

Title	摺動と揺動を利用した劣駆動ロボットの運動解析と制御
Author(s)	清野, 大樹
Citation	
Issue Date	2017-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/14150
Rights	
Description	Supervisor:浅野 文彦, 情報科学研究科, 修士

修士論文

摺動と揺動を利用した
劣駆動ロボットの運動解析と制御

北陸先端科学技術大学院大学

情報科学研究科

清野 大樹

平成29年3月

修士論文

摺動と揺動を利用した
劣駆動ロボットの運動解析と制御

1510028 清野 大樹

主指導教員 浅野 文彦
審査委員主査 浅野 文彦
審査委員 飯田 弘之
審査委員 平石 邦彦

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

平成29年2月

概要

先行研究において、支持脚先端が床面と1点で接し、かつ滑り接触をする受動歩行系に関する基礎的考察が行われた。数値解析を通して、単純なクーロン摩擦を採用する場合には、リムレスホイールやコンパス型2脚ロボットが下り斜面上で安定な受動歩行運動を生成できることが示された。これらのモデルがもつホロノミック拘束条件は、単脚支持期と衝突時のいずれも斜面の接線方向の1自由度拘束のみとなる。また、動摩擦係数がある程度の大きさを持つ場合には、支持脚交換直後から短い期間スリップした後、滑り接触を伴わない場合と同様の力学的特性を示すことが明らかにされた。これらの研究結果は、従来の一般的な受動歩行よりも自然な歩行運動が実現可能であることを示唆している。加えて、類似した先行研究の中には、実際にロボットを用いて地面と脚との接地点における摺動（摩擦）を制御に組み込んで目的の姿勢を達成するものがあるが、それらは実験的に求められたパラメータのみを使用しているため、全ての摩擦現象に適用できるものではない。

これを踏まえ本研究では、ロボットの身体表面が床面と滑り接触をする場合の運動について理解を深めるとともに、接触点の摺動を積極的に活用した新たな移動ロボットの実現可能性を模索する。提案するロボットは、半円形状をした身体フレームとその内部に取り付けられた1リンクの揺動質量から構成される。これは揺動質量の高周波振動が生む力学特性を利用して斜面下方向への移動を実現するものである。本研究では、このシンプルなモデルを用いて、システムパラメータに対する運動特性の基本的な変化傾向を明らかにする。加えて、解析結果を基に、揺動質量の振動・本体フレームの回転および接地点の摺動という三つのダイナミクスの支配的関係についても明らかにしていく。また、開発した実機を用いて、理論的結果の妥当性を検証する。

初めに、劣駆動ロボットについてその仕様を決定し、数学モデルを導出した。これを基に本体の回転運動と揺動質量の振動の支配関係を調べるため、数値シミュレーションを行い、運動生成ができることを確認した。次に、 ω の増加に伴うロボットの移動速度の変化について数値シミュレーションを行い、 ω を増加させると、移動速度が増加することを確認した。さらに、ロボットの半径 R および揺動の中心角度 y_0 を変更した場合の移動速度の変化について数値シミュレーションを行い、 R を変更した場合の移動速度の変化はほとんどみられなかった。また、 y_0 を変更すると移動速度が変化することを確認した。この変化は、周期的に発生している傾向がみられ、 0.25π 付近と 1.25π 付近では移動速度のピークがみられた。加えて、ロボットの中心から揺動質量までの長さ b を変更した場合の移動速度の変化について数値シミュレーションをした。この結果、 b を増加させると、移動速度が増加することを確認した。

これらの解析結果の妥当性を検証するため、実機を開発した。この実機を使用して予備実験を行ったが、レールの縁に接触し想定以上の摩擦抵抗が起こることや、予期しない振動が発生する現象などがみられた。これを踏まえ、次の仕様を考えて設計を行った。

- 重心位置の可変性付加

- 揺動質量の重さと長さの変更簡易化
- モータの振動抑制
- 機構の整備性向上

この仕様を満足するため、部品の滑動が可能なフレームを採用し、重心位置の調整が可能となった。さらに、揺動質量をフレーム外の両側に配置することで偏りをなくしている。これによって、揺動質量の重さと長さの変更を容易にしている。また、スライダクランク機構が動作する方向を変更することで、従来の機構よりも揺動効果を得ることができるようになった。これを使用して動作確認をしたが、動作が不安定となる現象がみられた。この原因は、スライダクランク機構に加わる負荷などが考えられる。主に不安定な動作をしている箇所は、スライダクランク機構のスライダである。軽量化および単純な機構を目的とするため、片側支持による保持方法を採用したが、高負荷に対して変形しやすい（低剛性）という欠点がある。質量の揺動時、瞬間的に加速度が変化するため、これに伴い大きな力が発生する。さらに、スライダクランク機構には上死点および下死点という最も大きな負荷がかかる地点が存在する。この点において質量の揺動の向きが変更されるため、加速度の変化による大きな力が発生したという推測ができる。また、変形が発生するため、ラックギアがフェアロックギアから離れて動作を伝達しない現象も確認された。他の原因として、機構を滑らかに動作させるための潤滑性が不足していることも挙げられる。そのため、スライダクランク機構の強化や新たな部品の搭載を行った。その結果、シミュレーションとほぼ同じ動作の生成が可能となり、各パラメータの変更も容易となった。

また、実験環境に実機の動作を停止させる問題が確認されたため、環境の整備を行った。これは、レールの高さや溝、摩擦係数などが均一でないことが問題であった。この原因は、部品のそのものによる誤差や部品の設置による誤差、材料表面の状態の違いによる誤差が挙げられる。そのため、レールの高さ調整や角棒を設置することなどで整備をした。その結果、シミュレーションにより近い環境での実験を可能にした。実機について、その固有振動数および固有角振動数を明らかにし、共振による破壊の可能性が低いことを確認した。

実機実験を行い、シミュレーションと同様にピークが出る領域と出ない領域があることが確認された。この原因は、実機に搭載したスライダクランク機構の移動によって発生する床反力だと考えられる。今後は、実機に発生する床反力を測定し、それを数学モデルに導入する必要がある。また、実験の結果から揺動質量を変更すると移動速度が変化することを確認した。

最後に、このロボットの制御について考察し、揺動の周波数や床反力などのいくつかのパラメータを変更することで移動速度を変化させる制御則ができると推測した。この制御則が完成すれば、将来的に滑りを有効利用した移動ロボットや滑りを制御する歩行支援器の開発が期待できる。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	1
1.3	本論文の構成	3
第2章	劣駆動ロボットの運動	4
2.1	モデリングおよび運動生成	4
2.2	数学モデルの導出	5
2.2.1	運動方程式	5
2.2.2	動摩擦力項	6
2.2.3	床反力	8
2.2.4	出力追従制御系設計	9
2.2.5	運動エネルギーと摩擦条件	9
第3章	劣駆動ロボットの運動解析	11
3.1	運動生成	11
3.1.1	運動生成およびロボットの基礎的な移動性能解析	11
3.1.2	ω の影響	16
3.2	シミュレーションのパラメータ設定	18
3.3	R の変更による移動性能解析	18
3.4	b の変更による移動性能解析	19
第4章	劣駆動ロボットの実機開発及び改良	23
4.1	試作機	23
4.2	試作機の改良	26
第5章	実機を使用した実験的検証	35
5.1	実験環境の構築	35
5.1.1	レールの改良	35
5.1.2	データ取得システムの構築	41
5.2	ロボットの固有振動数の導出	41
5.2.1	機械的な固有振動数の導出	42

5.2.2	ロボットの固有角振動数の導出	42
5.3	実機実験	44
第6章	劣駆動ロボットの制御に関する考察	48
6.1	移動速度を決定する要素	48
第7章	結論	49
7.1	結論	49
7.2	今後の予定	49
参考文献		52
付録		53

第1章 序論

1.1 研究背景

先行研究において、支持脚先端が底面と1点で接し、かつ滑り接触をする受動歩行系に関する基礎的考察が行われた。数値解析を通して、単純なクーロン摩擦を採用する場合には、リムレスホイール [1] やコンパス型2脚ロボット [2] が下り斜面上で安定な受動歩行運動を生成できることが示された。これらのモデルがもつホロノミック拘束条件は、単脚支持期と衝突時のいずれも斜面の接線方向の1自由度拘束のみとなる。また、動摩擦係数がある程度の大きさをもつ（高摩擦条件が成り立つ）場合には、支持脚交換直後から短い期間スリップした後、滑り接触を伴わない場合と同様の力学的特性を示すことが明らかにされた。これらの研究結果は、従来一般的な（支持脚接地点が滑らない条件をもつ）受動歩行よりも自然な歩行運動が実現可能であることを示唆している。

これを踏まえ本研究では、ロボットの身体表面が床面と滑り接触をする場合の運動について理解を深めるとともに、接触点の摺動を積極的に利用した新たな移動ロボットの実現可能性を模索する。提案するロボットは、半円形状をした身体フレームとその内部に取り付けられた1リンクの揺動質量から構成される。これは揺動質量の高周波振動が生む力学特性（揺動効果）を利用して斜面下方向への移動を実現するものである（図1.1参照）。本研究では、このシンプルなモデルを用いて、システムパラメータに対する運動特性の基本的な変化傾向を明らかにする。

加えて、解析結果を基に、揺動質量の振動・本体フレームの回転および接地点の摺動という三つのダイナミクスの支配的関係についても明らかにしていく。また、実機を用いた理論的結果の妥当性の検証を行う。さらに、解析および実験の結果を踏まえ、移動効率の向上に有利な劣駆動制御系の設計について考察を行う。

1.2 研究の目的

先行研究において、支持脚先端が床面と1点で接し、かつ滑り接触をする受動歩行系に関する基礎的考察が行われ、リムレスホイール [1] やコンパス型2脚ロボット [2] が下り斜面上で安定な受動歩行運動を生成できることが示された。これらの研究結果は、従来一般的な（支持脚接地点が滑らない条件をもつ）受動歩行よりも自然な歩行運動が実現可能であることを示唆している。また、類似した先行研究の中には、実際にロボットを用いて地面と脚との接地点における摺動（摩擦）を制御に組み込んで目的の姿勢を達成するもの

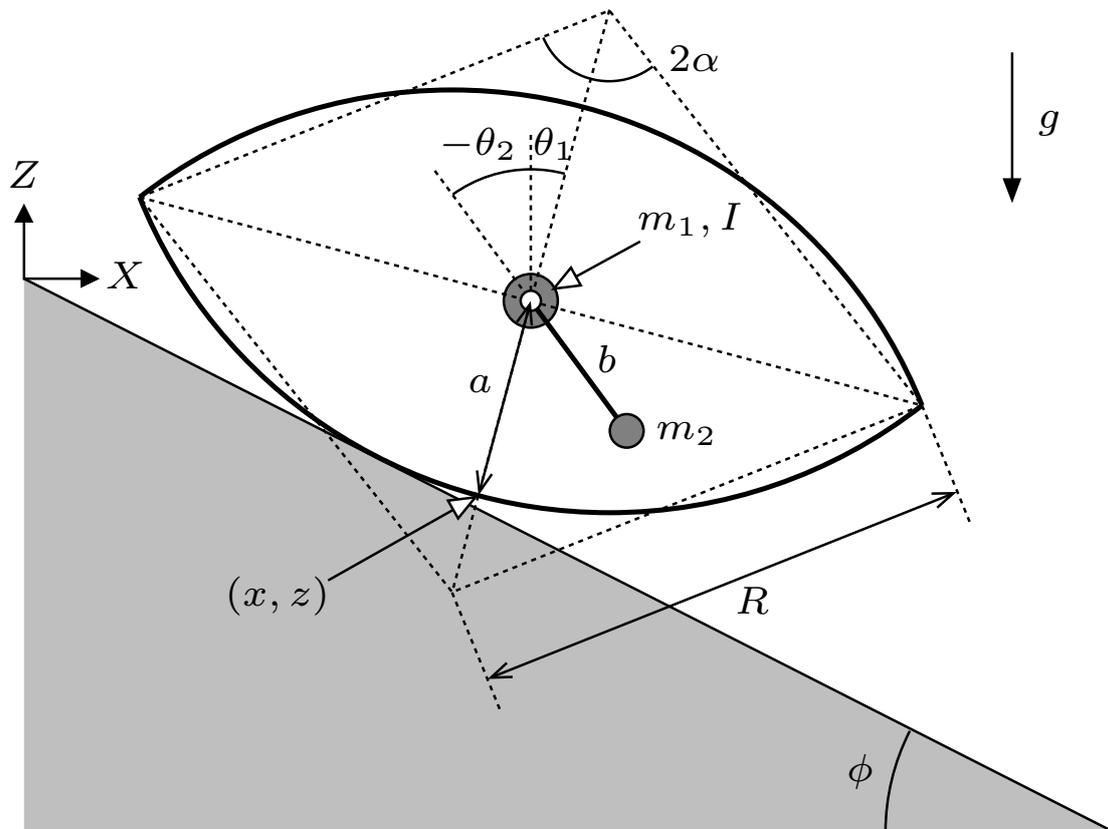


図 1.1: 劣駆動ロボット

があるが、それらは実験的に求められたパラメータのみを使用している [3][4][5] ため、全ての摩擦現象に適用できるものではない。

これを踏まえ本研究では、ロボットの身体表面が床面と滑り接触をする場合の運動について理解を深めるとともに、接触点の摺動を積極的に活用した新たなロボットの移動形態について実現可能性を模索する。提案するロボットは、半円形状をした身体フレームとその内部に取り付けられた 1 リンクの揺動質量から構成される。これは揺動質量の高周波振動が生む力学特性（揺動効果）を利用して斜面下方向への移動を実現するものである（図 1.1 参照）。本研究では、このシンプルなモデルを用いて、システムパラメータに対する運動特性の基本的な変化傾向を明らかにする。

加えて、解析結果を基に、揺動質量の振動・本体フレームの回転および接地点の摺動という三つのダイナミクスの支配的関係についても明らかにしていく。また、開発した実機を用いて、理論的結果の妥当性を検証する。

この研究により、移動時の揺動と摺動の役割を数学的に理解することで、ヒト歩行における体重移動のメカニズムの解明に繋げることができるものと期待される。

1.3 本論文の構成

本論文は、本章を含めて7章から構成される。第2章では、劣駆動ロボットについて概要を示し、この数学モデルを導出する。第3章では、第2章で導出した数学モデルを用いて、ロボットの各パラメータを変更し、その運動特性について解析する。第4章では、劣駆動ロボットの実機開発について説明する。第5章では、開発した劣駆動ロボットを使用し、解析結果の妥当性を評価するための実機実験を行う。加えて、その結果を踏まえてロボットの移動形態について考察する。第6章では、解析および実験の結果から得られた知見を基に、移動性能を向上させる制御方法について議論する。第7章では、本論文の内容について総括する。また、本研究を通して明らかになった課題を示す。

第2章 劣駆動ロボットの運動

本章では，劣駆動ロボットのモデリングや運動生成等について概要を示し，この数学モデルを導出する．

2.1 モデリングおよび運動生成

図 1.1 に本研究で扱う劣駆動移動ロボットのモデルを示す．ロボットは半径 R [m] の半円形状をした 2 個のフレームからなる本体と 1 リンクの揺動質量から構成される．揺動質量を高周波振動させることで，傾斜角度 ϕ [rad]，動摩擦係数 μ_0 の下り斜面上を高摩擦条件下 ($\tan \phi < \mu_0$) で滑りながら前進する．なお，図 1.1 に示すように， (x, z) は本体フレーム下側に固定された位置座標であり， θ_1 と θ_2 はそれぞれ本体フレームと揺動質量の鉛直方向に対する絶対角度である．また， (x, z) と本体フレーム中心位置までの長さを a [m] とし，本体フレーム中心位置から揺動質量までの長さを b [m] とする．中心角は 2α [rad] とし， α は a と R から定まる．その他のパラメータとして，本体質量を m_1 [kg]，その重心周りの慣性モーメントを I [kg·m] とする．さらに，揺動質量は m_2 [kg] とするが，その慣性モーメントは無視できるものとする．加えて，ロボットの全重量は， $M(= m_1 + m_2)$ [kg] とする．

このロボットの本体と揺動質量は，一つのアクチュエータによって接続されており，アクチュエータに回転トルク u [N·m] を印加することにより動作する．揺動質量は 1 リンクの剛体とする．ロボットは以下の順序で動作する．また，その動作方向を図 2.1 に示す．

1. アクチュエータに回転トルクを印加し，質量を揺動させる．
2. 揺動質量の引き込み効果により，ロボット本体が Y 軸周りに揺動するように回転する．
3. 斜面上を滑りながら前進する．

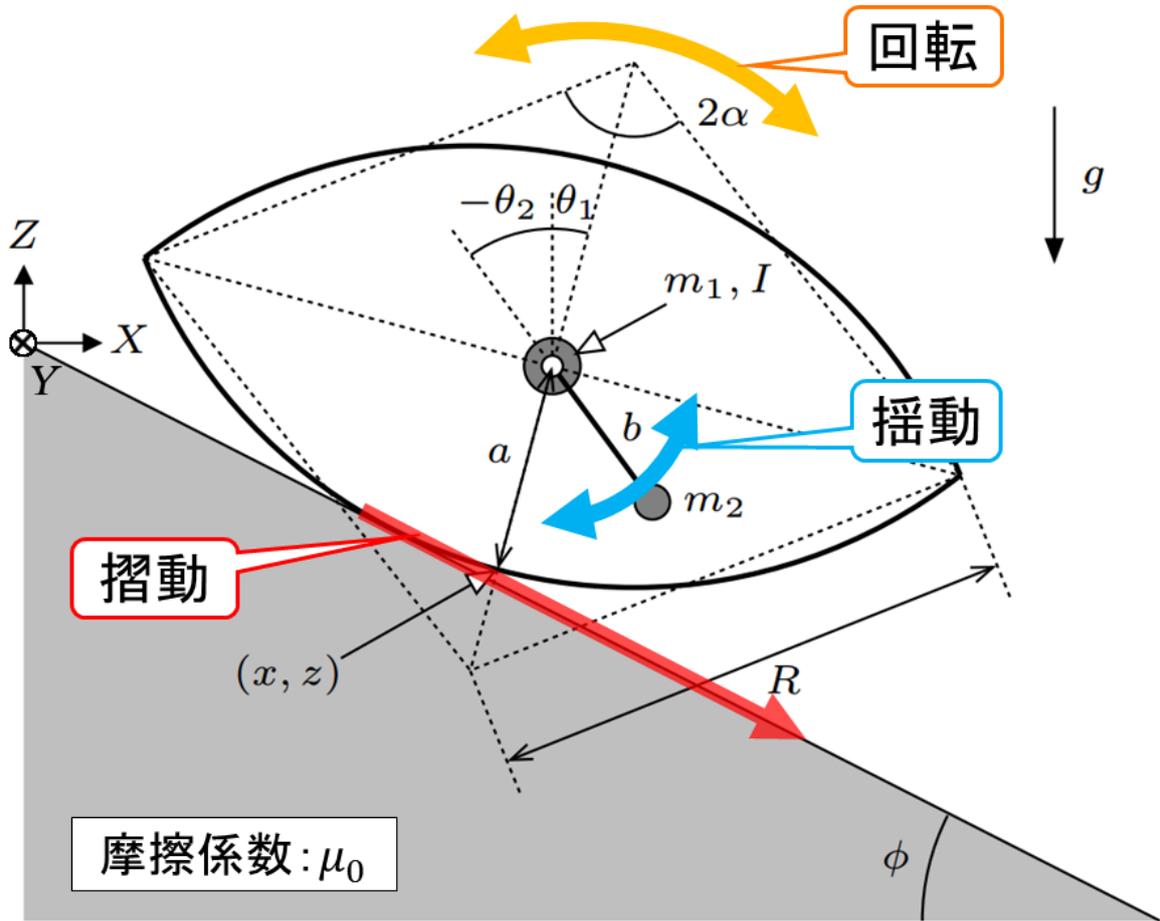


図 2.1: 劣駆動ロボットの運動生成

2.2 数学モデルの導出

2.2.1 運動方程式

まず, ロボットは4自由度の運動として記述する. 一般化座標ベクトルを $\mathbf{q} = [x \ z \ \theta_1 \ \theta_2]^T$ とするとロボットの運動方程式は,

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{S}u + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \lambda + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda \quad (2.1)$$

となる. 左辺の各項の詳細を以下に示す.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} M & 0 & Ma \cos \theta_1 & -m_2 b \cos \theta_2 \\ 0 & M & -Ma \sin \theta_1 & m_2 b \sin \theta_2 \\ Ma \cos \theta_1 & -Ma \sin \theta_1 & Ma^2 + I & -m_2 ab \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ -m_2 b \cos \theta_2 & m_2 b \sin \theta_2 & -m_2 ab \cos(\theta_1 - \theta_2) & m_2 b^2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} m_2 b \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 - M a \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 \\ m_2 b \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 - M a \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_1 + M g \\ -m_2 a b \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 \theta_2) - M a g \sin \theta_1 \\ m_2 a b \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 b g \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

また，式 (2.1) の右辺の各項の詳細は次の通りである．第一項は制御入力ベクトル，第二項はホロノミック拘束力ベクトル，第三項は動摩擦力ベクトルである．まず，ロボットに接続された一つのアクチュエータから運動生成されるため，駆動ベクトルは，

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

となる．次に，第二項のヤコビアン $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ の導出を行う．接触点の位置座標は，

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + R \sin \theta_1 - R \sin \phi \\ z + R \cos \theta_1 - R \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

となり，時間微分が

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} + R \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ \dot{z} + R \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

となる．接地点が斜面に沿って滑るための速度拘束条件は

$$\dot{\bar{z}} = -\dot{\bar{x}} \tan \phi \quad (2.7)$$

与えられるので，式 (2.6) を式 (2.7) に代入するとホロノミック拘束条件式は以下の通りとなる．

$$\dot{x} \tan \phi + \dot{z} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 \tan \phi - \sin \theta_1) = 0 \quad (2.8)$$

これによりヤコビアンが以下に定まる．

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \tan \phi & 1 & R(\cos \theta_1 \tan \phi - \sin \theta_1) & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2.9)$$

2.2.2 動摩擦力項

本研究では常に動摩擦条件下での運動と仮定する．これより，この条件下動摩擦力項を導出する．

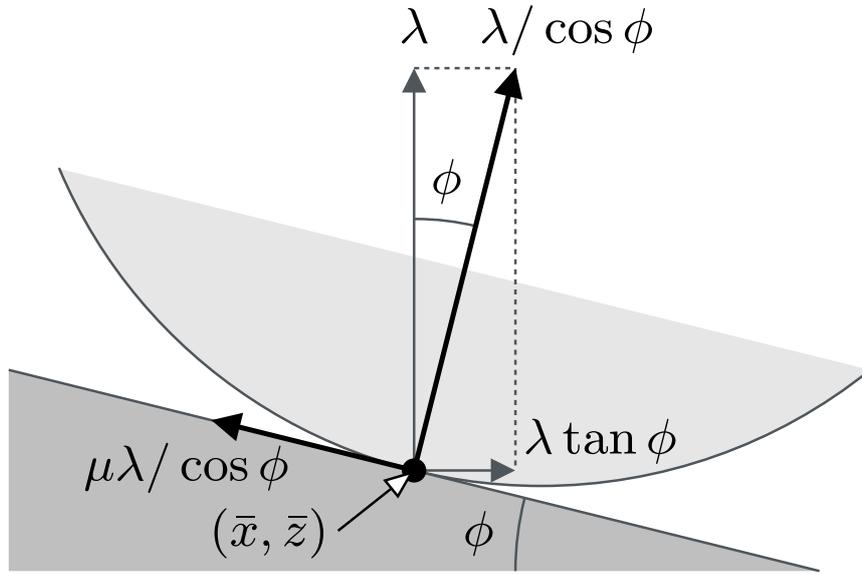


図 2.2: 動摩擦力と床反力

式 (2.9) の $J(q)$ の第一・第二成分より X 方向の床反力は $\lambda \tan \phi$ [N], Z 方向は λ [N] であることがわかる．これより, X - Z 平面における動摩擦ベクトルは, 図 2.2 に示すように

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{bmatrix} \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} \quad (2.10)$$

となる．これを三次元空間に拡大し, 外積演算を行うことで, 一般化座標系への等価交換が

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{x} - x \\ 0 \\ \bar{z} - z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \phi \\ 0 \\ -\sin \phi \end{bmatrix} \frac{\mu \lambda}{\cos \phi} &= \begin{bmatrix} R(\sin \theta_1 - \sin \phi) \\ 0 \\ R(\cos \theta_1 - \cos \phi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mu \\ 0 \\ -\mu \tan \phi \end{bmatrix} \lambda \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mu R(\cos(\phi - \theta_1) - 1) / \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \lambda \end{aligned} \quad (2.11)$$

となる．式 (2.10)(2.11) をまとめることで動摩擦力ベクトルが以下に定まる．

$$\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda = \begin{bmatrix} \mu \\ -\mu \tan \phi \\ \mu R(\cos(\phi - \theta_1) - 1) / \cos \phi \\ 0 \end{bmatrix} \lambda \quad (2.12)$$

ただし, $\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は以下の符号付動摩擦係数 μ を含むため, 位置と速度の両方を含んだ

関数である．

$$\begin{aligned}\mu &= -\mu_0 \text{sign} \left(\frac{\dot{x}}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) = -\mu_0 \text{sign} \left(\frac{\dot{x} + R\dot{\theta}_1 \cos \theta_1}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \\ &= -\mu_0 \text{sign} \left(\dot{x} + R\dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 - \cos \phi) \right)\end{aligned}\quad (2.13)$$

ここで， $\dot{x}/\cos \phi$ [m/s] は接地点の斜面の接線方向への移動速度であるが， $\dot{x} = 0$ の場合もロボット本体の回転運動により動摩擦力が発生するため， $R\dot{\theta}_1$ [m/s] を差し引かなければならないことに注意する．また，本研究では $\mu = 0$ の周りで発生するチャタリング防止策として，次の平滑関数を用いる．

$$\mu = -\mu_0 \tanh \left(c \left(\frac{\dot{x} + R\dot{\theta}_1 \cos \theta_1}{\cos \phi} - R\dot{\theta}_1 \right) \right)\quad (2.14)$$

c は関数の切れ味を調節するための正定数である．

2.2.3 床反力

式 (2.9) を時間微分すると

$$\mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0\quad (2.15)$$

となる．式 (2.1)(2.15) より， λ が以下のように求まる．

$$\lambda = -X(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \left(\mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} (\mathbf{S}u - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \right) - X(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}\quad (2.16)$$

ただし，

$$\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) := \mathbf{J}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\quad (2.17)$$

$$\mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) := \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T\quad (2.18)$$

$$\mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) := \mathbf{I}_4 - \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\quad (2.19)$$

とおき，式 (2.16) を式 (2.1) に代入して整理することで， λ を消去した以下の式で書き換えられる．

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) (\mathbf{S}u - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) - \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}\quad (2.20)$$

本研究における数値シミュレーションでは，式 (2.16) で求まる λ の値が正で動作するものを安定な運動生成の必要条件とする．

2.2.4 出力追従制御系設計

本研究では前進運動を実現する方法として、揺動質量の高周波振動に基づく間接励起の運動を試みる。

制御出力を

$$y := \mathbf{S}^T \mathbf{q} = \theta_1 - \theta_2$$

とすると、その時間による2階微分は

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= \mathbf{S}^T \ddot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{S}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) (\mathbf{S}u - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) - \mathbf{S}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})u + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \end{aligned}$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &:= \mathbf{S}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{S} \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &:= -\mathbf{S}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \mathbf{Y}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{S}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1} \hat{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \mathbf{X}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \end{aligned}$$

と置いた。本研究では、次の正弦波軌道を y の目標軌道とする。

$$y_d(t) = y_0 + A_m \sin(\omega t) \quad (2.21)$$

ここで A_m [rad] は振幅、 ω [rad/s] は角周波数、 y_0 [rad] は振動の中心角度である。

$y \rightarrow y_d(t)$ を実現する制御入力は次のように決定すれば良い。

$$u = \mathbf{A}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^{-1} (v - \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})) \quad (2.22)$$

$$v = \ddot{y}_d(t) + K_D (\dot{y}_d(t) - \dot{y}) + K_P (y_d(t) - y) \quad (2.23)$$

ここで K_P 、 K_D はPDゲインであり、いずれも正定数である。

2.2.5 運動エネルギーと摩擦条件

ロボットの全力学的エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + P(\mathbf{q}) \quad (2.24)$$

で求まる。ただし、

$$P(\mathbf{q}) = Mg(z + a \sin \theta_1) - m_2 g b \sin \theta_2 \quad (2.25)$$

は位置エネルギーである． E の時間微分は，

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \dot{\mathbf{q}}^T (\mathbf{S}u + \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \lambda + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda) \\ &= \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{S}u + \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})^T \lambda \\ &= \dot{y}u + \mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \lambda\end{aligned}\quad (2.26)$$

となる．式 (2.26) はそれぞれ第一項が制御入力，第二項が動摩擦力による力学的エネルギーの時間変化分を表している． μ_0, λ が共に正値であることを考慮すると次の不等式が導かれる．

$$\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \lambda = \mu \lambda (\dot{x} - \dot{z} \tan \phi) + \frac{\mu \lambda R \dot{\theta}_1 (\cos(\phi - \theta_1) - 1)}{\cos \phi} \quad (2.27)$$

$$= \frac{\mu \lambda (\dot{x} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 - \cos \phi))}{\cos^2 \phi} \quad (2.28)$$

$$= -\frac{\mu_0 \lambda}{\cos^2 \phi} (\dot{x} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 - \cos \phi)) \times \text{sign} (\dot{x} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 - \cos \phi)) \quad (2.29)$$

$$= -\frac{\mu_0 \lambda}{\cos^2 \phi} |\dot{x} + R \dot{\theta}_1 (\cos \theta_1 - \cos \phi)| \leq 0 \quad (2.30)$$

なお，式 (2.27) から式 (2.28) への変形においては，式 (2.8) の関係を使用した．また，式 (2.28) から式 (2.30) への変形においては，任意の実数 x について関係式

$$x \cdot \text{sign}(x) = |x|$$

が成り立つことを用いた．これより，力学的エネルギーは動摩擦力により常に減少し続けることがわかる．不等式 (2.30) の等号成立条件は

$$\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2.31)$$

であり，これはホロノミック拘束（転がり拘束）の成立条件である．従って不等式 (2.30) は，ホロノミック拘束条件が成り立たない限り力学的エネルギーは動摩擦力により減少し続けなければならない，ということを意味する．

式 (2.14) の動摩擦係数を用いる場合も任意の定数 x について関係式

$$0 \leq x \cdot \tanh(x) \leq |x| \quad (2.32)$$

が成り立つことから， $\mathbf{J}_\mu(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} \lambda \leq 0$ が示される．

第3章 劣駆動ロボットの運動解析

本章では，第2章で導出した数式モデルを使用したシミュレーションを行い，各パラメータがロボットの移動性能に与える影響を解析する．

3.1 運動生成

3.1.1 運動生成およびロボットの基礎的な移動性能解析

まず，ロボットの運動についてその特徴を確認するため，運動生成を行う．システムパラメータを表3.1に示す通りに設定し，初期状態を

$$\mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi \\ \phi \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

として数値シミュレーションを実行した．

表 3.1: 運動生成用システムパラメータ

m_1	1.0	kg	ϕ	0.2	rad
m_2	0.2	kg	K_P	2500	s ⁻²
I	0.1	kg·m ²	K_D	10000	s ⁻¹
R	0.30	m	A_m	0.3	rad
a	0.20	m	μ_0	0.30	-
b	0.03	m			

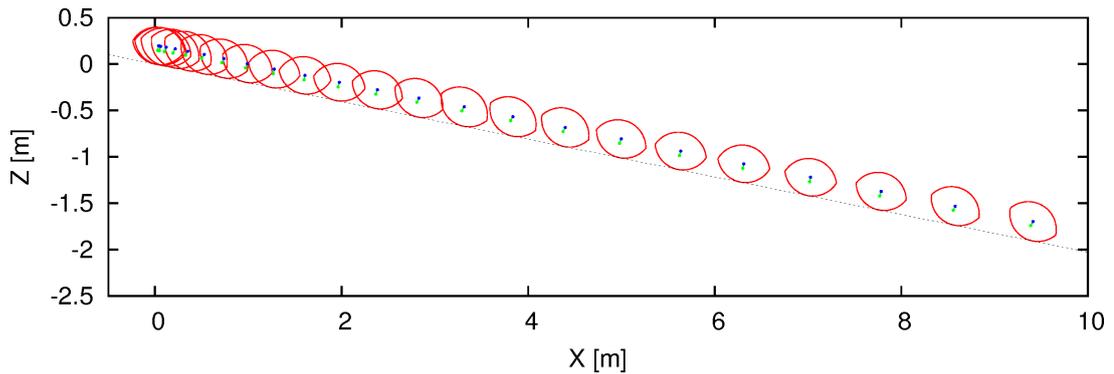
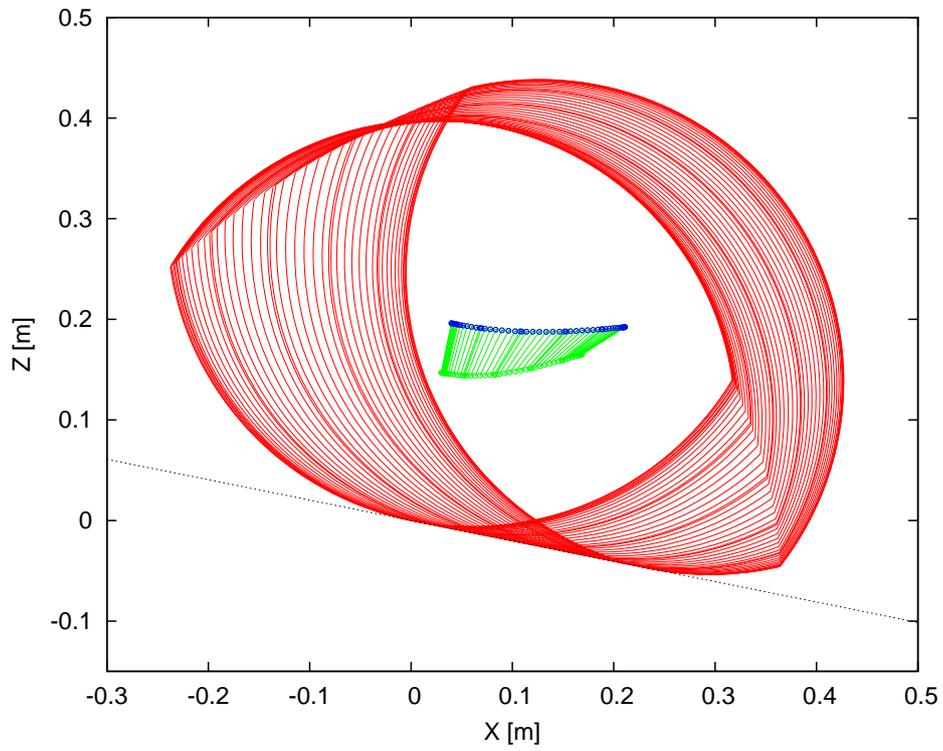


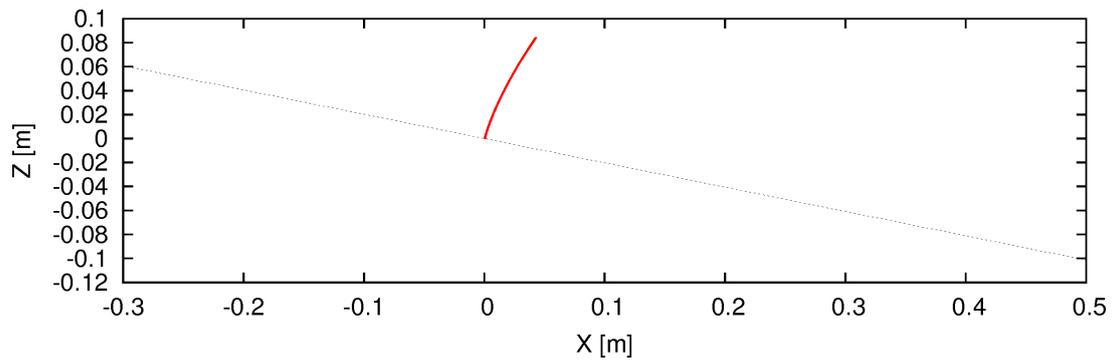
図 3.1: $A_m = 0.00$ [rad] , $\mu_0 = 0.10$ のスティック線図

図 3.1 に $\mu_0 = 0.10$, $A_m = 0.00$ [rad] , $\omega = 0$ [rad/s] とした数値シミュレーション結果をスティック線図で示す．この場合は動摩擦係数が十分に小さいため，ロボットの滑り速度は単調に増加し，最終的に発散した．次に $\mu_0 = 0.30$, $A_m = 0.00$ [rad] , $\omega = 0$ [rad/s] とした数値シミュレーションの運動開始から 10 秒までの結果を図 3.2 に示す．(a) はロボットのスティック線図，(b) は (X, Z) の軌道を $X-Z$ 平面に示したものである．これらの結果より，ロボットはほぼ定位置で単振動に近い（運動エネルギーの消費が押さえられた）運動を続けていることがわかる．質点の滑り運動であれば等加速度運動により停止へ向かう（単調減速する）摩擦条件であるが，円弧形状の本体が生み出す回転運動がこの減速効果を大きく回避しているものと考えられる．さらに， $\mu_0 = 0.30$, $A_m = 0.30$ [rad] , $\omega = 50$ [rad/s] とした数値シミュレーションの運動開始から 10 秒までの結果を図 3.3 に示す．揺動質量が高周波振動することでロボット本体が振動しながら斜面方向へ進んでいることがわかる．

図 3.4 は図 3.3 における各量の時間変化を示したものである．(a) , (b) よりロボット本体が振動しながら低速で斜面下方向へ進んでいること，(c) より制御出力が目標の正弦波軌道に追従していること，(d) より床反力が常に正值であることがそれぞれわかる．揺動の影響を受け，本体も前後方向に高周波振動をするため，正負のグリップ効果 [2] が短期間で切り替わりながら交互に現れている．このことは，(a) の x の軌道に高周波が含まれていることから理解できる．また，グリップ効果は運動エネルギーの消散を引き起こすことから，相応の移動効率の低下は免れないものと考えられる．

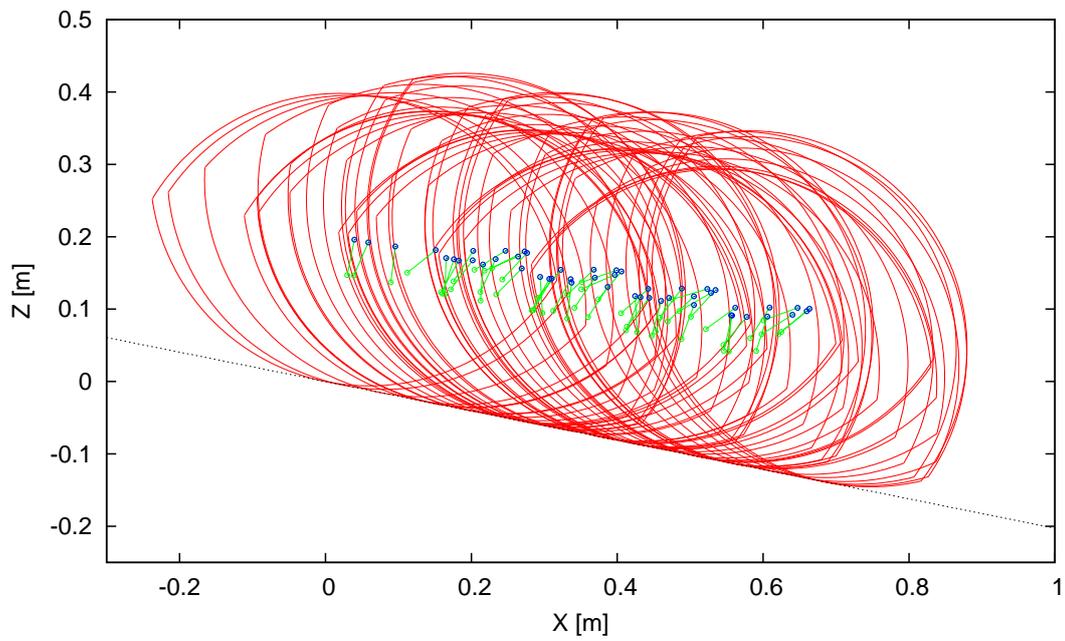


(a) スティック線図

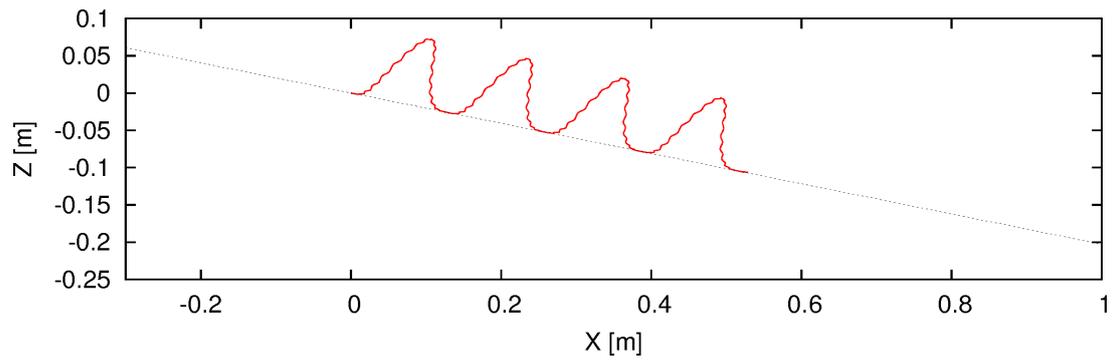


(b) (x, z) の軌道

図 3.2: $A_m = 0.00$ [rad] , $\mu_0 = 0.30$ における 10 秒間のスティック線図と (x, z) の軌道

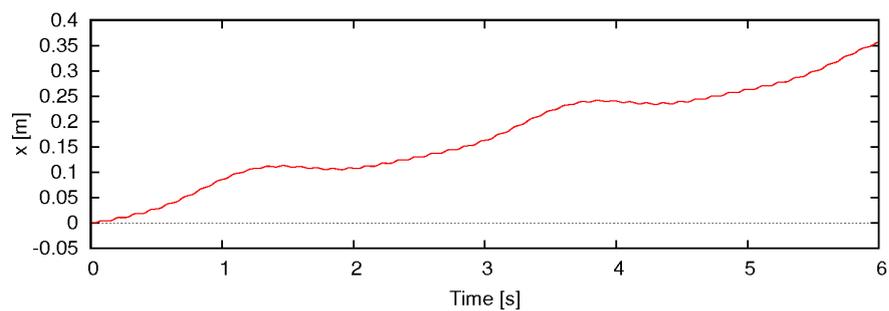


(a) スティック線図

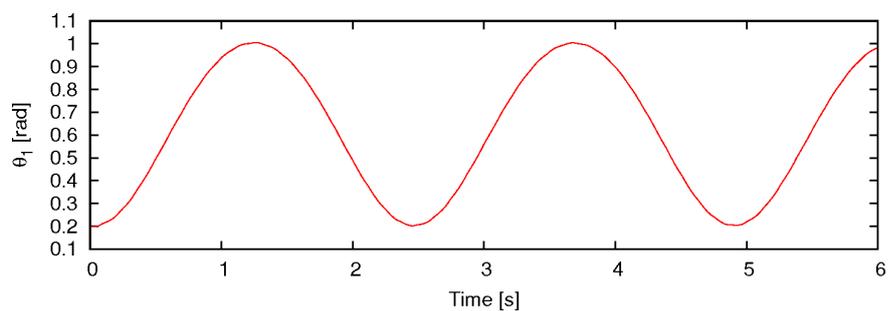


(b) (x, z) の軌道

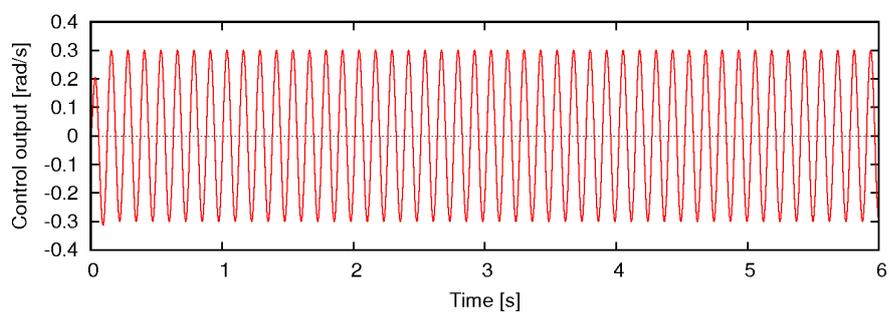
図 3.3: $A_m = 0.30$ [rad] , $\mu_0 = 0.30$ における 10 秒間のスティック線図と (x, z) の軌道



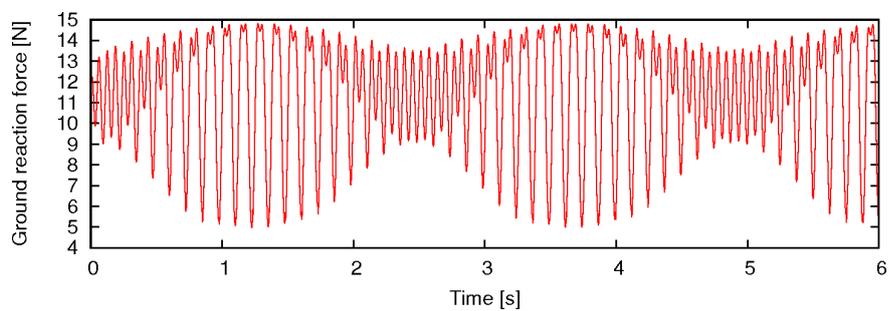
(a) x



(b) θ_1



(c) y



(d) λ

図 3.4: $A_m = 0.03$ [rad] , $\mu_0 = 0.30$ における 10 秒間の各量の時間変化

3.1.2 ω の影響

ω の影響を調べるため，以下の手順に従い歩容パラメータを計算する．

- (P1) b を 0.03 , 0.04 , 0.05 , 0.06 [m] に設定し b 以外のシステムパラメータを表 3.1 の値に設定する．また , $A_m = 0.30$ [rad] , $\omega = 0$ [rad/s] , $\mu_0 = 0.30$ と設定する．
- (P2) 初期状態を式 (3.1) の値に設定する．
- (P3) 各 b の値で数値シミュレーションを開始し , 200 秒間経過してから θ_1 の 10 周期分の歩容パラメータを保存する．
- (P4) ω を $\omega + 1$ として (P2) から繰り返す．

ここでは歩容パラメータの一つとして , 次式で定義される平均移動速度を用いる．

$$V =: \frac{1}{T_e - T_s} \int_{T_s}^{T_e} \frac{\dot{x}}{\cos \phi} dt \quad (3.2)$$

ここでは , $(T_s, T_e) = (200, 205) , (210, 215) , \dots , (290, 295)$ の十通りに設定した．図 3.5 に平均移動速度の解析結果を示す．結果より , 各場合で揺動が低周波振動をする場合は移動速度がほぼ零かつ準周期的であること , ある程度 ω が大きくなると移動速度が上昇をはじめ周期的な運動となることがわかる．また , b の値が大きいくほど移動速度の上昇傾向が強くなることがわかる．

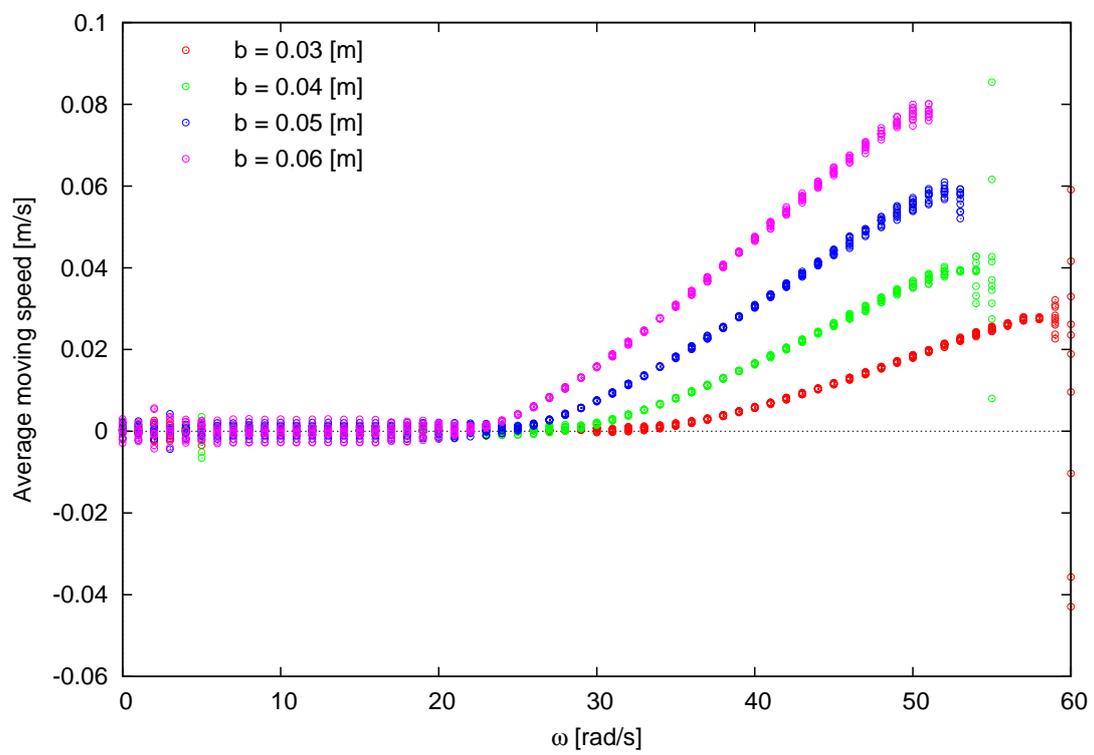


図 3.5: ω 変更におけるの移動速度の比較

3.2 シミュレーションのパラメータ設定

次より物理・制御パラメータは表 3.2 に示す値に設定し，初期状態を

$$\mathbf{q}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi \\ \phi - y_0 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

として，数値シミュレーションを実行した．

3.3 R の変更による移動性能解析

図 3.6 に移動速度の解析結果を示す．グラフの見易さを考慮して，10 歩分の平均値をプロットした．結果より， R の値に依存しない，ほぼ同一の変化傾向を示していることがわかる．また $y_0 = 0.2\pi \sim 0.25\pi$ [rad] 付近で移動速度が最大値をとっていること， $y_0 = 0.5\pi \sim 0.9\pi$ [rad] 付近で移動速度がほぼゼロとなっていることがわかる．

$y_0 = 1.2\pi \sim 1.25\pi$ [rad] 付近にも極大値が存在しているが，これを与える y_0 は前述の最大値を与える y_0 との差がほぼ π [rad] であるように見える．

$y_0 = 1.4\pi \sim 1.6\pi$ [rad] 付近では安定な運動が生成されていないが，これは運動中に床反力 λ が負の値になった（浮遊した）ためである．運動開始から 1 秒以内に λ が負になるが，これを無視して数値シミュレーションを続けても，定常的に負の値となる期間をもつサイクルに収束していた．

この解析結果の妥当性を検証するために， y_0 を $0, 0.25\pi, 0.75\pi$ [rad] の三通りに設定して数値シミュレーションを行った．図 3.7 に運動開始から 30 秒間の x の時間変化を示す．ただし， $R = 0.4$ [m] と設定し，これ以外のシステムパラメータは表 3.2 の値を用いた．図 3.6 において $y_0 = 0.75\pi$ [rad] の場合は移動速度がほぼゼロに見えたが，実際は非常に低速ながら僅かに前進していることがわかる．また，他の二通りの y_0 に関しては，劇的に移動速度が上昇していること，本体の低周波振動の影響が少ないこともわかる．図

表 3.2: システムパラメータ

m_1	1.0	kg	K_P	2500	s^{-2}
m_2	0.2	kg	K_D	100	s^{-1}
I	0.1	$kg \cdot m^2$	A_m	0.3	rad
R	0.4	m	ω	40	rad/s
a	0.2	m	μ_0	0.30	-
b	0.05	m	c	10000	-
ϕ	0.2	rad			

3.8 は θ_1 の時間変化を比較してプロットしたものである。運動開始から 30 秒間のうちに、 $y_0 = 0.75\pi$ [rad] 以外の場合は本体の回転運動が大きく減衰している（床面に接地している本体フレームに対する間接励起が有効になっている）ことがわかる。また図 3.9 は θ_2 の時間変化を比較してプロットしたものであるが、この結果からも θ_1 の低周波振動の影響を大きく受けているのは $y_0 = 0.75\pi$ [rad] の場合のみであることがわかる。これらの結果は、揺動質量の振動の中心角度（あるいは絶対角度）が揺動と回転の支配関係に大きな影響を与えることを意味するものである。リムレスホイールの受動歩行では振動数を増大させることで間接励起が有効となったが [6]、揺動の方向も同様にダイナミクスの支配関係を調節する要因となり得るということである。

3.4 b の変更による移動性能解析

ロボット中心から揺動質量までの長さ b の変更によるロボットの移動性能について検証した。 b を 0.05, 0.10, 0.20[m] の三通りに設定して、数値シミュレーションを行った。図 3.10 に運動開始から 30 秒間の x の時間変化を示す。ただし、 $y_0 = 0.2\pi$ [rad] とし、その他のパラメータは、これまでの解析と同様の値を用いた。これらの結果から、 b の値が上昇すると移動速度が上昇していることがわかる。これは、 b の値が上昇することにより揺動効果が高まり、それに対応して移動速度が上昇したと考えられる。

$b = 0.05$ [m] のとき、揺動の中心角度 y_0 に対する移動速度の変化について解析した。これを踏まえ、 b の値を変更した場合についてもその傾向を明らかにするために解析を行った。図 3.11 は、 $R = 0.40$ [m] の場合の $b = 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14$ [m] について、200 秒経過後の移動速度の平均値をプロットしたものである。この結果、 b を変更した場合でも速度の変化の傾向が同様であり、 b の値の増加に伴った速度の上昇を確認できた。また、この結果から b の増加に伴い、床反力が負になる範囲が拡大していることがわかる。これは、揺動質量の長さ変更により、揺動効果が高まったことが原因であると推測できる。

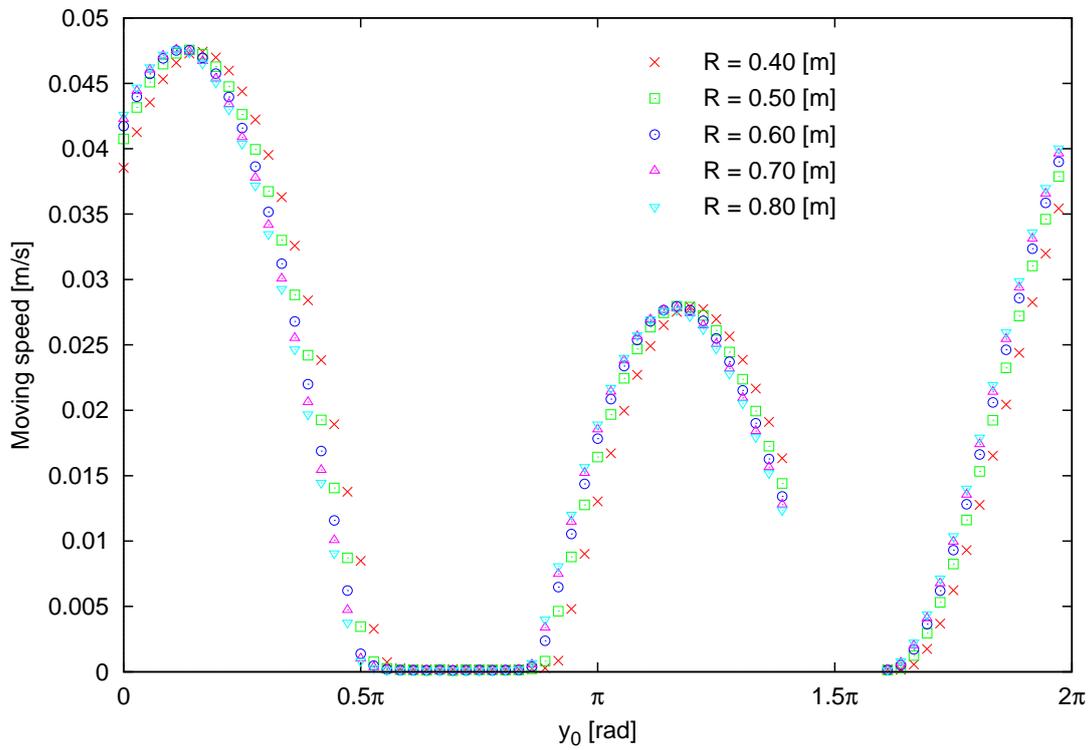


図 3.6: y_0 の変更における円弧半径 R および移動速度 \dot{x} の比較

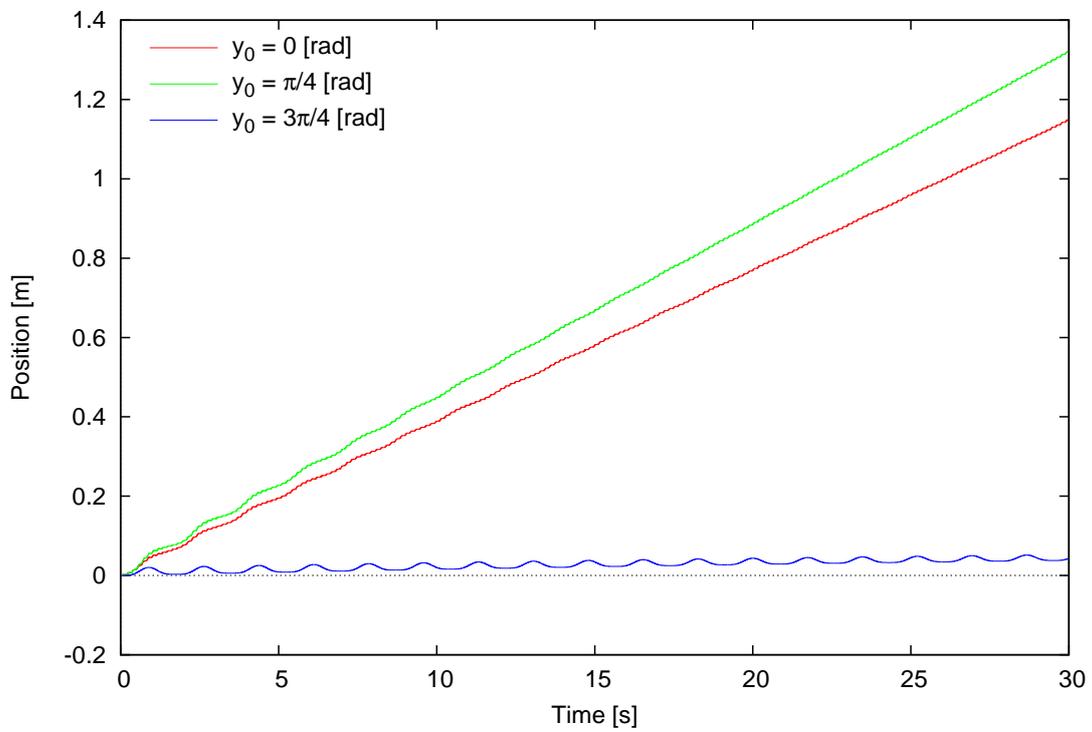


図 3.7: y_0 の変更における移動距離 x の時間変化

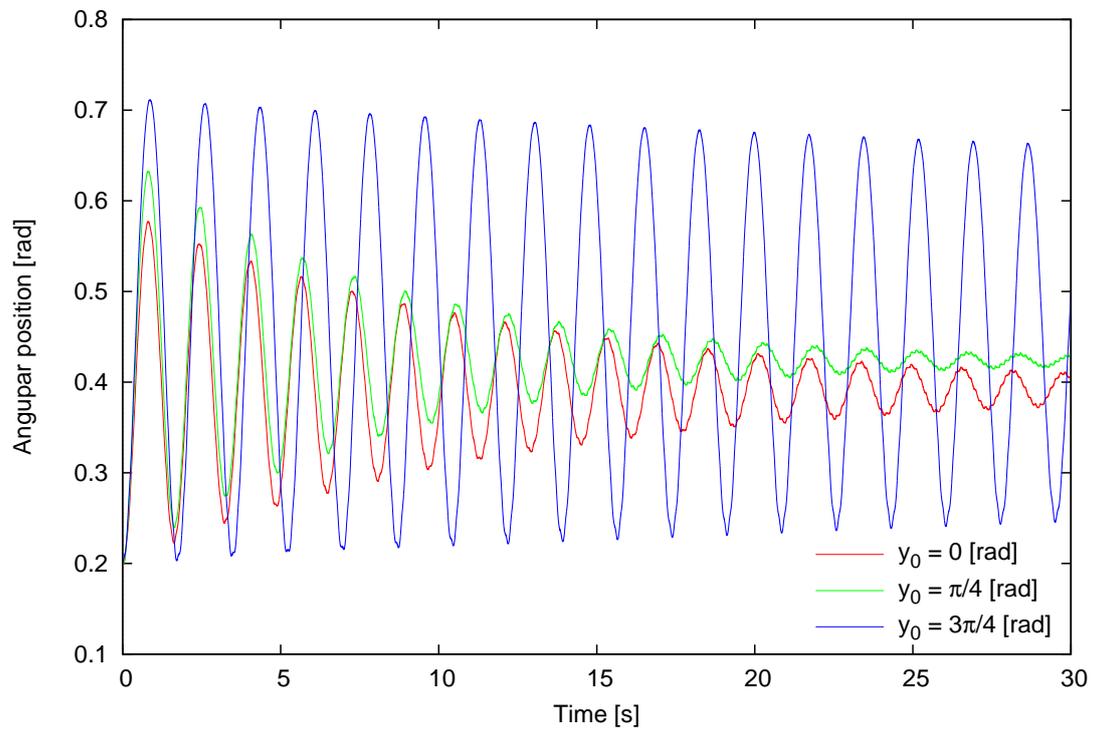


図 3.8: y_0 の変更における本体角度 θ_1 の時間変化

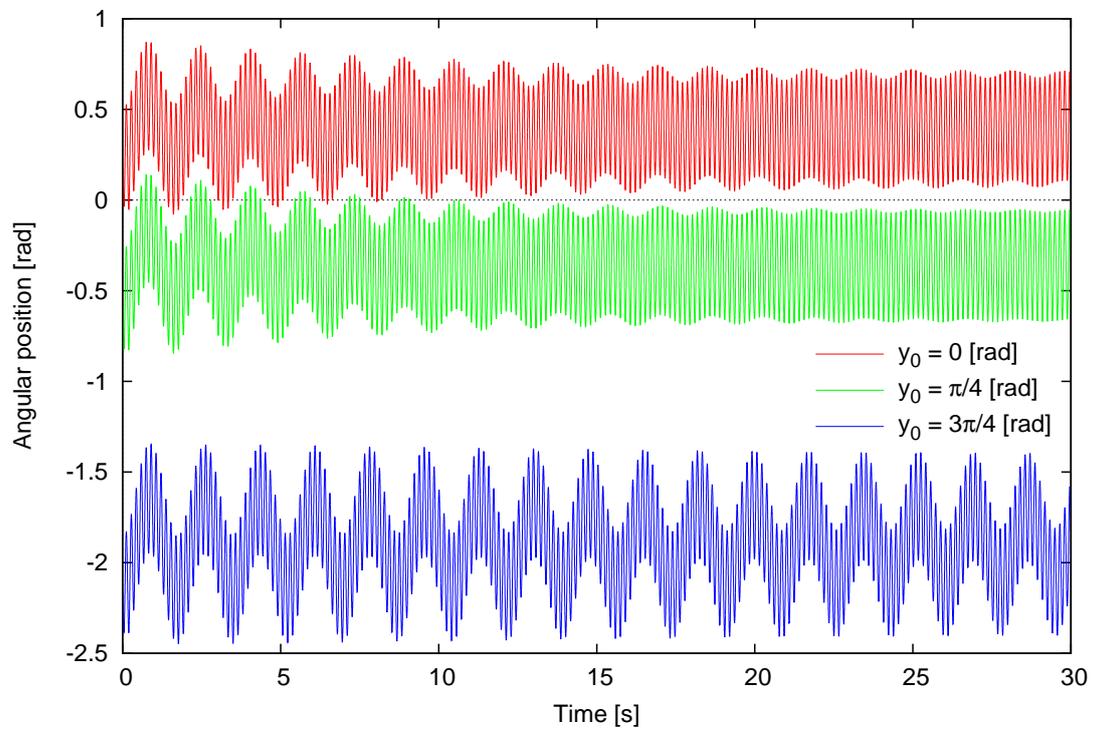


図 3.9: y_0 の変更における揺動質量角度 θ_2 の時間変化

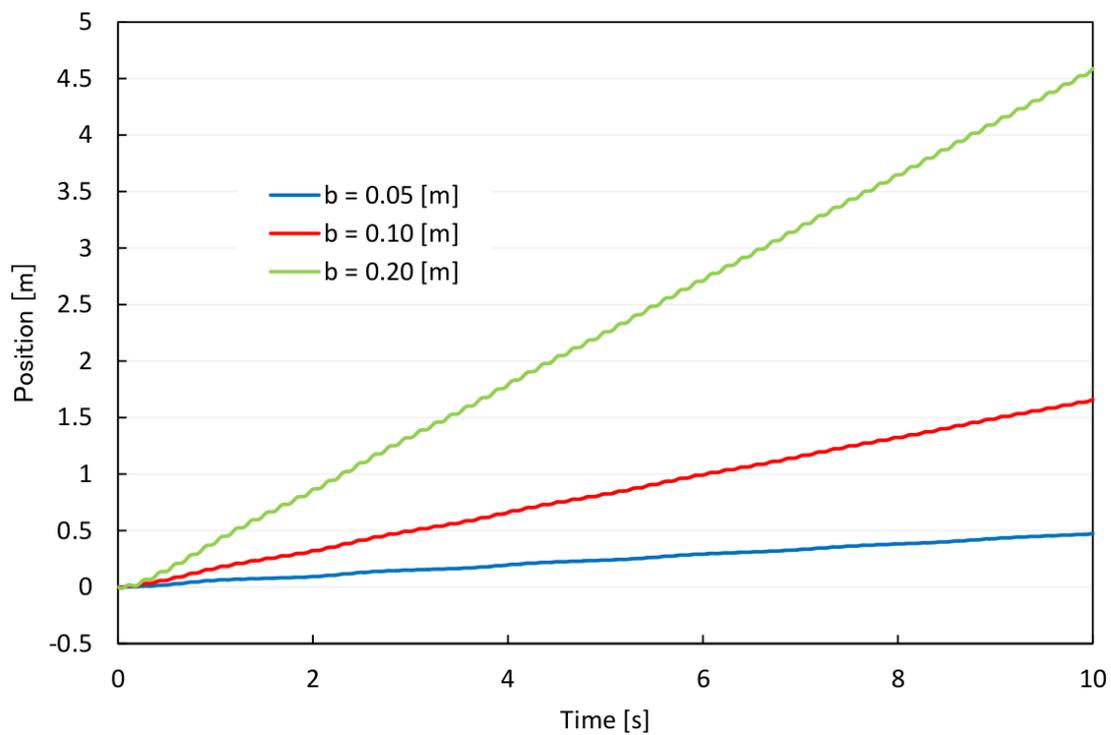


図 3.10: b の変更における移動距離 x の時間変化

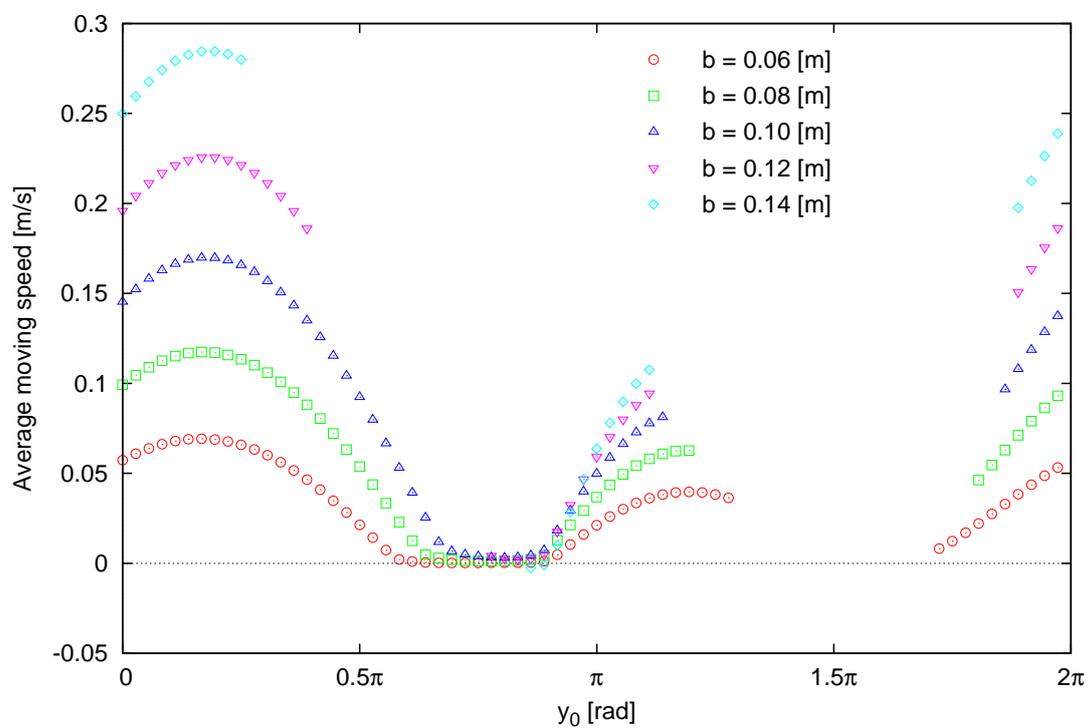


図 3.11: y_0 の変更における b および x の比較

第4章 劣駆動ロボットの实機開発及び改良

これまでに解析した結果の妥当性を検証するために実験を行う必要がある．そのため，設定した仕様を実現する実機の開発が必要となる．本章では，この実機開発について詳細を述べる．

4.1 試作機

図 4.1 に開発した試作機の概要を示す．同一の 2 枚の半円形状の本体フレーム（アルミ板）を 2 本のアルミパイプで平行に結合し（全幅は 260 [mm] となる），内部に振子（揺動質量）・モータ・ラックギア・平歯車を搭載する．揺動質量は片側の本体フレームの内側に接続されている（図 4.2 参照）．ウェイトを交換することで m_2 に相当する質量を調節することが可能である．モータの回転に従ってラックギアが横方向にスライドし，これに従って歯車が回転し，振子が左右に振られる，という機構を採用している（図 4.3 参照）．これにより，モータを一定速度で回転させるだけで，正弦波振動に近い揺動の運動を実現することが可能となる．ロボットの仕様は表 4.1 に示す．

開発したロボットを用い，レール上（図 4.4 参照）で実験を行った．この結果，運動開始直後レールの縁に接触し，想定以上の摩擦抵抗が発生したため，運動生成が困難となった．この原因は，ロボット重心の偏りのため，ロボットを水平方向に回転させる効果が発生しているものと推測できる．また，モータの固定が片側支持であることによる振動の発生や複雑な機構のために揺動質量の交換に工数を要するという問題も確認された．以上の理由から，これらの問題点を解消する試作機を設計する．

表 4.1: 試作機の仕様

m_1	1868	g
m_2	17.95	g
R	150	mm
a	60	mm
b	30	mm

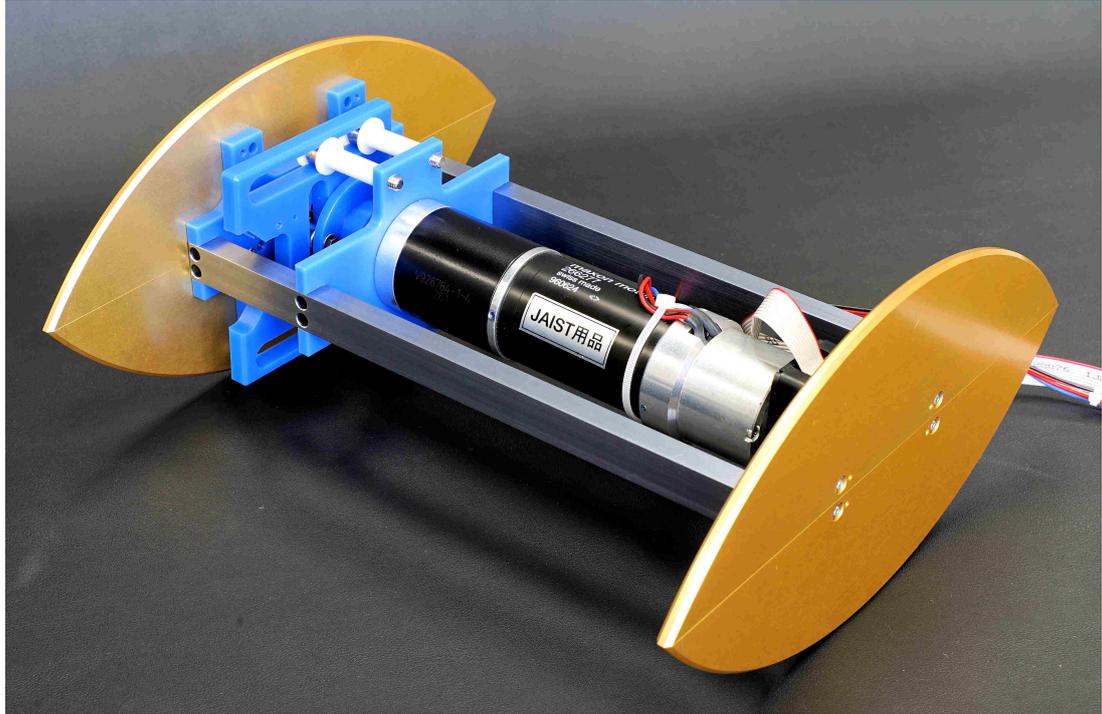


図 4.1: 実験機の外観

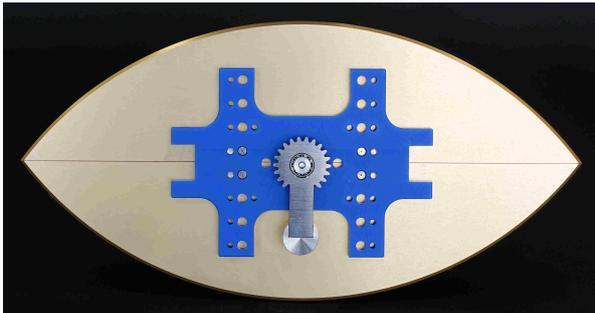


図 4.2: 揺動質量

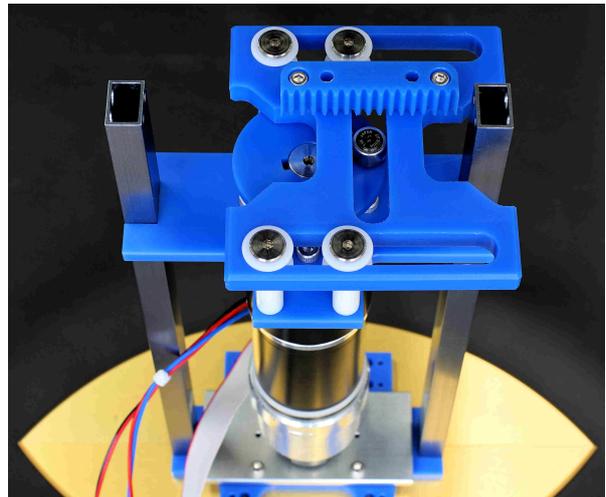


図 4.3: スライダクランク機構

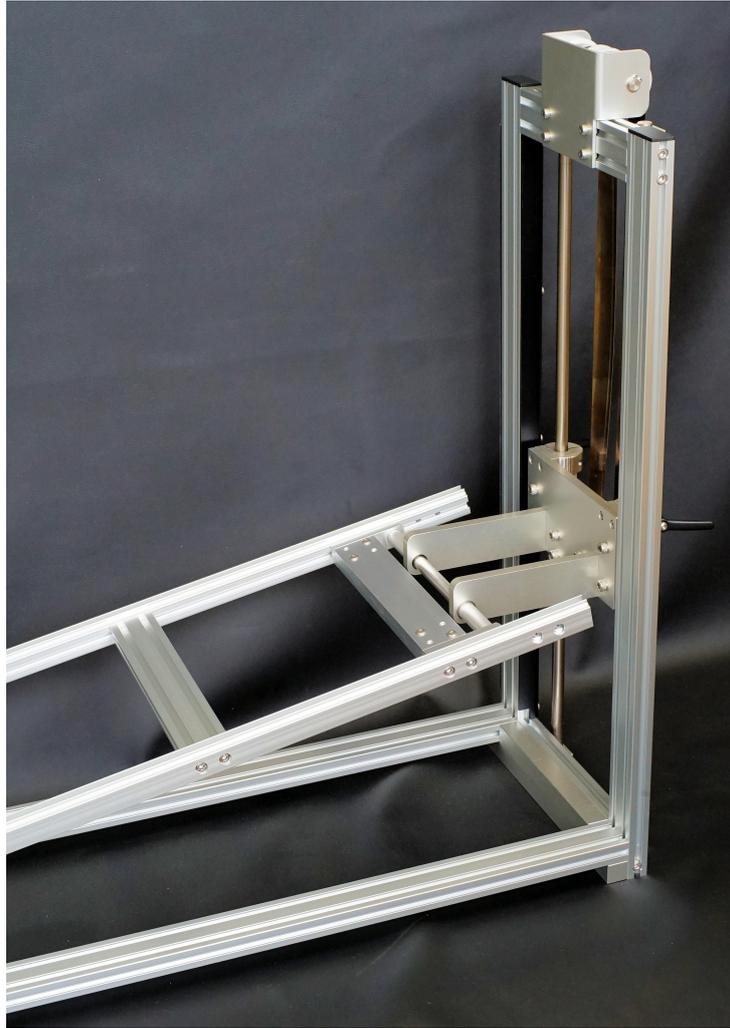


図 4.4: 実験用レール

4.2 試作機の改良

試作機の再設計に伴い，以下の仕様を考えた．

- 重心の位置の可変性付加
- 揺動質量の重さ・長さ変更簡易化
- モータの振動抑制
- 機構の整備性向上

加えて，重量の小さい揺動質量を使用した場合にもその効果を十分に得るために，使用するモータを小型化し，ロボットの軽量化を狙う．

設計したロボットの三次元図面を図 4.5，図 4.6 に示す．

初期の案は，図 4.5 のように，モータをフレームと平行に配置し，ロボットの進行方向を前としたときに左右対称となる機構を構成することで，その重心がロボットの中心になる配置とした．しかし，この構成は，モータから揺動質量までの動作の伝達には複数のギヤを使用することから，試作機よりもさらに機構が複雑となり，機構の交換に工数が必要となるため，整備性が低いと判断した．また，使用するレールの構造上，揺動質量の長さに制限がある．加えて，新たに機構を搭載するための拡張性も低いことから，この案を不採用とした．

これを踏まえ，最終案は図 4.6 に示す構成となった．滑動が可能なフレームを採用することで重心位置の調整が可能となり，揺動質量をフレームの外の両側に配置することで重量の偏りを防いでいる．また，揺動質量の重さ・長さの変更を容易にし，その長さの制限も試作機と比較して緩和された．この機構を実現するためにロボットの中心に軸を通し，その軸にフェアロックギヤを装着しラックギヤと接続している．ラックギヤは，ギヤの内側全体から軸に圧力を加えて取り付けることが可能なギヤで，軸との滑りを限りなく少なくする特徴がある．さらに，モータの進行方向と平行に移動していたラックギヤの移動方向を進行方向と垂直にしている．これは，ラックギヤの移動がロボット本体の回転を抑制する働きを防ぐためである．加えて，質量および長さ変更用部品も多くの種類製作した．

製作したロボットを図 4.7 に，主要な物理パラメータを表 4.2 に示す．フレームの全幅は試作機と同様に 260 [mm] であるが，揺動質量をロボットの外側に配置するため，揺動質量部分を含めたロボット本体の全幅は 280 [mm] となる．また， m_2 および b は任意に設定可能とし，試作機と比較して軽量化に成功した．

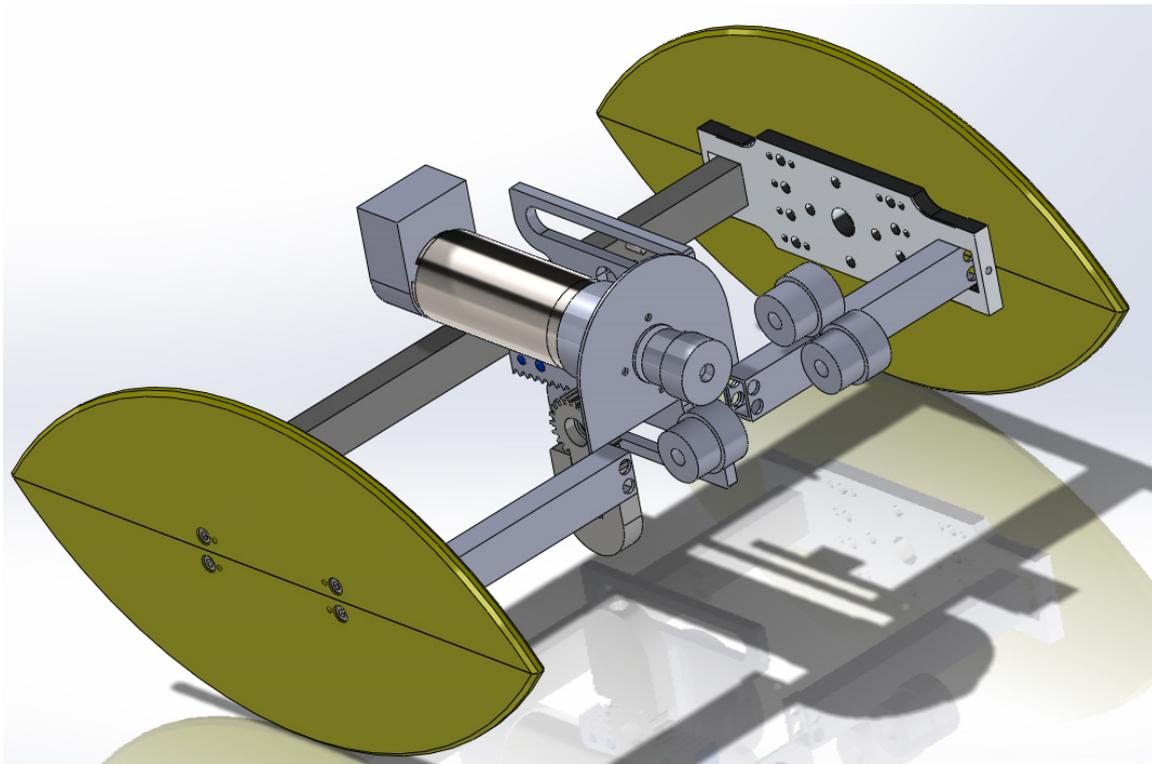


图 4.5: 改良案1

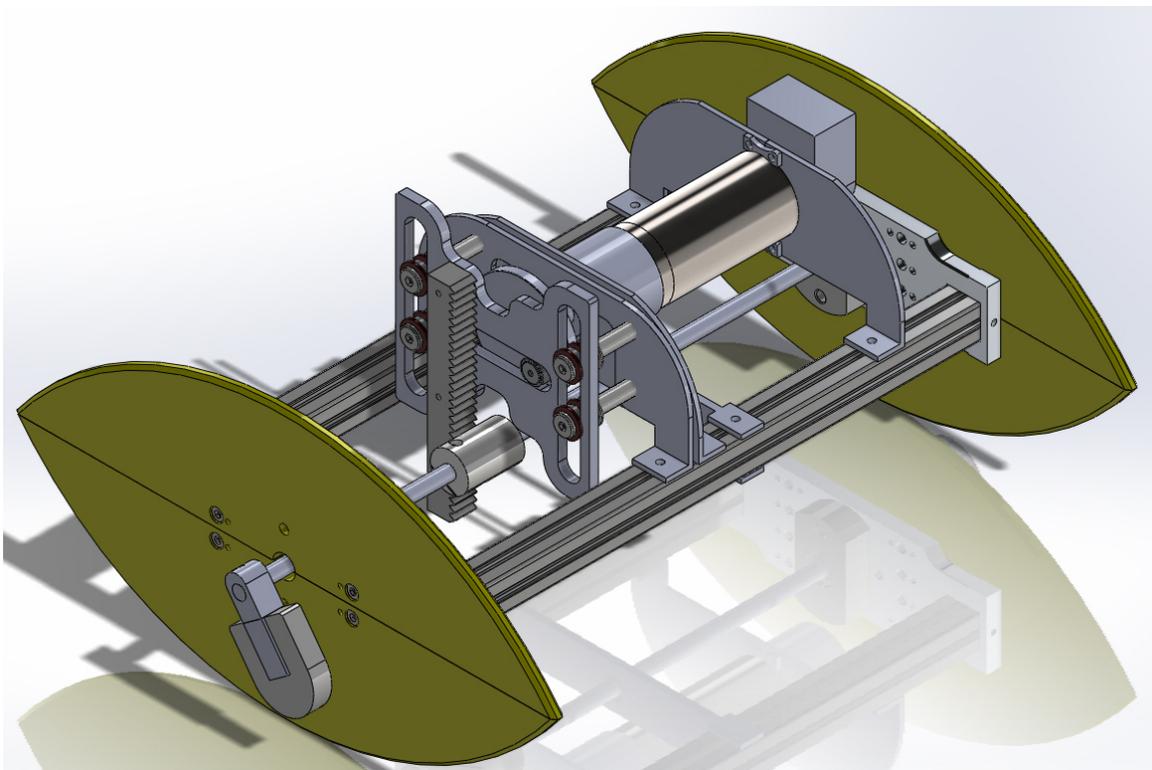


图 4.6: 最終版

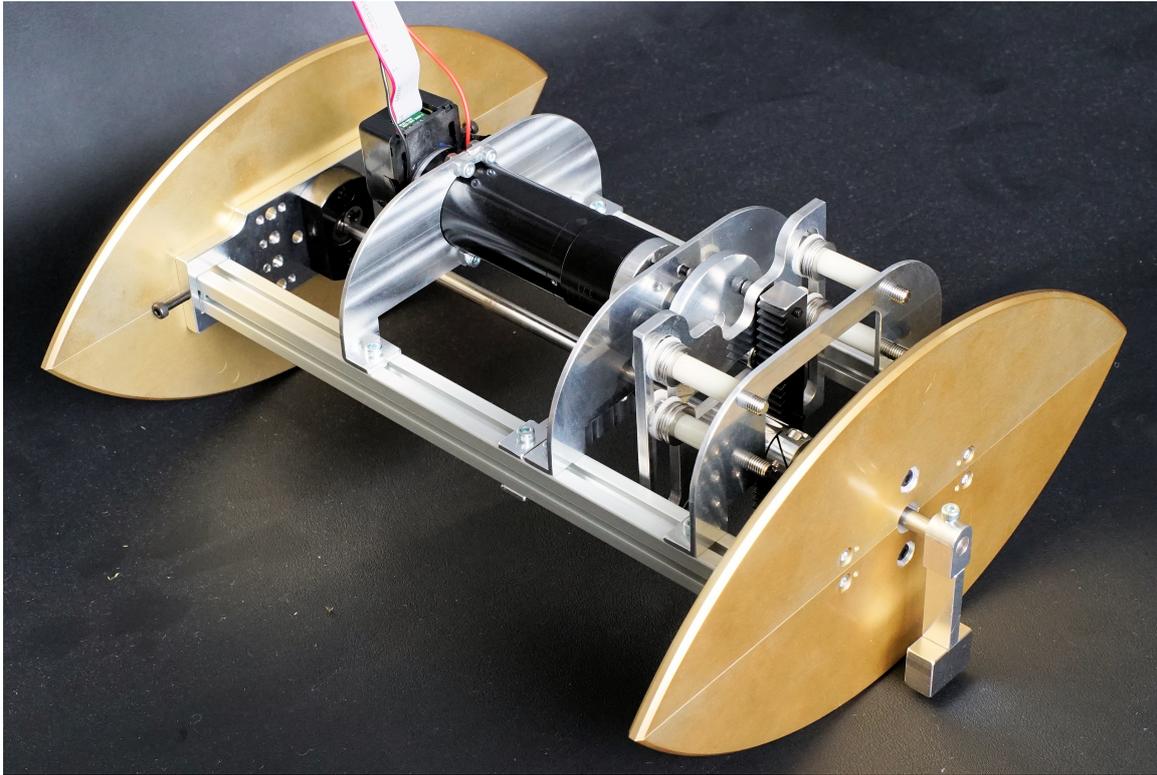


図 4.7: 改良した実機

表 4.2: 改良した実機の仕様

m_1	1740	g
R	150	mm
a	60	mm

実機を使用して動作確認を行ったが、機構の動作が不安定となる現象が確認できた。この現象は以下の三つの原因により発生したと推測できる。

- 低剛性な機構
- 死点での高負荷発生
- 低潤滑な機構

主に不安定な動作をしている箇所は、スライダクランク機構のスライダである。軽量化および単純な機構を目的とするため、片側支持による保持方法を採用したが、高負荷に対して変形しやすい（低剛性）という欠点がある。質量の揺動時、瞬間的に加速度が変化するため、これに伴い大きな力が発生する。さらに、スライダクランク機構には上死点・下死点（図 4.8, 4.9 参照）という最も大きな負荷がかかる地点が存在する。死点は、その機構の特異点であり、力を加えない限り機構が動作しない点のことをいう。開発した機構では、この点において最も大きな機構の変形が観察された（図 4.10 参照）。この現象を踏まえると原因は、開発した機構では死点において大きな力が必要であることに加えて、この点において質量の揺動の向きが変更されるため、加速度の変化による大きな力が発生したという推測ができる。また、変形が発生するため、ラックギアがフェアロックギアから離れて動作を伝達しない現象も確認された。他の原因として、機構を滑らかに動作させるための潤滑性が不足していることも挙げられる。

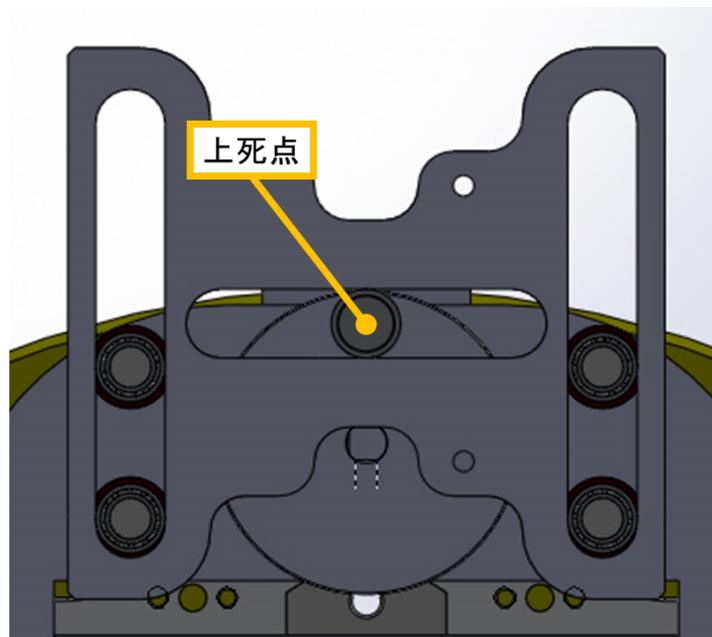


図 4.8: 上死点

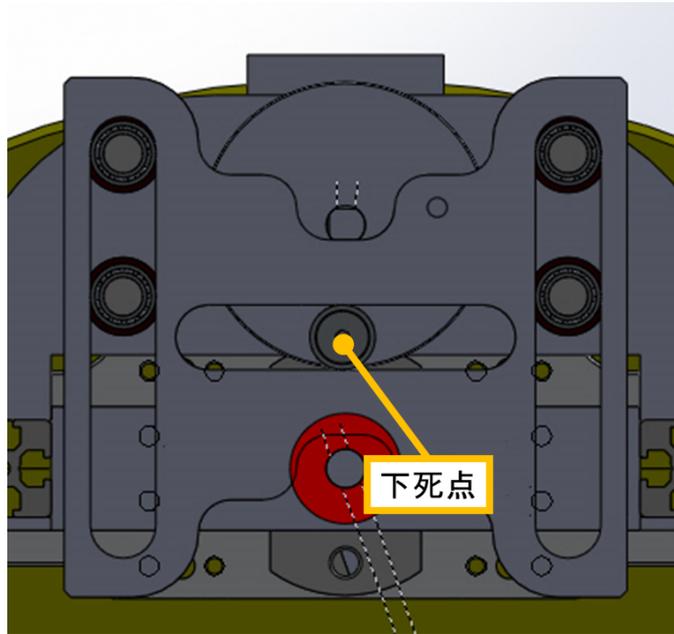


図 4.9: 下死点

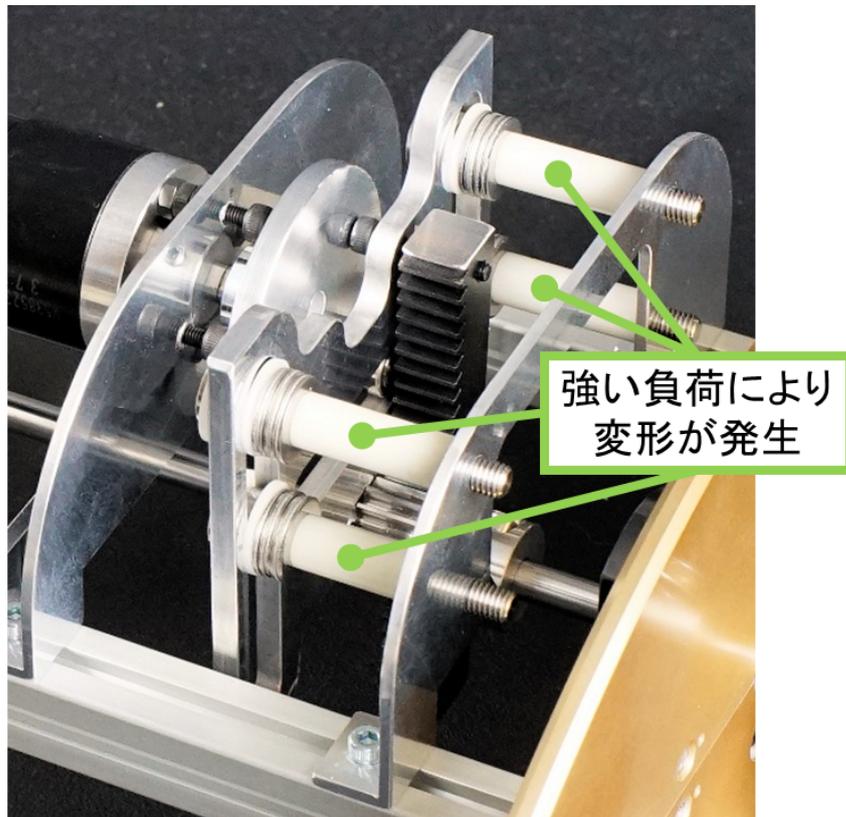


図 4.10: 機構の変形箇所

以上の考察から，変形の対策として以下の三つが挙げられる．

- 両端支持機構への変更
- ギア押さえの搭載
- 潤滑油の使用

まず，変形の最も大きな要因は機構の低い剛性であるため，これを改善する必要がある．このために，片側支持で構成された機構を両側で支持する機構に変更する．加えて，改良した機構で変形が生じた場合にもギア同士の伝達を維持するため，ラックギアを押さえる機構を搭載した（図 4.11 参照）．これらを踏まえて再度設計したものを図 4.12 に示し，製作した実機を図 4.13 に示す．

スライダクランク機構は，自己潤滑性のあるフッ素系樹脂で挟むことで，滑らかな往復運動を再現することを狙っている．加えて，ギアを押さえる機構に備えられたローラにもフッ素系樹脂を採用することによりギアの運動に作用する抵抗を小さくしている．また，モータとスライダクランク機構を接続するローラを取り付ける回転板（図 4.14 参照）に穴を複数開けた板（図 4.15～図 4.19 参照）を新たに装着した．この穴は，揺動角度を変更するためのものであり，ローラ的位置を変更すると 15 [deg] から 260 [deg] までの範囲を 5 [deg] 刻みでの角度変更が可能となる．

最終的に，表 4.3 に示すパラメータとなった．重量は改良前と比較し，僅かに増加したが安定した動作と多くのパラメータの変更が容易となり，改良は成功したといえる．

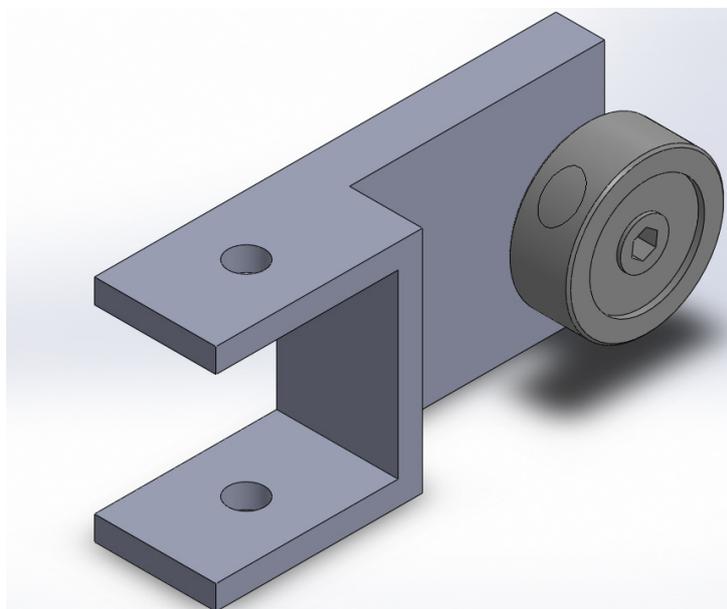


図 4.11: ギア押さえ

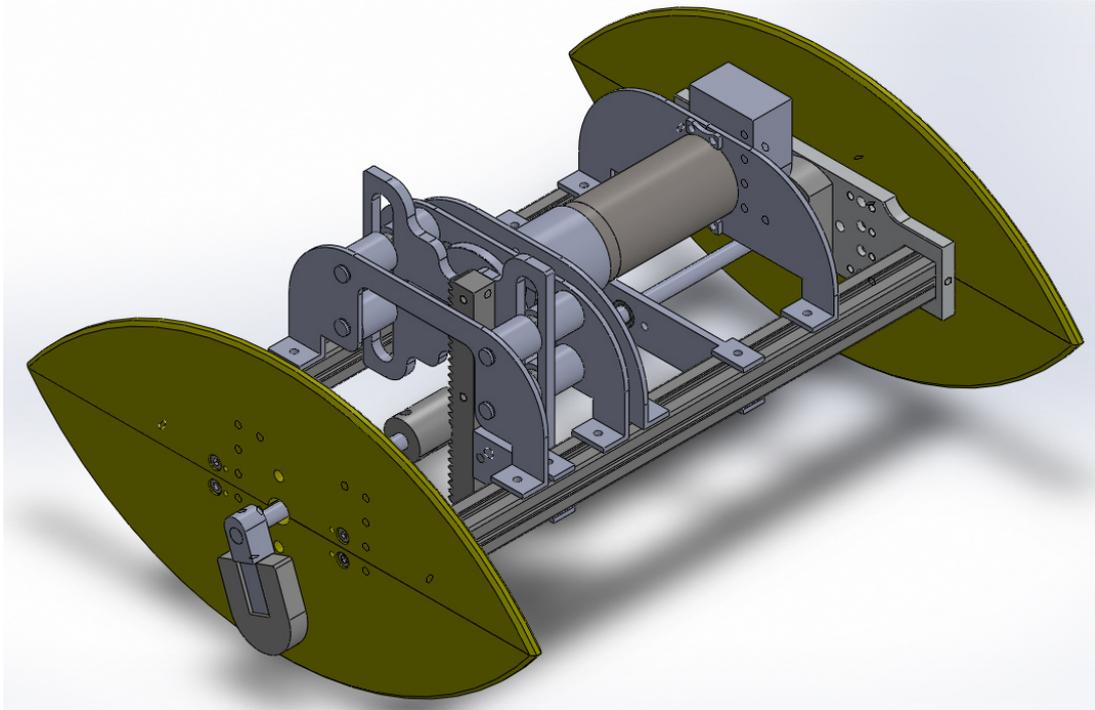


図 4.12: 両側支持のスライダクランク機構を持つロボットの3D 図面

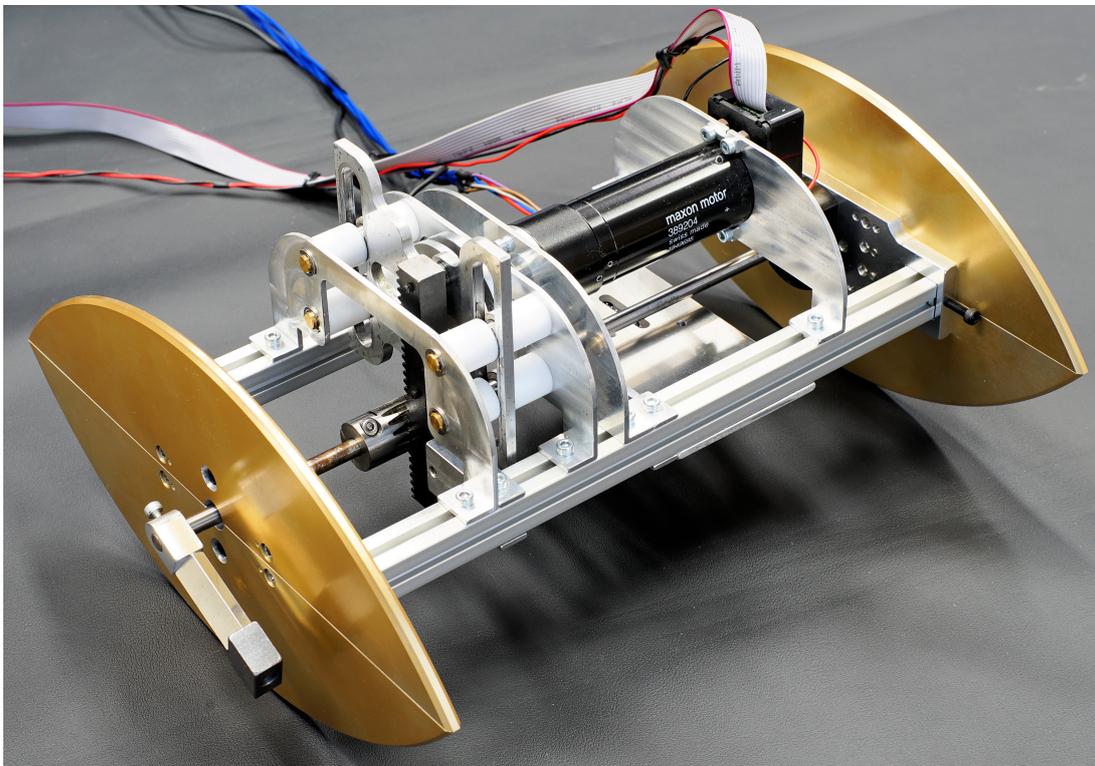


図 4.13: 両側支持のスライダクランク機構を持つ実機

表 4.3: 最終的な実機の仕様

m_1	1890	g
R	150	mm
a	60	mm

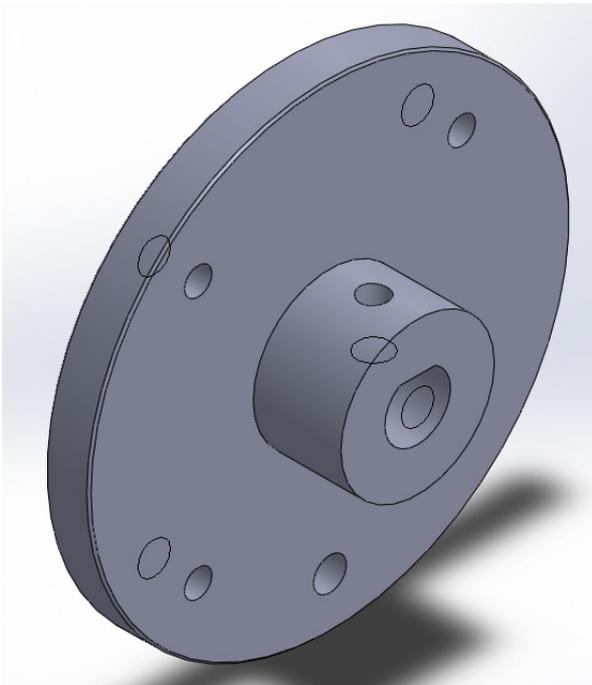


図 4.14: 回転板

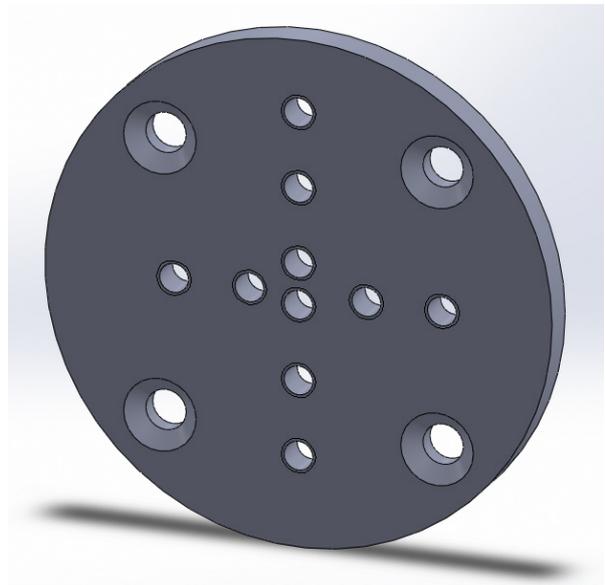


図 4.15: 揺動角度変更用板 1

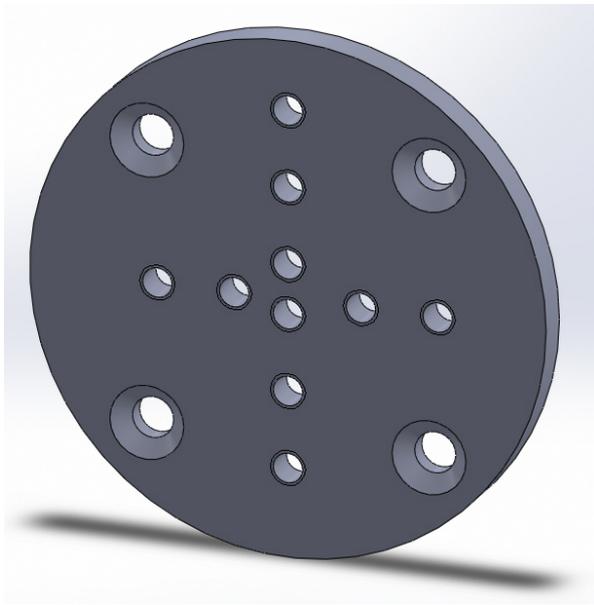


図 4.16: 揺動角度変更用板 2

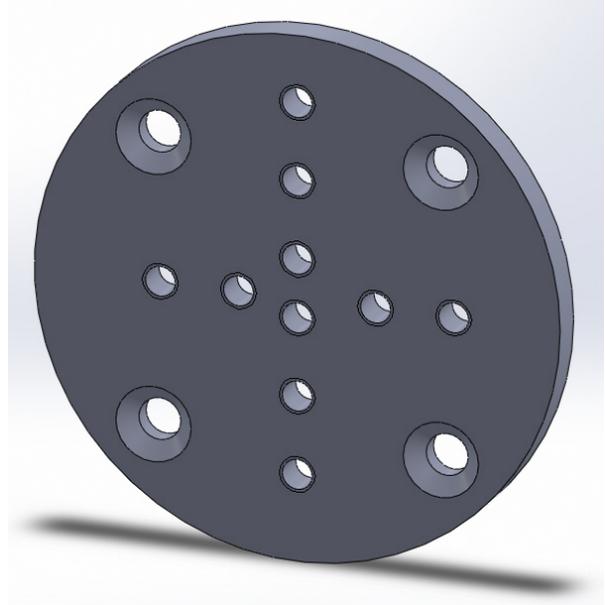


図 4.17: 揺動角度変更用板 3

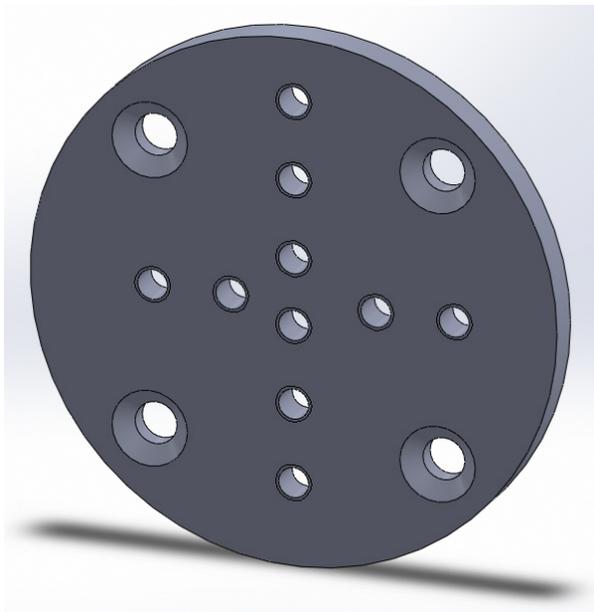


図 4.18: 揺動角度変更用板 4

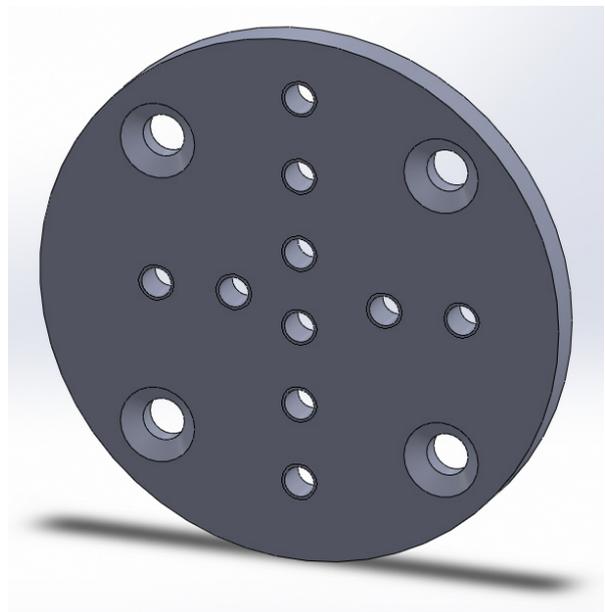


図 4.19: 揺動角度変更用板 5

第5章 実機を使用した実験的検証

本章では，第4章で製作したロボットを使用して解析結果の妥当性を検証するための実機実験について，その実験環境の構築を含めて詳細に述べる．

5.1 実験環境の構築

実験では，解析結果の妥当性を検証するため，シミュレーションの環境に限りなく近い，理想状態を実現する必要がある．その確認のため，ロボットを図4.4で示したレール上で動作させる実験を行った．その結果，スタート時からロボットが進まない現象や進行中に突然停止する現象が確認された．また，動作中にレールが振動し，ロボットの移動速度が大きく変化する現象もみられた．この条件下で実験を開始した場合，結果の再現性や妥当性を保証できない．従って原因を特定し，対策することが必要となる．

5.1.1 レールの改良

ロボットが進まない，もしくは進行を停止する際の状況を観察すると以下の問題が発生していた．

- ロボットがレールの縁に接触（図5.1参照）
- ロボットがレールの溝に嵌り込む（図5.2参照）

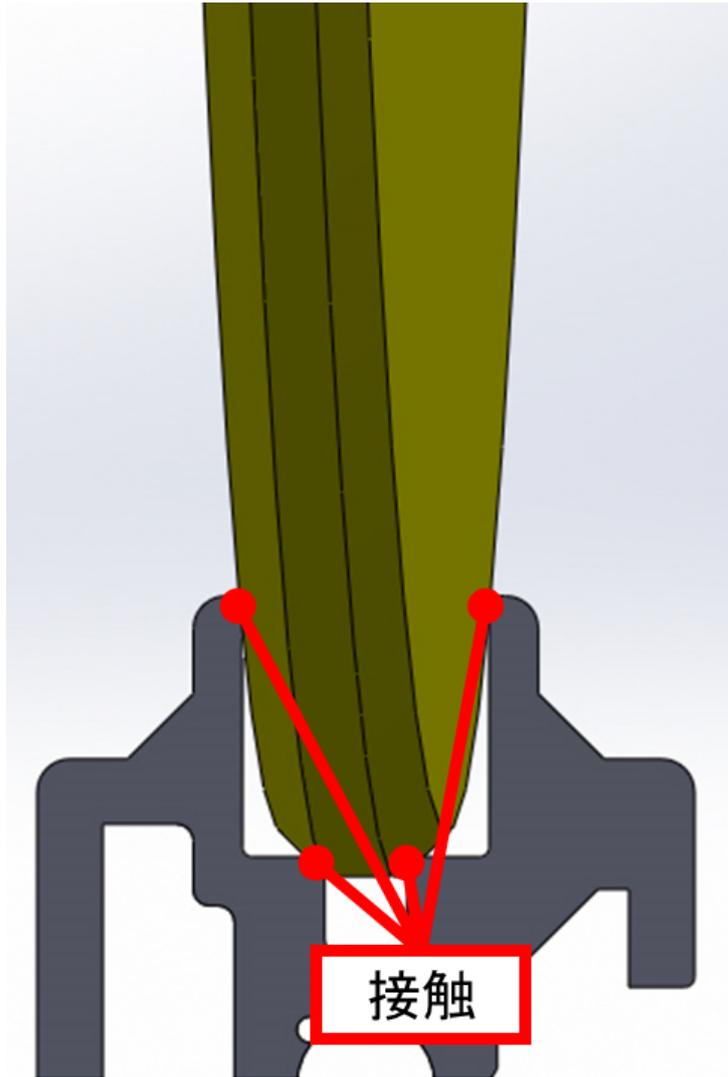


図 5.1: レール接触時のロボット

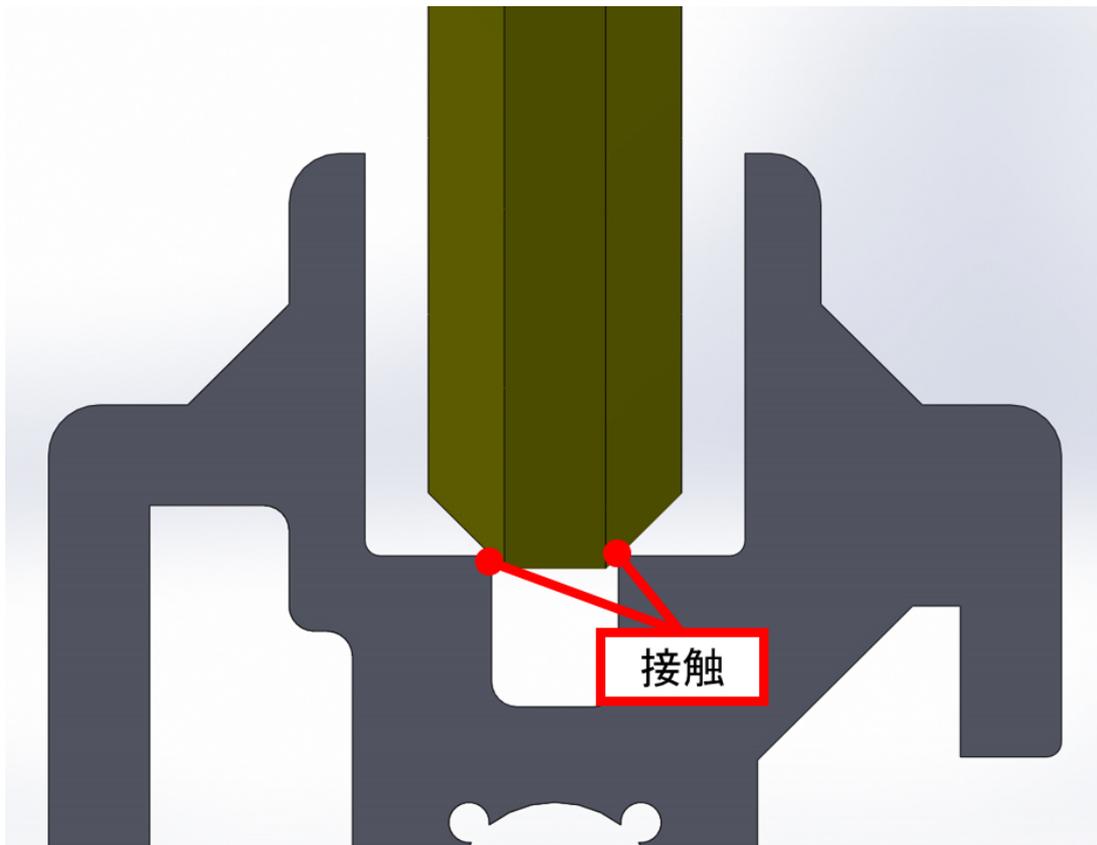


図 5.2: レール転落時のロボット

どちらの問題も想定以上の摩擦抵抗が発生したために起きたと推測する。まず、レール接触の問題についてはロボット改良前にも発生していた。改良後は、採用したフレームが滑動可能であるため、ロボットの重心位置を自在に調整することが可能である。これを踏まえ、調整を行い動作させたが、改善の余地がなかった。従って、この問題の原因はレールにあると推測した。考えられる問題として以下の点が挙げられる。

- 各レールの高低差
- 各レールの固有振動数
- 各レール表面の摩擦係数
- 実験環境の傾き

これらによってロボットの進行方向以外の方向に僅かな作用が起こり、レールへの接触や転落が起きたものと考えられる。以下より、これらの要因について考察する。

各レールの高低差

初めに、各レールの高低差について考察する。この高低差の原因は、様々な要因による誤差によって発生する。一つ目は、組み立て時に発生する誤差である。二つ目は、各部品そのものに存在する誤差である。三つ目は、温度による膨張で発生する誤差である。

組み立て時に発生する誤差について説明する。レールを組み立てる際、これに使用する各部品をねじ止めをする。しかし、この位置を目的の通り完全に一致させることは困難である。また、ねじ止めの強さも完全に同一にすることは困難となるため、その力の差によって固定位置が異なる。最終的にはそれらの誤差が積算されてしまう。

各部品そのものに存在する誤差は、同一の部品の場合でも必ず存在する誤差である。現在の加工技術では、その誤差を無くすことは不可能であるため、誤差のある状態で使用しなければならない。この誤差は多くの部品を組み合わせることによって積算されてしまう。

温度による膨張で発生する誤差は、各部品ごとに温度差が発生するとその膨張量にも差が発生し、その差が誤差となって現れる。

一つ目と二つ目の誤差は、全体を組み立てた後に角度計等の測定機器を用いて部品の位置を調整し、減少させることが可能である。三つ目の誤差は、厳密な温度管理を行うことで対策可能である。現在の実験環境では、厳密な温度管理は困難なため、部品の位置調整を行うことでレールの高低差を減らす。

各レールの固有振動数

次に、各レールの固有振動数について考察する。レールの振動が確認されたが、ロボットの揺動がレールの固有振動数と一致し共振したと考えられる。固有振動数は、物体の形

状や材質等から算出されるため、前述の誤差によりレール毎の固有振動数が僅かに異なったためにロボットの移動方向が変わったと推測できる。

この対策として、固有振動数を変える方法が挙げられる。固有振動数を変更することでロボットの揺動による振動を防ぎ、移動方向の差異を減らす。固有振動数は、形状等から決定されるため、フレームの追加や重りを搭載することで変更が可能である。

各レール表面の摩擦係数

次に、レール表面の摩擦係数について考察する。摩擦係数は、原則的に材料が全く同じならば等しくなる。しかし、摩擦係数が決定されるもう一つの要因として、表面状態がある。多くの文献に示されている摩擦係数の測定は、研磨工程後に洗浄した試料を使用する。レールに使用したフレームは、表面状態を均一化されたものではないため、その摩擦係数も同一ではなく、僅かな差異があると推測できる。レールを研磨し、表面状態を限りなく均一にすることでこの差異を減少させることが可能である。

実験環境の傾き

最後に実験環境の傾きについて考察する。レール全体の誤差が完全な零だとしても、それを置く地面が傾いている場合には正しい実験結果は得られない。この対策として、板を引き、水平器を使用して完全に水平な環境を構築する方法や水平台を使用する方法が挙げられる。

以上の考察を踏まえ、最終的に以下の対策を採る。

- 角度計を用いたレールの位置・高さ調整
- 補助フレームを使用し、レールの固有振動数変更
- レール内部に研磨した角棒を設置（図 5.3 参照）

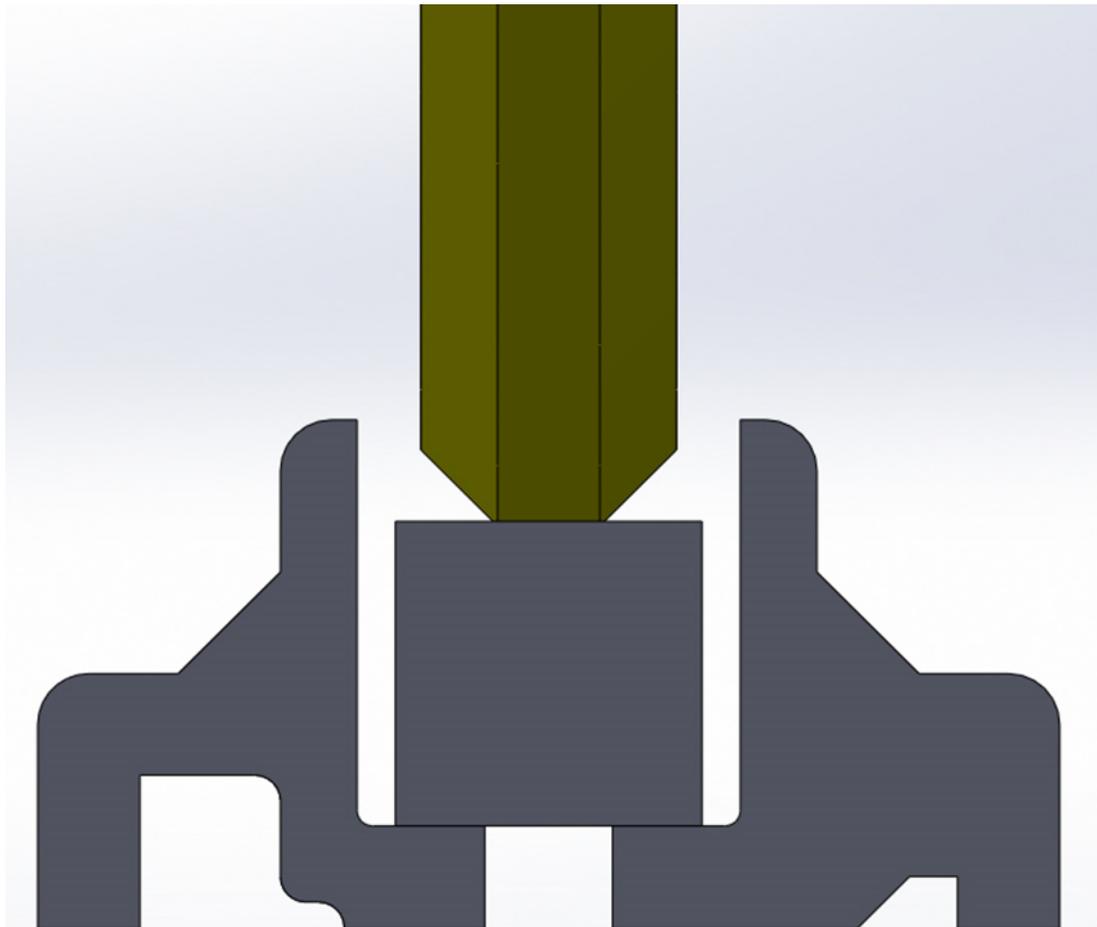


図 5.3: 角棒を設置したレール

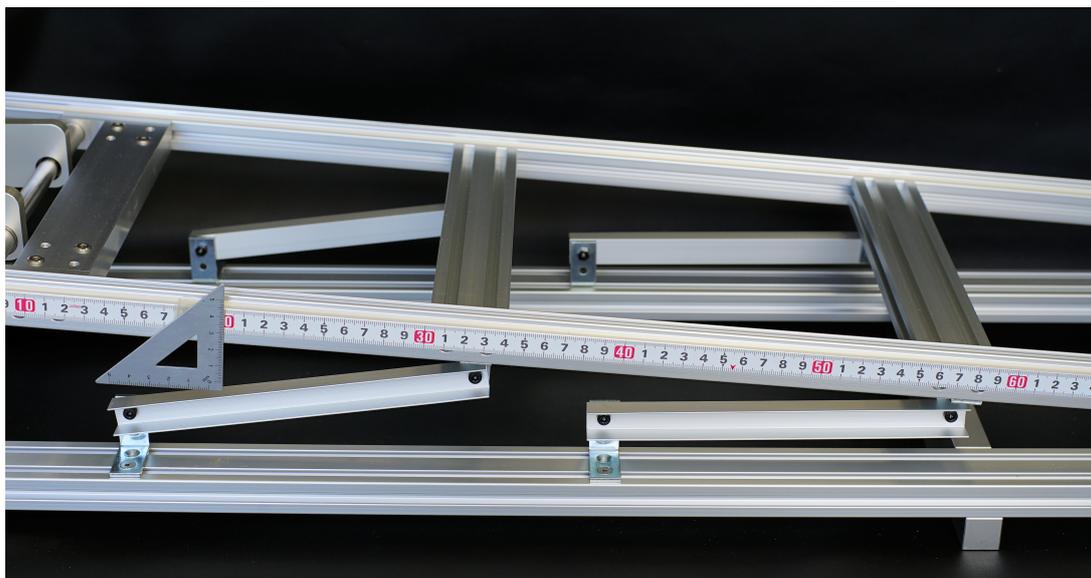


図 5.4: 実際の実験環境

対策を施した実験環境は、図 5.4 に示すものとなった。また、レールには目盛を追加し、移動距離の測定を容易にした。この結果、ロボットが進まない現象や進行を停止する現象を無くすことに成功した。

5.1.2 データ取得システムの構築

ロボットの運動をより詳細に分析するため、加速度・角速度を取得するデータ取得システムを構築した。加速度センサ CXL10HF3 およびジャイロセンサ MPU-6050 を用い、それぞれのデータ取得をオシロスコープ (SDS6062) および Arduino UNO を使用した。このシステムの特長として、0.5 [ms] 毎にデータ取得を行い、それぞれのセンサ情報の同期が可能となっている。各センサは、ロボットの下部に搭載している。

5.2 ロボットの固有振動数の導出

開発したロボットは、揺動質量を高周波振動させ運動を発生する仕組みのために共振が発生する可能性がある。共振が発生した場合には、その効果を利用して大きな揺動を得る可能性があるが、反対に、本来想定しない動作や破壊を引き起こす可能性も存在する。従って、使用するロボットの固有振動数を導出しておくことは重要となる。

5.2.1 機械的な固有振動数の導出

まず、動作や破壊の要因となる機械的な固有振動数を導出する。機械的な固有振動数とは、そのロボットに使用した部品一つ一つに存在し、その構造や材質によって決定される。今回は、ロボットの構造の大部分を支配する各フレームについて計算を行う。使用するフレームは、楕円形フレーム、アルミフレーム、A7075P フレームとする（図 5.5 参照）。ただし、共振による影響の少ないねじなどの小さな部品は無視する。仮定として、各フレームは全て長方形の固定両端はりとして計算する。また、発生する振動として曲げ振動および縦振動が予測できるのでこれについて計算する。

曲げ振動の式は以下の通りとなる [7]。

$$f_n = \frac{n^2\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \left[\frac{1}{s} = \text{Hz} \right] \quad (5.1)$$

縦振動は以下の通りとなる [7]。

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[\frac{1}{s} = \text{Hz} \right] \quad (5.2)$$

ただし、 n は振動モード（ $n = 1$ で半周期の波）、 l [m] は材料の長さ、 ρ [kg/m³] は材料の密度、 S [m²] は断面積、 E [N/m²=Pa] は縦弾性係数、 I [m⁴] は断面二次モーメントとする。

結果は、表 5.1 に示す数値となる。この結果から、最低でも 130 [Hz] 以上の振動数が必要なことから、ロボットの仕様上実現困難な振動数となった。従って、ロボットの振動による想定しない動作や破壊が発生しないことがわかる。

5.2.2 ロボットの固有角振動数の導出

データ取得システムを用いて、ロボットの固有角振動数を導出する。固有角振動数は、ロボット本体の回転に作用する振動数である。共振が発生すると大きな回転を得る可能性がある反面、不安定な回転が発生する可能性もある。

計測方法は、以下の手順で行う。

(P1) アルミニウム製の床にロボットを設置する。

表 5.1: 各フレームの固有振動数

	曲げ振動 [Hz]	縦振動 [Hz]
楕円形フレーム	$14628.15n^2$	$20162.30n$
アルミフレーム	$557.63n^2$	$9789.87n$
A7075P フレーム	$138.97n^2$	$20191.26n$

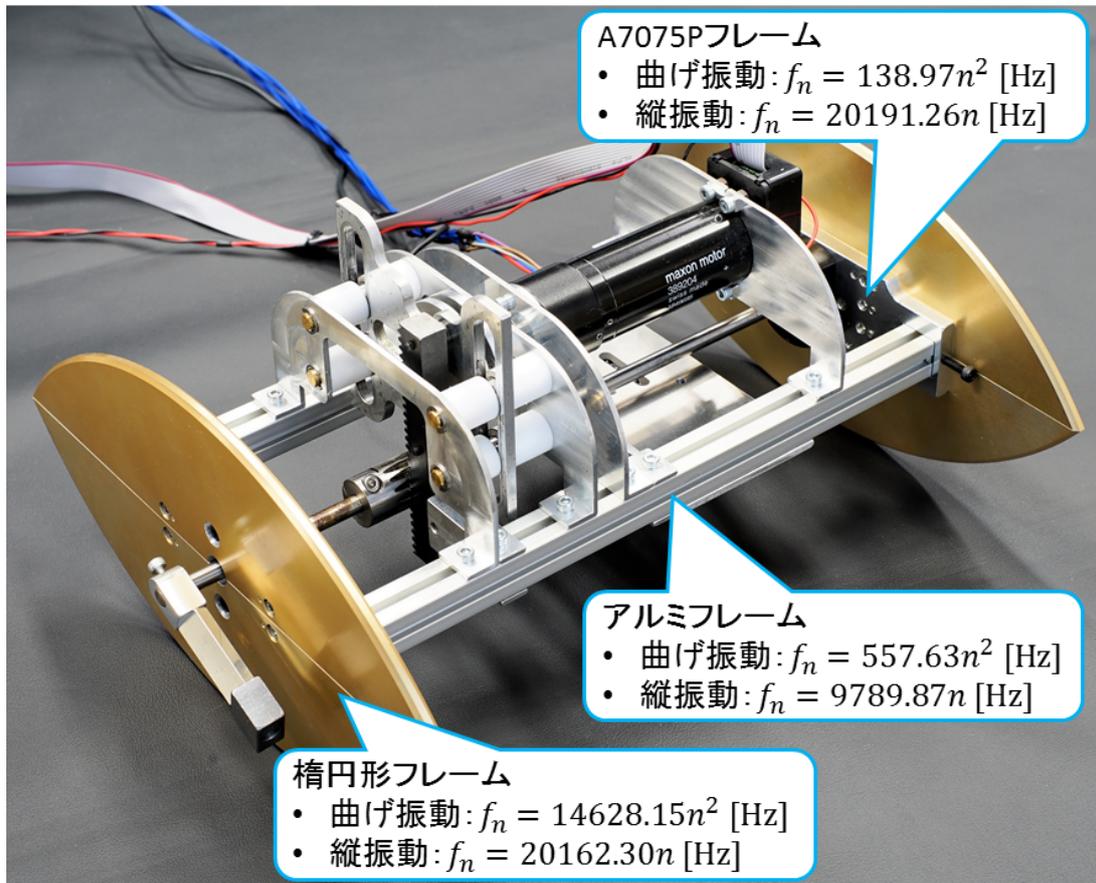


図 5.5: 各フレームの固有振動数

(P2) 任意の角度まで手で持ち上げる .

(P3) 計測開始と同時に手を離す .

(P4) ロボットの動作が停止するまで計測し続ける .

計測結果として、計測開始から 1.5 [s] 間のデータを図 5.6 に示す . ロボットの回転時間は、約 35 [s] だった .

この結果を元に固有振動数を導出する . 固有振動数 ω_n は、以下に示す式となる [7] .

$$\omega_n = \frac{\Lambda}{\xi t} \text{ [rad/s]} \quad (5.3)$$

ただし、

$$\Lambda = \log \frac{u_1}{u_2}, \quad \xi = \sqrt{\frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 + 4\pi^2}}$$

であり、 u_1 [rad] は 1 周期目の振幅、 u_2 [rad] は 2 周期目の振幅、 t [s] は波長である . 計算の結果、 $\omega_n = 9.68$ [rad/s] となった . この結果より、9.68 [rad/s] で揺動させた場合に共振が発生し、ロボットの動作に何らかの影響を与えることが確認できた .

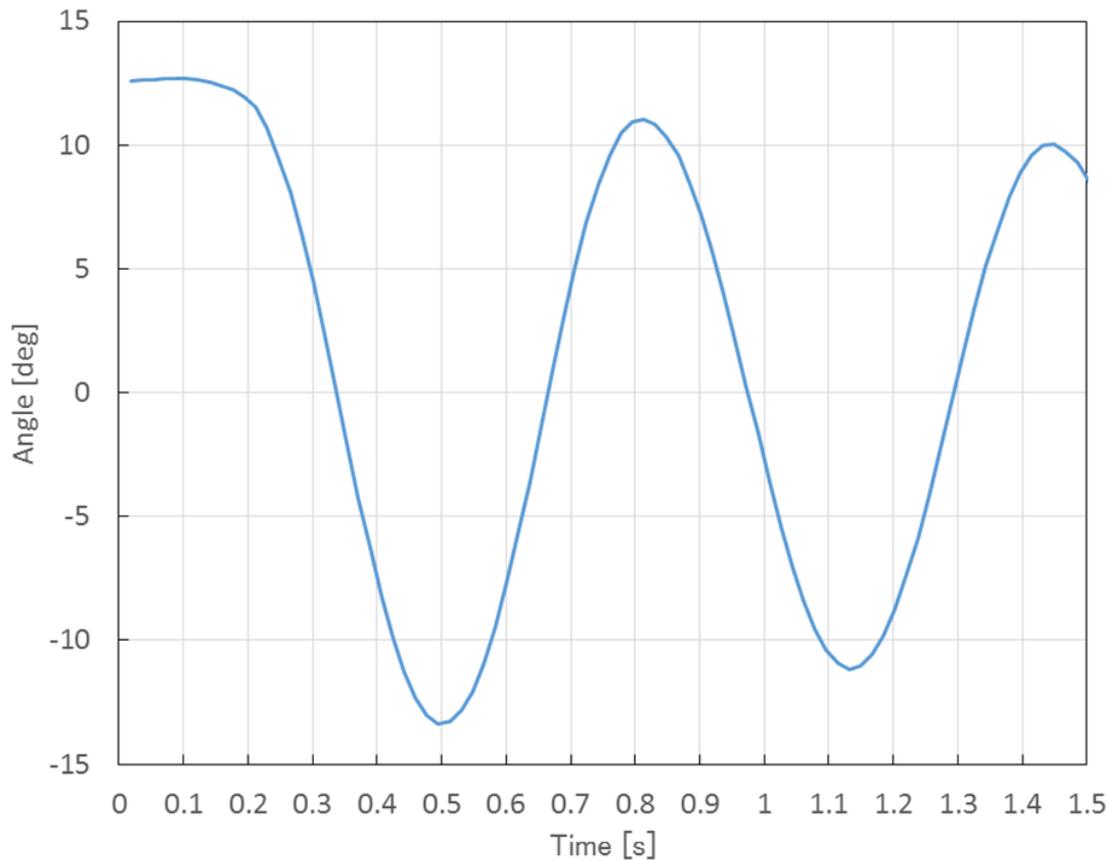


図 5.6: 各フレームの固有振動数

5.3 実機実験

これまでに行ってきた解析結果の妥当性を検証するため，実機実験を行う．実機実験の手順は以下に示す通りである．

- (P1) 揺動質量を揺動の中心角度 y_0 の通りに設定する．
- (P2) ロボットを初期位置に合わせ，設置する．
- (P3) モータを駆動させ，ロボットの動作を開始する．
- (P4) 100 [s] 経過したら動作を停止する．
- (P5) 移動距離を測定する．
- (P6) 実験終了まで (P1) から (P5) を繰り返す．

なお，実験は 0 [deg] から開始し，330 [deg] まで 30 [deg] の間隔で測定する．各パラメータについてそれぞれ 3 回ずつ行う．揺動質量は，45 [g]，60 [g] の 2 種類を使用し，中心か

ら揺動質量までの長さを 45 [mm]、床面の角度を 5 [deg] に設定した。また、15 [deg] の範囲を 13.5 [Hz] で揺動するよう設定した。

実験の結果を基に移動速度を導出したものを図 5.7、図 5.8 に示す。この結果より、揺動質量が大きい方が移動速度が大きくなることが確認された。また、 0.25π [rad] 付近において図 3.6 や図 3.11 のようなピークが出ていることがわかる。しかし、 1.25π [rad] 付近でのピークは確認できなかった。さらに、加速度、角加速度の取得データを確認したが、有意な差がないことが確認された。ピークが出ない原因は、揺動質量の揺動効果の違いによるものだと考えられる。質量を揺動させると、 X 軸方向および Z 軸方向へ加速度が発生し、移動速度や床反力に影響を与える。そして、揺動の中心角度 y_0 を変更することで、それぞれの軸に発生する加速度が変化する。加速度の発生によって、力が発生するため、その大きさによりロボットを移動させる効果が発生する。例えば、 $y_0 = 0, \pi$ の場合、 X 軸方向に発生する加速度が最大となるが、 Z 軸方向への加速度は最小となる。従って、 X 軸方向へは最大の力が発生するものの、 Z 軸方向への力は微小であるため、床反力を減少させる効果は発生しない。そのため、この角度に設定した場合には移動距離が小さいと考えられる。また、 $y_0 = 0.5\pi, 1.5\pi$ の場合は、 Z 軸方向に対して加速度は最大となるが、 X 軸方向の加速度は最小となる。この関係によって、移動距離は小さくなると考えられる。

他の原因として、機構の床反力への作用があると考えられる。床反力は、ロボットの Z 軸方向に加わる力であるが、その大小によってロボットが X 軸方向への移動に必要な力が変化する。床反力が小さいほど摩擦抵抗は小さくなり、移動に必要な力が減少する。ロボットには、スライダクランク機構が存在し、このスライダの動作が床反力に大きく作用すると考えられる。スライダクランク機構は、その仕様により Z 軸方向に直線運動することから揺動質量に影響を与えることがわかる。 0.25π 付近では、ロボットの移動発生時に床反力を下げる効果が発生し、 1.25π 付近では床反力を上げる効果が発生している可能性がある。今後、この確認のために床反力を測定する必要がある。さらに、この測定結果を踏まえて、実験機に対応するシミュレーションを構築するためには、新たに床反力を変化させる項を運動方程式に導入する必要があると考えられる。

これらの考察を踏まえて、再度解析や検証の必要があるが、シミュレーションと実機での結果に大きな隔たりがないことは確認できた。

今後は、床反力の測定の外、 b や ω を変更した場合の値など多くのパラメータを変更した場合の移動性能の変化について実験によって検証する必要がある。加えて、これらのパラメータを使用したシミュレーションを行い、これを比較する必要がある。

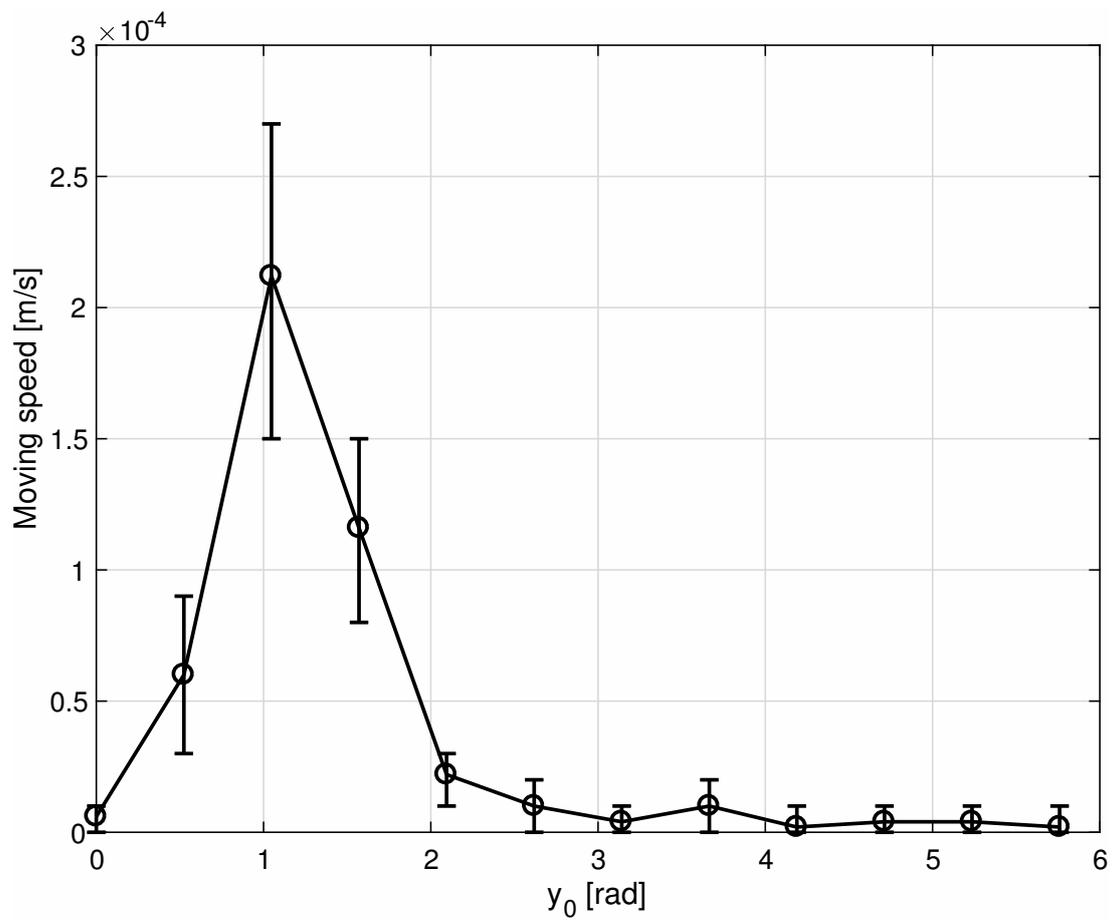


図 5.7: 45 [g] の実験結果

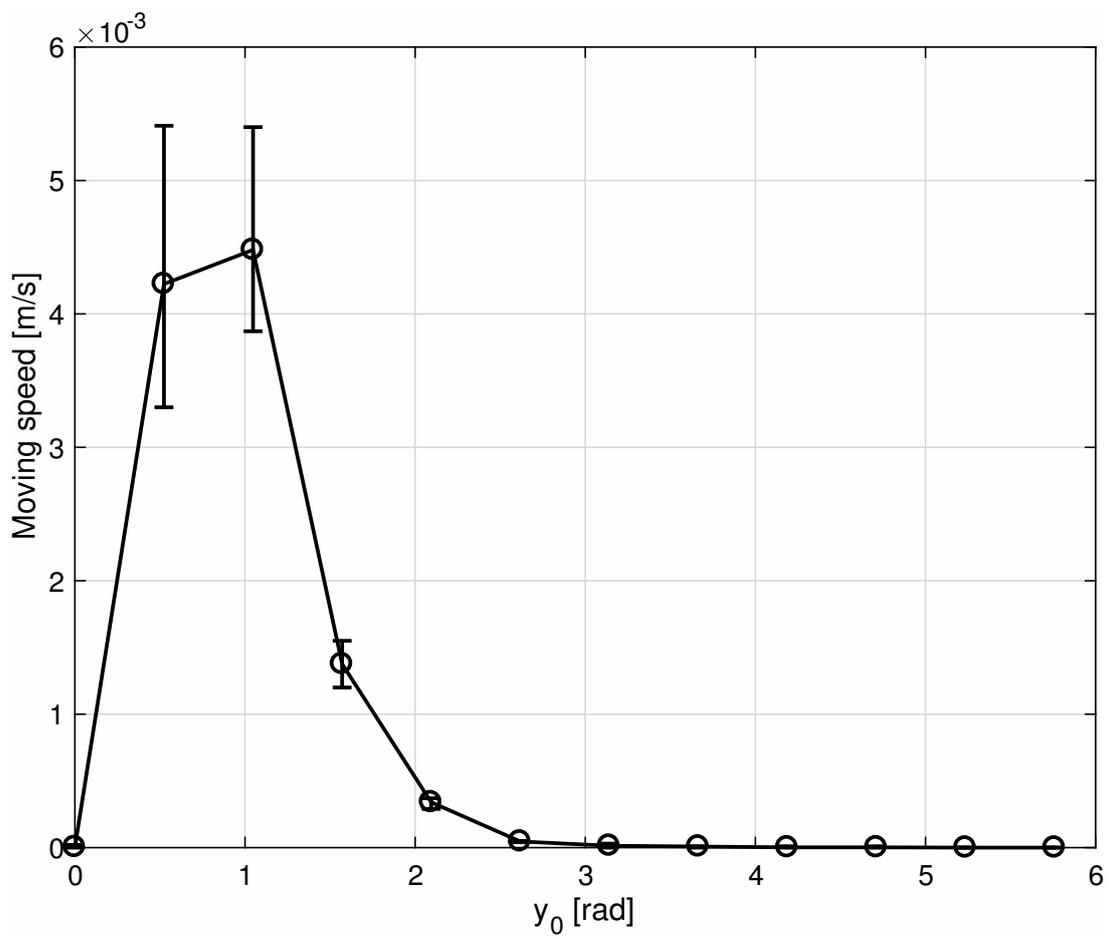


図 5.8: 60 [g] の実験結果

第6章 劣駆動ロボットの制御に関する考察

ここでは，これまでの研究から得た知見を基にロボットの制御について考察を行う．

6.1 移動速度を決定する要素

これまでに多くの解析や実験を行ってきたが，移動速度を確実に制御するための制御則を発見することができなかった．そこで，解析や実験の結果を基に移動速度を変化させる要因とそのパラメータについて考察する．

シミュレーションからは，全てロボットに加わるトルクの変化がその運動の性能に影響を与えることがわかる．実験においても質量が増加すると移動距離が大きくなるため，トルクに依存する傾向があると推測できる．また，揺動の中心位置の違いによってもその移動性能が変化することがシミュレーションおよび実験から確認することができた．従って，ロボットの移動速度を変化させるためには，トルクに関わるパラメータの変更および揺動の中心角度の変更が必要であるといえる．具体的には， b ， m_2 ， ω を自在に変更することができるロボットのモデル作成と制御則の開発が必要となる．

もう一つの要因として，床反力が挙げられる．実機実験の結果より，床反力の変動によって移動速度が変化することが示唆された．これを踏まえて，床反力を制御する機構をロボットに搭載することでより移動速度を高める可能性がある．これについては，解析によりさらに知見を得る必要がある．この知見を応用することで，さらに効果的な制御則の開発が期待できる．

このようなパラメータの変更が目的に応じて自在に行えるようになれば，将来的には新たな移動機構を持つロボットや氷面上で自在に移動するロボット，滑りを抑制するような歩行支援器の開発ができる可能性がある．

第7章 結論

7.1 結論

本論文では、解析や実機実験を通して劣駆動ロボットの運動特性を明らかにしてきた。これによって、劣駆動ロボットの移動速度の制御について、いくつかのパラメータを変化により実現の可能性があることが考察された。

以下にこれまでに行った成果や明らかになった知見を示す。

- 劣駆動ロボットについてその仕様を決定し、数学モデルを導出した。
- ロボットの運動生成シミュレーションを行い、各パラメータ変更における運動との支配的關係を確認した。
- 劣駆動ロボットの仕様を満足する実機の開発を行った。
- 実機に発生した問題を明確にし、適切な改良を行うことでシミュレーションとほぼ同じ動作の生成が可能となり、各パラメータの変更も容易となった。
- 実験環境を整備し、シミュレーションにより近い環境での実験を可能にした。
- 実機について、その固有振動数および固有角振動数を明らかにし、共振による破壊の可能性が低いことを確認した。
- 実機実験を行い、シミュレーションと似た傾向が出ることを確認した。また、揺動質量の違いについても移動速度が変化することを確認した。
- 劣駆動ロボットの制御について考察し、いくつかのパラメータ変更によって移動速度の制御則開発に向けた方針を策定した。

7.2 今後の予定

今後は、実機実験と比較するためのパラメータ設定をしたシミュレーションを行い、その違いを確認する。また、本研究ではこのロボットの運動を滑り摩擦としてモデリングしているが、実際の環境では転がり摩擦 [8] の要素が含まれる可能性がある。そのため、これを転がり摩擦項としてモデリングに取り入れ、これまでの解析および実機実験の結果と

比較する必要がある．さらに，実機で発生する床反力の測定を行い，移動速度への影響を確認する．これらを踏まえ，他のパラメータについてもシミュレーションと実験の両面から解析を行い，その運動生成の仕組みについて解明する．これらの知見を踏まえて，移動速度を自在に操る制御則の開発やロボットの開発を行う予定である．

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導に加えて日々の生活に関してもサポートしていただいた浅野文彦先生に心より深謝致します．的確なご助言を頂いた立命館大学の徳田功先生，広島大学の原田祐志先生，研究内容について貴重な意見を頂いた飯田弘之先生，平石邦彦先生に心より感謝致します．研究や生活において様々な意見・助言を頂いた浅野研究室の学生には，心より感謝致します．特にロボットの開発やシミュレーション等に対して専門的な観点から助けていただいた西原正継氏には本当に感謝しています．また，これまで支えてくれた家族にも本当に感謝しています．

参考文献

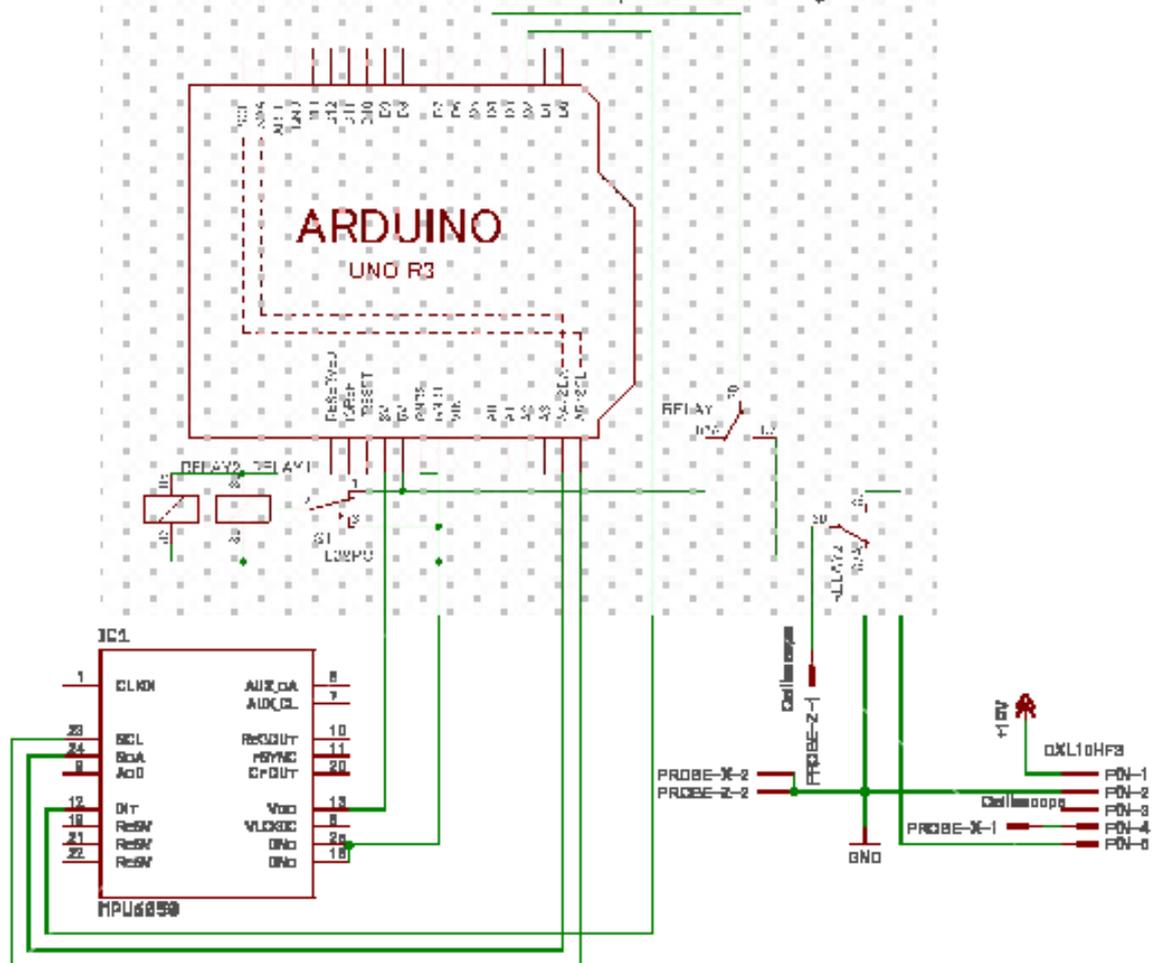
- [1] F. Asano, Y. Kikuchi and M. Shibata, “Modeling, control and analysis of limit cycle walking on slippery road surface,” *Int. J of Dynamics and Control*, Vol. 2, Iss. 4, pp. 463-473, 2014.
- [2] 坂利昭, “支持脚接地点の滑り運動を考慮したコンパス型2脚ロボットの3自由度受動歩行”, 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科, 修士論文, 2012.
- [3] K. Miura et al. “Slip-turn for biped robots,” *Proc. of the IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 29, No. 4. pp. 875-887, 2013.
- [4] T. Senoo, T. Mitsuhiro and I. Masatoshi. “Dynamic horizontal movement of a bipedal robot using frictional asymmetry,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1834-1839, 2012.
- [5] G. N. Boone and J. K. Hodgins, “Reflexive responses to slipping in bipedal running robots,” *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 158-164, 1995.
- [6] F. Asano and I. Tokuda, “Indirectly controlled limit cycle walking of combined rimless wheel based on entrainment to active wobbling motion,” *Multibody System Dynamics*, Vol. 34, Iss. 2, pp. 191–210, 2015.
- [7] 松村ら, “振動工学入門(改訂版)”, 株式会社パワー社, 2008, pp. 39-40, pp. 105-112, pp. 117-124.
- [8] 橋本巨, “基礎から学ぶトライボロジー”, 森北出版株式会社, 2006.

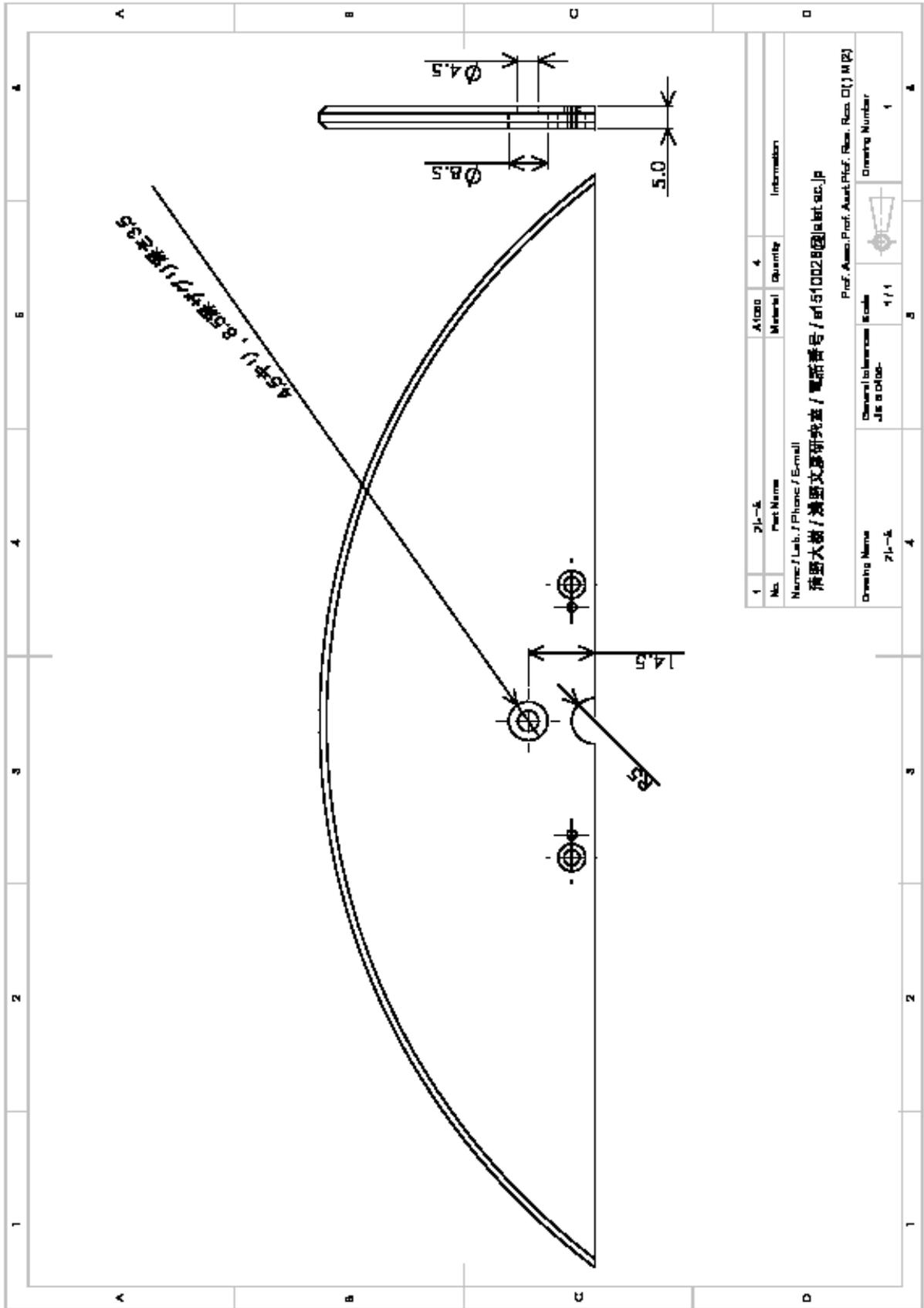
付録

データ取得システムと実機の図面

付録として、実験で使用したデータ取得システムと実機の部品製作で使用した図面を添付する。

Data acquisition system



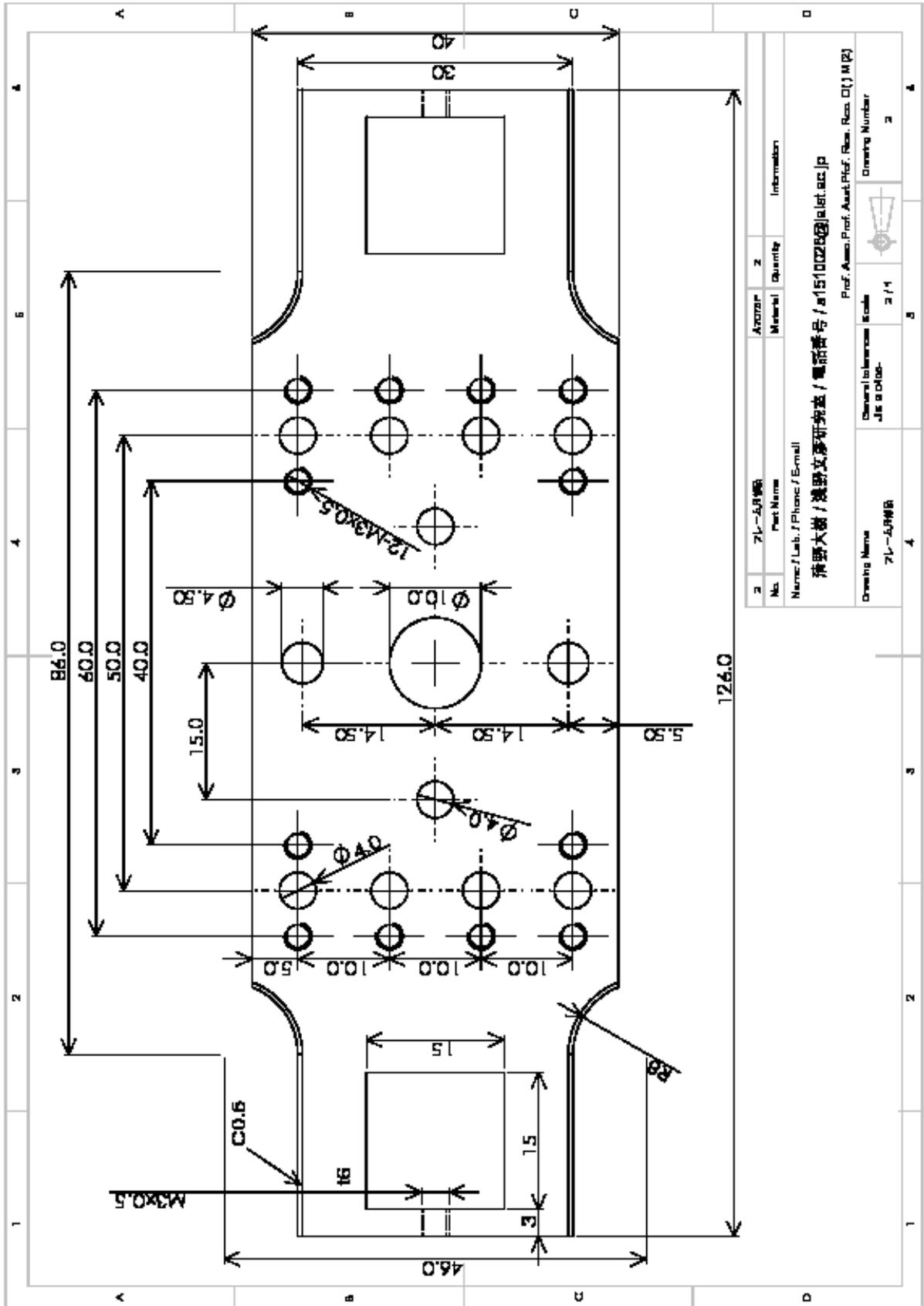


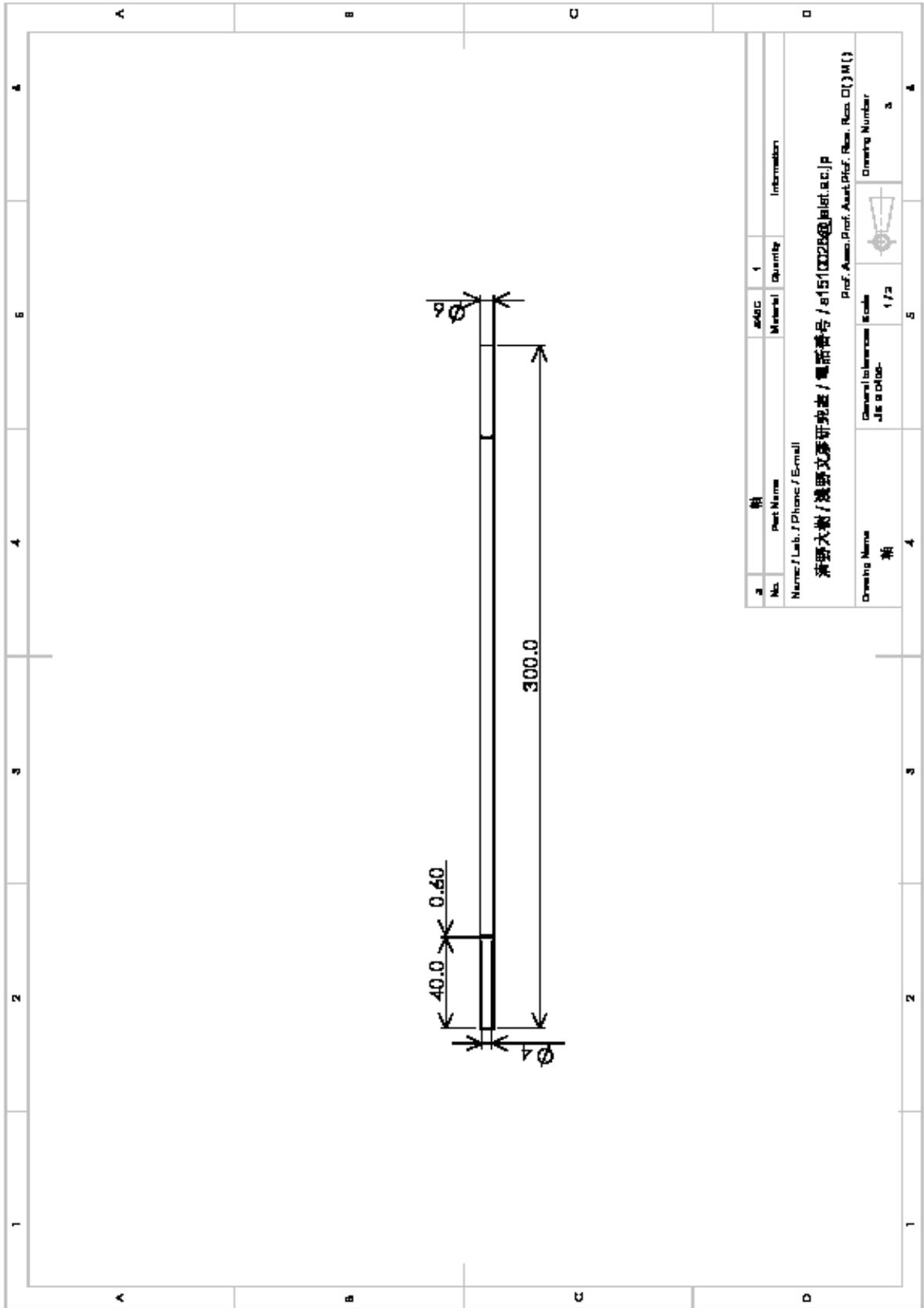
No.	Part Name	Material	Quantity	Information
1	21-4	A1020	4	

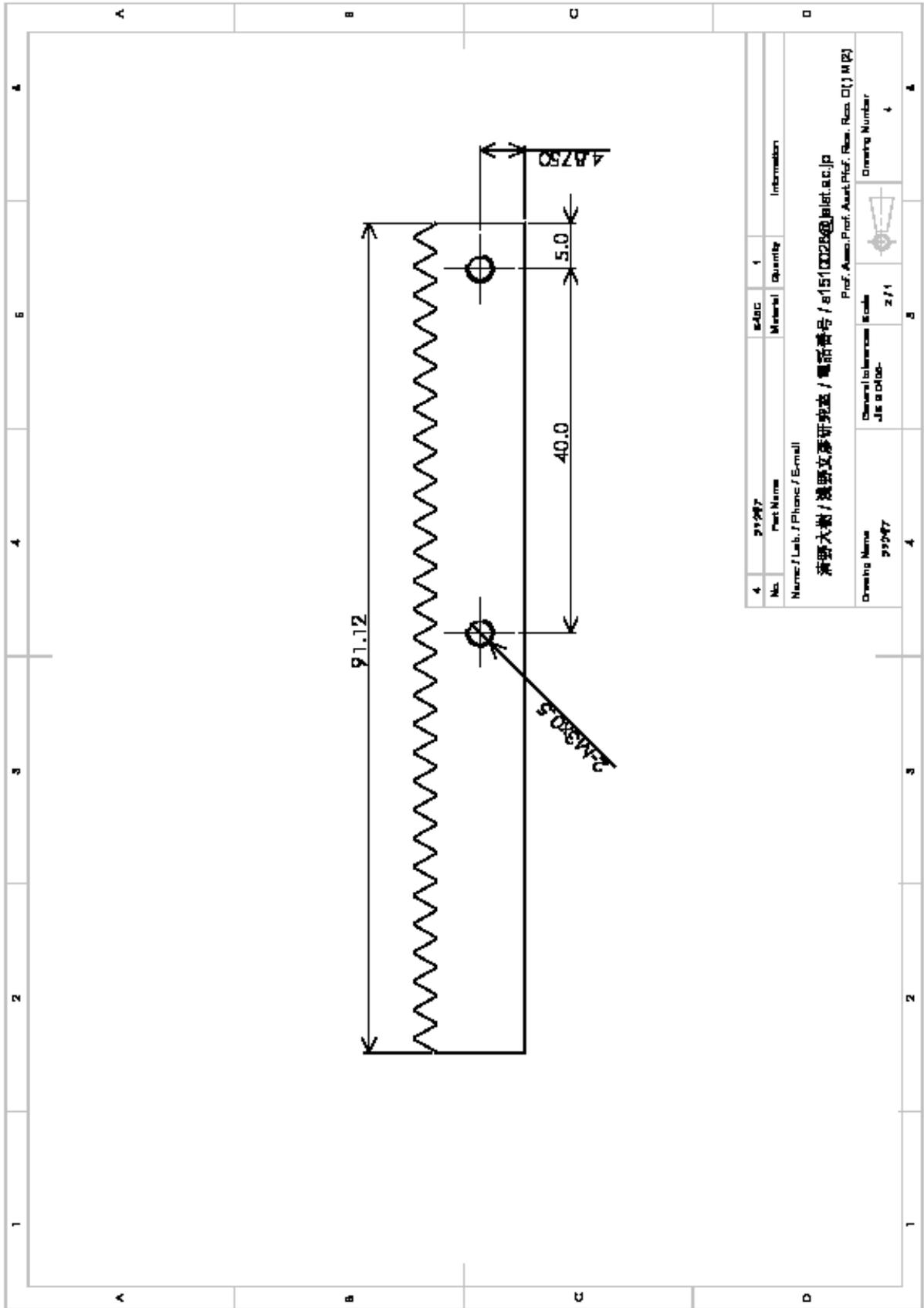
Name / Lab. / Phone / Email
 神田大樹 / 清田文彦研究室 / 電話番号 / e15102@elnet.ac.jp

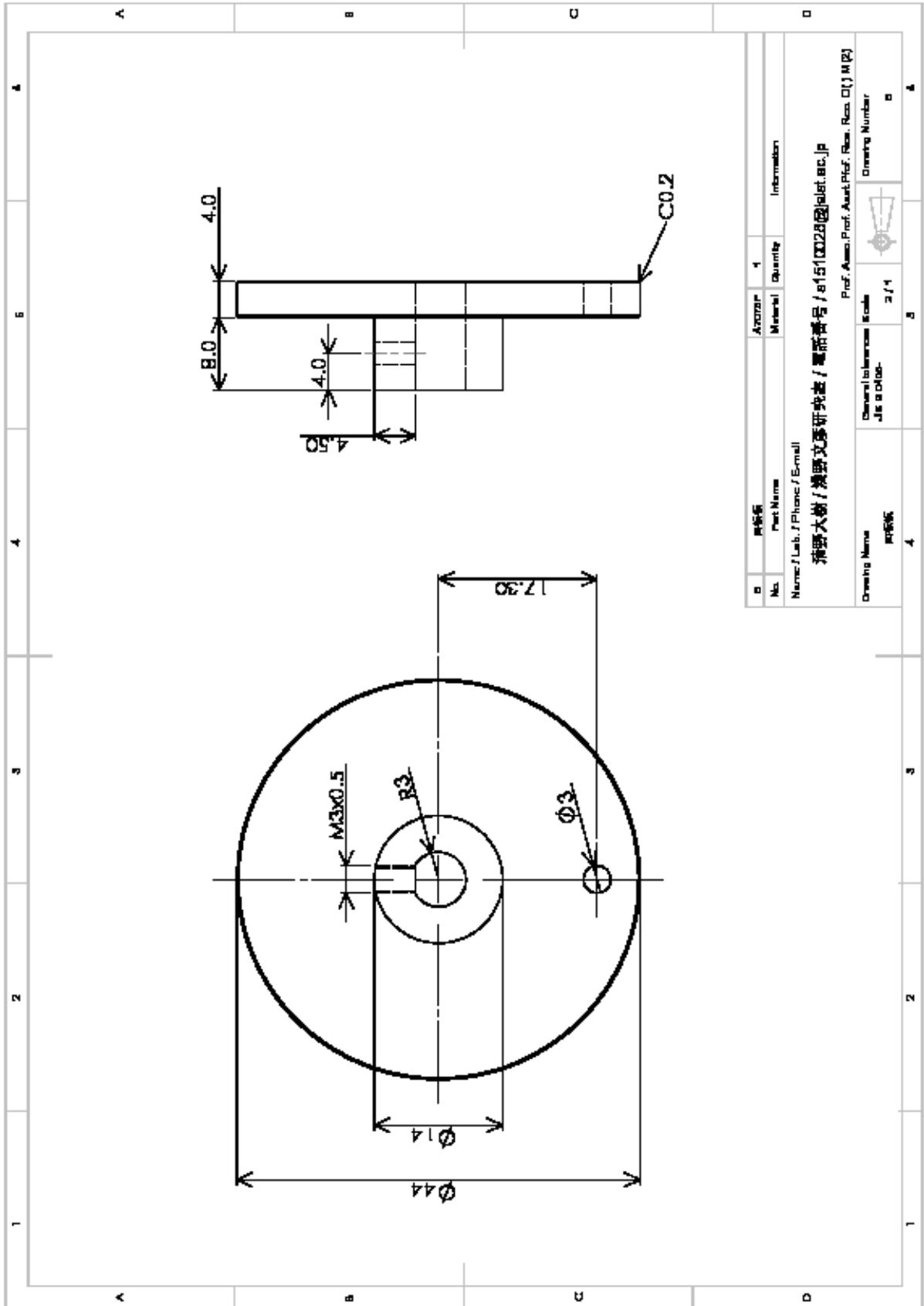
Prof. Aono, Prof. Asai, Prof. Res. Res. Oji M (P)

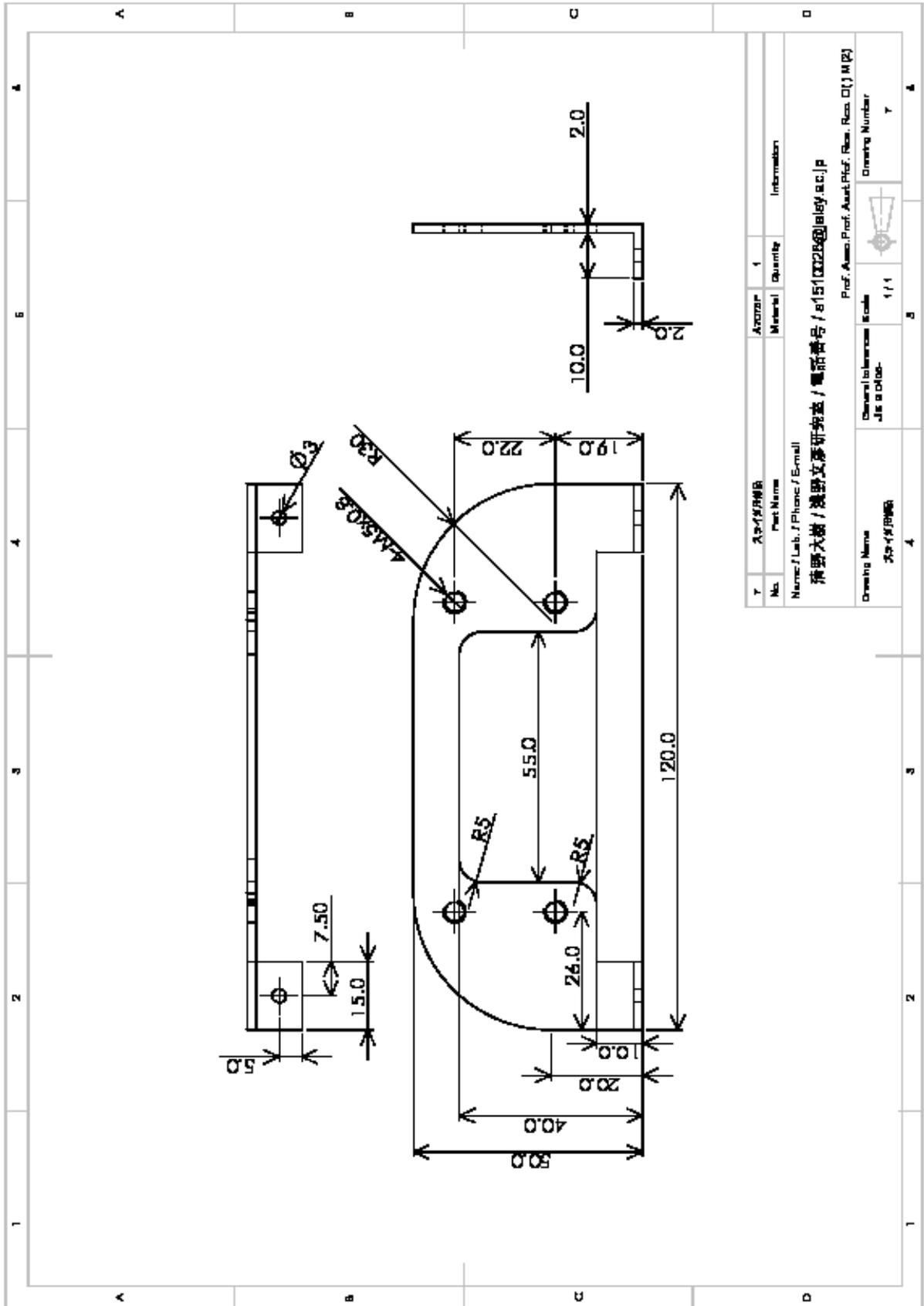
Drawing Name	General tolerance	Scale	Sheet Number	Drawing Number
21-4	JIS B 0100	1/1	1/1	1

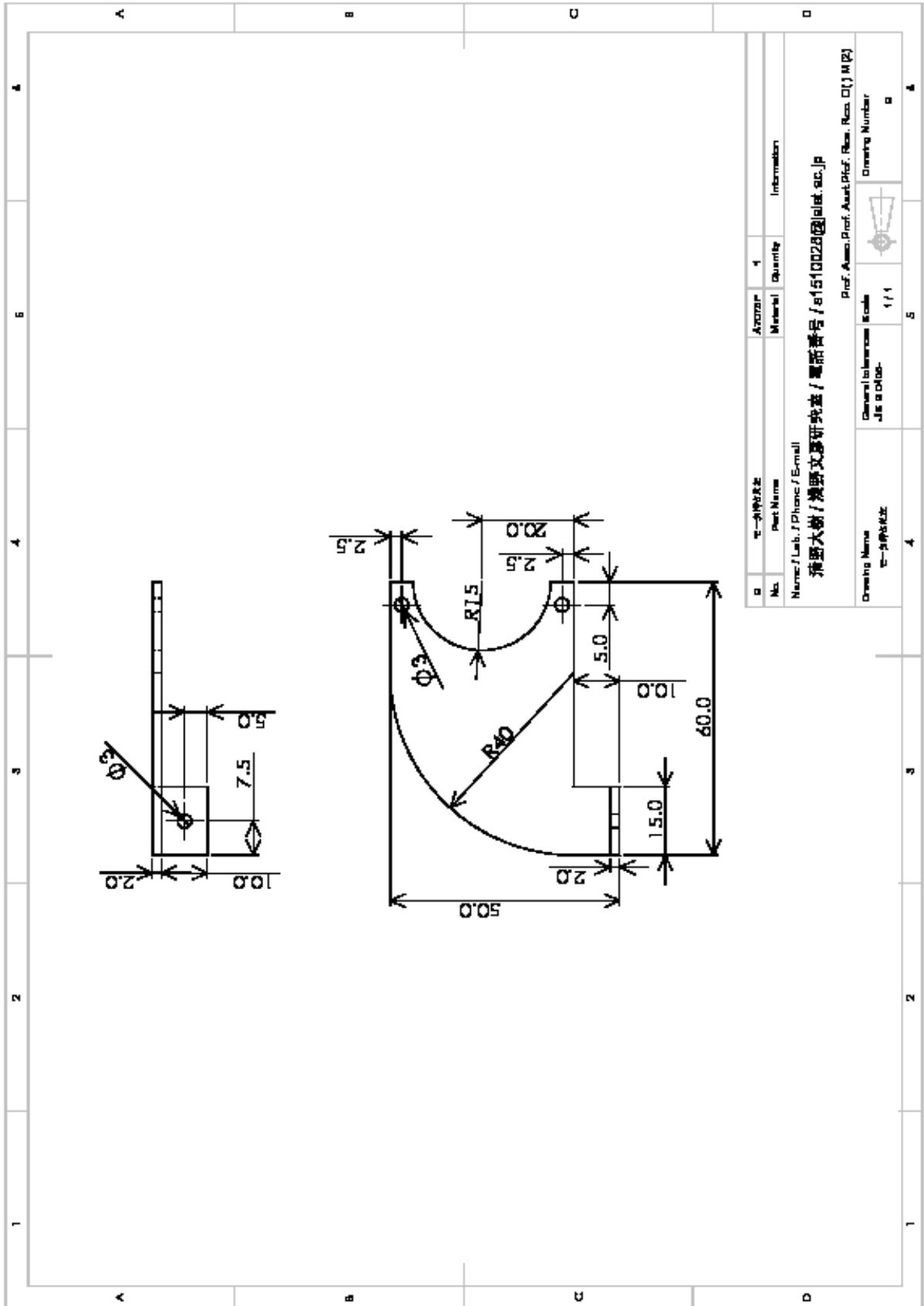




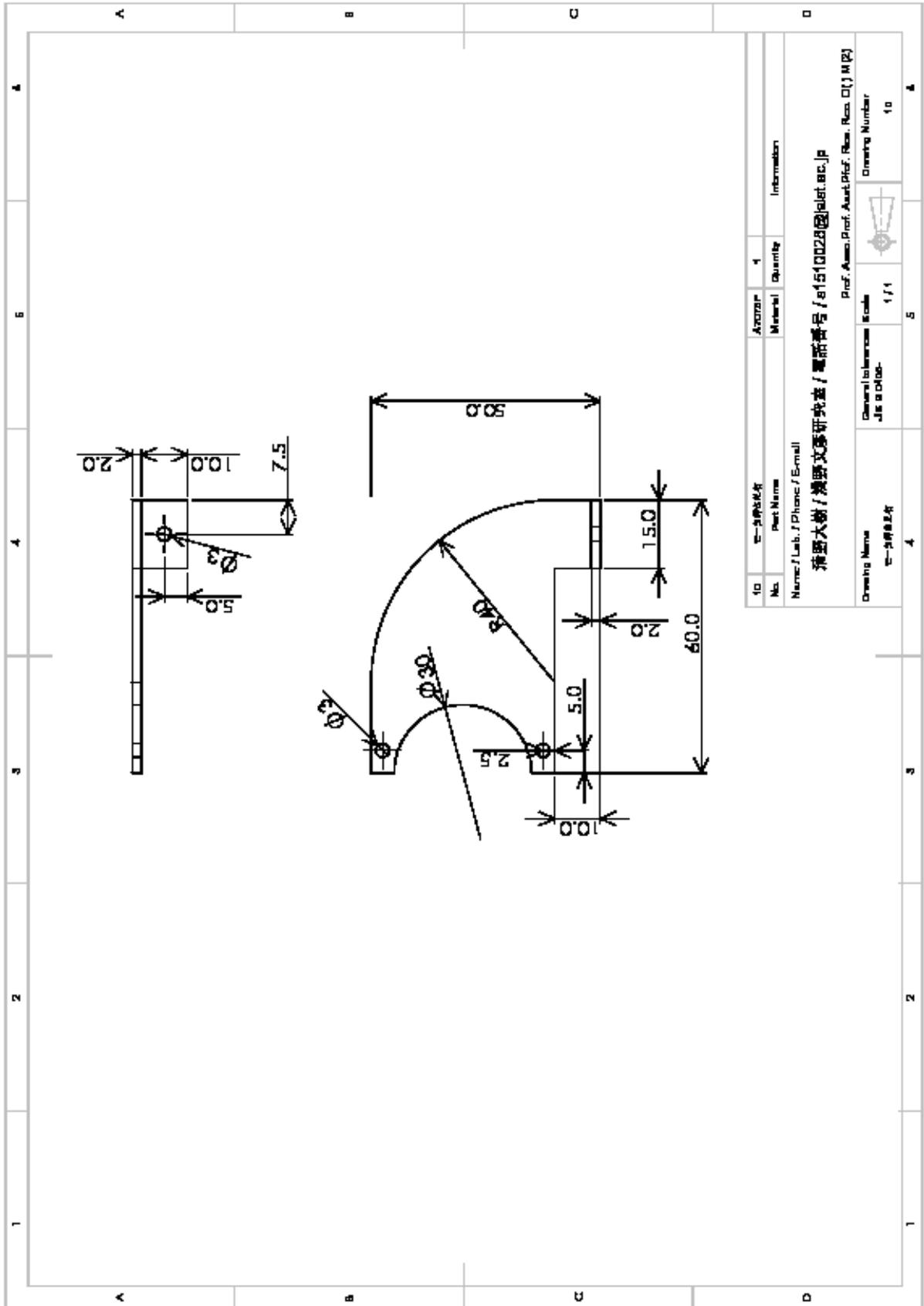


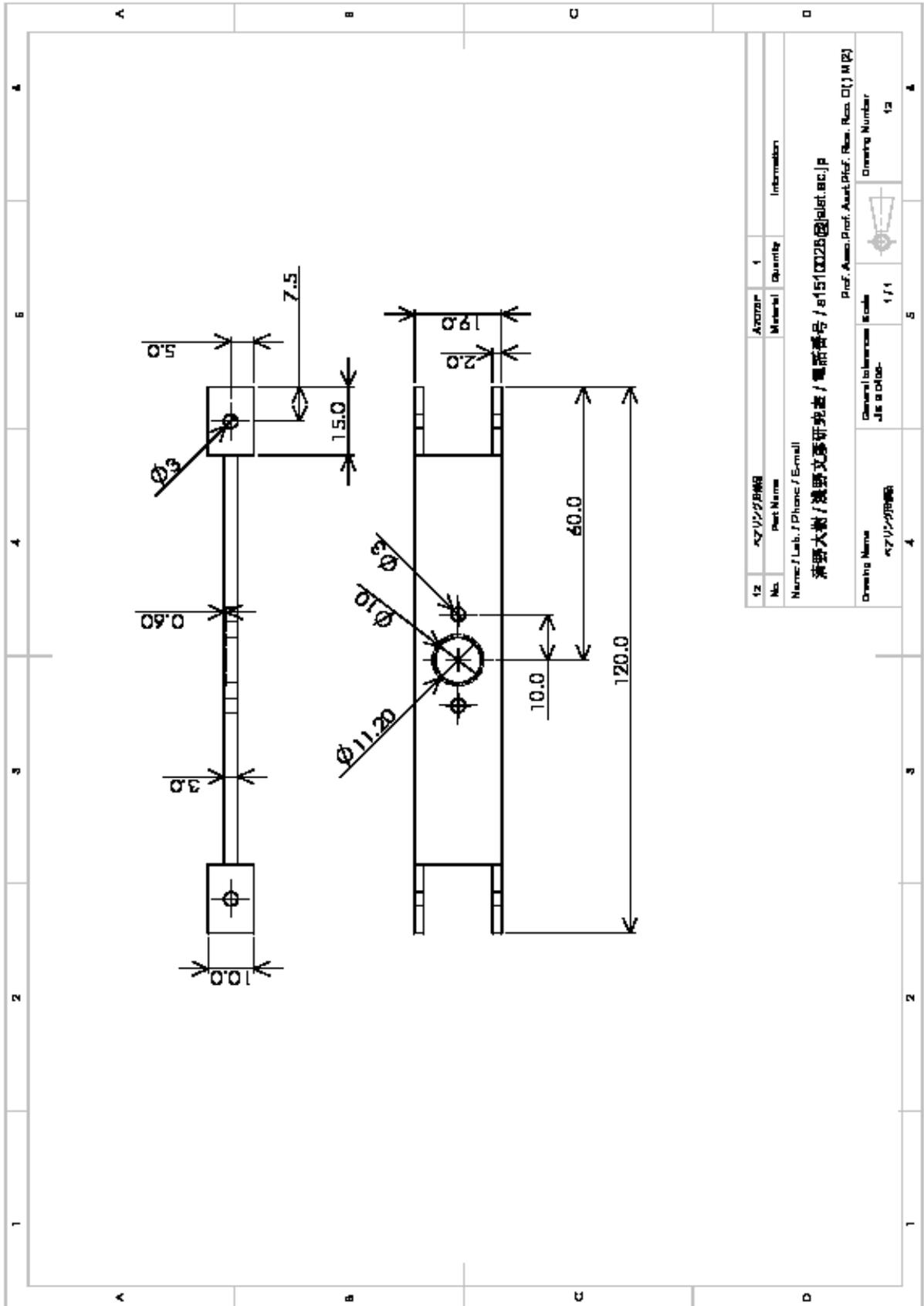


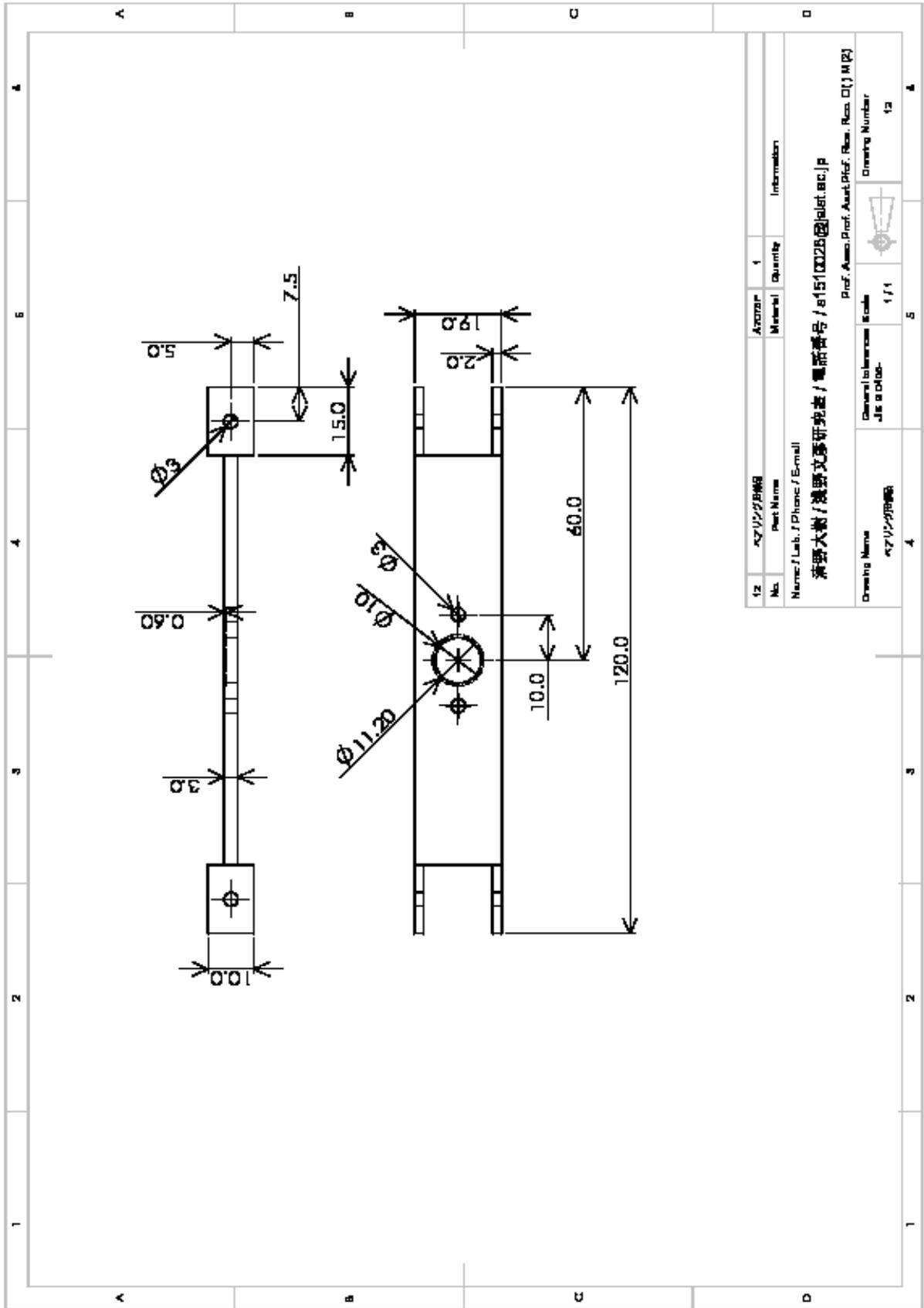


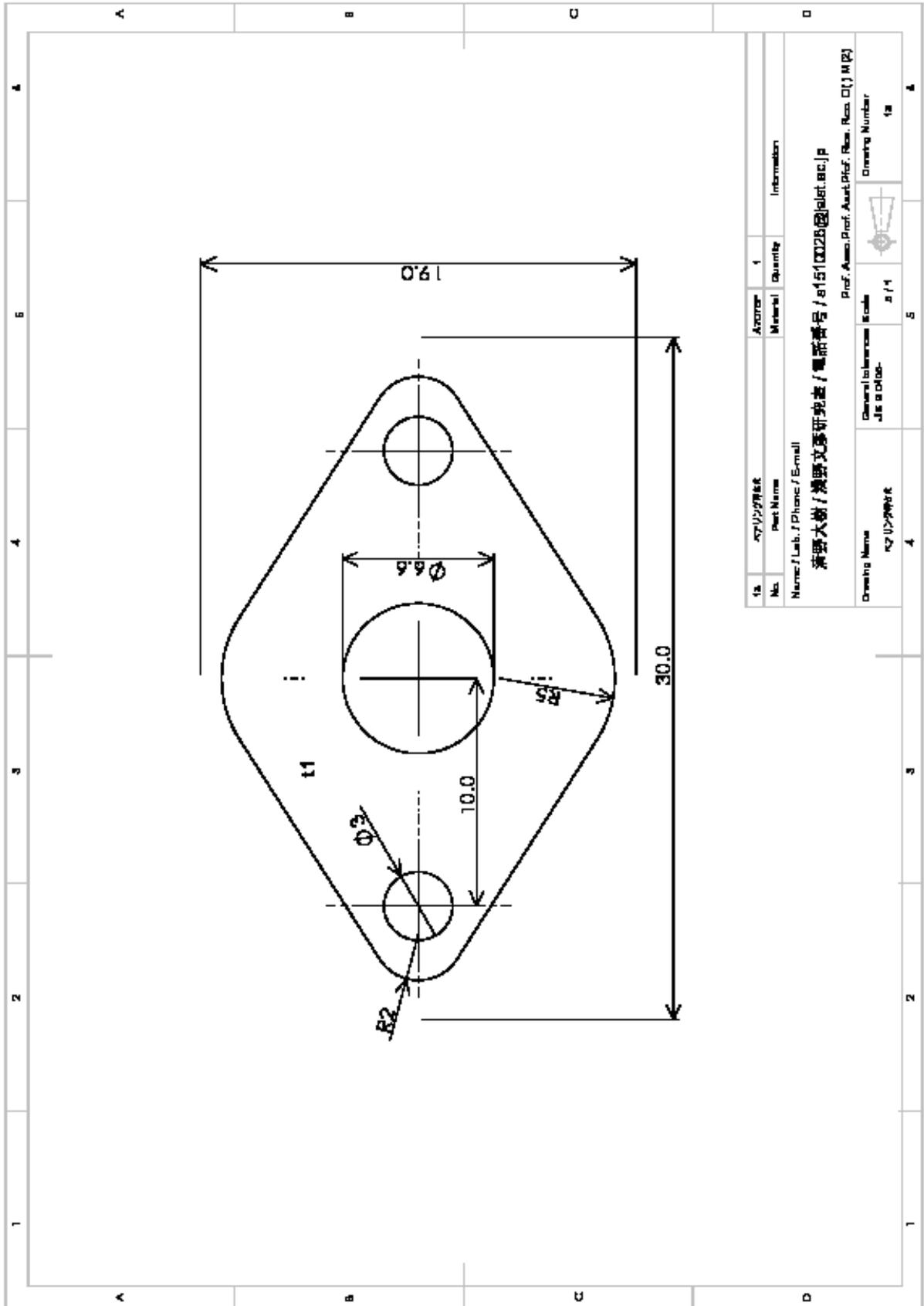


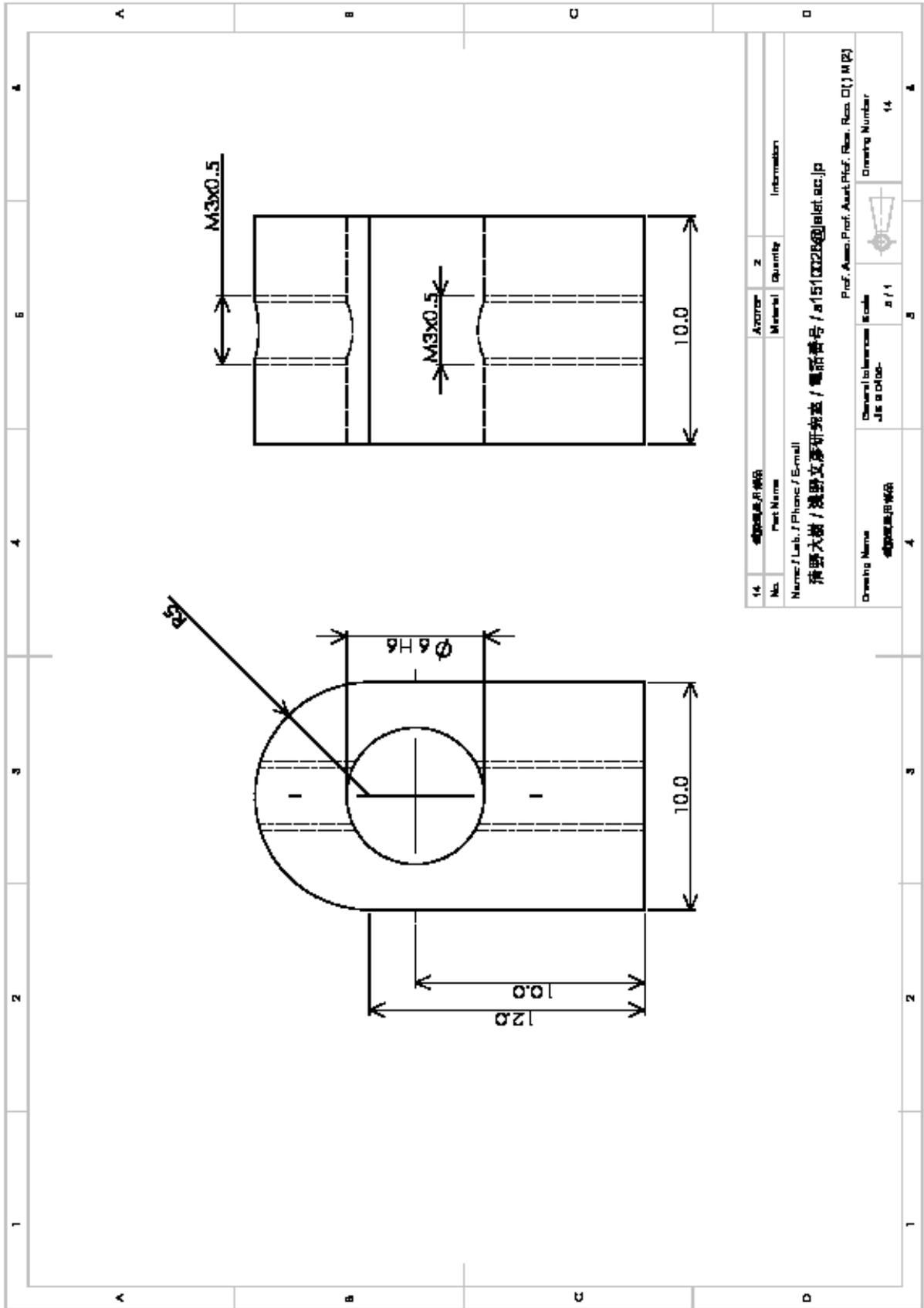
№	零件名称	数量	1	Information
№	Part Name	Material	Quantity	Information
Name / Lab. / Phone / Email				
清原大樹 / 清原文彦研究室 / 電話番号 / e1510028@uak.ac.jp				
Prof. Aono, Prof. Aoki, Prof. Awa, Res. Oji M (2)				
Drawing Name		General tolerance	Scale	Drawing Number
零件名称		JIS B 0100	1 / 1	□



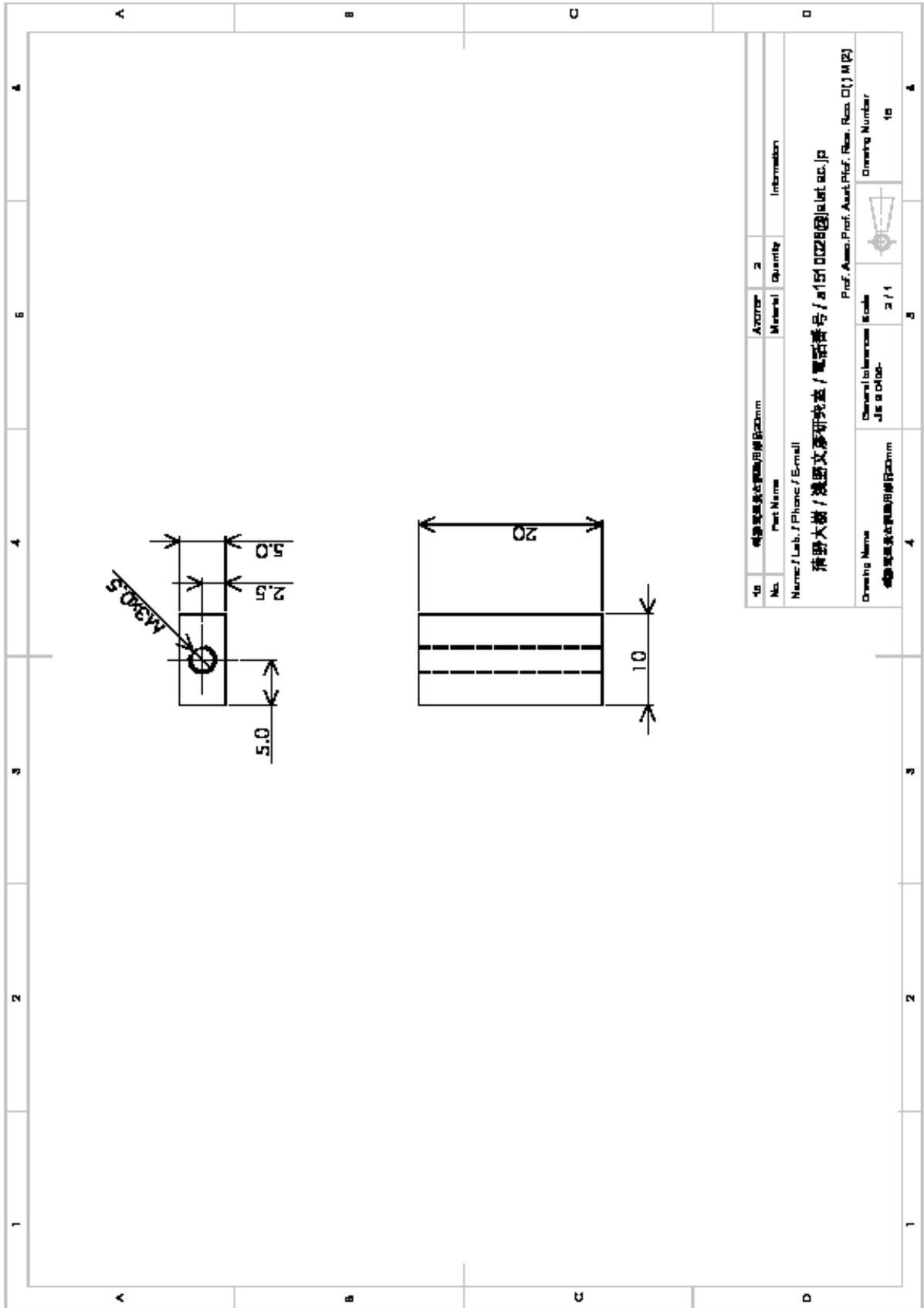


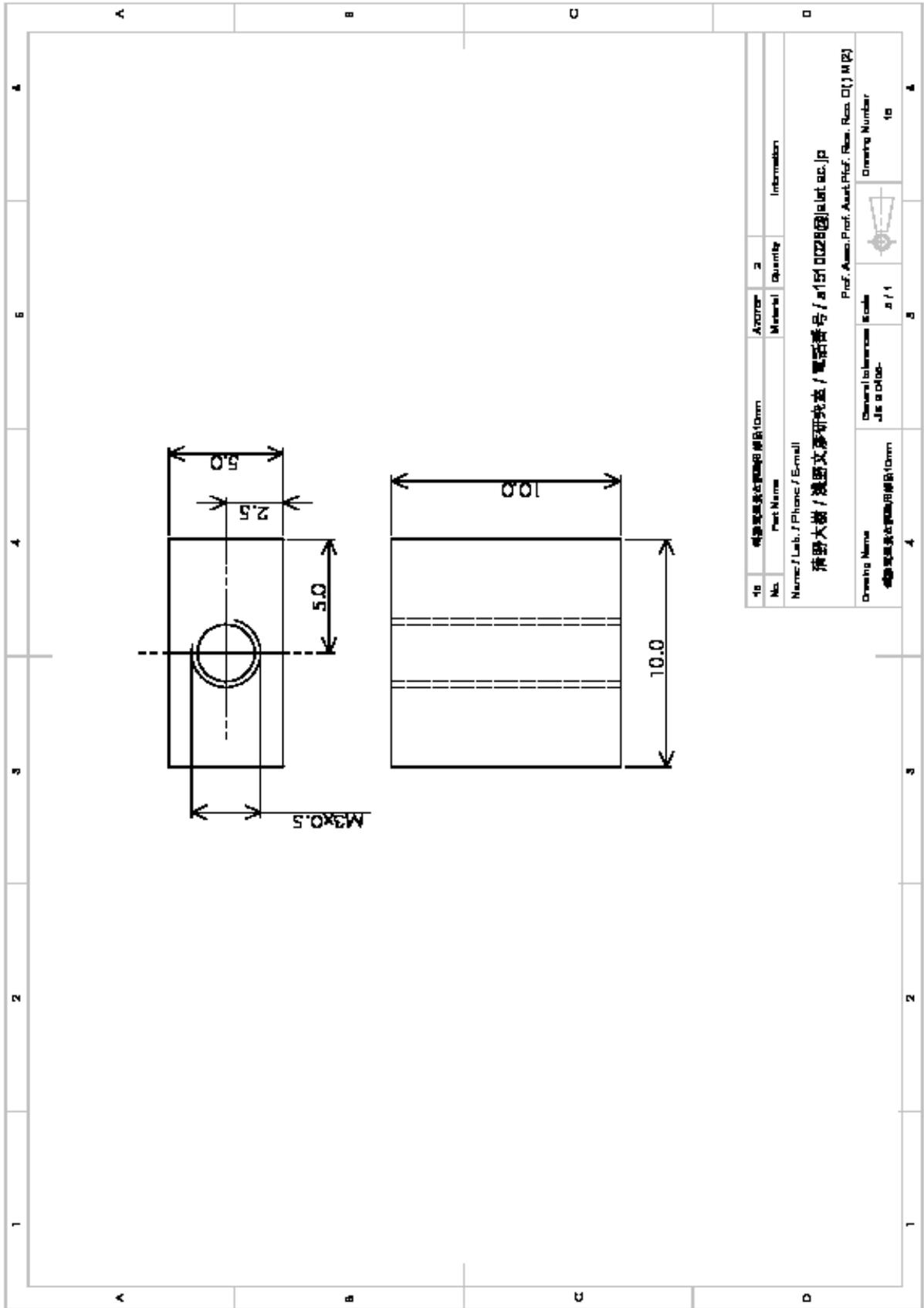


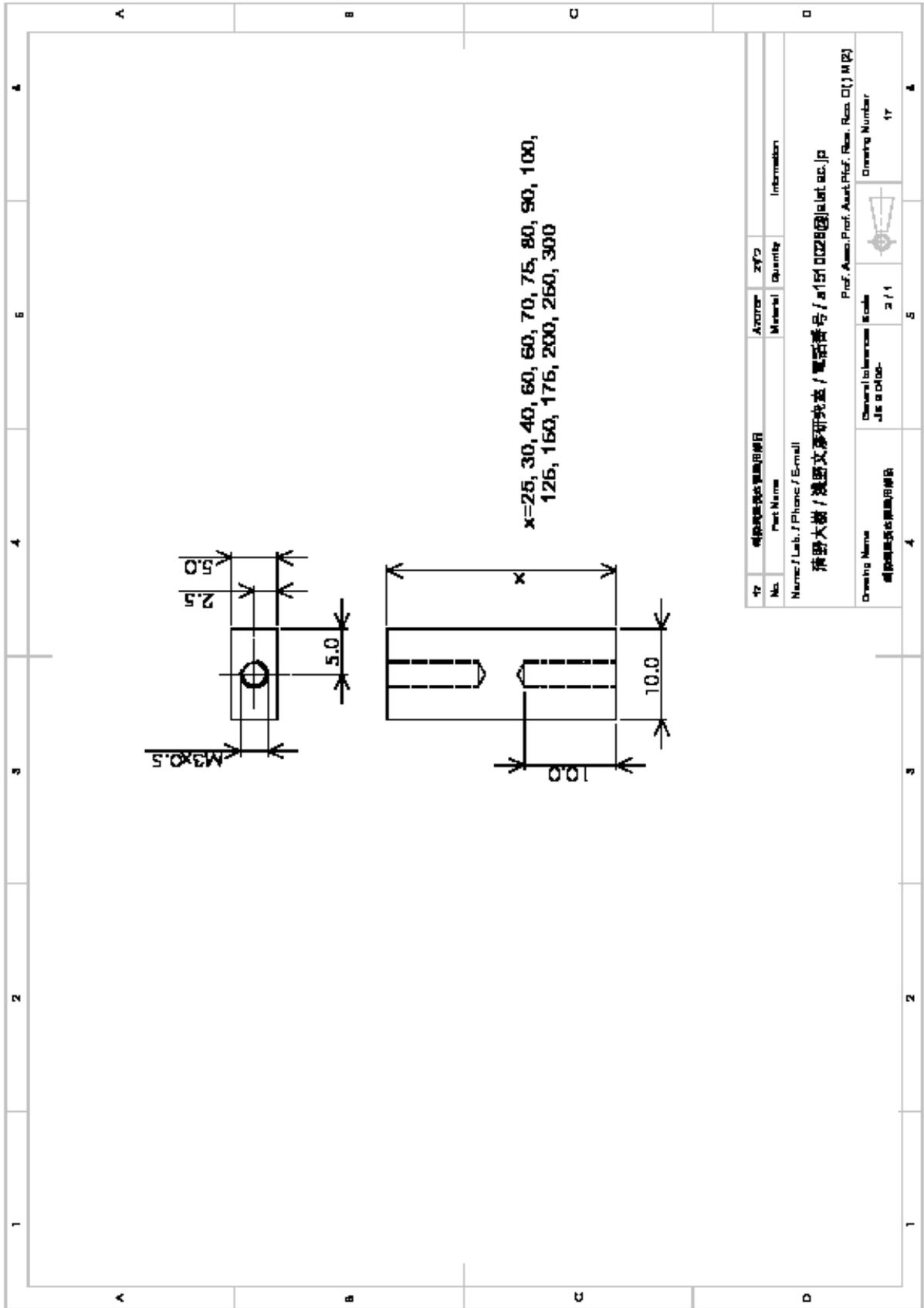


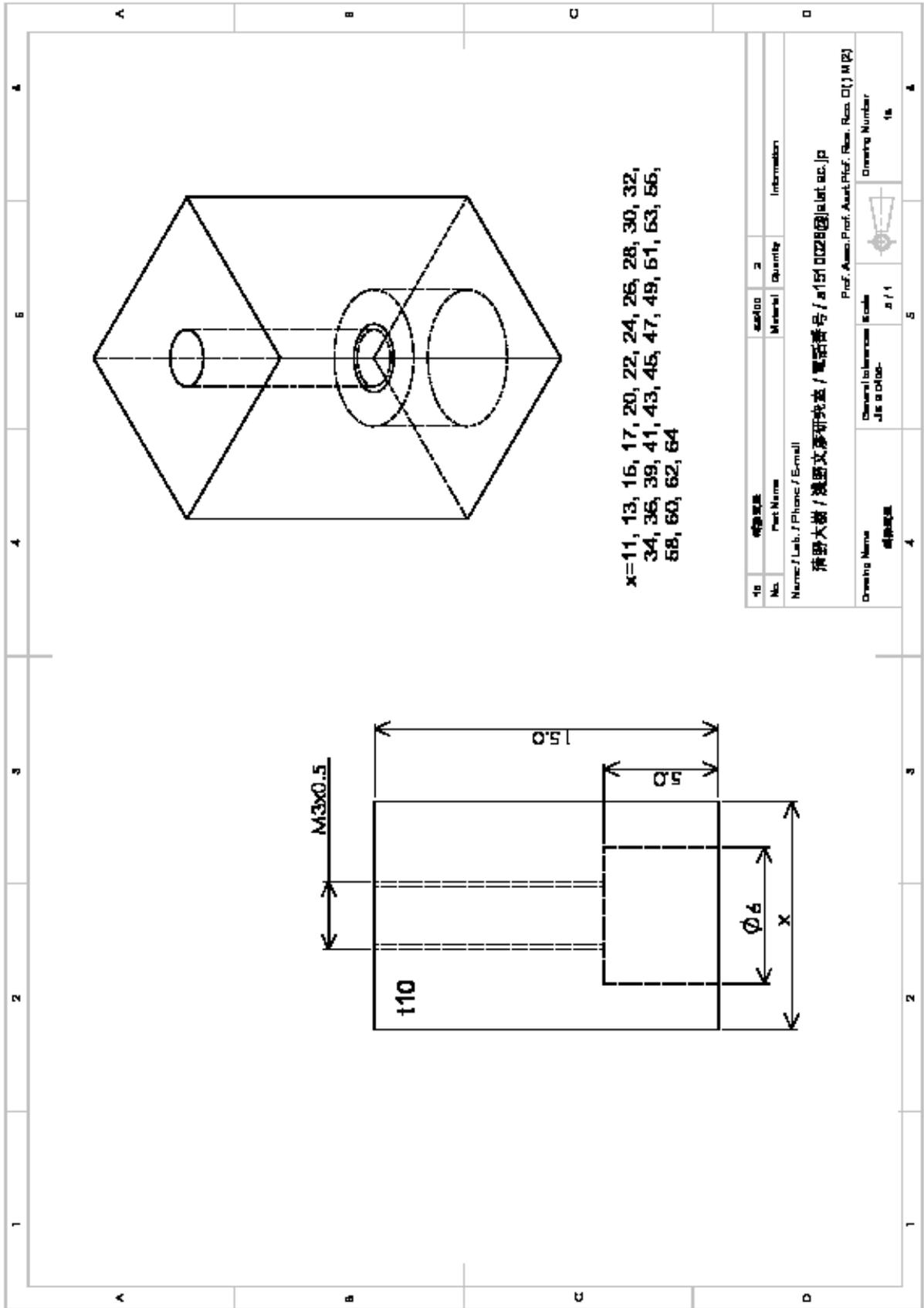


No.	Part Name	Material	Quantity	Information
14	溝取付部品		2	
Name / Lab. / Phone / Email 溝取付部品 / 溝取付部品 / a1510020@elnet.ec.jp				
Drawing Name 溝取付部品		General Information JIS A 0100-	Scale a / 1	Information Drawing Number 14
Prof. Assoc. Prof. Asst. Prof. Res. Res. O (J) M (P)				



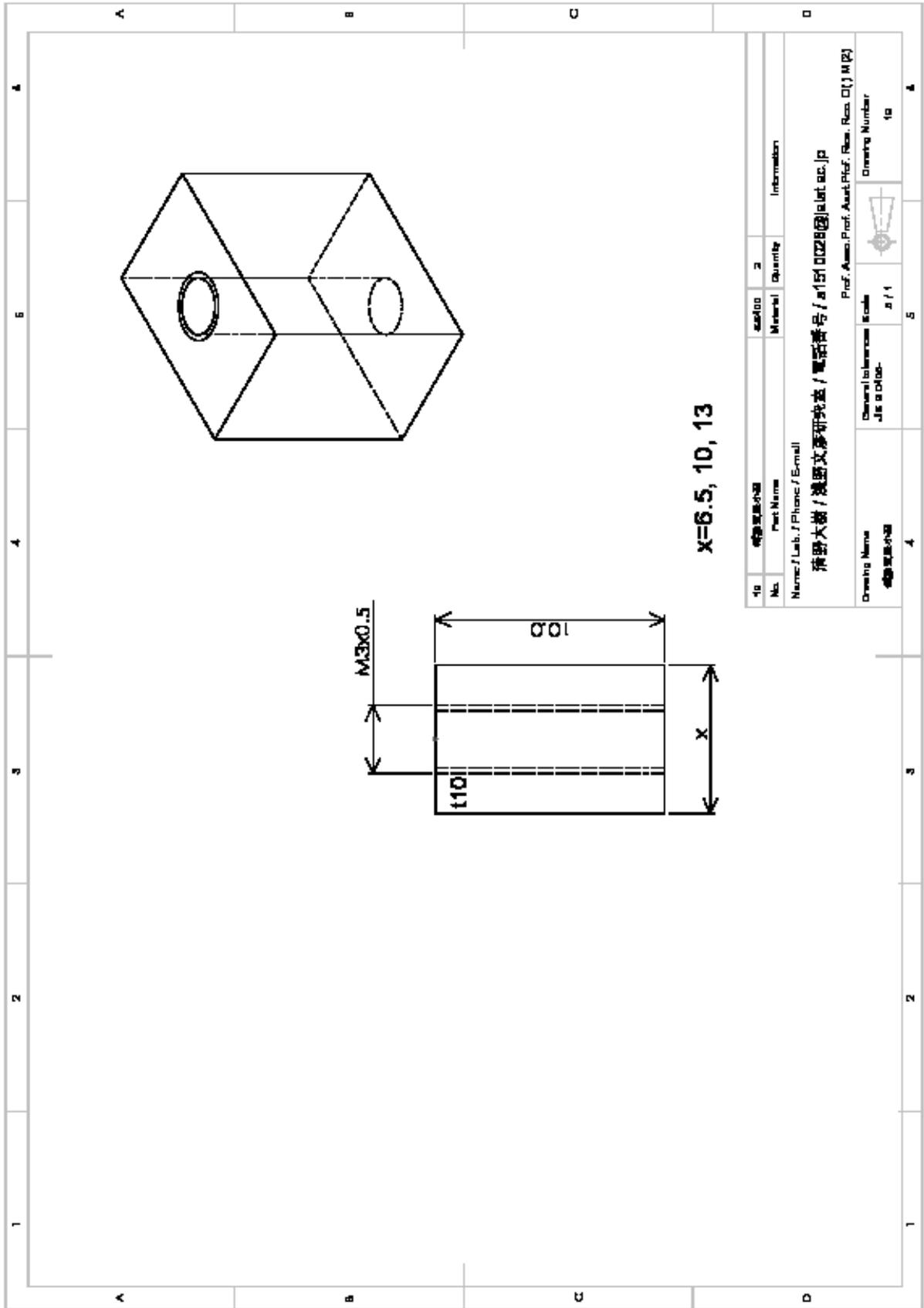


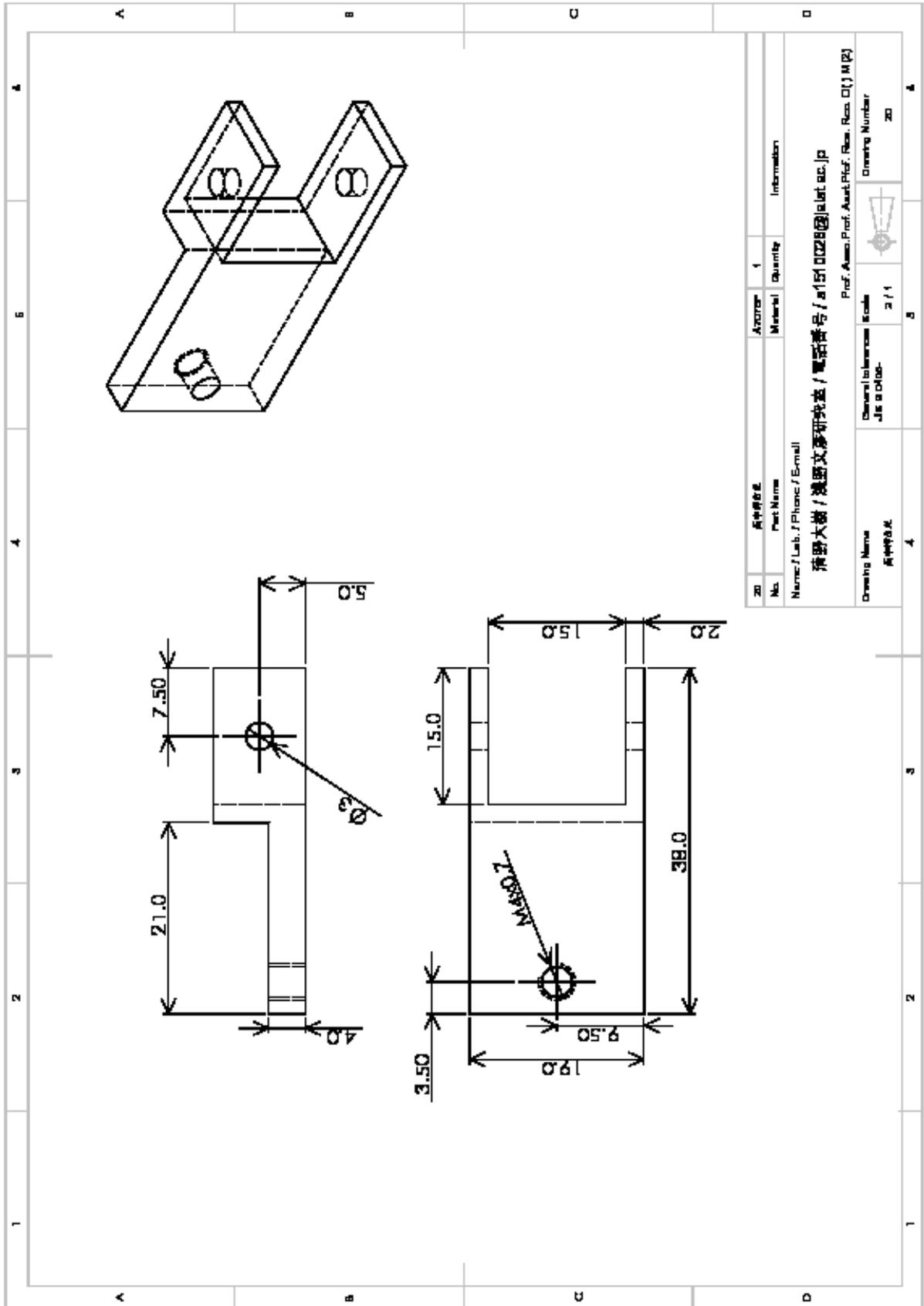


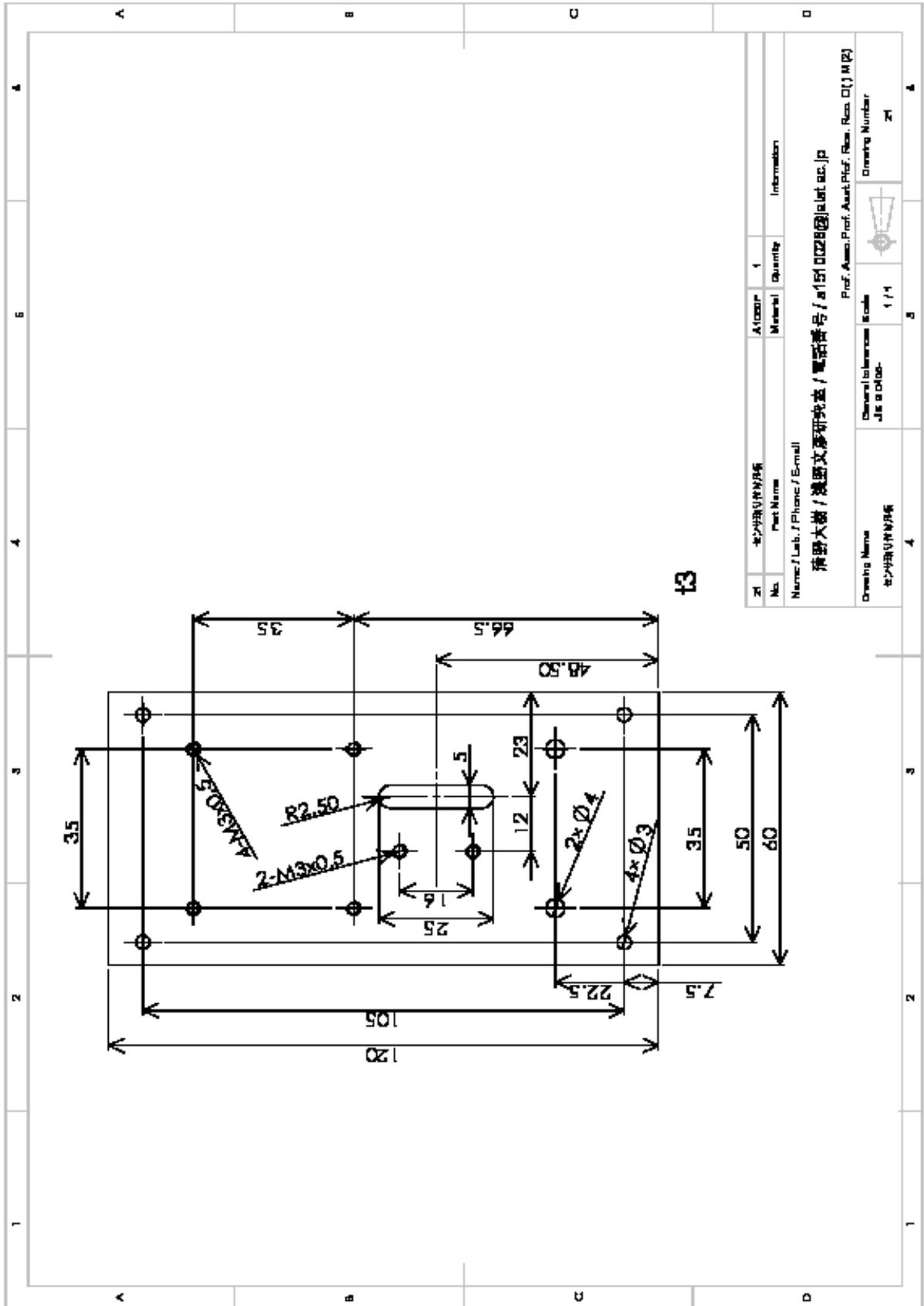


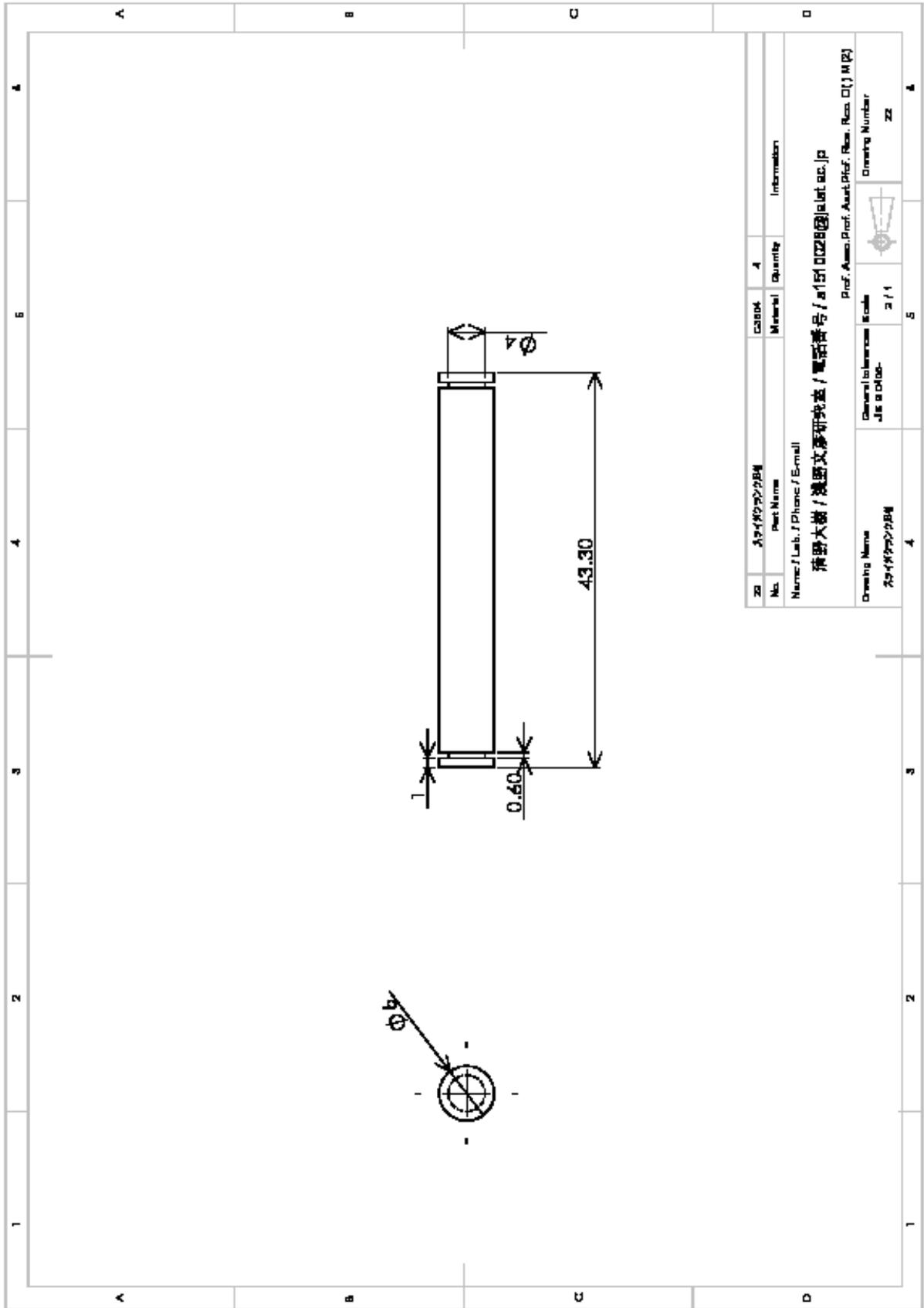
x=11, 13, 16, 17, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32,
34, 36, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 61, 63, 66,
68, 60, 62, 64

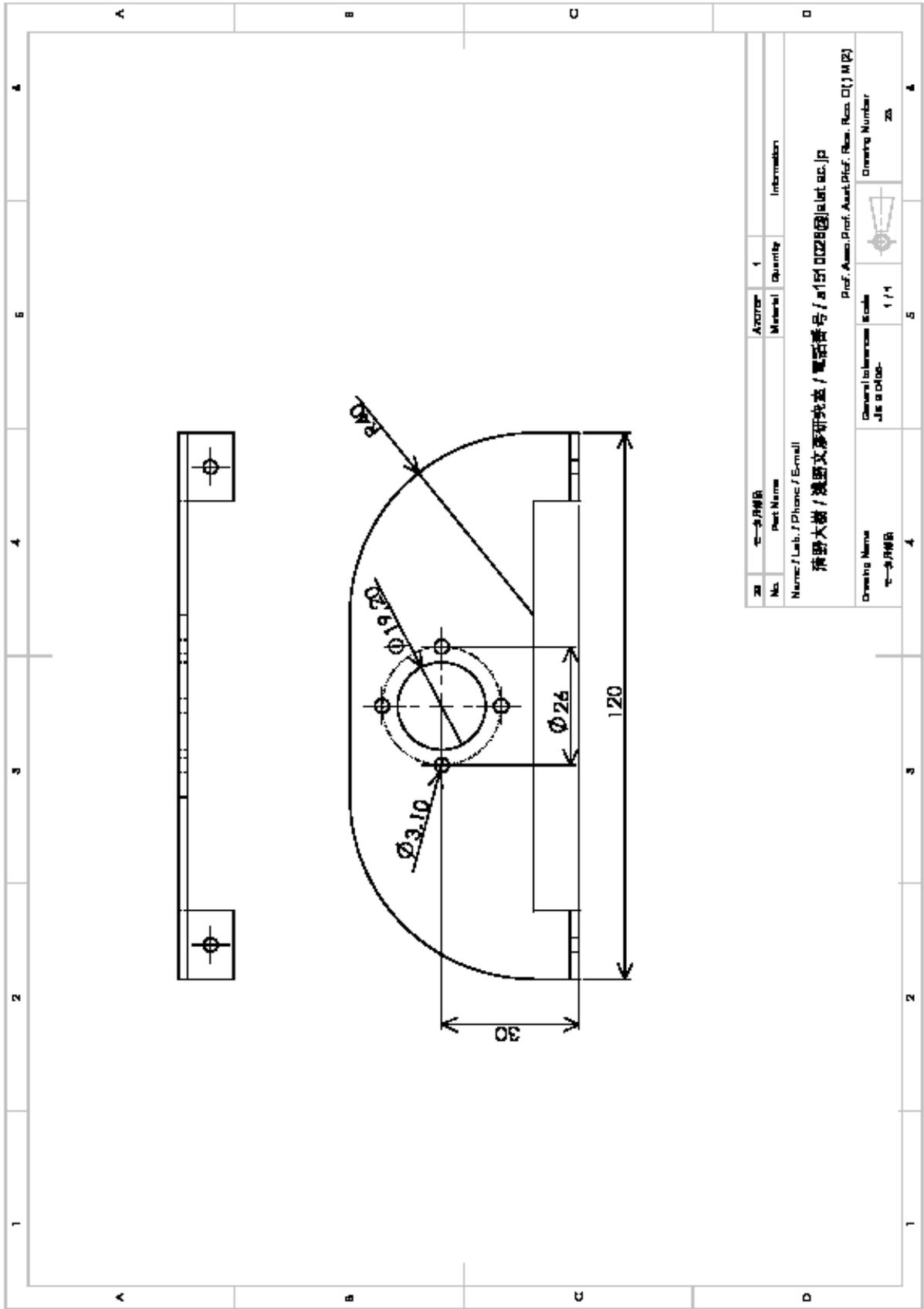
No.	Part Name	Material	Quantity	Information
10	六角ボルト	鋼	2	
Name / Lab. / Phone / E-mail Prof. Aono, Prof. Asai, Prof. Res. Res. Oji M (P)				
清野大樹 / 清野文彦研究室 / 電話番号 / a1510028@elab.t.u-tokyo.ac.jp				
Drawing Name		General Dimension Scale	Drawing Number	
六角ボルト		JIS B 0100	A / 1	10

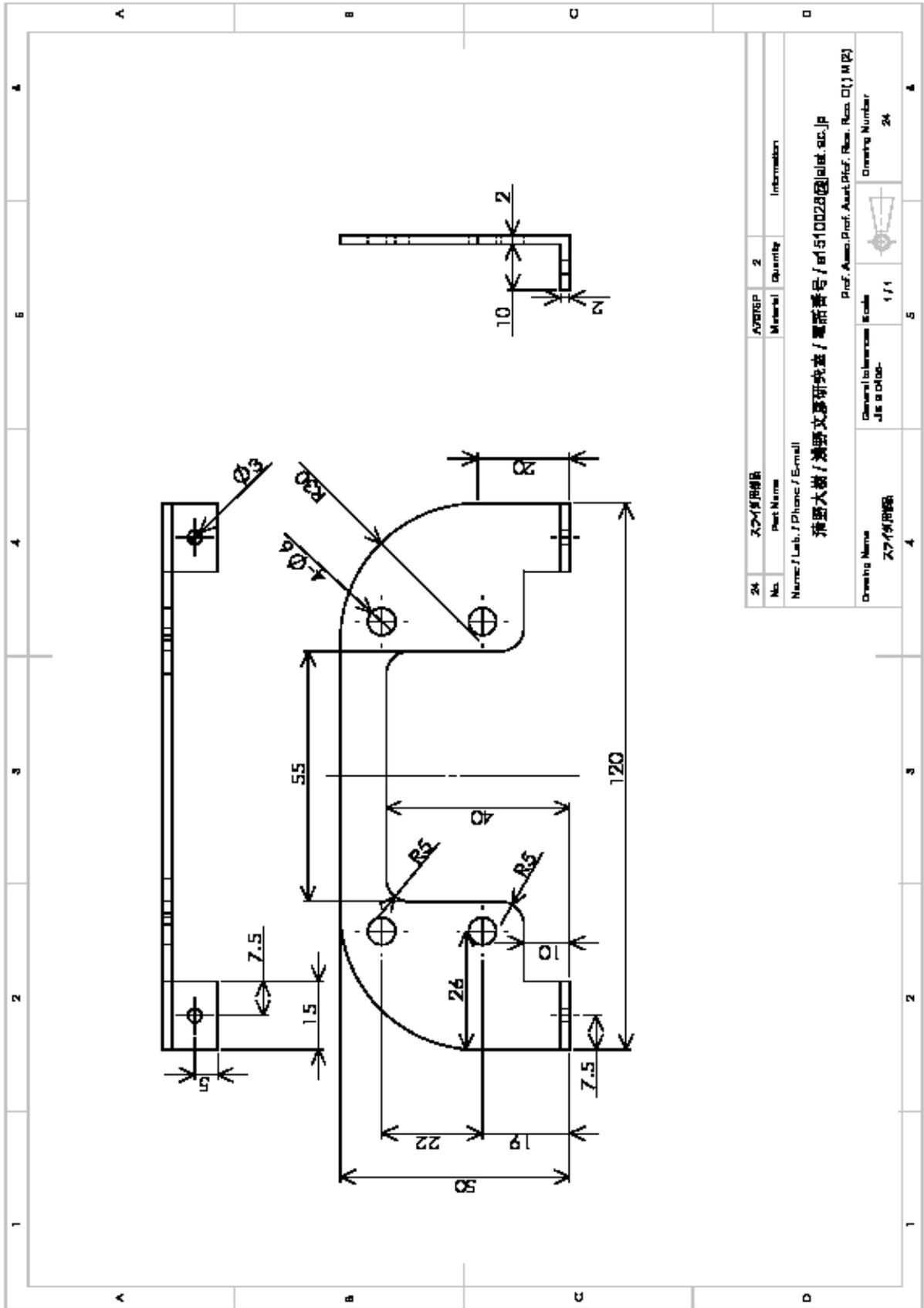












24	スライダ用部品	A2076P	2	Material	Quantity	Information
No.	Part Name					
Name / Lab. / Phone / E-mail 濱野大樹 / 濱野大樹研究室 / 電話番号 / 0151002801@net.ac.jp						
Prof. Name / Prof. Asst. / Prof. Res. Room / Office / M (P)						
Drawing Name スライダ用部品			General tolerances JIS B 0100-		Scale 1 / 1	Drawing Number 24

