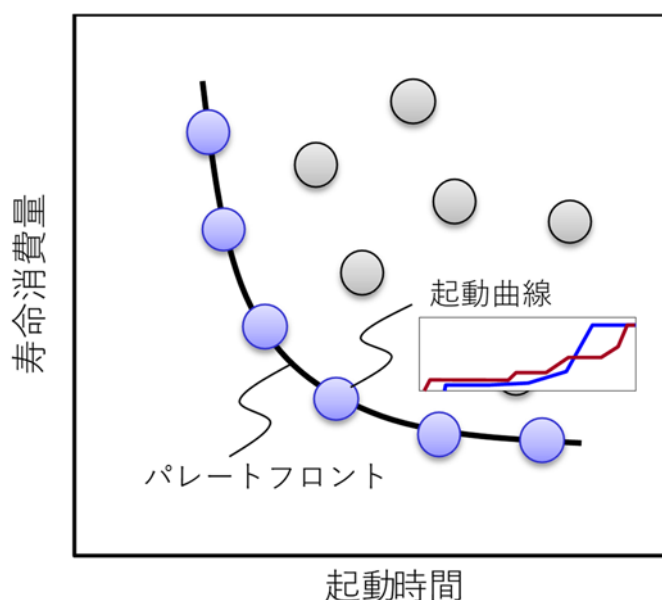


図 3.2 起動曲線の最適化によるパレート解

3.2 最適化プログラム

最適化プログラムでは、目的関数の値を最小化するようなガスタービン負荷の変化率や保持時間、蒸気加減弁の開度レートといった起動パラメータの値、およびこれらの組み合わせを探索することで最適な起動曲線を生成する。本研究で対象とするような最適化問題を解くのに適した手法として多目的進化的アルゴリズムがある。本研究では、多目的進化的アルゴリズムのうち、計算された解から隣り合う距離の近いものを排除することで多様性を維持して広範囲に広がる解を得ることができる NSGA(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)-II [25, 26]を採用した。起動パラメータの最適化による起動曲線の生成手順を、図 3.3 を用いて以下に説明する。

Step 1 N 個体から成る起動曲線群の母集団(P0)の初期値をランダムに生成

Step 2 動特性シミュレータにより、母集団(P0)における各個体(起動曲線)の目的関数(例：起動時間、寿命消費量)の値を計算

Step 3 母集団(Pi)から優良個体(起動時間が短く、寿命消費の少ない起動曲線)を選択し、交叉、突然変異により起動パラメータ値を変更して起動曲線群の子集団(Qi)を生成

Step 4 動特性シミュレータにより、子集団(Qi)における各個体の目的関数の値を計算

Step 5 母集団(Pi)と子集団(Qi)を組み合わせた集団(Pi ∪ Qi)を生成

Step 6 集団(Pi ∪ Qi)の個体に対して目的関数の値に基づく優劣をランク付け
(非優越ソート[26])

Step 7 集団(Pi ∪ Qi)の個体に対して、個体の密集度(混雑距離)を割り当て

Step 8 集団(Pi ∪ Qi)からランク・混雑距離に優れる上位 N 個体を選定し、母集団(Pi+1)に設定

Step 9 $i = i + 1$ とし、Step3 から Step8 まで規定回数繰り返す

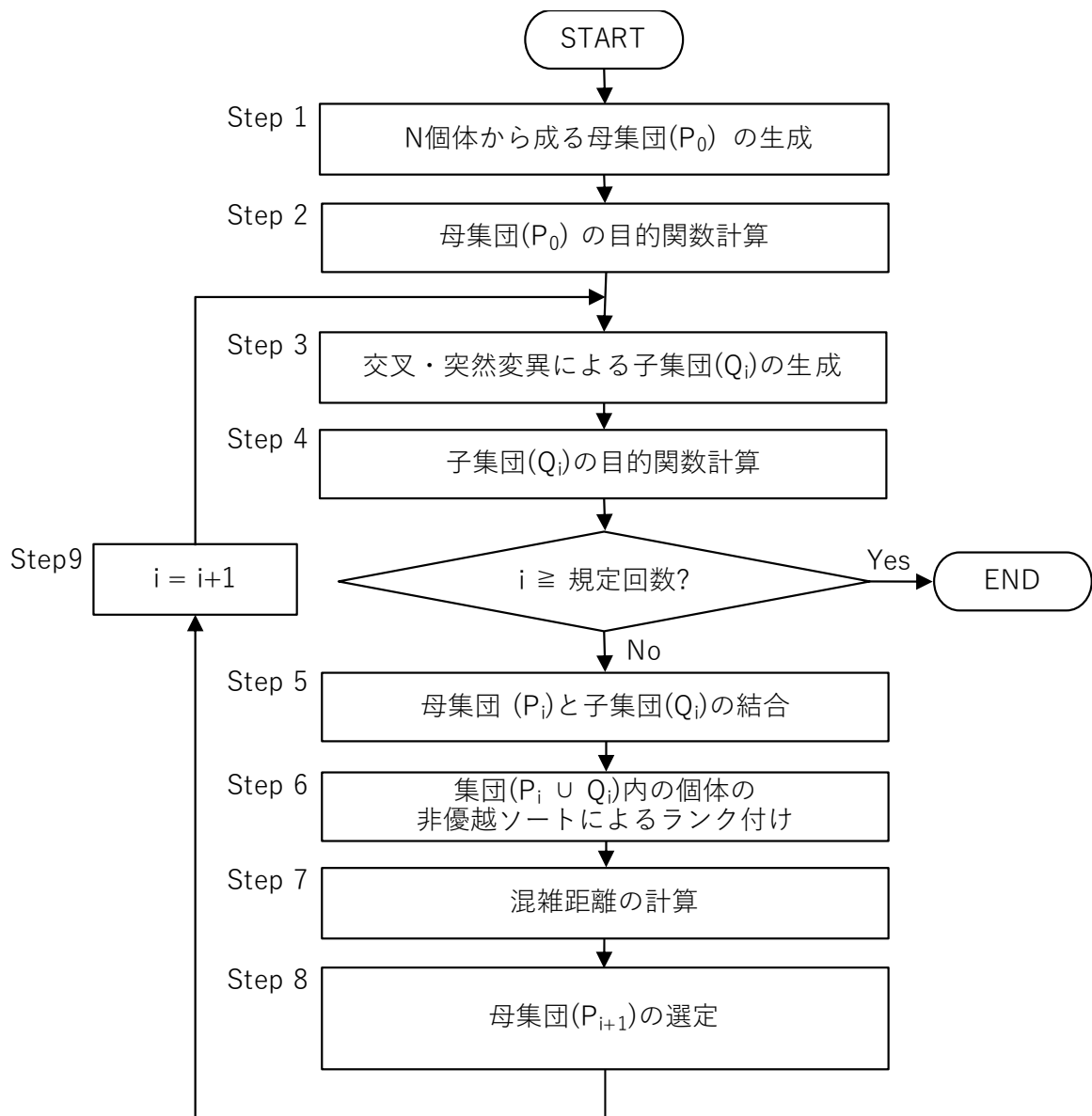


図 3.3 NSGA-II を用いた起動パラメータの最適化手順

このように、起動時間や寿命消費量などの目的関数のうち少なくともどちらか一方が他の個体(起動曲線)よりも優れる母集団(P_i)を選定し、新たな子集団(Q_i)を生成する世代交代を繰り返すことでパレートフロント上に解の集合(起動曲線群)を生成する。ここで、Step3 における交叉には擬似二進交叉(Simulated Binary Crossover: SBX) [27]を用いて式(3.1)-(3.4)により計算した。

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 0.5 \left((1 + \beta_{qi})x_1 + (1 - \beta_{qi})x_2 \right), \\
 y_2 &= 0.5 \left((1 - \beta_{qi})x_1 + (1 + \beta_{qi})x_2 \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$\beta_{qi} = \begin{cases} (\alpha u)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & \text{if } u \leq \frac{1}{\alpha}, \\ \left(\frac{1}{2-\alpha u}\right)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\alpha = 2 - \beta^{-(\eta_c+1)} \quad (3.3)$$

$$\beta = \min\left(1 + \frac{2(x_1 - x_{min})}{x_2 - x_1}, 1 + \frac{2(x_{max} - x_2)}{x_2 - x_1}\right) \quad (3.4)$$

ここで、 x_1, x_2 は母集団から選定された親個体の値、 y_1, y_2 はそれら親個体から生成される子個体の値、 η は非負の分布パラメータである。この親個体 x_1, x_2 の値を含む確率分布を定義し、この確率分布からランダムに子 y_1, y_2 を生成する。

また、突然変異にはPolynomial法[28]を用いて式(3.5), (3.6)から計算した。

$$y = x + (x_{max} - x_{min})\bar{\delta} \quad (3.5)$$

$$\bar{\delta} = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta_m+1}} - 1, & \text{if } u \leq 0.5, \\ 1 - (2(1-u))^{\frac{1}{\eta_m+1}}, & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (3.6)$$

ここで、 u は(0, 1)の一様乱数、 x_{max}, x_{min} はそれぞれ個体の値が取り得る範囲の上下限值である。突然変異においても、 x_{max}, x_{min} に対する確率分布を定義し、子をランダムで生成する。

Step. 6における非優越ソートでは、集団内の($P_i \cup Q_i$)の個体全てにランク付けを行う。非優越ソートによるランク付けの概要を図 3.4 に示す。例えば図中の個体 x_1 において、この個体よりも目的関数 1、目的関数 2 の値を同時に下回る個体は存在しない。このような個体を非劣解として全て抽出し Rank = 1 とする。次に、Rank = 1 以外の個体に対して非劣解を抽出し、Rank = 2 とする。この処理を全ての個体に対してランクが振り分けられまで繰り返す。このとき、Rank = 1 である集団がパレート解となる。

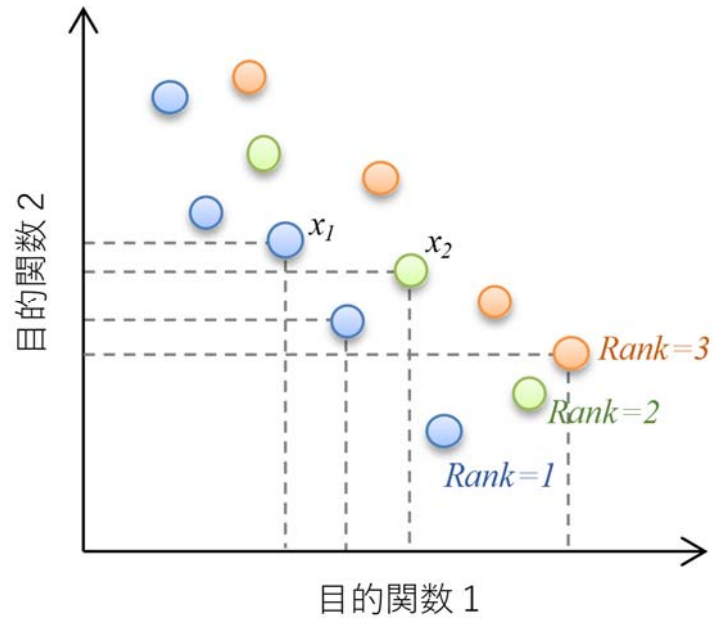


図 3.4 非優越ソートの概念図

Step. 7 における混雑距離の割り当てでは、1つの解の両隣にある解の距離を全ての目的関数について計算し、平均する。目的関数が2つの場合には、図 3.5 に示すように、個体 i の両隣の解で囲まれる四角形の辺の長さの平均となる。Step 8 において集団 $(P_i \cup Q_i)$ から決められた数の母集団 (P_{i+1}) を選定するに際し、非優越ソートにて割り振られたランクの低いものを選定し、ランクが同じ個体については混雑距離が高いものを優先して選定することで、パレートフロント上に網羅的に広がる解を生成することができる。

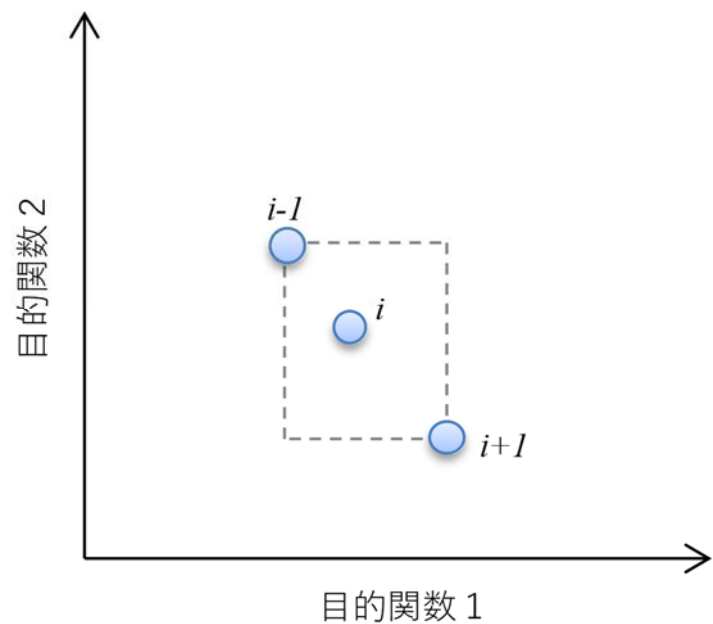


図 3.5 混雑距離計算の概念図

3.3 シミュレーションによる起動改善効果の検証

3.3.1 対象プラント

開発した多目的進化的アルゴリズムによる起動曲線群のパレートフロント生成機能と、生成された起動曲線の妥当性の検証を目的にケーススタディを実施する。対象とするプラント構成を図 3.6 に、起動手順を図 3.7 に示す。ガスタービン 1 台、排熱回収ボイラ 1 台、蒸気タービン 1 台で構成され、ガスタービンと蒸気タービンが同軸で連結される 1 軸式のコンバインドサイクルとした。このため、図 3.7 の起動曲線において蒸気タービン回転数の独立した制御はなく、起動初めにガスタービンと蒸気タービンの回転数を同時に上昇させる。また前章ではプラント操作量としてガスタービン負荷、蒸気タービン回転数、蒸気タービン負荷の指令値についての起動曲線を作成したが、本章では対象プラントの制御仕様によりガスタービン負荷、蒸気加減弁についての起動曲線を対象とする。

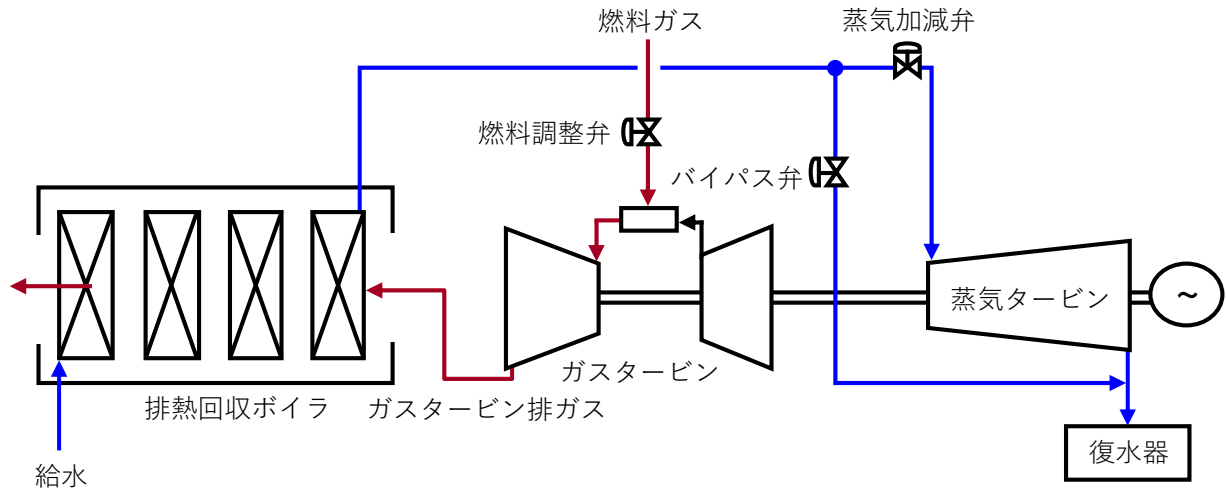


図 3.6 解析対象プラントの構成

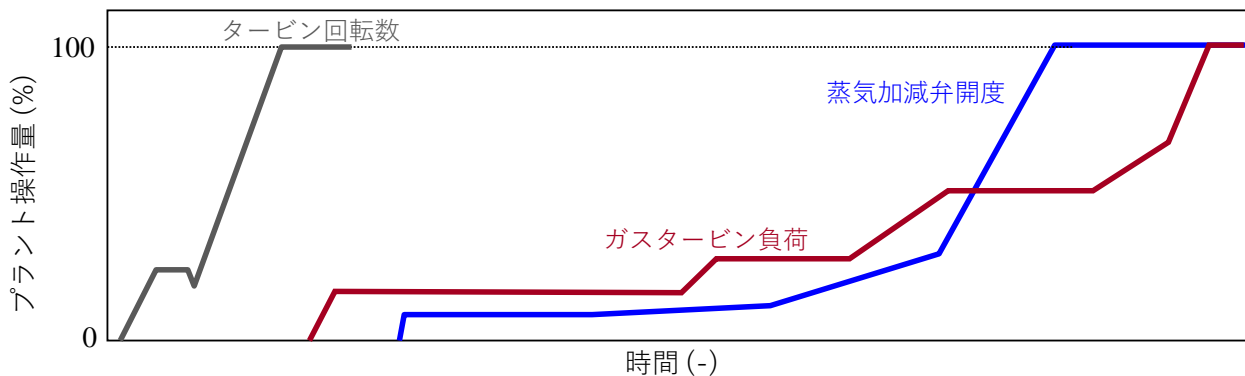


図 3.7 解析対象プラントの起動手順

3.3.2 最適化条件

起動曲線をガスタービンの負荷変化率や負荷保持時間、蒸気加減弁開度の開度レートや保持時間などにパラメータ化し、最適化対象となる起動パラメータとする。本章で対象とする起動パラメータを表 3.1 に、そのパラメータの起動曲線中における割り当てを図 3.8 に示す。最適化範囲は蒸気タービン通気後から起動完了までとし、ガスタービン負荷に関するパラメータ 7 つ、蒸気加減弁開度に関するパラメータ 4 つの全 11 パラメータ値を最適化する。なお、起動完了の定義は、ガスタービン負荷および蒸気加減弁開度がそれぞれ 100%に到達することとした。

表 3.1 最適化パラメータ

#	パラメータ	単位	範囲
1	ガスタービン負荷保持時間 1	min	(0-60)
2	ガスタービン負荷変化率 1	%/min	(0.01-仕様上限)
3	ガスタービン負荷保持時間 2	min	(0-60)
4	ガスタービン負荷変化率 2	%/min	(0.01-仕様上限)
5	ガスタービン負荷保持時間 3	min	(0-60)
6	ガスタービン負荷変化率 3	%/min	(0.01-仕様上限)
7	ガスタービン負荷変化率 4	%/min	(0.01-仕様上限)
8	蒸気加減弁開度レート 1	%/min	(0.01-仕様上限)
9	蒸気加減弁開度保持時間	min	(0-60)
10	蒸気加減弁開度レート 2	%/min	(0.01-仕様上限)
11	蒸気加減弁開度レート 3	%/min	(0.01-仕様上限)

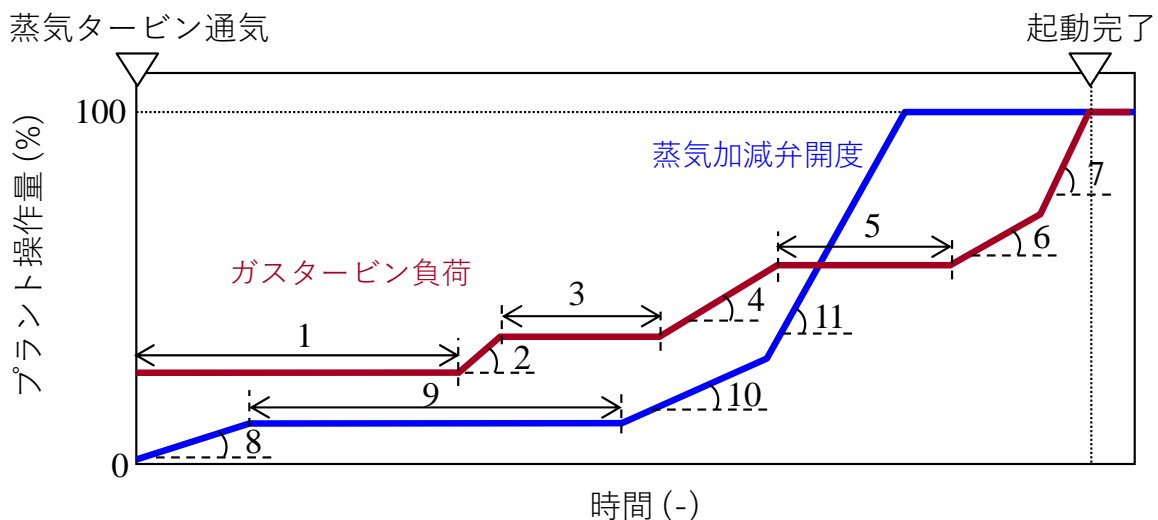


図 3.8 最適化する起動パラメータ

目的関数には、起動時間が最短となる起動曲線を寿命消費量に応じて生成できるよう、起動時間と蒸気タービンロータ熱応力のピーク値を選定した。起動時間は、蒸気タービン通気から起動完了までと定義した。また、発生する熱応力による寿命消費の計算方法には機器の使用条件に応じていくつかの種類があるが、本研究ではピークカウント法を用いるとする。プラントの起動停止における蒸気タービンロータの寿命評価方法のイメージを図 3.9 に示す。図 3.9(a)に示すように蒸気タービンロータ表面には起動時には引張、停止時には圧縮の熱応力が働く。この起動停止時の熱応力の最小値および最大値をカウントして寿命消費量を計算するのがピークカウント法であり、図 3.9(b)のようにこのピーク熱応力から寿命消費量に換算するテーブルを蒸気タービンの各メーカーは保有しており、これにより起動時の寿命消費量を計算する[29]。このため、寿命消費量を最適化するための目的関数として、蒸気タービンロータの熱応力のピーク値を採用した。

目的関数の起動時間と熱応力はトレードオフ関係にあり、これらのパレートフロント上に存在する起動曲線の起動パラメータ値とその組み合わせを探索する。また、コンバインドサイクルではプラント停止後から時間が経過するにともない構成機器のメタル温度が冷却されることから再起動の際に高い熱応力値が発生しやすくなり、これを回避するために起動時間が増加する。本章では停止後経過時間の異なる COLD 起動, WARM 起動, HOT 起動の 3 つの起動モードについて、起動曲線を生成した。また、運用上の制約を考慮し蒸気タービン通気時のガスタービンの保持負荷は起動モードごとに固定値とし、ガスタービン負荷変化率には上下限值を設定した。

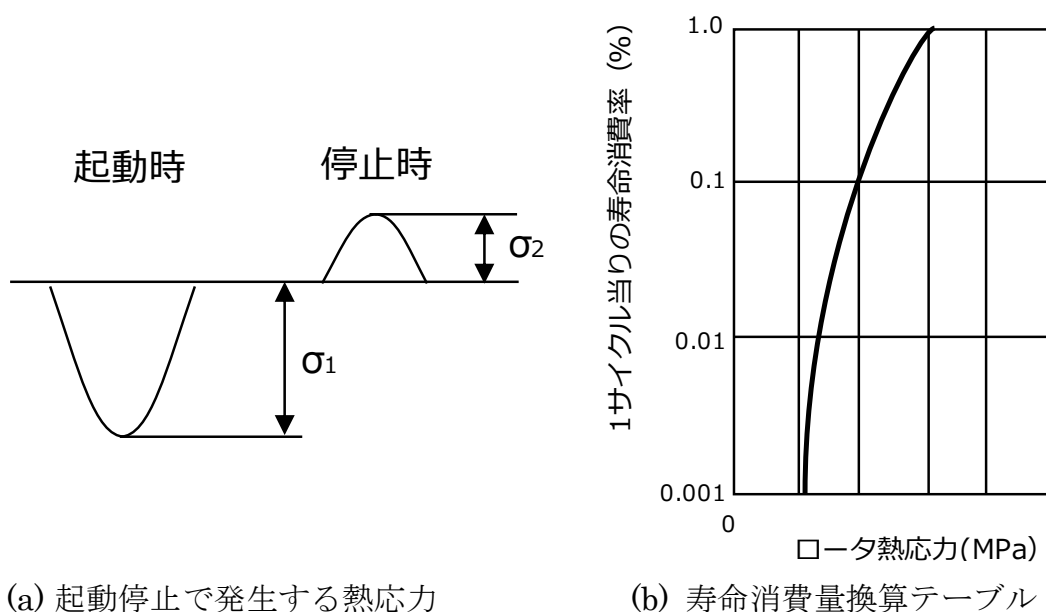


図 3.9 蒸気タービンロータの寿命消費量計算方法

3.3.3 パレートフロント生成の評価結果

開発方法による最適な起動曲線の探索が適切に実行されていることを検証するため、生成した起動曲線について目的関数の値を評価した。COLD 起動を対象に生成した起動曲線群を図 3.10 に示す。図中の横軸は既往の研究からベンチマークした COLD 起動における目標起動時間を 1 として正規化し、縦軸は熱応力制限値を 100% として相対値で示した。図中のプロットは各点が 1 つの起動曲線を表す。多目的進化的アルゴリズムでは、解の多様性を保つ目的で用いられる突然変異により、常に一定の非最適解を含む。そのため、パレートフロント上の起動曲線を抽出する際には最終 5 世代の個体について非優越ソートを再度適用し、最上位ランクの集合をパレート最適解とした。図に示すように、目標起動時間に対する比率 0.3 から 1.5 (熱応力制限値に対して 46% から 136%) にわたる起動曲線群を網羅的に生成できた。さらに起動時間と熱応力のトレードオフ関係を示すパレートフロントが生成されており、複数の要望に基づく起動曲線の最適化に対する本開発方法の有用性を確認できた。このように評価指標についての解全体の分布を把握することで、発電事業者が対話的に起動曲線を選定することが可能となり、プラントの運転計画や仕様策定についての意思決定が容易となる。

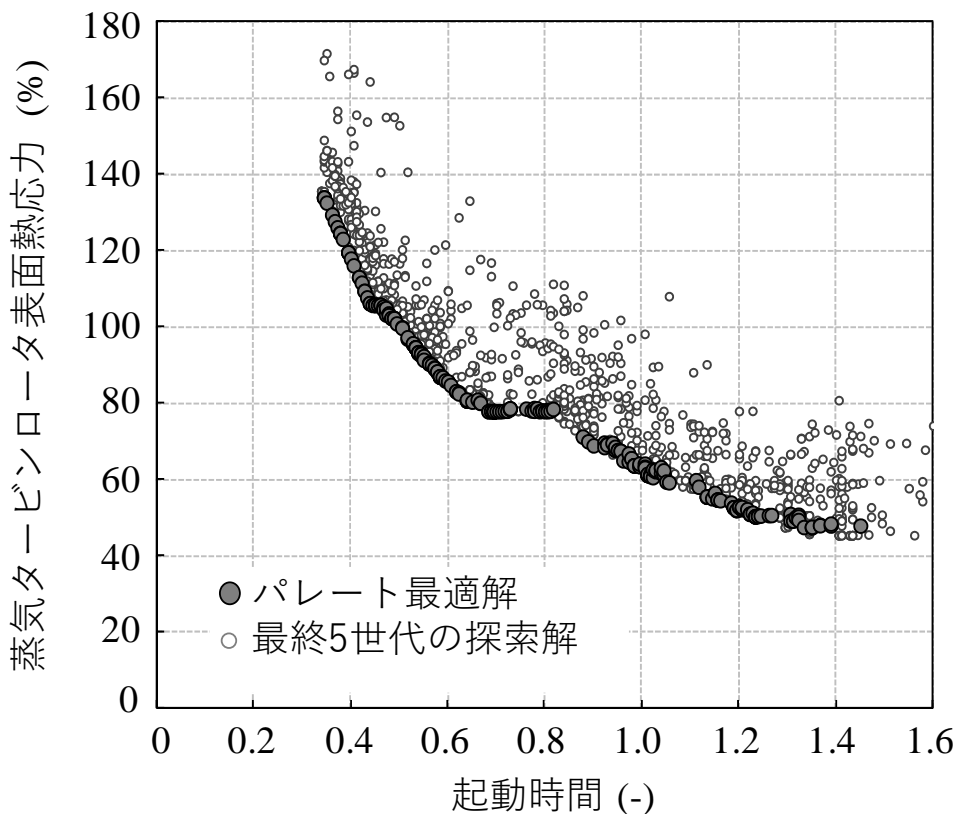


図 3.10 起動曲線生成結果(COLD 起動)

3.3.4 生成起動曲線の評価

図 3.10 において生成されたパレートフロントにはいくつかの変曲点が存在することから、パレートフロントが複数の局所解の集合から形成されていることが分かる。この原因を分析するため、生成された起動曲線のガスタービン負荷と蒸気加減弁開度のそれぞれの100%到達順序に応じてパレートフロント上の起動曲線を分類した。結果を図 3.11 に示す。図において、蒸気加減弁の開操作が先に完了する起動曲線(蒸気加減弁先行起動)を青で、ガスタービンの負荷上昇が先に完了する起動曲線(ガスタービン先行起動)を緑で示した。この結果、起動時間と熱応力のトレードオフ関係を示すパレートフロントは、蒸気加減弁先行起動が有利な領域とガスタービン先行起動が有利な領域の組み合わせから構成されることが分かる。

起動時間の短い図中①の領域では蒸気加減弁先行起動の起動曲線がパレートフロント上に出現している。このことから、起動時間を短縮する場合は、蒸気加減弁先行起動のほうがガスタービン先行起動よりも熱応力を低減できることが分かる。反対に、起動時間の比較的長い領域②ではガスタービン先行起動がパレートフロント上に出現していることか

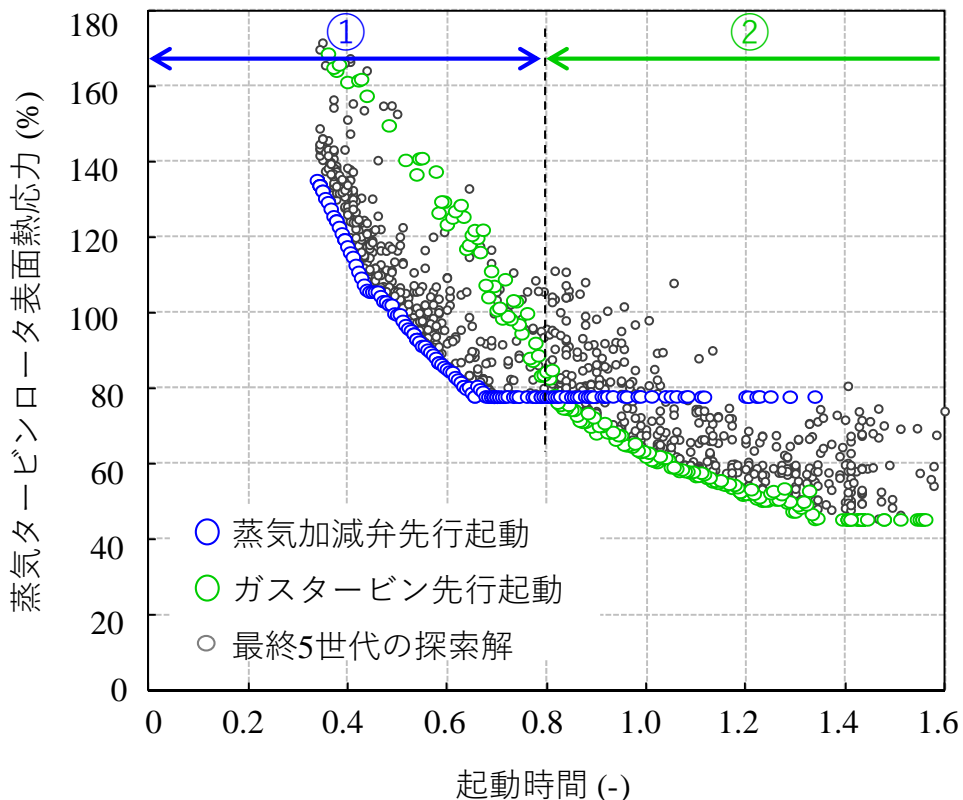
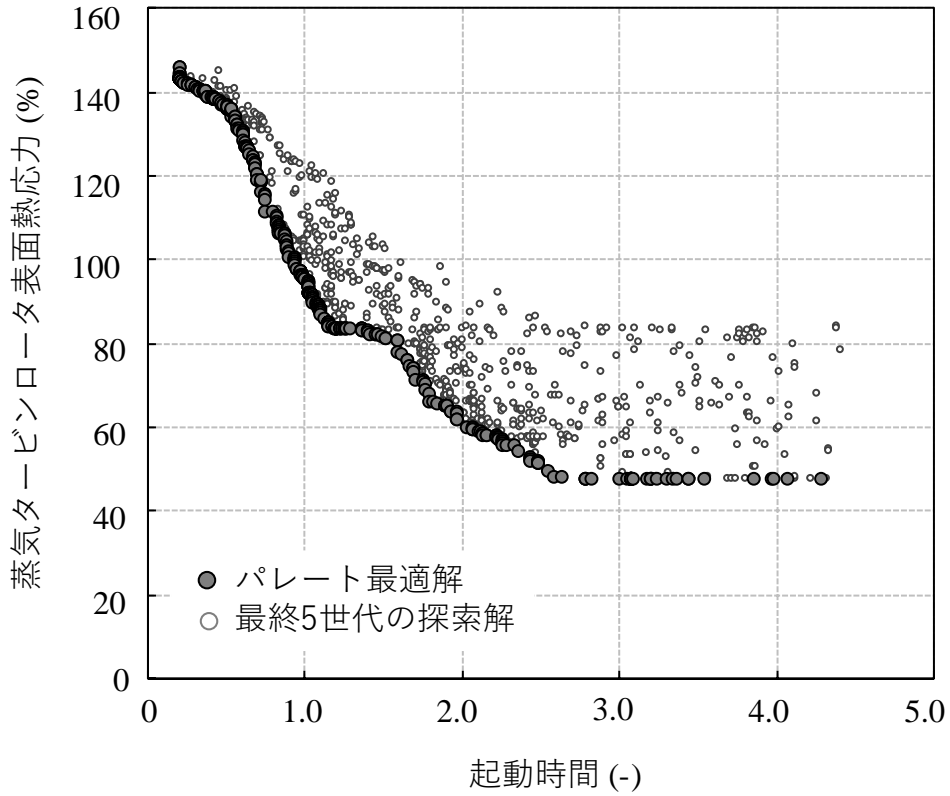


図 3.11 パレートフロント上の起動曲線分類結果 (COLD 起動)

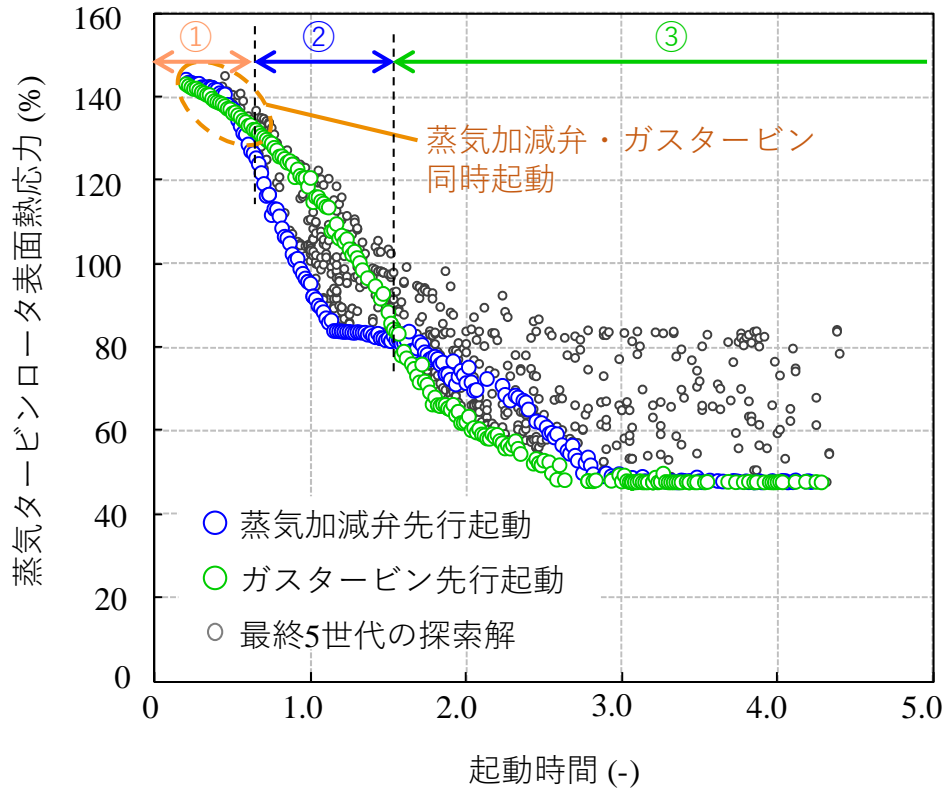
ら、長い起動時間が許容される場合はガスタービン先行起動のほうが熱応力を低減できることがわかる。起動時間 0.8 においては蒸気加減弁先行起動とガスタービン先行起動のパレートフロントが交差しており、それぞれの起動手順で同じ起動時間と熱応力になる起動曲線が存在することを示している。また、どちらの起動手順においても起動時間を延ばしても熱応力が低減されないような下限値が存在しているが、この値は蒸気タービン通気時のガスタービン保持負荷を固定としたことによるものである。蒸気タービン内部で蒸気が湿りの状態とならないよう蒸気過熱度などの通気条件を考慮した上でこのガスタービン保持負荷を低減すれば、熱応力をさらに低減する解の探索は可能である。ただし、その分ロータへの入熱が遅れることとなり、起動時間が増加する。

同様に WARM 起動、HOT 起動について、最適化された起動曲線群とその分類結果をそれぞれ図 3.12、3.13 に示す。どちらの計算ケースもパレートフロント上に網羅的に起動曲線を生成できており、COLD 起動と同様に蒸気加減弁先行起動が有利な領域とガスタービン先行起動が有利な領域の組み合わせから構成されている。図 3.12(b)の WARM 起動では、領域②において蒸気加減弁先行起動、領域③においてガスタービン先行起動がパレートフロント上に出現している。ここで、起動時間の短縮にともない蒸気加減弁先行起動とガスタービン先行起動の起動曲線の形状が近づき、領域①に示す範囲ではガスタービン負荷と蒸気加減弁開度が同時に上昇(ガスタービン・蒸気加減弁同時起動)する傾向を示している。

図 3.13(b)の HOT 起動においても、WARM 起動と同様にガスタービン・蒸気加減弁同時起動、蒸気加減弁先行起動、ガスタービン先行起動の起動曲線がパレートフロント上に出現した。これら起動手順の違いが熱応力の制御性に与える影響を評価するため、図 3.13(b)のパレートフロントにおいて黒丸でプロットした起動曲線 A、起動曲線 B、起動曲線 C におけるガスタービン負荷、蒸気加減弁開度について、蒸気温度、蒸気流量および熱応力の経時変化を比較した結果をそれぞれ図 3.14、図 3.15、図 3.16 に示す。

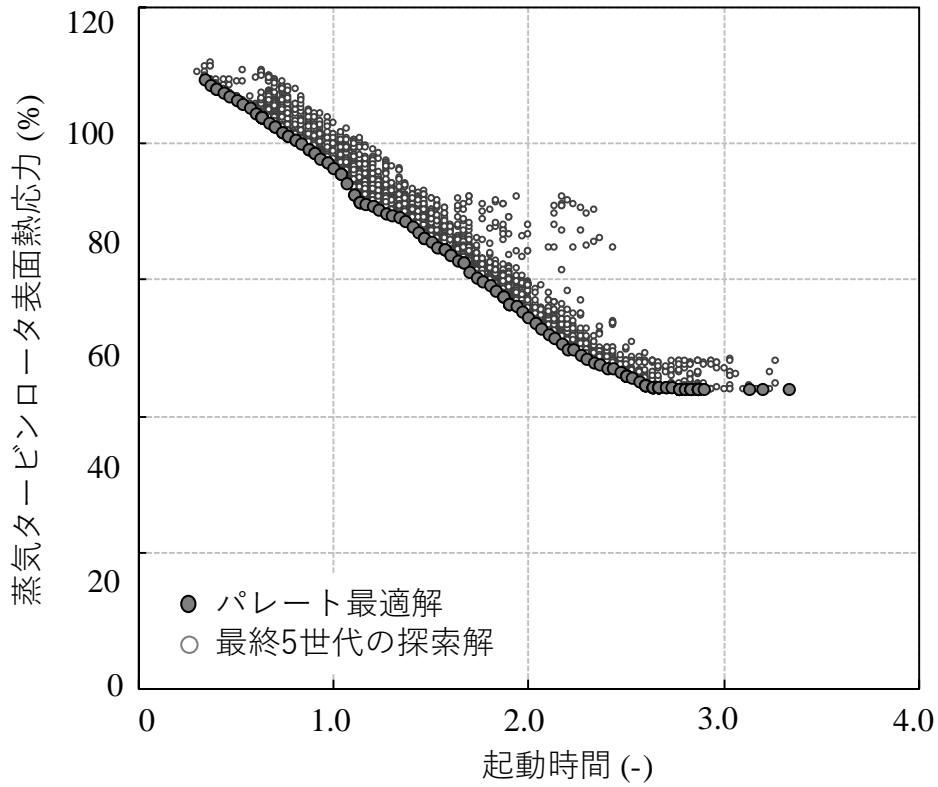


(a) パレートフロント

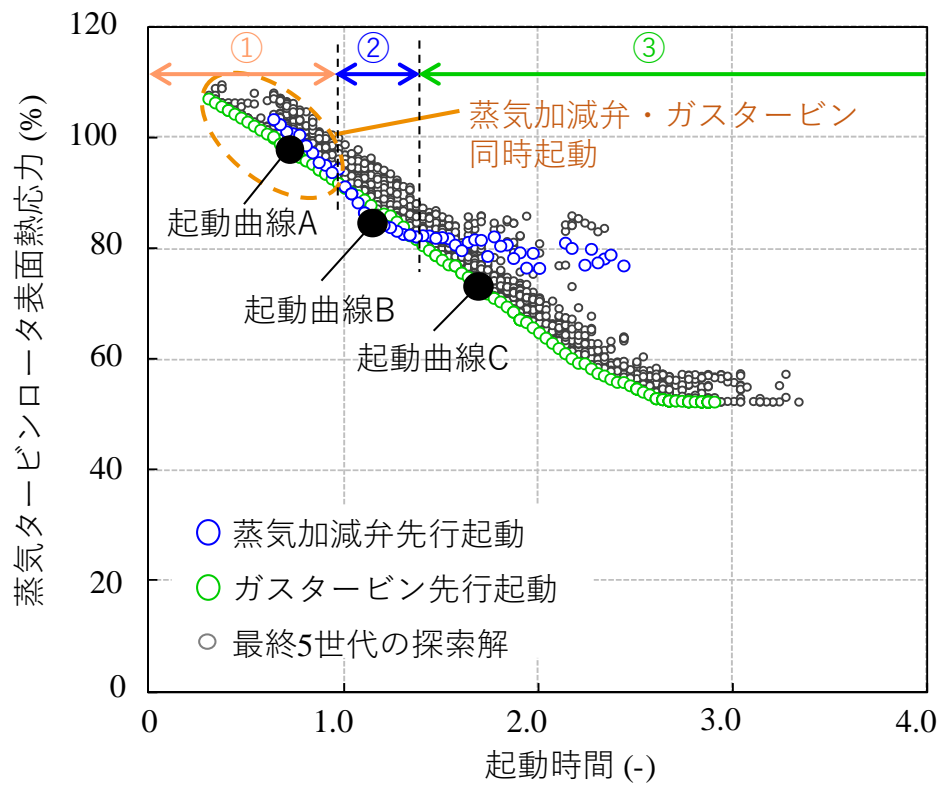


(b) 起動曲線分類

図 3.12 起動曲線生成結果 (WARM 起動)



(a) パレートフロント



(b) 起動曲線分類

図 3.13 起動曲線生成結果 (HOT 起動)

図 3.14 は起動曲線 A の計算結果を示している。ややガスタービンが先行して上昇を開始しているものの、ガスタービン負荷変化中に蒸気加減弁開度も上昇を開始しており、同時起動の傾向を示している。熱応力は起動初期には低い値で保たれ、起動後半のガスタービン負荷および蒸気加減弁開度の上昇にともない蒸気タービンに流入する蒸気流量が急増することで熱応力も増大する。その後、蒸気加減弁開度 100%到達後の起動完了後にピークを迎える。このように、ガスタービン・蒸気加減弁同時起動では、短い時間で起動できるものの蒸気の温度上昇と流量増加が同時に起こることで、高い熱応力が発生する。

図 3.15 は、起動曲線 B の計算結果を示している。起動曲線 A と比較して起動直後の蒸気加減弁開度の保持を省略する代わりに、ガスタービン負荷を長く保持している。この結果、蒸気流量が起動初期に増加して熱応力の上昇タイミングは早まるものの、ピーク値が低減されていることが分かる。これは、ガスタービン負荷の低い段階で蒸気加減弁を先行的に開くことで蒸気タービンロータが暖機され、起動後半のガスタービン負荷上昇による熱応力の増加を緩和できたためである。このように、蒸気加減弁とガスタービンの上昇タイミングを離すことで熱応力が低減された。

図 3.16 は、起動曲線 C の計算結果を示している。熱応力の上昇は全体的に緩やかとなり起動曲線 B よりもさらに低減された。起動曲線 B では蒸気加減弁開度保持を排除することで入熱を前倒しして熱応力のピーク値を低減したのに対し、起動曲線 C では蒸気加減弁開度の保持時間をより長くすることで蒸気流量を絞り、起動初期の熱応力上昇幅を低減している。また、蒸気加減弁開度を保持している間にガスタービン負荷を上昇させておき双方の上昇タイミングを十分に離すことで、蒸気加減弁開度の上昇前に蒸気タービンロータが暖機されて熱応力ピーク値が低減された。

以上のように、起動時間短縮と寿命消費(熱応力)低減のどちらを優先するかに応じて、ガスタービン負荷と蒸気加減弁開度の最適な起動手順が異なることが分かった。プラント耐用年数 20~30 年を想定した従来基準どおりの熱応力制限値において起動時間短縮を優先したい場合は蒸気加減弁先行起動、起動時間の優先度が高くなく起動 1 回当たりに消費する寿命消費量(熱応力値)を節約したい場合はガスタービン先行起動、初期メタル温度が十分高い状態からの最速起動ではガスタービン・蒸気加減弁同時起動が適しているといえる。またこのことから、起動時間短縮に向けて第 2 章で開発した起動前半に蒸気タービン回転数・負荷で熱応力を予測制御し、起動後半でガスタービン負荷を制御する協調制御方式の妥当性をあらためて確認することができた。

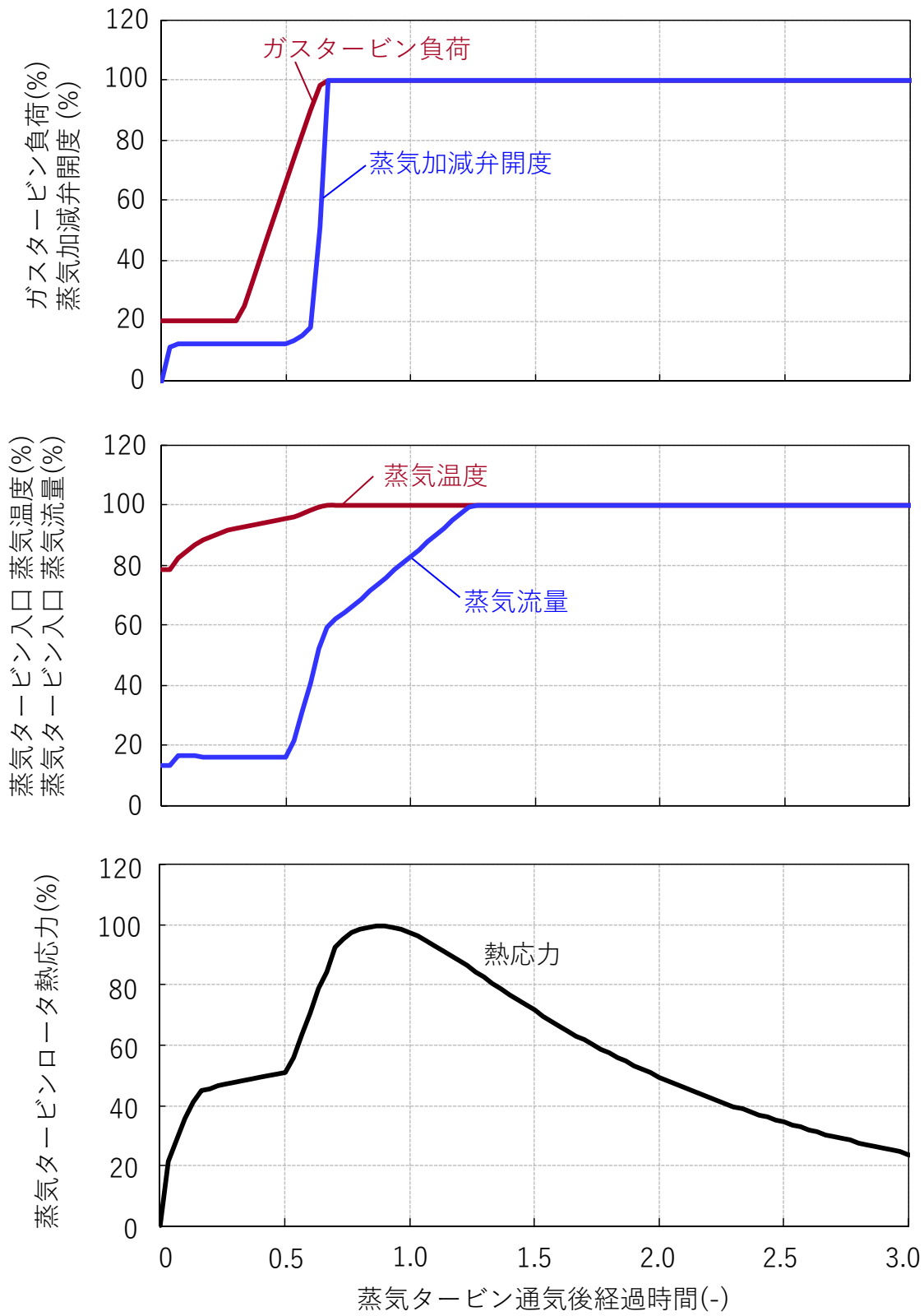


図 3.14 ガスタービン・蒸気加減弁同時起動 (起動曲線 A (図 3.13))

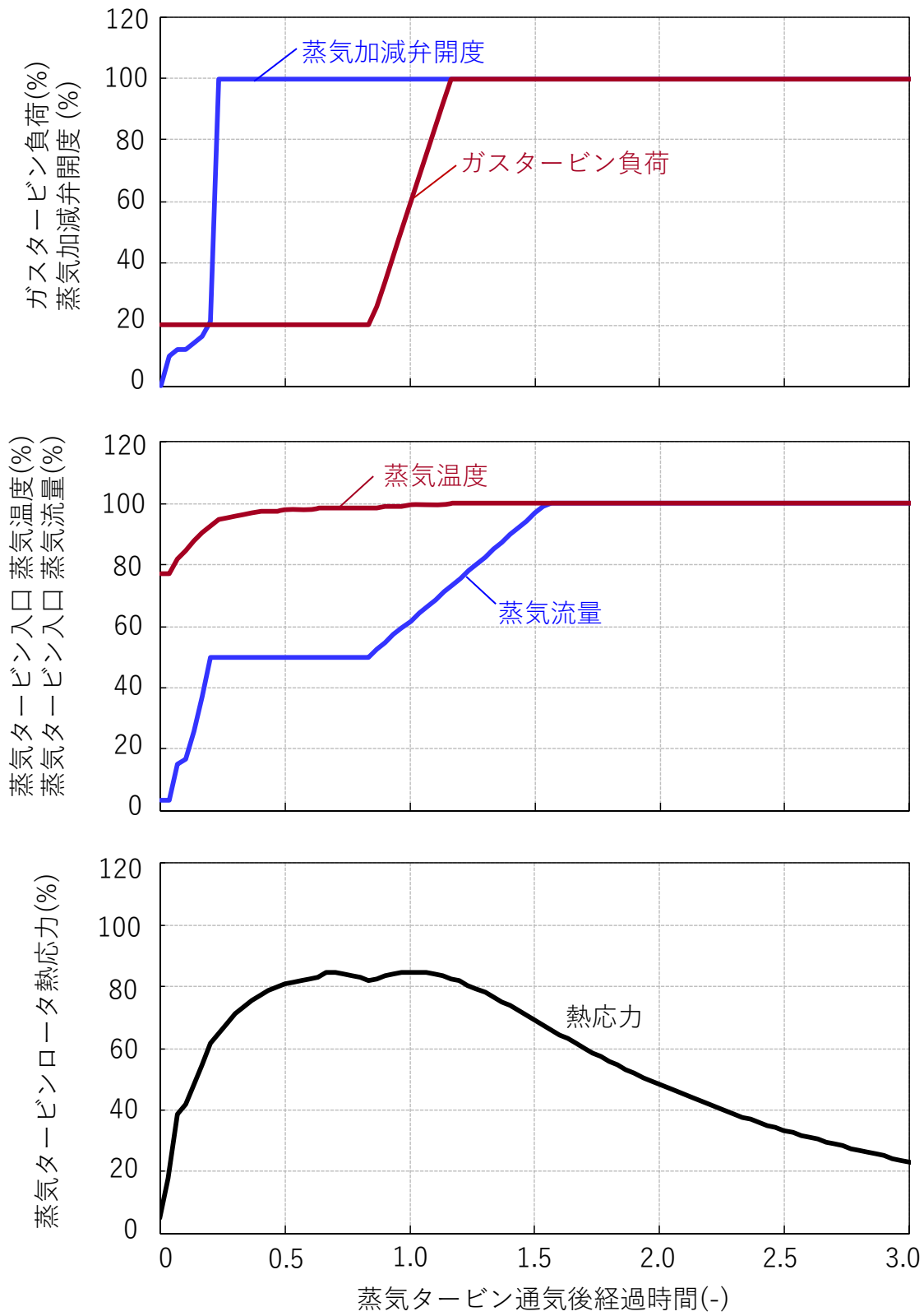


図 3.15 蒸気加減弁先行起動 (起動曲線 B (図 3.13))

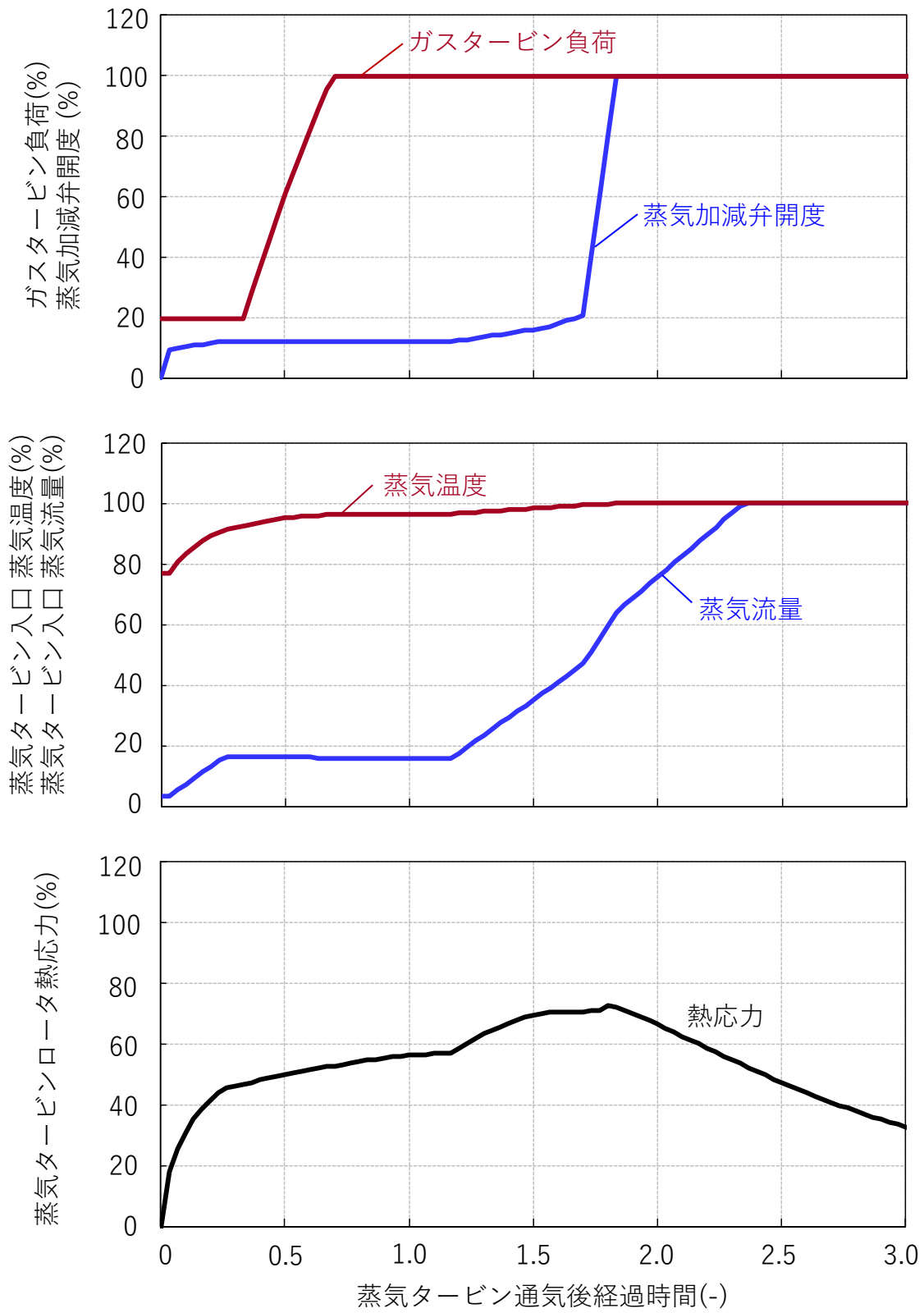


図 3.16 ガスタービン先行起動曲線 C (図 3.13))

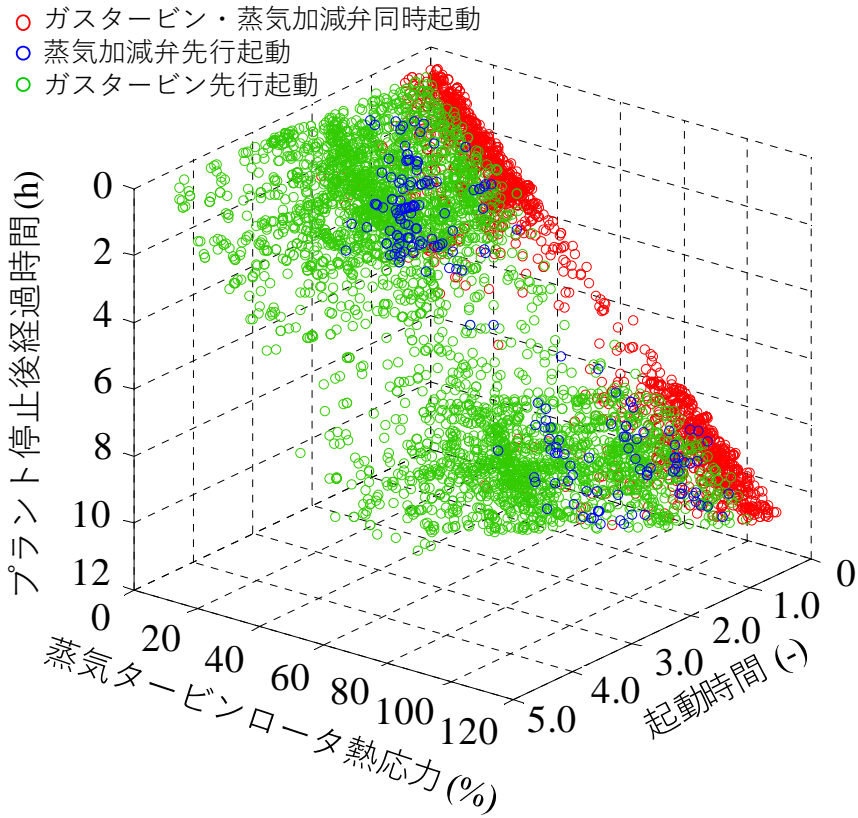
3.3.5 起動初期条件に応じたパレートフロントの評価

実際のプラント運用では電力需給バランスの変動に応じて日々異なる停止後経過時間でプラントを起動させることが多く、停止後経過時間が少し変化した場合でも起動時間や熱応力の値が不連続に変化することのないよう起動曲線を策定する必要がある。停止後経過時間の変化に対して、前項までで説明したパレートフロントが不連続点なく生成できることを確認するため、HOT 起動の範囲で停止後経過時間を最適化のパラメータに追加して起動曲線群を生成した。結果を図 3.17 に示す。図 3.17(a)中にプロットした各点が1つの起動曲線に対応しており、どの停止後経過時間においてもガスタービン・蒸気加減弁同時起動、蒸気加減弁先行起動、ガスタービン先行起動の起動曲線が起動時間の増加に対して同じ順序でパレートフロント上に出現した。これら起動曲線群のプロット間を補間したものを図 3.17(b)に示す。得られたパレートフロントの曲面は連続的となり、停止後経過時間の増加に対して起動時間や熱応力も単調に延長、増加することを確認できた。またこのことから、任意の停止後経過時間と、起動時間や熱応力などの運転条件を指定することで、最適な起動曲線を一意に選定できる見通しを得た。

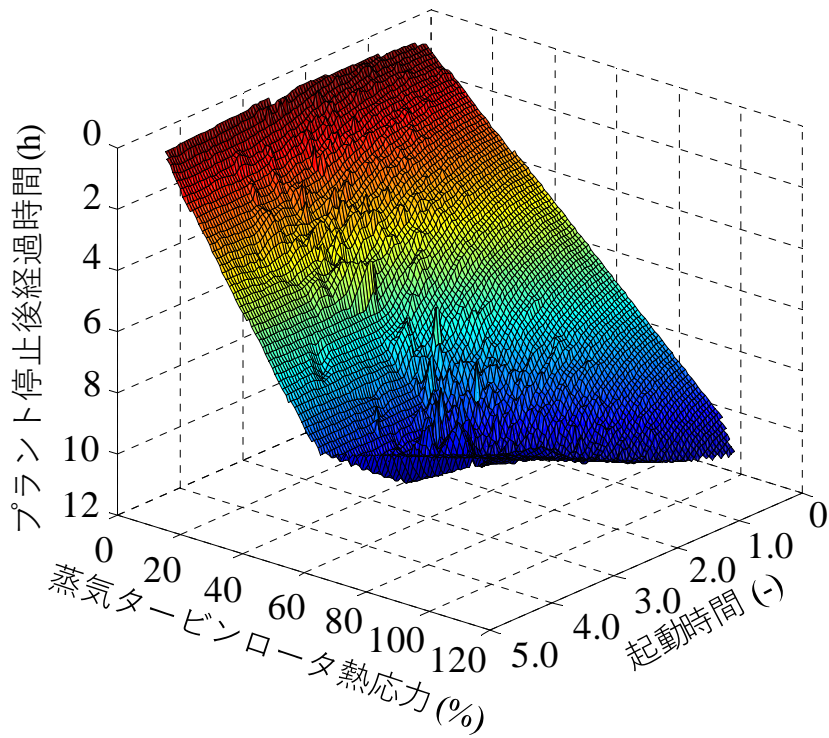
3.4 結言

起動時間短縮に加え、寿命消費量や燃料消費量の低減など、多様化する顧客要望に対応するため、多目的進化的アルゴリズムの NSGA-II を用いてプラントの起動方法を最適化する技術を開発した。本技術では、NSGA-II によるガスタービン負荷変化率や蒸気加減弁開度レートなどの起動パラメータ値の探索と、動特性シミュレータによる目的関数の評価を繰り返すことで最適な起動曲線を自動生成する。

開発技術の妥当性の検証を目的に一軸式コンバインドサイクルを対象に起動曲線を試作し、目的関数として採用した起動時間とロータ熱応力のトレードオフ関係を示すパレートフロント上に起動曲線を複数自動で生成できることを確認した。また、生成された起動曲線はガスタービン負荷と蒸気加減弁開度の 100% 到達の順序に応じて2種類に分類され、起動時間短縮と寿命消費低減のどちらを優先するかに応じて、最適な起動順序が異なるという知見を得た。さらに、停止後経過時間に対する起動時間と寿命消費量のパレートフロントの曲面が連続的となり、任意の起動初期条件と発電事業者からの要望に基づく最適な起動曲線を一意に選定できることから、起動時間短縮を含む任意の顧客要望に対して最適な起動曲線を提示できることを確認した。



(a) パレート解



(b) 点群補間

図 3.17 停止後経過時間に応じた起動曲線群の最適化結果

4. 商用プラントへの適用試験

4.1 対象プラント

第3章で開発した最適化手法による起動プロセスの運用改善効果を検証するため、生成した起動曲線を欧州の商用プラントに適用する。対象とするプラントの仕様を表4.1に、プラント模式図を図4.1に示す。ガスタービン1台、排熱回収ボイラ1台、蒸気タービン1台からなる400MW級のコンバインドサイクルである。ガスタービンと蒸気タービンが同軸で連結された一軸式の構成で、排熱回収ボイラは縦型となっている。なお、本図では低圧蒸気系統および低圧タービンを簡単のため省略して示している。

このプラントにおける起動手順を図4.2に示す。対象プラントでは、発電機出力および蒸気加減弁開度に指令値を与え、起動中の蒸気タービン負荷の変動を吸収して発電機出力の指令値を満たすようガスタービン負荷が調整される。また、コンバインドサイクルでは、通常運転中の出力の下限値である最低負荷が予め定められている。この最低負荷は主にガスタービン燃焼器バーナの燃焼切り替えのタイミングに基づき決定される。対象プラントでは、発電機が最低負荷に到達後では系統からの電力要求に追従して運転されるため、起動完了の条件は、発電機の最低負荷到達および蒸気加減弁全開とした。

表 4.1 対象プラント仕様

項目	仕様
プラント構成	一軸式 1 on 1 コンバインドサイクル
燃料	天然ガス
プラント出力	400MW 級
回転数	3000rpm
蒸気サイクル	再熱式三重圧
起動完了条件	-発電機の最低負荷到達 -高圧・再熱・低圧の蒸気加減弁全開

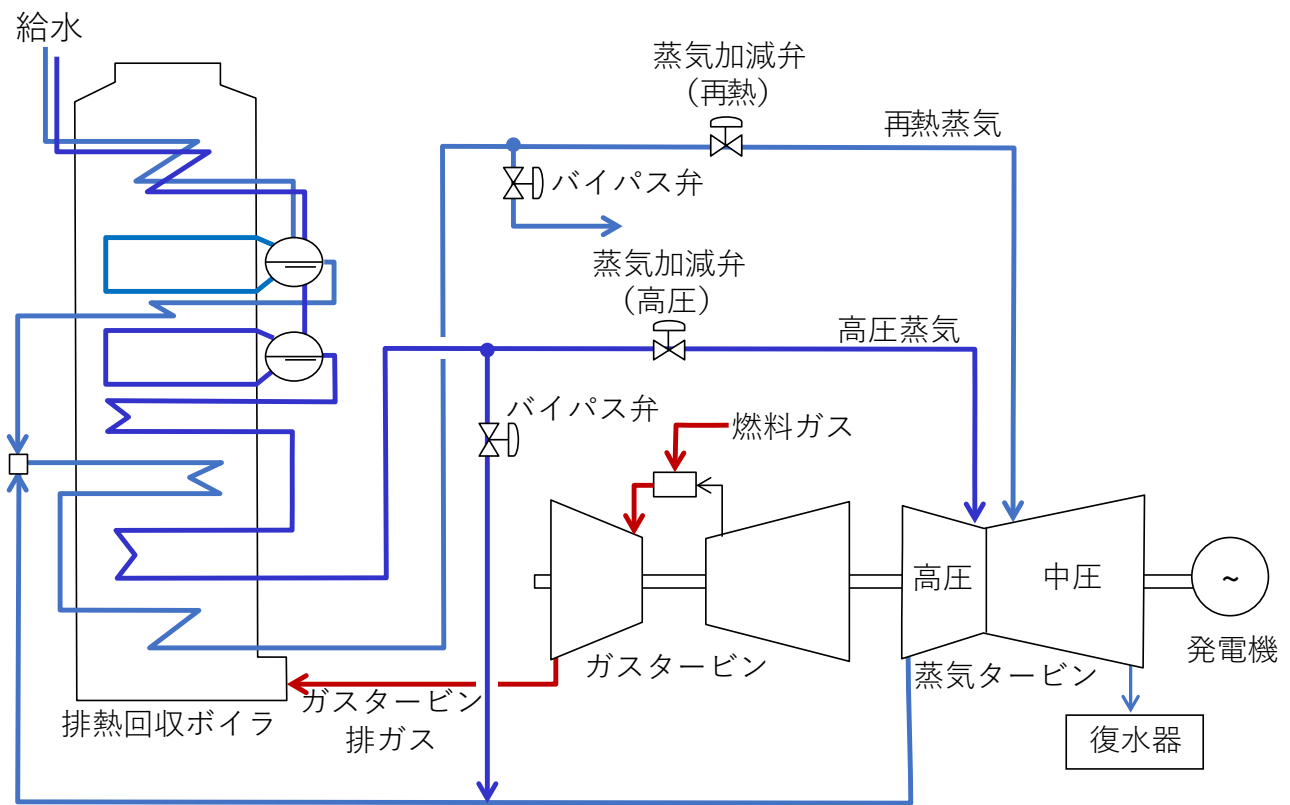


図 4.1 対象プラントの装置構成

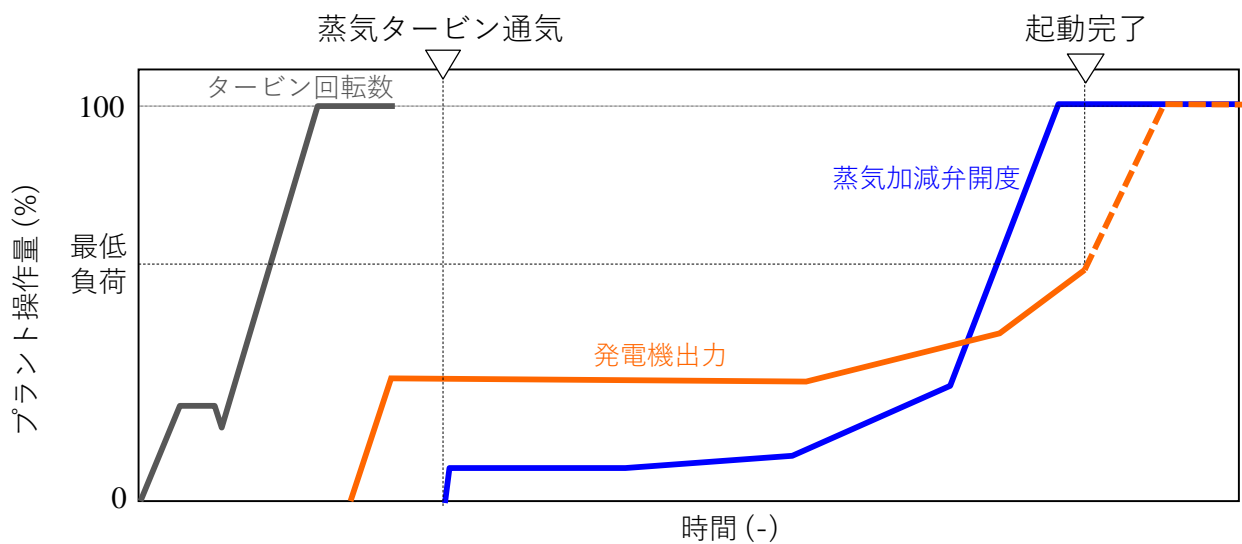


図 4.2 対象プラントの起動手順

4.2 起動曲線生成

4.2.1 動特性シミュレータの構築

第2章で説明した動特性シミュレータと同様、ガスタービン負荷や蒸気加減弁開度の時系列データを入力とし、排熱回収ボイラ出口の蒸気条件から蒸気タービン初段後における半径方向のロータ温度分布を計算するシミュレータを対象プラントの構成に合わせて構築した。構築したシミュレータの妥当性を評価するため、対象プラントの過去の計測値とシミュレーションの計算値を比較した。結果を図4.3に示す。図において縦軸の蒸気温度、蒸気流量、蒸気圧力はそれぞれの定格値で、蒸気タービン熱応力は制限値100%として示し、横軸の時間は蒸気タービンに通気してから起動完了までの時間を1として正規化している。

計算された蒸気温度、蒸気流量、蒸気圧力の応答はそれぞれ計測値とよく一致し、制約条件である蒸気タービンロータ熱応力のピーク値の差は1.8%であった。このことから、構築したシミュレータを対象プラントの起動曲線生成に適用可能であることを確認した。

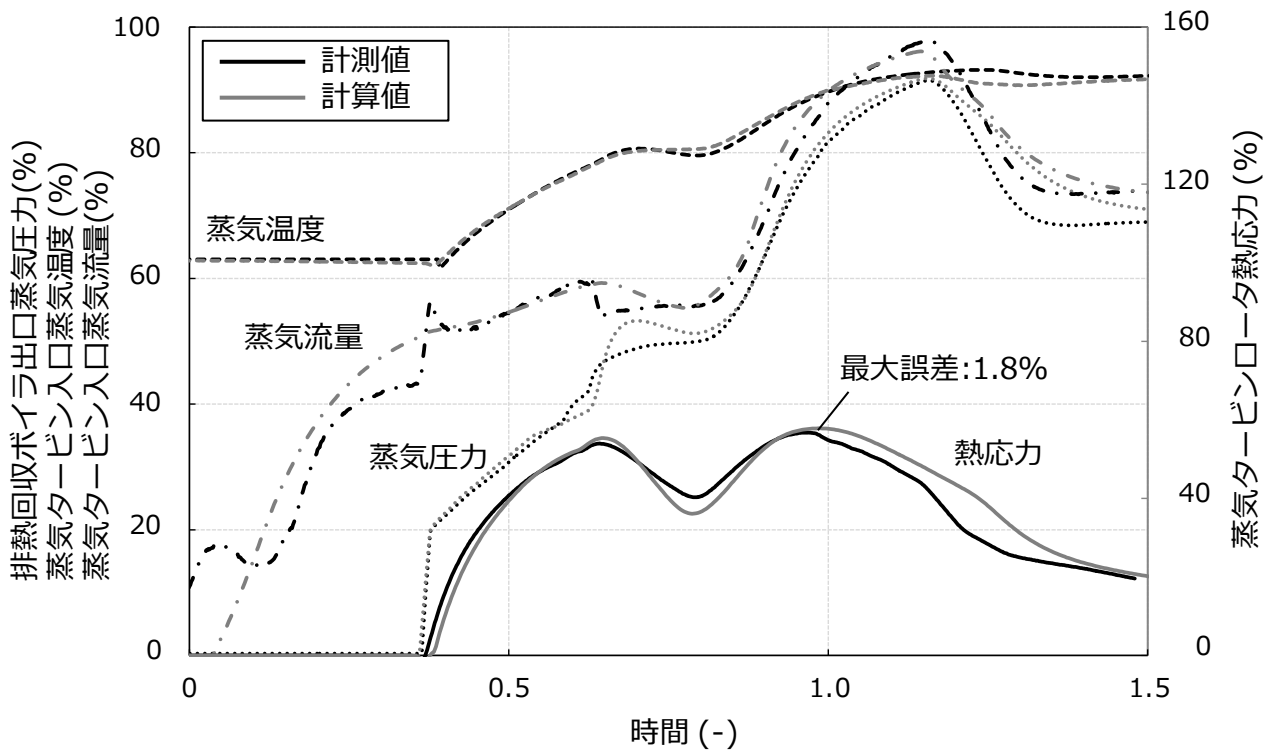


図 4.3 蒸気条件・蒸気タービンロータ熱応力の計算結果と計測値の比較

4.2.2 最適化条件

図 4.2 の起動曲線を発電機出力指令の変化率や保持時間、蒸気加減弁開度の開度レートや保持時間などにパラメータ化し、最適化する起動パラメータとする。実機試験向けに対象とする起動パラメータを表 4.2 に、そのパラメータの起動曲線中における割り当てを図 4.4 に示す。前述したように、本プラントでは最低負荷到達以降の出力は電力系統からの発電要求に従うこととなっている。そのため、最適化範囲は蒸気加減弁を開いて蒸気タービンに

表 4.2 最適化パラメータ

#	パラメータ	単位	範囲
1	発電機保持出力 1	%	(0-最低負荷)
2	発電機保持出力 2	%	(0-最低負荷)
3	発電機出力保持時間	min	(0-100)
4	発電機出力変化率 1	%/min	(0.01-仕様上限)
5	発電機出力変化率 2	%/min	(0.01-仕様上限)
6	蒸気加減弁開度レート 1	%/min	(0.01-仕様上限)
7	蒸気加減弁開度レート 2	%/min	(0.01-仕様上限)
8	蒸気加減弁開度レート 3	%/min	(0.01-仕様上限)
9	蒸気加減弁開度レート 4	%/min	(0.01-仕様上限)

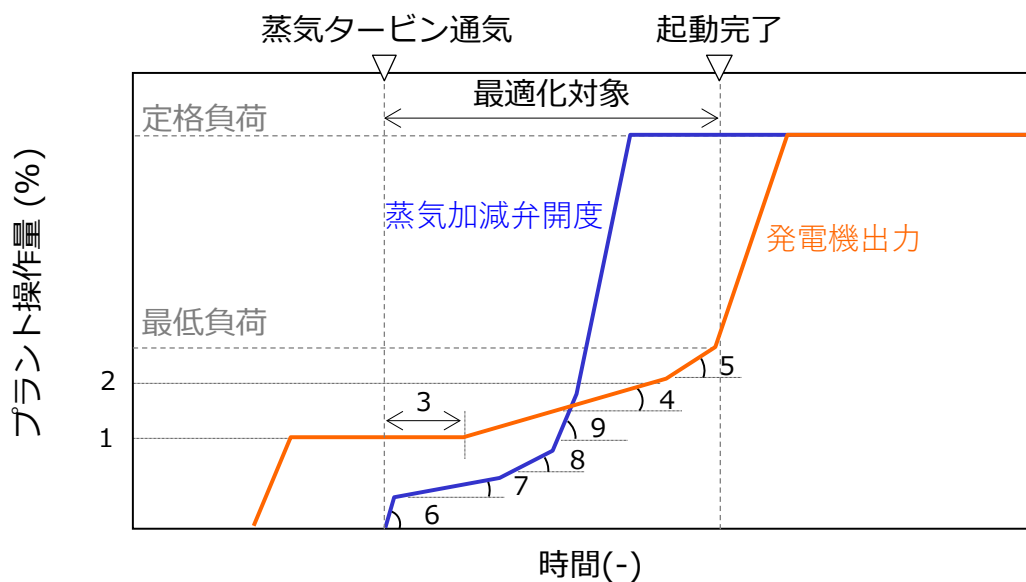


図 4.4 最適化する起動パラメータ

通気してから発電機の最低負荷到達、蒸気加減開度全開、バイパス弁全開の起動完了までとした。最適化計算に際して、最低負荷到達後の発電機出力指令は発生する熱応力を最も安全サイドで評価できるよう最大レートで上昇させるとした。また、表 4.2 および図 4.4 における蒸気加減弁は高圧蒸気加減弁を指し、中圧・低圧の蒸気加減開度指令はこの高圧蒸気加減開度指令から変換する関数を用いて指令値を計算するとした。

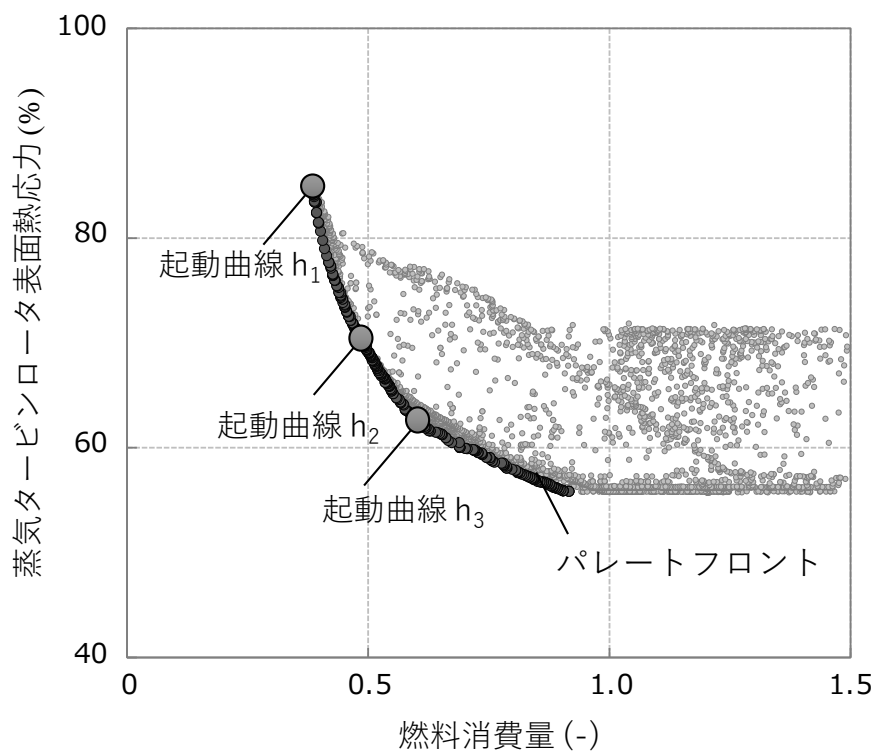
なお、本プラントでは顧客からの要望として起動における燃料消費量の削減を挙げられている。このため、目的関数にはプラントが機器の安全性を保障しつつ燃料消費量を削減した起動曲線を生成できるよう、燃料消費量と蒸気タービンロータ表面熱応力を最適化プログラムにおける目的関数として選定した。

4.2.3 最適化計算

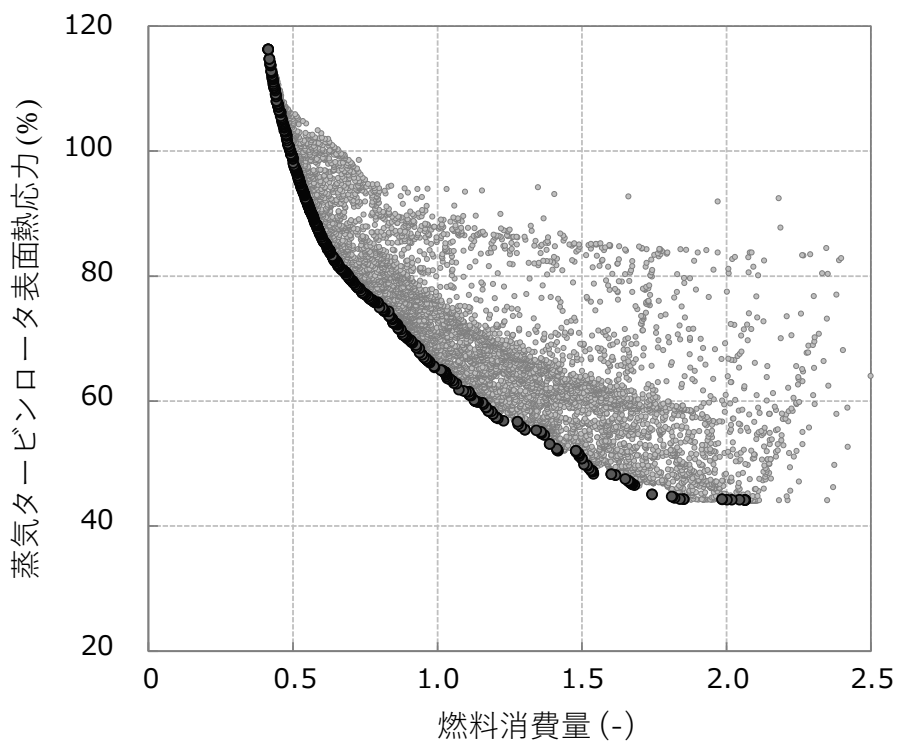
プラント停止後経過時間の異なる HOT 起動、WARM1 起動(低温)、WARM2 起動(高温)、COLD 起動の 4 ケースについて最適化計算を実施した。起動曲線群の生成結果を図 4.5 に示す。起動中の燃料消費量と蒸気タービンロータ熱応力のパレートフロント上に起動曲線を網羅的に生成できた。図中の横軸は過去のある運転実績における値を 1 として正規化し、縦軸は熱応力制限値を 100%として相対値で示した。図中のプロットは各点が 1 つの起動曲線を表す。図に示すパレートフロントは、最終 5 世代の個体について非優越ソートを再度適用し、最上位ランクの集合を抽出した。

また、この最適化計算では、最適化対象を図 4.4 に示すように蒸気タービン通気から、発電機出力の最低負荷到達を含む起動完了までとしている。このため、発電機が最低負荷に到達してからのガスタービンが定格負荷に到達するまでは最適化範囲に入っておらず第 3 章で示したようなガスタービン負荷先行起動による起動曲線は存在せず、図 4.5 のパレートフロント上の起動曲線は、全て蒸気加減弁先行起動の傾向を示すものとなっている。

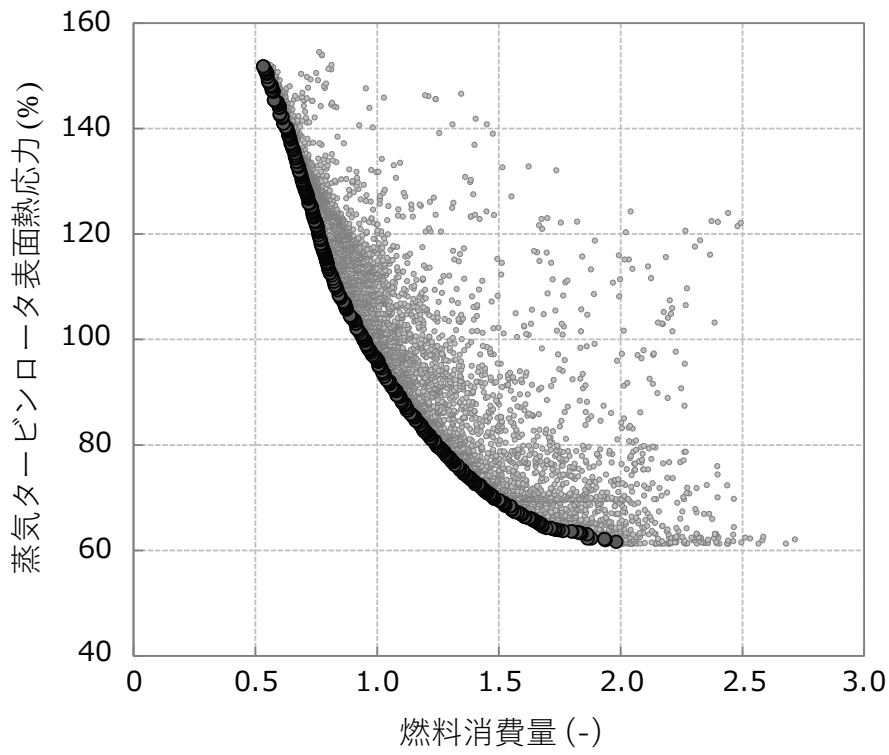
このように、生成された起動曲線における発電機出力や蒸気加減弁開度などのプラント操作量の制御動作を評価するため、例として図 4.5(a)における HOT 起動のパレートフロント上から選定した起動曲線 h_1 、起動曲線 h_2 、起動曲線 h_3 と蒸気タービンロータ熱応力の関係を図 4.6 に、図 4.5(d)における COLD 起動のパレートフロント上から選定した起動曲線 c_1 、起動曲線 c_2 、起動曲線 c_3 の熱応力との関係を図 4.7 に示す。



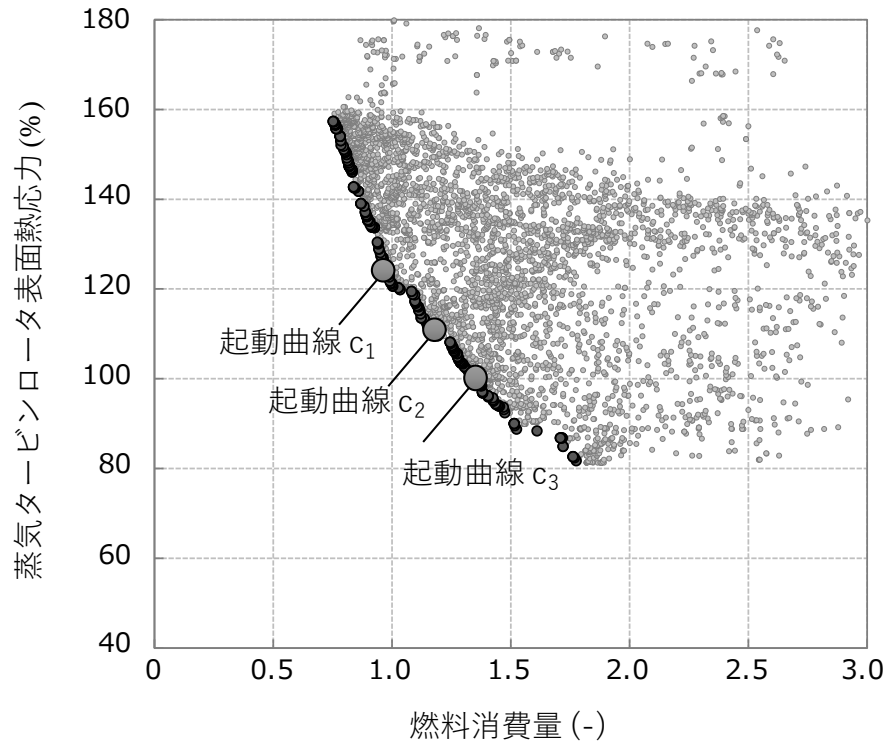
(a) HOT 起動



(b) WARM2 起動

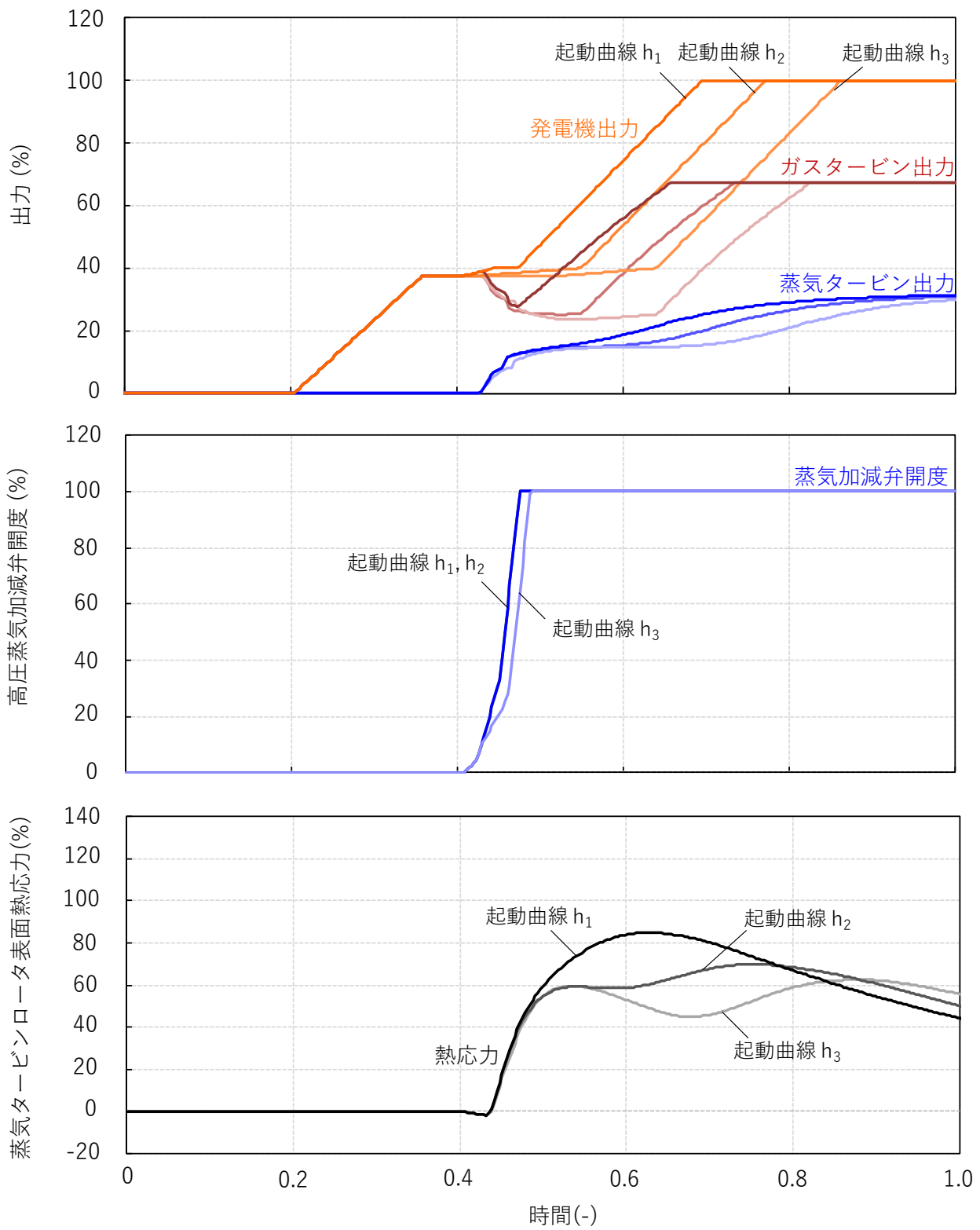


(c) WARM1 起動

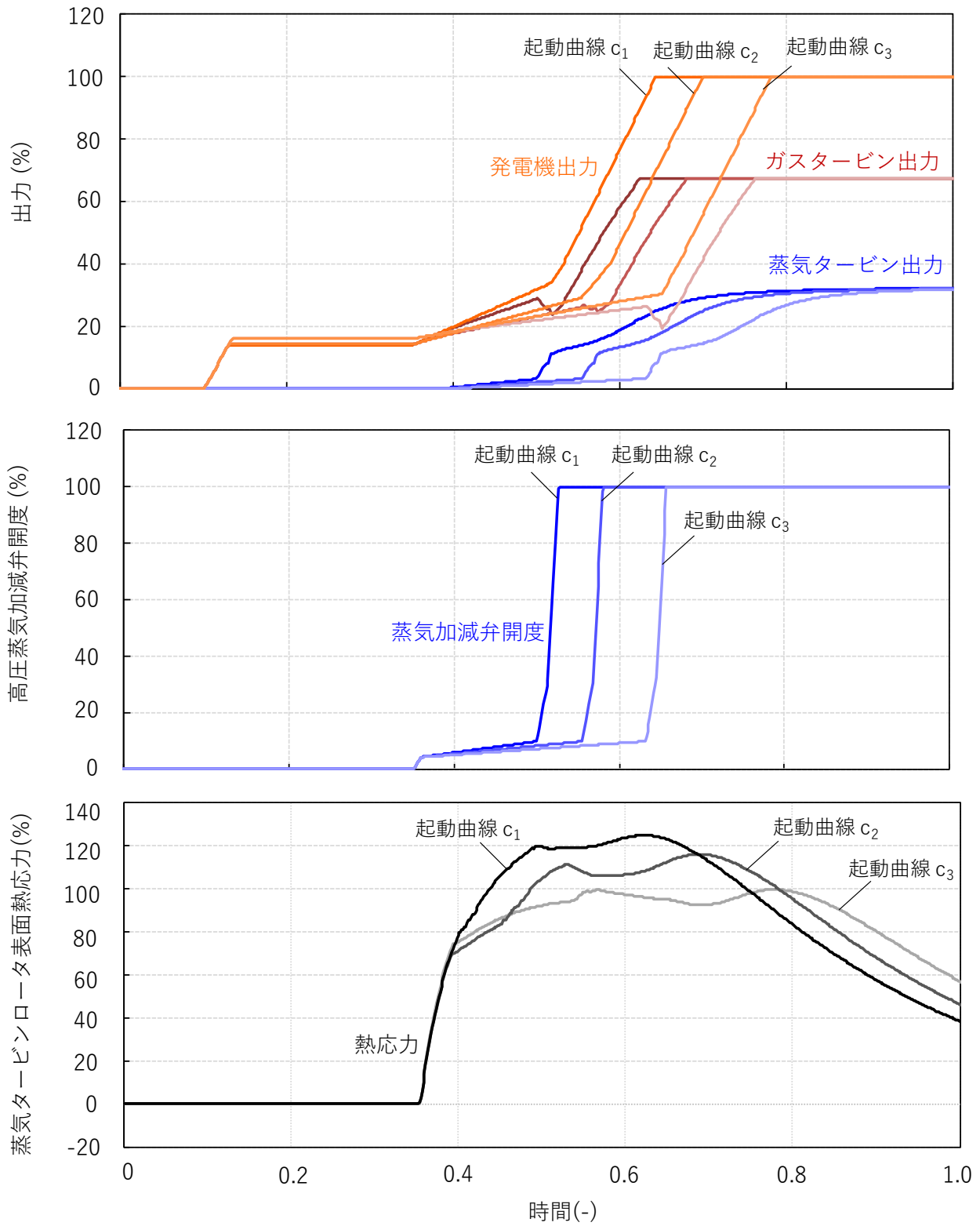


(d) COLD 起動

図 4.5 燃料消費量削減のための起動曲線生成結果



(a) HOT 起動



(b) COLD 起動

図 4.6 生成起動曲線

図 4.6 において横軸はそれぞれの起動モードにおける過去の運転実績のガスタービン点火から起動完了までの時間を 1.0 として正規化した。また、縦軸において、上段は発電機出力の定格値を、中段は蒸気加減弁開度の定格値を、下段は熱応力の制限値をそれぞれ 100% として示した。図 4.6(a), (b) それぞれの起動曲線 h_1 や起動曲線 c_1 では、軸出力や蒸気加減弁開度の変化率を高く設定することで、それぞれ 3 つの起動曲線のうち最も起動時間が短縮されている。起動時間を短縮することで、起動に要する燃料消費量が低減された。また、前述したように本プラントでは軸出力に指令値を与え、この指令値を満足するよう蒸気タービン出力の応答遅れをガスタービン出力が補償する。蒸気加減弁開度の変化率を高めて蒸気タービン出力の割合を増加させることで、軸出力の中に占めるガスタービン出力の割合を低減することでも燃料消費量の削減が図られていることが分かる。

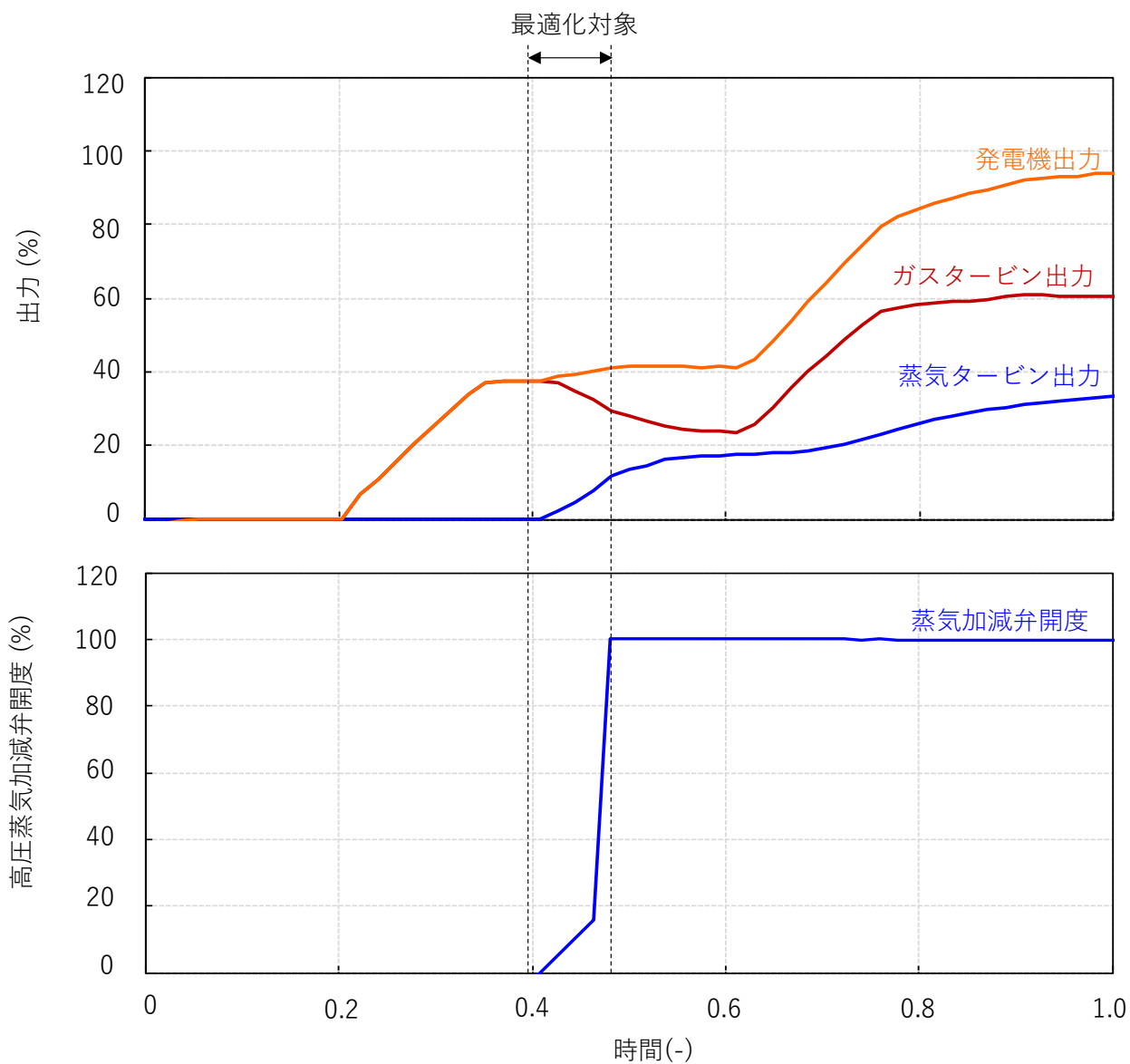
起動曲線 h_3 、起動曲線 c_3 では、軸出力や蒸気加減弁開度の変化率が緩くなり起動時間は長くなるものの、蒸気タービンの通気による熱応力上昇と、その後のガスタービン負荷上昇による熱応力上昇のタイミングを離して、熱応力発生のピークを 2 つに分割することで、ピーク値の低減が図られている。起動曲線 h_2 、起動曲線 c_2 ではそれぞれ、起動曲線 h_1 と起動曲線 h_3 および起動曲線 c_1 、起動曲線 c_3 のそれぞれ中間的な特徴を示している。このように、燃料消費量と熱応力のトレードオフ関係を最適化する起動曲線がパレートフロント上に生成されており、生成された起動曲線の妥当性が確認できた。

4.3 試験結果

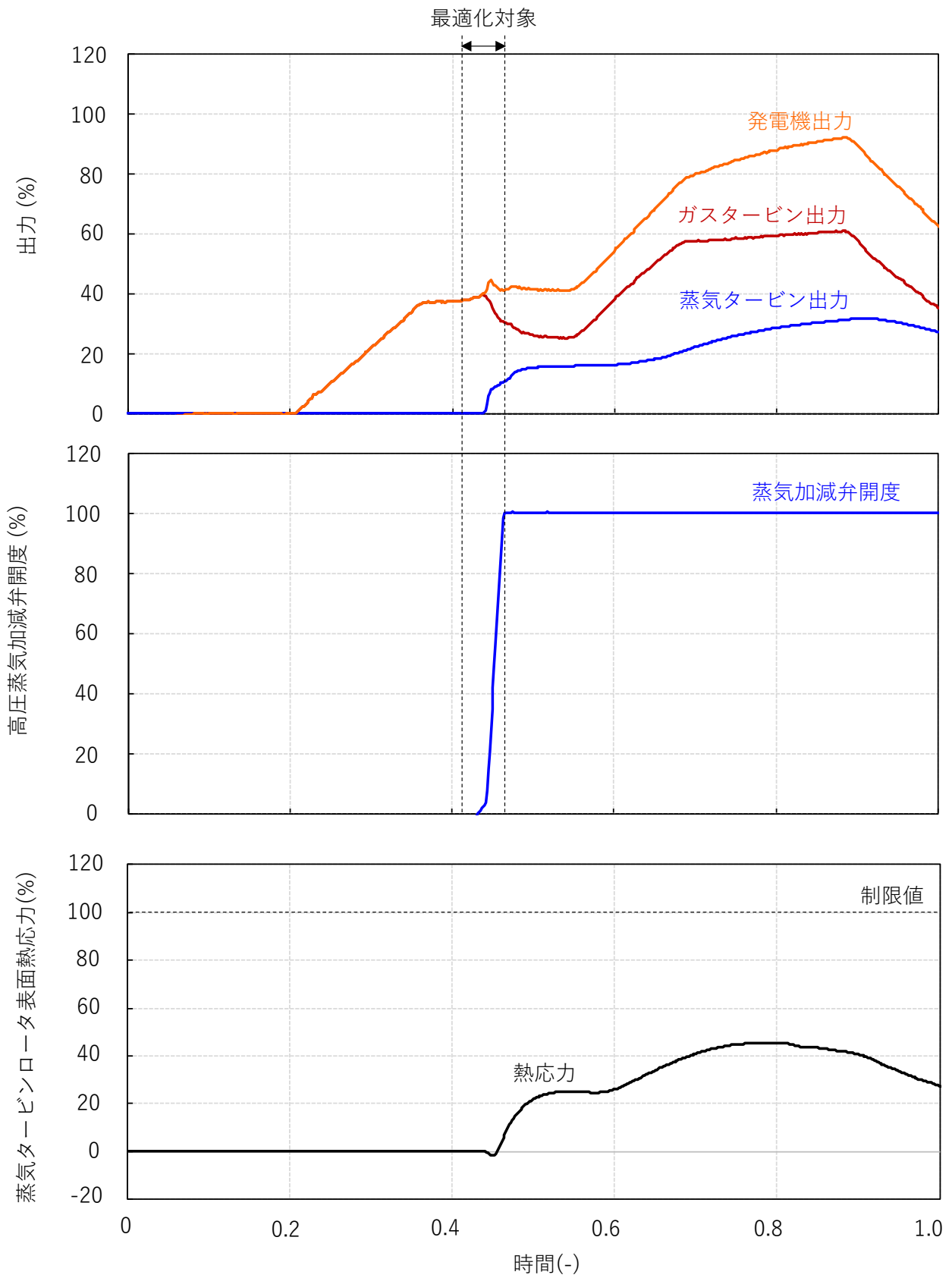
生成された起動曲線による起動改善効果を確認するため、商用プラントにおいて適用試験を実施した。試験から直近 2 ヶ月以内の過去の HOT 起動運転実績と、図 4.6 (a) における起動曲線 h_1 を適用した結果の比較を図 4.7 に示す。本図における過去の運転実績は、起動時間短縮および燃料消費量削減が顧客サイドにおいて独自に取り組みされた起動曲線を使用しており、図 4.5 や図 4.6 の燃料消費量の参考値に使用したのとは別の起動となっている。

図 4.7 より、最適化適用の対象範囲において、過去の運転実績と比較して軸出力や蒸気加減弁の変化率を上昇させたことで起動時間が短縮できていることが分かる。また蒸気加減弁の変化率を上昇させたことで蒸気タービン出力の立ち上がりが早くなり、過去の運転実績と比較して蒸気タービン通気後のガスタービン出力の低下速度が増加された。このよ

うに事前の目論みどおりガスタービン出力と蒸気タービン出力が動作したことを確認できた。また、熱応力は制限値に十分余裕があることから、ガスタービン負荷変化率の上限の見直しなどにより、さらなる起動時間の短縮および燃料消費量の削減を見込む。



(a) 過去の運転実績



(b) 試験結果

図 4.7 過去の運転実績と試験起動の結果

図 4.7 の過去の運転実績と今回に試験における燃料消費量の比較を図 4.8 に示す。図において濃いグレーの部分が発電機が電力系統に並列してから蒸気タービン通気まで、薄いグレーが今回の最適化対象である蒸気タービンに通気してから起動完了までに要した燃料消費量である。このうち濃いグレーの蒸気タービン通気までに要する燃料消費量は初期メタル温度などの起動の初期条件に依存するため、図 4.7(a)の過去の運転実績における燃料消費量を共通で用いた。本試験において、前述したように起動時間の短縮や、蒸気タービン負荷の早期立ち上げによるガスタービン負荷の低減により、起動に要する燃料消費量を 22.8%削減する効果を得た。今後プラント制約を考慮したうえで適用範囲・最適化対象を広げることで、さらなる起動改善効果を得られる見通しである。

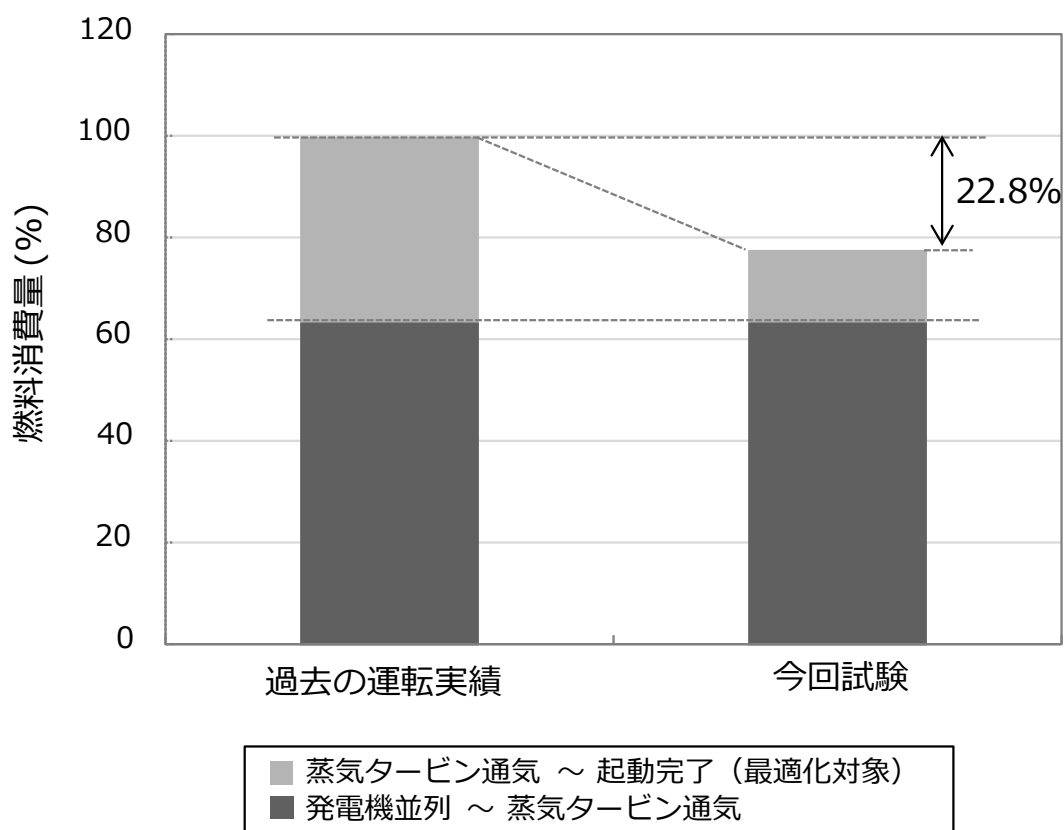


図 4.8 起動試験における燃料消費量削減効果

4.4 結言

第3章で開発した起動曲線の最適化技術による起動プロセスの運用改善効果を検証するため、欧州の商用プラントにて起動試験を実施した。まず、対象プラントの構成や起動制御方式に合わせて動特性シミュレータを構築し、精度検証した。シミュレータにより計算された蒸気温度、蒸気流量、蒸気圧力の応答はそれぞれ計測値とよく一致し、制約条件である蒸気タービンロータ熱応力のピーク値の差は1.8%であったことから、構築シミュレータを対象プラントの起動曲線生成に適用可能であることを確認した。

次に、最適化する起動パラメータを選定し、顧客要望である起動時の燃料消費量の低減を目的関数として起動曲線を生成した。生成した起動曲線を対象プラントに適用した結果、過去の運転実績と比較して軸出力や蒸気加減弁の変化率を上昇させたことで起動時間が短縮した。また蒸気タービン出力上昇が早められ、蒸気タービン通気後のガスタービン出力の低下速度が増加した。これら起動時間の短縮とガスタービン負荷の低減により、過去の運転実績と比較して起動に要する燃料消費量を22.8%削減する効果を得た。このことから、開発した最適化技術を用いて生成した起動曲線の有効性を確認できた。

5. モードレス起動技術の開発

5.1 起動コンセプト

従来の起動制御では HОT 起動、WARM 起動、COLD 起動などのように起動開始時の構造体の代表温度(初期メタル温度)に応じて起動モードをいくつか分割しておき、蒸気タービンロータ熱応力などの各種制限値の超過がないよう予め策定された起動曲線に基づき各起動モード内では同一の起動をしていた。このため、同一起動モード内におけるメタル温度が高い領域では制限値に対して余裕が生じることとなり、起動時間短縮には限界があった。一方、既往の研究や第2章で開発した対象機器のモデリングに基づくリアルタイム制御は、起動中の計測データに基づき逐次的にプラント操作量を計算するものであり、構造体の温度分布などプラントの状態に応じて高速で起動制御できるものの起動時間が予め定まらず、電力系統からの発電要求に対して正確な起動開始時間の逆算が困難であるという課題があった。

このため、本研究では第3章、第4章において開発した最適化手法の有効性が確認できたことから、この手法を拡張して初期メタル温度に応じて起動時間が連続的に変化するようにするような起動曲線を生成する(図5.1)。これにより、従来の起動モードを排して(モードレス起動)プラントの高速起動を可能とする。

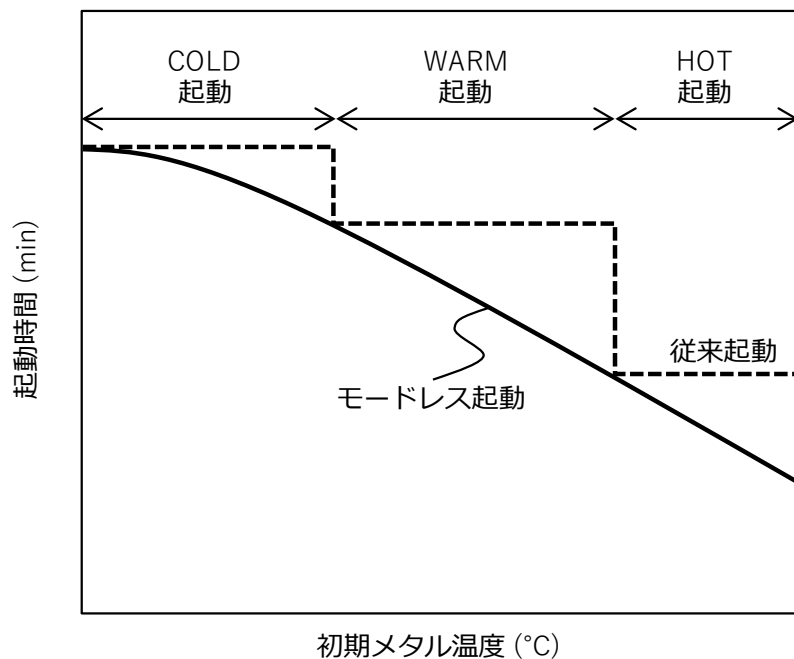


図5.1 モードレス起動のコンセプト

5.2 モードレス起動曲線の生成方法

5.2.1 起動曲線生成システム

モードレス起動のための起動曲線生成システムの構成図を図5.2に示す。本構成図は、第3章の図3.1で説明した目的関数に基づき起動パラメータの最適値を探索する最適化プログラムと、探索された起動パラメータによる起動曲線のプロセス値を計算する動特性シミュレータに加え、探索された多数の起動パラメータ値の候補を統計処理して最適な起動パラメータ値を推定するパラメータ推定器を備えた構成とする。

本研究では、図5.1に示すモードレス起動を示す起動曲線群を得るために、目的関数として初期メタル温度と起動時間を採用する。最適化問題の目的関数には設計変数の変更などによって調整可能である製品性能のような指標が採用されるのが一般的である。本研究では、計算された解から隣り合う距離の近いものを排除することで多様性を維持して広範囲に広がる解を得るNSGA-IIの特性を利用して、起動時間を最小化する起動曲線を初期メタル温度に応じて網羅的に探索することを狙い、外部環境であり本来アンコントローラブルな初期メタル温度を、目的関数と最適化パラメータの双方に採用することとした。また、プラントの起動においては守るべき制約条件があるため、この制約条件の逸脱をペナルティとして、起動時間に加算することとした。

最適化プログラムと動特性シミュレータでは、第3章、第4章と同様に起動パラメータの探索と目的関数評価を繰り返すことで最適な起動曲線を得るための起動パラメータの組み合わせを生成する。パラメータ推定部では、最適化プログラムで生成された多数の起動パラメータ値の候補を統計処理して最適な起動パラメータ値を推定することで、初期メタル温度に応じたパラメータ線図を作成する。このパラメータ値の推定には、パラメータの真値が存在する範囲とその確率を学習するベイズ推定を用いた。パラメータの存在確率を分布で推定することで、パラメータ値の確からしさをユーザが確認できるとともに、起動曲線の微調整が必要となった場合にその存在確率の範囲でユーザが起動パラメータ値を任意に調整することができる。

こうして得られたパラメータ線図を参照して起動のたびに各パラメータ値を選定することで、初期メタル温度に応じて最適化された起動曲線を構築する。

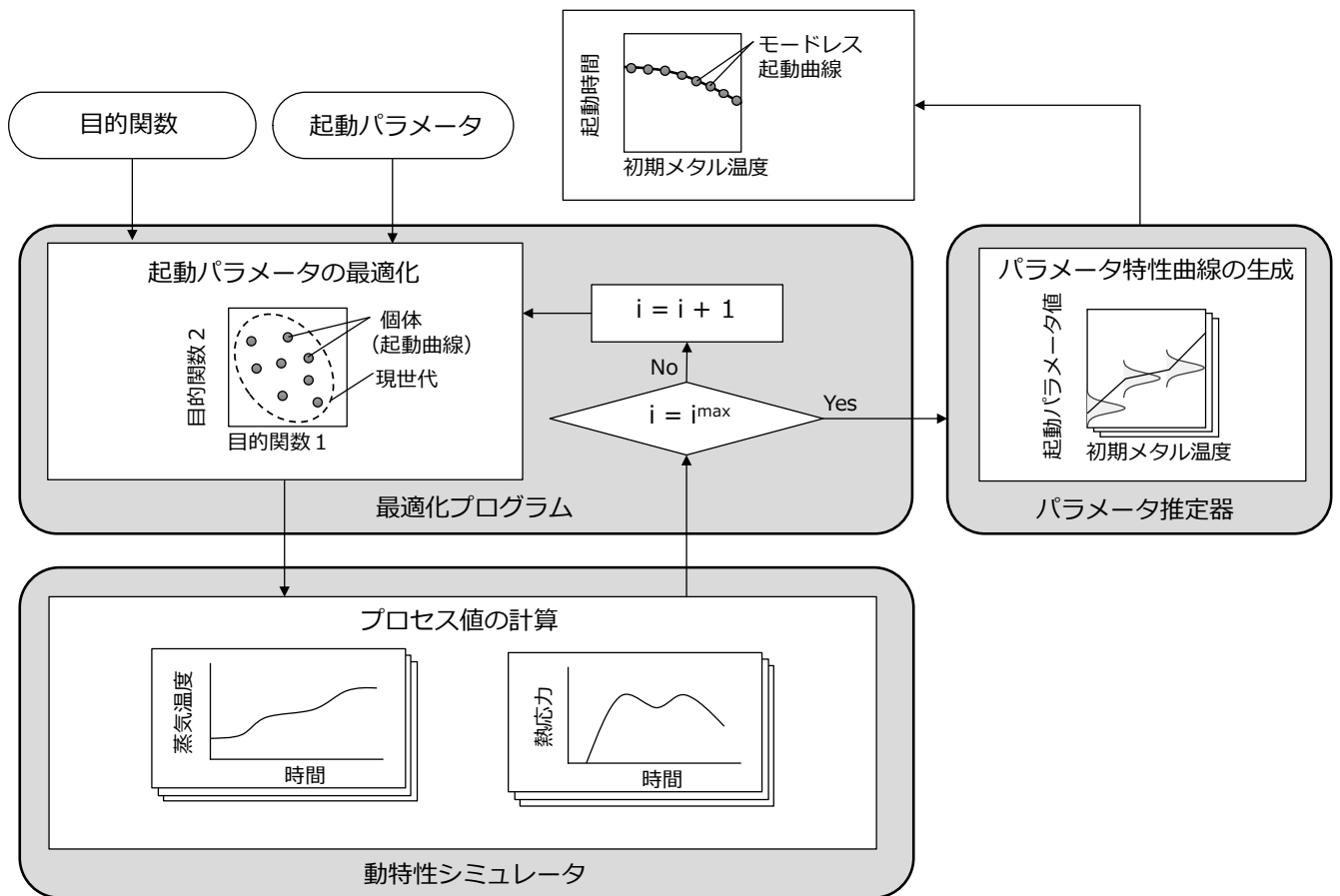


図 5.2 起動曲線生成システム

5.2.2 最適化プログラム

最適化プログラムでは、定義した複数の目的関数のうち少なくともどちらか一方の値が小さくなるような起動パラメータを探索する。最適化手順は第3章における図3.3と同様とする。目的関数は、図5.1のモードレス起動の関係を示す起動曲線群の生成を目的に、式(5.1), (5.2)に示すように初期メタル温度 T_{ini} と起動時間 t_{start} とする。また、本報告では守るべき制約条件として蒸気タービンロータの熱応力に着目し、この制限値超過の場合にはペナルティとして定数を目的関数 f_2 に加算することで、制限値超過のない起動曲線を生成する。ここで、 σ_{peak} は起動過程で発生した熱応力のピーク値、 σ_{lim} は熱応力の制限値を示している。

$$f_1 = T_{init} \tag{5.1}$$

$$f_2 = \begin{cases} t_{start}, & \text{if } \sigma_{peak} \leq \sigma_{lim} \\ t_{start} + penalty, & \text{Otherwise,} \end{cases} \tag{5.2}$$

この熱応力制限値は従来のHOT起動、WARM起動、COLD起動などのモード別起動では各モード内で一律であったが、モードレス起動で起動時間をより短縮するには制限値も初期メタル温度に応じて可変として設定されることが望ましい。本研究では図5.3に示すように従来のCOLD起動における制限値とHOT起動における制限値を線形補完することで、モードレス起動向けの制限値を暫定的に設定した。実運用の際にはプラント耐用年数と年間の起動計画による初期メタル温度に応じた寿命消費量の割り振りによりプラントごとに決定する。なお、本図において横軸は初期メタル温度の取り得る最小値から最大値までの範囲を100%として示した。例えば、初期メタル温度0%とはメタルが完全に放熱した大気温度の値であるし、100%は蒸気タービン初段後ロータの定格値である。

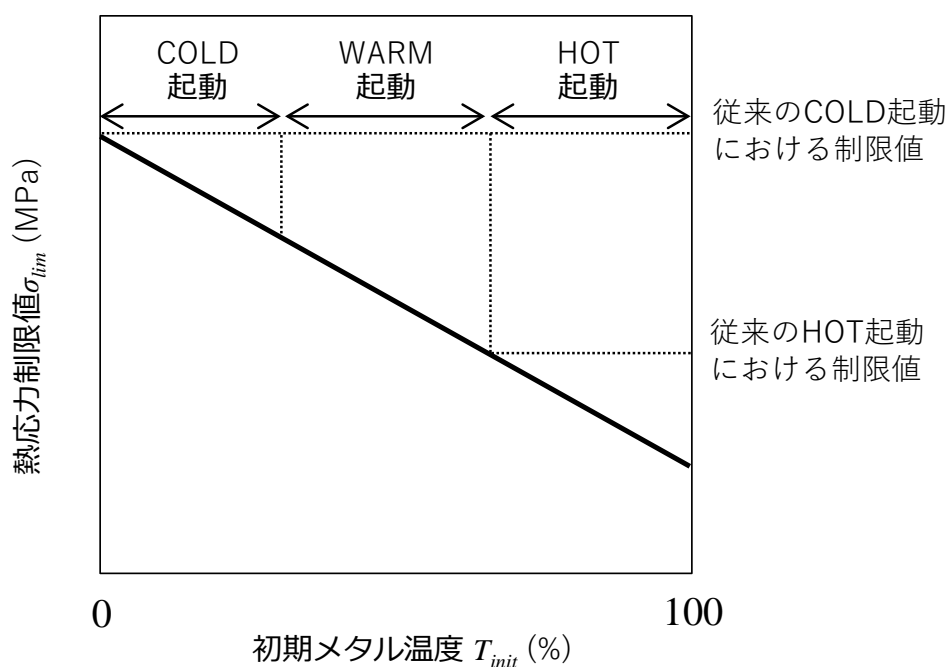


図5.3 モードレス起動向け熱応力制限値の設定

本章で対象とするプラントは、第4章と同じく起動曲線を適用した一軸式の商用プラントとする。最適化する起動パラメータを図5.4に示す。発電機出力と蒸気加減弁開度に関する起動曲線を変化率や保持時間などにパラメータ化し、目的関数を最小化するようなこれらの値やその組み合わせを探索する。第4章では最適化範囲を、実機の運用に合わせて蒸気タービン通気後から発電機出力の最適負荷到達までとしたが、本章では機能検証のため定格出力到達までとし、最低出力から定格出力到達までの出力変化率も最適化する起動パラメータに含めた。このため、本章では起動完了条件も発電機出力および蒸気加減弁開度がともに定格

値に到達とする。

また、蒸気加減弁が開く前の発電機保持出力 $1(pw_1h)$ は、ガスタービンのみで発電される。この時のガスタービン負荷は、蒸気タービンの通気条件を満足する蒸気温度を得るためのガスタービン排ガス条件から逆算で求まる。このため、この発電機保持出力 $1(pw_1h)$ については、図 5.5 に示すような初期メタル温度に応じたルックアップテーブルを作成し、最適化に要する計算コストを低減するために対象外とした。なお、ガスタービンには電力系統に並列時にとる初負荷が存在し、これが図 5.5 のテーブル中における下限値となる。

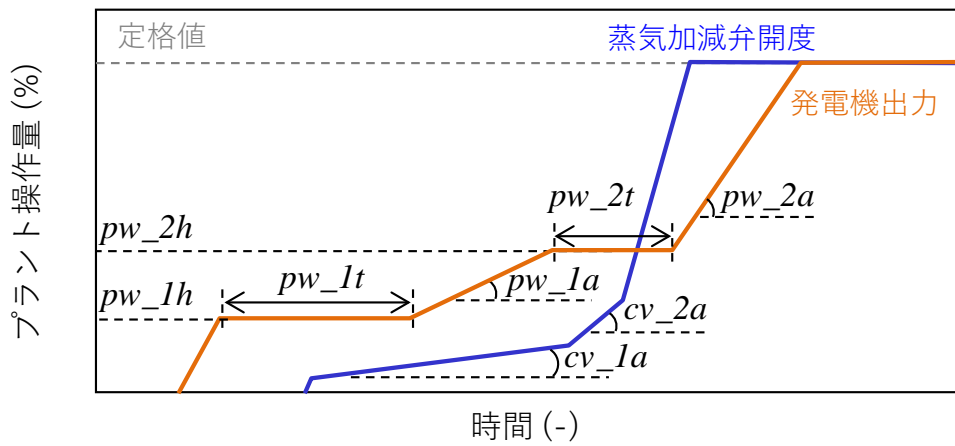


図 5.4 最適化対象となる起動パラメータ

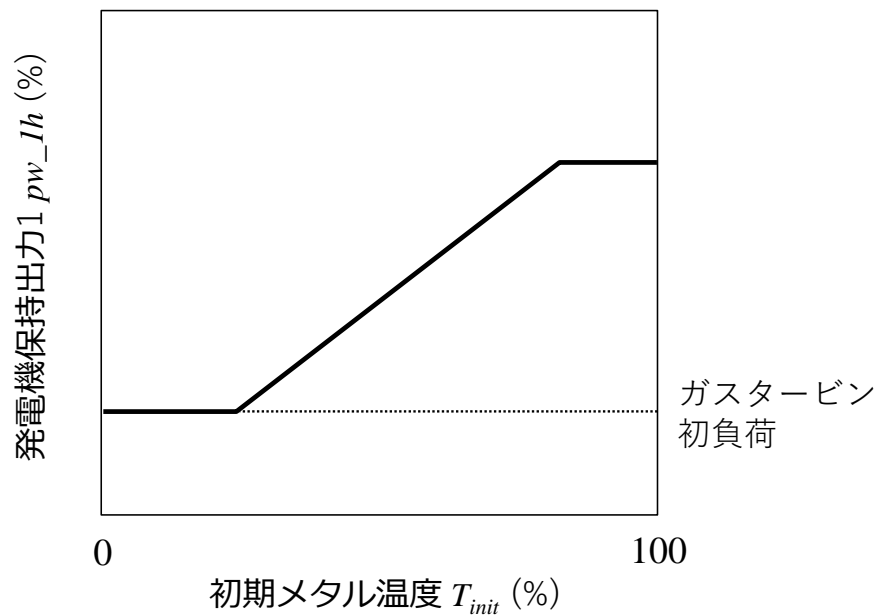


図 5.5 発電機保持出力 $1(pw_1h)$ 用ルックアップテーブルの例

初期メタル温度に応じたモードレス起動曲線の生成に向けて、最適化する起動パラメータ（発電機保持出力 pw_2h 、発電機出力保持時間 pw_1t, pw_2t 、発電機出力変化率 pw_1a, pw_2a 、蒸気加減弁開度レート cv_1a, cv_2a ）について初期メタル温度に応じたパラメータ線図となるルックアップテーブルを作成する。本研究では、図5.6に示すように、取りえる初期メタル温度の領域を3分割し、図5.4に示す各起動パラメータについて $T_{ini_1}, T_{ini_2}, T_{ini_3}, T_{ini_4}$ における値を最適化プログラムにより探索することとする。ここで、初期メタル温度の最低値である T_{ini_1} は大気温度、最大値である T_{ini_4} は定格温度とした。さらに本手法では、前述したように探索する最適化パラメータに初期メタル温度を追加し、初期メタル温度に応じた起動パラメータの値やその最適な組み合わせを探索する。対象とする最適化パラメータの一覧と、パラメータ線図上で対応する初期メタル温度を表5.1に示す。このように、探索したパラメータ線図を起動のたびに参照して起動パラメータ値を得ることで、初期メタル温度に応じて最適な起動と事前の起動スケジュールを得ることを可能とする。

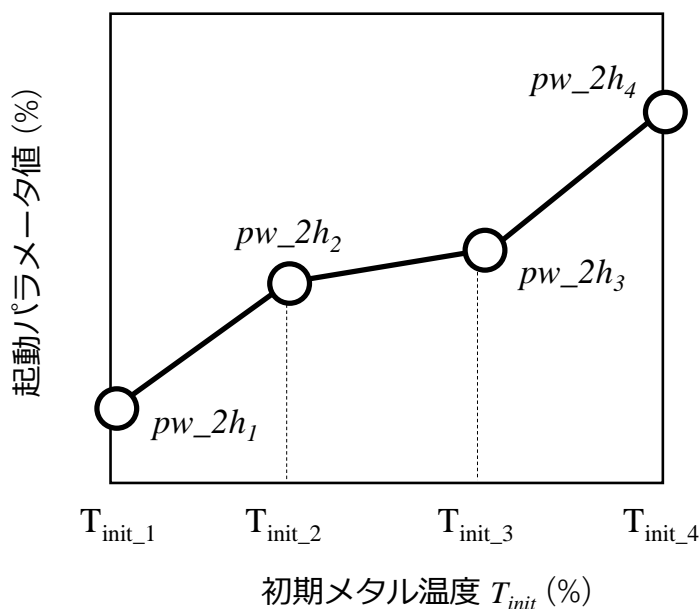


図5.6 パラメータ線図

表5.1 最適化パラメータ

#	パラメータ	説明	パラメータ線図における初期メタル温度	単位	範囲
1	pw_2h_1	発電機保持出力 2	T_{init_1}	%	(0-最低出力)
2	pw_2h_2	発電機保持出力 2	T_{init_2}	%	(0-最低出力)
3	pw_2h_3	発電機保持出力 2	T_{init_3}	%	(0-最低出力)
4	pw_2h_4	発電機保持出力 2	T_{init_4}	%	(0-最低出力)
5	pw_1t_1	発電機出力保持時間 1	T_{init_1}	min	(0-60)
6	pw_1t_2	発電機出力保持時間 1	T_{init_2}	min	(0-60)
7	pw_1t_3	発電機出力保持時間 1	T_{init_3}	min	(0-60)
8	pw_1t_4	発電機出力保持時間 1	T_{init_4}	min	(0-60)
9	pw_2t_1	発電機出力保持時間 2	T_{init_1}	min	(0-60)
10	pw_2t_2	発電機出力保持時間 2	T_{init_2}	min	(0-60)
11	pw_2t_3	発電機出力保持時間 2	T_{init_3}	min	(0-60)
12	pw_2t_4	発電機出力保持時間 2	T_{init_4}	min	(0-60)
13	pw_1a_1	発電機出力変化率 1	T_{init_1}	%/min	(0.01-仕様上限)
14	pw_1a_2	発電機出力変化率 1	T_{init_2}	%/min	(0.01-仕様上限)
15	pw_1a_3	発電機出力変化率 1	T_{init_3}	%/min	(0.01-仕様上限)
16	pw_1a_4	発電機出力変化率 1	T_{init_4}	%/min	(0.01-仕様上限)
17	pw_2a_1	発電機出力変化率 2	T_{init_1}	%/min	(0.01-仕様上限)
18	pw_2a_2	発電機出力変化率 2	T_{init_2}	%/min	(0.01-仕様上限)
19	pw_2a_3	発電機出力変化率 2	T_{init_3}	%/min	(0.01-仕様上限)
20	pw_2a_4	発電機出力変化率 2	T_{init_4}	%/min	(0.01-仕様上限)
21	cv_1a_1	蒸気加減弁開度レート 1	T_{init_1}	%/min	(0.01-仕様上限)
22	cv_1a_2	蒸気加減弁開度レート 1	T_{init_2}	%/min	(0.01-仕様上限)
23	cv_1a_3	蒸気加減弁開度レート 1	T_{init_3}	%/min	(0.01-仕様上限)
24	cv_1a_4	蒸気加減弁開度レート 1	T_{init_4}	%/min	(0.01-仕様上限)
25	cv_2a_1	蒸気加減弁開度レート 2	T_{init_1}	%/min	(0.01-仕様上限)
26	cv_2a_2	蒸気加減弁開度レート 2	T_{init_2}	%/min	(0.01-仕様上限)
27	cv_2a_3	蒸気加減弁開度レート 2	T_{init_3}	%/min	(0.01-仕様上限)
28	cv_2a_4	蒸気加減弁開度レート 2	T_{init_4}	%/min	(0.01-仕様上限)
29	T_{init}	初期メタル温度	-	%	(0-100)

5.2.3 動特性シミュレータ

対象プラントは第4章と同様とし、図4.1の一軸式コンバインドサイクル向けに構築したシミュレータを流用する。動特性シミュレータで起動プロセスや目的関数の値を計算するに際し、前項の最適化プログラムで生成された起動パラメータに基づき、起動曲線を構築する。構築方法を図5.7に示す。最適化プログラムで生成された1個体における起動パラメータ(#1-28)に基づきパラメータ線図を作成する。これに、個体中の初期メタル温度(#29)を入力として、パラメータ線図の線形補間によって発電機保持出力や保持時間、出力変化率などの起動パラメータ値を計算する。この計算されたパラメータ値を起動曲線に当てはめることで、起動曲線を構築する。構築された起動曲線に対する目的関数の値を計算し、最適化プログラムに返す。

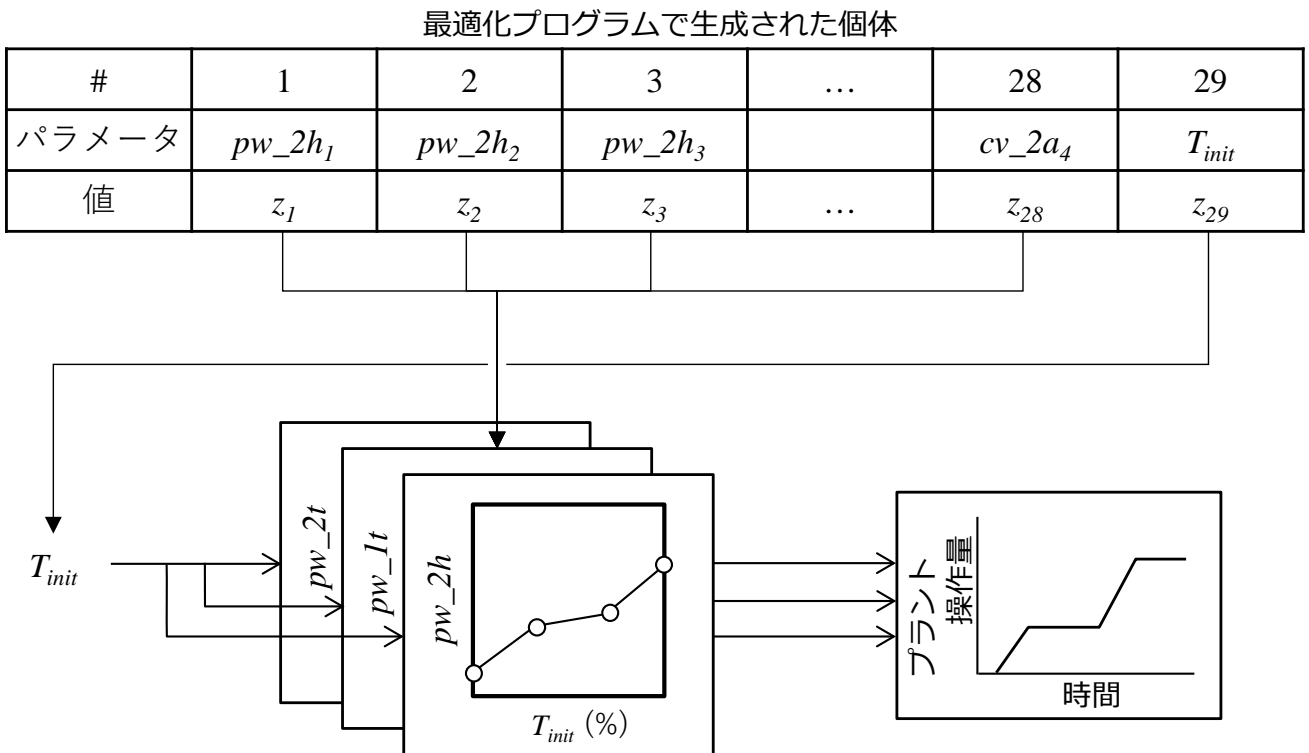


図 5.7 パラメータ線図に基づく起動曲線構築方法

5.2.4 パラメータ推定器

最適化プログラムから得られた多数の起動パラメータ値の候補を統計処理することで、パラメータ線図に使用する値を決定する。この統計処理手法には、パラメータを確率変数とみなして、パラメータの値の確信度を確率密度分布によって表現することを特徴とする

ベイズ推定を用いた[30]。ベイズ推定では未知のパラメータ集合に関する事前分布が、データ入手後にどのような事後分布 $P(\theta|D)$ に変化するかを計算する。ベイズの定理に従えば、推定するパラメータ値 θ の条件付き確率は次のように表現できる[31]。

$$P(\theta|D) = \frac{P(D|\theta)P(\theta)}{P(D)} \quad (5.3)$$

ここで、 D は最適化プログラムから生成される起動パラメータ値の候補、 $P(\theta|D)$ は事後確率分布、 $P(\theta)$ は事前確率分布、 $P(D|\theta)$ は尤度関数、 $P(D)$ は証拠である。

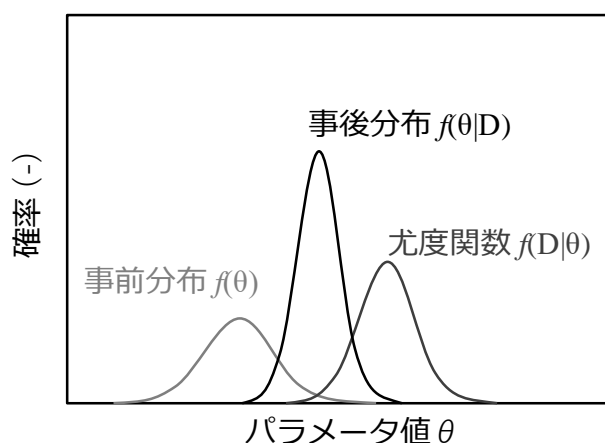


図5.8 ベイズ推定によるパラメータ確率分布の更新方法

本報告では、事前分布の平均値には既設の対象プラントに実装されている起動曲線のパラメータを用い、分布形状は簡単のため式(5.4)に示すように正規分布とした。

$$P(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2}} \exp\left(-\frac{(\theta - \mu)^2}{2s^2}\right) \quad (5.4)$$

尤度関数は観測データ(学習データ)の存在確率である。本研究で対象とする観測データ D である起動パラメータ値は、第3章で説明したように最適化プログラムの進化計算において親世代の個体の値に基づく確率分布からSBX法によって計算する。このため、SBX法における定義式を式(5.5)–(5.7)に示すように変形し、尤度関数の分布形状に用いた。

$$P(D|\theta) = \begin{cases} 1 - \beta_1, & \text{if } \beta_1 \leq 0.5, \\ 1 - \beta_2 & \text{Otherwise,} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\alpha = \left(\frac{2|D - \theta|}{\Delta\theta} \right)^{\eta+1} \quad (5.6)$$

$$\beta_1 = 2^\eta \alpha, \quad \beta_2 = \frac{2^{\eta+1} \alpha - 0.5}{2^{\eta+1} \alpha}, \quad (5.7)$$

ここで、 $\Delta\theta$ は分布の分散に関するパラメータ、 η は非負の分布パラメータであり値を小さくするほど分布の裾野が広がる。これら式(5.5)により計算される尤度関数 $P(D|\theta)$ は図5.9に示すような確率分布となる。

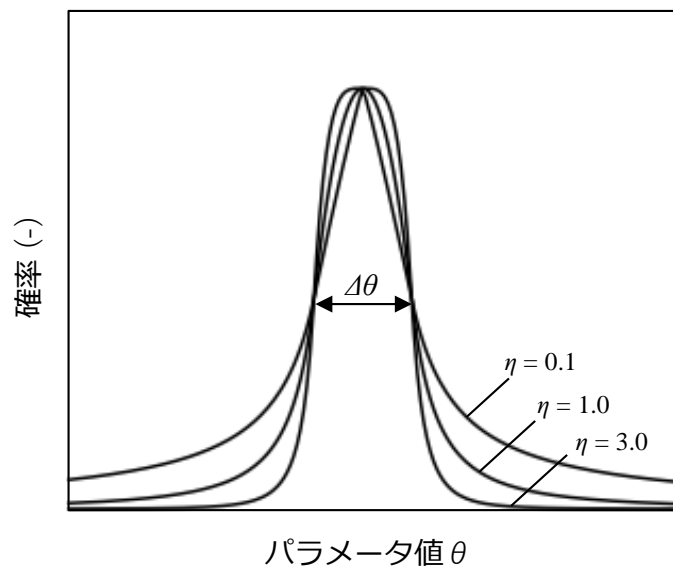


図5.9 SBX法に基づく尤度関数

本研究では、事後確率分布を得るのにマルコフ連鎖モンテカルロ法(Markov chain Monte Carlo method, MCMC)を用いる。その場合、(5.4)式の右辺分母の項は影響せず、式(5.8)に示すように分子の項のモデル化のみを考えればよい。

$$P(\theta|D) \propto P(D|\theta)P(\theta) \quad (5.8)$$

5.3 モードレス起動曲線の生成方法

5.3.1 最適化計算結果

開発したモードレス起動曲線の生成手法の妥当性を評価するため、第4章の図4.1に示すプラントを対象に、図5.4および表5.1で示したプラント出力指令と蒸気加減弁開度指令のパラメータについて、目的関数である初期メタル温度と蒸気タービンロータ熱応力超過のペナルティ付きの起動時間を最小化するよう値を探索した。最適化過程で得られたパラメータ値による起動曲線について、上記の2つの目的関数値を軸としたグラフ上にプロットした結果を図5.10に示す。

目的関数に採用した初期メタル温度に応じて網羅的に起動時間を最小化し、モードレス起動の特性を示す起動曲線群が生成された。これにより、初期メタル温度を最適化パラメータと目的関数の双方に採用することで、初期メタル温度の全領域に渡り起動曲線を生成できることを確認できた。また、図においてパレートフロント上の起動曲線を赤で、蒸気タービンロータの熱応力値が制限値を満足する結果を青で、制限値を逸脱した結果は緑でプロットしている。目的関数に熱応力超過のペナルティを加算することで、熱応力値が制限値を逸脱する起動曲線をパレートフロント上から除外できていることを確認できた。

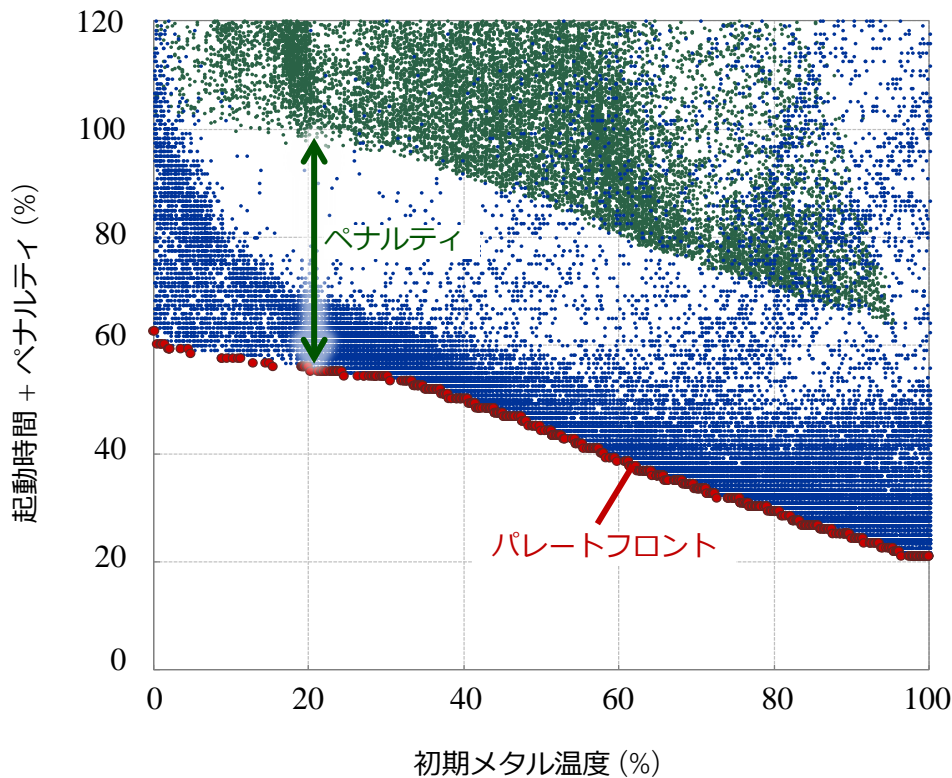


図5.10 起動曲線最適化結果

(初期メタル温度 vs 起動時間 + ペナルティ)

図 5.10 における縦軸からペナルティの加算値を取り除き、新たに蒸気タービンロータ熱応力の値を新たに軸として加えた結果を図 5.11 に示す。図 5.10 と同様に、蒸気タービンロータの熱応力値が制限値を満足する結果を青で、制限値を逸脱した結果は緑でプロットしている。同じ初期メタル温度では起動時間を短くするほど熱応力は連続的に上昇し、パレートフロントを境に起動曲線が熱応力制限値を満足するものと超過するものが分割されている。このことから、パレートフロント上の起動曲線以上に起動時間を短縮しようとすると、必ず熱応力が制限値を超過するような最適な起動曲線群が生成できたことが確認できた。これにより、開発した手法により初期メタル温度に応じて起動時間を最短とするモードレス起動曲線群を生成できることを確認した。

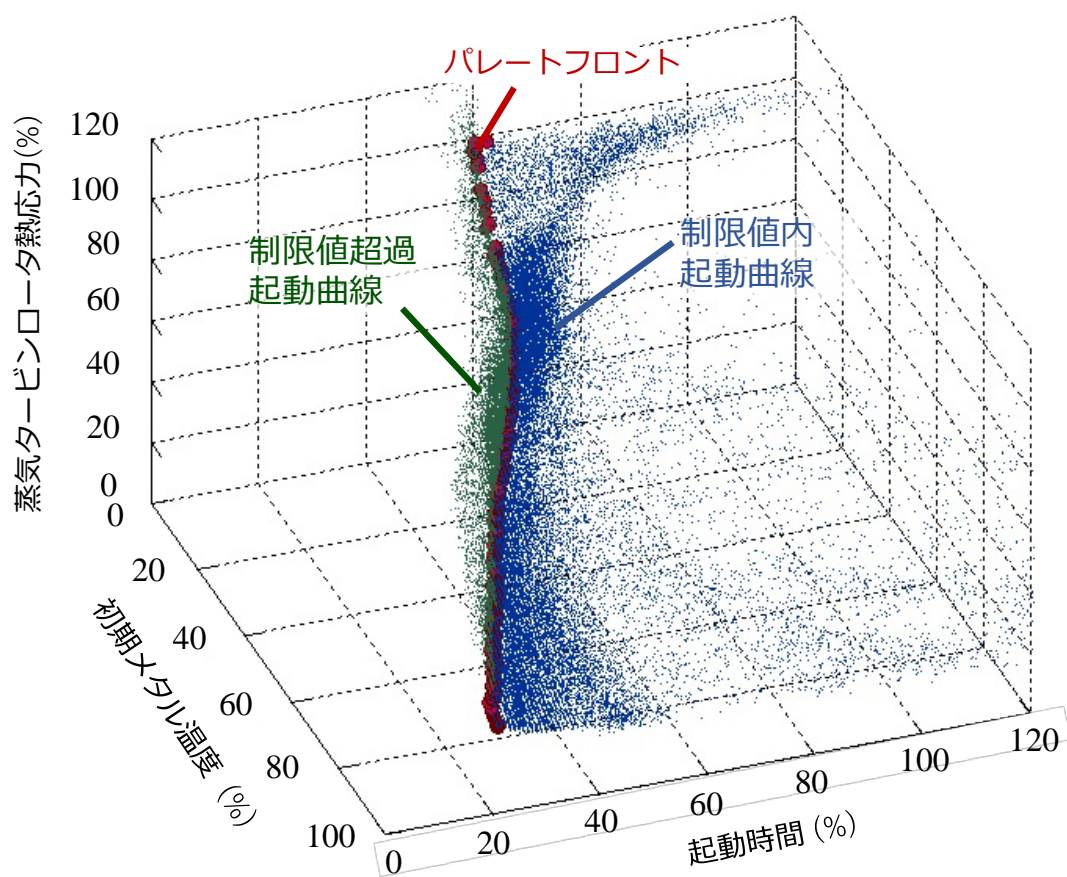


図5.11 起動曲線最適化結果

(初期メタル温度 vs 起動時間 vs 蒸気タービンロータ熱応力)

5.3.2 パラメータ線図の生成結果

前項の図 5.10 で得られたパレートフロント上の起動曲線の数(起動パラメータの組み合わせ数)は 1096 個であり、これら起動曲線における制御パラメータ値を計測データ D として、モードレス起動曲線を構築するためのパラメータ線図の折れ線関数に使用するパラメータ値を、式(5.9)を用いてベイズ推定により選定した。表 5.1 に示す最適化パラメータのうち、発電機保持出力 2(pw_2h)、発電機出力保持時間 1(pw_1t)、発電機出力変化率 2(pw_2a)、蒸気加減弁開度レート 1(cv_1a)の事後分布を例として図 5.12 に示す。各パラメータの存在領域を確率分布として提示することができた。これにより、生成された起動曲線を微調整するなどの際に、この確率分布内で値を修正するなどパラメータの選定の意思決定をサポートすることができる。本研究では、図中の赤線で示す最尤値をパラメータ線図に使用する値として選定する。得られたパラメータ線図の結果を図 5.13 に示す。

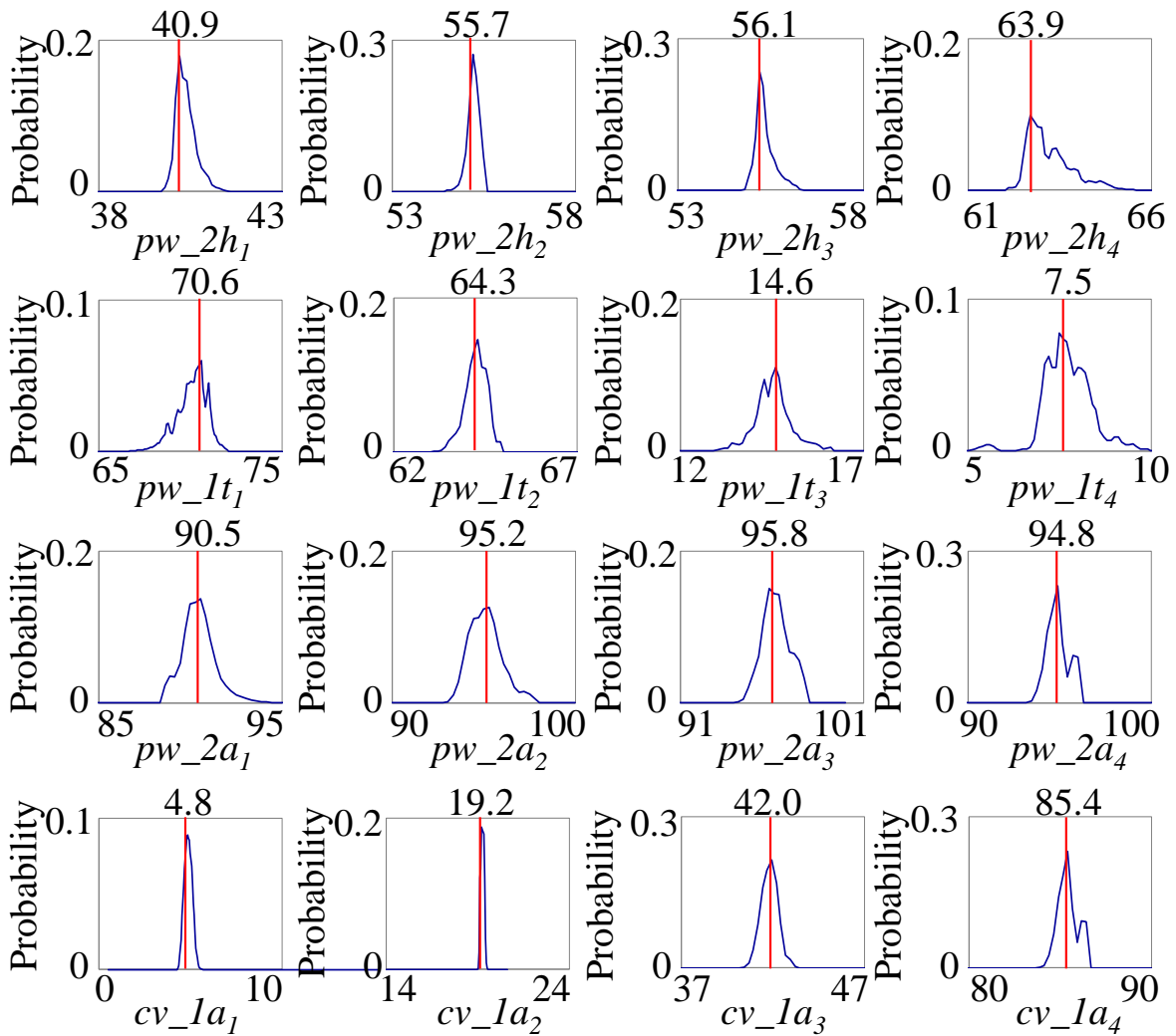


図 5.12 起動パラメータ推定の事後分布

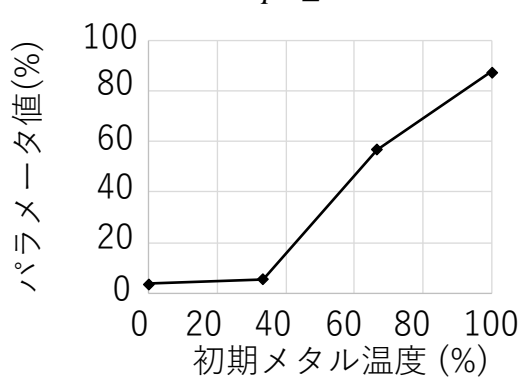
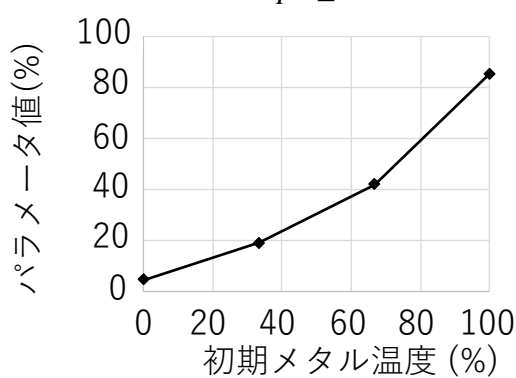
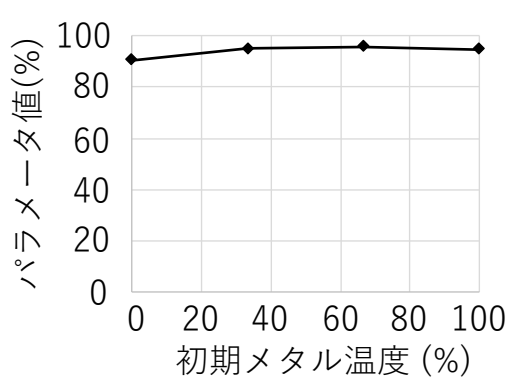
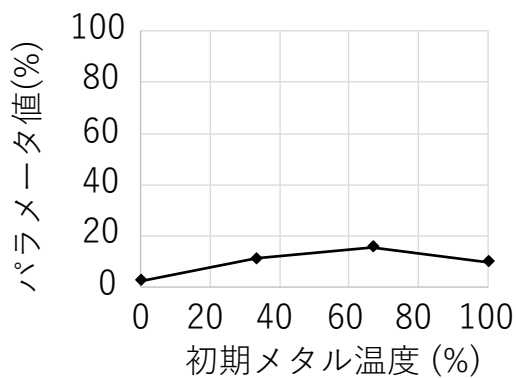
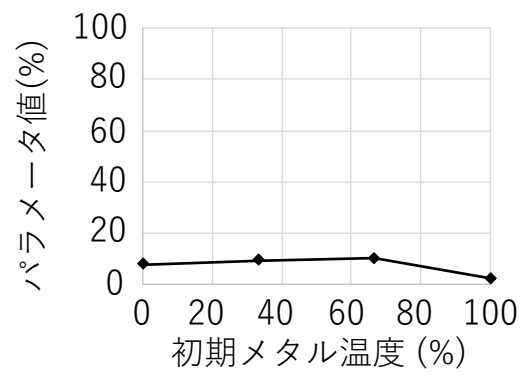
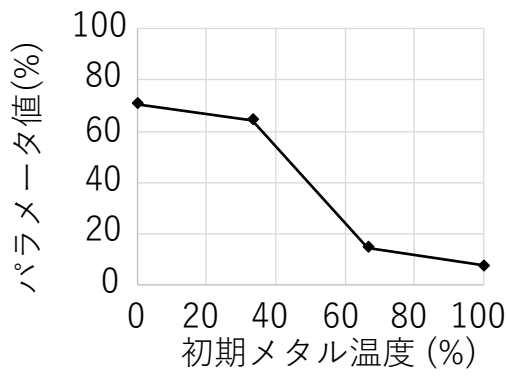
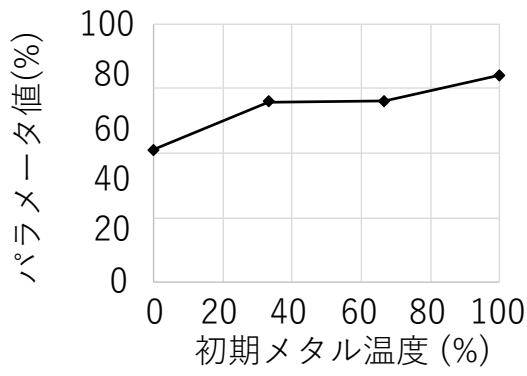


図 5.13 パラメータ線図

どのパラメータも概ね単調減少あるいは単調増加であり、初期メタル温度が高くなるほど起動時間が短くなる方向にパラメータが選定されている。初回の発電機出力変化率指令である pw_1a については初期メタル温度が最も高い 100% において値が減少するようなパラメータ値が得られたが、これは出力保持時間(pw_2t)を削減して負荷変化率を伸ばした方が熱応力の抑制および起動時間の短縮に有効であると判断されたためである。発電機出力指令の保持負荷(pw_2h)や蒸気タービン通気直後の発電出力の保持時間(pw_1t)、蒸気加減弁開度レート(cv_1a, cv_2a)の初期メタル温度に応じたパラメータ値の変化幅が大きく、これらの値を調整の主用いて起動曲線が最適化されたことがわかる。こうして得られたパラメータ線図を参照して起動曲線を構築することで、初期メタル温度に応じた起動曲線をモードレスに生成する。

5.3.3 初期メタル温度に応じた起動時間の評価

図 5.13 のパラメータ線図を用いて構築した起動曲線の初期メタル温度と起動時間の関係を図 5.14 に示す。従来同一起動モード内で一定であった起動時間が、初期メタル温度が高くなるにつれて起動時間が連続的に減少しており、モードレスな起動曲線を提供できる見通しを得た。また、このように初期メタル温度と起動時間の関係を可視化することで起動時間の事前の推定が可能となり、電力系統からの発電要求に対してプラント起動計画を容易に立案することができる。

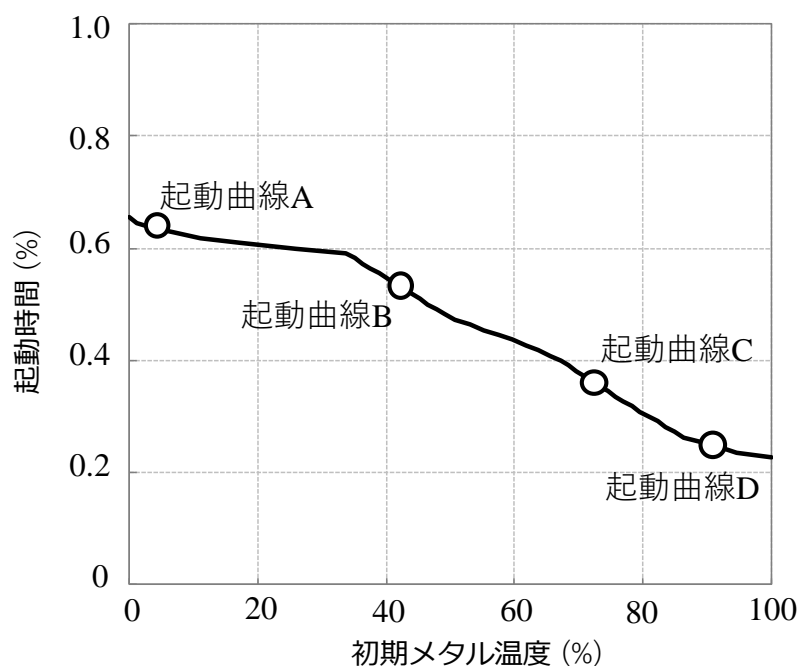


図 5.14 生成起動曲線の起動時間と初期メタル温度の関係

パラメータ線図により生成した起動曲線における制御動作の妥当性を評価するため、図 5.14 中の起動曲線 A、起動曲線 B、起動曲線 C、起動曲線 D による発電機出力や蒸気加減弁のプラント操作量と、これによる蒸気温度、蒸気流量、蒸気タービンロータ熱応力の応答をそれぞれ図 5.15-5.18 に示す。図において、横軸は過去の COLD 起動におけるガスタービン点火から発電機出力が定格値に到達するまでの時間を 1.0 として正規化し、縦軸については各プロセス値の定格値を 100% として示している。

図 5.15 の起動曲線 A では、発電機出力が蒸気加減弁開度に対して先行して上昇し、後に説明する 3 つの起動曲線とは異なる傾向となっている。対象としたプラントでは、発電機出力指令を満足するようガスタービン出力が調整される。このため、前章の実機試験や後に示す起動曲線 C や起動曲線 D では蒸気加減弁の開操作に伴う蒸気タービン出力の上昇によりガスタービン出力が一時的に低下しているが、図 5.15 では蒸気加減弁開操作と発電機出力の上昇を同時に実施することでガスタービン出力の低下を防止し(図示せず)、蒸気温度が一定に保たれている。この結果、時間 0.6 付近において熱応力は制限値近傍まで上昇されている。また、時間 0.8 付近では、蒸気加減開度を急上昇しているものの蒸気温度はすでに定格値到達しており影響少なく制限値の超過なく起動完了している。

図 5.16 の起動曲線 B においても、起動曲線 A と同様に蒸気加減弁開と発電機出力上昇のタイミングを揃えることで、ガスタービン出力の低下それによる蒸気温度の低下を防止している。その後は蒸気加減弁を先行的に上昇し、熱応力に 1 つ目のピークが発生する。その後、発電機出力の上昇に伴い熱応力の 2 つ目のピークが発生し、それぞれ制限値を満足しつつ起動時間を短縮するよう制限値近傍に達するよう制御されている。

図 5.17 の起動曲線 C では、起動曲線 A や起動曲線 B よりも高い出力で発電機出力を保持し、この間に蒸気加減弁を開いて蒸気タービンに通気している。蒸気加減弁の上昇レートも起動曲線 A や起動曲線 B と比較して高い値となっているが、その後ガスタービン出力低下による蒸気温度低下を利用して、熱応力の制限値超過が防止されている。蒸気加減弁全開後では蒸気タービンでは発生した蒸気を全量受け入れることとなり、図に示す蒸気タービン入口流量は発電機出力に追従して応答する。その後、発電機出力保持を継続し、十分ロータ内部が昇温した後に発電機出力を上昇させ起動完了となっている。

図 5.18 の起動曲線 D では、4 つの起動曲線のうち初期メタル温度が最も高く、発電機出力変化率と蒸気加減弁開度レートが高い値に設定され、起動時間が短縮されている。発電機出力と蒸気加減弁開度レートの上昇のタイミングが近づいたことで熱応力のピークの山

は一つになっている。また、発電機出力 40% 付近の保持時間を微調整することで、熱応力の制限値超過防止が図られている。

このように、熱応力が合理的に制御され、制限値を満足しつつ初期メタル温度に応じて起動時間を短縮するような起動曲線が生成できていることから開発したモードレス起動の有効性を確認できた。

5.4 結言

従来の起動モードを排して初期メタル温度に応じてプラントを最速で起動するモードレス起動を実現する制御技術を開発した。本技術では、第 3 章、第 4 章で開発した最適化手法を拡張して、初期メタル温度と起動時間を目的関数として探索された起動パラメータに基づき、初期メタル温度に応じた起動パラメータのパラメータ線図を作成し、このパラメータ線図を起動のたびに参照することで起動曲線を作成する。開発方式の妥当性を検証するため、第 4 章の実機試験で対象としたプラントについて最適化計算を実施し、初期メタル温度と起動時間のトレードオフ関係において、モードレス起動の特徴を示すパレートフロント上に起動曲線群を網羅的に生成できることを確認した。

また、初期メタル温度と起動パラメータ値の関係から成るパラメータ線図に基づき生成した起動曲線により、熱応力が合理的に制限値を満足するよう制御され、初期メタル温度の上昇に応じて起動時間連続的に短縮するような起動曲線が生成できたことから、開発したモードレス起動の有効性を確認できた。

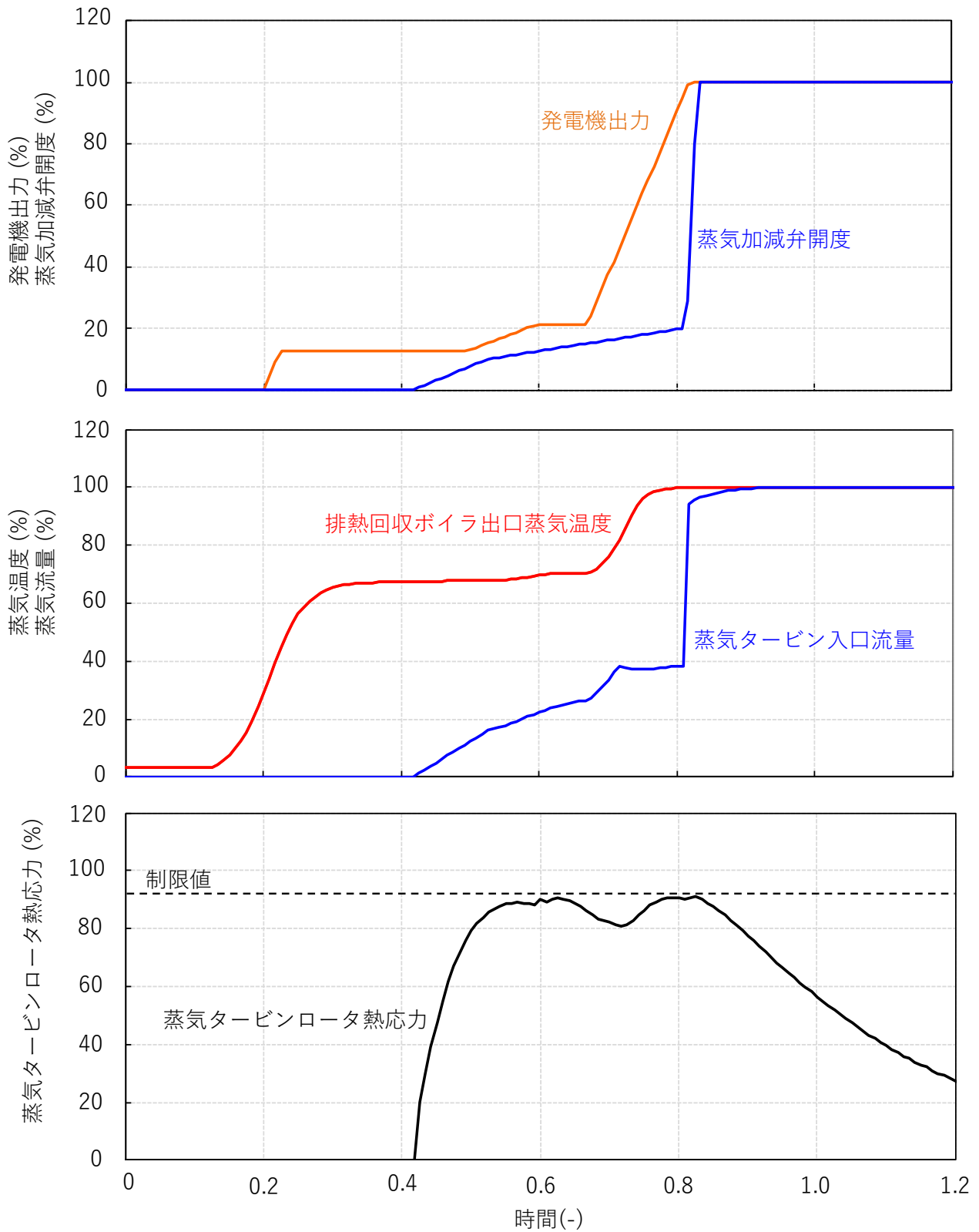


図 5.15 モードレス起動曲線生成結果（起動曲線 A）

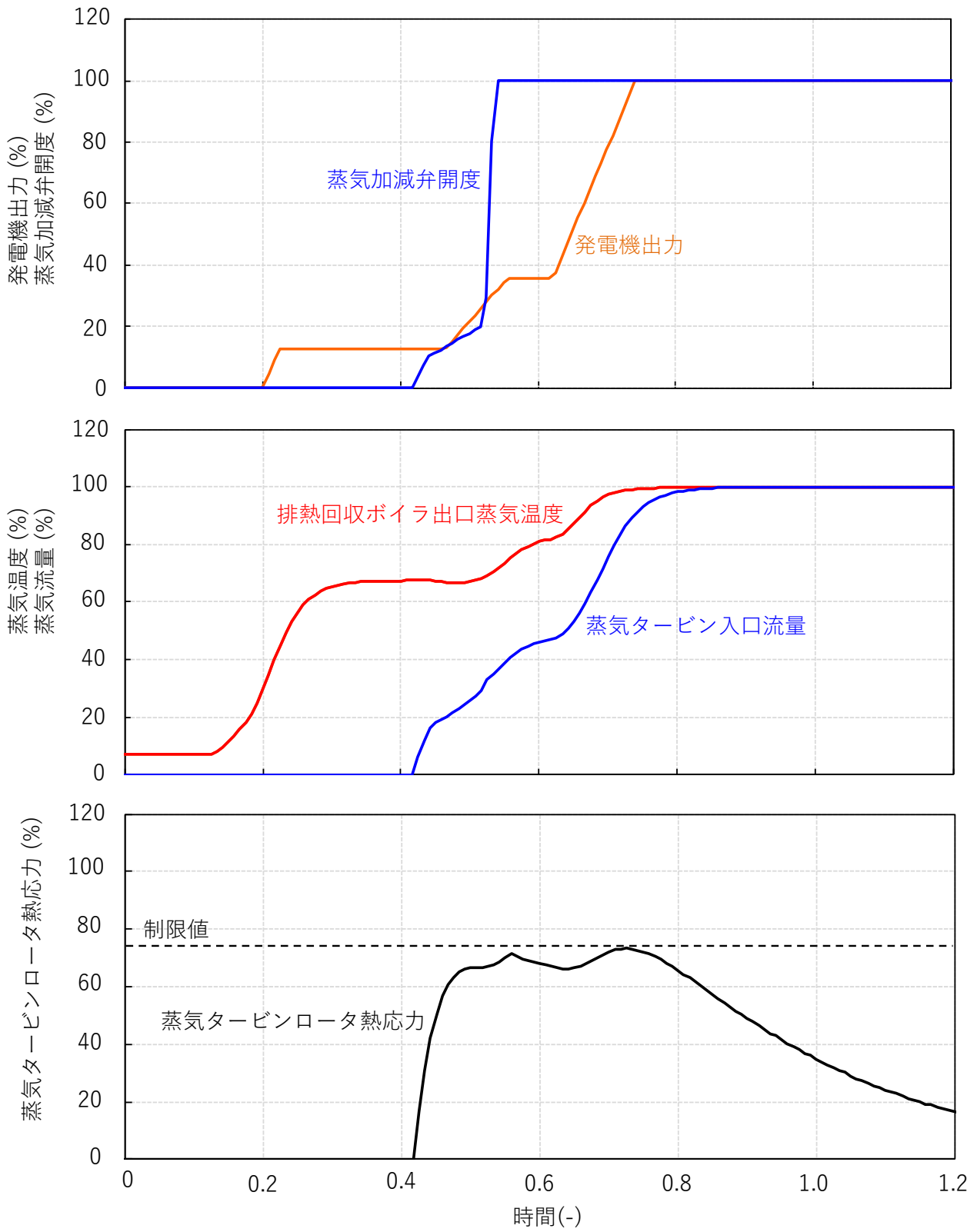


図 5.16 モードレス起動曲線生成結果（起動曲線 B）

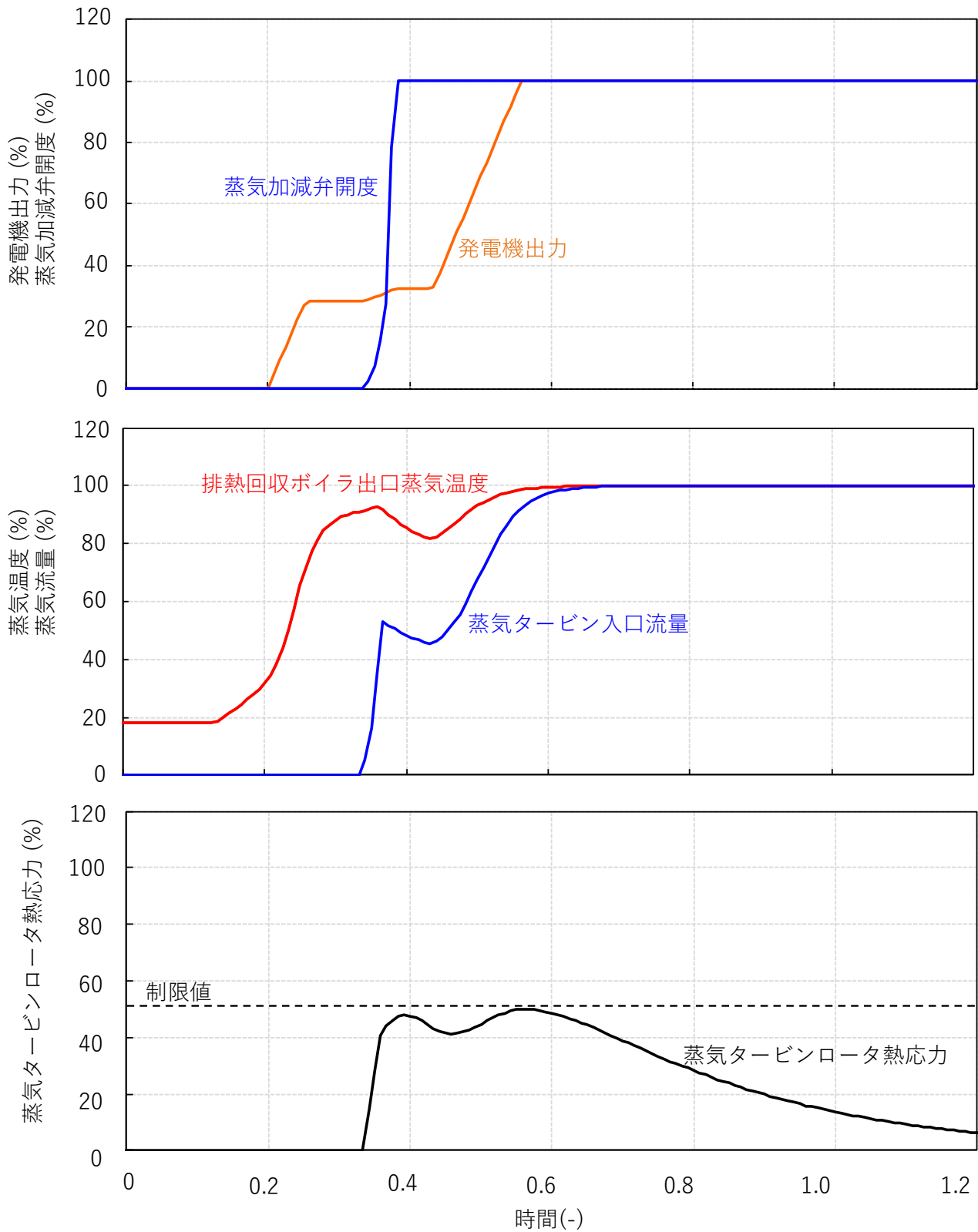


図 5.17 モードレス起動曲線生成結果 (起動曲線 C)

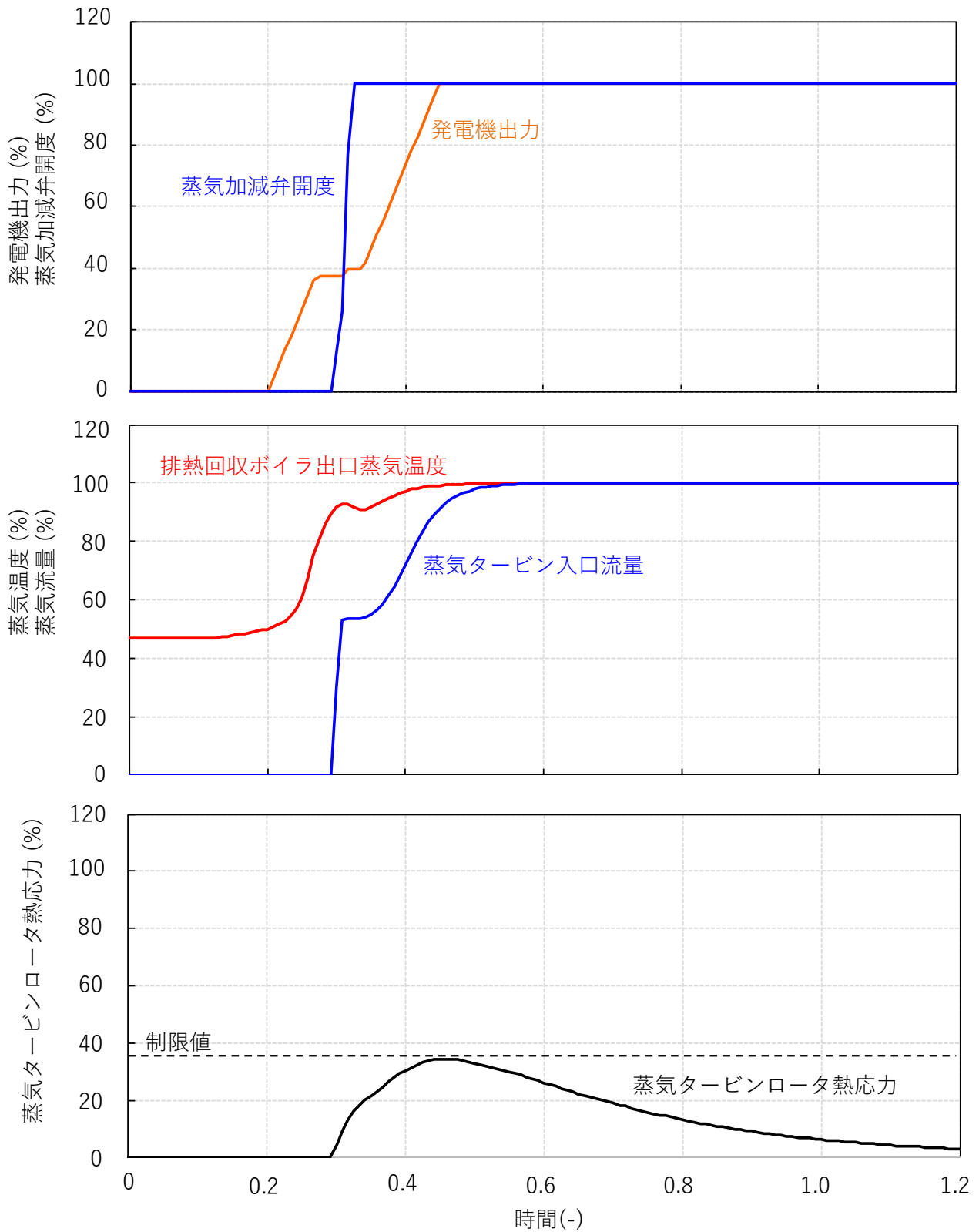


図 5.18 モードレス起動曲線生成結果（起動曲線 D）

6. 結論

本研究では電力系統の安定化を目的に、ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせから構成されるコンバインドサイクル発電プラントの高速起動制御技術を開発した。

第1章では、研究の背景としてCO₂排出削減に向けた風力発電や太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入量の増加と、その発電量の変動を抑制するためコンバインドサイクルの起動時間短縮の必要性について説明した。また、コンバインドサイクルの一般的な起動方法として起動時の代表メタル温度（初期メタル温度）に応じたHOT起動、WARM起動、COLD起動などの起動モードごとに作成された起動曲線に基づくガスタービンや主要弁の制御方法を示し、この起動における主な装置構成であるガスタービン、排熱回収ボイラ、蒸気タービンの制約条件について説明した。

既往の研究について、起動時の制約となるプラント構造体の肉厚部分を削減する機器改良の取り組みや、機器の損傷が懸念されるプラント構造体の制限値を満足するようプラントシステム全体を改善する取り組みについて述べ、既存の設備を変更することなく制御の改善により起動時間を短縮する技術を開発する本研究の位置づけについて説明した。

第2章では、コンバインドサイクルの起動時間短縮に向けて、起動時の制約条件の1つである蒸気タービンロータ熱応力を予測計算し、この予測結果に基づきガスタービンと蒸気タービンを協調制御する方式を開発した。本方式では、蒸気タービンロータのメタル温度の上昇度合いに応じて起動過程を前後半に二分割し、起動前半では蒸気タービンの回転数・出力を操作して蒸気流量を調整し、起動後半ではガスタービン出力を操作して蒸気温度を調整することで、熱応力の蒸気温度や蒸気流量に対する感度に合わせて操作項目を切り替えることを特徴としている。開発した制御方式の効果を検証するため、多軸式コンバインドサイクルを対象にシミュレーションを実施し、以下の結論を得た。

- ・ガスタービン負荷や蒸気タービン回転数・負荷などのプラント操作量を入力として蒸気タービンロータ熱応力を計算する動特性シミュレータを開発した。既設プラントにおける蒸気の温度と圧力の最大誤差はそれぞれ2.3%、4.9%と実機応答を再現し、開発したシミュレータを熱応力の予測計算に適用可能であることを確認した。

- ・開発した協調制御方式を HOT 起動、WARM 起動、COLD 起動の異なる初期メタル温度の条件に適用し、熱応力が制限値以下に安定的に制御されることを確認した。
- ・熱応力の予測計算に基づき蒸気タービンのみを制御したケースと比較して、開発したガスタービン・蒸気タービン協調制御方式では起動時間を最大 28%削減した。

これらにより、開発した制御方式によって蒸気タービンロータに発生する熱応力を安定的に制御しつつコンバインドサイクルの起動時間を短縮できることを確認した。

第 3 章では、起動時間短縮に加え、寿命消費量や燃料消費量の低減など、多様化する顧客要望に対応するため、多目的進化的アルゴリズムを用いてプラントの起動方法を最適化する技術を開発した。本技術では、最適化プログラムによるガスタービン負荷変化率や蒸気加減弁開度レートなどの起動パラメータ値の探索と、動特性シミュレータによる目的関数の評価を繰り返すことで最適な起動曲線を自動生成する。本研究では、最適化過程において計算された解から隣り合う距離の近いものを排除することで多様性を維持して広範囲に広がる解を得ることができる NSGA-II を起動パラメータ値の探索手法に用いた。開発した多目的進化的アルゴリズムによる起動曲線の生成機能と、生成された起動曲線の妥当性の検証を目的に、一軸式コンバインドサイクルを対象に起動時間とロータ熱応力(寿命消費量)を目的関数とした起動曲線を試作し以下の結論を得た。

- ・蒸気タービンの起動時間と寿命消費量のトレードオフ関係を示すパレートフロント上に起動曲線を複数自動で生成できることを確認した。パレートフロントを可視化して解全体の分布を把握することで、起動曲線の対話的な選定を可能とした。
- ・起動時間と寿命消費のどちらを優先するかに応じて、ガスタービン負荷と蒸気加減弁開度の最適な起動順序が異なるという知見を得た。
- ・停止後経過時間に対する起動時間と寿命消費量のパレートフロントの曲面が連続的となることを確認し、任意の起動初期条件と発電事業者からの要望に基づく最適な起動曲線を一意に選定できることを確認した。

これらにより、開発技術を用いて起動時間短縮を含む任意の顧客要望に対して、起動曲線を最適化できることを確認できた。

第 4 章では、第 3 章で開発した起動曲線の最適化技術による起動プロセスの運用改善効果を検証するため、欧州の商用プラントにて起動試験を実施した。対象プラントの構成や

起動制御方式に合わせて動特性シミュレータを構築、および最適化する起動パラメータを選定し、顧客要望である起動時の燃料消費量の低減を目的関数として起動曲線を生成した。生成した起動曲線を実機に適用し、以下の結論を得た。

- ・構築した動特性シミュレータにより計算された蒸気温度、蒸気流量、蒸気圧力の応答はそれぞれ計測値とよく一致し、制約条件である蒸気タービンロータ熱応力のピーク値の差は1.8%であった。このことから、構築シミュレータを対象プラントの起動曲線生成に適用可能であることを確認した。
- ・生成された起動曲線では、過去の運転実績と比較して軸出力や蒸気加減弁の変化率を上昇させたことで起動時間が短縮した。また蒸気タービン出力上昇が早められ、蒸気タービン通気後のガスタービン出力の低下速度が増加した。これら起動時間の短縮とガスタービン負荷の低減により、過去の運転実績と比較して起動に要する燃料消費量を22.8%削減する効果を得た。

これらにより、開発した最適化技術を用いて生成した起動曲線の有効性が確認できた。

第5章では、従来の起動モードを排して初期メタル温度に応じてプラントを最速で起動するモードレス起動を実現する制御技術を開発した。本技術では、第3章、第4章で開発した最適化手法を拡張して、初期メタル温度と起動時間を目的関数として探索された起動パラメータに基づき、初期メタル温度に応じた起動パラメータのパラメータ線図を作成し、このパラメータ線図を起動のたびに参照することで起動曲線を作成する。開発方式の妥当性を検証するため、第4章の実機試験で対象としたプラントについて最適化計算を実施し、以下の結論を得た。

- ・初期メタル温度と起動時間のトレードオフ関係において、モードレス起動の特徴を示すパレートフロント上に起動曲線群を網羅的に生成できることを確認した。
- ・初期メタル温度と起動パラメータ値の関係から成るパラメータ線図に基づき生成した起動曲線により、熱応力が合理的に制限値を満足するよう制御され、また初期メタル温度の上昇に応じて起動時間連続的に短縮するような起動曲線が生成できた。

これらにより、開発したモードレス起動の有効性を確認できた。

以上で述べたように、コンバインドサイクルの起動時間短縮を目的に予測制御に基づく起動制御技術と、多目的最適化による起動曲線生成技術を開発した。これにより、再生可

能エネルギーの導入量増加に対応する、電力系統の安定化に向けたコンバインドサイクルの運用が可能となる。

また、本研究では起動中に守るべき制約条件として蒸気タービンのロータ熱応力を対象としたが、この代わりに排熱回収ボイラのヘッダ応力や蒸気タービンの熱伸び差などシミュレーションで評価する対象を変更することで他の制約条件を考慮した起動曲線についても生成可能である。さらに、本研究で扱ったような制御対象機器のモデル化とそれを用いたモデルベース制御や最適化の応用範囲は広く、食品・化学・医薬プラントなどさまざまな運転最適化に適用できる。ただし、多くの場合において制御のリアルタイム性の確保が重要となることが想定され、シミュレータや最適化、学習アルゴリズムの高速化に向けた取り組みが次の課題となる。

参考文献

- [1] 経済産業省, “エネルギー基本計画,” (2018)
- [2] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “NEDO 再生可能エネルギー技術白書,” (2014)
- [3] 上田慎太, 富田康意, 平原悠智, 住吉泰生, “火力プラントの柔軟性向上による電力系統の安定化,” 火力原子力発電, Vol. 66, No. 11, pp. 676-691, Nov. (2015)
- [4] 高鷹生男, 重中利則, 古林肇, 保泉真一, “コンバインドプラントにおける蒸気サイクルの高効率化と排熱回収ボイラの対応,” 日立評論, Vol. 74, No. 11, pp. 25-30, Nov. (1992)
- [5] Albrecht, M.J., Sedlak, S.R., Jain, R., Wells, E.L. and DiVitto, J.G., “Use of a Vertical Separator Design for a Natural Circulation HRSG Boiler” Power-Gen International, Orlando, Florida, U.S.A. Dec.11-13 (2012)
- [6] 北口公一, “コンバインド発電用蒸気タービンの最新技術動向,” 日本ガスタービン学会誌, Vol. 38, No. 4, pp. 225-230. (2010)
- [7] 浅野誠一, 高橋陽一, 森山高志, “中容量再熱蒸気タービン,” 富士時報, Vol. 73, No. 12, pp. 650-654. (2000)
- [8] 乾泰二, 西嶋庸正, 日下巖, 柏原克人, 福島弘一郎, “コンバインドプラント,” 日立評論, Vol. 63, No. 7, pp. 443-448. (1981)
- [9] Andreas Fabricius, Mark Taylor and David Moelling: Impact of Startup Purge Credit on Combined Cycle Plant Operation, ASME POWER 2015-49101, pp. V001T09A002. (2015)

- [10] Bohtz, C., Stevens, M., Sackmann, H., and Ruedt, A., “District Heating with the Flexibility of the KA26 Combined Cycle Power Plant,” *Russia Power*, Moscow, Russia, Mar. 5–6. (2013)
- [11] Henkel, N., Schmid, E., and Gobrecht, E., “Operational Flexibility Enhancements of Combined Cycle Power Plants,” *Power-Gen Asia*, Kuala Lumpur, Malaysia, Oct. 21–23. (2008)
- [12] McManus, M., and Baumgartner, R., “An Integrated Combined-Cycle Plant Design That Provides Fast Start Capability at Base-Load,” *Power-Gen*, Las Vegas, NV, Dec. 4–6. (2003)
- [13] Brückner, J., and Schlund, G., “Pego Experience Confirms BENSON as Proven HRSG Technology,” *Mod. Power Syst.*, 31(6), pp. 21–24. (2011)
- [14] Alyah, M., Ashman, J., Arisoy, A., Astley, E., Herbst, E., Jennings, P., Gusev, A., Emelyanov, R., and Radevsky, R., “Combined Cycle Power Plants,” *IMIA Annual Conference*, Merida, Mexico, Sept. 26–30. (2015)
- [15] Balling, L., “Fast Cycling and Rapid Start-Up: New Generation of Plants Achieves Impressive Results,” *Mod. Power Syst.*, 31(1), pp. 35–41. (2011)
- [16] Ruchti, C., Olia, H., Franitza, K., and Ehram, A., “Combined Cycle Power Plants as Ideal Solution to Balance Grid Fluctuations,” *Kraftwerkstechnisches Kolloquium*, TU Dresden, Germany, Sept. 18–19. (2011)
- [17] Vogt, J., Schaaf, T., Mohr, W., and Helbig, K., “Flexibility Improvement of the Steam Turbine of Conventional or CCGP,” *Power-Gen Europe*, Cologne, Germany, June 4–6. (2013)
- [18] Gulen, S. C., and Jones, C. M., “GE’s Next Generation CCGT Plants: Operational Flexibility is the Key,” *Modern Power Systems*, 35(6), pp. 16–18. (2011)
- [19] 薬師宏治, 中井昭祐, “熱伝達率係数逐次適応計算を用いた蒸気タービン発電機の熱応力予測起動制御,” *電気学会*, 論文番号 4-224. (2005)
- [20] 宮澤桂太郎, 深町有佑, 薬師宏治, 浅中利忠, “蒸気タービン最適起動技術の開発と試運転実績,” *平成 26 年度火力原子力発電大会論文集*, pp. 22-27. (2014)
- [21] Bertini, I., Felice, D. M., Moretti, M., and Pizzuti, S. “Start-Up Optimisation of a Combined Cycle Power Plant with Multiobjective Evolutionary Algorithms,” *EvoApplications 2010: Applications of Evolutionary Computation*, Istanbul, Turkey, Apr. 7–9, pp. 151–160. (2010)
- [22] Ahmadi, P., and Dincer, I., “Thermodynamic and Exergoenvironmental Analyses, and Multi-Objective Optimization of a Gas Turbine Power Plant,” *Appl. Therm. Eng.*, 31(14–15), pp. 2529–2540. (2011)

- [23] Hajabdollahi, F., Hajabdollahi, Z., and Hajabdollahi, H., “Soft Computing Based Multi-Objective Optimization of Steam Cycle Power Plant Using NSGA-II and ANN,” *Appl. Soft Comput.*, 12(11), pp. 3648–3655. (2012)
- [24] Greis, J., Gobrecht, E. and Wendt, S., Flexible and economical operation of power plants - 25 years of expertise, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012*, June 11-15, Copenhagen, Denmark, pp.497-504. (2012)
- [25] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meysrivan, T., “A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II,” *Parallel Problem Solving From Nature VI Conference*, Paris, France, Sept. 18–20, pp. 849–858. (2000)
- [26] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., and Meysrivan, T., “A: Fast and Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II,” *IEEE Trans Evol. Comput.*, 6(2), pp. 182–197. (2002)
- [27] Deb, K., and Gulati, S., “Design of Truss-Structures for Minimum Weight Using Genetic Algorithms,” *Finite Elem. Anal. Des.*, 37(5), pp. 447–465. (2001)
- [28] Deb, K., “Analysing Mutation Schemes for Real-Parameter Genetic Algorithms,” *Int. J. Artif. Intell. Soft Comput.*, 4(1), pp. 1–28. (2014)
- [29] 斎藤公則, 木村和成, “疲労-基礎と設計への展開疲労設計の実務と問題点 II(自動車,高温機器の疲労設計)”, *日本材料学会*, 35 卷, 397 号, pp. 123-129, (1986)
- [30] Thiemann, M., Trosset, M., Gupta, H., and Sorooshian, S., “Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models,” *Water Resources Research*, October 37(10), pp. 2521-2535. (2001)
- [31] Xing, X., Jing, T., Huo, Y., Li, H. and Cheng, X., “Channel Quality Prediction Based on Bayesian Inference in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Infocom*, pp.1465-1473. (2013), DOI: 10.1109/INFCOM.2013.6566941

記号

a	ガスタービン負荷変化率	(%/min)
D	観測データ (起動パラメータ値)	(-)
E	ヤング率	(MPa)
f_1, f_2	目的関数	(-)
G	蒸気流量	(kg/s)
h	比エンタルピ	(kJ/kg)
L	負荷	(%)
P	蒸気圧力	(MPaA)
$\triangle P$	差圧	(MPa)
P_i	母集団	(-)
$penalty$	目的関数に加算するペナルティ値	(-)
Q_i	子集団	(-)
RPM	回転数	(%)
s	標準偏差	(-)
t	時間	(min)
$\triangle t$	刻み時間	(s)
t_{hold}	ガスタービン負荷保持延長量	(min)
t_{pre}	予測期間	(min)
t_{start}	起動時間	(min)
T	温度	(°C)
u	一様乱数(0, 1)	(-)
v_σ	熱応力上昇速度	(MPa/s)
VA	弁開度	(%)
x	進化計算における親個体の値	(-)
y	進化計算における子個体の値	(-)
α	線膨脹係数	(1/K)
η	確率分布の形状を決定するパラメータ	(-)
θ	推定するパラメータ値	(-)
μ	平均値	(-)
ν	ポアソン比	(-)
σ	熱応力	(MPa)
τ	時定数	(s)
添字 :		
b	中心	
byp	バイパス弁	
c	交叉	

<i>dmd</i>	指令値
<i>gt</i>	ガスタービン
<i>gt_g_tbl</i>	ガスタービン負荷に関する蒸気流量のテーブル
<i>gt_t_tbl</i>	ガスタービン負荷に関する蒸気温度のテーブル
<i>hrsg</i>	排熱回収ボイラ出口
<i>i</i>	インデックス
<i>init</i>	メタル起動初期状態
<i>lim</i>	制限値
<i>m</i>	突然変異
<i>max</i>	上限値
<i>min</i>	下限値
<i>m_ave</i>	蒸気タービンロータメタル体積平均
<i>m_b</i>	蒸気タービンロータメタルボア
<i>m_s</i>	蒸気タービンロータメタル表面
<i>peak</i>	ピーク値
<i>r</i>	定格値
<i>s</i>	表面
<i>st</i>	蒸気タービン(または、蒸気タービン入口)
<i>steady</i>	整定値
<i>st_g_tbl</i>	蒸気タービン回転数・負荷に関する蒸気流量のテーブル
<i>s_tbl</i>	蒸気表
<i>t</i>	<i>t</i> 回目の時間ステップ
<i>t-1</i>	<i>t-1</i> 回目の時間ステップ
σ	熱応力

謝辞

本研究の遂行、ならびにジャーナルへの寄稿から博士論文の執筆に至るまで幅広くご指導いただいた指導教官の柘植先生に心から感謝申し上げます。研究者として至らない点多々ありましたが、本論文の完成に至るまで暖かくご支援いただきました。また、論文執筆にあたりご指導およびご討議いただいた深井先生、梶原先生に感謝いたします。さらに、社会人ドクター進学を後押しして頂いた株式会社日立製作所の当時の上司である片桐幸徳さん、ならびに本学入学までの架け橋を作ってくくださった鈴木朋子さん、折田久幸さんに感謝いたします。

本研究の立ち上げに際しては野村健一郎さん、楠見尚弘さんに綿密な開発スコープを策定頂き、前任者の江口徹さんには予測制御方式の基本方針を立案頂きました。また、本研究は吉田卓弥さん、矢敷達朗さん、徳田勇也さんとの度重なる議論の上、進めてまいりました。さらに、株式会社日本コンピュータシステムの天下井輝幸さんには、プログラムの実装やシミュレーションによる評価など、本研究の全ての内容に渡り助けていただきました。

三菱日立パワーシステムズの山中和典さん、富沢雅昭さん、山下厚さん、高橋祐一さん、弥永典宏さん、鈴木文之さんには、コンバインドサイクルの起動制御方法から守るべき制約条件などを一からご教示いただき、予測制御による起動方式や進化計算による起動最適化方式を共に開発してまいりました。欧州プラントでの試験に際しては、榎本裕基さん、大崎展弘さん、長濱義人さんに試験方法の立案や、リスクの評価、起動曲線の修正など、開発した最適化方式の実機適用を力強く推進して頂きました。深く感謝いたします。

最後に、いつも身近で支えてくれた妻と、笑顔で癒しをくれた娘に感謝いたします。