

6. ハイブリッドショベルの開発

— 省エネシミュレーションと実証実験 —

(株) 神戸製鋼所 機械研究所 振動音響研究室 ○南條 孝夫
コベルコ建機 (株) 開發生産本部 要素開発部 鹿児島 昌之
小見山 昌之

1. はじめに

近年、地球温暖化防止や経済性などの観点から、建設機械においても、作業中の燃料消費量を低減することが求められてきている。建設機械の中でも最も稼働台数の多い油圧ショベルに関しては、これまで油圧機器やエンジンの損失低減などに取り組んできているものの、それだけでは限界があり、大幅な燃料消費量低減を図るためには大胆なシステムの見直しが必要である。その低減対策として注目されているのが、自動車 で用いられているハイブリッドシステム¹⁾²⁾の適用である。

このような状況下で、当社は省エネルギー効果 40%以上を目標に、新エネルギー・産業開発機構 (NEDO) およびコベルコ建機株式会社と共同で 6 tクラスのハイブリッドショベルを開発した。

本報では、ハイブリッド化による設計段階での省エネルギー効果の評価を行う目的で、ハイブリッドショベルのシステム全体をモデル化した動的シミュレーションモデルを開発し、ショベルの実作業における多様な作業状態を反映した燃費評価モードに基づき、燃料消費削減効果の予測を行うとともに、実証機製作による燃料消費削減効果の実証とシミュレーション評価の検証を行ったので、その結果を報告する。

2. 油圧ショベルのハイブリッド化の狙い

油圧ショベルは、掘削などの高負荷作業と水平引き・均しなどの低負荷作業を短時間で繰り返すため大きな負荷変動を受ける。また、基本アクチュエータとして、ブーム、アーム、バケット、旋回、左右走行という分散配置されたアクチュエータを持っており、これらのアクチュエータに対し、高エネルギーを高応答に供給するために油圧システムが採用されている。

図1に従来油圧ショベルの動力活用状況を示す。従来の油圧ショベルでは、最大負荷に対応できる動力を油圧ポンプから供給し、余剰動力を熱として放出しながら機械の動きを制御しているため、作業有効動力が低い場合であっても、複合操作時のコントロールバルブでの各アクチュエータへの流量分配や合流のための絞り損失やブリード損失が大きくなり、投入動力はあまり下がらない。また、アタッチメントの下降時や旋回停止時など外部から与えられる位置エネルギーや運動エネルギーも熱として放出している。図2に従来ショベルのエネルギー伝達図を示すが、平均するとエンジン出力の20%しか有効活用されていないのが現状である。

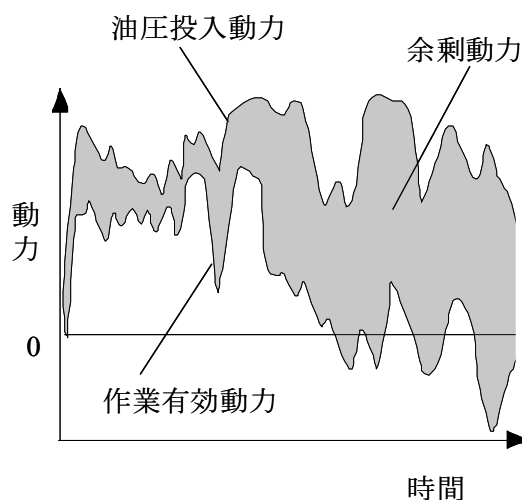


図1 ショベルの動力活用状況

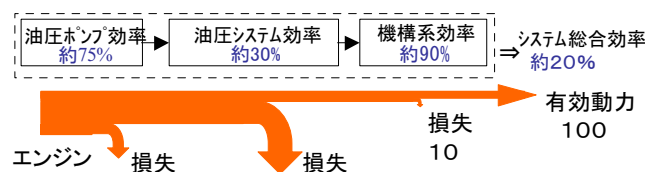


図2 エネルギー伝達図

これらの状況を踏まえ、油圧ショベルのハイブリッド化については、以下のような狙いでシステム開発を行った。

- ・アクチュエータの独立駆動による油圧合流・分配ロスの低減
- ・電動油圧駆動アクチュエータによる制御ロスの低減
- ・位置エネルギーや運動エネルギーなどの回生エネルギーの再利用

また、動力供給を行う動力源の効率化については以下の狙いとした。

- ・バッテリー、キャパシタを用いたエンジン負荷の平準化と高効率領域運転
- ・エンジン間欠運転による燃料消費量削減

3. ハイブリッドショベルのシステム構成

今回開発したハイブリッドショベルの外観図、システム構成をそれぞれ図3、4に示す。6tクラスのショベルを対象としており、システム構成は図のようなシリーズハイブリッドシステムである。

アクチュエータシステムとしては、6個のアクチュエータを準独立な電動油圧駆動のアクチュエータとしており、油圧でのアクチュエータ間の干渉を最小限に抑えて従来発生していた油圧システム内での損失を低減させている。また、ブームについては、電動機、両回転油圧ポンプを用いたクローズドシステムとしており、ブーム上昇時に蓄積した位置エネルギーをブーム下降時に、油圧を介して電気エネルギーとして回生できるものとなっている。旋回は回転運動であることから、油圧は用いず、電動機で直接駆動するシステムとなっており、旋回停止時には、上部旋回体の運動エネルギーを電気エネルギーとして回生する。走行システムも回転運動であることから、電動機駆動に適しているが、電動機と減速機を直結するコンパクトな走行システムの開発が困難であることから、アーム、バケットの油圧源を用いた電動油圧駆動としている。

動力源は、エンジン、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となっている。動力源として、バッテリー、キャパシタを用いることで、ショベルのような負荷変動が激しい場合でも、負荷に対するエンジンパワーの過不足分をバッテリーで補うこ

とができるため、エンジン負荷を平滑化し、従来ショベルより小さなエンジンを用いてエンジンの高効率運転が可能となり、燃費を向上させることができる。

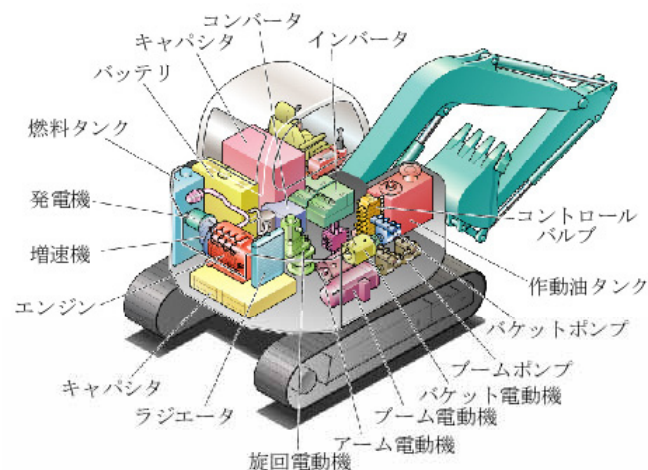


図3 ハイブリッドショベル外観図

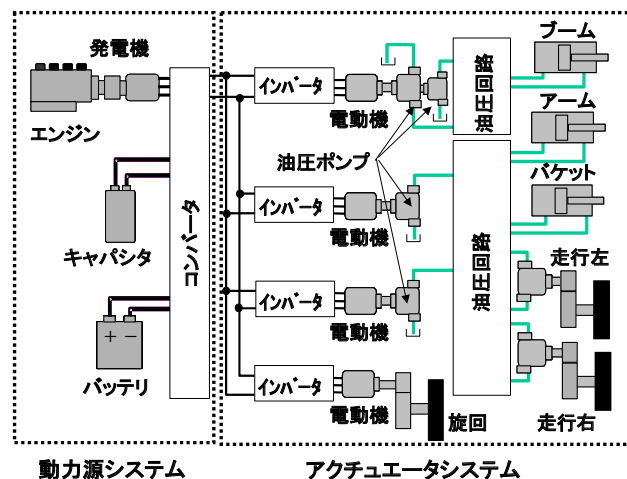


図4 ハイブリッドシステム構成図

表1 ハイブリッドシステム主要機器仕様

	仕様
ブーム	20kW (3000min ⁻¹)
アーム (走行左)	11kW (2000min ⁻¹)
バケット (走行右)	11kW (2000min ⁻¹)
旋回	6kW (3000min ⁻¹) 減速比 = 330
エンジン	22kW (1600min ⁻¹) 減速比 = 4.15
発電機	20kW (6600min ⁻¹)
バッテリー	6.5Ah (80セル)
キャパシタ	11.3F (132セル)

また、本システムは、エンジンパワーを一旦電気に置き換えているため、バッテリー、キャパシタ出力に余裕がある場合には、ショベルの作業中であってもエンジンを停止して作業を行うことができ、エンジンの間欠運転により、さらに燃料消費を抑えることができる。

表1にハイブリッドシステム主要機器の仕様を示す。上段はアクチュエータ駆動電動機の仕様、下段は動力源機器の仕様である。駆動電動機は、各アクチュエータの最高出力と同等以上の能力を持つように設定しており、動力源機器仕様は、連続重負荷作業条件とエンジン/発電機とバッテリーとの電力分担を考慮して決定している。エンジン出力については、従来油圧ショベルの約半分である。

4. シミュレーションモデル

シミュレーションの目的は、ハイブリッドショベルの燃料消費量予測、および操作性設計を行うことである。図5にシミュレーションモデルの構成を示すが、ハイブリッドショベルの構成要素である動力源の駆動系および電力系、アクチュエータの油圧系、およびショベルのアタッチメントなどのリンク機構系を全てモデル化し、システム全体の応答を求める動的シミュレーションモデルを当社で開発した非線形動的解析コードSINDYS³⁾を用いて構築した。SINDYSは有限要素法

をベースにしており、上記の各要素を式(1)に示すMCK形の微分方程式に記述することによりモデル化できる。

$$M\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} + C\dot{\mathbf{q}}_{n+1} + K\mathbf{q}_{n+1} = \mathbf{f}_{n+1} - \bar{\mathbf{f}}_n \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{q}_{n+1} はリンク機構系では時刻 t_{n+1} における変位、油圧系では流量積、電力系では電荷を表す状態量ベクトルである。 \mathbf{f}_{n+1} は t_{n+1} における外力項であり、 $\bar{\mathbf{f}}_n$ は非線形要素力を各時刻で線形化することによる補正外力である。

このシミュレーションモデルは、燃費性能や省エネ評価を行うのが主な目的であり、各機器の効率特性や損失特性が実機特性を反映したものにしなければならないため、機器特性については、機器の単体試験で採取した特性データから式(1)の形式にあうような特性パラメータを同定し、モデル化している。

以下にシミュレーションモデルで考慮した主な機器の効率、損失特性を示す。

- ・バッテリー、キャパシタの充放電効率特性
- ・発電機、電動機の効率特性
- ・エンジンの燃費率特性
- ・電気系制御器の効率特性
- ・配管、バルブの圧力損失特性
- ・制御弁の絞りによる圧力損失特性
- ・油圧ポンプ、モータの容積効率、機械効率特性
- ・主要機器以外の補機での消費動力

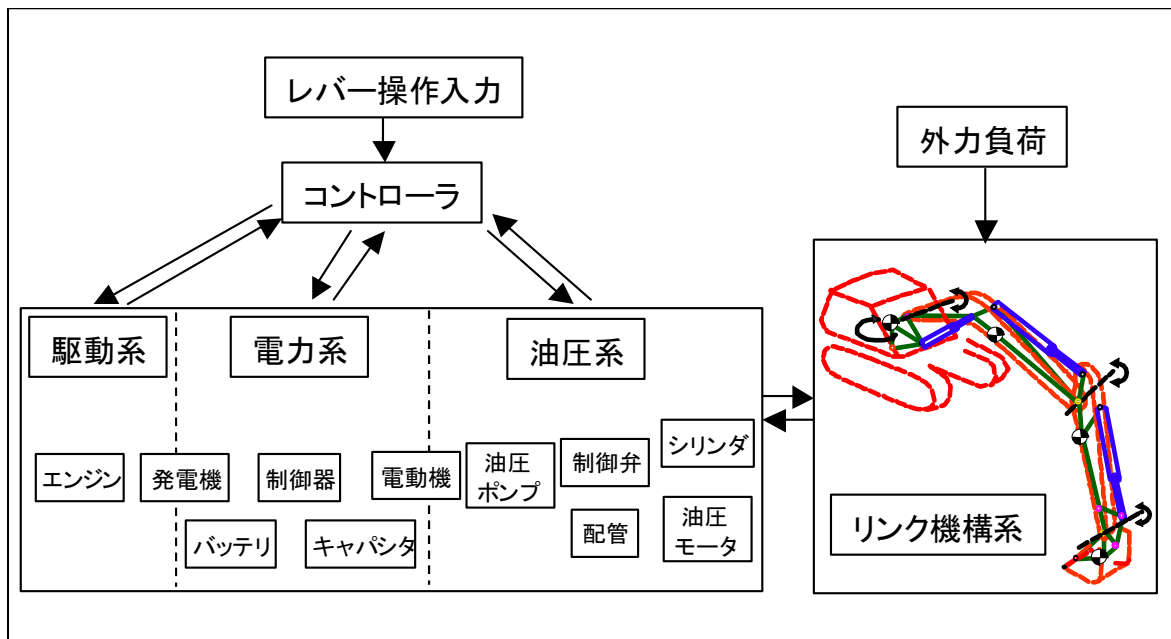


図5 ハイブリッドショベルのシミュレーションモデル構成

5. 実作業時の燃費シミュレーション

5.1. 対象作業

燃費評価の対象作業としては、6tクラスのショベルの作業として代表的な下水管理設工事を対象とし、独自に行った作業現場での稼働状況調査から策定した標準負荷モード⁴⁾に準じた作業で評価することとした。表2に標準負荷モードのサイクルタイムと時間比率を示す。エンジン停止を除いて軽負荷から重負荷の7作業を対象としており、現実に近い作業での燃費評価である。作業中のアクチュエータ速度および負荷は従来油圧ショベルで実測した負荷データを用い、作業工程にあわせてこれらの作業を組み合わせることで約1時間の連続作業負荷データを作成し、これをシミュレーションでの評価対象作業とした。

表2 標準負荷モードの構成

モード	作業パターン	サイクルタイム (s)	時間比 (%)
1	掘削積み込み	45	18
2	積みおろし	35	8
3	均し	50	8
4	吊り	80	10
5	矢板	75	7
6	走行	20	3
7	アイドリング	120	23
8	エンジン停止	80	23
合計			100

5.2. シミュレーション結果

(1) アクチュエータ動力

図6に評価作業の1つである掘削積み込み作業におけるアクチュエータ動力を示す。従来油圧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、従来油圧システムでは実測した駆動油圧ポンプ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では特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、狙いとする低出力時の複合操作における油圧配分ロスが低減できていることがわかる。ただし、作業前半では急操

作時の電動機の加速や掘削中の低速、高負荷領域での電動機効率の低下などにより一部で従来油圧システムよりも悪い部分も出ている。図7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。表中、回生エネルギーは各アクチュエータの回生エネルギーの総和を示しているが、複合操作時には回生電力は他のアクチュエータ電力として使用されるため、動力源に回生されるエネルギーはこれよりもさらに小さくなり、実作業での動力源システムへの回生はあまり期待できない。これらの傾向は他の評価作業についても同様の傾向である。

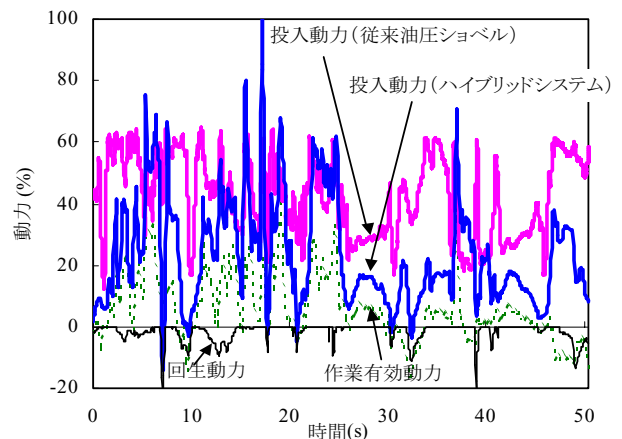


図6 掘削積み込み作業でのアクチュエータ動力

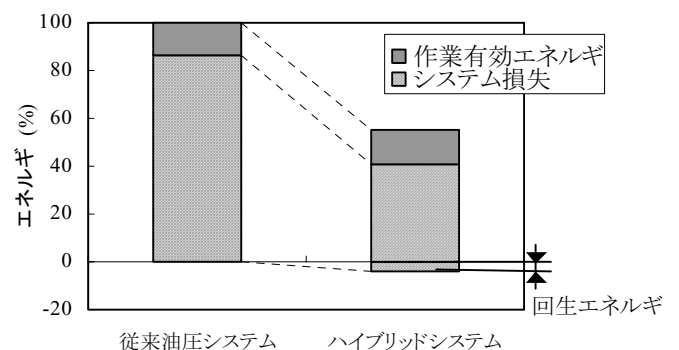


図7 掘削積み込み作業での消費動力比較

(2) 標準負荷モードでの燃費

図8に上記標準負荷モードでのアクチュエータ消費動力（動力源出力）、動力配分および燃費のシミュレーション結果を示す。図中、EDモードとは、アクチュエータ負荷とバッテリー、キャパシタの充電状態により、作業中であってもエンジンを停止し、バッテリーとキャ

パシタのみでアクチュエータを駆動する電気駆動モードを意味し、図にはEDモードあり/なしの2条件の結果を示した。EDモードなしの場合には、バッテリー、キャパシタの充電状態(SOC)が時間とともに高くなり、エンジンは高効率領域での運転が維持できないが、EDモードありの場合には、エンジンを間欠運転することで高効率域での運転が維持できていることがわかる。図9に標準負荷モード全体に対するシミュレーションでの燃費評価結果を示す。従来油圧ショベルに対し、64%の燃費削減効果が期待できる結果となった。

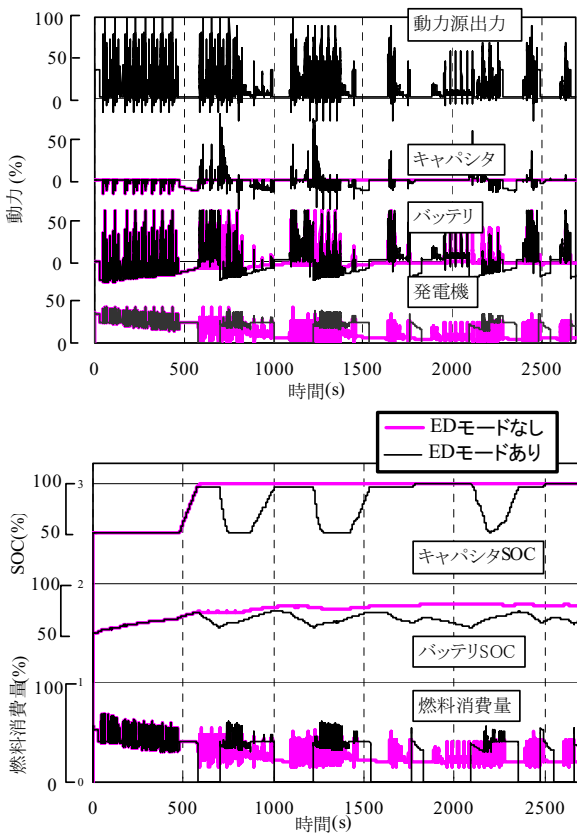


図8 標準負荷モードのシミュレーション結果

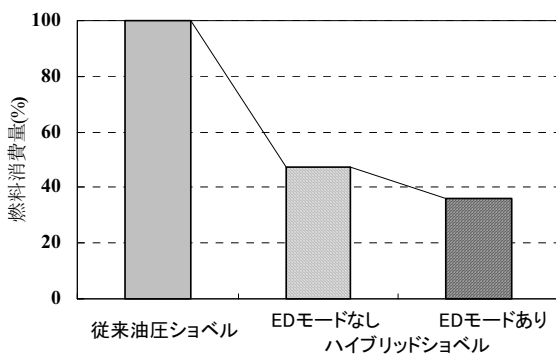


図9 標準負荷モードの燃費予測結果

6. 実証試験結果と精度検証

本研究開発では、燃費性能を実証するために、実際に6tクラスのハイブリッドショベル実証機を製作し、各種の試験により、従来油圧ショベルのとの性能比較を行った。作業機としての各アクチュエータの作動速度や応答性、操作性評価などの試験では、従来油圧ショベルと同等の性能を有していることを確認している。以下では、燃費削減効果についての実証結果とシミュレーション予測精度の検証結果を示す。

6.1. 作業モード別燃費評価

標準負荷モードの主要作業を含む4作業について、個別にハイブリッド実証機での燃費測定を行った。

各作業とも従来油圧ショベルでの作業サイクルタイムを目標に作業を行い、複数回の計測の平均値で評価した。図10に、各作業での従来油圧ショベルに対する燃費低減効果の実測結果とシミュレーションでの評価結果の比較を示す。作業により、燃費削減効果に差があることがわかった。シミュレーション結果と実測結果の比較では、作業により差にばらつきがあるが、どの作業も5%以内の燃費削減効果の誤差となっており、狙い通りの性能が確保され、またシミュレーションによる事前予測が精度よく行えていることが確認できた。

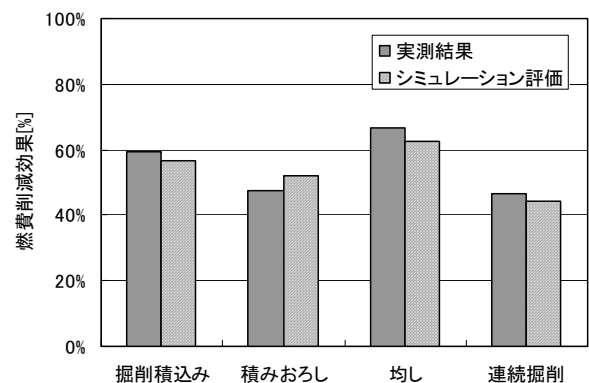


図10 作業モード別燃費評価結果

6.2. 下水枝管理設工事での燃費評価

実証試験では、実際の現場作業での燃費を評価するために、試験場に幅4m、長さ30mのアスファルト舗装道路を造成し、専門工業者に実証機を供与して、下水枝管理設の模擬工事を実施した。舗装剥取りから下水管理設と舗装修復まで、規定通りの1日工事を3回

実施し、燃費データを採取した。

この試験での従来油圧ショベルに対するハイブリッドショベル実証機での燃費比較を図 11 に示す。図中、ハイブリッドショベルについては、標準負荷モードのシミュレーションで事前予測した結果と実測結果を合わせて書いている。燃費実測結果はシミュレーション予測結果とほぼ同じとなっており、目標とする 40% 以上の省エネルギー効果が実証された。また、実作業での燃費性能は標準負荷モードとしてパターン化した作業モードに基づいてシミュレーションを行うことにより精度よく事前予測できることもわかった。

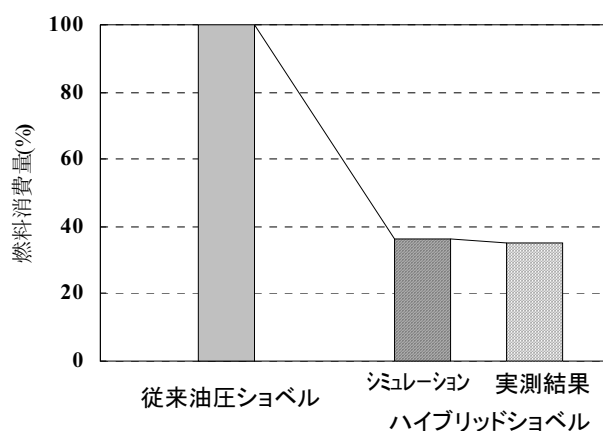


図 11 下水枝管工事での燃費評価結果

7. まとめ

建設機械の省エネルギー化のための方策として、6 t クラスの油圧ショベルを対象に、ハイブリッド化による燃費削減効果をシミュレーションにより評価するとともに、ハイブリッド実証機を製作し、ショベルの実作業での燃費評価を行った結果、従来油圧ショベルに対して 65% の燃費削減効果があることが実証された。また、ショベルの作業をパターン化した標準負荷モードに基づくシミュレーションにより、実作業での燃費性能が精度よく行え、設計段階での評価ツールとして活用できることがわかった。

ハイブリッドショベルの市場導入・普及については、コストダウンが重要となる。今後の商品化では、ハイブリッドシステムを構成する機器のコストダウンが必要である。

参考文献

- (1) 佐々木正和, 野津育朗, 荒木修一, 山田良昭, 菅野裕之, キャパシタ式 CNG ハイブリッドバスシステムの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 32, No. 4, p181-186, 2001
- (2) 緒方誠, 須々木裕太, 武田信章, シリーズ式 HEV ノーステップバスの開発, 自動車技術会論文集, Vol. 33, No. 1, p101-104, 2002
- (3) 藤川猛, 井上喜雄, 今西悦二郎, 非線形動的解析プログラム” SINDYS”, R&D神戸製鋼技報, Vol. 34, No. 3, 1984, p109
- (4) 小見山昌之, 絹川秀樹, 田中恒次郎, 6 トンクラスショベルの省エネルギー効果評価モード, 建設の機械化, No. 626, April 2002, p28-33