

(解説)

# 油圧ショベルの低燃費を支えるシミュレーション技術

## Simulation Techniques for Fuel Efficiency Improvement in Hydraulic Excavators



今西悦二郎\*<sup>1</sup>(工博)  
Dr. Etsujiro IMANISHI



南條孝夫\*<sup>1</sup>  
Takao NANJO



筒井 昭\*<sup>2</sup>  
Akira TSUTSUI

Simulation techniques to reduce the fuel consumption of hydraulic excavators are presented in three categories: First, a strongly non-linear dynamic simulation technique is described for a coupling system with a non-linear hydraulic system and a linkage system. Second, a technique is presented for evaluating fuel consumption in an engine powering the hydraulic pump in the real time digging operation of a hydraulic excavator. Finally, a dynamic simulation technique is presented for evaluating the efficiency of a hybrid system consisting of power electronics equipment, electric-hydraulic equipment, and a linkage system.

まえがき＝地球温暖化や原油価格の高騰によって、油圧ショベルにおいても、低燃費化への要求が近年ますます強くなってきた。油圧ショベルは、図1に示すようにエンジンによって油圧ポンプを駆動し、油圧配管、バルブからなる動力システムによって作業機(アタッチメント)を駆動する。油圧ショベルにおける低燃費化の取組としては、これまでポンプ制御や配管の圧力損失低減などによって燃費改善が行われてきたが、これだけでは燃費改善を図ることは限界となっており、システムとしての損失評価および改善が求められていた。また、エンジンとバッテリーシステムからなるハイブリッドシステム<sup>1), 2)</sup>の適用も有効と考えられる。

本稿では、油圧ショベルの低燃費化を図る上で重要となるシステムのシミュレーション技術について紹介する。まず、強い非線形性を示す油圧システムとリンクシステムが連成するシステムの非線形動的解析技術と、油圧ショベルの掘削作業時に発生する油圧ポンプ動力をリアルタイムにエンジンに負荷するエンジン燃費評価技術を紹介する。

次に、ハイブリッド動力源を構成する発電機、バッテリー、コンバータなどのエレクトロニクス機器、アクチュエータシステムを構成する電動油圧機器、およびアタッチメントのリンクシステムからなるトータルシステムを

モデル化したハイブリッドシステムの動的シミュレーション技術を紹介する。

### 1. 油圧ショベルの動力評価と低燃費化

#### 1.1 油圧システムにおける動力損失の寄与度解析

油圧ショベルの油圧システムとリンクシステムの連成解析を行うため、リンクシステムでは変位、油圧システムでは流量積の状態量を用いることによって、連成するシステムをMCK形<sup>3)</sup>の非線形運動方程式<sup>3)</sup>に記述した。これによって、陰解法による数値積分を行うことができ、非線形性の強いシステムでも安定して解析することが可能となる。リンクシステムでは、物体が空間を大きく運動することによる幾何学的非線形性を考慮したはり要素<sup>4)</sup>、およびトラス要素を用いた。これらの要素を用いて、油圧ショベルのアタッチメントをモデル化した(図2)。油圧システムは、配管要素、バルブ要素、シリ

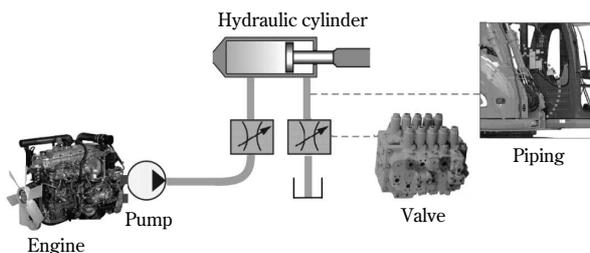


図1 油圧ショベルの動力システム  
Fig. 1 Power train system on hydraulic excavator

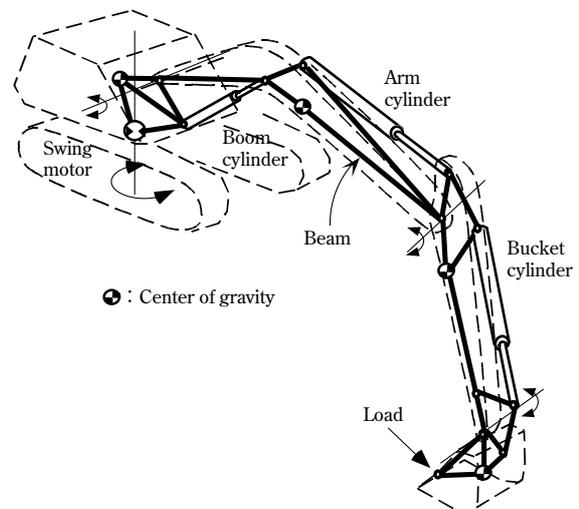


図2 油圧ショベルのアタッチメントのモデル化  
Fig. 2 Modeling of attachment on hydraulic excavator

\*<sup>1</sup>(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 \*<sup>2</sup>(株)神戸製鋼所 技術開発本部 電子技術研究所

ンダ要素<sup>5)</sup>などを用いて図3のようにモデル化した。シリンダ要素ではポートからの作動油の流入・流出によってストロークが伸縮し、部材端における負荷に応じてシリンダ内部に圧力が生じる。シリンダ要素では油圧システムの作動油流量積とリンクシステムの節点変位が連成しており、連成解析が可能となる。

本解析の妥当性を検証するため、油圧ショベルの掘削作業2サイクルの解析を行い、実験結果と比較した。掘削作業は大別すると掘削、ブーム上げ旋回、ダンプ、ブーム下げ旋回の4つの作業形態に分かれ、走行以外の全てのアクチュエータが作動する作業である。アクチュエータ挙動、ポンプ動力、および燃費の実験結果と解析結果の比較を図4に示す。実機の性能を解析でほぼ再現できており、燃費の誤差は0.4%以内であった。この解析結果から、油圧システムの各部位において発生する動力損

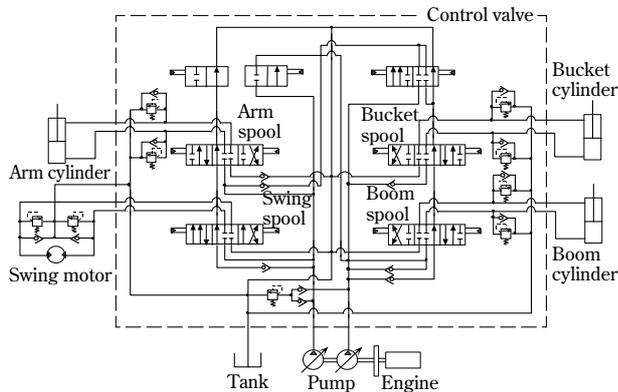


図3 油圧ショベルの油圧システム  
Fig. 3 Hydraulic system on hydraulic excavator

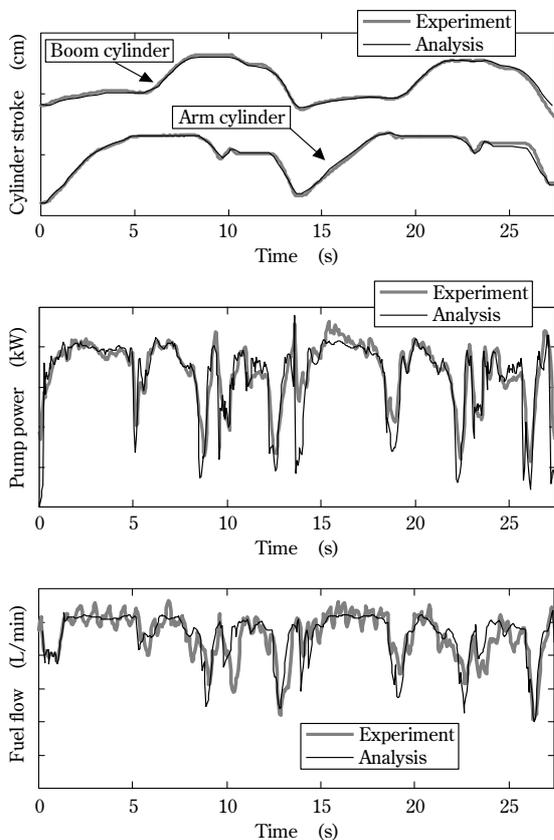


図4 掘削作業時の実験結果と解析結果の比較  
Fig. 4 Comparison with experimental and analytical results in digging operation

失が得られる(図5)。さらに、油圧システムの配管、バルブ開口、バルブ通路などの要素別に損失を分類した結果を図6に示す。この図は、掘削作業時に油圧システムにおいて発生する動力損失の寄与度を示すものであり、定量的な省エネ対策指針を策定する上で極めて重要な結果である。図6の結果に基づいて、損失動力の大きな部位に対しては、半減させることを目標とし、動力損失の具体的な削減対策方針を策定した。

本技術によって、油圧ショベルの掘削作業時の複雑な動きを詳細に、かつ高精度に解析することが可能となり、省エネに対する寄与度を明確にすることで、バルブなどの圧力損失による動力損失を最も効果的に低減し、省エネ性の高い油圧ショベル用油圧システムを実現することが可能となった。

## 1.2 油圧システムの損失動力低減技術

損失寄与度解析結果から、油圧システムにおける動力損失の主要部位の一つとして、バルブ内の圧力損失が挙げられる。内部通路を全て拡大すると、バルブ全体が大きくなり過ぎて油圧ショベル本体へ搭載することが困難となる。そこで省エネ寄与度解析結果から、最も効果的な通路に着目し、通路拡大を図った。

また、省エネ寄与度解析結果から、油圧システムにおける動力損失の主要部位の一つとして、旋回用油圧シ

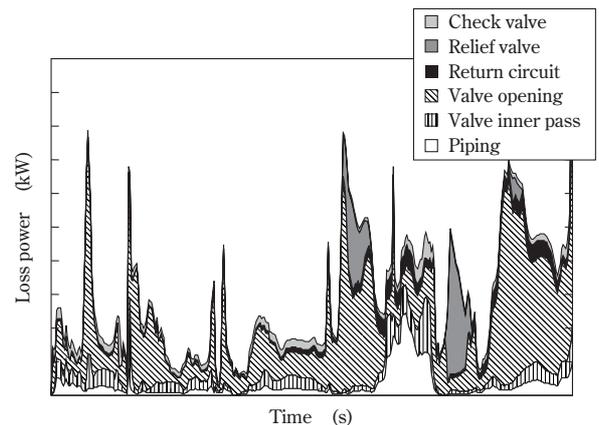


図5 掘削作業時の油圧損失動力の解析結果  
Fig. 5 Simulation results of hydraulic loss power in digging operation

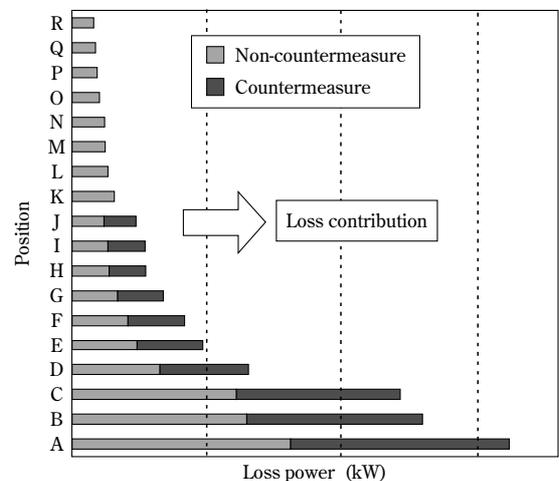


図6 油圧システムにおいて発生する動力損失の寄与度解析結果  
Fig. 6 Simulation results of power loss contribution generated in hydraulic system

テムのリリーフ弁の損失が挙げられる。そのため、ポンプ流量制御と組み合わせた旋回リリーフ制御を考案した。従来、油圧ショベルの旋回用油圧システムでは、加速中に油圧ポンプからの供給流量を旋回用油圧モータへ流すとともに、リリーフ弁から無駄に捨てる流量があった。そこで、リリーフ弁の特性に着目し、ポンプ圧力信号によってポンプ供給流量を制限しながら、リリーフ弁から無駄に捨てていた流量を削減し、旋回に必要な圧力を確保する制御を考案した。その他、油圧システムでは、ポンプ制御とバルブ制御を最適に組合せた制御方式を考案し、ポンプ供給流量の最適化を図り、油圧システムの損失を大幅に削減することに成功した。

### 1.3 エンジンの燃費評価および改善

図7は操作レバーに応じた実作業時の負荷をシミュレーションによって求め、それをリアルタイムにエンジンに負荷するエンジンHILS(Hardware In the Loop Simulation)システムの構成概念図である。本システムはアニメーション表示ができ、実際にアタッチメントの動きに合わせて操作レバーを操作することが可能である。エンジンHILSシステムによって、システム解析とエンジンベンチ評価技術を融合させることができ、負荷パターンがない場合でも、各種操作でエンジン燃費性能を評価することが可能となった。本評価技術によって、油圧ショベル搭載時のエンジン燃費をベンチ上で高精度に評価することが可能となった。エンジン単体だけでなく油圧ポンプを含めたトータルシステムとして燃費改善に取組み、油圧ショベルに最適なエンジン燃費性能を実現するエンジン・ポンプ制御技術を新たに開発することができた。

トラックメーカーから購入したエンジンは、燃費特性がトラック用にチューニングされている。そのため、油圧ショベルの負荷に適したチューニングが必要となる。トラック用エンジンでは回転数の低い領域で燃費特性を高めており、油圧ショベルで使う領域では燃費特性が悪化する。そこで、エンジンHILSシステムを活用し、油圧ショベルに適したエンジン燃費特性の最適化を行い、高出力域での燃費を大幅に改善することができた。

エンジン・ポンプ制御に関しては、従来は生産性を優先し、最高回転数から最大馬力点を狙う制御を行っていた。しかし回転数が高く、出力の低い領域ではエンジンの燃焼効率が悪いことが問題であった。そこで使用回転数を低く抑え、かつ一定に制御するアイソクロナス制御

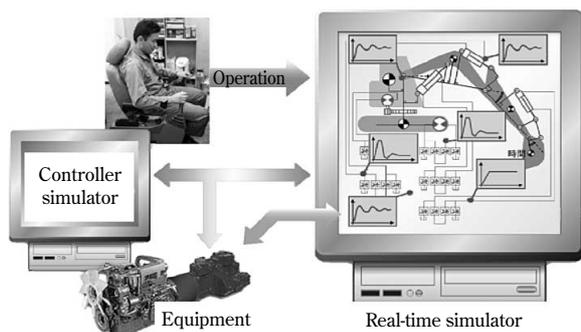


図7 エンジンHILSシステムの構成概念図  
Fig. 7 Configuration diagram of engine HILS system

を採用し、ポンプ制御とエンジン回転数の最適化を図った。その結果、燃費を大幅に改善することができた。

### 1.4 低燃費効果

油圧システムの省エネ技術、およびエンジン燃費改善技術によって、20tクラスの油圧ショベルにおいて、従来機に対して、掘削Sモード時に作業量同等で燃費20%削減、掘削Hモード時では燃費同等で作業量8%向上を確認した。また、(社)日本建設機械化協会規格(JCMAS)における燃料消費量計測結果では、従来機と比べ17%の燃費低減となった。

## 2. 油圧ショベルのハイブリッドシステムの開発

### 2.1 ハイブリッドシステムの概要

ハイブリッドショベルの外観図およびシステム構成をそれぞれ図8、図9に示す。各アクチュエータは、基本的には独立なシステムによって構成する。そのため、従来の油圧ショベルにおいて発生していた油圧配分損失を低減させることができる。また、動力源はエンジン動力の平準化のためにエンジンとバッテリー・キャパシタからなるシリーズ方式のハイブリッド動力源システムである。

### 2.2 動力源システム

動力源システムはシリーズ方式としているため、ハイブリッド動力源から各アクチュエータへの動力は、直流母線によって電力供給される。そのため、各アクチュエータの消費動力に応じて電力が供給され、各アクチュエ

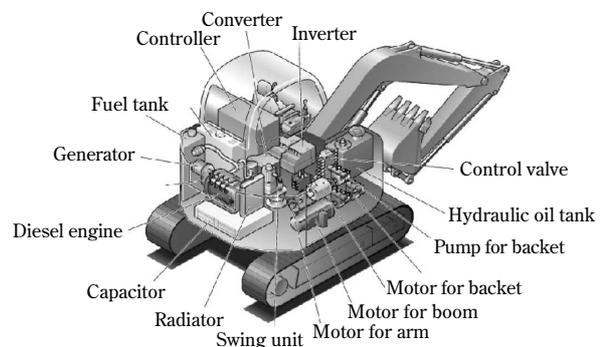


図8 ハイブリッドショベルの概念図  
Fig. 8 Conceptual scheme of hybrid excavator

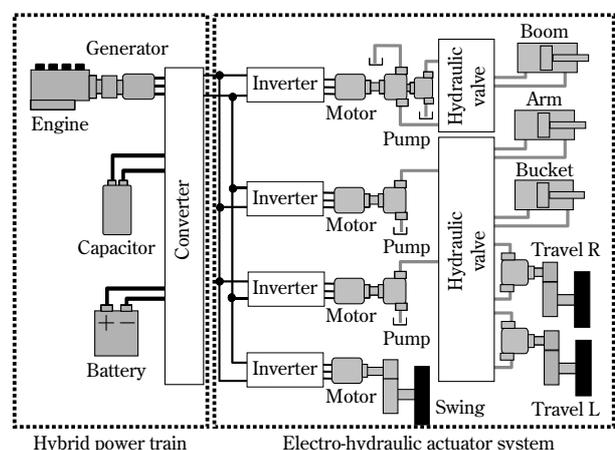


図9 ハイブリッドショベルのシステム構成図  
Fig. 9 System diagram of hybrid excavator

ータに配分される。アクチュエータの消費動力に対して動力源からの電力を安定して供給するために、直流母線の電圧を一定に保つ制御（直流母線電圧制御）を行う。

### 2.3 アクチュエータシステム

アクチュエータシステムは、ブームシステム、アーム・バケット走行システム、および旋回システムからなる。ブームシステムは、アタッチメントの自重を保持しており、ブーム上昇時に蓄積した位置エネルギーを回生するため、電動機、両回転油圧ポンプ、制御弁を用いたクローズドな電動油圧システムとしている。ブーム下げ操作時に発生するブームヘッド側の油圧動力を両回転油圧ポンプに作用させ、その動力によって電動機に回生電力を発生させる。発生した回生電力は、キャパシタおよびバッテリーに充電される。アーム・バケットシステムは、電動機、片回転ポンプ、方向制御弁などを用いたオープンシステムである。旋回システムは、回転運動であることから油圧は用いず、電動機駆動システムとしている。走行システムは、アーム・バケットの油圧源を用いた電動油圧駆動システムとしている。

### 2.4 システム方程式

ハイブリッドショベルの数式モデルは、リンクシステム、油圧システム、パワーエレクトロニクスシステム、およびエンジンシステムの要素ごとに生成された方程式を有限要素法的に組合せ、システム方程式を構築<sup>6)</sup>する。ハイブリッドシステムの数式モデルの構成を図10に示す。各要素において生成された特性マトリックス、および動力源システム、アクチュエータシステムにおけるシステム指令を、システム方程式のマトリックスおよび外力項に組込む。その後、システム運動方程式を時間ステップごとに解き、シミュレーションを実行する。本手法では、時間積分法としてニューマークβ法、収束計算法としてニュートン法を用いることによって数値解析的な安定性を確保することができる。

### 2.5 性能評価解析および精度検証

ハイブリッドシステムのトータルシミュレーションモデルを用いて、各種の性能評価解析を行った。また、ハイブリッドショベルの性能実証機を製作し、実機試験により、従来機との性能比較を行っている。

実作業時の動力評価の例として、図11に油圧ショベルの代表作業の一つである掘削積込作業のアクチュエータ動力の性能評価結果を示す。操作はブーム、アーム、バケット、旋回の4アクチュエータの複合操作である。従来システムとの比較のために、ハイブリッドシステムではアクチュエータ駆動電動機の入力電力の総和、従来システムでは駆動油圧ポンプの出力動力をアクチュエータ投入動力として比較している。ハイブリッドシステム

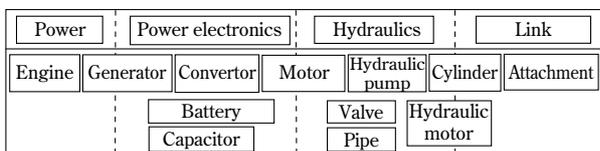


図10 ハイブリッドシステムの数学モデルの構成  
Fig.10 Configuration of mathematical model of hybrid system

では、とくにアクチュエータ出力（作業有効出力）の低い作業後半に大幅な投入動力低減が図られており、狙いとする油圧低出力時の油圧配分ロスが低減できていることがわかる。図12にこの作業でのアクチュエータシステムのエネルギー収支を示すが、この作業では従来油圧システムに対し約45%の動力低減が図られている。

上記の掘削積込作業を含めて油圧ショベルの代表的な作業パターンでの燃費性能評価をトータルシミュレーションモデルにより評価し、実機性能との比較検証を行った。図13に各作業での従来機の作業燃費に対するハイブリッドシステムでの燃費削減効果の実測結果とシミュレーション結果の比較を示す。作業により、従来機と比較し燃費削減効果に差はあるが、全ての作業において40%以上の燃費削減効果があることがわかった。シミュレーション結果と性能実証機の実測結果の比較では、燃費削減効果の評価がどの作業においても5%以内の誤差となっており、狙いどおりの性能が確保された。このこ

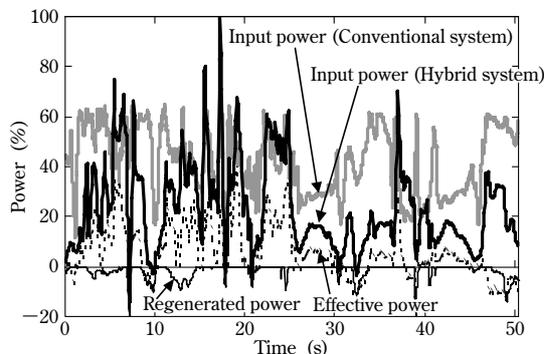


図11 掘削積込作業のアクチュエータ動力の性能評価結果  
Fig.11 Actuator power on excavating and loading

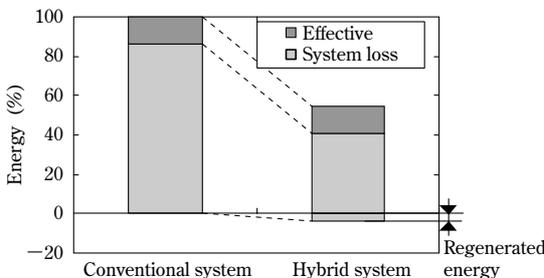


図12 掘削積込作業におけるアクチュエータのエネルギー収支  
Fig.12 Energy consumption of actuator in excavating and loading

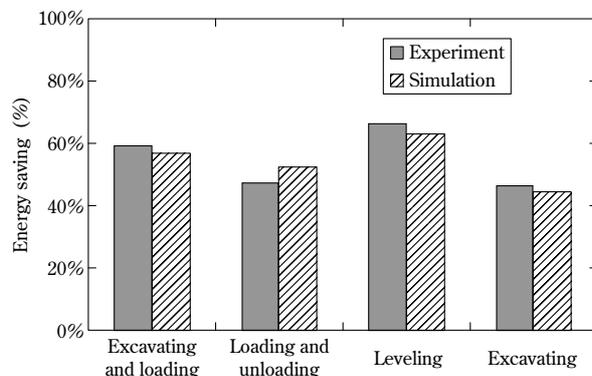


図13 各作業モードにおける燃料消費削減効果の実験結果およびシミュレーション結果  
Fig.13 Experimental and simulation results of fuel energy saving effect on each operation mode

とから、本手法によるシミュレーション技術は、ハイブリッドショベルの燃費性能を精度よく事前予測できる、実用的な技術であることが示された。

**むすび**＝本稿では、省エネ型油圧ショベルの開発において取組んだ省エネ技術の概要を紹介した。今後、油圧ショベルの省エネ化の要求はますます高まると考えられるが、現状の動力システムにおける損失改善だけでは大幅な改善は難しく、新たなシステム開発が求められる。そのためには、パワーエレクトロニクスを含むシステム評価技術が不可欠となる。今後とも、さらなる省エネ化に取組み、地球環境保護に貢献していきたい。

#### 参 考 文 献

1) 井上宏昭. 建設の施工企画. 2009, No.707, p.30-34.

2) 鹿兒島昌之. 建設の施工企画. 2009, No.707, p.40-44.

3) 今西悦二郎ほか. 日本機械学会論文集. 2003, Vol.69, No.685, p.2336-2343.

4) 頭井 洋ほか. 日本機械学会論文集. 1986, Vol.52, No.483, p.2814-2821.

5) 今西悦二郎ほか. 日本機械学会論文集. 1987, Vol.53, No.492, p.1711-1719.

6) 南條孝夫. 日本機械学会論文集. 2011, Vol.77, No.782, p.3694-3704.