

跳躍移動ソフト ロボット KOHARO

平成16年度～平成17年度 新エネルギー・産業技術総合開発機構 21世紀ロボットチャレンジプログラム・ プロトタイプ開発支援事業 研究成果報告書

平井 慎一 立命館大学 理工学部 ロボティクス学科
原 義行 東レエンジニアリング株式会社
坪井 辰彦 東レエンジニアリング株式会社
岩出 卓 東レエンジニアリング株式会社

本報告書は NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) 平成16年5月25日付け委託契約に基づく開発項目「21世紀ロボットチャレンジプログラム・プロトタイプ開発支援事業 跳躍移動ソフトロボット KOHARO」(平成16年5月25日～平成18年3月20日) に関する研究成果をまとめたものである。

まえがき

新エネルギー・産業技術総合開発機構の 21 世紀ロボットチャレンジプログラム・プロトタイプ開発支援事業により，跳躍移動ソフトロボット KOHARO の研究開発を進め，その一環として愛知万博のプロトタイプ展で KOHARO の実演を行った．KOHARO は，転がり (KO) 跳ねる (HA) ロボット (RO) の略である．柔らかいボディを柔らかいアクチュエータで変形させ，移動と跳躍を実現するという今までにないアイデアで地面を移動する．軽量で柔らかく，生物的な動きが特徴である．本報告では，KOHARO の研究開発の成果，プロトタイプ展における KOHARO の実演について述べる．

研究発表

学術論文

1. 杉山勇太, 平井慎一, "柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍", 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, 掲載予定.
2. Yuuta Sugiyama and Shinichi Hirai, "Crawling and Jumping by a Deformable Robot", International Journal of Robotics Research, to be published.

国際会議

1. Yuuta Sugiyama, Ayumi Shiotsu, Masashi Yamanaka, and Shinichi Hirai, "Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3606–3611, Barcelona, April, 2005.
2. Hidefumi Wakamatsu, Kousaku Takahashi and Shinichi Hirai, "Dynamic Modeling of Linear Object Deformation based on Differential Geometry Coordinates", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1040–1045, Barcelona, April, 2005.
3. Ayumi Shiotsu, Masafumi Yamanaka, Yoshinari Matsuyama, Hisashi Nakanishi, Yoshiyuki Hara, Tatsuhiko Tsuboi, Takashi Iwade, Yuuta Sugiyama, and Shinichi Hirai, "Crawling and Jumping Soft Robot KO-HARO", Proc. 36th Int. Symp. on Robotics, Tokyo, November, 2005.
4. Yuuta Sugiyama and Shinichi Hirai, "Crawling and Jumping by a Deformable Robot", Proc. Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
5. Yuuta Sugiyama and Shinichi Hirai, "Crawling and Jumping of Deformable Soft Robot", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3276–3281, Sendai, September, 2004.

口頭発表

1. 塩津あゆみ, 平井慎一, "IPMC アクチュエータによる柔軟ロボットの移動", ロボティクス・メカトロニクス'06 講演会予稿集 CD-ROM, 2006 発表予定.
2. 中西永, 平井慎一, "柔軟振り子の動的線状物体モデリング", ロボティクス・メカトロニクス'06 講演会予稿集 CD-ROM, 2006 発表予定.
3. 松山吉成, 平井慎一, "円形ロボットの外殻変形による跳躍の実験的解析", ロボティクス・メカトロニクス'06 講演会予稿集 CD-ROM, 2006 発表予定.
4. 杉山勇太, 塩津あゆみ, 山中雅史, 平井慎一, "弾性ポテンシャルエネルギーの蓄積・放出を用いた円形／球形ソフトロボットの移動と跳躍", ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.239-244, 2005.
5. 杉山勇太, 塩津あゆみ, 山中雅史, 平井慎一, "移動跳躍ソフトロボット KOHARO", ロボティクス・メカトロニクス'04 講演会予稿集 CD-ROM, 2005.
6. 杉山勇太, 平井慎一, "SMA ファイバーを用いた柔軟円形ロボットの变形移動", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.1112-1113, 2003.

報道

- 2005/6/28 週刊アスキー
- 2005/6/10 ロボコンマガジン No.40 「名物研究者から未来の研究者へのメッセージ」
- 2005/6/4 日本経済新聞
- 2005/6/4 産経新聞
- 2005/6/4 京都新聞
- 2005/6/4 読売新聞
- 2005/6/3 NHK かんさいニュース1番
- 2005/6/3 よみうりテレビ ニューススクランブル
- 2005/6/1 日経ものづくり 6月号 「でこぼこ道も水中もロボットはあらゆる所を移動する」
- 2004/7/28 毎日新聞「サイエンス TODAY」
- 2004/7/4 雑誌 New Scientists, Robotic wheels that just keep rolling
- 2004/6/17 日経産業新聞

目次

第1章 柔軟ロボットの構想と詳細設計	1
1.1 緒言	1
1.2 変形による移動と跳躍の原理	2
1.3 円形柔軟ロボットの動作試験	3
1.3.1 平地移動	3
1.3.2 坂道移動	5
1.3.3 跳躍	5
1.4 球形柔軟ロボットの動作試験	6
1.4.1 平面移動	10
1.4.2 坂道移動	11
1.4.3 跳躍	12
1.5 結言	13
第2章 プロトタイプ展における実演	14
2.1 緒言	14
2.2 部品製作と組み立て	14
2.3 動作試験と対人評価	15
2.4 マイクロコントローラ製作	16
2.5 ビジョンシステム構築	16
2.6 傾斜制御システム構築	17
2.7 実演用構造物の製作	17
2.8 システム構成	17
2.9 複数台動作試験	18
2.10 実証試験	20
2.11 結言	20
第3章 実証試験後の改良研究	22
3.1 曲げ変形アクチュエータを用いた移動	22
3.1.1 緒言	22

3.1.2	変形による移動の原理	22
3.1.3	プロトタイプを使用した動作検証	22
3.1.4	結言	25
3.2	移動と跳躍の分析	25
3.2.1	緒言	25
3.2.2	線状物体の静的シミュレーション	26
3.2.3	受動的変形による転がりの分析	29
3.2.4	跳躍の分析	36
3.2.5	結言	46

目 次

1.1	Principle of crawling and jumping by deformation	2
1.2	Prototype of circular soft robot made of rubber	2
1.3	Voltage patterns applied to SMA coils	4
1.4	Circular soft robot crawling	4
1.5	Circular soft robot climbing a slope	5
1.6	Prototype of circular soft robot made of spring metal	6
1.7	Voltage patterns for circular soft robot jumping	6
1.8	Circular soft robot made of spring metal jumping	7
1.9	Circular soft robot made of spring metal jumping higher	8
1.10	Prototype of spherical soft robot	8
1.11	SMA coils attached to spherical soft robot	9
1.12	Voltage patterns for spherical soft robot crawling	9
1.13	Deformation in transition through arc	10
1.14	Deformation in transition via vertex	11
1.15	Spherical soft robot climbing a slope by a transition via vertex	11
1.16	Voltage patterns for spherical soft robot jumping	12
1.17	Spherical soft robot jumping	12
1.18	Spherical soft robot jumping higher	13
2.1	Three prototypes for demonstration	15
2.2	Prototypes of spherical soft robot	15
2.3	Connectors for KOHARO	16
2.4	Demonstration of KOHARO jumping	18
2.5	Demonstration of KOHARO climbing a slope	18
2.6	Demonstration of KOHARO crawling	19
2.7	Demonstration at exhibition	19
2.8	Jumping type: breakage of SMA coil	20
2.9	Jumping type: relaxation of SMA coil	21
2.10	Jumping type: breakage of frame	21

2.11	Autonomous crawling type: deformation of core by heat	21
3.1	Deformation driven by SMA coils	23
3.2	Deformation driven by IPMC actuators	23
3.3	Prototype of IPMC circular soft robot	24
3.4	Voltage patterns applied to IPMC actuators	24
3.5	IPMC circular soft robot crawling	25
3.6	Shrinkage of deformat objects	27
3.7	Shrinkage of deformat sponge objects	27
3.8	Flexural energy caused by shrinkage	28
3.9	Object shapes on ground	28
3.10	Simulation shape of objects on ground	28
3.11	Shape of objects suspended at one point	28
3.12	Simulation shape of objects suspended at one point	29
3.13	Rotation of object (0.07 mm in thickness)	30
3.14	Rotation of object (0.03 mm in thickness)	30
3.15	Rotation of object (0.015 mm in thickness)	31
3.16	Climbing over object (0.07 mm in thickness)	32
3.17	Climbing over of object (0.03 mm in thickness)	32
3.18	Climbing over object (0.015 mm in thickness)	33
3.19	Flexural energy object	34
3.20	Cycle of circular object rolling down	35
3.21	Successive images of soft robot jumping	37
3.22	Shape and elastic strain energy	38
3.23	Height during jumping	39
3.24	Initial shapes for jumping	40
3.25	Jumping from shape D	41
3.26	Jumping from shape G	42
3.27	Jumping from shape I	43
3.28	Jumping from shape J	44
3.29	Jumping from shape H	45

表 目 次

2.1 Robots that are working	20
---------------------------------------	----

第1章 柔軟ロボットの構想と詳細設計

1.1 緒言

不整地移動ロボットには、主にクローラーや脚メカニズムが使われている。これらのロボットは硬いボディを有している。本論文では、柔軟いボディの変形を用いた従来のメカニズムと異なる移動手法を提案する。

硬いボディを有する移動メカニズムは大きく重いため、人間に危害を加える恐れや姿勢が崩れ反転した際に戻りにくい欠点を抱えている。近年、反転から戻るメカニズムが研究されている [1, 2]。また、跳躍ロボットに関する研究が従来より行われており [3, 4]、近年は小惑星探査への応用 [5]、移動と跳躍により不整地を踏破するメカニズムの開発 [6]、なぞり型脚式ロボットの研究 [7] へ発展している。しかしながら、これらのメカニズムは複雑である。そのため、軽くシンプルなメカニズムで不整地走行を実現することが望まれている。一方、近年のソフトアクチュエータ、すなわち形状記憶合金 (SMA) アクチュエータやポリマー/ゲルアクチュエータの発展は目覚ましく [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]、足機構や柔軟ロボットの駆動に用いられている [15, 16, 17]。柔軟アクチュエータを用いた移動機構は軽量になる可能性が高い。しかしながら現在のソフトアクチュエータには、いくつかの欠点がある。すなわち一般的に動作が遅く、移動や跳躍に必要な運動量や力積を生成することが難しい。代表的なソフトアクチュエータである形状記憶合金 (SMA) アクチュエータに関しては、従来より特性の改善に関する研究が進められており [18, 19]、近年は冷却機構を付加することによる応答の向上が提案されている [20, 21] が、依然として移動や跳躍に必要な運動量や力積を生成することが難しい。このような課題を解決するために、ソフトアクチュエータをロボットボディを変形させるために用い、変形により不整地上の移動と跳躍を実現する手法を提案する。変形するボディにエネルギーを蓄積し、それを急速に放出することにより移動や跳躍に必要な運動量や力積を得る。また、変形を用いた移動と跳躍は、硬いボディによる不整地走行より高い適応性を発揮すると期待できる。さらに、柔軟いロボットボディは人に与える衝撃が小さくなる。

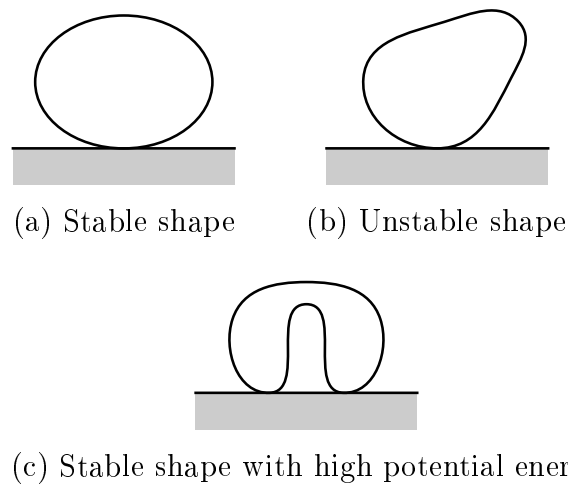


Fig. 1.1: Principle of crawling and jumping by deformation

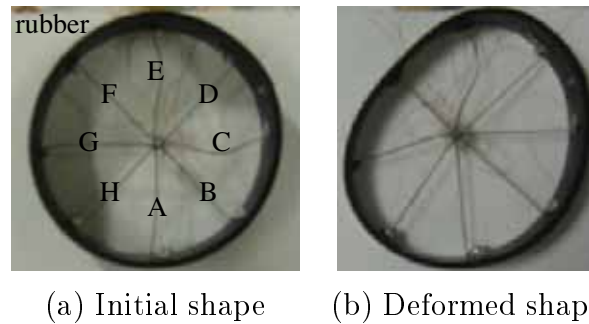


Fig. 1.2: Prototype of circular soft robot made of rubber

1.2 変形による移動と跳躍の原理

円形柔軟ロボットを地面に置くと Fig. 1.1-(a) に示すように安定状態となる。このとき、ロボットの重力ポテンシャルエネルギーは極小であり、ポテンシャルの勾配は0である。円形のボディを Fig. 1.1-(b) のように変形させポテンシャルエネルギーに勾配が生じると、ロボットと地面の接触領域まわりに重力によるモーメントが発生する。このモーメントによりロボットは地面の上を転がりながら移動する。例えば、Fig. 1.1-(b) の場合は、右回りにモーメントが発生し右方向に移動する。柔軟アクチュエータによって連続的な変形を行うことで、ロボットは移動し続けることができる。以上のように提案する移動の方式は、重力ポテンシャルエネルギーの勾配を用いている。

円形柔軟ロボットの跳躍原理を説明する。動作すると収縮する柔軟アクチュエータを用いるとする。一般にアクチュエータ自体の収縮速度は遅く、跳躍に必要な力積

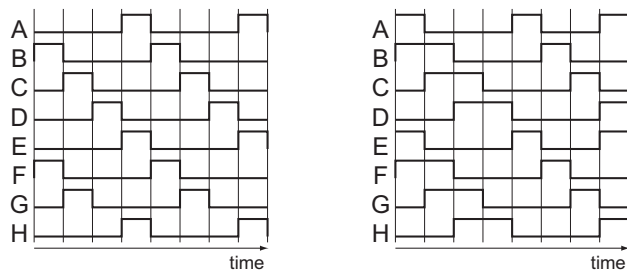
を得ることができない．そこで，円形のボディの変形を使うことによって跳躍する．柔軟アクチュエータを動作させ収縮力を発生させると，柔軟なボディは Fig. 1.1-(c) に示すように変形し，ボディに弾性ポテンシャルエネルギーを貯めることができる．アクチュエータが力を発生している限り，Fig. 1.1-(c) の形状は安定である．一方，アクチュエータの動作を止め収縮力を失うとこの形状は不安定になり，ロボットボディは Fig. 1.1-(c) の形状から Fig. 1.1-(a) に示す安定形状へ変形する．この変形を十分に速く実現できれば，ロボットボディは十分に大きい力積を地面に与えることができ，結果としてロボットは跳躍する．すなわち，この方法は弾性ポテンシャルエネルギーの蓄積と放出を用いている．内部の柔軟アクチュエータは，弾性エネルギーを貯めるために使われる．アクチュエータの収縮速度に制限されるため，弾性エネルギーを蓄積するときロボットボディの変形速度は小さい．一方，弾性エネルギーを放出するとき，ロボットボディの変形速度はロボットボディの曲げ変形の粘弾性によって決まるため，変形速度は弾性エネルギーを蓄積するときより大きくなる．したがって，変形するロボットボディが有する運動量はエネルギーを放出するときに大きくなり，跳躍に必要な力積を実現することができる．なお，このような弾性エネルギーの蓄積と放出は，物体捕獲に用いられている [22]．また，昆虫の跳躍に見ることができる [23]．

円形柔軟ロボットのプロトタイプを Fig. 1.2 に示す．Fig. 1.2-(a) に示すように，円形柔軟ロボットは円形の弾性殻と内部に取り付けられた柔軟アクチュエータから構成される．このロボットには，円の中心から円周に向かって8本の SMA コイルが取り付けられており，A から H とラベル付けされている．SMA コイルを収縮させると弾性殻が変形する．たとえば，SMA コイル F に電圧を印加し収縮させると，円形柔軟ロボットの弾性殻は Fig. 1.2-(b) に示すように変形する．この円形柔軟ロボットでは弾性殻の材料に天然ゴムを使用した．変形させるための柔軟アクチュエータとして，トキ・コーポレーション社製 SMA コイル BMX100 を採用した．円形の弾性殻の直径は 40mm，ロボット全体の質量は 3.6g である．一定のパターンに沿って SMA コイルの収縮と弛緩を行うことで，ロボットは移動と跳躍を行う．

1.3 円形柔軟ロボットの動作試験

1.3.1 平地移動

Fig. 1.2-(a) に示す円形柔軟ロボットの性能を実験的に検証する．移動の際は，Fig. 1.3-(a) に示すパターン BF を SMA コイルに印加する．パターン BF での移動の様子を Fig. 1.4 に示す．図に示すとおり，円形柔軟ロボットは平面移動できる．なお，本実験での最大移動速度は 26mm/s であった．一秒間に進む距離は，円形柔軟ロボット



(a) Voltage pattern BF (b) Voltage pattern ABE

Fig. 1.3: Voltage patterns applied to SMA coils



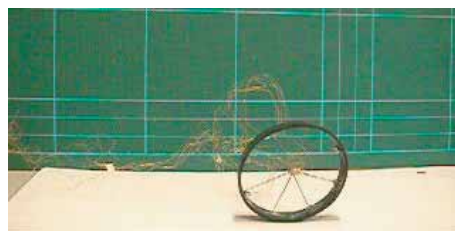
(a) 0 [s]



(b) 2 [s]



(c) 4 [s]



(d) 6 [s]



(e) 8 [s]



(f) 10 [s]

Fig. 1.4: Circular soft robot crawling

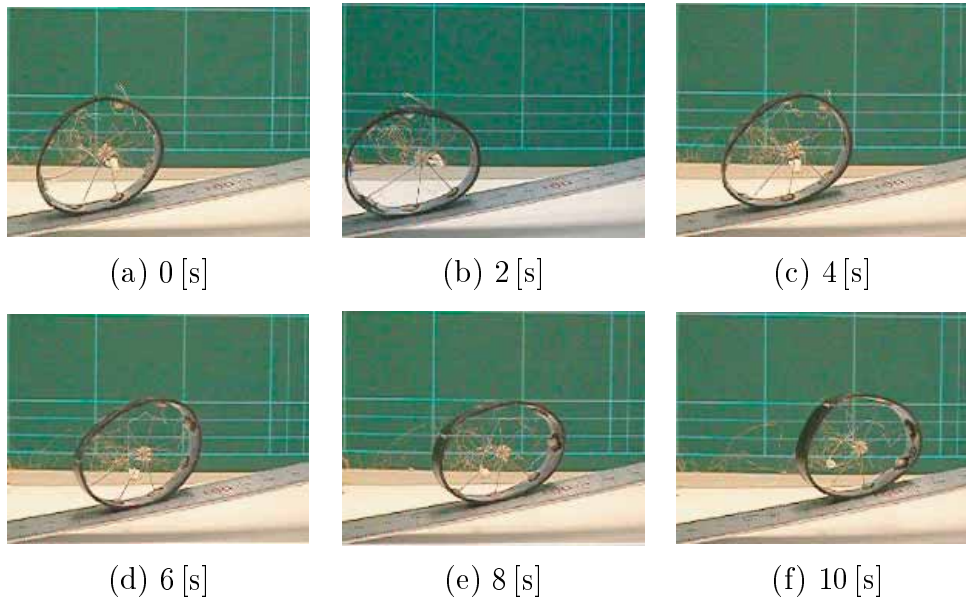


Fig. 1.5: Circular soft robot climbing a slope

の直径の 65%に相当する.

1.3.2 坂道移動

Fig. 1.3-(b) の電圧パターン ABE を SMA コイルに印加することで、坂道を登ることができる. Fig. 1.5 に 15° の坂道を登る様子を示す. 坂道は金属製のスケールである. この場合、最大 20° の坂道をロボットは登ることができることを確認した.

1.3.3 跳躍

ゴムの殻を用いた円形柔軟ロボットのプロトタイプでは、跳躍することができなかった. その理由として、十分な曲げ弾性がないことが考えられる. そこで、バネ鋼を円形の殻に用いて、円形柔軟ロボットを試作した. バネ鋼を用いることで、十分な曲げ弾性と塑性変形しにくい特性を殻に持たせることができる. 幅 12mm, 厚さ 0.1mm のバネ鋼を用いた円形柔軟ロボットのプロトタイプを Fig. 1.6 に示す. 曲げ弾性を増した分、収縮力の強い BMX200 を用いた. BMX200 の収縮力は BMX100 の収縮力の約 4 倍の 600mN である. 8 本の SMA コイルを円の内側に取り付け、さらに、跳躍用 SMA コイル I を円の外側を通して B と H の端点の間に取り付けてある. 直径は 90mm, 質量は 4.0g である. 跳躍の過程を横からビデオカメラで撮影し、

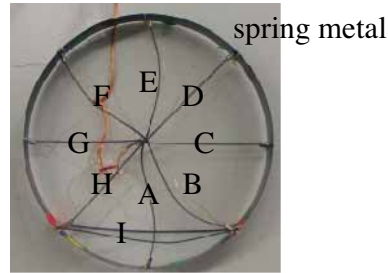


Fig. 1.6: Prototype of circular soft robot made of spring metal

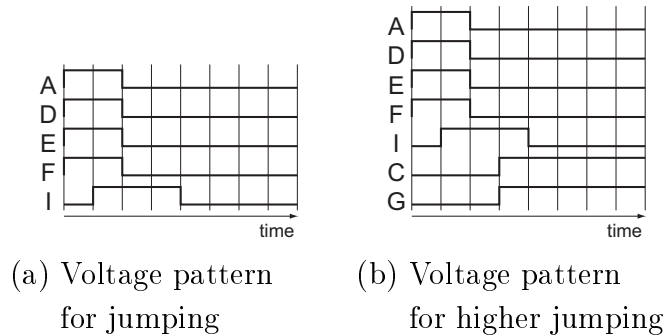


Fig. 1.7: Voltage patterns for circular soft robot jumping

ロボットの最下部と床との距離を求め、その距離を跳躍実験における跳躍量とする。

Fig. 1.7-(a)に示す電圧パターンをSMAコイルに印加した。Fig. 1.8に示すように、円形柔軟ロボットは跳躍できる。本実験では、 $\text{step1} = 4\text{s}$, $\text{step2} = 3\text{s}$, $\text{step3} = 10\text{s}$ とした場合、バネ鋼の殻を用いたプロトタイプは160mm跳躍することができた。これは円形柔軟ロボットの直径の約1.7倍に相当する。Fig. 1.7-(b)に示す電圧パターンをSMAコイルに印加した。そのときの跳躍をFig. 1.9に示す。特に、 $\text{step1} = 4\text{s}$, $\text{step2} = 3\text{s}$, $\text{step3} = 15\text{s}$, $\text{step4} = 3\text{s}$ とした場合、ロボットは300mm跳躍することができ、跳躍量が2倍近く増加した。跳躍量は円形柔軟ロボットの直径の約3.3倍に相当する。

1.4 球形柔軟ロボットの動作試験

円形柔軟ロボットは、円形という形状から、移動方向が前進後退に限られ、十分な不整地走行ができない。この問題を解決するために、球形柔軟ロボットを製作した。基本形状は球形であり、柔軟アクチュエータによって球形のボディを変形させる。柔らかい球形のボディを変形させることによって、多方向への移動と跳躍を実現し不整地を走行する。三つの円形フレームを互いに直交するように組み合わせる

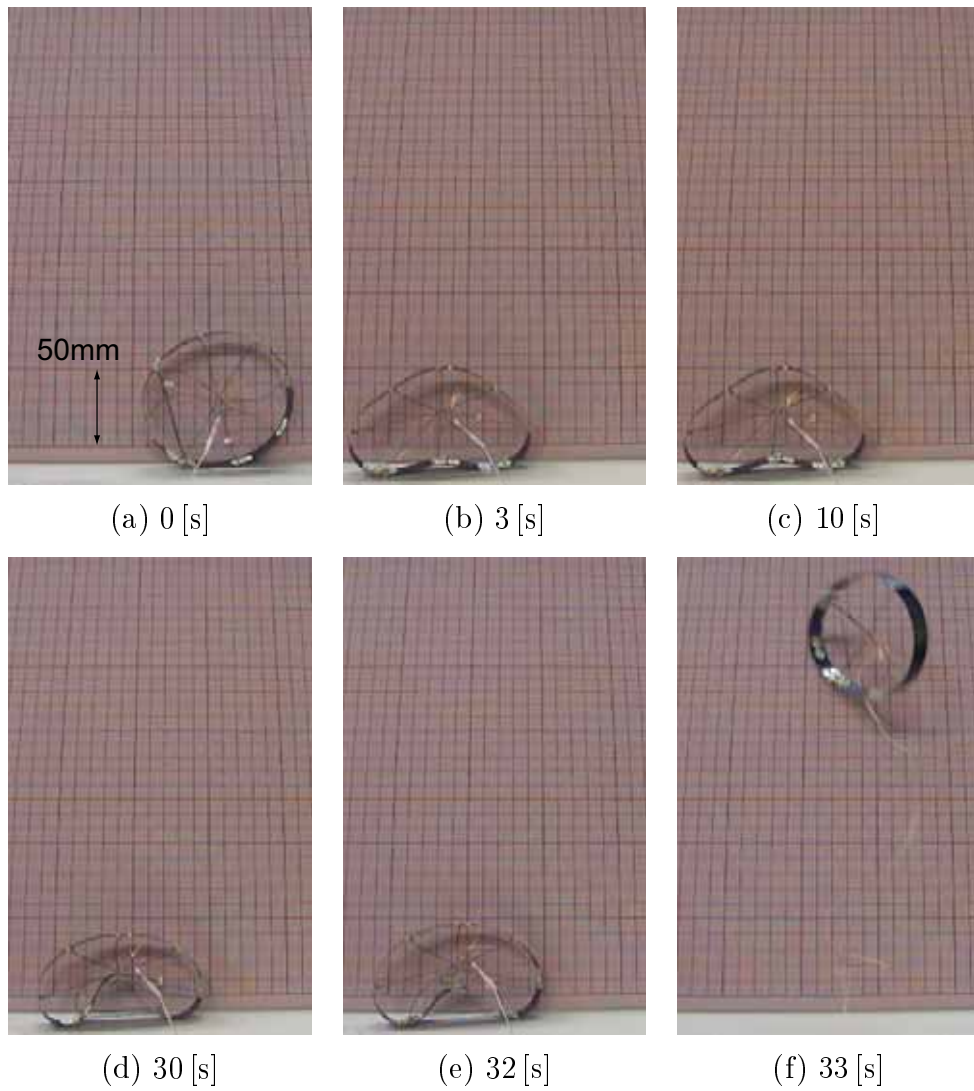


Fig. 1.8: Circular soft robot made of spring metal jumping

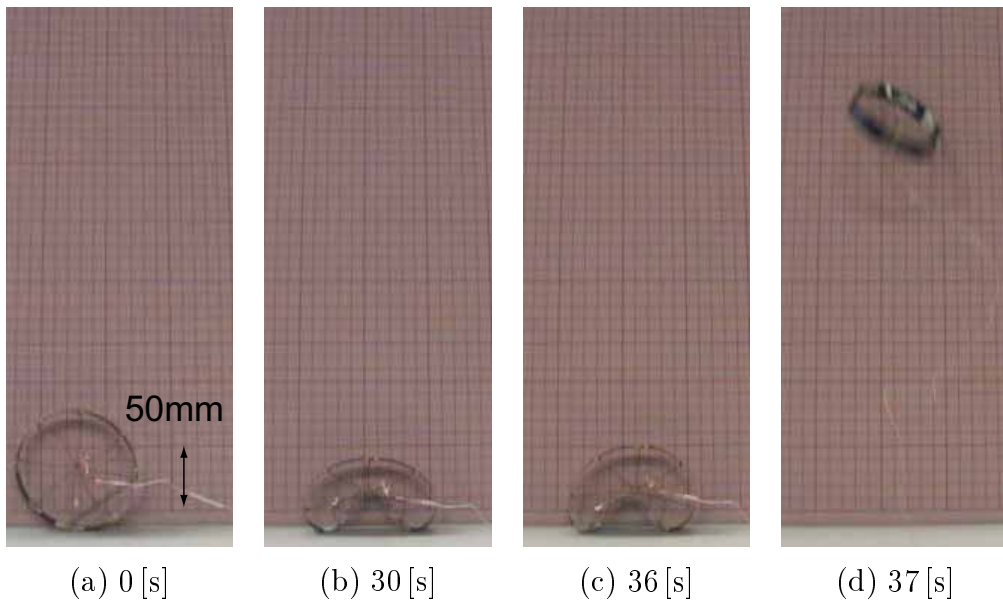


Fig. 1.9: Circular soft robot made of spring metal jumping higher

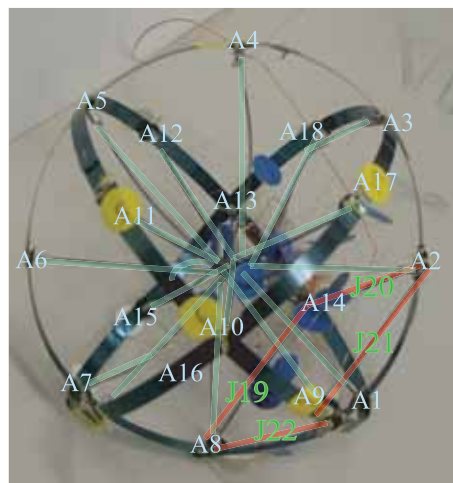


Fig. 1.10: Prototype of spherical soft robot

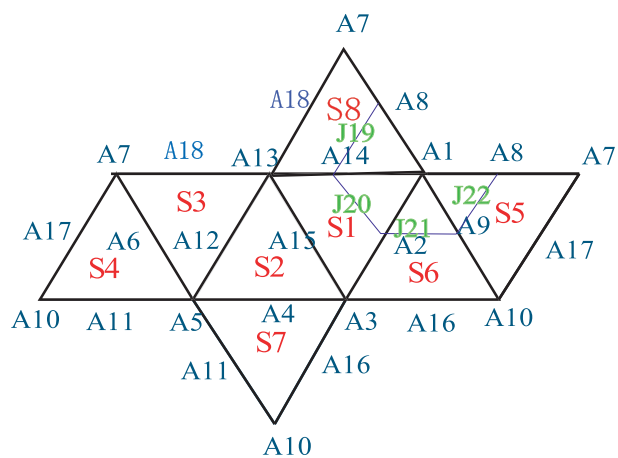


Fig. 1.11: SMA coils attached to spherical soft robot

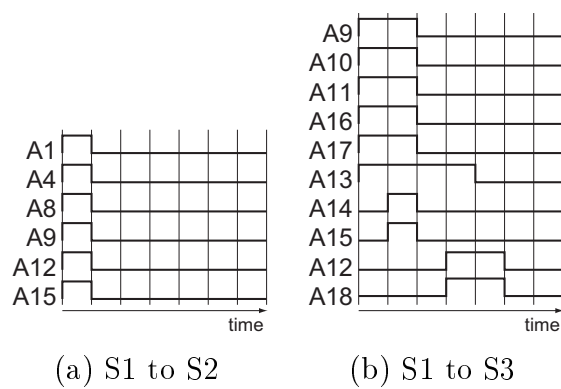


Fig. 1.12: Voltage patterns for spherical soft robot crawling

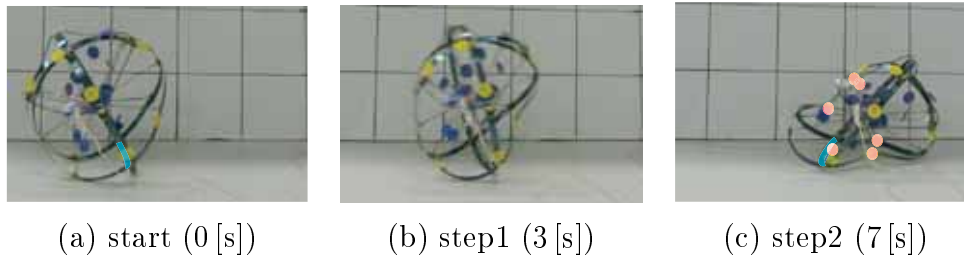


Fig. 1.13: Deformation in transition through arc

ことで、Fig. 1.10 に示す球形柔軟ロボットのプロトタイプを試作した。球の殻を構成する三つのフレームは、幅 4mm、厚さ 0.1mm のバネ鋼である。Fig. 1.10 に示すように、中心から 18 本の BMX200 を放射状に取り付けてある。各 SMA は A1 から A18 の記号で区別する。また、跳躍用 SMA コイル 4 本が、SMA コイル A2 と A9、A9 と A8、A8 と A14、A14 と A2 のそれぞれの端末間に取り付けてあり、J19 から J22 の記号で区別する。ロボットの直径は 90mm、自重は 5g である。

1.4.1 平面移動

球形柔軟ロボットのプロトタイプは完全な球形でなく、三つの円形フレームを組み合わせたロボットである。そのため、水平な床に対して安定な状態は三つのフレームが床に接する場合である。プロトタイプにはこの安定状態が 8 つ存在する。この安定状態間の遷移により移動を実現する。三フレーム型球形柔軟ロボットの展開図を Fig. 1.11 に示す。記号 A1 から J22 は SMA コイルの付いている位置を示している。8 つの安定状態を S1 から S8 と呼ぶ。一つの安定状態から他の安定状態への遷移を連続的に行うことによって、移動を実現する。三フレーム型球形柔軟ロボットの安定状態からの移動方法は、二つに分類できる。一方は、床と接しているフレームの方向に進むパターンであり、もう一方は、フレームとフレームの交点方向に進むパターンである。前者をエッジパターン、後者をインターセクションパターンと呼ぶ。

エッジパターンの例として、安定状態 S1 から S2 への移動を示す。移動の様子を Fig. 1.13 に示す。SMA コイル A2, A14, A15 の端点に対応するフレームが床に接しており、Fig. 1.13-(a) の状態から、A15 が接続されている右のフレームの向きに移動する。その場合、Fig. 1.12-(a) に示すパターンを SMA コイルに印加することによって、S1 から S2 へ移動できる。各ステップの時間を短くすることで、移動速度を速めることができる。本実験での最小のステップ時間は $\text{step1} = 3\text{s}$, $\text{step2} = 4\text{s}$ であり、一回の遷移での移動量 60mm から移動速度は 8.5mm/s と計算できる。すなわち一秒間に進む距離は、球形柔軟ロボットの直径の約 9% に相当する。

インターセクションパターンの例として、安定状態 S1 から S3 への移動を示す。移

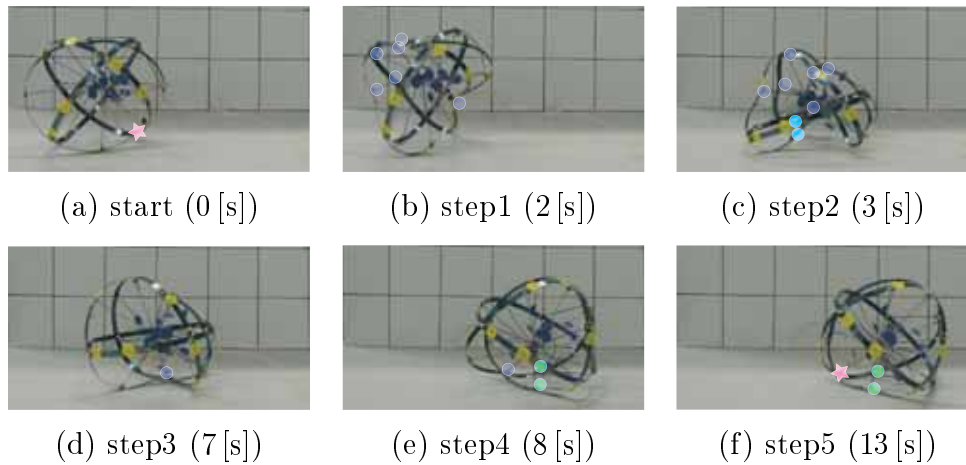


Fig. 1.14: Deformation in transition via vertex

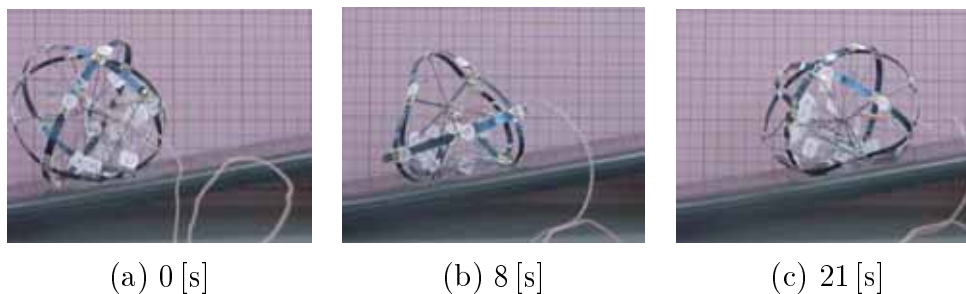


Fig. 1.15: Spherical soft robot climbing a slope by a transition via vertex

動の様子を Fig. 1.14 に示す. Fig. 1.14-(a) の状態から, SMA コイル A13 が接続されている交点の方向に進む. その場合, Fig. 1.12-(b) に示すパターンを SMA コイルに印加することによって, S1 から S3 へ移動できる. 本実験での, 各ステップの最小時間は, $\text{step1} = 2\text{s}$, $\text{step2} = 1\text{s}$, $\text{step3} = 4\text{s}$, $\text{step4} = 1\text{s}$, $\text{step5} = 6\text{s}$, $\text{step6} = 10\text{s}$ であり, 一回の遷移での移動量 90mm から移動速度は 3.7mm/s と計算できる. すなわち一秒間に進む距離は, 球形柔軟ロボットの直径の約 4% に相当する.

1.4.2 坂道移動

水平面移動で示した二つの移動パターンで, 坂道を登ることができる. インターセクションパターンでの坂道移動の様子を Fig. 1.15 に示す. 坂道はプラスチックの板である. エッジパターンでは 6° , インターセクションパターンでは 10° の坂道を登ることができることを確認した.

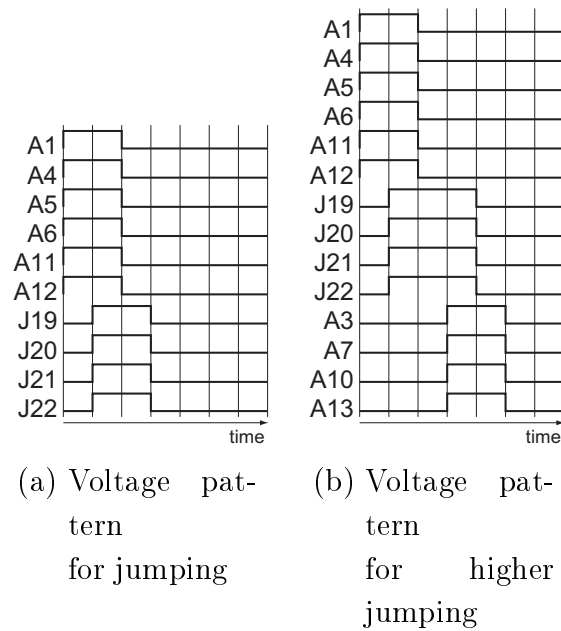


Fig. 1.16: Voltage patterns for spherical soft robot jumping

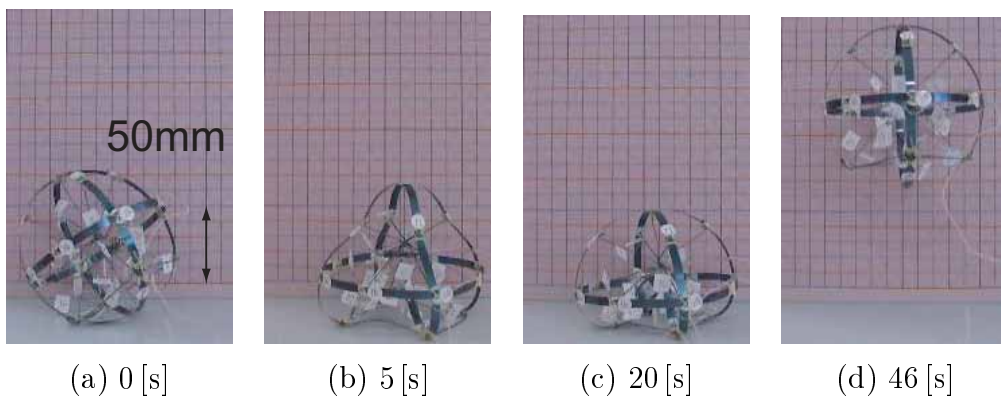


Fig. 1.17: Spherical soft robot jumping

1.4.3 跳躍

球形柔軟ロボットは、円形柔軟ロボットと同様に跳躍が可能である． Fig. 1.16-(a) に示す跳躍パターンをSMA コイルに印加することで、跳躍することができる． 跳躍の様子を Fig. 1.17 に示す． 本実験では、 $\text{step1} = 4\text{s}$ 、 $\text{step2} = 3\text{s}$ 、 $\text{step3} = 30\text{s}$ として SMA コイルを制御した． そのときの跳躍量は 70mm であった． これは球形柔軟ロボットの直径の約 0.7 倍に相当する．

円形柔軟ロボットと同様に、跳躍待機形状で幾つかの SMA に電圧を印加すること

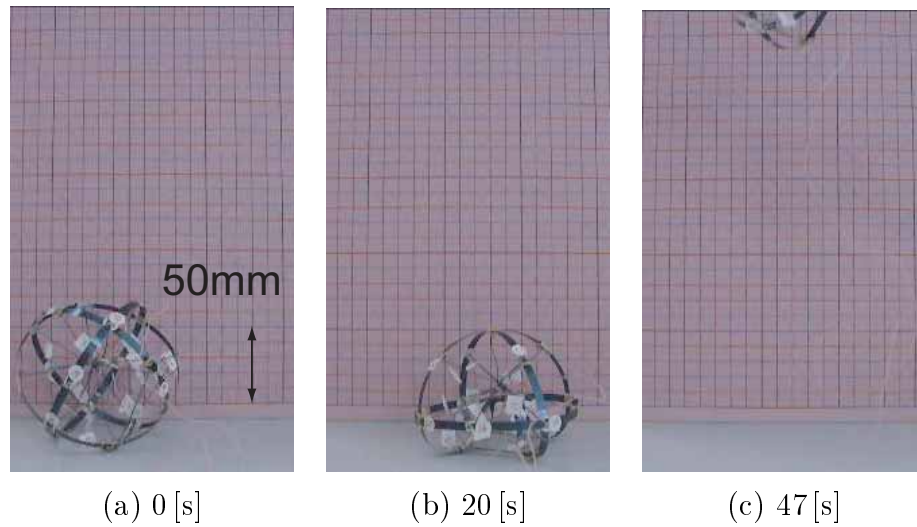


Fig. 1.18: Sphrical soft robot jumping higher

で、球形柔軟ロボットの跳躍量を増やすことができる．球形柔軟ロボットの跳躍量増加のパターンを Fig. 1.16-(b) に示す．通常の跳躍パターンに A3, A7, A10, A13 の制御が追加されている．Fig. 1.16-(b) の電圧パターンで SMA コイルを制御した場合の跳躍の様子を Fig. 1.18 に示す．跳躍待機形状で A3, A7, A10, A13 に電圧を印加することで、Fig. 1.18-(c) に示すように床に触れている跳躍変形部の曲率がさらに大きくなっている．この状態で、跳躍用 SMA コイル J19, J20, J21, J21 の電圧を切ると、高く跳躍させることができる．本実験では $\text{step1} = 4\text{s}$, $\text{step2} = 3\text{s}$, $\text{step3} = 30\text{s}$, $\text{step4} = 3\text{s}$ として SMA コイルを制御した．このとき、ロボットは 180mm 跳躍することができ、跳躍量が 2.5 倍に増加した．跳躍量は球形柔軟ロボットの直径の約 2 倍に相当する．

1.5 結言

本論文では、柔軟なロボットの変形による移動と跳躍を提案した．まず、ロボットボディの変形を利用した移動と跳躍の原理を述べた．次に、スライダー付き三要素モデルを用いた変形シミュレーションにより、円形柔軟ロボットが移動と跳躍を実現できる可能性を示した．さらに、円形柔軟ロボットと球形柔軟ロボットという二種類のプロトタイプが、移動と跳躍を実現できることを実験的に示した．円形柔軟ロボットのプロトタイプは、一秒間に直径の約 65% 移動し、 20° の坂を登り、直径の 3.3 倍の高さに跳躍することができた．球形柔軟ロボットのプロトタイプは、一秒間に直径の約 9% 移動し、 10° の坂を登り、直径の 2 倍の高さを跳躍することができた．

第2章 プロトタイプ展における実演

2.1 緒言

愛知万博のプロトタイプ展で、「跳躍移動ソフトロボット KOHARO」の実演を行った。KOHAROは、前章で述べたように、柔らかいボディの変形により地面の上を転がったり跳ねたりするロボットである。クローラや脚機構、ヘビ型ロボットなどの移動機構は、主として硬い部品から構成されている。一方、KOHAROは、柔らかいボディを柔らかいアクチュエータで変形させ、移動と跳躍を実現するという今までにないアイデアで不整地を走行する。KOHAROは、転がり (KO) 跳ねる (HA) ロボット (RO) の略である。軽量で柔らかく、生物的な動きが特徴である。本章では、プロトタイプ展における実演とその評価について述べる。

2.2 部品製作と組み立て

愛知万博のプロトタイプ展における KOHARO の実演のために、以下に示す三種類のプロトタイプを製作した。

- 跳躍移動型
- 自律移動型
- 坂登り型

三種類のプロトタイプを Fig. 2.1 に示す Fig. 2.2-(a) に示す跳躍移動型は、前章で述べた球形ロボットと同じである。これは主に跳躍の実演に用いる。Fig. 2.2-(b) に示す自律移動型は、自律移動の可能性を実演するプロトタイプである。ロボットの直径は 200mm、自重は 137g である。SMA アクチュエータの配置は、前章の球形ロボットと同じである。球形ロボットは坂を登る速度がプロトタイプ展の実演としては十分ではないため、坂登り型を製作した。坂登り型は円柱形状を有しており、二つの円型ロボットを軸方向に接続して製作する。

複数枚のフレームを組み合わせて KOHARO を製作するため、強度を有する接合部が要求される。また、接合部には SMA コイルや LED を配置する必要がある。そ



Fig. 2.1: Three prototypes for demonstration



(a)



(b)

Fig. 2.2: Prototypes of spherical soft robot

ここで、Fig. 2.3 に示す接合部品を製作した．Fig. 2.3(a) に示す接合部品は、二枚のフレームと SMA コイルを接合するとともに、上部に LED と LED 用の配線を設置するスペースを有する．Fig. 2.3(b) に示す接合部品は、二枚のフレームと SMA コイルを接合する．三種類のプロトタイプロボットの製作には、これらの接合部品を用いる．

2.3 動作試験と対人評価

移動の動作試験の結果を 1.4.1 節に、坂登りの動作試験の結果を 1.4.2 節に、跳躍の動作試験の結果を 1.4.3 節に示す．実演に必要なパフォーマンスは得られていると判断した．また、本態の重量、本体の移動速度から、人に危害を与える可能性は低いと判断した．



Fig. 2.3: Connectors for KOHARO

2.4 マイクロコントローラ製作

確実な動作のために、電子回路を基板上に実装した。跳躍移動型と坂登り型における内部基盤と電源ユニットの回路図を付録に示す。基盤には、SMAの駆動回路とマイクロコンピュータが内蔵されている。PC上であらかじめコンパイルしたプログラムをマイクロコンピュータにダウンロードすることで、跳躍移動型や坂登り型はプログラムにしたがって動くことができる。自律移動型においては、球形ボディの中心に樹脂製のコアがあり、コアの内部にはSMAの駆動回路、LEDの駆動回路、マイクロコンピュータ、シリアル通信回路が収められている。回路の重量は75gである。自律移動型の内部基盤と電源ユニットの回路図を付録に示す。シリアル通信回路を通して外部からマイクロコンピュータに動作指令を与えることにより、ロボットは自律的に移動することができる。

2.5 ビジョンシステム構築

自律移動型の実演では、視覚誘導のデモンストレーションを行う。この実演では、外部カメラで複数のプロトタイプの位置と姿勢を求め、その結果をプロトタイプに送信することにより、複数のプロトタイプの協調的な運動を示す。移動型プロトタイプには6個のLEDが取り付けられている。内部のマイクロプロセッサでLEDの発光パターンを制御しつつ、外部のカメラと通信する。CCDカメラは、上部からデモステージを撮影している。CCDカメラは画像処理用のPCに接続されている。さらに、自律移動型のプロトタイプは、画像処理用のPCと通信することができる。

2.6 傾斜制御システム構築

自律移動型プロトタイプの姿勢は、ビジョンシステムを用いて検出する。まず、一個のLEDを発光させ、画像重心の計算により、発光しているLEDの平面内の位置を求める。すなわち、プロトタイプから画像処理用PCにリクエストを送り、それを受けた画像処理用PCはLEDの発光コマンドをプロトタイプに送信する。その直後に画像処理用PCはCCDカメラから画像を取得し、画像重心を計算した後に、画像重心の値をプロトタイプに送信する。六個のLEDを順次発光させ、それぞれの重心位置を求めると、プロトタイプの位置と姿勢を計算することができる。すなわち、複数枚の撮影画像からプロトタイプの位置と姿勢を計算し、その結果をプロトタイプに送信する。プロトタイプは、現在の位置と姿勢と目標の位置から、アクチュエータの駆動パターンを決定し、動作する。すなわち、自律移動型プロトタイプは個々の位置と姿勢を認識し、それに応じて運動を制御することができる。

2.7 実演用構造物の製作

三種類のプロトタイプの動作を実演するために、実演用のステージを製作した。実演用ステージの設計図を付録に示す。ステージの内部には、制御用PC、ビジョン用PC、跳躍移動型と坂登り型の内部基盤と電源ユニット、自律移動型の電源ユニットを収納する。ステージ表面にコネクタを設置し、ロボットの配線をコネクタに接続することにより、そのロボットが動作する。ロボットが故障した場合は、コネクタから配線を外し、別のロボットの配線を接続すれば良い。実演においては、移動跳躍型、坂登り型、自律移動型を、ステージ内で順次動作させる。

2.8 システム構成

実演用のシステムは主に、跳躍移動型、坂登り型、跳躍移動型と坂登り型の内部基盤と電源ユニット、自律移動型(内部に基盤を含む)、自律移動型の電源ユニット、制御用PC、CCDカメラ、ビジョン用PCから構成される。跳躍移動型や坂登り型は、跳躍移動型と坂登り型の内部基盤に接続され、電力は跳躍移動型と坂登り型の電源ユニットから供給される。自律移動型内部の基盤は通信のために制御用PCに接続されており、基盤を駆動する電力は自律移動型の電源ユニットから供給される。CCDカメラはビジョン用PCに接続されている。ビジョン用PC上で画像処理を行う。制御用PCとビジョン用PCはシリアルラインで接続されており、相互にデータを通信することができる。自律移動型の視覚誘導のデモンストレーションにおいては、LEDの発光指令と画像処理の結果を通信する。

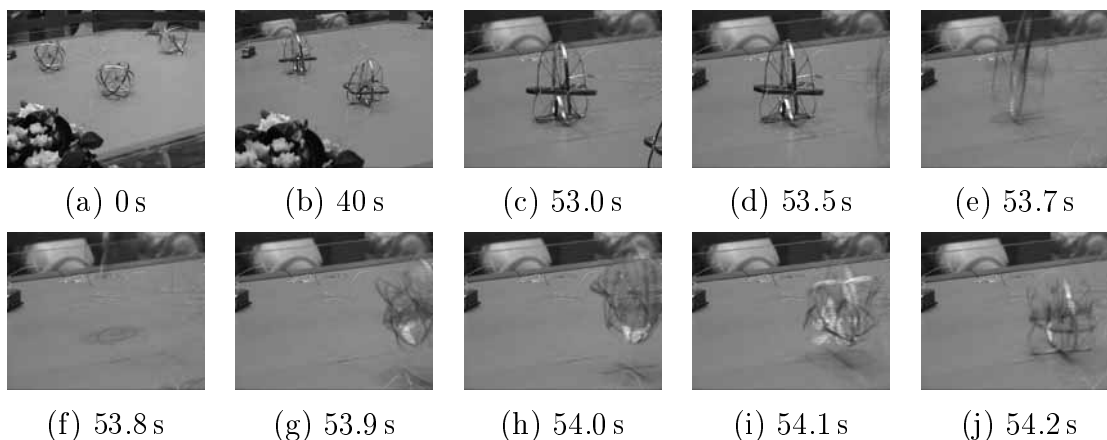


Fig. 2.4: Demonstration of KOHARO jumping

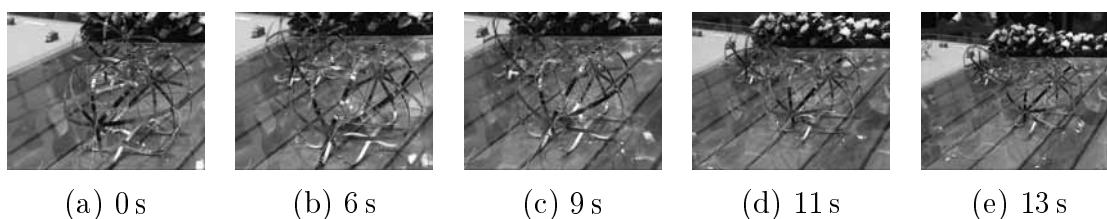


Fig. 2.5: Demonstration of KOHARO climbing a slope

2.9 複数台動作試験

Fig. 2.4に、跳躍移動型の動作の様子を示す．個々のロボットが跳躍するためには約1分を要するため，実演では同時に4体のロボットを稼働させる．Fig. 2.5に、坂登り型の動作の様子を示す．実演では二体のロボットを同時に稼働させる．一体は坂を登り，もう一体は坂を降る．Fig. 2.6に、自律移動型の動作の様子を示す．赤いボディの一体を親とみなし，4体の子とみなしたロボットが親ロボットに向かって移動するデモンストレーションである．すなわち，実演では五体のロボットを同時に稼働させる．親の位置，子の位置と姿勢をカメラで計測し，子ロボットに送信する．子ロボットは，受信した情報に基づいて親の方向に移動するために必要な駆動パターンを計算し，実行する．以上の図に示すように，KOHAROのプロトタイプは良いパフォーマンスを示した．Fig. 2.7に実演の様子を示す．

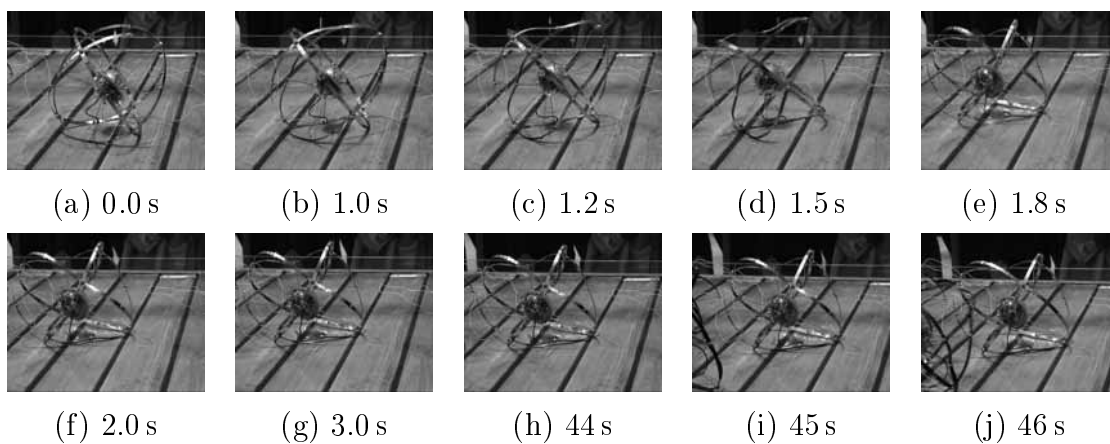


Fig. 2.6: Demonstration of KOHARO crawling



Fig. 2.7: Demonstration at exhibition

Table 2.1: Robots that are working

	製作台数	プロトタイプ展 終了時	ロボットステーション 実演終了時
移動跳躍型	30 台	10 台	4 台
自律移動型	16 台	11 台	7 台
坂道型	6 台	5 台	5 台



(a)



(b)

Fig. 2.8: Jumping type: breakage of SMA coil

2.10 実証試験

2005年6月9日から19日までの愛知万博プロトタイプロボット展での実演，7月26日から8月7日までのロボットステーションでの実演の後に，製作したロボットの内，正常に動くロボットの割合を調べた．

特に，跳躍移動型が故障する割合が高い．跳躍移動型の故障は，SMAコイルの切断や弛緩，外周のフレームの破断と多岐に渡っている．SMAコイルが切断した例を，Fig. 2.8に示す．SMAコイルが弛緩した例を，Fig. 2.9に示す．跳躍移動型のフレームが破断した例を，Fig. 2.10に示す．自律移動型に特有の故障として，SMAコイルの発熱によるコアの変形がある．コアが変形した例を，Fig. 2.11に示す．

2.11 結言

本章では跳躍移動ソフトロボット KOHARO のプロトタイプ展における実演について述べた．プロトタイプ展の間，KOHARO の移動と跳躍を実演することに成功したが，様々な故障が生じた．特に，移動跳躍型に故障が顕著であるため，ロボットの構造や跳躍のパターンを再考すべきと考える．

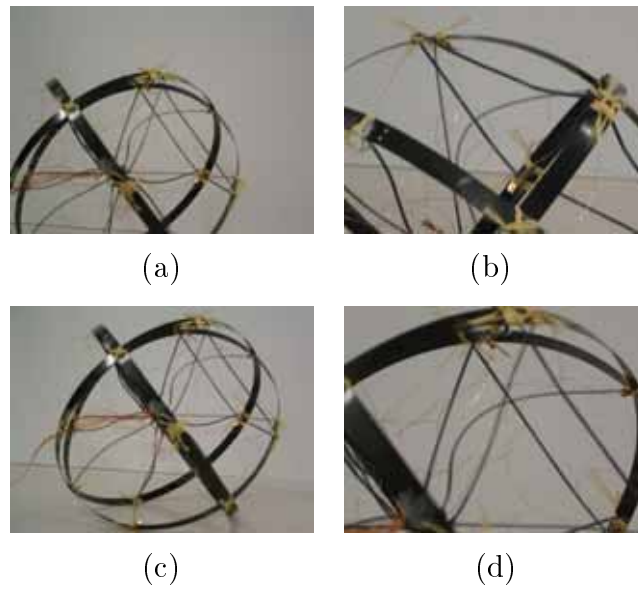


Fig. 2.9: Jumping type: relaxation of SMA coil

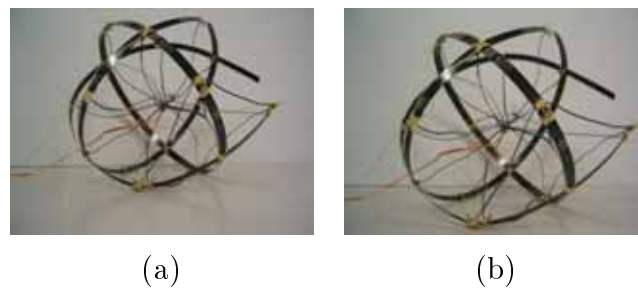


Fig. 2.10: Jumping type: breakage of frame

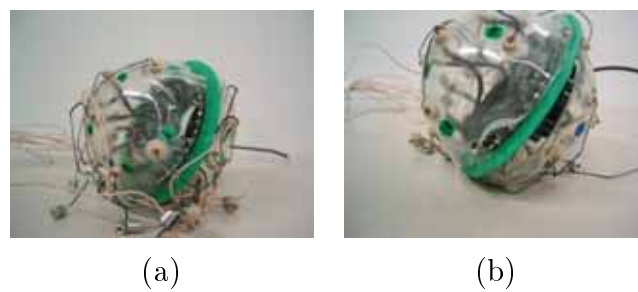


Fig. 2.11: Autonomous crawling type: deformation of core by heat

第3章 実証試験後の改良研究

3.1 曲げ変形アクチュエータを用いた移動

3.1.1 緒言

著者らは、ソフトアクチュエータとしてSMAコイルを用い、ロボットボディを変形させ、変形により不整地上の走行を実現する手法を提案してきた。しかし、このロボットではボディの中心にSMAコイルや配線があり、ロボット内部に動力源やセンサなどを搭載することが難しい。それを可能にするためには、アクチュエータをボディとして用い、ロボット内部には空間を残す必要がある。本論文では、IPMCアクチュエータをロボットボディとして用い、IPMCの屈曲運動によるボディの変形により移動する手法を検討する。

3.1.2 変形による移動の原理

ロボットボディを変形させる方法としては、伸縮型アクチュエータを用いボディを内部から引っ張る方法と、屈曲型アクチュエータをボディ全体に取り付け、ボディの屈曲を用いる方法がある。前者の方法については、形状記憶合金(SMA)コイルを用いた移動跳躍ソフトロボット「KOHARO」で実現した。このロボットには、Fig. 3.1に示すようにロボットの中心からSMAコイルを放射状に8本取り付け、SMAコイルの収縮によりボディを変形させ、ロボットの移動を実現する。本論文では、後者の方法を用いたボディの変形を提案する。Fig. 3.2-(a)のようにIPMCアクチュエータ4本をボディとして取り付ける。IPMCは、電流の向きを変えることで2種類の変形を実現できる。Fig. 3.2-(b)とFig. 3.2-(c)は、電流の向きを変えた場合の変形を示す。Fig. 3.2-(a)と比べると、IPMCの曲率が増減している。

3.1.3 プロトタイプを使用した動作検証

変形移動を確認するためにプロトタイプを製作した。IPMCアクチュエータは、米ERI社製で厚さ0.3mmである。このIPMCアクチュエータは空気中での動作が可能

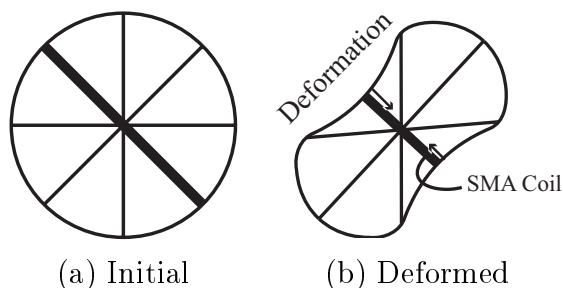


Fig. 3.1: Deformation driven by SMA coils

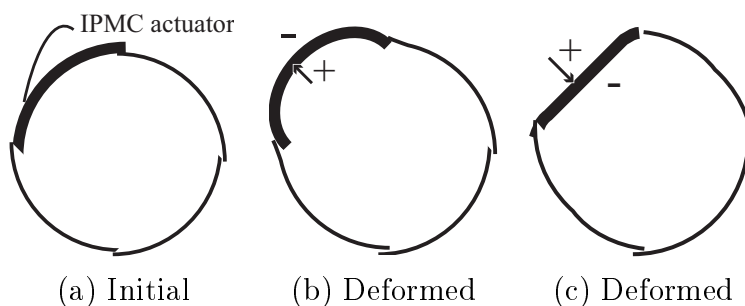


Fig. 3.2: Deformation driven by IPMC actuators

である。Fig. 3.3-(a)に示すように IPMC アクチュエータ 4 本により、円形状を作る。それぞれの IPMC アクチュエータは、電流の向きにより曲率の違う 2 つの形に制御できる。また、IPMC アクチュエータに流す電流と PWM の Duty 比で、変形速度と曲率を変更できる。ロボット本体の質量は、3g である。

各 IPMC アクチュエータの表面と裏面に 2 枚の電極を貼る。Fig. 3.3-(a)に示すように、4 本の IPMC アクチュエータの電極を記号 a から h で表す。Fig. 3.4-(a)に示すパターンを IPMC アクチュエータ 4 本に用いた時のボディの変形を、Fig. 3.3 に示す。Fig. 3.4-(a)は、電極 b,c,f,g に+の電圧、電極 a,d,e,h に-の電圧を印加するパターンである。

Fig. 3.5 に、プロトタイプの移動の様子を示す。Fig. 3.4-(b)に示すパターンで、各 IPMC アクチュエータに電圧を印加した。第 1, 2 ステップで、外側の電極 a には+の電圧、内側の電極 b には-の電圧を印加し、電流を外側から内側に流す。次の第 3 ステップで、電流の向きを内側から外側に変える。移動を行う際は、電極の置き方を変えることによる電流の向きの変化の組合せを、ステップ間隔で順次移行させる。すると、ボディの変形が連続的に起こり、ロボットが移動する。ロボットが 90 °回転するには、3 つのステップ、16s の時間を要する。このプロトタイプは、64s で 360 °回転し、180 mm の移動が可能である。

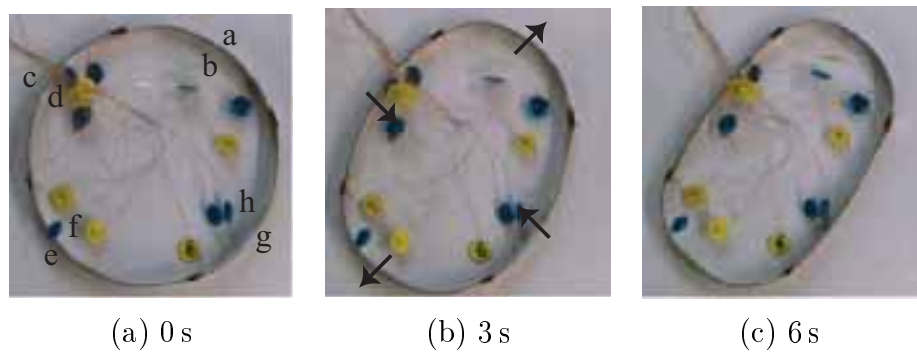


Fig. 3.3: Prototype of IPMC circular soft robot

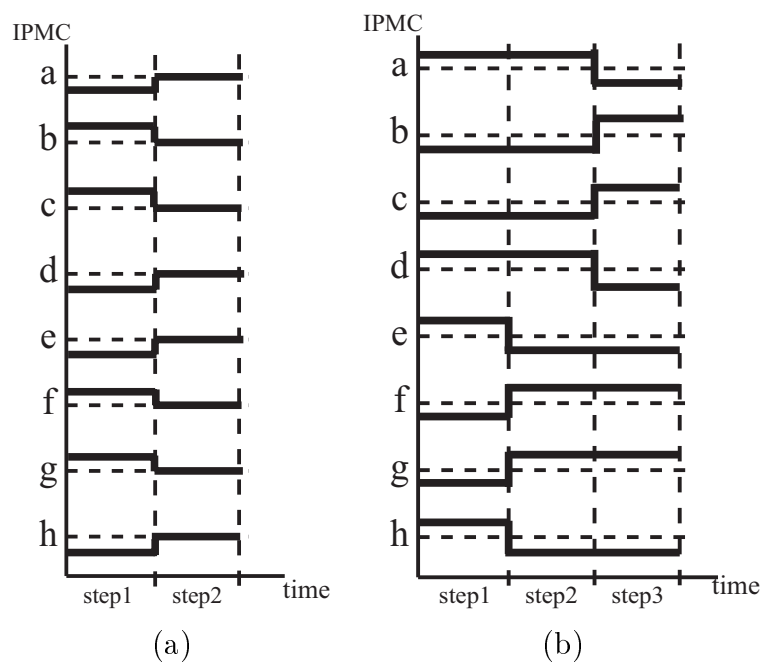


Fig. 3.4: Voltage patterns applied to IPMC actuators

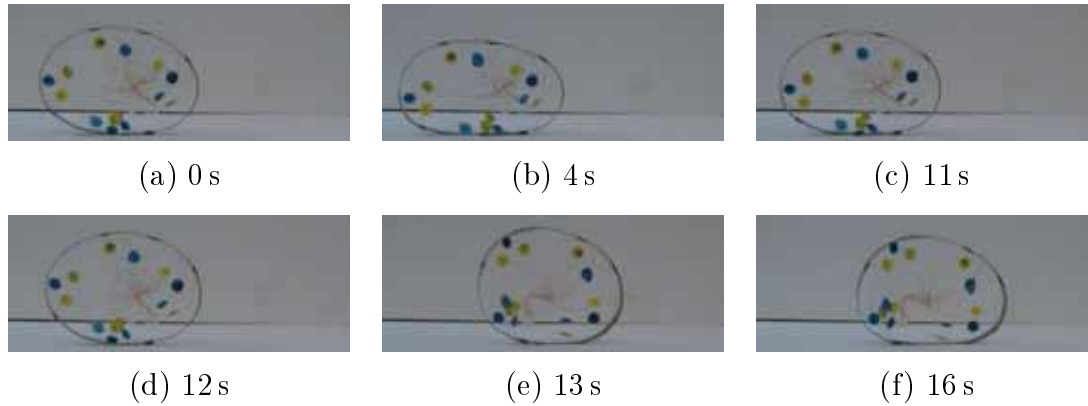


Fig. 3.5: IPMC circular soft robot crawling

3.1.4 結言

本論文では、IPMC アクチュエータにより移動が可能なソフトロボットを提案した。まず、アクチュエータをロボットボディとして用い、ボディの変形を利用した移動の原理を述べた。次に、プロトタイプを用いて、変形による移動が可能なことを示した。

3.2 移動と跳躍の分析

3.2.1 緒言

柔軟ロボットの移動の移動では、ボディを変形させ、その変形を利用して移動する。小川らはIPMCを用いた蛇方水中推進ロボットなどを開発した [27]。IPMCの屈曲を利用して水中を移動することが可能である。また、水上を移動するアメーバを模倣したロボット [28]、不整地でのレスキュー活動を目的とした水力学骨格を利用した柔軟ロボット [29] が提案されている。また、生物学的にミミズの動きを模倣した移動が研究されている [30, 31, 32]。ただし、解析が不十分であり、どのような変形が移動に適しているかは不明の部分が多い。

柔軟物体の挙動をモデリングすることにより、柔軟ロボットの移動を解析することが可能となる。また、微分幾何法を用いた線状物体モデリングでは、ヤング率やポアソン比などの材料固有のパラメータを使用しモデリングするので、材料パラメータの同定が比較的容易にできる。本章では線状物体モデリングを基に、円形ロボットの移動と跳躍を解析する。

3.2.2 線状物体の静的シミュレーション

本節では、円形物体の静的な変形のシミュレーションを行う。円周 200 mm の円形物体の一点を空間内に固定する。固定した点の対蹠点を距離 l だけ強制的に移動させ、そのときの変形形状を調べる。移動距離 l に 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm を与えて計算した変形形状を、Fig. 3.6 に示す。厚さ 5 mm, 円周 200 mm のスポンジゴムに同様の変位を与えたときの変形形状を、Fig. 3.7 に示す。曲げエネルギー U_{flex} のシミュレーション結果を Fig. 3.8 に示す。Fig. 3.6 と Fig. 3.7 を比較すると、シミュレーション結果と実際のスポンジゴムによる変形は定性的にほぼ一致していることが分かる。変位を与えなければ安定な形状である円形になるが、変位を与えることによって、その与えられた変位条件の中でポテンシャルエネルギーが最小となる値をとる形状を示していることが分かる。

線状物体の端点二点を固定したとき重力が働くと、物体が安定となる形状は円形ではなく、歪んだ形状を取る。それは、重力ポテンシャルエネルギーと曲げポテンシャルエネルギーの和を最小とする形状は、もはや円形ではないからである。変形形状は線状物体の線密度 ρ 等、線状物体の力学パラメータに依存する。金属材料 SUS304 を素材とする周囲長 314 mm, 幅 20 mm で厚みが 0.015 mm, 0.03 mm, 0.07 mm の三種類の薄板の金属の端点を接続して、円形の形状物体を作成した。質量はそれぞれ 3.55 g, 1.60 g, 0.73 g であり軽量である。これらを地面に置いたときの形状を Fig. 3.9 に示す。同じパラメータを用いたシミュレーション結果を Fig. 3.10 に示す。

それぞれの物体を重力方向に垂直に固定した形状を Fig. 3.11 に示す。厚さが 0.03 mm のときの中央部の円形からの最大伸び率は 15% である。この結果をもとに材料の密度など既知のパラメータを導入し、初期形状を円形とし最終的に静止した形状の伸び率が 15% となるように曲げ剛性と曲げ粘性を調整すると、 $R_f = 400$, $R_v = 200$ で形状がほぼ一致した。そのときの結果を Fig. 3.12(b) に示す。曲げ剛性は板の厚みの 3 乗に比例するので、それを利用して厚みの違う Fig. 3.12(a) ならびに (c) については曲げ剛性と曲げ粘性を導出し、その値をもとにシミュレーションを行った。中央部の最大伸び率はほぼ一致した。形状についても薄くなるにつれて楕円形状を取っていることが分かる。以上のように、同じ素材を利用した物体の力学パラメータが分かれば、厚みが異なる物体の変形形状を予測できる。

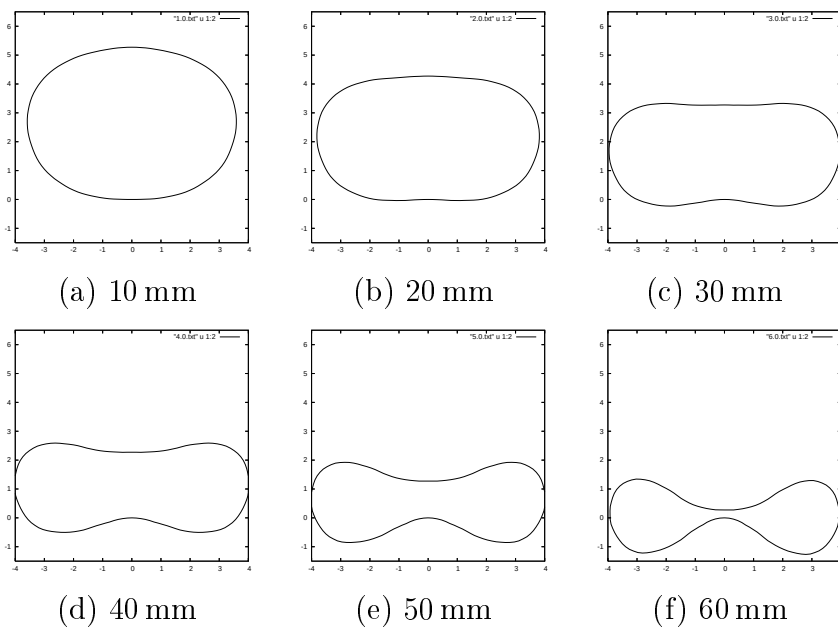


Fig. 3.6: Shrinkage of deformal objects

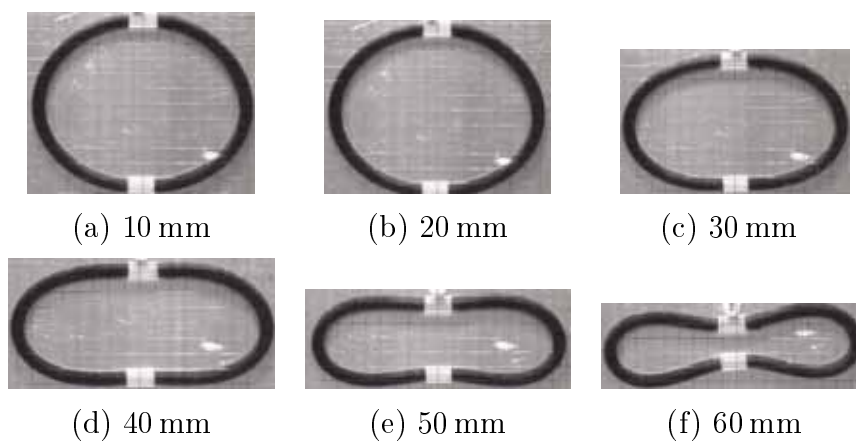


Fig. 3.7: Shrinkage of deformal sponge objects

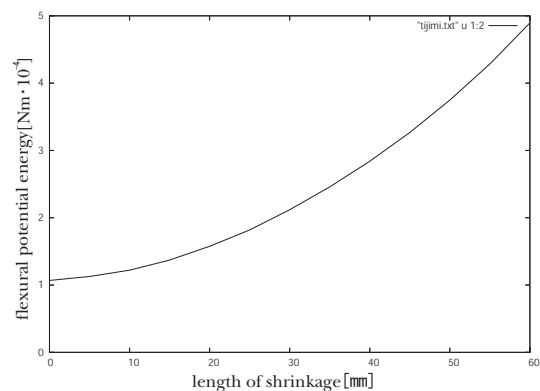
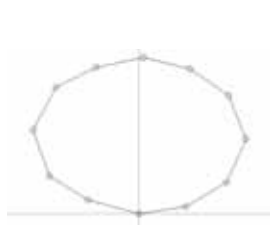


Fig. 3.8: Flexural energy caused by shrinkage



(a) 0.07 mm in thickness (b) 0.03 mm in thickness (c) 0.015 mm in thickness

Fig. 3.9: Object shapes on ground



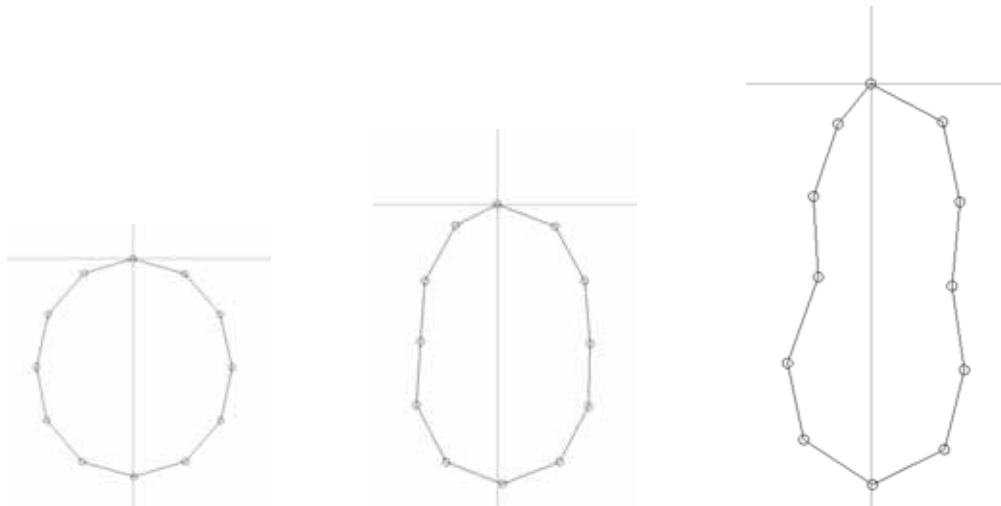
(a) 0.07 mm in thickness (b) 0.03 mm in thickness (c) 0.015 mm in thickness

Fig. 3.10: Simulation shape of objects on ground



(a) 0.07 mm in thickness (b) 0.03 mm in thickness (c) 0.015 mm in thickness

Fig. 3.11: Shape of objects suspended at one point



(a) 0.07 mm in thickness (b) 0.03 mm in thickness (c) 0.015 mm in thickness

Fig. 3.12: Simulation shape of objects suspended at one point

3.2.3 受動的変形による転がりの分析

坂道の転がり

SUS304で作成した周囲長が314 mm, 幅20 mm, 厚み0.015 mm, 0.03 mm, 0.07 mmの薄板の円形線状物体を角度 5.24° の坂に置き手を離し, 坂道を転がる様子をCMOSカメラで, 撮像サイズ 1280×1024 pixel, 300 Hzで撮影した. 厚み0.015 mmの円形物体の転がりをFig. 3.13に, 厚み0.03 mmの円形物体の転がりをFig. 3.14に, 厚み0.07 mmの円形物体の転がりをFig. 3.15に示す. 転がるときの外形はほぼ一定の形を維持しつつ, 回転と同時に形状を変化させながら転がっている. このことから重力による転がりの速さより自重による形状の変化の速さの方が支配的であると推察される. また, 厚みが薄くなればなるほど顕著に形状の変化が表れる. これは, 曲げエネルギー U_{flex} を定める曲げ剛性 R_f の値が厚みの3乗に比例することから, 曲げポテンシャルエネルギーは薄いほど小さくなり, 結果として変化しやすいと推察される. 厚みが0.07 mm, 0.03 mmの場合は形状の変化がほとんどなく転がっている. 一方, 厚みが0.015 mmの場合はクローラのように自身の形状を変化させつつ転がっているが, Fig. 3.15(b)では右方が膨れ, (d)では左方が膨れて規則的なゆれが起こっていることが分かる. これは曲げ剛性が低いために室内の微風や, 初期形状の違いなどによって生じる形状の変化に対して外乱を受けやすいということが考えられる.

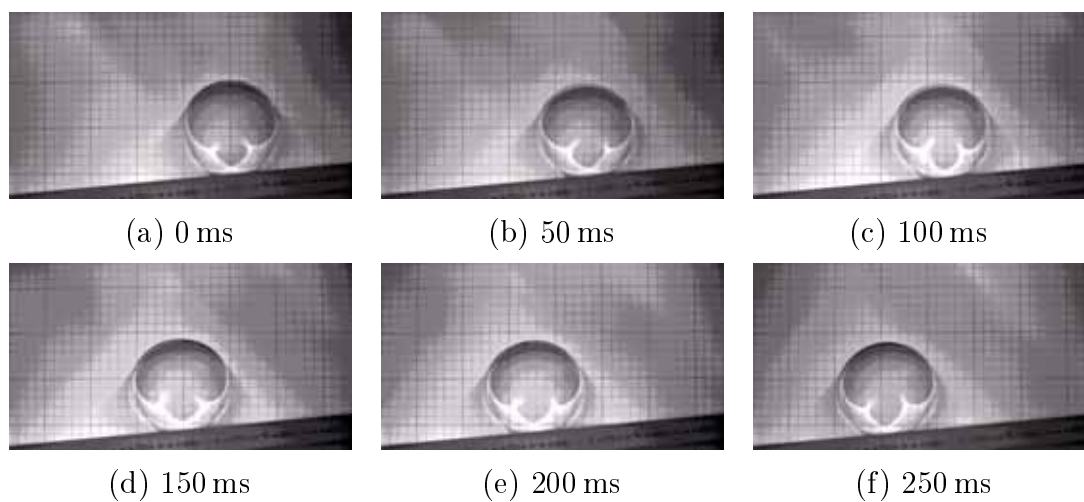


Fig. 3.13: Rotation of object (0.07 mm in thickness)

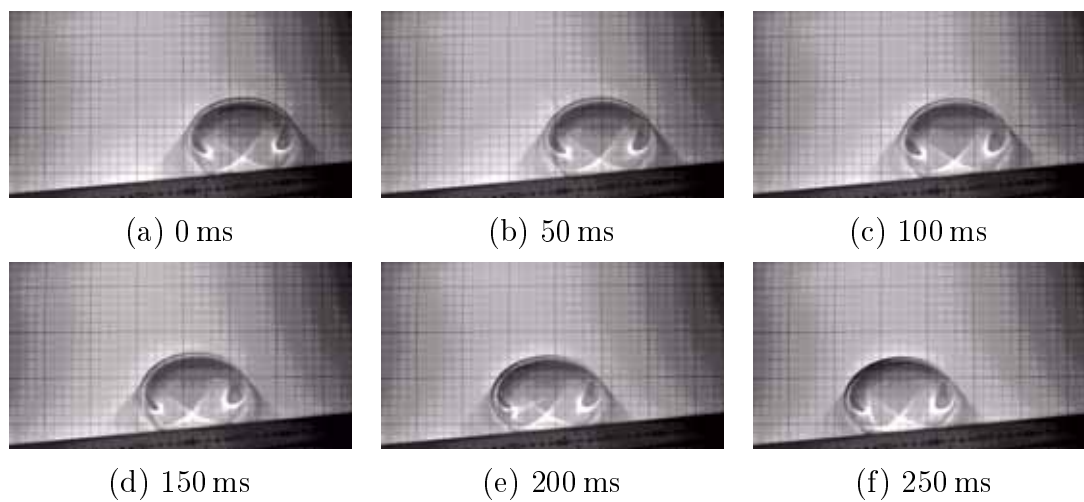


Fig. 3.14: Rotation of object (0.03 mm in thickness)

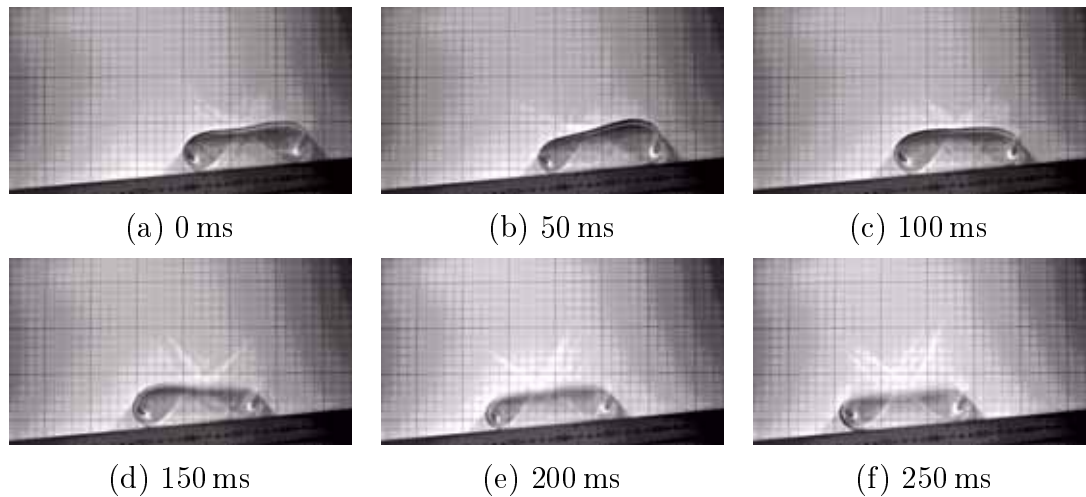


Fig. 3.15: Rotation of object (0.015 mm in thickness)

障害物の乗り越え

第3.2.3節と同様の坂道に、幅 25 mm、高さ 13 mm の乾電池を障害物としておき、その障害物に対して線状物体がどのような挙動を示すか、接触した時間を 0.0 s とし、Fig. 3.16, Fig. 3.17, Fig. 3.18 に示す。いずれの場合も障害物と接触すると、衝撃による力が発生し、それまでに転がって移動していた運動エネルギーが物体の内部エネルギーに変換され、形状が変化する。実験より、厚さ 0.015 mm の円形物体に比べて曲げ剛性が高い厚さ 0.07 mm と 0.03 mm の円形物体は、障害物に対して変形が少なく、障害物を乗り越えることができない。厚さ 0.015 mm の円形物体は、障害物に対して受動的に変形をすることによって、形状を変化させながら、障害物を覆うような形から乗り越えることができる。

Fig. 3.19 にそれぞれの厚さの曲げポテンシャルエネルギーの計算結果を表す。実験結果から代表点を均等に 8 点とり、その座標をもとに角代表点の角度を計算し、曲げポテンシャルエネルギーを求めた。Fig. 3.19-(a) では 0.1 s のときに一時的にポテンシャルエネルギーが増加するが、その後、衝突前のエネルギーとほぼ同じ値を示す。時刻 0.7 s で再び増加しているのは障害物と再衝突したからである。厚さ 0.07 mm の円形物体の場合、曲げ剛性が高いため衝突前の運動エネルギーをほとんど形状変化のエネルギーに変換されていないということがわかる。Fig. 3.19-(b) では衝突により 0.2 s まで曲げポテンシャルエネルギーは増加し、0.3 s ではもとのエネルギー状態に戻る。再び、0.4 s でエネルギーが増加し、0.7 s で元の形状に戻る。時刻 0.2 s までエネルギーが増加するのは、坂道を転がるときの運動エネルギーが衝撃によって曲げポテンシャルエネルギーに変換されているからである。このエネルギーの変換は、0.07 mm の Fig. 3.19-(a) より割合が高いことが分かる。これは曲げ剛性が 0.07 mm

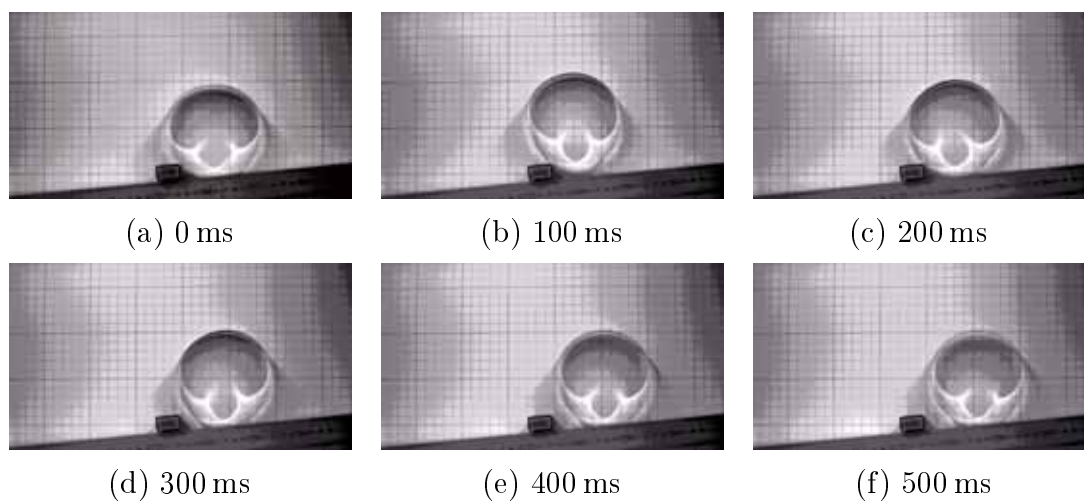


Fig. 3.16: Climbing over object (0.07 mm in thickness)

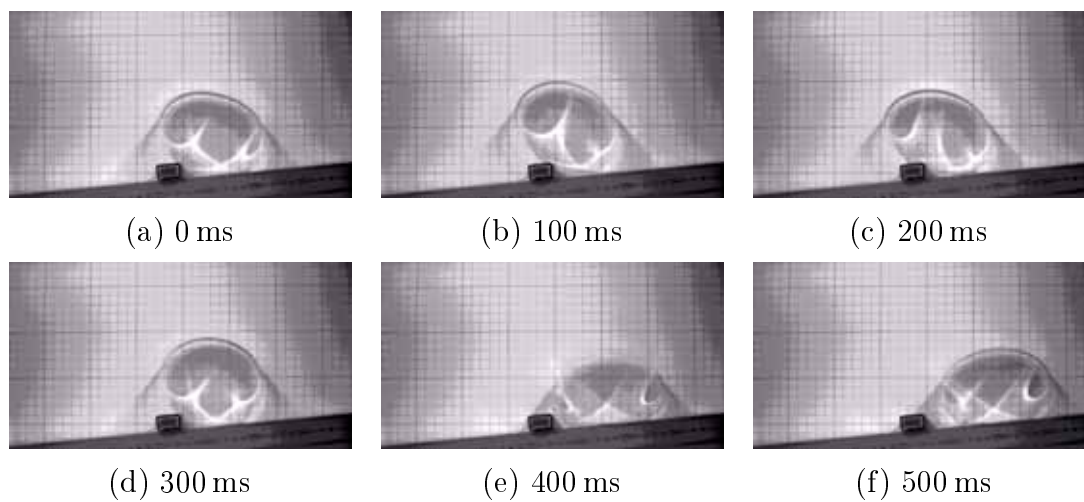


Fig. 3.17: Climbing over of object (0.03 mm in thickness)

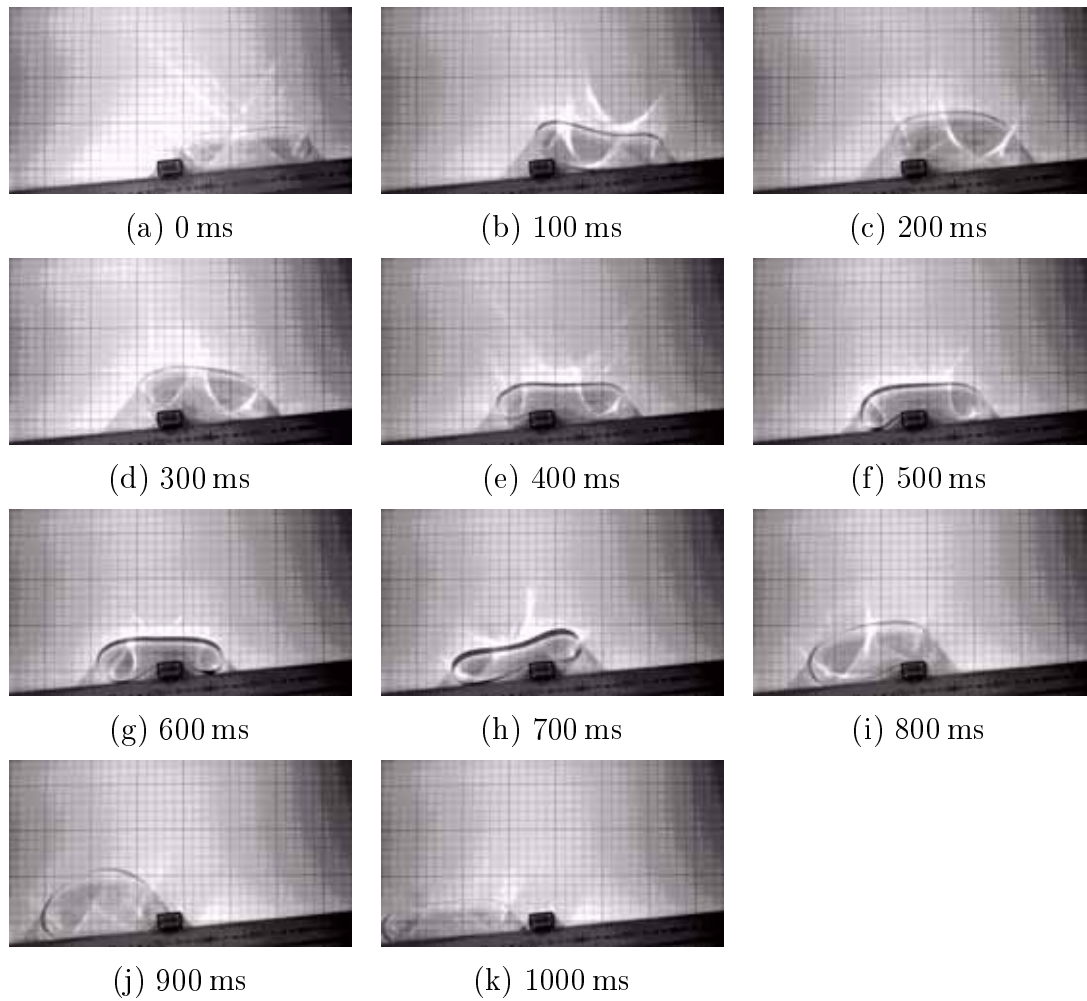


Fig. 3.18: Climbing over object (0.015 mm in thickness)

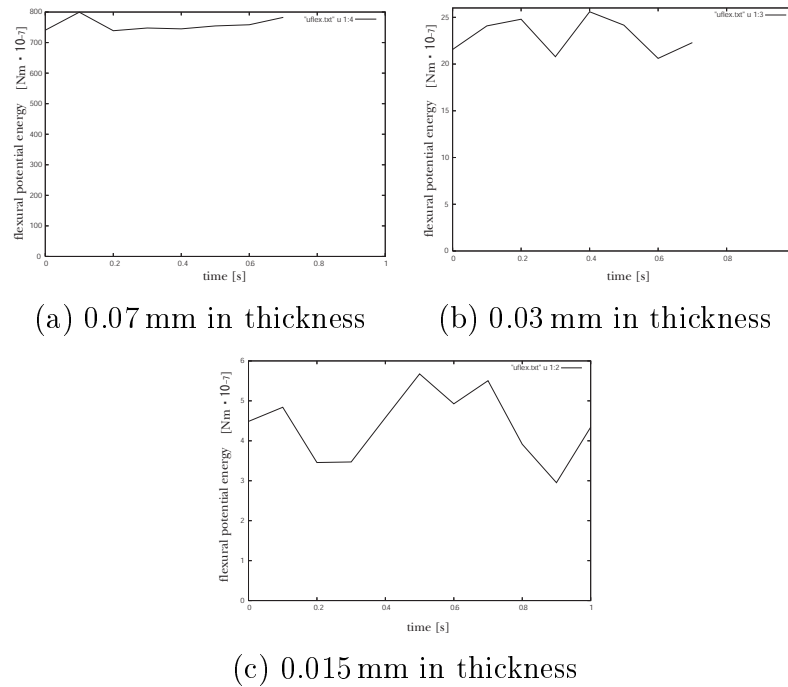


Fig. 3.19: Flexural energy object

のときより低く、運動エネルギーを曲げポテンシャルエネルギーに変換しやすいことを示唆している。時刻0.3sまで曲げポテンシャルエネルギーが減少するのは、物体が静的に安定な形状をとるために0.2sまで曲げポテンシャルエネルギーとして蓄積されたエネルギーが消費されていることを表す。時刻0.4sで再び曲げポテンシャルエネルギーが増加するのは、縦長に形状を変化していた物体が反動で形状が横長に変形するために起こる形状の変化による曲げポテンシャルエネルギーの増加である。時刻0.7sで再度、衝突前の物体の形状に戻る。Fig. 3.19-(c)では、時刻0.1sで運動エネルギーが曲げポテンシャルエネルギーに変換されて一時的に増加しているが、0.2から0.3sの間に衝突前の曲げポテンシャルエネルギーより減少している。これは一時的に曲げポテンシャルエネルギーを再び運動エネルギーに変換されて、衝突前の運動エネルギーより低い状態になっていることを示す。再度、運動エネルギーに変換されたポテンシャルエネルギーの影響によって、物体の重心は前に傾き、結果的に0.6sで障害物の中心まで重心が移動している。障害物が線状物体の中心にある状態が曲げエネルギーが低い状態にとどまり、障害物が物体の中心から再びずれると0.7sまで曲げポテンシャルエネルギーが増加し、その後0.9sで衝突する前より円形に近い形状となり、曲げポテンシャルエネルギーは衝突前より低い状態となる。時刻1.0sでは衝突前の形状に戻り、曲げポテンシャルエネルギーの値も同等となる。以上のように、線状柔軟物体の受動的な変形においては、曲げ剛性の値によって挙

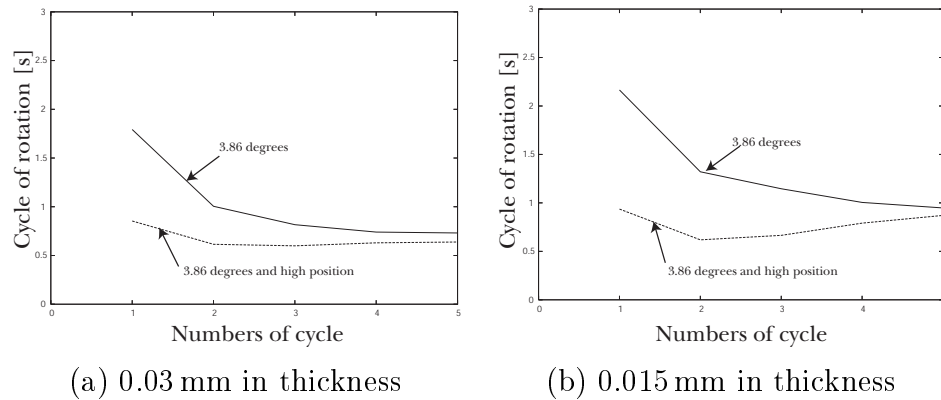


Fig. 3.20: Cycle of circular object rolling down

動が大きく異なる．また，曲げ剛性が低い物体の方が形状の変形が容易であるので移動，接触においては，形状の移動を利用した動作が可能になる．特に，坂道の転がり移動に関しては曲げ剛性が低い，すなわち柔らかい円形物体の方が障害物を乗り越えやすいことがわかる．

周期の安定性

受動的な移動の代表として受動歩行が挙げられる．受動歩行についての基本的な研究は，すでに活発に成されている [33]．受動歩行とは，二足歩行ロボットが制御や外力を加えずに安定して坂道を下る現象である．エネルギー効率が良く，自然さを持った移動方法として受動歩行は注目されている．受動歩行の特徴として「引き込み現象」が挙げられる [34]．引き込み現象とは，初期条件に外力を加えて坂道を下らせた場合でも，歩行を繰り返すとある一定周期で定常的に歩行する現象である．受動的な移動にみられるこの「引き込み現象」について，受動的変形を利用した線状円形物体では観測できるかを調べるために，物体が回転するごとにストップウォッチでラップタイムを計測した．本実験では第3.2.3節と比べてさらにゆるやかな3.86度の傾斜で行った．結果をFig. 3.20に示す．横軸に周期の回数，縦軸に周期を示す．いずれも10回の計測を行いその平均値を示している．いずれも同じ傾斜で実験を行ったが破線のパターンは初期位置を高い位置からスタートして初期高さを与えている．

仮に摩擦が無ければ自由落下と同じように重力のみのエネルギーで等加速度運動を行うので回転周期は短くなるはずであるが，ころがりによる摩擦の影響で厚さ0.03 mmの円形物体では回転周期が約0.7 sになった．高い初期位置から始めた場合においても，短い周期から減速して一定の周期に収束している．厚さ0.015 mmの円形物体でも同様の傾向が見られ一定の周期に収束していることが分かる．以上のように線状物体の転がりについては，物体の形状の特性に依存する安定した転がりの

周期が存在することがわかる．この現象は受動歩行に見られる「引き込み現象」との関係性が深いと推察される．

3.2.4 跳躍の分析

高速カメラを用いてフレームレート 3000 fps, $512 \times 1024 \text{ pixel}^2$ で跳躍の様子を撮影した結果を Fig. 3.21 に示す．下部に示す時間は左上の画像からの経過時間である．ロボットの最下点が, 280 mm の位置まで跳躍している．内側に入ったバネ鋼が下がりだしてから接地するまでの時間は 18 ms と短く, 接地する際に球状に戻ろうとするバネ鋼の速度を求めると 1.3 m/s となった．内側に入っていたバネ鋼が地面と接触する瞬間を撮影した 215 ms と 218 ms の画像を観察すると, 衝突した瞬間に接触点でボディが変形していることがわかる．衝突により, 接触点でバネ鋼の形状が変化し, ボディにエネルギーが蓄えられて, 変形した部分からロボットを上方向に持ち上げようとする復元力が働いていると考えられる．

円形柔軟ロボットを対象に, どのような形状が跳躍に適しているかを, シミュレーションと実験を通して考察する．ロボットのボディを, 曲げ剛性 $R_{flex} = 600 \text{ N m}^2$, 直径 40 mm の円形と仮定する．いくつかのボディの形状に対して曲げひずみエネルギーを計算した結果を Fig. 3.22 に示す．円形よりも楕円形のほうがエネルギーが高い．Fig. 3.22(a) に示す円形に蓄えているエネルギーが $88.4 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ と一番小さく, Fig. 3.22(j) に示すボディが内側に入り込んだ形状に蓄積されているエネルギーが $338.2 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ と約 4 倍大きいことがわかる．Fig. 3.22(e)～(j) に示す形状のように, 内側に凹んだ部分を持っているとその部分の曲率が大きくなり, 物体の持つ曲げひずみエネルギーは大きくなる．形状変化によって蓄積されたエネルギーは, 高い状態から低い状態へと遷移すると仮定すると, エネルギーの差を用いることで跳躍が可能になると考えられる．

Fig. 3.22 に示した shape C～shape J の形状を用いて, 跳躍のシミュレーションを行った．パラメータは, $k_{bend} = 5.1 \times 10^{-2} \text{ Nm/rad}$, $b_{bend} = 0.1 \times 10^{-5} \text{ Nm s/rad}$, 全体の質量を 5.5 g, 質点数を 32 とした．跳躍したときの重心の高さを, Fig. 3.23 に示す．Fig. 3.22(a) から (h) の順に初期状態の曲げひずみエネルギーが大きくなっているが, 柔軟物体の上部が凹んでいる (b), (c), (e), (g) の形状における跳躍量は残りの形状における跳躍量はより大きい．また, 下部が内側に入り込むような形状の (a), (d), (f), (h) では, エネルギーが大きくなるにしたがって跳躍量が増加する．また, (b) と (d) を比較すると, (d) のほうが蓄えているエネルギーが $87.0 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ 大きい, 跳躍量は (b) のほうが 470 mm 高い．これと同様に, (g) と (h) についても, エネルギーの差は小さいが跳躍量を見ると 503 mm の差が生じている．以上の結果より, 初期形状が接地している場合, 上部が凹んでいる場合に高い跳躍が可能になっている

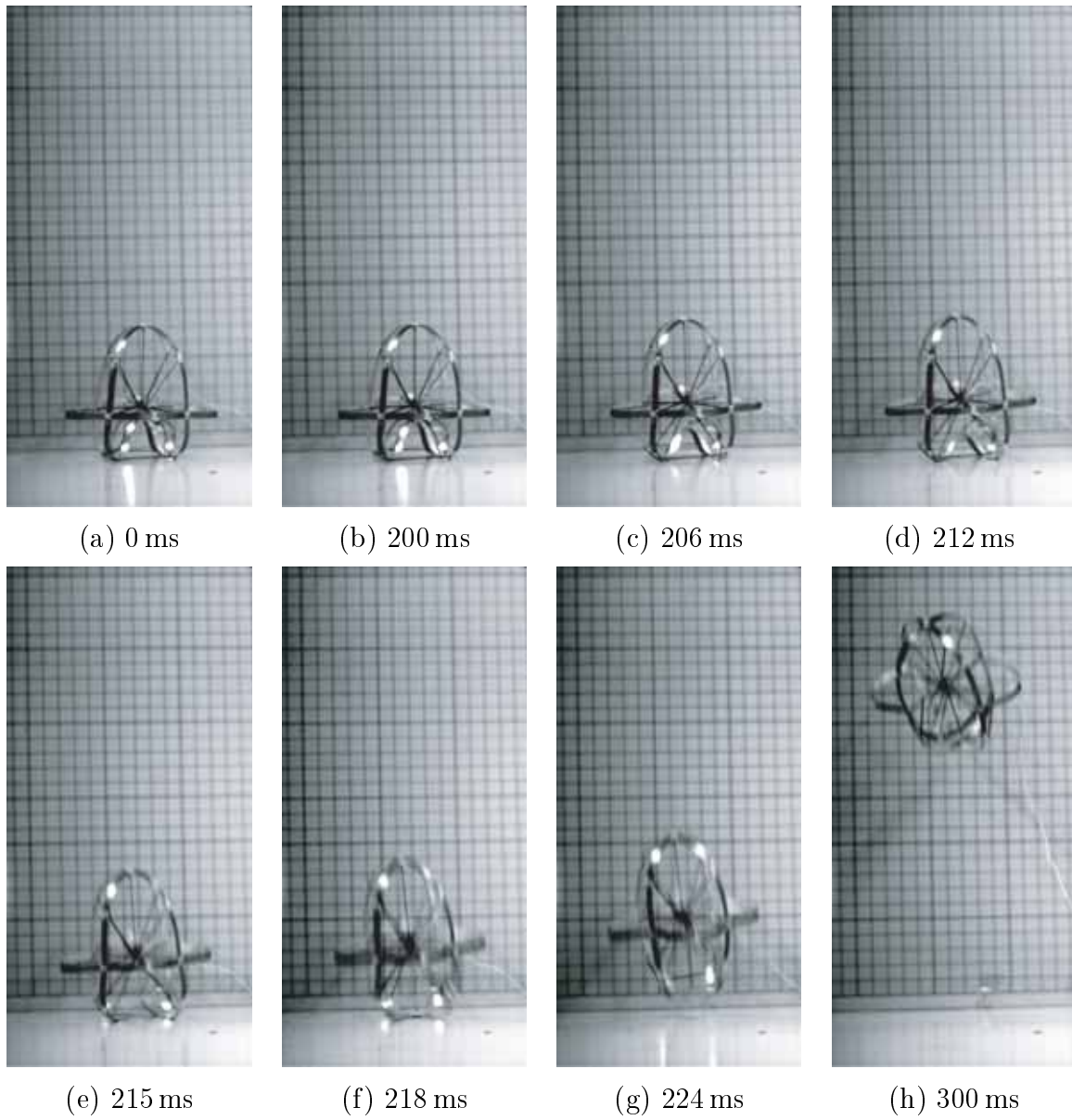


Fig. 3.21: Successive images of soft robot jumping

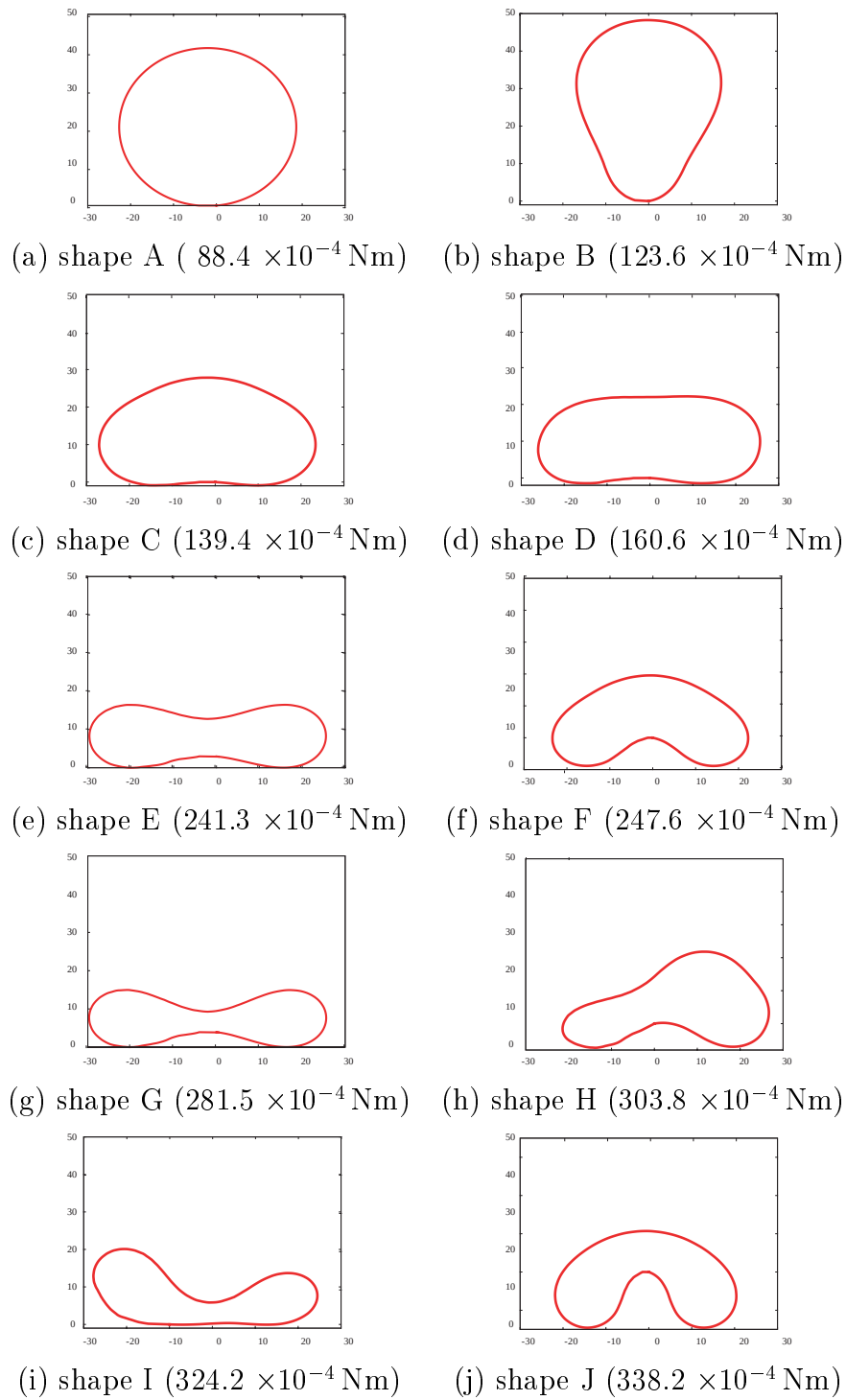


Fig. 3.22: Shape and elastic strain energy

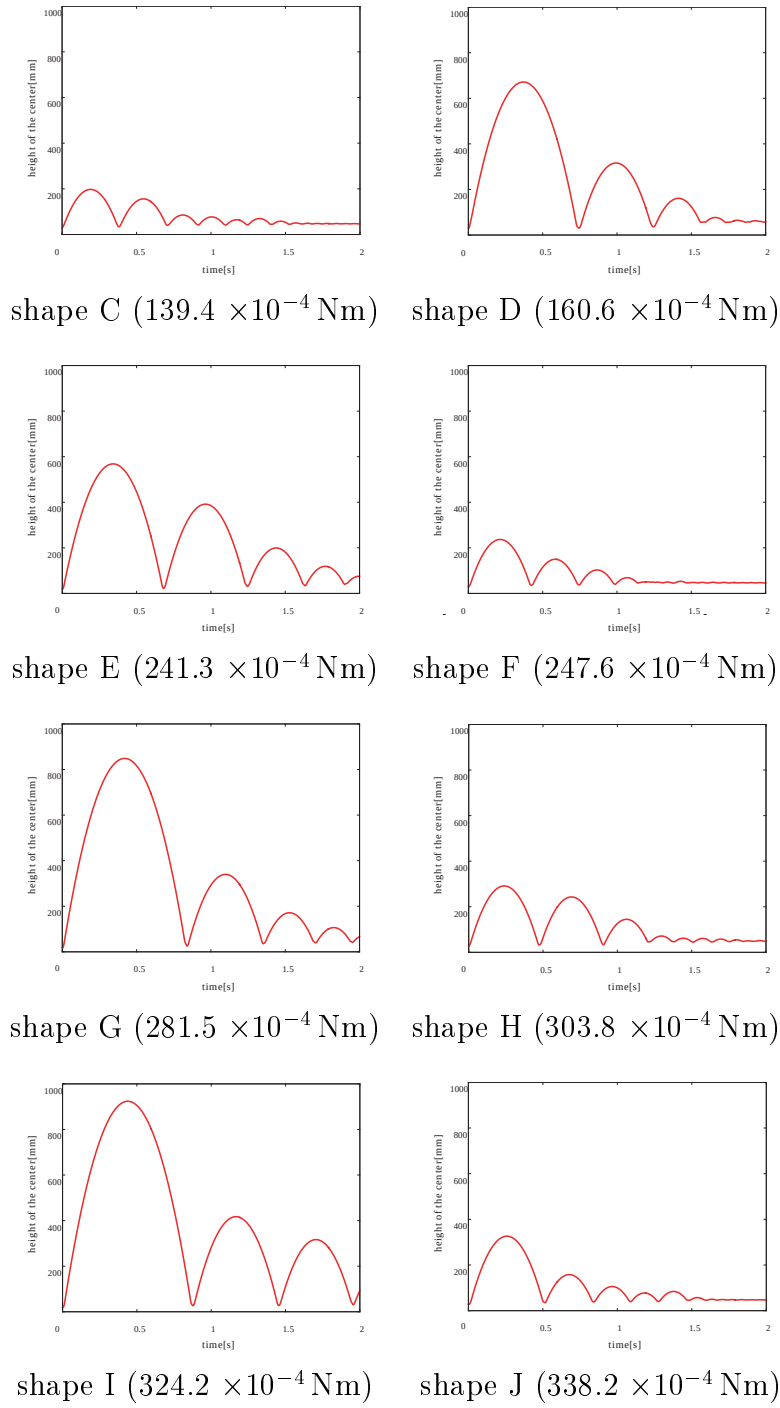


Fig. 3.23: Height during jumping

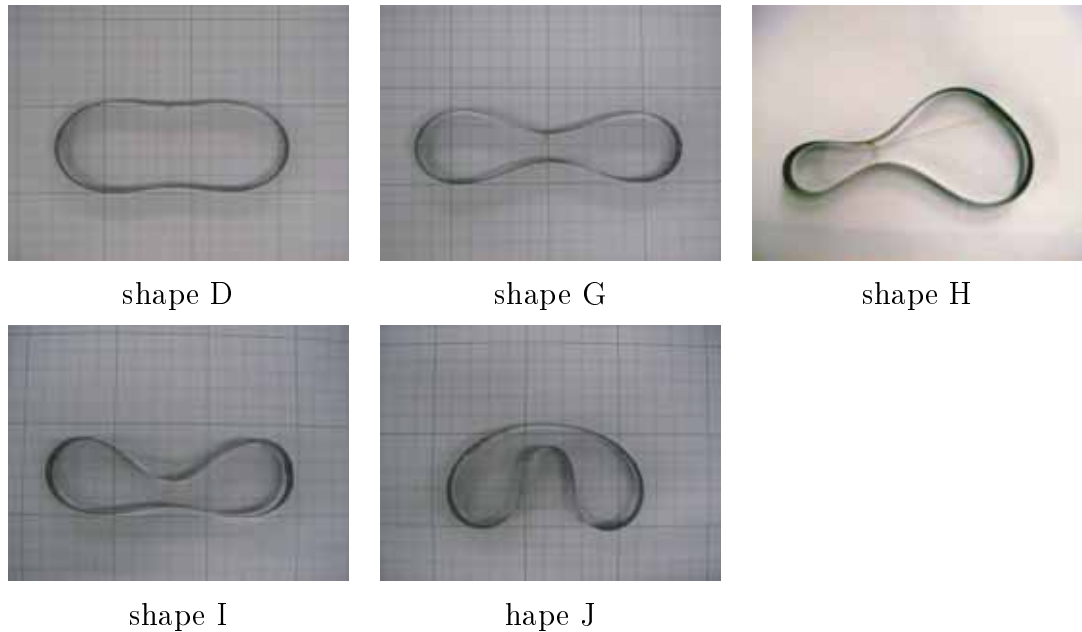


Fig. 3.24: Initial shapes for jumping

ことがわかる．これは，元の形状に戻ろうとする際に D と G の形状については，下側は地面と接しているため，上方向に復元力が働くため全体が上側に引っ張られる形で慣性力が生じたと考えられる．また，力積の考えかたより，柔軟物体は床から反力と接地時間の積を加えられているため，地面に接した状態のほうが，接地している時間が長いことによって力積が大きく加えられていると考えられる．

前節で述べたように，質量が軽いとき I の形状のほうが J の形状よりも跳躍量が大きくなることを実機を用いて検証する．また，D，G，H の形状も計測する．幅 12 mm，厚さ 0.2 mm，質量 6 g のバネ鋼を直径 100 mm の円にする．その円に糸を通すことで，Fig. 3.24 に示すようにそれぞれの形状を作成する．跳躍の際は，ライターを用いて紐を切ることで跳躍する．それぞれの形状の跳躍量は，D の形状では跳躍量は 450 mm，G の形状では 718 mm，H の形状で 502 mm，I の形状では 950 mm，J の形状で 540 mm となった．シミュレーション結果と同様，質量が小さいときには J の形状よりも I の形状のほうが跳躍量が向上した．実際の跳躍の様子についてはそれぞれ，Fig. 3.25～Fig. 3.29 に示す．Shape D，G，J については，跳躍後に縦に長い楕円，横に長い楕円と形状を変化させながら跳躍した．

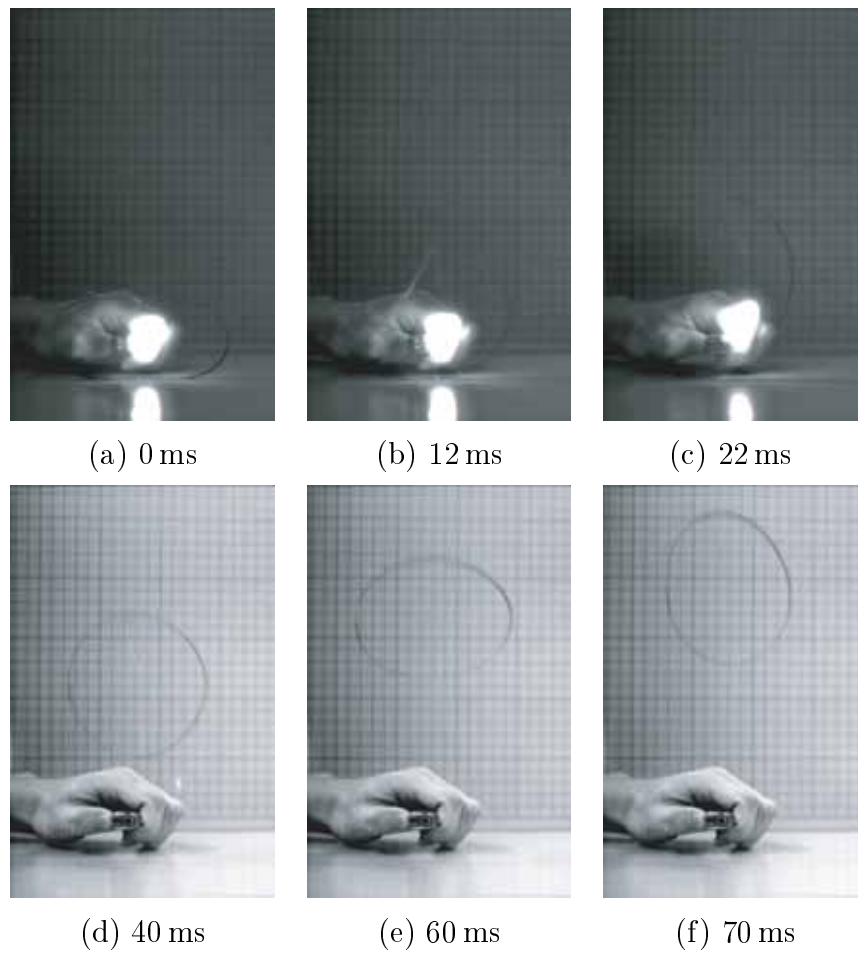


Fig. 3.25: Jumping from shape D

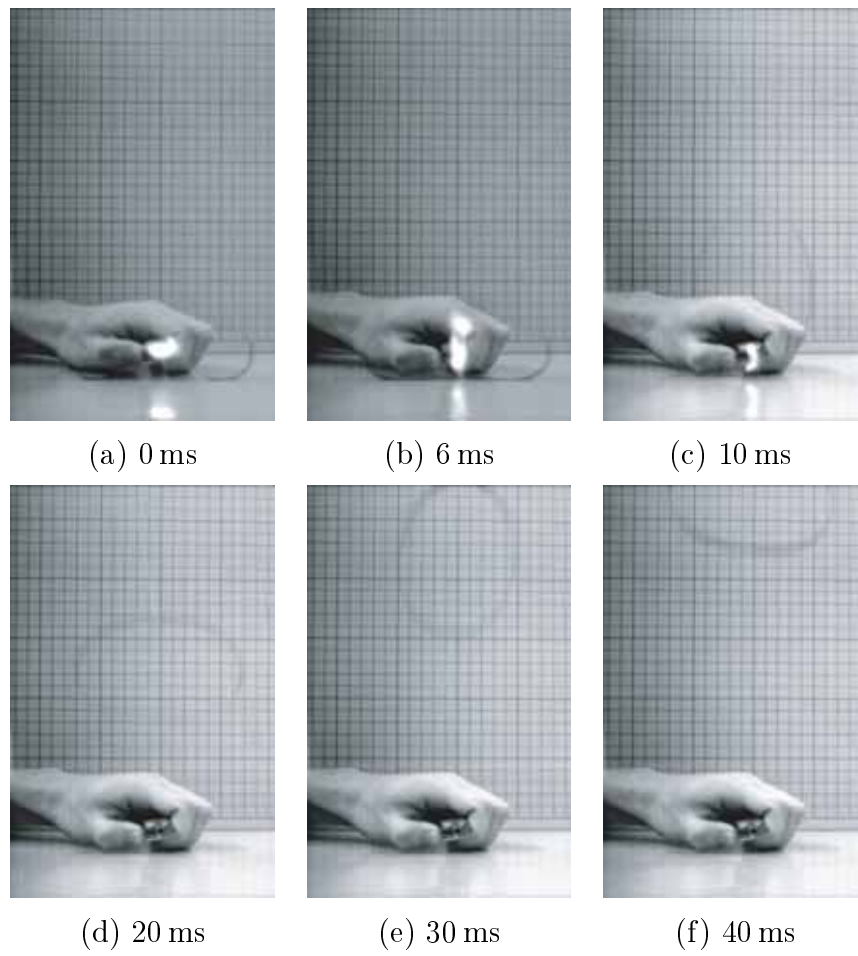


Fig. 3.26: Jumping from shape G

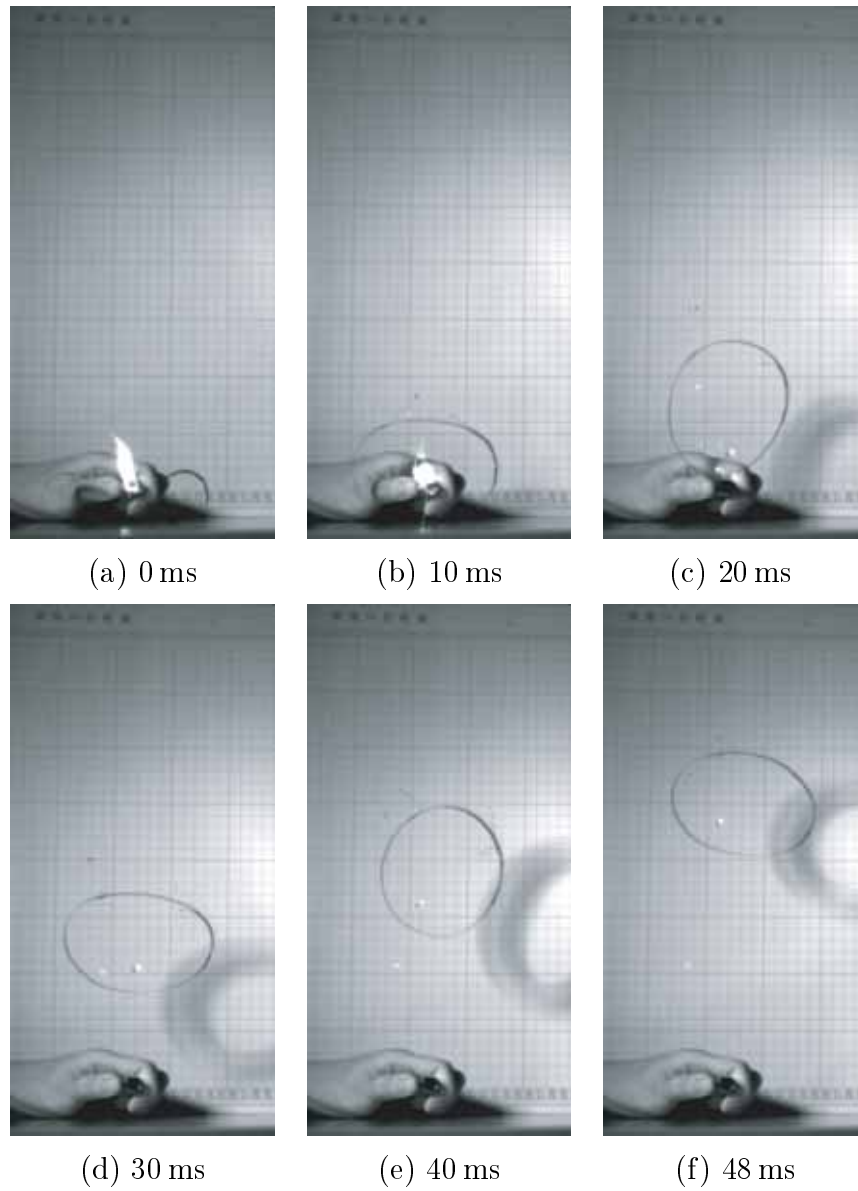


Fig. 3.27: Jumping from shape I

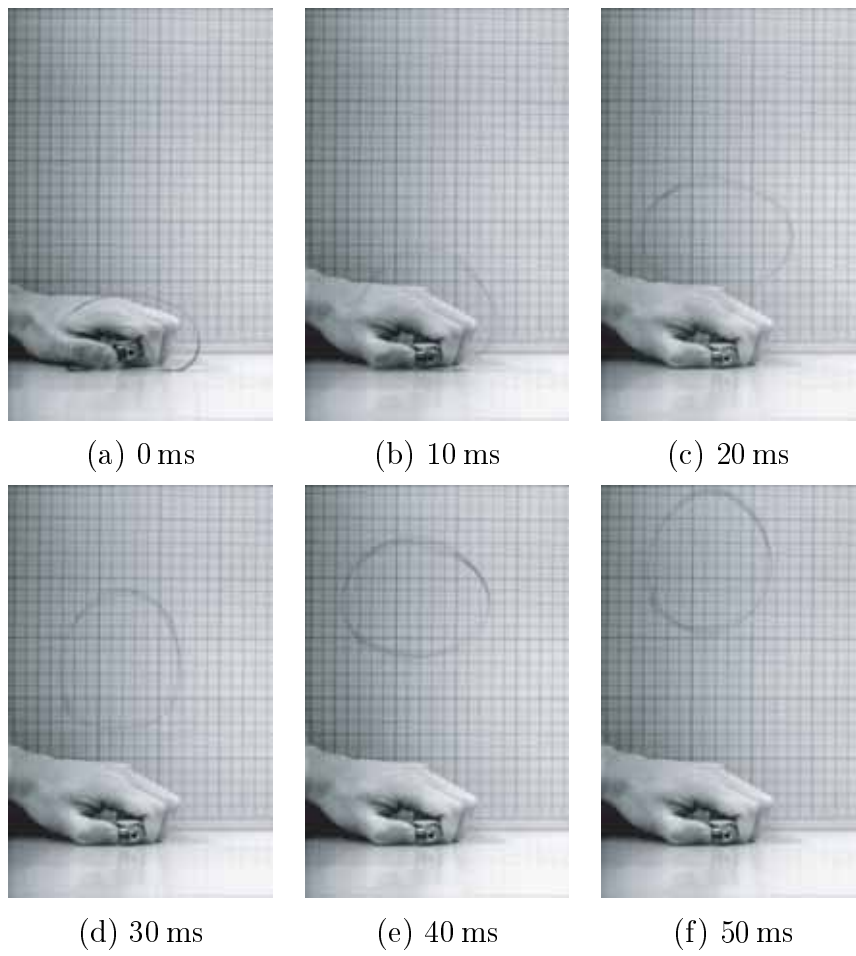


Fig. 3.28: Jumping from shape J

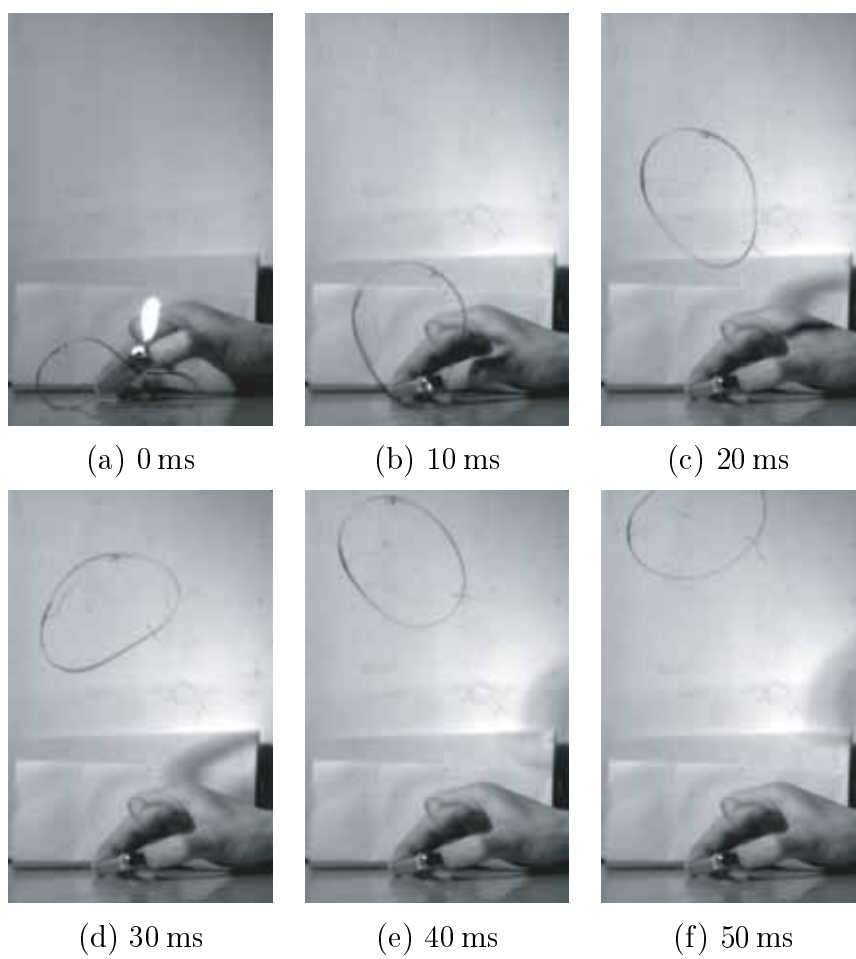


Fig. 3.29: Jumping from shape H

3.2.5 結言

本章では、微分幾何法を用いた線状物体モデリングによるシミュレーションを通して、円形ロボットの移動と跳躍を解析した。さらにシミュレーション結果と実験結果を比較し、シミュレーションの妥当性を示した。円形ロボットの転がり移動においては、安定した転がり周期が存在することがわかった。円形ロボットの跳躍においては、上部を変形させた形状が貯えられるエネルギーは小さいものの、跳躍量が高いことがわかった。今後は解析を進め、移動や跳躍に適切な変形を見いだす。

参考文献

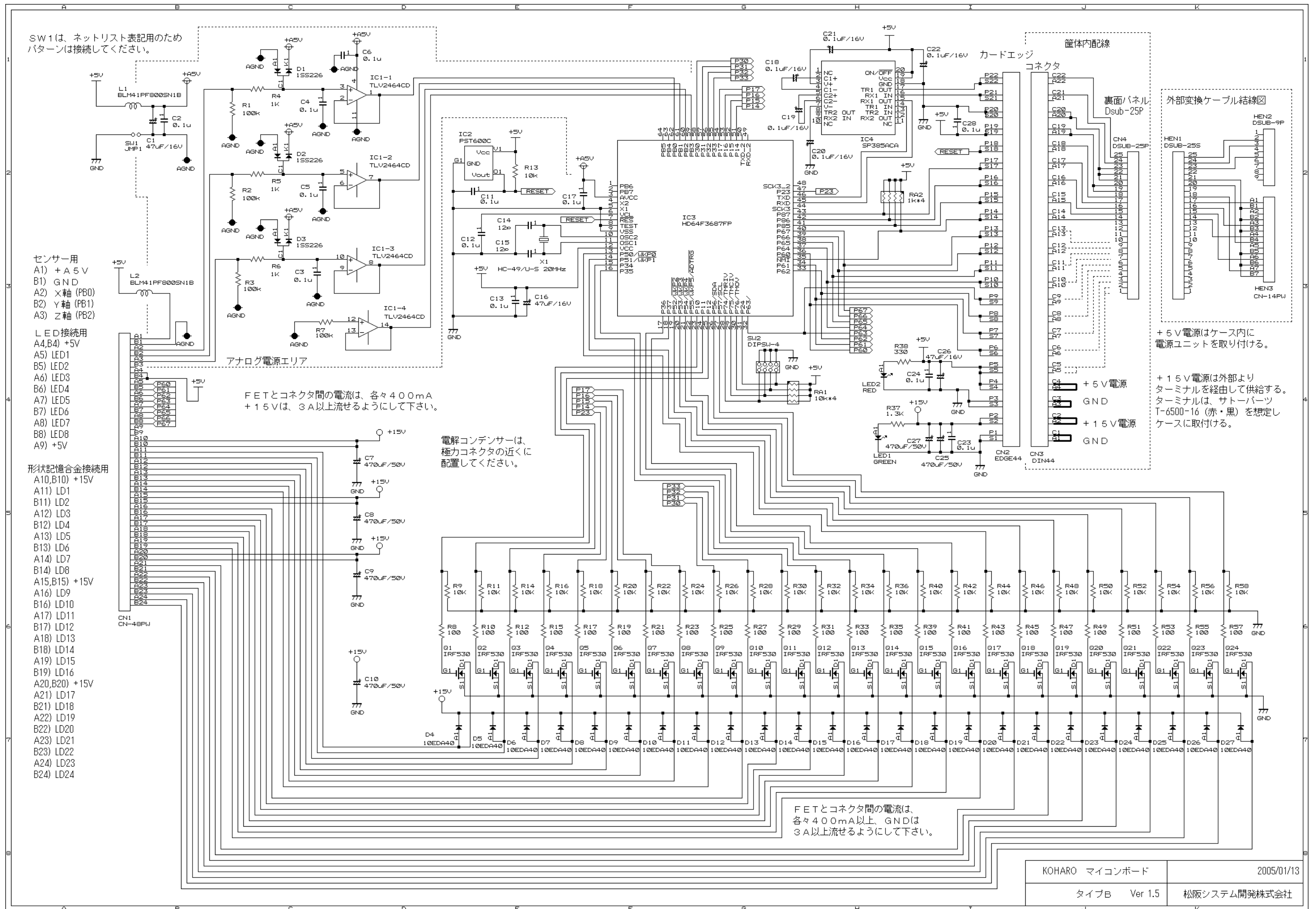
- [1] U. Saranli, M. Buehler, and D. E. Koditschek, *RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot*, Int. J. of Robotics Research, vol. 20, no. 7, pp.616–631, 2001.
- [2] M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang, and D. Duff, *Limbless Conforming Gaits with Modular Robots*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
- [3] M. H. Raibert, *Legged Robots that Balance*, The MIT Press, Cambridge, 1986.
- [4] J. K. Hodgins, and M. H. Raibert, *Biped Gymnastics*, Int. J. of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp.115–132, 1990.
- [5] E. Hale, N. Schara, J. Burdick, and P. Fiorini, *A Minimally Actuated Hopping Rover for Exploration of Celestial Bodies*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, April, pp.420–427, 2000.
- [6] 塚越, 森, 佐々木, 田中, 北川, 瓦礫踏破能力を向上させる跳躍・回転移動体の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 70, no. 692, pp.1068–1076, 2004.
- [7] M. Higashimori, M. Harada, M. Yuya, I. Ishii, and M. Kaneko, *Dimensional Analysis Based Design on Tracing Type Legged Robots*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3744–3749, Barcelona, April, 2005.
- [8] 田所, 柔らかいアクチュエータ, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 3, pp.318–322, 1997.
- [9] 三宅, 人工筋肉. 亀井ブックサービス, 1998.
- [10] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, *High-speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%*, Science, vol. 287, February, pp.836–839, 2000.

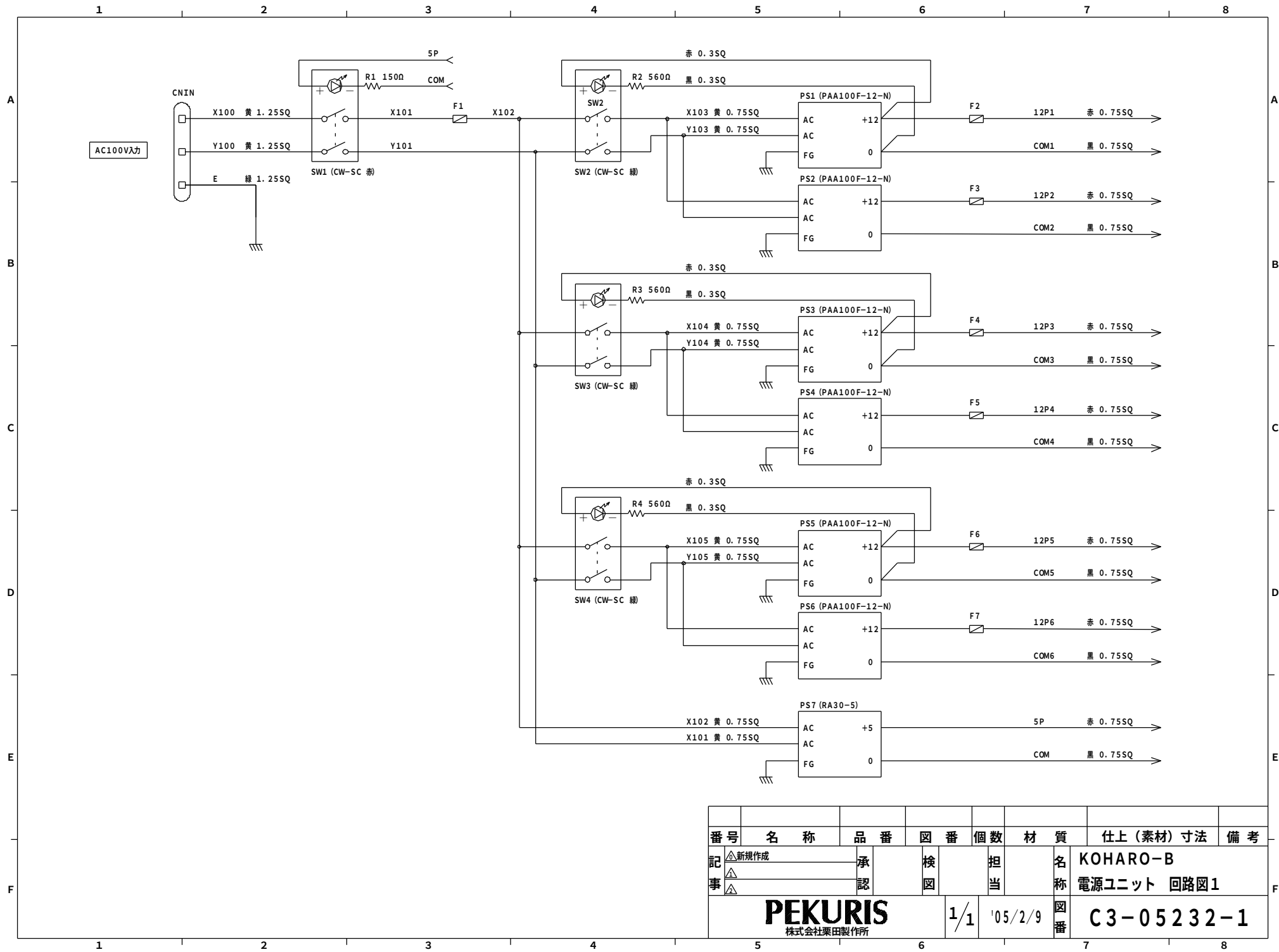
- [11] Proc. of the First Conference on Artificial Muscles, December, 2001.
- [12] 釜道, 金田, 山北, 安積, 羅, イオン導電性高分子を用いた直動人工筋アクチュエータの開発 –歩行ロボットへの応用を目指して–, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3F37, 2002.
- [13] T. Hirai, Z. Uddin, J. Zheng, M. Yamaguchi, S. Kobayashi, M. Watanabe, and H. Shirai, *Quick and large electrostrictive deformation of non-ionic soft polymer materials*, Smart Structures and Materials 2003, Proc. SPIE, vol. 5051, pp.198–206, 2003.
- [14] S. Ashley, *Artificial Muscles*, Scientific American, October, pp.34–41, 2003.
- [15] 大武, 鏡, 稲葉, 井上, ヒトデ型ゲルロボットの全身変形運動, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1435–1436, 2000.
- [16] 嘉数, 横井, 兪, アメーバ状ロボットへのアプローチ, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 7, pp.843–849, 2001.
- [17] M. Otake, Y. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, *Motion design of a starfish-shaped gel robots made of electroactive polymer gel*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 40, pp.185–191, 2002.
- [18] 三輪, 形状記憶アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, vol. 2, no. 4, pp.330–337, 1984.
- [19] 広瀬, 生田, 佐藤, 形状記憶合金アクチュエータの開発 (σ 機構の導入による出力特性の改善), 日本ロボット学会誌, vol. 4, no. 6, pp.618–628, 1986.
- [20] B. Selden, K.-J. Cho, and H.-H. Asada, *Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4931–4936, New Orleans, April, 2004.
- [21] R. Featherstone and Y.-H. Teh, *Improving the Speed of Shape Memory Alloy Actuators by Faster Electrical Heating*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
- [22] M. Kaneko, R. Takenaka, M. Higashimori, A. Namiki, and M. Ishikawa, *The 100G Capturing Robot –Too Fast to See*, IEEE Trans. on Mechatronics, vol. 8, no. 1, pp.37–44, 2003.
- [23] C. O'Toole 編, 動物大百科 15 昆虫. 平凡社, pp.84–85, 1987.

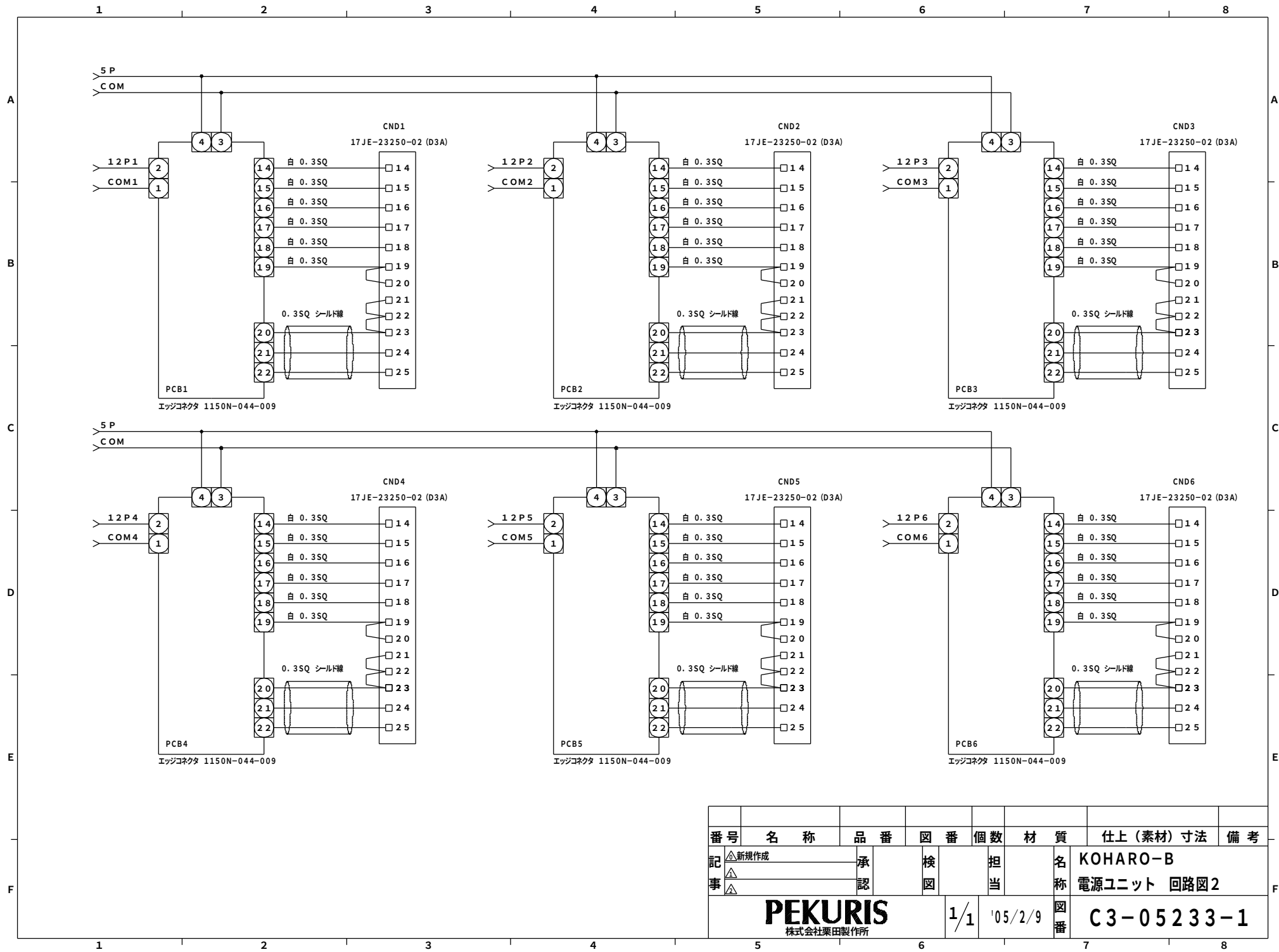
- [24] R. E. Rosenblum, W. E. Carlson, and E. Tripp, *Simulating the Structure and Dynamics of Human Hair: Modelling, Rendering and Animation*, Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 2, no. 4, pp.141–148, 1991.
- [25] A. Daldegan, N. M. Thalmann, T. Kurihara, and D. Thalmann, *An Integrated System for Modeling, Animating and Rendering Hair*, Computer Graphics Forum (Eurographics '93), vol. 12, no. 3, pp.211–221, 1993.
- [26] M. Kimura, Y. Sugiyama, S. Tomokuni, and S. Hirai, *Constructing Rheologically Deformable Virtual Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3737–3743, Taipei, September, 2003.
- [27] 小川, 中坊, 向井, 安積, 大西, 人工筋肉を利用したヘビ型水中推進ロボット, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.1, pp.80–89, 2006.
- [28] I-Ming Chen, Hsi-Shang Li, and Arnaud Cathala, *Mechatronic Design and Locomotion of Amoebot-A Metamorphic Underwater Vehicle*, Journal of Robotic Systems, Vol.20, No.6, pp.307–314, 2003.
- [29] 木村, 梶村, 丸山, 小関, 伊能, 水力学的骨格を用いた完全密閉型柔軟移動ロボットの開発, 第 23 回日本ロボット学会講演会予稿集, 3A36, 2005.
- [30] 前野, 山崎, 立川, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第 1 報 ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション), 日本機械学界論文集 C, Vol.62, No.603, pp.142–149, 1996.
- [31] 前野, 山崎, 立川, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第 2 報 大節の変形を考慮した細長動物の構造モデル), 日本機械学界論文集 C, Vol.65, No.636, pp.296–297, 1999.
- [32] 前野, 山崎, 立川, 波動伝播に基づく移動機構の研究 (第 3 報 柔軟生物の構造・環境・移動パターン), 日本機械学界論文集 C, Vol.68, No.667, pp.920–926, 2002.
- [33] T. McGeer, *Passive Dynamic Walking*, Int.J. of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.62–82, 1990.
- [34] 大須賀, 桐原, 受動的歩行機械 QuartetII の歩行解析と歩行実験, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp.737–742, 2000.

付録

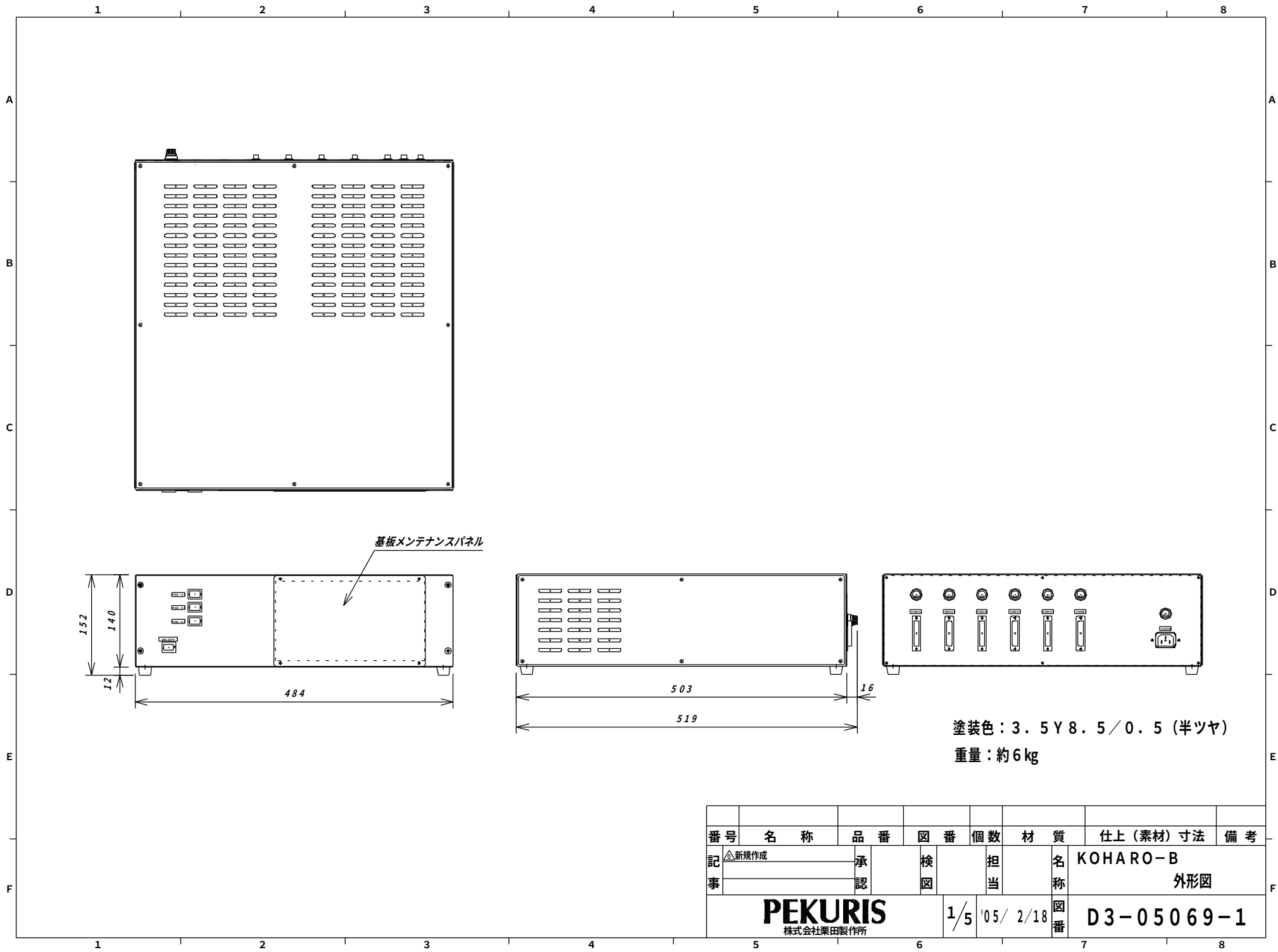
- 跳躍移動型/坂登り型 制御回路
 - － 内部基盤回路図
 - － 電源ユニット回路図 (1/2)
 - － 電源ユニット回路図 (2/2)
 - － 電源ユニット外形図
 - － 電源ユニット配置図
- 自律移動型 制御回路
 - － 内部基盤回路図
 - － 電源ユニット回路図 (1/3)
 - － 電源ユニット回路図 (2/3)
 - － 電源ユニット回路図 (3/3)
 - － 電源ユニット外形図
 - － 電源ユニット配置図
- 実演用ステージ
 - － 展示ブース平面図
 - － ステージ製作図 (平面・立面図)
 - － ステージ製作図 (断面図)

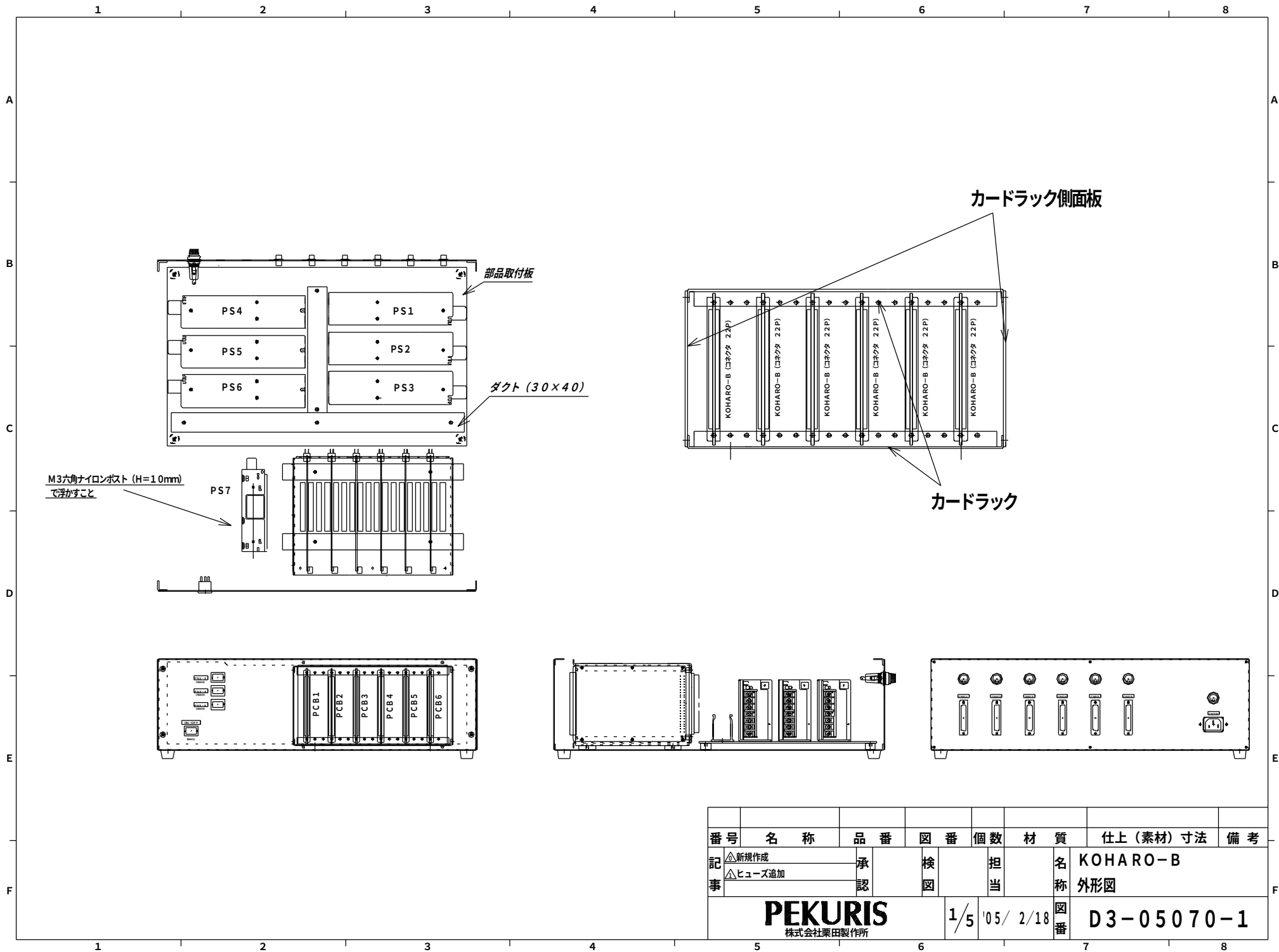




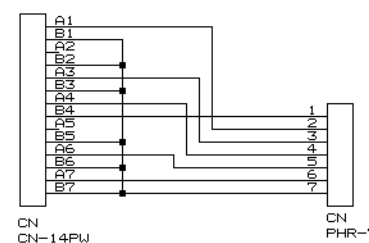


番号	名称	品番	図番	個数	材質	仕上(素材)寸法	備考
記事	△新規作成	承認	検図	担当	名称	KOHARO-B	
	△	認				電源ユニット 回路図2	
	△				図番	C3-05233-1	
PEKURIS				1/1	'05/2/9		
株式会社栗田製作所							

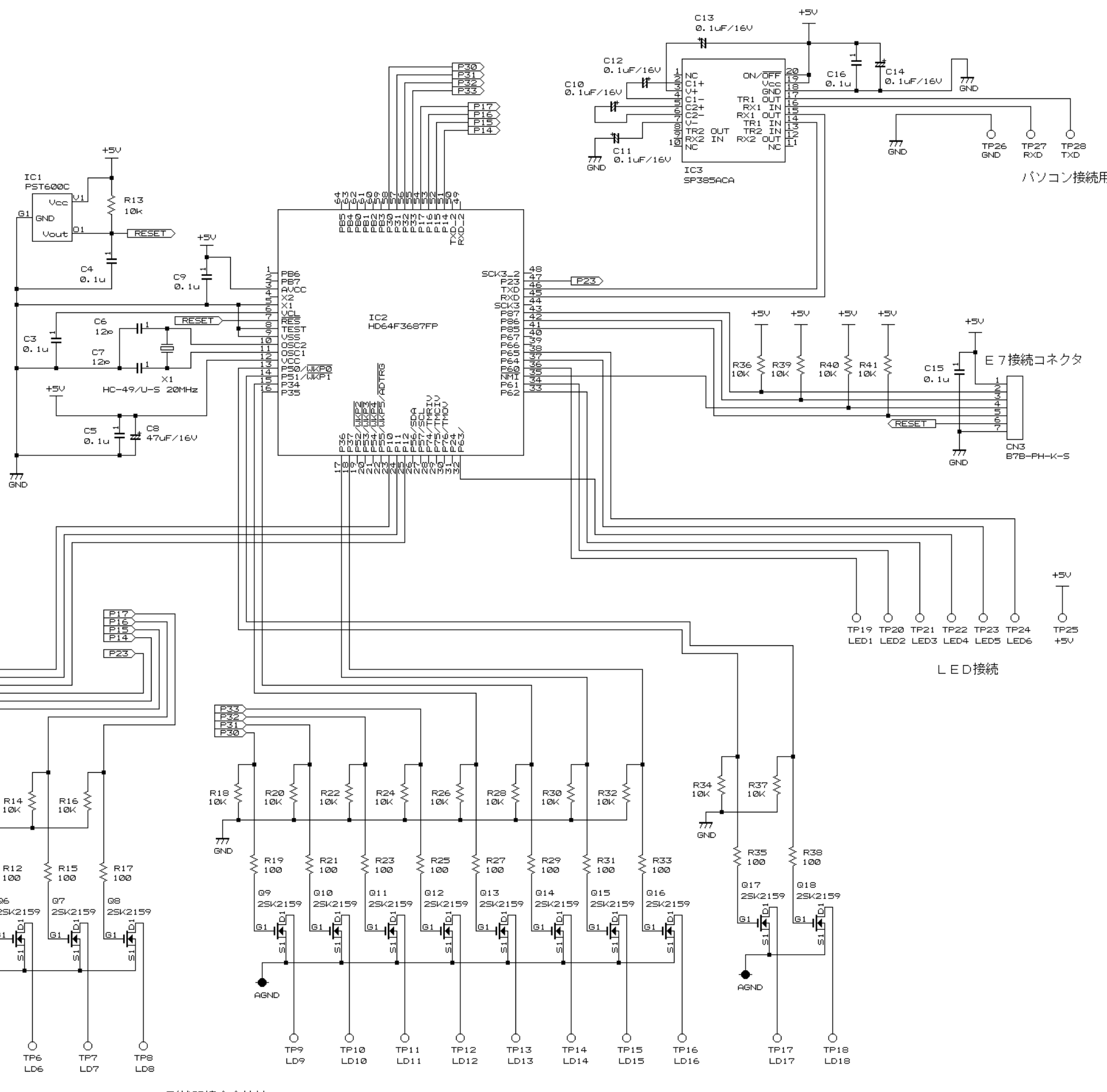




E 7 接続用変換ケーブル



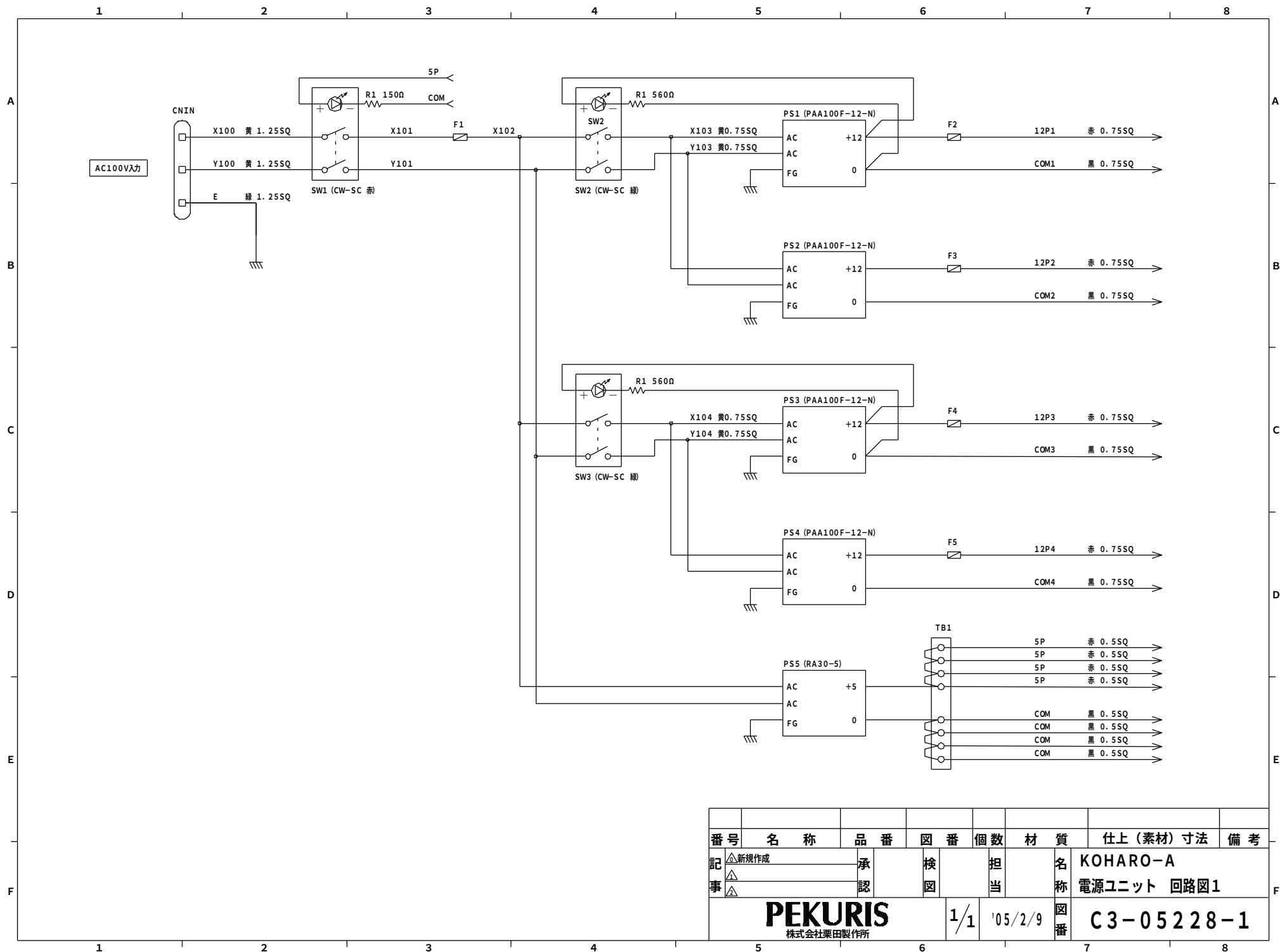
HIF3BA-14PA-2.54DSA 相当品



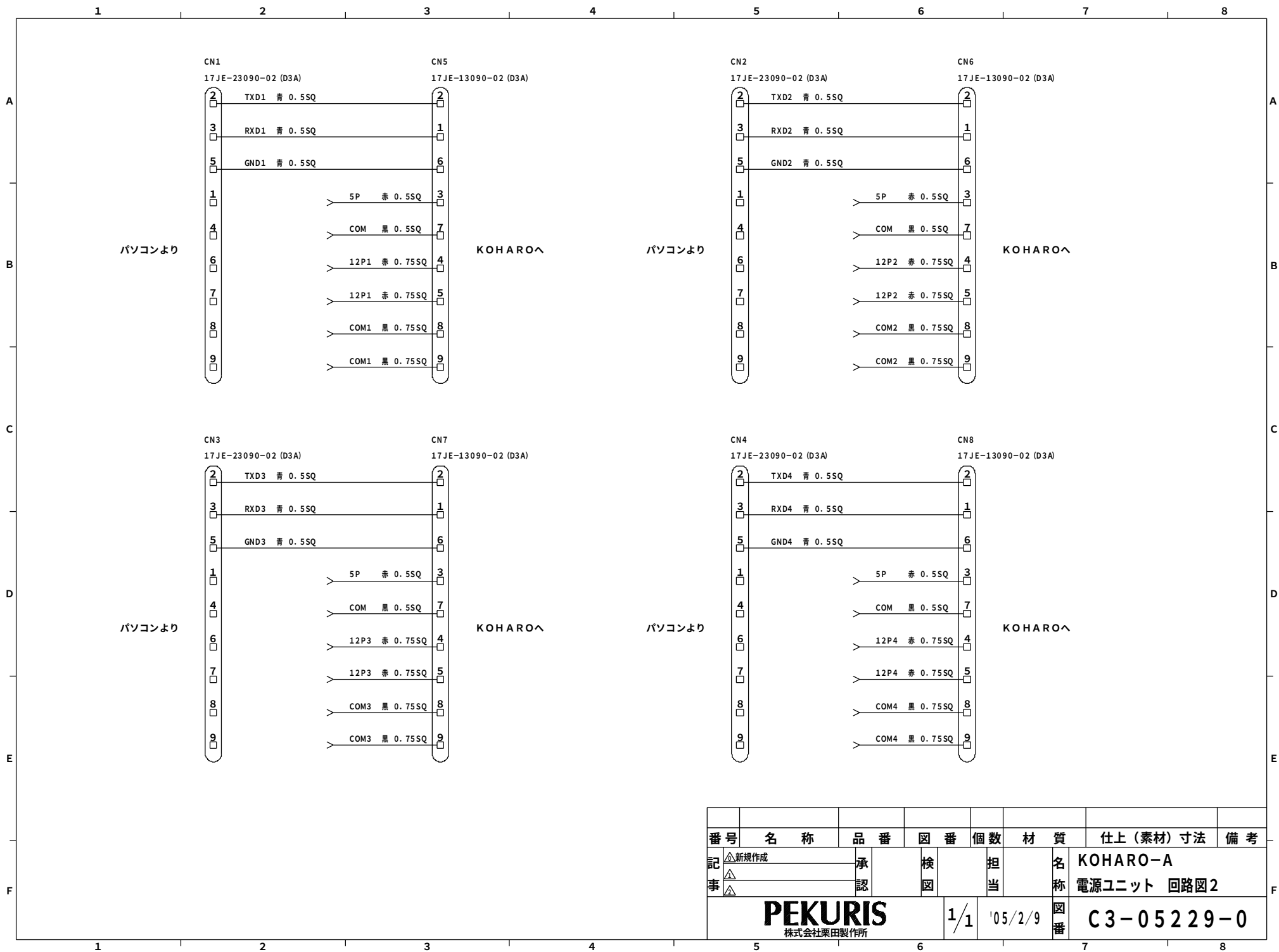
形状記憶合金接続

パターン設計を行うとき
FET と AGND (アクチュエータ GND)
間の電流値に御配慮願います。

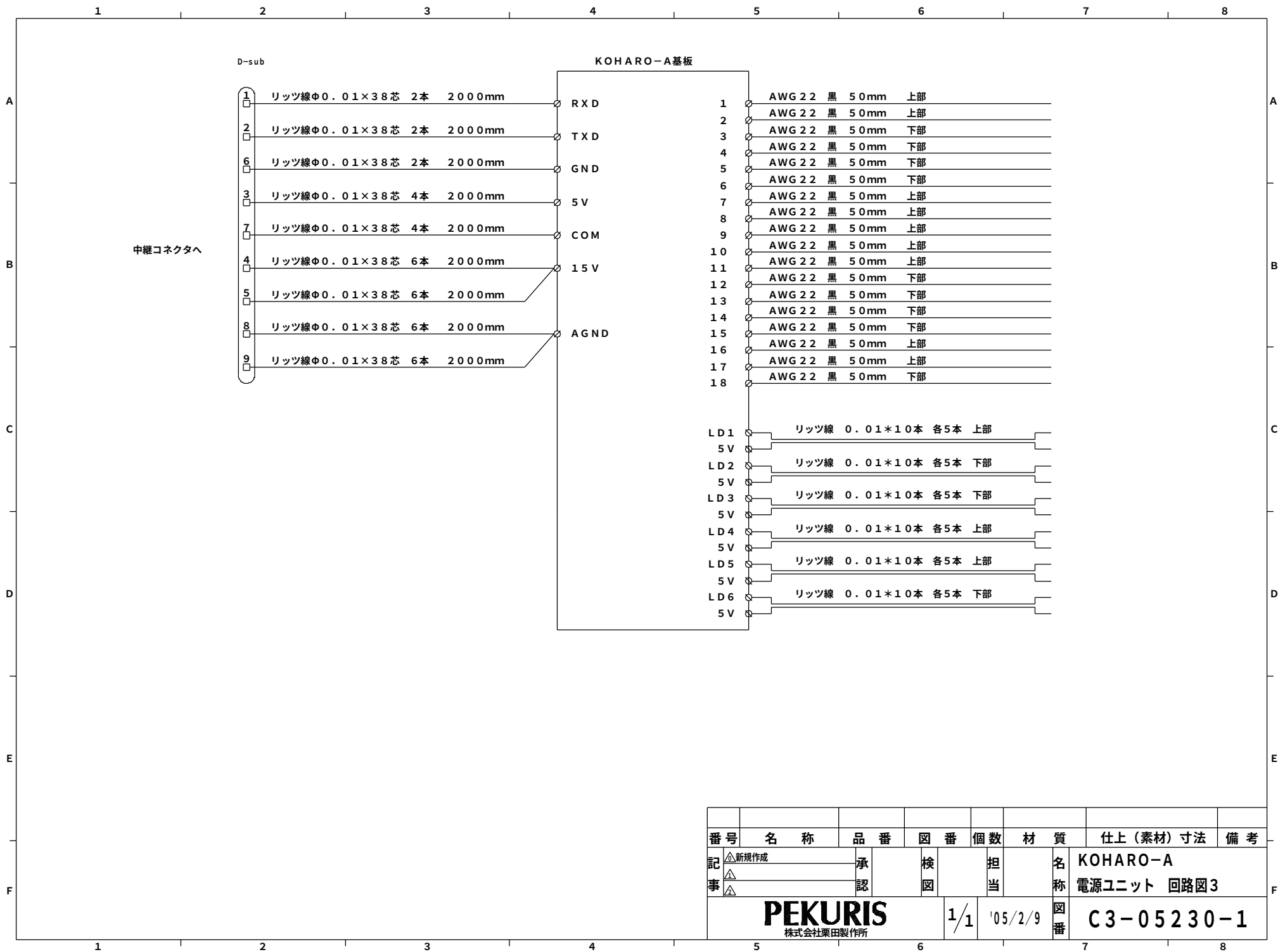
KOHARO マイコンボード	2004/12/28
タイプ: A Ver. 2.2	松阪システム開発株式会社

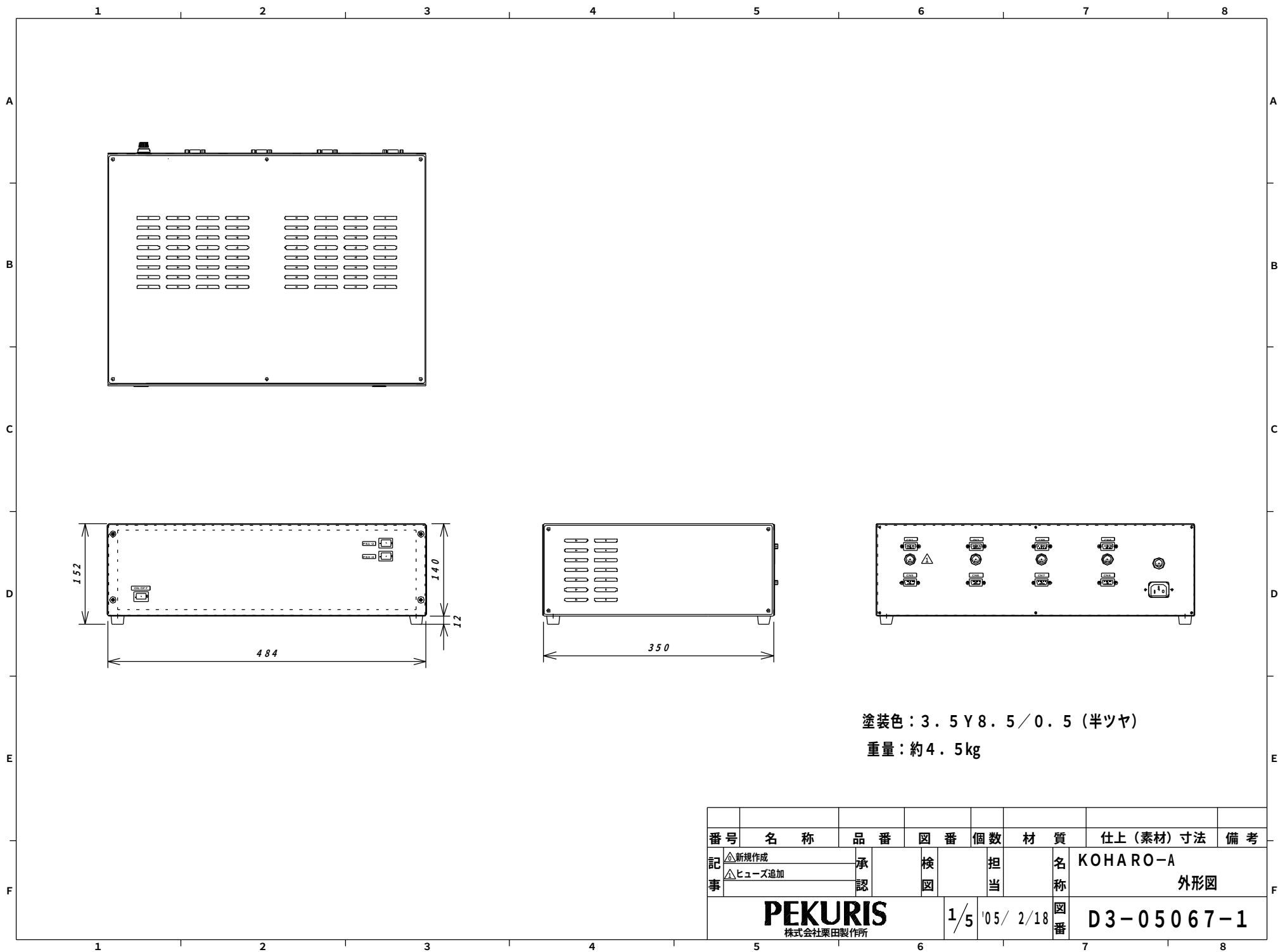


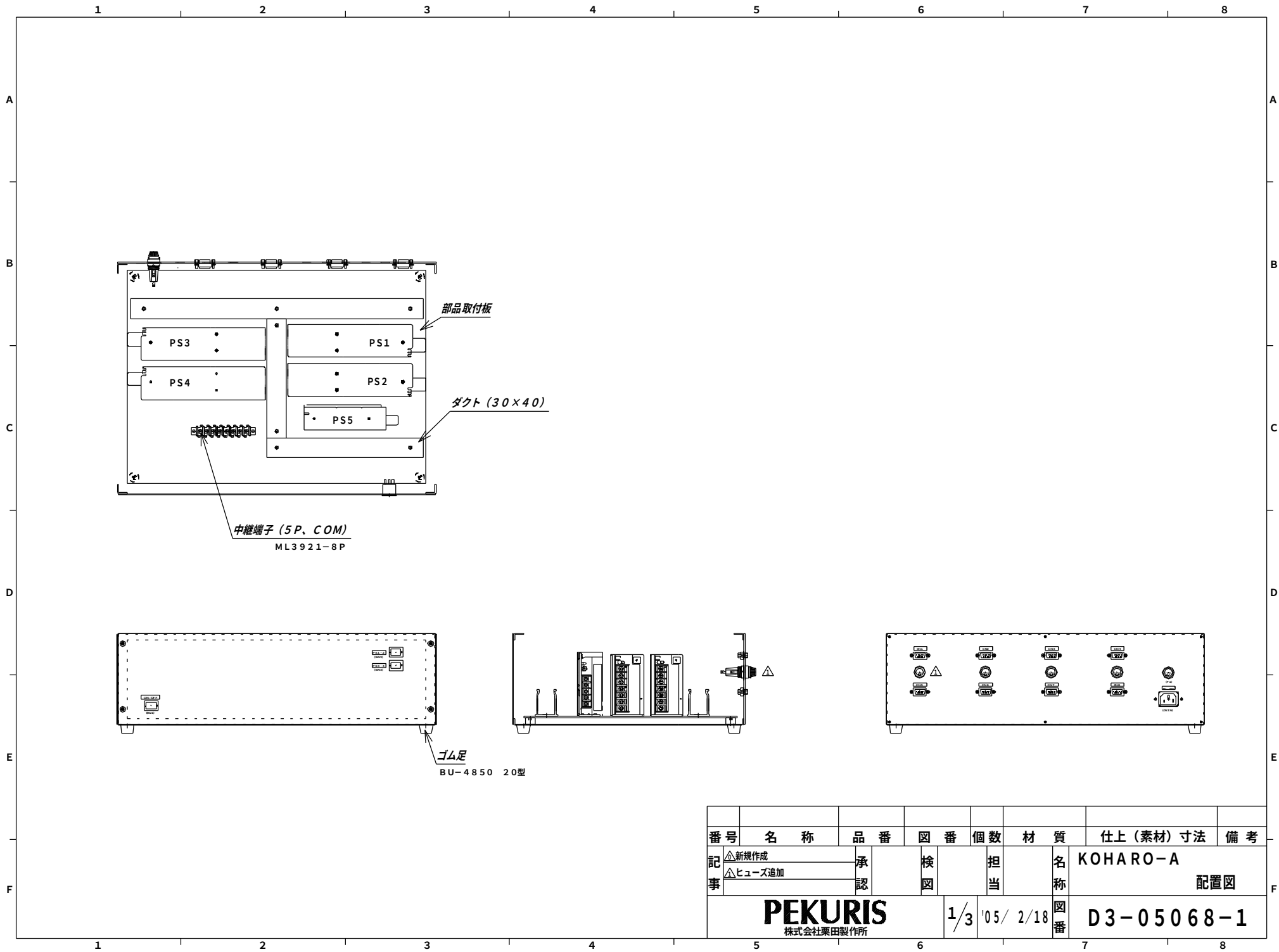
番 号	名 称	品 番	図 番	個 数	材 質	仕上(素材)寸法	備 考
記 事	△新規作成	承 認	検 図	担 当	名 称	KOHARO-A	
	△					電源ユニット 回路図1	
	△						
PEKURIS			1/1	'05/2/9	図番	C3-05228-1	
株式会社栗田製作所							



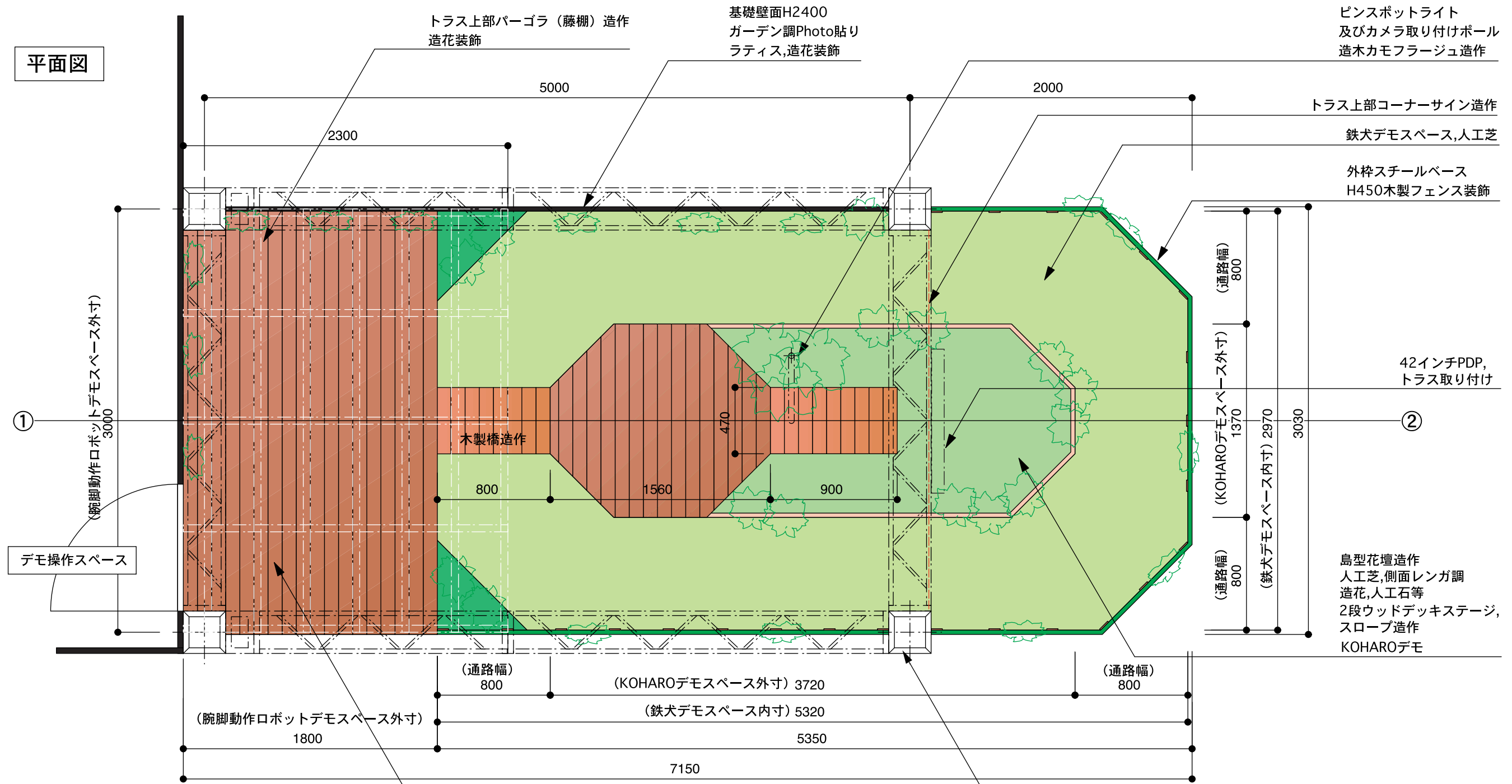
番号	名称	品番	図番	個数	材質	仕上(素材)寸法	備考
記事	△新規作成	承	検	担	名	KOHARO-A	
	△	認	図	当	称	電源ユニット 回路図2	
	△				図番	C3-05229-0	
PEKURIS				1/1	'05/2/9		
株式会社栗田製作所							



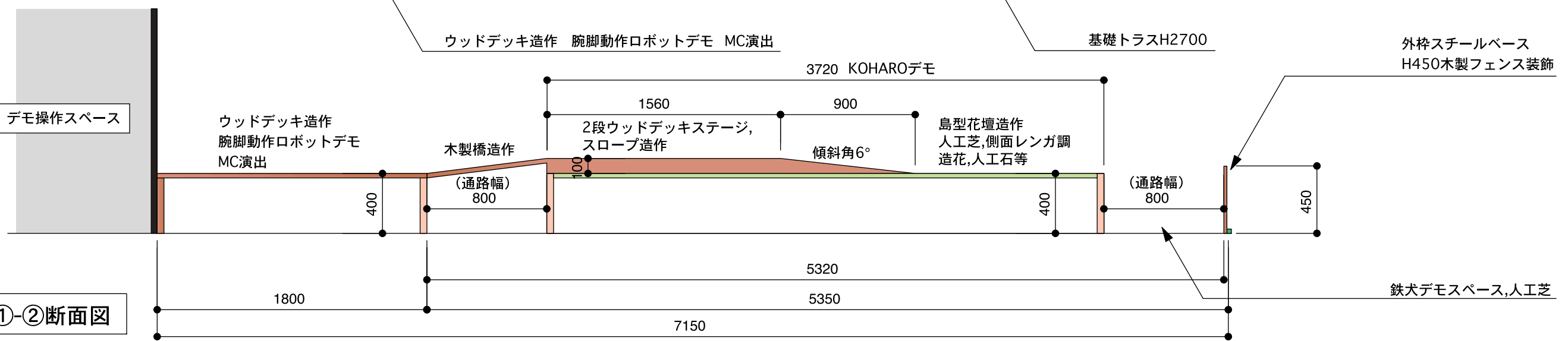


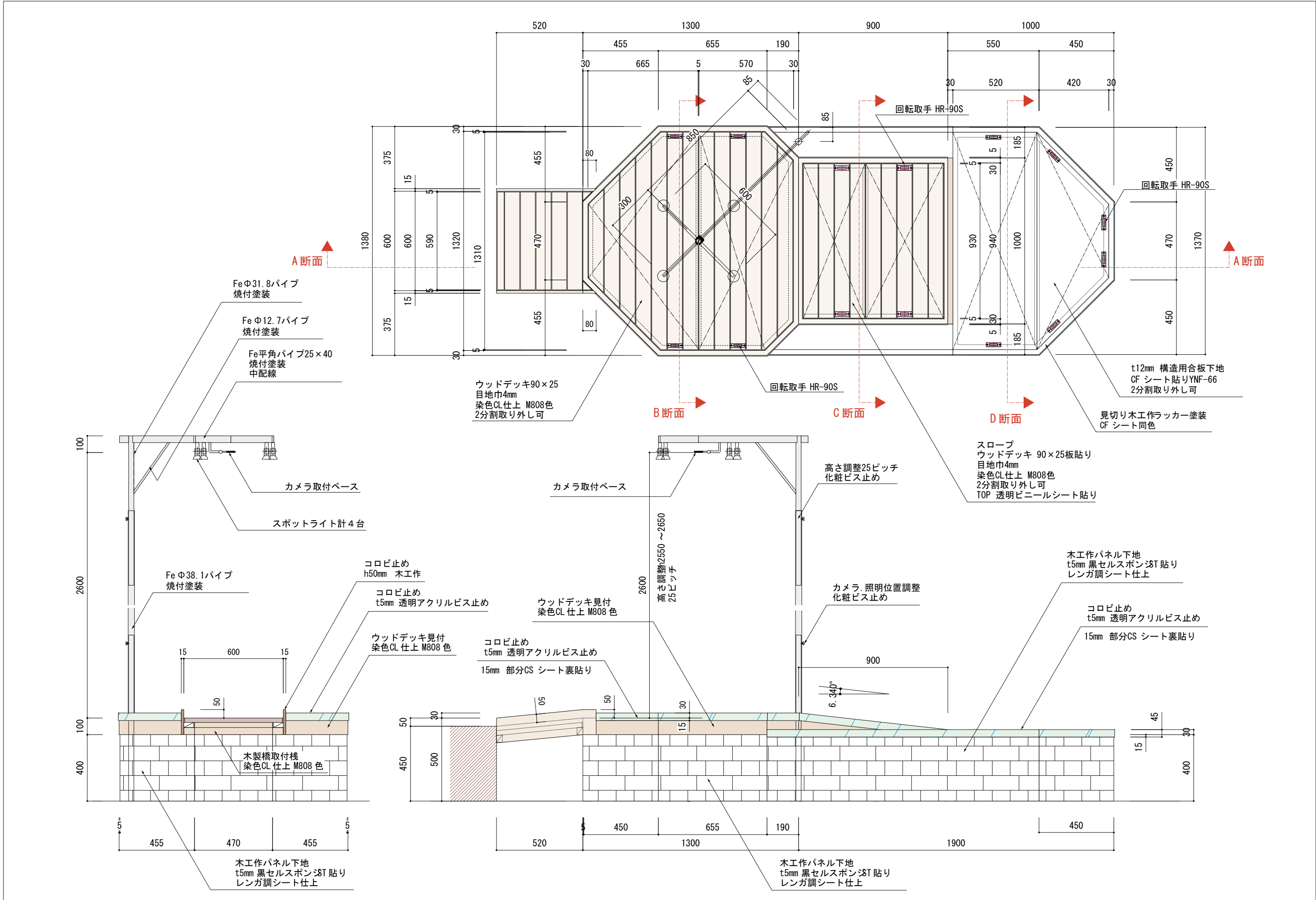
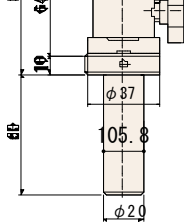


平面図

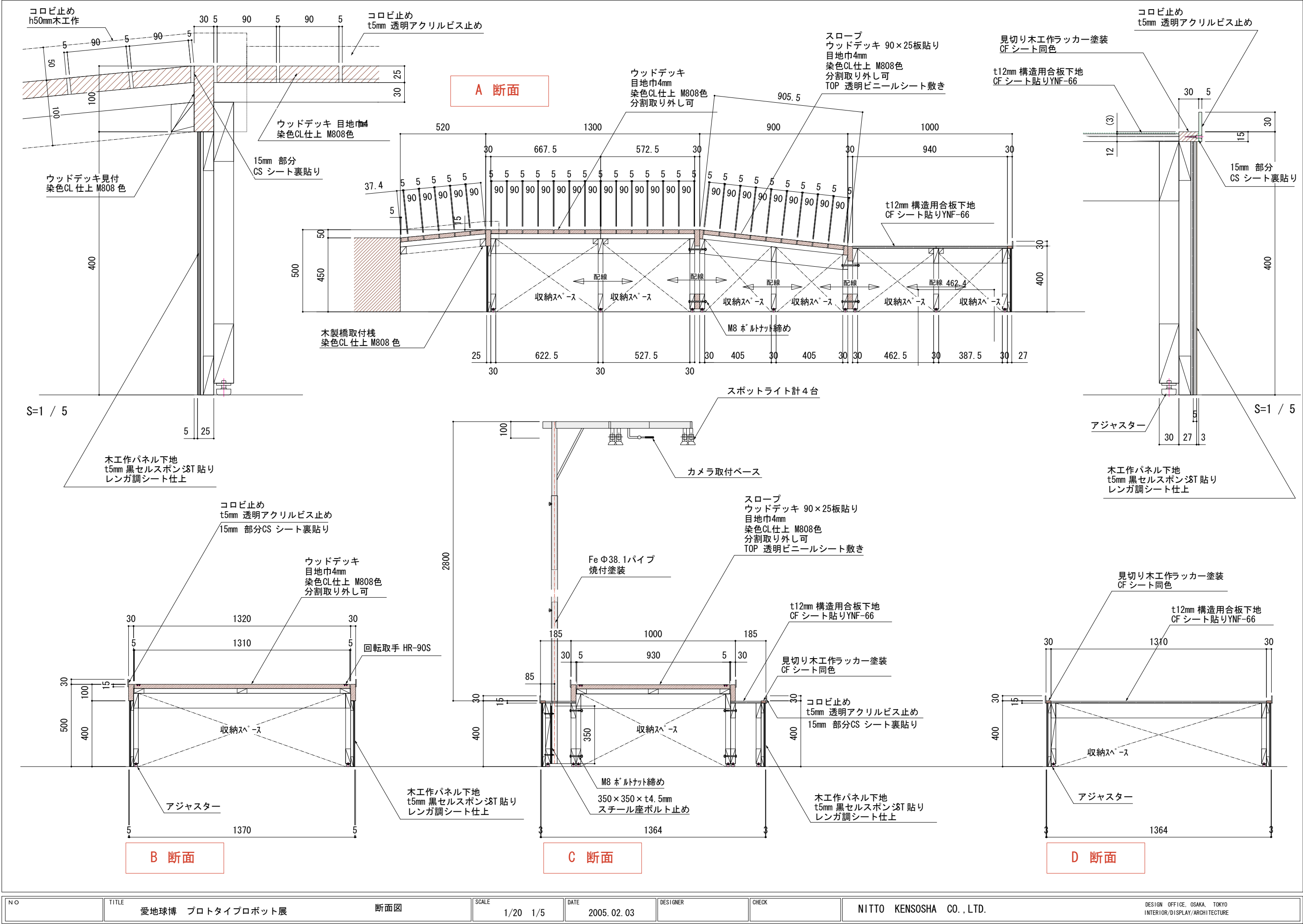


①-②断面図





NO	TITLE	SCALE	DATE	DESIGNER	CHECK		DESIGN OFFICE
	愛地球博 プロトタイプロボット展	S=1/20	05. 02. 18			NITTO KENSOSHA CO., LTD.	OSAKA TOKYO INTERIOR/DISPLAY/ARCHITECTURE
平面図 立面図							



NO	TITLE	断面図	SCALE	DATE	DESIGNER	CHECK	NITTO KENSOSHA CO., LTD.	DESIGN OFFICE, OSAKA, TOKYO INTERIOR/DISPLAY/ARCHITECTURE
	愛地球博 プロトタイプロボット展		1/20 1/5	2005. 02. 03				