

解説 記事

規格基準動向

配管減肉管理に関する内外の動向

稲田 文夫 Fumio INADA

社団法人 日本機械学会 発電用設備規格委員会
配管減肉対応特別タスク 技術サブタスク幹事
財団法人 電力中央研究所

1. 配管減肉管理の必要性

1-1) 配管減肉とは

原子力・火力の発電プラントや石油・化学プラント等の系統配管では、エルボ、T管部、およびオリフィスや弁の直下流部など偏流（流れの強い乱れ）が発生している部位（以下偏流発生部位）において肉厚が時間の経過と共に徐々に減少する配管減肉現象が見られる。

配管減肉は、プラント配管系でその管理対象箇所が多いこと、人的被害を伴う大規模破断に至るケースもあることから、その管理が極めて重要である。

1-2) 管理体制の整備の契機となった事故

1986年12月に発生した米国Surry発電所2号機の二次系給水系統の炭素鋼配管の大規模破断事故（以下サリー事故）^[1]では、作業員の死傷者8人を出す惨事となった。これを機に米国では原子力規制委員会（NRC）が中心となり、発電プラントにおける配管肉厚の管理体制が強化された。日本でも、加圧水型原子力発電所（以下PWR）を所有する事業者では、その管理指針を1990年に作成して運用してきており^[2]、沸騰水型原子力発電所（以下BWR）、火力発電所などの事業者も各社で独自に指針を作るなどして管理を行ってきた。

一方日本でも、2004年8月に美浜原子力発電所3号機2次系配管破損事故（以下美浜事故）など、原子力・火力発電プラントで配管系の減肉による破断事故が実際に顕在化した^[3]。これを契機として再び同様な事故を起こさないように、日本機械学会では従来の事業者の指針を技術的に見直し、設備管理者の品質保証活動まで含めた配管減肉管理規格を作成することと

◆連絡先：稲田 文夫

〒201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1

(財)電力中央研究所

tel: 03-3480-2111 E-mail: inada@criepi.denken.or.jp

なった。

本資料では、米国と日本における事業者と規制当局が協力した配管減肉管理の取り組みについて概説する。

2. 米国における配管減肉管理体制^{[4],[5]}

減肉問題は主にタービン系で発生するが、米国では従来タービン系は規制の対象外であった。しかし、1986年のサリー事故以降原子力規制当局（NRC）から、まず单相流および二相流下での炭素鋼配管の肉厚モニタリング計画と長期的管理プログラムに関する情報提供を要請する通達がだされた。1992年には検査手順書IP49001が発行され、NRCより監視プログラムの内容とその継続的な実行がなされているかどうかを確認されることとなった。

一方、産業界では原子力エネルギー協会（NEI）の前身であるNUMARC（Nuclear Management and Resources Council）からは单相流／二相流の炭素鋼配管の減肉に関する主要点検系統と部位、検査方法、点検頻度、修理交換などの規定^[6]が、米国電力研究所（EPRI）からは減肉傾向をプラントデータに基づいて予測できるコードCHECWORKSを使用した管理法（NSAC/202L-R2）^[7]が、米国機械学会（ASME）からは局所減肉の場合の健全性評価法の規定（Code Case N597-1）^[8]が作成された。NRCからは、NSAC/202L-R2およびCode Case N597-1を使用してNEIのガイドラインに従って肉厚管理することが是認されている。

3. 日本における減肉管理規格策定

3-1) 日本機械学会における規格策定の体制^[9]

日本における配管減肉管理は、従来事業者の作成する自主的な指針に基づいてなされてきた。しかし美浜事故を契機として、再度同様な事故を起こさないことを目標として日本機械学会傘下の発電用設備規格委員会に配管減肉対応特別タスクを設置して減肉管理規格を策定することになった。本節では日本機械学会における規格策

定活動の歴史的背景について説明しておく。

まず、発電用設備の設計建設等に関わる規格については、かつては国が定める規制法体系下で国がそれを守らせてきた。

しかし、たとえば機器の健全性を維持することを考える場合、その方法は構造強度を高めてもよいし、荷重を小さくしてもよいなど、複数の方法が考えられる。このようなことを国が事細かに決めることは、①自由貿易の障壁となり国際法上問題がある②国が技術基準を技術の進展に合わせて改訂していくことは困難で技術の発展を阻害するなどのために問題がある。特に1996年世界貿易機関の貿易に関する技術的障壁の撤廃に関する合意（TBT合意）の締結以降は、「機器の健全性を維持する」との機能要求までをし、その先は日本機械学会を初めとする民間の学協会が規格を策定し、それに対して規制当局である原子力安全保安院が技術評価を行い、その使用による運用を許可する（エンドースする）形をとることとした。この動きに対応して、日本機械学会では1997年に発電用設備規格委員会を設置し、発電用設備の設計建設規格や維持規格などを整備してきている。

日本機械学会の発電用設備規格委員会における規格策定では、産業界、大学・研究機関、国などの規制機関、検査機関から幅広く委員を集め、運営規約に基づいて中立的に審議を進め、規格を制定している。規格策定のための会議や資料は基本的に公開である。委員以外の個人、団体も委員会にオブザーバとして参加でき、委員長の許可の元、審議項目を提案したり、意見を述べたりすることができる。このように中立性、公

正性、公開性の確保には特に配慮されている。

配管減肉管理についても、この発電用設備規格委員会の元に、故 朝田東大名誉教授を主査として規格原案を策定する配管減肉対応特別タスク（以下「特別タスク」）を2004年9月に設置して規格策定を行ってきた（現主査：東大関村教授）。その際、下部組織として原子力と火力の発電プラントを対象とした技術規格原案を策定する作業会である、原子力サブタスクと火力サブタスクを設置するとともに、これらのサブタスクを支援し現象・データベース等の技術的検討を行う技術サブタスクを設置した（図-1）。

3-2) 第一ステップとしての機能性規格の制定^{[5],[9]}

配管減肉管理に関する規格の策定では、第一段階として2005年3月に設備管理者が策定する配管減肉管理を定める指針が満足すべき要件を規定した「発電用設備規格配管減肉管理に関する規格（JSME S CA1-2005）^[5]」（以下「機能性規格」）を制定した。

本機能性規格は、配管減肉に対する健全性を確保するための技術規格や各設備管理者が作成する指針の満たすべき要件、いわば作り方を規定したもので、学会が制定する技術規格をも包含し、技術規格制定後も運用される（図-2）。

まず機能性規格を策定した理由は、各社でこれまで行ってきた点検管理方法やその記録などを活用できるようにするためである。配管減肉については、各社で既に重要な劣化要因であるとして自主的に指針を策定して管理を行ってきた場合も多い。いずれの指針も、基本的にこれまでの肉厚点検データから減肉傾向を予測

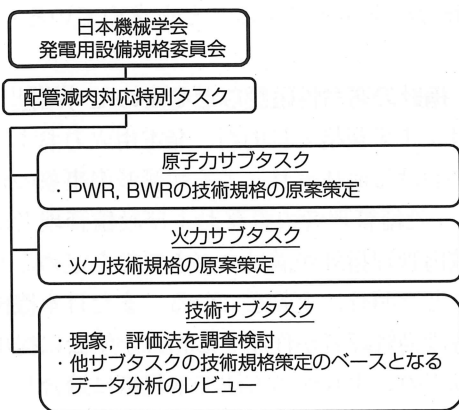


図-1 日本機械学会における配管減肉管理規格策定の体制^[9]

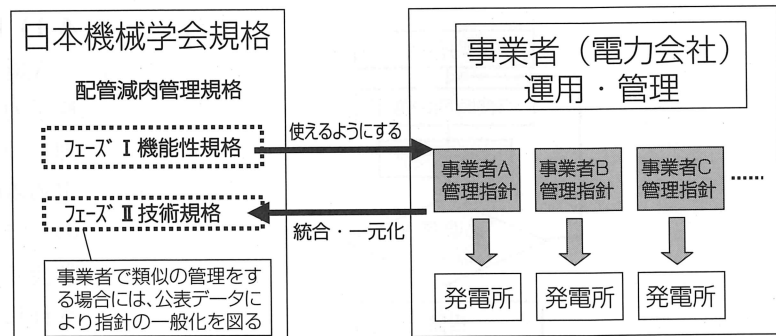


図-2 機能性規格、各設備管理者で策定する指針、技術規格の関係^[9]

して管理を行うが、点検部位や点検周期などの管理法は会社毎に異なっている。学会では、これまでの点検結果を活用するために各社の点検管理指針を（おそらくはこれを機に最新のプラントデータも使って見直して）使えるようにすることが合理的と判断した。

3-3) 第二ステップとしての技術規格の制定^{[5],[9]}

配管減肉管理に関する規格の策定の次のステップは、この機能性規格に従い、PWRおよびBWRと火力発電プラントに適用される運用指針が満足すべき技術的要求事項を規定する技術規格（以下PWR規格、BWR規格、火力規格）を策定することである。現在火力規格については2006年3月に制定済み^[10]であり、またPWR規格、BWR規格についてもその原案が特別タスクで完成し、2006年5月以降、上部委員会である発電用設備規格委員会で書面投票、公衆審査などを行った上で制定される予定である。それぞれの設備管理者は、これらの規格に合致した運用指針を定めてゆくことになる。

3-4) 技術規格の根幹／肉厚測定による管理

ここで機能性規格で求められる技術規格あるいは各事業者が策定する管理指針における管理法の概略を説明する。基本的に肉厚測定に基づく管理を実施し、肉厚測定をどの部位で、いつ、どのように行い、その部位の肉厚測定に基づく減肉速度および余寿命の算出法、その評価結果に基づく次回測定時期の決め方、配管の補修や交換などの措置（補修、取替など）をとる時期や方法などを規定することが求められている（図-3）^{[5],[9]}。

肉厚管理を行う場合、減肉が想定される各偏流発生部位で、ある程度空間的な減肉傾向がわかるように複数の点で肉厚計測を行う。

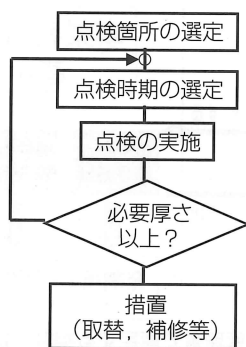


図-3 肉厚測定による管理の流れ^[10]

肉厚測定による管理の一例として1990年にPWR事業者が作成した管理指針^[2]における余寿命算出、次回測定時期や措置をとる時期の決め方について簡単に説明する。まず、初回の測定時期を決める。減肉予測のために、初期設定減肉速度・減肉率を、二相流と水単相流の条件および流速、温度条件をパラメータとした表で推定する。この初期設定減肉率を用いて、国の技術基準で規定される必要最小厚さに至るまでの余寿命を算出し、余寿命があらかじめ決められた制限値になる前までに初回測定を行う。肉厚測定を行った後の単位時間あたりの減肉量すなわち減肉速度については、基本的には前回の測定値との差から一次関数の傾き、もしくは全データの最小自乗近似により求める。これらの評価により、再度肉厚測定をしたり、措置をとったりすることを求めている。

水質条件の違いやこれまでの管理の経緯により減肉傾向は変化するため、対象とする現象、肉厚測定箇所の選定、初回測定時期の設定、詳細測定を実施するかどうか等は異なってくる。各技術規格の策定におけるこれらの項目は、それぞれの形式のプラントの実測データに基づいて決められ、その技術的妥当性については、技術サブタスクでの各現象の専門家により技術評価した。

4. 機能性規格が規定を求めている事項^{[5],[9]}

機能性規格は、配管減肉に対する健全性を確保するための技術規格や各設備管理者が作成する指針の満たすべき要件を規定しており、減肉管理のベースとなるものであるため、その中身に触れておく。機能性規格の構成は、A.総則、B.設備設置者の責務、C.指針が満たすべき要件からなり、全体として判断基準を規定すること、評価方法を明確にすることを求めている。

4-1) 目的、指針の適合性確認などを定めた「総則」

A.総則では、まず規格の目的が、発電用火力および原子力設備における流体流れによる配管減肉事象の管理について、「設備管理者の責務および設備管理者が定める配管減肉管理指針が満たすべき要件を定めるもの」であることを明確に定義している。また日本機械学会では、各設備管理者が作成する指針が学会に提出されれば、以下のいずれかの方法で本規格に適合しているかどうかを確認することを規定している。

・自己診断に基づいた適合性確認（事業者が指針を

作成したことを学会が確認)

- ・ 指針の項目が機能性規格の要求を満たしていることを学会で確認
- ・ 指針の内容が機能性規格に準拠していることを詳細にレビューして確認

4-2) 品質保証体制の要求事項を規定した「設備管理者の責務」

B.設備管理者の責務では、管理実施に係る組織の責任と権限を明確にすること、管理業務をする要員の力量、教育訓練、文書の承認、レビュー活動、記録法、および指針の検証と改善の必要性など、設備管理者の品質保証体制のあり方について記載している。本項の内容は通常の規格には見られないものであるが、配管減肉は管理箇所が非常に多く、確実に管理を行うためには品質保証体制が重要なキーポイントとなることから、特に規定している。

4-3) 実際の管理の仕方を規定する「指針が満足すべき要件」

C.指針が満足すべき要件では、B節の基本的考え方に従って作成された規格、指針が満足すべき要件を具体的に規定している。まず適用設備や対象とする減肉現象を明確化することを求めている。また、文書、記録が管理者にわかりやすく、かつ後々使用しやすいようにするための内容を定めている。その上で配管減肉管理のプロセスの定め方を記載している。ここでは、試験対象部位、試験実施時期、試験方法の定め方、結果の評価方法および評価結果に基づき実施する補修、取替などの措置の仕方を定めることを要求している。

5. 現象分類の重要性^{[5],[11]}

機能性規格では、C節で対象とする減肉現象を明確化することを求めている。現象が異なれば、減肉速度に対する温度・圧力・流速といった熱流動条件、pHや溶存酸素などの水化学条件、配管材料の組成などの材料条件に対する配管減肉量の感度が全く異なっても不思議ではなく、それを考慮するかどうかで管理の仕方も変わってくるためである。

1990年代前半までは、配管減肉の原因の多くは腐食による化学的作用(コロージョン)と浸食・壊食(エロージョン)による機械的作用が重畳したものと考えられ、

「エロージョン・コロージョン」と称されてきた。しかし最近の技術的知見を総括してみると、配管減肉のメカニズムは腐食が乱流によって助長される化学的作用が支配的なもの(図-4)と、極めて大きな衝撃力の発生による機械的作用によるもの(図-5)に大別することができるのが主流のようである。前者は「流れ加速型腐食(Flow Accelerated Corrosion: FAC)」、後者は「エロージョン(Erosion)」と呼ばれる。

実際に両現象において発生しうる衝撃力(流体力)を比較してみると、流れ加速型腐食が発生しやすいとされる水単相流のオリフィス下流側における流体の壁面に対する剪断力は10Pa以下のオーダーである(図-6^[13])一方、エロージョンの代表例である液滴衝撃エロージョンおよびキャビテーション・エロージョンでは、100MPa

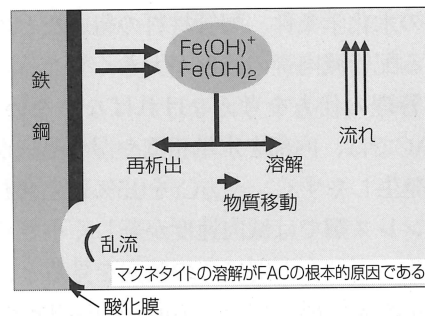
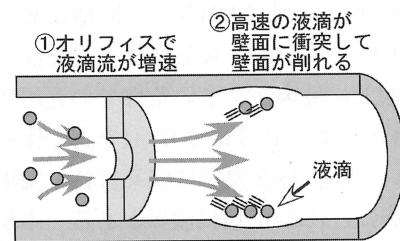
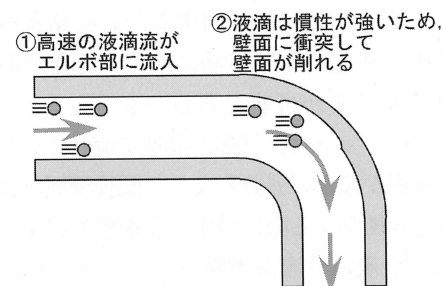


図-4 FAC発生メカニズムの模式図^[12]



オリフィス部での液滴衝撃エロージョン



エルボ部での液滴衝撃エロージョン

図-5 液滴衝撃エロージョンの発生メカニズムの模式図^[12]

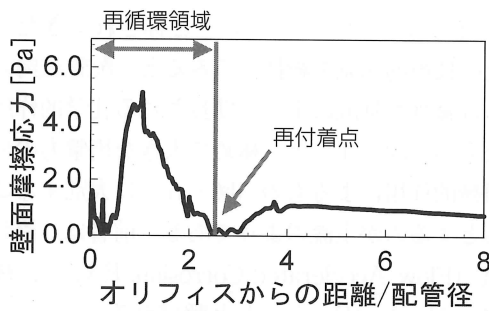


図-6 オリフィス下流域管壁面に作用する壁面摩擦応力に関する電中研のLES解析コードMATISによる解析例 (Re: 約10⁷, 絞り面積比: 約0.37)^[13]

からGPaオーダーにまで及ぶと言われている。すなわち流れ加速型腐食とエロージョンでは、流体によって壁面に及ぼす衝撃力が10⁶程度以上異なると推測された。

このようにメカニズムが異なれば、減肉速度に対する温度・圧力・流速といった熱流動条件、pHや溶存酸素などの水化学条件、配管材料の組成などの材料条件に対する配管減肉量の感度が大きく異なる。それら考慮して管理の仕方を考えなければならない。

実際FACでは、内部を水単相流や湿り蒸気が流れる炭素鋼で発生しやすく、一方Crを0.5%以上含む低合金鋼やステンレス鋼では減肉速度が著しく小さくなるとされている。プラント別にその傾向を見ると、火力発電ではりん酸塩処理、AVT (All Volatile Treatment: 揮発性物質処理) などによりFACによる減肉が抑制される高pH条件とし、またBWRでは同様に減肉が抑制される15ppb以上の溶存酸素を含む水質条件とされ、いずれも比較的減肉が小さい条件での運用がなされている。PWRでは、AVTによりpHを高く保って減肉を抑制しているが、熱交換器に銅系材料を使用しているために実際にとれるpH値に限界がある。本現象は比較的配管を広範囲で減肉させ、大口径管を大破断させる可能性のある現象であるため、特にその管理が重要である。しかし広範囲に減肉するために超音波厚み計等による肉厚測定により容易に検出が可能であり、適切に管理することが可能であるとも言える。

一方エロージョンは、気体が高速で流れている状況において、液相が細かい液滴となって配管壁面に100m/sec前後の高速で衝突する際に発生する衝撃力により配管材料が減肉する現象 (液滴衝撃エロージョン) (図-5) や、オリフィスなどでの減圧に伴って発生する蒸気泡が圧力回復により潰れる際に発生する衝撃圧によるキャビ

テーション・エロージョンなどがあるが、水質はほとんど影響しないといわれているし、材料因子もステンレス鋼でわずかに耐エロージョン性がある程度であり、低合金鋼では炭素鋼とほとんど変わらないといわれている。

エロージョンによる損傷モードはピンホールになりやすく、国内外の事例調査でも大破断に至った例は調査した範囲内では見られなかった。すなわち、破損した場合の影響度はFACの場合と比較すると、小さいと言える。

米国やフランスで規制当局より管理を義務づけられているのはFACのみであり、エロージョンは対象とはなっていない。

以上の内容の詳細は、日本機械学会の規格策定において特別タスクの作業会の一つである技術サブタスクで、2005年9月に現象のメカニズムと影響パラメータ、評価法等に関する調査結果を「配管減肉現象に関する技術的知見の現状」としてとりまとめている。本資料は平成18年4月に発刊された機能性規格 (増訂版) に参考資料^[5]として掲載されており、それを参照されたい。

6. 減肉管理の高度化と技術開発の方向性

本章では、日本機械学会での配管減肉管理規格策定の動向を踏まえ、今後の検討課題の認識とそれに基づく技術開発について説明を加えたい。

減肉管理は、FACとエロージョンの両方について実施する必要がある。まずFACの管理は、火力、原子力を問わずプラントにおける肉厚の点検がベースとなる。管理規格上の問題は、実機における減肉率測定の見込みが無く、誤差要因を見込んで保守側の規格を策定すると、水質条件等により減肉が発生しにくい箇所でも肉厚点検による管理が必要になることである。今後、水質条件や流動状況の減肉に対する影響を定量化できれば、管理の必要な点検箇所の合理的抽出が可能となると考える。

このようなFACに対する各パラメータの影響を定式化したコードにより点検箇所を抽出する管理は、米国ではEPRIのCHECWORKSコードを使用することがNRCより是認されている。またフランス電力公社EDF (Electricite de France) では、米国と同様FACの各パラメータ影響とプラントデータに基づいたBRT-CICEROコードを開発し、フランス規制当局より同コードにより配管減肉評価することが義務化され

ている。EDFによれば同コードの使用により、点検点数を大幅に減らしたと報告されている。

しかしこれらは、米国やフランスのプラント仕様と管理条件に対してチューニングされたものであり、実際国内プラントに適用すると合わない場合もあるようである。基本的にこれらのコードのベースとなるプラントデータはブラックボックスとなっており、国内プラントデータに基づくコードの構築が必要である。

FACに対する各パラメータの影響を流体および水化学の観点で把握し定式化する研究を現場のニーズをよく調査し、対応しなければならない。

一方エロージョンについては、ピンホールリークで留まるケースが多くFACほど重要性が高くないと考えられている。しかし貫通口が開いてしまえばプラントを止める必要も生じるため、その対策は事業者として重要である。特に液滴衝撃エロージョンによるピンホールの事例も散見されるようである。

ピンホールが開くということは比較的狭い範囲で損傷することを意味するため、その点検による検出は意外と難しい。このため、局所的な流速がエロージョン限界流速に達しているかどうかを判定できるツールの開発も必要となる。

7. おわりに

配管減肉管理規格は、機能性規格、火力規格が制定され、PWR規格とBWR規格も制定作業の最終段階にある。これらの規格あるいは規格案は保守側に策定されており、配管減肉管理をすることにより、本規格がなかったら発生したかもしれない事故の多くを防止できると考える。一方これらの規格は非常に短期間で策定したためかなり保守側で、最適化の余地のあるものになっている。例えばフランスでは、減肉予測コードBRT-CICEROを使用した管理が規制当局から認められており、健全性を確保するために必要な1定検あたりの肉厚計測箇所数を大幅に減らした経験もあると言われている。今後は現場のニーズを調査した上で、フランスで策定されたような減肉予測コードの開発などの研究開発、および最新の知見を反映した規格の改定を行っていく必要があると考える。

謝辞

配管減肉対応特別タスク幹事の宮野廣氏、火力サブタスク幹事の浜田晴一氏、原子力サブタスク幹事PWR—WG主査の中村隆夫氏およびBWR—WG主査の波木井順一氏には、本原稿の内容につきまして貴重なコメントをいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 宮園、植田、ほか、「サリー原子力発電所の配管破断事故」日本原子力学会誌 Vol.29(1987)952-969.
- [2] 原子力設備二次系配管肉厚の管理指針(PWR)平成2年5月(1990).
- [3] 原子力安全・保安院「関西電力株式会社美浜発電所3号機二次系配管破損事故について(最終報告書)平成17年3月30日」(2005).
- [4] 原子力安全・保安院、(独)原子力安全基盤機構「米国の減肉管理に関する規制について」総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会美浜発電所3号機2次系配管破損事故調査委員会(第3回)資料3-2-1.
- [5] 日本機械学会発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格(2005年版)増訂版JSME S CA1-2005(2006).
- [6] Wu, P.C., "Erosion/Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning in U.S. Nuclear Power Plants," NUREG-1344(1989).
- [7] Chexal, V.K. et al., "Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program," NSAC/202L-R2, EPRI(1999)(初版は1996).
- [8] ASME Code Case N-597, "Requirements for Analytical Evaluation of Pipe wall Thinning," Section XI, Division 1(2004).
- [9] 宮野「日本機械学会における配管減肉管理規格の策定方針」機講論No.05-1, Vol.8(2005)50-51.
- [10] 日本機械学会発電用設備規格 火力設備配管減肉管理に関する技術規格(2006年版).
- [11] 関村「減肉管理に関わる現象の学会における検討状況」機講論No.05-1, Vol.8(2005)54-55.
- [12] 太田、他4名「火力・原子力発電用配管の減肉現象」動力Vol.55 No.264(2005)春季号 1-14.
- [13] 森田「疑似圧縮性法による3次元CFDコード"MATIS-I"の開発と縮流部流れへの適用」、第83期日本機械学会流体工学部門講演会G603, pp.3(2005).
(平成18年5月12日)