

無段変速機の制御概念

Control Concepts of Continuously Variable Transmissions (CVT)

ロバート・フックス R. FUCHS 蓮田康彦 Y. HASUDA
イヴ・ローテンビューラー Y. ROTHENBUEHLER 松本こず恵 K. MATSUMOTO

This paper gives a general overview of friction type CVTs in automotive powertrain emphasizing on the two concepts of ratio and torque control. These are described and compared from different perspectives, starting with an introduction to their most common designs, to considerations of the basic dynamics and mechanism of interaction observed in CVT powertrains. Distinctions between the two systems are identified, resulting in the establishment of formal definitions of ratio control CVT (RC/CVT) and torque control CVT (TC/CVT). This paper is completed with a new classification of transmissions including, at its root, a first separation between ratio and torque control.

Key Words: CVT, IVT, torque control, interaction, ratio control, traction, friction.

1. はじめに

近年、自動車排ガスの環境への悪影響に対する関心の高まりと原油の供給不足による燃料価格の高騰から、燃費・排ガス削減技術の開発がこれまで以上に求められている。こうした社会情勢の中で、エンジンの運転状態の最適化と優れた走行性能を連続かつ無段階の変速により実現することができる無段変速機（以下 CVT と称す）は、理想的なトランスミッションと言える。CVT は、エンジンからのトルクを連続的に変換してホイールに伝達するシステムであるが、逆に、エンジン負荷を制御するためのアクチュエータと見なすこともできる。これらの目的のためにさまざまな機構が開発されている。当社ではフルトロイダルバリエータの研究開発を進めており、その材料・加工技術開発のみならず、車両システム中での動作を保証するための挙動解析・制御系の研究を実施してきた^{1)~3)}。本報ではそこから得られた知見に基づいて、トロイダル式やベルト式のように有限の接触点により動力を伝達する摩擦伝動式 CVT に焦点をあて、それぞれの制御概念とそれに伴うダイナミクスについて考察した結果を紹介する。

2. 摩擦伝動式 CVT

摩擦伝動式 CVT のバリエータは通常 3 つの要素で構

成される。1 対の外部回転体（円すい型シーブまたはトロイダルディスク）によって囲まれた空間に 3 つ目の中間伝動部材（ベルトまたはローラ）が挟持され互いに接触する。接触点から外部回転体の回転軸までの距離を接触半径と呼び、入力側と出力側の接触半径の比を幾何学的変速比と呼ぶ。接触点に荷重を負荷するために、外部回転体にはクランプ力が与えられる。全動力はそれぞれの接触点に分配されてトラクション力（摩擦力）によって伝達される。外部回転体の伝達トルクは、それに作用するトラクション力の和に接触半径を乗じたものである。一方、トラクション力、クランプ力、その他の内力が中間伝動部材の挙動を決定する。

摩擦伝動式 CVT の特性は、トラクション力の発生機構と制御方法に依存する。トロイダル式では、接触点は高面圧となり完全な EHL（弾性流体潤滑）状態を実現する。この条件下では、接触点において金属表面が互いに接触することなく、介在する油膜の微小なせん断により力を伝達することができる⁴⁾。一方、ベルト式の場合、接触点は通常 EHL 状態に達しない。いずれの場合にも、外部回転体と中間伝動部材の間のスリップとスピンは比較的大きな動力損失を生ずるため、伝達効率において歯車式トランスミッションに劣る原因となっている。

接触点で発生するトラクション力 F_t は、スリップに依存するトラクション係数 μ と接触荷重 F_l の積で表される。

$$F_t = \mu(x, u) F_l(x, u) \tag{1}$$

ここで、トラクション係数は実験的に得ることができ、トラクションカーブとして表現される(図1)。式(1)から分かるように、トラクション力は接触部におけるスリップと接触荷重という二つの変数に依存する。CVTシステムにおいて、スリップは外部回転体の速度(システムの入力 u) および中間伝動部材の位置と速度(システムの状態 x) の関数である。また、接触荷重は外部回転体のクランプ力および中間伝動部材の駆動力(システムの入力 u) と位置(システムの状態 x) の関数である。レシオ制御、トルク制御方式のCVTは、これらの変数に対してそれぞれ固有の感度を有するが、このことはCVTの制御方式を考察する上で重要な指標となる。

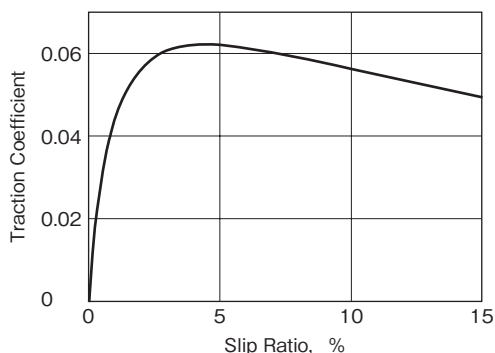


図1 トラクションカーブの例
(フルトロイダルバリエータ)

An example of a traction curve for the full toroidal variator

3. 制御概念

3.1 レシオ制御

システムの入力が変速比を直接決定する場合、CVTはレシオ制御である。自動車製品として普及しているレシオ制御CVT(RC/CVT)は、ベルト式バリエータまたはハーフトロイダルバリエータを使用している(図2)。どちらの場合も、クランプ力によって伝達トルクの上限が決定される。ベルト式バリエータは、円すい型シーブからなる1対のプーリと伝動部材であるベルトとで構成される。各プーリの片方のシーブには油圧ピストンが設置されクランプ力を負荷するが、このうち一方はベルトを駆動し変速比を制御するために用いられる。レシオ制御は、変速比のフィードバックを使用してこのクランプ油圧を制御することで実現される。ハーフトロイダルバリエータでは、ディスクに設置された油圧ピストンまたはローディングカムによりクランプ力を負

荷し、またローラに設置された油圧ピストンによりこれを駆動する。定常状態ではローラの回転軸はディスクの回転軸と交差しているが、ローラをディスク回転軸垂直方向にオフセットすることで、トラクション力のチルト成分が発生しローラがチルトする。変速比をフィードバックしてオフセットを調節することにより、要求される変速比に達した時点でローラは再び元の位置に戻り、レシオ制御が実現される。このように、いずれの場合にも、システムの入力である中間伝動部材の駆動力によって変速比が直接決定される。

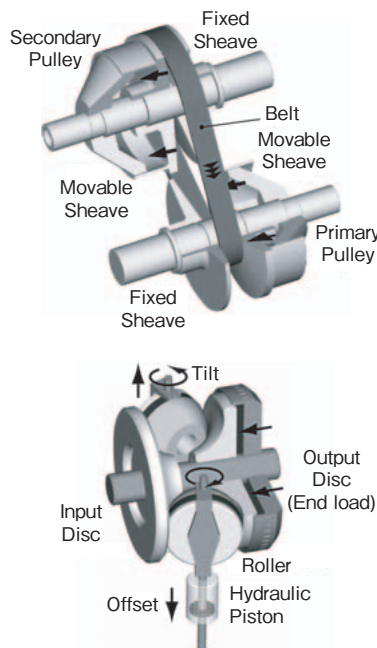


図2 レシオ制御CVT
(上：ベルト式, 下：ハーフトロイダル)
Ratio control CVT (Top : Belt type,
Bottom : Half-toroidal type)

3.2 トルク制御

システムの入力が伝達トルク(バリエータ入出力トルク)を直接決定する時、CVTはトルク制御である。トルク制御CVT(TC/CVT)としてはフルトロイダルバリエータが良く知られている(図3)。これは、2枚のディスクとこれに挟まれた3個のローラのユニット2組で構成される。ローラとディスクの各々の接触部でトラクション力が伝達されるため、ローラはその反力を受ける。ローラは油圧ピストンによって駆動されるが、定常状態ではトラクション力が油圧ピストン力と均衡関係にあるため、ピストン力でトラクション力を制御できる。伝達トルクはトラクション力と接触半径の積で表されるので、システムの入力であるピストン力が伝達トルクを

直接決定すると言える。さらに、ローラ支持軸はキャスト角と呼ばれる角度に傾いているため、ローラは自動調心の特性を有する。これは自動車のステアリングシステムにおけるキャスト角と同様の役割を果たし、位置制御は必要ない。

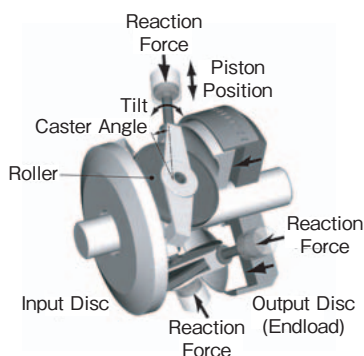


図3 トルク制御CVT (フルトロイダル)
Torque control CVT (Full toroidal type)

4. RC/CVTとTC/CVTのダイナミクス

4.1 基本的なダイナミクスの考察

両制御方式のCVTに固有のダイナミクスを考察するために、図4に示すような単純化したモデルを想定する。いま、エンジンとCVTで構成されるパワートレインは一定の出力負荷のもとで定常状態にあり、さらにCVTシステムの入力は一定であると仮定する。ここで、微小な回転変動 $\Delta\omega_o$ を瞬間的に出力軸に与えた時の応答を考える。まずRC/CVTの場合、エンジン回転速度と変速比は固定されているので仮想的には無限大の反力トルク ΔT_o が生じることになる(実際には、この反力トルクはクランプ力で決まる最大伝達トルクにより制限される)。一方TC/CVTの場合、変速比が回転速度変動に追従し瞬間的な反力トルク ΔT_o は生じない。この例は、レシオ制御のCVTではエンジンと出力軸とがギヤのように結合されていることを示す。さらに、システムの入力により決定される変速比が固定なので、システムの状態変数はスリップを除いてほとんど変化しない。一方、トルク制御の場合には、エンジンと出力軸の分離が見られる。出力軸の回転速度変動は変速比が変化することにより「吸収」され、エンジン側へ伝達されない。この場合、システムの状態変数(中間伝動部材の位置、速度)が変化し、トランスミッション内部で強い相互作用を引き起こす。

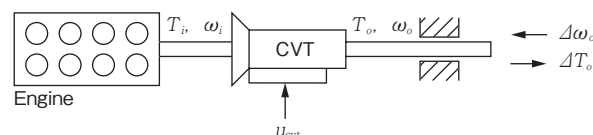


図4 CVTパワートレインモデル
CVT powertrain model

4.2 相互作用のメカニズム

図5は、CVTパワートレイン内部の相互作用を一般化して示したもので、トラクション、内部ダイナミクス、トルク、イナーシャのブロックで構成される。最初の3つはCVTを示し、最後のイナーシャはエンジン、車両を示す。トラクションブロックの入力は、クランプ力 F_c 、幾何学的変速比 r_g 、中間伝動部材および外部回転体の回転速度 ω_{int} 、 ω_{ext} であり、出力はトラクション力 F_t である(中間伝動部材の駆動力も接触点荷重に影響するが微小であるためここでは無視する)。内部ダイナミクスのブロックは中間伝動部材の挙動に関係し、その入力は中間伝動部材に作用する外力(トラクション力 F_t と中間伝動部材の駆動力 F_a) であり、出力は中間伝動部材の回転速度と幾何学的変速比である。CVTトルクは幾何学的変速比によって決定される接触半径とトラクション力の積で表され、連結されたイナーシャに負荷または駆動力を与えて加減速させる。

これらの相互作用のメカニズムは3つのカスケードループ ($L1 \sim L3$) で表される。 $L1$ は中間伝動部材の微視的挙動に伴う速度変化とトラクション力との間の最も高速のダイナミクスを示しており、中間伝動部材の駆動に対するCVTトルクの応答に影響する。より低速のダイナミクスを有するループである $L2$ は、中間伝動部材の巨視的挙動に伴う接触半径の変化とトラクション力との関係を表しており、幾何学的変速比の変化によるCVTトルクの変化に影響する。最も低速の $L3$ は、CVTトルクの変化によるイナーシャのダイナミクスを示し、変速比の応答に影響する。

重要な点は、RC/CVTとTC/CVTのシステムがその基礎的なメカニズムにおいて似ており、内部ダイナミクスの差異のみがそれら固有の特性を決定するという点である。当社では、フルトロイダルバリエータにおけるこうしたメカニズムを詳細に研究している¹⁾。これに対しベルト式CVTの場合は、変速が接触点におけるスリップだけではなくプーリの変形にもよるためメカニズムはより複雑になっている。Tenbergeは、スリップと

プリーの変形の効果を共に考慮した簡易なモデルを示した⁵⁾。さらに詳細な研究として、Carboneらは変速性能への各々の効果の寄与を解析し、高速の変速においてはスリップが支配的な現象であることを示した^{6) 7)}。プリーの変形は変速が遅い時には支配的となるが、この場合には変速速度がクランプ力と回転速度に依存するため、制御には好ましくない。しかしながら、変速速度が高速で外部回転体が剛体であると仮定できる場合には、**図5**は摩擦伝動式 CVT 一般に適用できる。

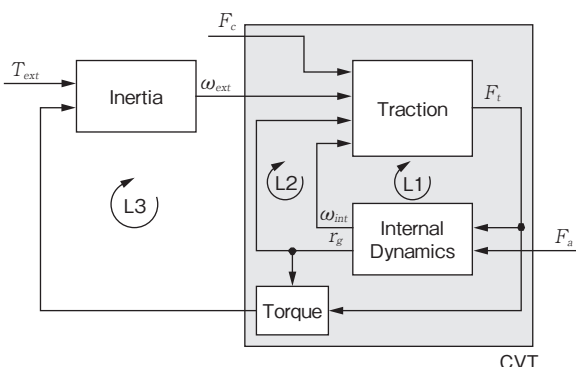


図5 一般化された摩擦伝動式CVTにおける相互作用のメカニズム

Generalized mechanism of interaction in friction type CVT.

CVT パワートレーンシステムにおける主要な入力には、CVT のクランプ力、中間伝動部材の駆動力 F_a および外部トルク T_{ext} (エンジントルク、走行抵抗、ブレーキトルク) である。ここで、駆動力 F_a による変速メカニズムについて考える。まず、中間伝動部材の微視的挙動が生じ接触点スリップが変化する。これに伴うトラクション力の変化により CVT トルクの変化が起こり、エンジンと車両のイナーシャの加減速を引き起こす。そして、イナーシャの速度変化の結果、初めて実質的な変速が起こる。一方で外部トルク、たとえばエンジントルクが変動した場合、まずエンジン速度が変化する。この局所的な変化は接触点のスリップとトラクション力を変化させる。初期トルクの変化は伝達され、中間伝動部材はバランスを崩して幾何学的変速比の変化を引き起こすが、この変化の大きさは内部ダイナミクスの特性に依存する。ベルト式 CVT では、トラクション力の変化は中間伝動部材の微視的挙動に伴う微小な幾何学的変速比の変化を起こすのみである。ところがフルトロイダル CVT では、ローラに作用する外力のいかなる変動もトラクション力のチルト成分を生じるため巨視的な変速が

起こり、キャスト角の効果によって変速比はディスクの回転速度変化に追従する。

まとめとして、レシオ制御およびトルク制御の概念は、中間伝動部材の駆動力による CVT トルクの制御性と外部からの回転速度変動に対する幾何学的変速比の感度から定義できると考えられる。

4.3 RC/CVT の定義

外部からの回転速度変動に対する幾何学的変速比の感度が低い場合、その CVT はレシオ制御であるという。ベルト式バリエータおよびハーフトロイダルバリエータの場合、中間伝動部材のクランプ力と駆動力が一定に維持された状態では、外部回転速度変動が CVT を介して直接伝達され中間伝動部材の巨視的挙動を引き起こすことはない。このとき通常は、外部トルクに応じたクランプ力を与えることでスリップを制御している。センサが使用できないため外部トルクを検出することは容易ではないが、クランプ力を与えるローディングカムによる方法^{8) 9)} や、トルクを推定する方法¹⁰⁾ が用いられている。

4.4 TC/CVT の定義

中間伝動部材のクランプ力と駆動力が一定に維持された状態で、外部からの回転速度変動に対する幾何学的変速比の感度が高い場合、その CVT はトルク制御であるという。フルトロイダル CVT では、ディスク回転速度の変化はスリップの変化、ないしはトラクション力の変化を生じ、ローラのバランスを崩す。ここで、自動調心のメカニズムにより、ディスクの回転速度変化に対するローラチルトの追従性が保証されている。この幾何学的変速比の柔軟性による変速は、スリップ制御やローラの駆動力制御を必要としない。またローラの駆動力とクランプ力を共に制御しているので、トラクション係数と伝達トルクを同時に設定できる。

4.5 トルク制御とレシオ制御の連続性

ギヤードニュートラル制御の問題を解決するために、RC/CVT を TC/CVT に変換する試みがなされている^{11) ~ 14)}。これらは、トルクまたはスリップの推定や中間伝動部材の駆動力のアクティブ制御に基づいた類似の手法であるが、内部ダイナミクスが比較的低速で、また中間伝動部材の駆動力と伝達トルクの関係が不正確であるために動特性に制約があり、動作条件はギヤードニュートラルに限定されている。一方、田中はトルクとレ

シオの2つのカスケード制御ループを採用し、ハーフトロイダルバリエータの入力トルクの制御において、より一般的な設計を行い、その可能性を検討している¹⁵⁾。

これに対してTC/CVTは、変速比をフィードバック制御することで、RC/CVTに変換でき、しかもトルクとスリップの制御性は維持される。このことは、トルク制御とレシオ制御の間に連続性が存在することを示している。

トルク制御とレシオ制御の連続的な変換は、CVTの新しい研究と応用の可能性を示している。一般的には、TC/CVTをRC/CVTに変換する方がその逆よりも現実的でロバストであると考えられる。なぜなら、前者の内部ダイナミクスは制御方式の変換に対してより柔軟であるからである。一方で、外部回転速度変化に対する変速比変化の感度が比較的高いために、TC/CVTはRC/CVTよりもその内部相互作用の影響を強く受けることになる。この影響を緩和し、要求されるシステムの安定性と応答性を実現するために、TC/CVTは本質的にこの連続性の中で制御される。

5. トランスミッションの分類

外部回転速度変動に対する変速比の柔軟性という視点から、図6のような新しいトランスミッションの分類を提案する。この分類表では、現在市場に出ているもの、あるいは非常に強い市場投入の可能性を有するものを示

した。固定変速比ギヤボックスは、外部回転速度変動に対して変速比が全く変化しないレシオ制御の極限を示していることが分かる。

6. おわりに

本報では、レシオ制御とトルク制御という2つの制御概念を軸にして、摩擦伝動式のCVTについて論じた。まず、TC/CVTではシステムの入力が伝達トルクを直接決定するのに対して、RC/CVTではシステムの入力が変速比を直接決定することを示した。これらの制御概念の根本的な差異は、外部回転速度変動に対する変速比の柔軟性にあることから、制御概念の再定義を行った。その結果、RC/CVTは速度変動を固定変速比のギヤのように伝達する方式であるのに対し、TC/CVTは変速比が自動的に追従するため速度変動をトランスミッションによって「吸収」し、伝達トルクを制御できる方式であることが特徴付けられた。さらに、トルク制御からレシオ制御への連続的な変換について言及し、新たなトランスミッションの分類を提案した。

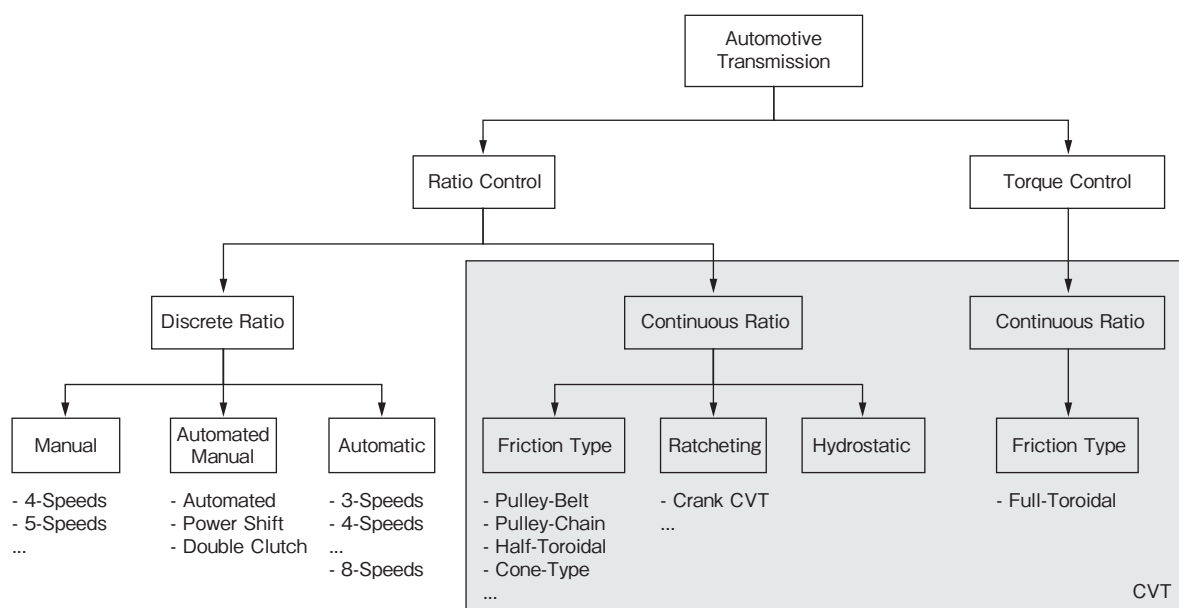


図6 レシオ制御とトルク制御の概念に基づいた自動車のトランスミッションの分類

Classification of automotive transmissions emphasizing the fundamental difference between ratio and torque control

参考文献

- 1) R. D. Fuchs, Y. Hasuda, I. B. James, Full Toroidal IVT Variator Dynamics, SAE paper 2002-01-0586, March 2002.
- 2) R. Fuchs, Y. Hasuda, I. James, Modeling, Simulation and Validation for the Control Development of a Full-Toroidal IVT, CVT2002 Congress, VDI-Berichte 1709, October 2002.
- 3) R. Fuchs, Y. Hasuda, I. James, Dynamic Performance Analysis of a Full Toroidal IVT - A Theoretical Approach, CVT Congress 04CVT-30, Sacramento, USA, September 2004.
- 4) K. L. Johnson, The Strength of Surface in Rolling Contact, vol. 203, p. 151-163, IMechE 1989.
- 5) Peter Tenberge, Efficiency of a Chain-CVTs at Constant and Variable Ratio - A New Mathematical Model for Very Fast Calculation of Chain Forces, Clamping Ratio, Slip and Efficiency, CVT Congress 04CVT-35, Sacramento, USA, September 2004.
- 6) G. Carbone, L. Mangialardi, G. Mantriota, Theoretical Model of Metal V-Belt Drives During Rapid Ratio Changing, Journal of Mechanical Design, vol. 123 p. 111-117, ASME, March 2001.
- 7) G. Carbone, L. Mangialardi, G. Mantriota, The Influence of Pulley Deformations on the Shifting Mechanism of Metal Belt CVT, Journal of Mechanical Design, vol. 127 p.103-113, ASME, January 2005.
- 8) R. Pfiffner, Optimal Operation of CVT-Based Powertrains, PhD thesis, ETH. Diss. no.14136, 2001.
- 9) T. Yamamoto, T. Osidari, M. Nakano, Improvement of Loading Cam Performance in a Toroidal CVT, JSAE Review 23, 481-487, 2002.
- 10) Bras Vroemen, Component Control for The Zero Inertia Powertrain, PhD thesis, TuE, 2001.
- 11) H. Vahabzadeh, S. M. Linzell, Modeling, Simulation and Control Implementation for a Split-Torque, Geared Neutral, Infinitely Variable Transmission, SAE paper 910409, April 1991.
- 12) B. Veenhuizen, B. Bonsen, T. Klaassen, K. van de Meerakker, H. Nijmeijer, F. Veldpaus, Simulated Behavior of a Vehicle with V-Belt Type Geared Neutral Transmission with Variator Slip Control, Journal of Automobile Engineering-Part D, 219 (5), 1, 2005.
- 13) T. Osumi, K. Ueda, H. Nobumoto, M. Sakaki, T. Fukuma, Transient Analysis of Geared Neutral Type Half-Toroidal CVT, JSAE Review 23 p. 49-53,

Elsevier 2002.

- 14) K. Hebbale, M. Carpenter, Control of the Geared Neutral Point in a Traction Drive CVT, Proceeding of the American Control Conference, IEEE, Denver, USA, June 2003.
- 15) H. Tanaka, Torque Control of a Double Cavity Half-Toroidal CVT, JSAE Annual Congress Proceeding no. 21-03, (95), p. 5-8, 2003.

筆者



ロバート・フックス*
R. FUCHS



蓮田康彦*
Y. HASUDA



イヴ・ローテンビューラー*
Y. ROTHENBUEHLER



松本こず恵*
K. MATSUMOTO

* 研究開発センター 機械システム研究部