

カーエアコン用電動コンプレッサの回転1次振動低減における機構解析の活用 Utilization of Multibody Dynamics Simulation in Reducing First-Order Rotational Vibration of Electric Compressors for Car Air Conditioners

太田 貴之^{*1} 佐伯 愛^{*1} 戸澤 耕作^{*1}
Takayuki Ota Ai Saeki Kosaku Tozawa

*1 コンプレッサ事業部 技術部

要旨 電気自動車(BEV)に搭載されるカーエアコン用電動コンプレッサは、従来の振動・騒音源であったエンジンがないため、高レベルの振動・騒音低減が求められている。本稿では、機構解析を活用して、設計の初期段階から回転1次振動の原因となるコンプレッサ作動時のアンバランス発生を低減した取組みについて報告する。また、最適化ツールを用いて寄与度分析を行い、多くの設計諸元や運転条件がアンバランス発生に及ぼす影響を効率的に確認した事例を紹介する。

キーワード: 電動コンプレッサ, スクロール式, 回転1次振動, 機構解析, 寄与度分析

Abstract Electric compressors for automotive air conditioning systems in battery electric vehicles (BEV) require high levels of vibration and noise reduction due to the absence of traditional sources of vibration and noise, such as the engine. This report outlines efforts to reduce the unbalance generated during compressor operation, a major cause of first-order rotational vibration, through multibody dynamics simulation in the early design stages. Furthermore, the study introduces a case in which contribution analysis was performed using optimization tools to efficiently assess the impact of various design parameters and operating conditions on unbalance generation.

Keywords: Electric Compressor, Scroll-Type, First-Order Vibration, Multibody Dynamics Simulation, Contribution Analysis

1 はじめに

カーエアコンシステムは、冷媒ガスの循環によって熱の吸収と放出を行い、車室内の温度を制御する。このシステムの心臓部であるコンプレッサ(圧縮機)は、冷媒を圧縮して循環させる役割を持つ。従来のコンプレッサはエンジンの回転をベルトで伝達して作動させていたが、近年、電気自動車(BEV)やハイブリッド車(HEV)の増加にともない、車両電源の電力でモータを回転させて作動する電動タイプへの移行が進んでいる(図1)。

BEVでは従来のエンジンに代わって主機モータや車体に電動コンプレッサが取り付けられる。BEVはエンジンによる振動・騒音の発生がなくなるため、車両の静粛性が高まっている。そのようななかで、電動コンプレッサは主機モータが停止していても単独で作動すること、また、車体に取り付けられる場合は作動による振動が車室内に伝わりやすくなることから、コンプレッサの振動や騒音が目立つようになる。そのため、電動コンプレッサには、これまで以上の高レベルの低振動・低騒音化が求められている。

また、電動コンプレッサは車室内空調だけでなく、車両電池の冷却などの熱マネジメントにも使用されるようになってきているため、冷房能力のアップ

が必要となっている。冷房能力を増やすには、コンプレッサの容量(エンジンの排気量に相当)を増やす方法があるが、体格が大きくなるため、車両によっては搭載できなくなることがある。その場合、容量はそのままに回転数を増やすことで対応するが、一般に高い回転数で作動させると振動、騒音は大きくなる。

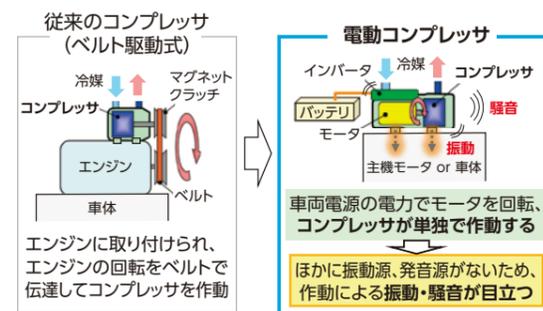


図1 カーエアコン用コンプレッサの電動化
Fig.1 Electrification of Car Air Conditioning Compressor

低振動・低騒音化のほかに、電動コンプレッサには省動力化も求められている。車両電源の電力を使用するため、動力を抑えられれば、車両の航続距離が長くなる。

これらのニーズから、当社の電動コンプレッサは圧縮形式に高回転数でも静粛性と性能に優れた

スクロール式を採用しているが、冷媒ガスを回転して圧縮するため、回転不釣り合いがあると高回転数での作動時に大きな振動(回転1次振動)が発生してしまう。

本稿では、スクロール式電動コンプレッサの作動により生じる振動の低減を目的に、設計の初期段階で機構解析を活用することで作動時の回転不釣り合いを予測し、回転1次振動を低減した取組みと、多くの設計諸元や運転条件の影響を効率的に確認するため、最適化ツールを用いた寄与度分析を実施した事例について紹介する。

2 電動コンプレッサの概要

2.1 電動コンプレッサの構造

当社の電動コンプレッサ(ESBシリーズ)の構造を図2に示す。主軸受で支持されたシャフトをモータで回転(最大10000 r/min)し、シャフト先端にある偏心ピン、ブッシュを介して旋回スクロールを固定スクロールに対して公転運動(旋回)させることで冷媒ガスを圧縮する。旋回スクロール(質量 M1、主軸受からの軸方向距離 L1)はシャフト回転軸から偏心した位置(偏心距離 r1)で公転するため、このままではシャフトの回転により遠心力の不釣り合いが発生する。この不釣り合いを解消するため、旋回スクロールに対向する位置にバランス(質量 M2、偏心距離 r2、主軸受からの軸方向距離 L2)をブッシュに一体化して配置している。また、モータ回転子の2か所にバランスウェイト(質量 M3、M4、偏心距離 r3、r4、主軸受からの軸方向距離 L3、L4)を配置することで、シャフト回転で生じる遠心力の釣り合い(静バランス、式(1))と、主軸受まわりに生じるモーメントの釣り合い(動バランス、式(2))をとっている(図3)。本稿では静バランスの改良について述べる。

遠心力の釣り合い(静バランス)

$$M1 \cdot r1 + M4 \cdot r4 = M2 \cdot r2 + M3 \cdot r3 \quad \text{式(1)}$$

モーメントの釣り合い(動バランス)

$$M1 \cdot r1 \cdot L1 + M3 \cdot r3 \cdot L3 = M2 \cdot r2 \cdot L2 + M4 \cdot r4 \cdot L4 \quad \text{式(2)}$$

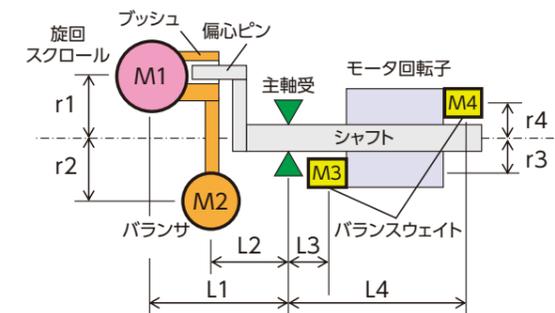
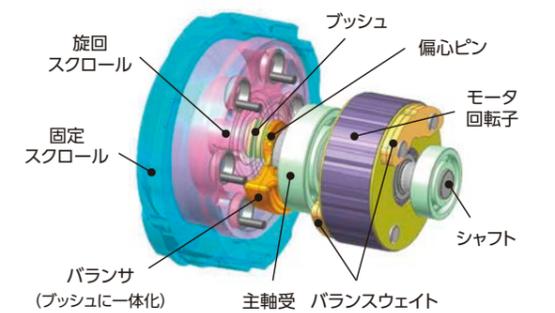


図2 電動コンプレッサ(ESB)の構造
Fig.2 Structure of Electric Compressor (ESB)

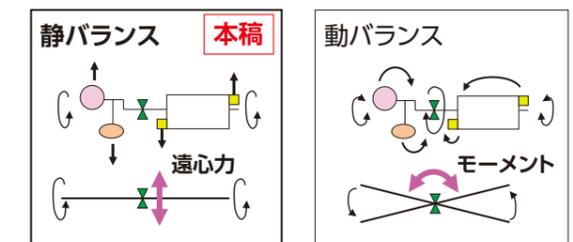


図3 静バランスと動バランス
Fig.3 Static Balance and Dynamic Balance

2.2 ブッシュの揺動

ブッシュ(バランス一体)は偏心ピンに対して揺動することで、旋回スクロールの偏心距離(公転半径)を調整する機構を備えている(図4)。スクロールの渦巻き形状の出来栄や作動時の挙動により、固定スクロールと旋回スクロールとの間に隙間が生じる場合、詰まるようにブッシュが揺動し、内部漏れを防止する。逆に干渉する場合は避けるようにブッシュが揺動し、スクロールの損傷を防ぐ。

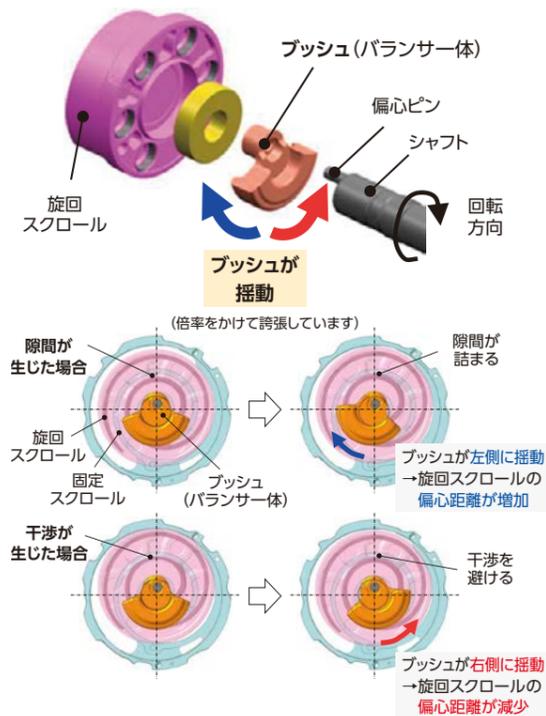


図4 ブッシュの揺動による偏心距離(公転半径)の調整
Fig.4 Adjustment of Orbital Radius by Bush Swinging

2.3 アンバランスの発生

静バランスや動バランスがとれていないと、作動時に回転1次振動が発生する。設計の際には2.1で述べたように各種のバランスを配置することでこれらのバランスをとるが、作動時には各部品間の隙間や変形によって部品が理想の位置からずれる(例: 回転スクロールの偏心距離 r_1 が変化するため、アンバランスが生じる。また、そのずれを吸収するためにブッシュが揺動し、ブッシュに一体化されたバランスが移動(r_2 が変化)するため、これによってもアンバランスが発生してしまう。

低振動を実現するには、これらの部品の作動時の挙動を考慮したバランス設計を行う必要があるが、構成部品が多く、各部品が接触しながら複雑に動くため、手計算での予測には限界がある。

3 回転1次振動低減の取組み

そこで、機構解析^{*1}を活用することで、作動時の各部品の挙動を予測し、作動時のアンバランス発生量の見積りを行うことにした。解析には機構解析ソフトウェア RecurDyn を使用した。

*1 機構解析: 複数部品で構成される機構の動的な挙動を計算(出力として位置、速度、力など)

3.1 機構モデル^{*2}の構築

作動時のアンバランス発生を精度よく再現させるため、以下の点に配慮してスクロール式電動コンプレッサESBシリーズの機構モデルを構築した(図5)。

- ・各部品間の隙間、接触を考慮
- ・偏心距離の調整機構(ブッシュの揺動)を考慮
- ・荷重を受けるシャフト、偏心ピンの変形を考慮
- ・シャフトを指定回転数で回転、回転位相に合わせてスクロールに冷媒ガス圧縮による荷重変動を付与

コンプレッサ内部には、隙間を持つ接触部が多数存在する。一般に機構解析では接触計算をともなうと計算負荷が高くなるが、これらの接触部をなるべく単純な形状に置き換え、専用の接触要素を用いることで計算の負荷を軽くしている^[1]。また、隙間量はパラメータで調整可能にしている。

*2 機構モデル: 複数の部品をジョイントなどで結合し、強制運動や荷重の入力を設定した計算モデル

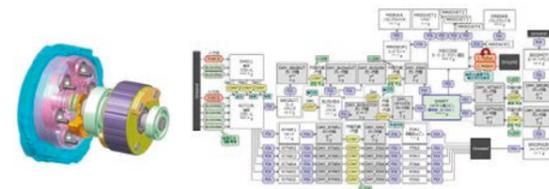


図5 電動コンプレッサ ESB 機構モデルのブロック図
Fig.5 Electric Compressor ESB Mechanism Model

3.2 解析結果に基づく1次振動低減の検討

構築した機構モデルを用いて、発生頻度の高い運転条件で機構解析を行った。部品寸法はすべて図面中央値とした。

回転数 2000~6000r/min での解析結果を図6に示す。各部品の重量に、解析結果から得られた重心位置(回転軸中心からの距離)を掛けた値の総和(静バランス量)を算出し、XY座標のグラフにプロットしている。グラフの原点から離れるほど、静バランスがとれていない状態である。

作動前、部品配置が理想の状態とすると静バランス量はゼロで、グラフの原点に位置する。作動すると、各接触部の隙間の詰まりや偏心ピンの変形が生じ、これを吸収するようにブッシュがシャフト回転方向に揺動、ブッシュに一体化しているバランスの重心位置が移動する。これにより、作動時の静バランスはグラフの原点から左側に離れた

位置にプロットされ、アンバランスが発生することがわかる。また、回転数によってアンバランスの大きさが変化することもわかった。

この解析結果より、作動時に生じる回転1次振動を低減する対策を立案した。作動時に静バランスがゼロになるように、各種バランスの位置や重量を当初の設計からずらす。回転数によってアンバランスの量は変化するため、すべての回転数で静バランスをゼロにすることはできないが、振動がより大きくなる高回転数を狙って、ずれ量を設定する。

この1次振動低減案での解析結果を図7に示す。狙い通り、作動時に静バランスがゼロに近づくことを確認した。

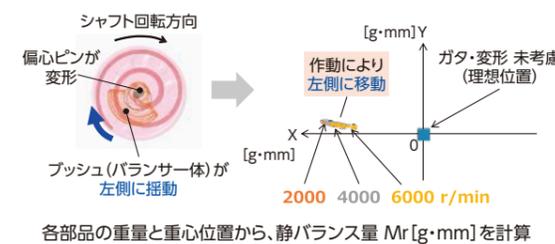


図6 機構解析結果(2000~6000r/min)
Fig.6 Simulation Result (2000~6000r/min)

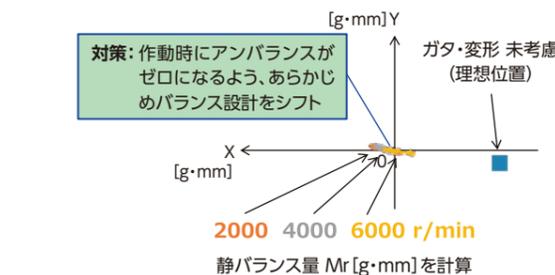


図7 機構解析結果(1次振動低減案)
Fig.7 Simulation Result (Reducing First-Order Rotational Vibration)

3.3 高回転数化の検討

先述の通り、電動コンプレッサには冷房能力アップのニーズが高まっていることから、高回転数においての検討も行った。同じESBシリーズの機構モデルを用いて、回転数を10000r/minとした場合の解析結果を図8に示す。作動時、6000r/minまでの場合とは異なり、ブッシュはシャフト回転方向と反対の向きに揺動し、アンバランスが反対側に生じる結果となった。

これが実際に生じると、10000r/minでアンバランスがゼロになるように調整しても6000r/minでアンバランスがより増加してしまうため、

3.2で示した1次振動の低減案は適用できないことになる。

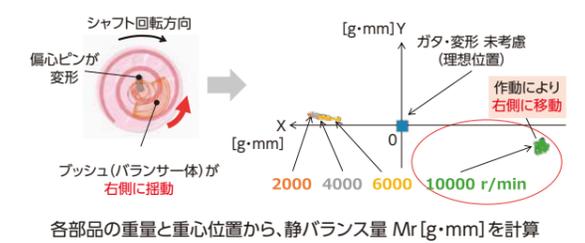


図8 機構解析結果(10000r/min)
Fig.8 Simulation Result (10000r/min)

4 実機評価による確認

解析結果の検証として、実機試験で作動時の部品挙動および振動特性を評価した。

4.1 ブッシュの挙動確認

図9のようにギャップセンサを用い、作動時のシャフトとブッシュとの距離を計測し、ブッシュの揺動角を算出した。結果を図10に示す。

2000~6000r/minではブッシュはシャフト回転方向に揺動し、10000r/minではシャフト回転方向とは逆向きに揺動していることが確認された。これにより、実機挙動が機構解析の結果と同様の傾向であることが確認された。

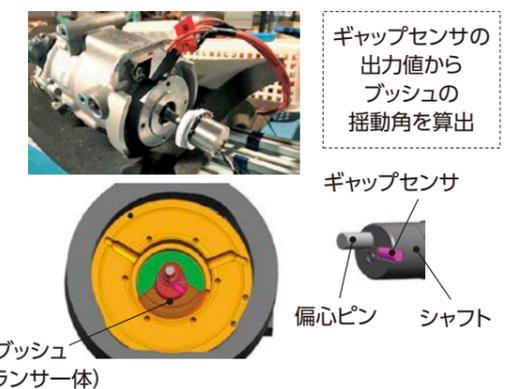


図9 ブッシュの挙動計測
Fig.9 Measurement of Bush Behavior

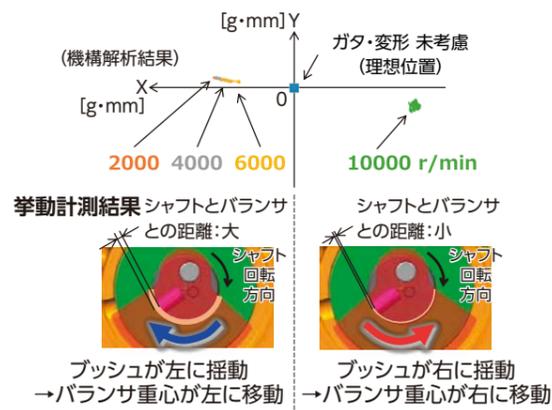


図10 プッシュの挙動計測結果
Fig.10 Results of Bush Behavior Measurement

4.2 振動測定

コンプレッサ作動時の振動測定結果を図11に示す。

3.2で示した1次振動低減案の仕様にて回転数を上昇させたところ、10000r/minに至る前に回転1次成分の振動が急増することがわかった。これにより、機構解析でのアンバランス発生傾向と一致していることが確認された。

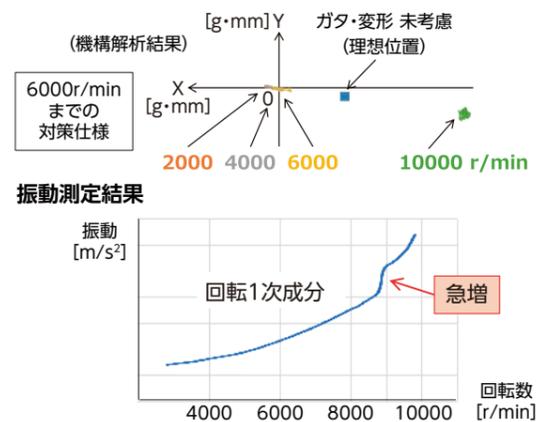


図11 振動測定結果
Fig.11 Result of Vibration Measurement

5 高回転数化への対応

ESBシリーズの構造では、低～中回転数と高回転数とでは内部の挙動に大きな違いがあることが機構解析と実機評価の両方で確認された。機構解析の結果の分析から、このような挙動になるメカニズムの解明も行っているが、ここでは割愛する。

このままでは高回転数で1次振動低減の方策が取れないため、ESBシリーズの後継であるESH

シリーズでは、一部のバランスの取り付け部と形状を変更するなどして、バランス部材の配置と重量配分を変更し、高回転数域においても作動時のアンバランス発生を抑制できる新構造とした(図12)。

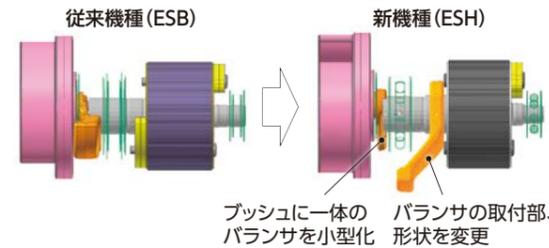


図12 高回転数化への対応
Fig.12 Action for High-speed rotation

6 寄与度分析

前述の解析では、部品寸法はすべて図面中央値のモデルを用い、1つの運転条件で計算をしている。実際は、多数ある構成部品それぞれに寸法や重量、重心位置のばらつきがあり、運転条件も多数存在する(図13)。どの要因が内部の挙動やそれによるアンバランスの発生に影響を及ぼすのかがわかれば、効果的に振動低減の対策ができるが、組合せが膨大なため、総当たりでの計算は非現実的である。

そこで、機構解析と最適化ツールを連成させることで、複数の設計変数(部品寸法、公差、冷媒圧力条件など)の1次振動発生への寄与度の分析を実施した。

最適化ツールには modeFRONTIER を使用、RecurDynと連成させて^[2]、アンバランス発生に直結するプッシュの揺動を決める要因を調査した。その結果の一例を図14に示す。

modeFRONTIERのクラスタ多次元解析により、ある部品の寸法公差が大きく、吐出圧力が低い低負荷な運転条件では、プッシュの揺動角が小さくなりやすい、といった結果が得られている。

この手法により、設計諸元や運転条件が内部挙動に与える影響を効率的に分析することが可能となった。

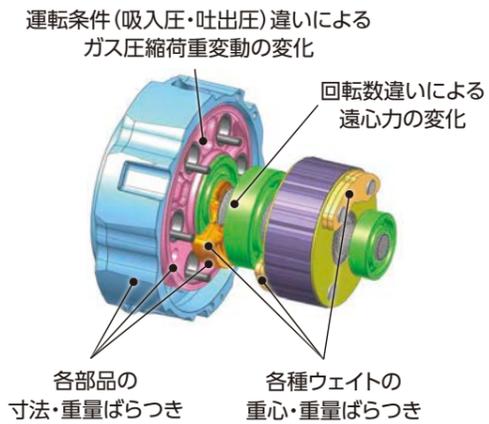


図13 電動コンプレッサにおけるばらつき
Fig.13 Variation in Electric Compressor

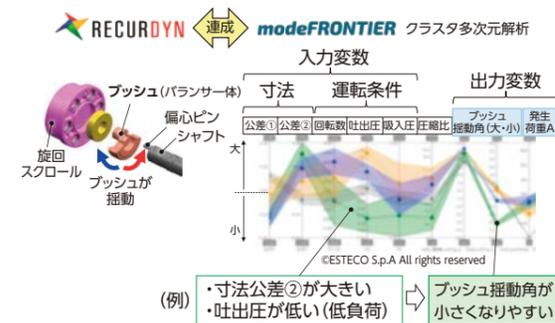


図14 寄与度分析の事例
Fig.14 Example of Contribution Analysis

7 まとめ

スクロール式電動コンプレッサ作動時のアンバランス発生(回転1次振動の原因)について、機構解析を活用することで、隙間や変形を考慮した精度の高い見積りが設計初期段階からできるようになった。また、機構解析と最適化ツールとの連成に

開発の経緯と開発者の思い

電動コンプレッサ開発における機構解析の取組みは2013年より開始しました。作動時の振動・騒音の発生原因を探るにあたって、コンプレッサ内部の挙動測定が容易ではないため、これまではいくつかの予想のもとで仕様を振っての実機評価を中心に行っていましたが、準備や計測に時間がかかり、予想が外れることもありました。そこで、シミュレーションで内部挙動の予測ができればメカニズム解明がスムーズに進むと考え、機構解析を始めました。

コンプレッサ技術部ではさまざまなシミュレーション技術を設計に活用していますが、機構解析については、当初は扱える技術者がほとんどおらず苦労しました。(株)豊田中央研究所の皆様から技術指導を頂き、また実機との合わせ込みを進めることで、精度を確保しつつ計算負荷が高くない機構モデルの構築を行うことができました。今後も、電動コンプレッサのさらなる低振動、低騒音、高効率化、高耐久性を実現するため、解析技術の向上を進めていきます。

より、多くの設計諸元や運転条件の内部挙動への影響を効率的に確認することが可能となった。これらの手法はESHシリーズほかの電動コンプレッサ開発において現在活用中である。

なお、本取組みでは静バランスの改良による回転1次振動の低減を狙いとしているが、同様に動バランスについても改良の検討が可能である。

最後に、今回の取組みにあたり、機構解析の技術指導を頂きました(株)豊田中央研究所、機構解析ソフトウェアRecurDynのサポートで協力いただきましたファンクションベイ(株)をはじめとする社内外の皆様に対し、深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] ファンクションベイ(株):RecurDynリファレンスガイド
- [2] (株)IDAJ:RecurDyn/ProcessNet機能を使ったCATIA-modeFRONTIER連成
(ファンクションベイ(株)技術サポート専用サイトに掲載)

著者紹介



太田 貴之 佐伯 愛 戸澤 耕作