車輪の凹凸地踏破性能評価と HS 車輪の開発

内 田 康 之^{*1} 古 市 和 也^{*2} 広 瀬 茂 男^{*1}

Evaluation of Wheel Performance on Rough Terrain and Development of HS Wheel

Yasuyuki Uchida^{*1}, Kazuya Furuichi^{*2} and Shigeo Hirose^{*1}

We are in the process of development of the "HELIOS-V", which is equipped with 4 low-pressure tires outside and 2 high-pressure tires inside. This vehicle is designed to acquire the performance to ascend and descend stairs using low-pressure tires and move effectively on even ground by using high-pressure tires. To make the most of the characteristics of the vehicle, we have to understand the performance of the wheels in accordance with the terrain condition quantitatively. Therefore we constructed an experiment setup to evaluate performance of wheels on several terrain conditions without influence of the vehicle motion. By this experiment, we compared a low-pressure tire with a high-pressure tire and showed superiority of a low-pressure tire on rough terrain. We also evaluated 2 kinds of tires with slits and ribs to make grip force. Based on these considerations, we developed a Hard-Soft Wheel, or HS Wheel having both of the advantages of a low-pressure and high-pressure tire.

Key Words: HELIOS-V, Wheel Performance, Stair, Tire, HS Wheel

1. は じ め に

現在筆者らは、高齢者・身障者のための階段や段差を克服できる電動車椅子や、階段を使った荷物搬入時において作業者の負荷軽減をはかる荷役機械、複雑な障害物上を移動できる極限作業ロボットなどのプラットフォームとして、Fig. 1にある小型6輪不整地走行車「HELIOS-V」を開発している[1]。これは、平坦地で高速高効率な走行を可能とする中間部の高圧タイヤ2輪と、凹凸地や階段昇降などの障害克服において有効なグリップ力を発生する前後の低圧タイヤ4輪を能動リンクにより連結し、動力伝達部は1対の無段変速機構を用い変速とステアリングを一体化し、地形の状態に応じて車両の有する特性を最大限に発揮し、バランスの良い走行を可能にしようとする車両である。これまでの基本的走行実験の結果、この車両の階段昇降能力は、タイヤの階段昇降時の力学メカニズムに大きく支配されていることが明らかとなった。しかし、その力学メカニズムは実験的検証なしには予想し得ない複雑さを内含している。

そこで本研究では、昇降時の車体の揺動による影響を除去することで問題を単純化し、車輪単体についての段差乗り上げを含む多様な走行条件での推進メカニズムを解明する実験装置を

構築する。さらに、タイヤ空気圧および表面形状の違いによる踏破性を定量的に評価する方法を提案し、その評価法に基づき踏破性について実験的に考察する。そしてこれらを、今後この種の階段や段差走行車両のための車輪設計の基本指針としてまとめる。

Fig. 1 HELIOS-V

原稿受付 1999年7月8日

^{*1}東京工業大学

^{*2}(株)日揮

^{*1}TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

^{*2}JGC CORPORATION

Fig. 2 Illustration of the experiment

さらに、これらの実験結果から得られた知見に基づき、階段昇降などの不整地踏破性能を向上するための一つのアプローチとして、障害物踏破性の高い低圧タイヤと、平地走行時に運動の滑らかさと高い移動効率を発揮する高圧タイヤの特性を併有するHS車輪（Hard-Soft Wheel）を提案する。

2. 各種タイヤの凹凸地踏破性能

2.1 凹凸地踏破性能評価試験装置

装輪車による階段状障害物の踏破性能は、タイヤの種類、トレッドの模様、蹴上げと車輪径、車軸間距離と階段ステップ間隔や自重と摩擦力とタイヤの変形の関係など、非常に複雑な要素に支配されている。そのため車両および車輪の定量的な評価は容易ではない。そこで本研究では、車輪形状と走破性の基本的関係を明確化するため、車体の揺動の影響を切り離し、車輪単体での階段昇降性や障害地形踏破性を、実験的に評価することにした。そして、任意の車輪駆動トルクと車軸間距離を持つ仮想車両における、1輪の凹凸地上での挙動を模擬可能である試験装置を構築した。試作した実験装置の模式図をFig. 2に示す。この装置は車両ではなく地形の方を移動させることで、車輪が凹凸地を克服する状況を模擬しようとするものである。車輪の形状、空気圧、他の車輪からの牽引力、負荷（自重）、地形形状などのパラメータを変化させ、車輪を一定速度で回転させたときの地形の移動量、車輪の上下動、トルクなどが計測でき、様々な状況における車輪の踏破性やトルク履歴などを実験的に確認可能である。ただし、牽引力の方向は一定である。また、試験用模擬地形としては、各種高さの階段状段差、斜度30[deg]の斜面および直角二等辺三角形（等辺長さ80[mm]）を連続して2個並べた凹凸面などを用意し各種実験を行ったが、本論文では主として階段状段差の実験結果を中心に述べる。

2.2 検討した各種タイヤ

検討したタイヤは、市販されている空気チューブを内包した外径256[mm]、幅80[mm]のゴム製タイヤである。そして、その空気圧をゲージ圧で約200[kPa]、100[kPa]、0[kPa]とした場合のタイヤ特性の変化による踏破性の違いを実験的に確認した。以下すべての空気圧はゲージ圧で表現している。このタイヤは、試作した6輪不整地走行車HELIOS-Vで使用しているものであり、寸法は空気圧などにより変化するため参考値であ

Fig. 3 Tire with slits and tire with ribs

るが、本実験ではこれを標準タイヤと定義している。

また、階段状段差の踏破においては、タイヤ表面が段差エッジを確実に捕らえることが重要であると考えられるため、その点を考慮したFig. 3に示す二種類のタイヤについてもその特性を実験的に確認することとした。(1)は、標準タイヤの表面に等間隔に切り込みを入れたものであり、(2)は標準タイヤ表面に等間隔にウレタンゴム（厚さ5[mm]）による突起を取り付けたものである。後に詳しく述べるが、標準タイヤによる実験結果から低圧タイヤの高い踏破性が確認されたので、基本的には空気圧を0[kPa]とし、(2)については、表面の突起のみの効果を確認するために、空気圧100[kPa]の場合についても実験した。

2.3 階段状段差踏破実験結果

Fig. 4は、各車輪が単体で昇ることができた最大段差高さを示している。ここで、左側縦軸は段差高さを、右側縦軸は空気圧0[kPa]のときの車輪半径で正規化した値を示している。また、負荷質量軸は車輪に加わる全質量を示し、牽引力軸は水平進行方向に車輪を押す力を示している。ただし、牽引できず滑りを生じたものは記載していない。

Fig. 4において、(1)～(3)の標準タイヤについて比較すると、(1)空気圧200[kPa]と(2)空気圧100[kPa]では顕著な差がみられないが、(3)空気圧0[kPa]の場合では、全体的に踏破性が向上している。牽引力がある場合に各負荷において半径の約0.70倍の段差までは踏破可能であり、最大で1.17倍の段差も踏破できた。(3)空気圧0[kPa]の標準タイヤと(4)空気圧0[kPa]の切り込みを入れたタイヤを比較すると、明らかに後者の踏破可能段差高さが高い。牽引力がある場合に各負荷において半径の約0.94倍の段差までは踏破可能であり、負荷と牽引力との関係に依存するが、最大で約1.17倍の段差まで踏破できる。さらに、(5)空気圧100[kPa]の突起付きタイヤでは、突起無しと比較すると、牽引力が 10×9.8 [N]において踏破可能段差高さがわずかに高いなどの知見が得られた。

計測された一部についての段差上昇過程の計測結果をFig. 5, 6に示す。Fig. 5は、段差高さ60[mm]、負荷質量20[kg]、牽引

Fig. 4 Height of successful steps

Fig. 5 One of the result of the experiment to show locus and torque of wheel on step

Fig. 6 Wheel ascending motion and required torque

Load Mass=20[kg] Traction=10 × 9.8[N]

Fig. 7 The experiment of wheels to ascend 150 [mm] step

力 5×9.8 [N] における空気圧 200 [kPa] と空気圧 0 [kPa] の標準タイヤの移動軌跡と必要トルク履歴である。空気圧 0 [kPa] では軌跡図から明かなように、その大変形により移動軌跡が平滑化され、空気圧 200 [kPa] の場合より振動および上下動が抑制されている。また、Fig. 5 (2) のトルク履歴から、空気圧 0 [kPa] の場合は、タイヤ変形部の遷移のために早い時期からトルクを必要とするが、その最大値は空気圧 200 [kPa] のタイヤより抑制されている。以上の傾向は、空気圧差により一般的に観測された。

Fig. 6 は、段差高さ 120 [mm]、負荷質量 30 [kg]、牽引力 5×9.8 [N] における空気圧 0 [kPa] の標準タイヤと切り込みを入れたタイヤ、空気圧 100 [kPa] の突起付きタイヤに関して、段差踏破時の表面形状の違いによる上下方向の位置関係と発生しているトルクの様子である。このデータから、踏破性に関し表面の摩擦にのみ頼っている標準タイヤでは、滑りによりその挙動が振動的であり、長時間に渡り上昇できない場合があるが、切り込みや突起のあるタイヤは、その引っ掛かりの効果により、短時間で比較的滑らかに踏破可能であった。このように、空気圧を低圧にすることに加え、突起や切り込みなどの表面形状によりグリップ力を発生させることが、踏破性向上に効果的であることが分かった。また、Fig. 7 は段差高さ 150 [mm] の実験の様子である。空気圧 0 [kPa] の標準タイヤでは踏破不可能であったが、タイヤ表面の突起などがある場合には踏破できていることが分かる。

Fig. 8 Conditions to measure Specific resistance ε Fig. 9 One of the measured results of Specific resistance ε in various conditions

2.4 移動仕事率による段差踏破性の評価

移動体の移動エネルギー消費の評価基準として使用されている「移動仕事率」により、階段状段差踏破時における走行性能の評価を試みた。文献[6]～[8]に示されるように、移動仕事率 (Specific resistance) ε は、

$$\varepsilon = \frac{E}{WL} = \frac{P}{WV} \quad (1)$$

と示される。ただし、 E : 移動に必要なとするエネルギー、 W : 移動全重量、 L : 移動距離、 P : 移動時の消費パワー、 V : 移動速度である。この移動仕事率 ε は、「単位重量のものを単位距離移動させるために必要なエネルギー」を意味する無次元量である。これは、垂直上昇時の ε は 1、摩擦係数 μ の床で物体を引きずりながらの移動の ε は μ となる特徴を持つものである。従来、この移動仕事率が段差移動の性能評価に利用されたことはなかったため、ここで新たにその適用法を検討した。段差移動時の移動距離 L は、Fig. 8 のようにタイヤ直径と同じとする。移動に必要なエネルギー E は、車輪を駆動するために消費したモータのエネルギーと牽引力によるエネルギーの和であり、車輪が高さ h だけ上昇前方へ L だけ移動する間に t_E 秒かかったとし、各時間におけるトルクを $T(t)$ 、角速度を ω 、牽引力を F_T とすると、

$$E = \int_0^{t_E} T(t)\omega dt + F_T L \quad (2)$$

で表される。これより求まる ε は、全エネルギーで考えているために、位置エネルギーによる h/L が加味される。このようにして計測した結果の一例を Fig. 9 に示す。四つの条件とも走行可能であった Fig. 9 の 6 例のうち、右の四つの走行を比較

すると、特に段差が 120 [mm] と高いときに、単純な低圧タイヤはスリップが生じて結果的に移動仕事率 ε が大きくなっていることが分かる。このように、移動仕事率 ε を段差走行の性能評価に用いるとスリップの生成などの評価しにくい現象が定量的に評価でき有効である。

2.5 等価摩擦係数による段差踏破性の評価

先にも述べたように、車輪の凹凸地踏破性は、路面上での滑りにくさに大きく影響される。そのため、段差エッジ上での等価的な摩擦係数を実験的に確認することを行った。実際の段差乗り上げ時には、わずかな滑りを生じており、その際のタイヤの回転に伴う変形がグリップ力を発生し、車体の滑落を防いでいると考えられる。そのため、このような動的な接触状態で生じる摩擦力も含んだ摩擦力によるものを、ここでは「等価摩擦係数」と呼び、段差走行性能の評価に用いることにする。

等価摩擦係数を求める実験は標準タイヤ（空気圧 200 [kPa]、0 [kPa]）と切り込みのあるタイヤ（空気圧 0 [kPa]）に関して

行い、Fig. 10 に示すように凸地上にタイヤを置き、突起頂上からタイヤの距離 X 、負荷 W そしてタイヤ回転速度を変え車輪トルク T を計測した。このとき、地形は動かないように固定し、タイヤは直動ベアリングにより横方向の動きを完全に拘束した。ここで、摩擦力は突起頂上に集中するものと仮定し、突起頂点と車軸を結ぶ線上に法線力 R を、その力に垂直に等価摩擦力 F を、突起頂点と車軸との距離をころがり半径 r とし、 W と R のなす角を α とすることで、等価摩擦係数 μ^* を次式により定義した。

$$\mu^* = \frac{T \cos \alpha}{Wr} \quad (3)$$

負荷質量を 10 [kg]、20 [kg]、30 [kg]、タイヤ回転数を 1 [rpm]、6 [rpm]、接地位置を車軸鉛直下から左へ $X = 80$ [mm]、40 [mm]、0 [mm] とした実験でのタイヤの様子を Fig. 11 に示す。

Fig. 12 は、タイヤ回転数 1 [rpm] における各試験条件で計測された等価摩擦係数を示す。ここで、 $X = 80$ [mm] のデータは段差踏破時に大きな影響力を有する段差乗り上げ初めの状況に対応しているが、この結果を見ると、高圧タイヤ、低圧タイヤ、切り込みのあるタイヤの順に等価摩擦係数が大きくなっていることが分かる。また、負荷が大きいはどタイヤの変形が大きく、その傾向が顕著に現れることも観測された。そして、階段状段差の踏破性は、切り込みのあるタイヤが最も良く、高圧タイヤ

Fig. 10 Measurement of friction with slip

Fig. 11 Variation of various tires

Fig. 12 Maximum coefficient of friction with slip (in the case of 1 [rpm] of wheel rotation)

Fig. 13 Coefficient of driving resistance

Fig. 14 Measurement of turning resistance

が最も悪いということが分かった。以上のことは、低圧あるいは切り込みのあるタイヤが Fig. 11 に示されるように、確実にエッジを捕らえていることから明らかである。つまり、このようなタイヤの変形が摩擦力の発生に大きく起因していると思われる。なお、すべての実験において、滑り速度にあたるタイヤ回転数の違いによる影響は、ほとんど見られなかった。

3. 走行抵抗係数による平地走行性能の評価

タイヤの空気圧の違いによる平地上での走行性能も検討した。空転可能な標準タイヤによるベニヤ板上での直進時における走行抵抗係数の計測結果を Fig. 13 に示す。また、空転可能な標準タイヤに Fig. 14 に示すように 30 [deg] のスリップ角を与え、ベニヤ板上で X 方向に滑り移動させたときの走行抵抗係数も求めた。Fig. 15 はその結果であり旋回時の走行抵抗係数を示す。どちらの結果からも低圧タイヤは高圧タイヤに比較して走行抵抗係数が大きいことが確認できた。なお、走行抵抗は、車輪が回転中に接触面で受ける抵抗力であり、「走行抵抗係数=走行抵抗/垂直負荷」である。この結果は過去に得られているタイヤ性能のデータとも一致している [11]。

4. 実験についての考察

前述した段差踏破実験結果および移動仕事率、等価摩擦係数、走行抵抗係数などのパラメータとそれらの計測結果により、特性の異なる各種タイヤの走破性が実験的に評価できる。つまり、(1) 低圧タイヤは凹凸面で高圧タイヤに比べ小さなトルクおよび同程度の移動仕事率で踏破可能である。(2) その軌跡は平滑化され車両の振動および上下動が抑制される。さらに、(3) タイヤの表面形状を工夫することで、踏破可能段差高さを向上させることなどが確認できた。しかし、平坦地においては少なく

Fig. 15 Coefficient of turning resistance

Fig. 16 Motion of planet gears

とも走行のエネルギー特性的には、高圧タイヤの方が低圧タイヤより優れた走行性能を示すことも分かった。

5. HS 車輪の提案とその評価

今まで述べてきたように、階段状段差踏破性を向上させるためには、低圧タイヤあるいは切り込みのあるタイヤが望ましく、平坦地での走行性能を向上するためには、運動の滑らかさと高い移動効率を発揮する高圧タイヤが望ましいことが分かった。これら相反する特性を兼ね備えるために低圧・高圧タイヤハイブリッド車両を研究しているが、本章では、車輪単体でそのような機能をも有し、段差踏破信頼性を向上するために、新たに HS 車輪を提案する。

5.1 HS 車輪の概念

車輪の接地面下部は、高圧タイヤとしての特徴を示し、階段の段差に接する車輪の前後の側面が低圧タイヤの特徴を示す車輪が実現できれば、高い段差踏破性と平坦地での高い走行性能の両者を実現できる。提案する HS 車輪 (Hard-Soft Wheel) は、この特徴を実現するため、12 本のピストンで支持されるゴムブロックで構成し、それらのピストンの摺動運動を、車輪の下部では固定し、側部では自由に動くようにしている。具体的には、Fig. 16 のように貫通穴を有する円柱軸を常に一定方向に向けながら回転させ、Fig. 17 のように側部でのみピストンが摺動できる構造としたものである。

5.2 HS 車輪の構造

HS 車輪の構造は、Fig. 18 に示すように、円筒形の筐体の表面に放射状に等間隔にけられた 12 個所の貫通穴に、ゴムブロック付きの摺動ピストンをおのおの配置し、各ピストンはバネにより常に一定の力で外向きに押し出している。車軸を回転させず、筐体とそれを覆うゴムブロックを一体として回転させる車輪である。車軸には太陽歯車が、筐体側板 (蓋) には車

Fig. 17 Motion of rubber block and slider when ascending

Fig. 18 Overall view of HS (Hard-Soft) Wheel

軸と各ピストンを結ぶ放射線上に、内側に小・外側に大遊星歯車が固定されている。大遊星歯車は、その表面に 90 [deg] 間隔に山と谷がある円形の溝が掘られており (Fig. 19), その溝を

Fig. 19 Slot shaft with planet gear

Fig. 20 Side view of HS Wheel

滑るプランジャピンの先端がバネ力により常に谷位置に保持されるように、長穴のあいた軸が回転自由に取り付けられている。言い換えると、歯車列はその噛み合わせで位置拘束されているが、長穴のあいた軸は外力によりプランジャピンが押し込まれる量に応じて自由に回転することができる。この車輪の初期組み立て位置は、プランジャピンを谷位置で安定させ、すべての長穴が Fig. 20 の断面図に示されるように水平になった状態である。この状態で車輪つまり筐体とゴムブロック部が回転すると、Fig. 16 に示されるような遊星歯車列の特徴により、筐体の回転位置に依存せず常に長穴が水平 (初期取り付け方向) に向く構造である。また、車輪の回転による構造上の損失を低減するために、負荷の加わっていないピストンと長穴のあいた軸の表面は、常に非接触状態を保持する構造としている。

5.3 HS 車輪の機能

HS 車輪は、上下方向 (Fig. 20 (1)) にはピストンの底部が Fig. 19 にある軸の長穴のあいていない中実部に接触し全自重を支持し、高圧タイヤ的な特徴を発揮する。左右方向 (Fig. 20 (4)) にはピストンと長穴の方向が一致し、ゴムブロックを車軸側に押し込むことが可能となり、凸障害物に接触した際に低圧タイヤ的な変形を可能とする。これらにより、路面からの車

Fig. 21 The experiment of ascending 150 [mm] step

軸高の低下という低圧タイヤの問題の一つが解決され、確実なグリップ力の発生による踏破性の向上と平地での高効率走行を実現する。

Fig. 17 が模式的に示しているように、段差側面に接触後、(1) のように接触したゴムブロックが押し込まれ、タイヤの回転と前進により、(2) (3) のようにさらに押し込まれながら次のゴムブロックが段差のエッジを捕らえる。このとき、Fig. 19 にあるプランジャピンが押し込まれながら大遊星歯車に掘られた溝の山位置へ滑り、軸のみが押し込まれた摺動部に拘束され任意の位置に回転する。(4) のように踏破後は、ピストンがバネ力により長穴から抜け、ピストンと拘束されていた軸の長穴も、プランジャピンの効果により再び水平方向に復帰する。

5.4 HS 車輪の段差踏破試験

HS 車輪の段差踏破試験は、先に述べた評価法等に基づき車輪単体で実施した。段差高さ 150 [mm] に対し、垂直負荷質量 10, 20, 30 [kg]、水平方向の牽引力（他から押される力）5, 10, 15 $\times 9.8$ [N]、車輪回転速度 2 [rpm] の各条件で実施した。このときの実験の様子を Fig. 21 に示す。また、段差踏破時の車輪中心の移動量計測結果の一例を Fig. 22 に、車輪駆動トルクの計測結果の一例を Fig. 23 に示す。

ここから、HS 車輪は段差エッジを確実にゴムブロックで捕らえて、車輪半径に対し約 1.5 倍の段差高さまで踏破可能であることを、耐久負荷質量 30 [kg] まで確認できた。

Fig. 24 は、180 [mm] の段差踏破を実現した様子を示している。このように、最も期待していた踏破可能段差高さが、前述したタイヤ中最も性能の良い切り込みを入れたタイヤが示す半径に対する 1.17 倍という値よりもさらに高いことが確認された。また、段差高さ 150 [mm]、負荷質量 20 [kg]、牽引力 10 $\times 9.8$ [N] の場合の移動仕事率 ε は、空気圧 0 [kPa] の切り込みを入れたタイヤ=1.76、空気圧 100 [kPa] の突起付きタイヤ=1.64 に対し、HS 車輪=1.23 であり、スリップによる損失の少ない

Fig. 22 Displacement of the center of HS Wheel

Fig. 23 Measurement of wheel torque

Fig. 24 The experiment of ascending 180 [mm] step

HS 車輪のエネルギー効率の良さも確認できた。HS 車輪の等価摩擦係数が、空気タイヤに比べて大きいことは実験的に確認できた。その上限値は、構造の強度限界まで得られると思われる。さらに、平地走行性能に関しても、ソリッドゴムであるために走行抵抗係数は直進時で 0.02 程度、旋回時で 0.2 程度であり平地での走行抵抗も十分に低いと考えられる。

6. 結 言

本論文では以下の結論が得られた。

(1) 空気タイヤを用いた車両による階段昇降時の複雑な力学的メカニズムを解明するために、車両の影響を除外し車輪単体において、その特性の違いによる凹凸地踏破性の変化を定量的に確認できる試験装置を構築し、各種車輪の踏破限界などを明らかにした。

(2) 各種車輪の段差踏破性能の評価法として、(1) の実験装置によるものに加え、移動仕事率、等価摩擦係数による方法を提案し、その有効性を示した。これらから、段差踏破に関しては、ゴム表面に切り込みを入れた低圧タイヤが優れていること、平地走行には高圧タイヤが適していることを示した。

(3) 障害物踏破性の高い低圧タイヤと、平地走行時に運動の滑らかさと高い移動効率を発揮する高圧タイヤの特性という相反するものを機械的に併有する HS 車輪を開発した。単車輪実験から車輪半径に対し約 1.5 倍の段差を踏破可能であり、切り込みを入れたタイヤよりも踏破性が高いことを確認した。また、移動仕事率 ε の点からもエネルギー効率の良さを確認した。さらに、平地走行時の走行抵抗の低さを示した。

このような単車輪による踏破試験は、今後、不整地走行車両を開発する過程において有効と思われる。同一径の車輪で考え

た場合、不整地走行車両への切り込みのある低圧タイヤや HS 車輪の適用は、不整地踏破性を向上させることにつながると思われ、平坦地での走行効率を低下させないという点で、高圧タイヤとのハイブリットは重要であり、我々が開発した 6 輪不整地走行車「HELIOS-V」の有効性も同時に示されたと考えている。

本研究は、文部省科学研究費（COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム）を使用して行われました。

参 考 文 献

- [1] Y. Uchida, K. Furuichi and S. Hirose: "Fundamental Performance of 6 Wheeled Off-Road Vehicle HELIOS-V," Proc. '99 ICRA, pp.2336-2341, 1999.
- [2] S. Hirose, J. Miyake and S. Aoki: "Terrain Adaptive Tracked Vehicle HELIOS-I," Proc. '89 Int'l Conf. on Advanced Robotics, pp.676-687, 1989.
- [3] 広瀬, 三宅, 青木: "対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.2, pp.283-291, 1992.
- [4] 広瀬, 宇佐, 大森, 青木, 鶴澤: "対地適応型 4 輪走行車 HELIOS-III の開発", 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.305-306, 1991.
- [5] Hirose, Rattipat: "Design of Stair-Climbing Vehicle," 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.153-154, 1995.
- [6] G. Gabrielle, Th. Von Karman: "What price speed," Mechanical Engineering, vol.72, no.10, 1950.
- [7] M.G. Bekker: Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Univ. of Michigan Press, 1969.
- [8] 梅谷, 広瀬: はふく(匍匐)運動の生物力学的研究(移動様式としての評価), バイオメカニズム 2, pp.289-297, 東京大学出版会, 1973.
- [9] 酒井: タイヤ工学, グランプリ出版, 1987.
- [10] R.N. Yong, E.A. Fattah, N. Skiadas, 北野(訳): オフロード車両の走行力学. 山海堂, 1986.
- [11] タイヤ設計指針作成委員会 編: オフロードタイヤ工学—設計と性能予測の基礎—. テラメカニクス研究会, 1999.

内田康之 (Yasuyuki Uchida)

1967 年 6 月 20 日生。1991 年東京理科大学工学部機械工学科卒業。1993 年同大学大学院工学研究科修士課程機械工学専攻修了。同年、防衛庁技術研究本部第 4 研究所に入庁。自律移動ロボットの研究に従事。1997 年より東京工業大学大学院博士課程機械物理工学専攻に在学中。現在に至る。移動ロボットの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

古市和也 (Kazuya Furuichi)

1973 年 10 月 7 日生。1997 年東京工業大学機械宇宙学科卒業。1999 年同大学大学院修士課程機械物理工学専攻修了。同年、(株)日揮に入社。現在に至る。

広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了。同年、同大学機械物理工学科助手。1979 年同大学助教授。1992 年同大学教授。現在に至る。ロボットの機構、センサ、制御の研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)