

# M2 機械要素

～機械要素の配置と詳細設計の手順～

## 1. 目的

- ・ 設定された目的を達成するための「性能」あるいは「ユニークさ」をうまく発揮できるオリジナルマシンを設計する。
- ・ 市販されている機械要素の種類や機能、材料の種類と特徴を理解し、これらを効果的に用いたマシンを設計することでそれぞれの使い方を習得する。
- ・ M1「リンクの構成法」で検討したアイデアを踏まえつつ、S1「見よう見まね」メカ製作で確認した自分の「製造能力」、限られた「授業時間」と「予算」を十分考慮して設計すること。

## 2. 機械要素

S1「見よう見まね」サンプルメカでは、ネジ、ナット、Cリング・Eリングといった、既にお馴染みの部品のほかに、市販されている機械要素として、ベアリングと回転軸の2種類の部品が用いられている。このほかにも、ロボットの製作に用いることができそうな機械要素は、標準品として実に様々なものが市販されている。授業では比較的に利用しやすい部品類をある程度はストックしてあるので、これらは手にとって実際に見ることができるが、時間があつたら、標準機械部品の販売会社(例えば「ミスミ」<http://fa.misumi.jp/index.html>)の分厚いカタログや部品検索サイトをのぞいてみよう(図1参照)。様々な部品を眺めているうちに、「これを使えばこんな動きができるかも」というようなアイデアも出てくるかもしれない。安い部品をうまく選べば、限られた材料の予算内でもロボットに使えるものを購入できる。世の中にどんな機械部品が出回っているか頭の片隅に記憶しておく、授業のなかでのロボット製作だけでなく、卒業研究や将来の仕事でももちろん役に立つ。

本章ではこれらの機械要素のうち、ロボット製作に関連の深いものを運動支持要素、動力伝達要素、固定要素、エネルギー操作要素の4種類に分けて概説する。

### 2.1. 運動支持要素

市販されている主な運動支持要素は、ベアリングに代表されるような回転支持要素と、スライドレールに代表されるような直動支持要素に大別できる。

代表的な回転支持要素の例を図2に示す。ベアリングは既にS1「見よう見まね」サンプルメカ

**SMALL BALL BEARINGS - SHIELD TYPE - 小径玉軸受**  
一両シールド形

Steel Type	Stainless Steel Type	Flange Steel Type	Flange Stainless Steel Type
B6 ZZ	SB6 ZZ SB6 AZZ	FL6 ZZ	SFL6 ZZ SFL6 AZZ

**■フランジ付タイプ**

Catalog No.	d	D	B	Dn	C	r	基本定格回転速度	取付厚さ寸法	質量			
スタンダードタイプ	10	3	11.2	0.6	0.1	465	422	196	174	0.1	0.74	465
FL6ZZ	6	13	5	1.2	0.2	1350	1158	530	418	7.6	3.2	43
SFL6ZZ	6	17	6	1.8	0.3	2190	1924	865	877	8	3.5	61

**■止め軸タイプ**

Type	Type	材質	表面処理	
スタンダードタイプ	FXKA	FXLA	S40C	表面硬化処理
PFKA	PFKA	PFKA	表面硬化処理	
SFKA	SFKA	SUS304	—	

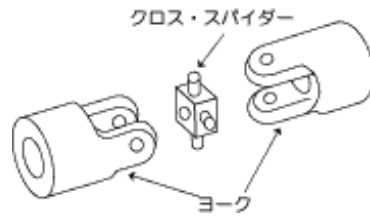
**■止め軸タイプ**

Catalog No.	Type	指定1mm単位	F	G	P	M	L	V	B	C	d	m	n
スタンダードタイプ	0	5-100	5-10	8	M6	6	8	10	11.5	5	0.7	2	
FXKA	10	5-100	5-10	8	M8	8	10	12	13.5	7	0.9	3	
PFKA	12	5-100	5-15	10	M10	10	12	14	16.2	9.6	1.15	3	
SFKA	15	5-100	5-15	12	M12	12	15	17	19.6	11.5	1.35	3	
片持ちタイプ	17	5-75	5-20	12	M12	12	15	18	19	21.5	1.45	3	
FXLA	23	5-75	5-20	14	M14	14	17	20	22	27.5	1.9	4	
PFXLA	25	5-75	5-20	16	M16	16	19	22	24	31.2	2.3	5	
SFXLA	28	5-75	5-20	18	M18	18	21	24	27	34.5	2.9	5	
											0.210	1.35	
											1.85		

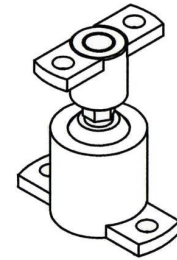
図1 標準部品カタログ例(ミスミ)



ベアリング

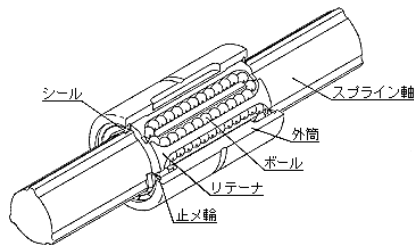


ユニバーサルジョイント

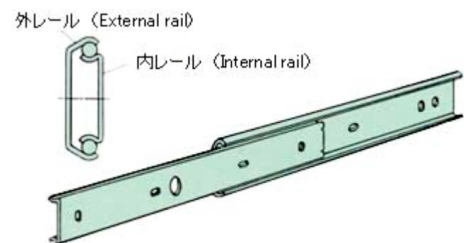


ボールジョイント

図 2 回転支持要素



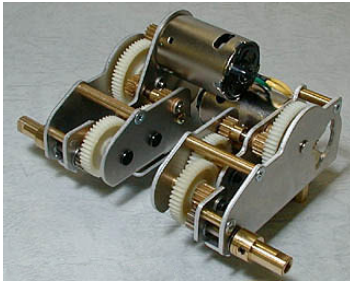
ボールスプライン



スライドレール

図 3 直動支持要素

でも使っているのだから分かっており、回転軸の支持に用いる。軸の位置・角度をしっかりと固定しつつ滑らかに回転させることができる。ベアリングには回転軸と直角方向(放射=ラジアル方向)の荷重を支持するためのラジアルベアリングと、軸方向(スラスト方向)の荷重を支持するためのスラストベアリングがある。サンプルメカで用いているのは軸径 6mm のミニチュアラジアルベアリングである。ユニバーサルジョイントは回転



平歯車(ギアボックス)



ウォームギア



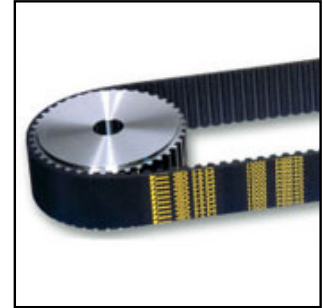
かさ歯車



ローラチェーン&スプロケット



ラダーチェーン&スプロケット



タイミングベルト&プーリ

図4 動力伝達要素

軸同士の接続(軸同士に角度あるいは位置のずれがあっても利用可能)に用いる。自動車のエンジンの動力を後輪に伝達(よって動力伝達要素であるとも言える)するのに、トラックなどの車体の下で回っているのを見たことがある人も多いだろう。ボールジョイントは動物の間接のような動きができる3自由度の回転支持要素である。

代表的な直動支持要素の例を図3に示す。ボールスプラインは突起を持つスプライン軸上を、ボールを内蔵するスプラインナットが滑らかにスライドする。ボールは転がりながらスプラインナット中で循環する。丸い軸ではなく四角い断面のレール上をスライドするものはリニアガイドと呼ばれ、これをさらに単純化し安価に製造したものが図3右に示したスライドレールである。



図5 エンプラベアリング

## 2.2 動力伝達要素

図4に代表的な動力伝達要素の例を示す。ここではモーターの回転によりロボットを駆動することを前提として代表的な要素を例示している。当然、空気圧や油圧などの流体アクチュエータを用いた場合には、流体そのものによって圧力=動力が伝達されることになる。

ギア(歯車)は回転動力を伝達すると同時に、径の異なるギアを組み合わせることで減速/増速(当然、同時に増トルク/減トルク)に用いられる。キット化されているギアボックスを使えば、大幅な減速や、様々なギア比の切り替えが簡単にできる。ウォームギアは大径あるいは多数のギアを用いずに、簡便かつコンパクトに大幅な減速ができ、かつ回転軸の方向を直角方向に変換できる便利なギアだが、摩擦が大きく動力の伝達効率は低い。かさ歯車なら、動力を効率的に伝達しつつ、減速と軸方向変換を同時に



行うことができる。チェーン&スプロケットやタイミングベルト&プーリはいずれも距離の離れた平行軸間で回転動力を伝達するのに用いられる。種類やサイズは伝達する動力の大きさに応じて選択する。この授業で製作するロボットの動力程度であれば、図 5 に示す歯のついていないプーリ(エンブラベアリング)にナイロン紐や細いスチールワイヤを巻きつける程度でも伝達できる。

### 2.3 固定要素

S1「見よう見まね」サンプルメカでも、ネジ、ナット、Cリング、Eリングといった固定要素を既に使用しているが、使い方をきちんと理解せず間違っているケースが散見されるのでここで再確認しておこう。

ネジの種類とサイズは JIS

規格で詳細に定められているが、この授業で使うのはほとんどの場合「メートル並目ネジ」である。図面に「M5」などと書かれているのがそれで(詳細は M コース「機械製図」を参照)、M に続く数字がねじの外径(mm)である。図 6 の左の例に示すようにネジ(またはボルト)とナットを使って 2 枚の板状の材料を締結する場合には、両方の板に「ネジの外径よりも 1~2 割くらい大きな径」の穴を開けてネジを貫通させ、ナットで固定する。M5 のネジを通すのにちょうど直径 5mm の穴を開けてしまうと、穴の位置が正確に加工できずずれてしまったとき(ほとんど場合そのようになる)に、2 枚の材料が思った位置で固定できない、あるいはネジが 2 つの穴を貫通してくれないといったことになってしまう。このように、穴に通すものよりも直径の大きな穴のことを「バカ穴」と呼ぶ。ネジ及びナットと材料の間には、材料に傷がついたりネジが緩んだりするのを防ぐためにワッシャーを入れると良い。

また、図 6 の右の例のように、ナットを使わずに 2 枚の板のうちの 1 枚に雌ネジを加工しておいて締結する方法もある。ネジを加工する手間はかかるが、ドライバー一本で簡単に分解・組立ができるようになるので、頻繁に分解・組立をする箇所には便利である。雌ネジを加工するときは、まずネジの外径よりも 2 割程度小さな径の下穴(正確な下穴径の一覧表はたいていボール盤の近くに掲示されている)を開け、少量のグリスをつけたタップとタップハンドルを使って両手で少しずつ正逆回転を繰り返しながら加工する。いい加減にやっているとネジ穴が斜めになってしまうので、材料の表面とタップがきちんと垂直になっていることを前後左右の 2 方向からこまめに確認しながら加工すると良い。ダイスとダイスハンドルを使えば同様の手順で回転軸に雄ネジを加工することもできる。

S1「見よう見まね」サンプルメカでも使っているように、回転軸に取り付けた部品(サンプルメカの場合はベアリングとアーム)が回転軸から抜けてしまわないようにするには Cリングや Eリングが便利である。サンプルメカに用いている市販の回転軸には Cリングや Eリングを取り付けるための細い溝が既に加工されている。棒材から回転軸を自分で加工する場合は、軸を旋盤に取り付けて回転させながらリング溝加工用の幅の小さい突切バイトをほんの少し当てるだけで、好きな位置に簡単にリング溝を加工することができる。

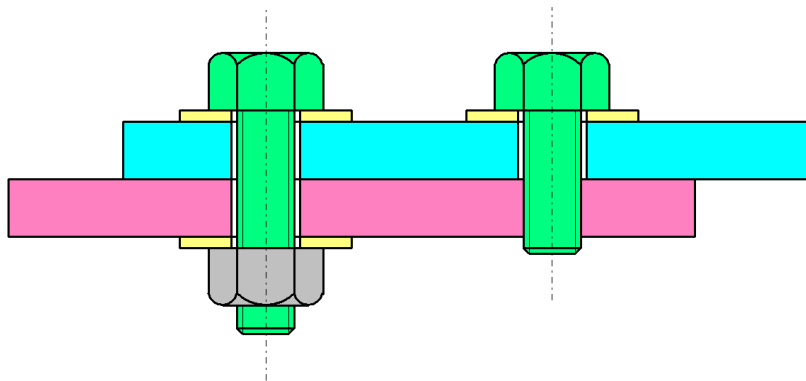


図6 ねじによる締結

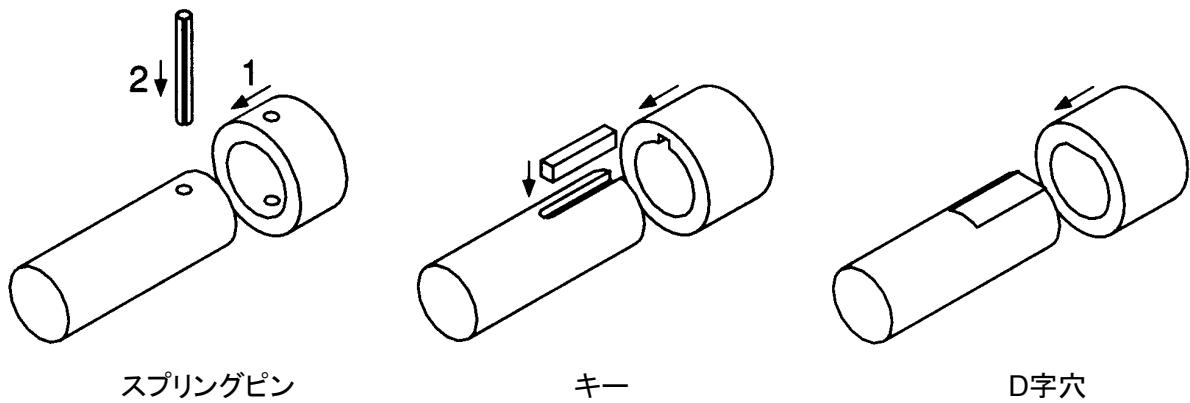


図7 車輪と軸の固定

回転軸に車輪やギア類を取り付けて固定する代表的な方法を図7に示す。スプリングピンは薄いばね鋼を筒状にした部品で、スプリングピンよりやや小さめの穴を軸と車輪を貫通するように開けておき、押し込んで固定する。軸径が大きい場合は、軸側に雌ネジを加工してスプリングピンのかわりにネジを使って固定することもできる。これらの方法は手軽だが、伝達するトルクが大きいとスプリングピンやネジが折れてしまう。これに対して、キーやD字穴により固定する場合は、穴側の加工が難しくなるが、より大きなトルクを伝達することができる。

## 2.4 エネルギー操作要素

この授業ではロボットの駆動に RC サーボを用いることを基本としているが、ばね等に蓄えられたエネルギーを RC サーボをトリガとして駆動に用いたり、ダンパ等を用いて速度調節したりすれば、よりスピーディでパワフルな、RC サーボでは直接に作り出すのが難しいような動作も可能となる。

図8にさまざまなばねの例を示す。ばねには、線材を巻いて作られるコイルばねや、板材を切り出して作られる板ばねをはじめとして、非常に多くの種類や形がある。最も標準的に用いられるコイルばねには押しばねと引きばねがあり、ばねの力  $F$  はよく知られているフックの法



図8 さまざまな種類や形状のばねの例

則  $F = kx$  で表される。図9に示すように、ばね定数  $k$  は素線の直径  $d$ 、素線の横弾性係数  $G$  (ばね鋼の場合で  $80\text{GPa}$ )、ばねの巻き数  $n$ 、及びコイルの巻き径  $D$  により  $k = Gd^4/8nD^3$  として求められる。板ばねは大きなものではトラックや鉄道車両に使用される重ね板ばねから、小さなものでは電子機器類に組み込まれるものまで、さまざまなところで用いられている。図9に示すような長さ  $L$  の片持ちの板ばねを力  $F$  で押したときのたわみ  $\delta$  は、ヤング率  $E$  (ばね鋼の場合で  $200\text{GPa}$ )、断面二次モーメント  $I$  を用いて  $\delta = FL^3/3EI$  で求められる。薄板の断面二次モーメント  $I$  は、板幅  $b$  及び板厚  $t$  のとき、 $I = bt^3/12$  で求められる。

図 10 はコイルばねを使った張力可変機構の例である。上段の例ではチェーンの長さだけ張力の小さなばねが伸びた後に張力の大きな(硬い)ばねに切り替わる。下段の例では張力は連続的に変化する。

ダンパ(緩衝器)は、ばねを用いたときに問題になりやすい振動を抑制するのによく用いられる。自動車や鉄道車両のサスペンションにもばねとダンパがセットで用いられている。地震による建物の揺れを抑制するのにも大型のダンパが用いられる。図 11 はダンパの一種でばねの機能を併せ持つガススプリングの構造図である。ガススプリングは大きな荷重のもとでも軟らかいばねとして機能するため、コピー機のメンテナンス用開閉部、乗用車の跳ね上げ式後部ドア(ハッチバック)などによく用いられている。オイルを満たしたチューブ内をピストンが往復動すると、ピストンに設けられた小孔(オリフィス)を通じてオイルが A 室と B 室の間を移動する。オイルはオリフィスを通過するときに流体摩擦をうけるため、A 室と B 室の間には圧力差が生じ、ピストンは常に減速方向に力を受ける。フリーピストンで仕切られた C 室には圧縮ガスが封入されており、ばねとしても作用する。

### 3. 材料の種類

前期の創造設計第一ではロボットの材料として木材を多用していた。木材は軽いわりに強く、加工が簡単だからである。しかし、「見よう見まね」サンプルメカ程度に、ベアリングや回転軸等の部品の相対位置を 0.1mm 単位で決めようとする、木目の粗い木材では精度を出

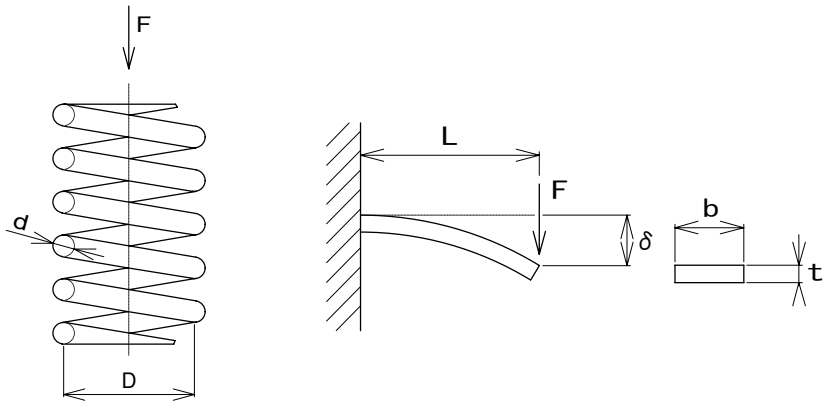


図 9 コイルばねと板ばねの力と変形

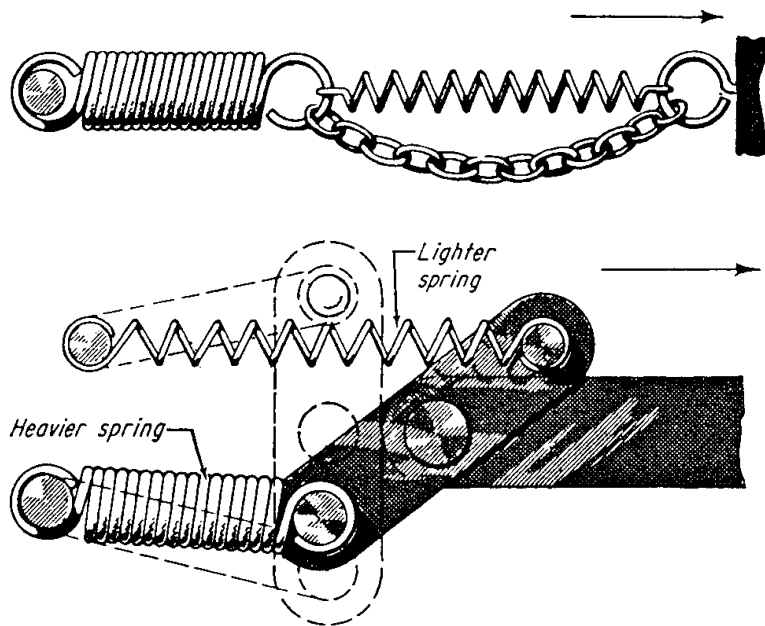


図 10 ばねの張力可変機構の例

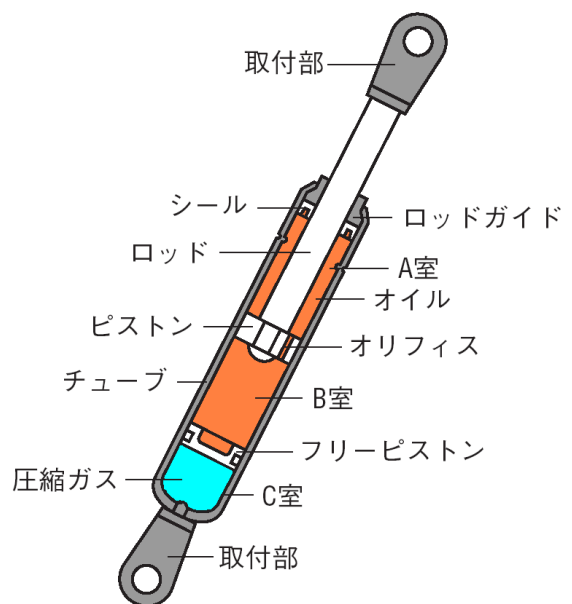


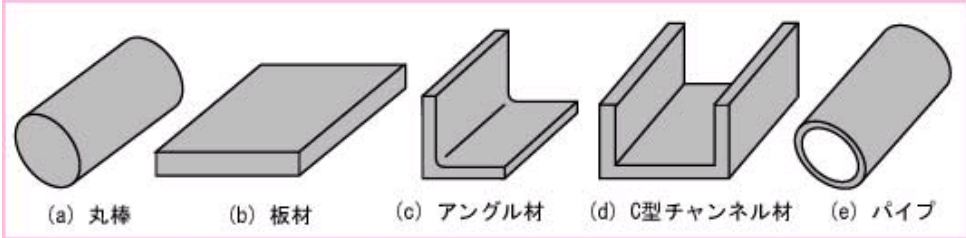
図 11 ダンパ(ガススプリング)の構造



すのが難しくなるし、強度を確保するために部品が分厚く大きくなってしまふ。そこでロボットの材料として、均質で部品の寸法精度を出しやすい金属やプラスチック類を用いる機会が増えてくる。金属やプラスチックにもいろいろな種類があり、目的によって材料を使い分けることが必要である。サンプルメカの金属部品でも、長く軽く作りたいアームにはアルミニウム、ロボット全体の重さをしっかり支えたい回転軸には鉄が使われている。

表 1 にロボットの構造材として使えそうな代表的な材料と、市販されている材料の主な形状を示す。アルミニウムの比重は炭素鋼(鉄)の 3 分の 1 程度で、軽く作りたい部品に向いているが、剛性(ヤング率)も鉄の 3 分の 1 程度である。つまり、鉄より 3 倍「しなりやすい」ということである。プラスチックは加熱するとやわらかくなる熱可塑性樹脂と、逆に加熱にすると硬くなる熱硬化性樹脂に分類できる。熱可塑性樹脂は機械加工すると材料が溶けて変形したり、刃物にくっついてしまったりするので注意が必要である。

表 1 主な材料の種類

金属材料	
炭素鋼	(比重 7.8g/cm <sup>3</sup> 、剛性(ヤング率) 200GPa、引張強度 600MPa)
アルミニウム	(2.7g/cm <sup>3</sup> 、70GPa、110MPa)
ジュラルミン	(2.8g/cm <sup>3</sup> 、70GPa、600MPa)
黄銅(真鍮)	(8.9g/cm <sup>3</sup> 、110GPa、500MPa)
ステンレス	(8.0g/cm <sup>3</sup> 、200GPa、600MPa)
合成樹脂	
熱可塑性樹脂	
ポリエチレン・ポリプロピレン・塩化ビニル・フッ素樹脂・ABS 樹脂・アクリルなど	
熱硬化性樹脂	
フェノール樹脂(ベークライト)・エポキシ樹脂など	
複合材料	
繊維強化プラスチック(FRP)など	
(炭素繊維樹脂：比重 1.6g/cm <sup>3</sup> 、剛性 100GPa、引張強度 2500MPa)	
市販されている材料の主な形状	
	
(a) 丸棒	(b) 板材
(c) アングル材	(d) C型チャンネル材
(e) パイプ	

#### 4. 設計の手順

マシンの概念設計(M1「リンク機構」参照)と使うべき機械要素が決まったら、詳細設計に進む。機械製図の細かなルールは M3 機械製図で追って勉強することにして、まずは機械要素やさまざまな部品が組み立てられられた姿の概略を、試行錯誤しつつ、方眼紙上に寸法を考えながら描いていってみよう。このときの思考の流れがまさに「設計」の基本である。既成の機械要素を使ってマシンを設計するときの思考の流れの例を、図 12 のサンプルメカの設計例に沿って説明しよう。

- ① このメカの果たすべき目的は、「RC サーボでアームを回転させること」である。ならば、RC サーボの回転軸とアームをサーボホーンを介して接続すれば、アームを回転させられそうだと誰でも考える。だがこれだけでは、アームの先端にほんの少し力が加わっただけでアーム全体が斜めに傾いてしまい、ロボット全体の姿勢が安定しない、思ったとおりの動作を実現できない、RC サーボの回転軸に無理な力がかかって壊れる、ということになってしまう。
- ② それならば、アームの回転軸は RC サーボの出力軸とは別に準備し、アームをしっかり支持してやればよい。アームの回転運動をしっかり支持しつつ滑らかに回転できるようにするには、ベアリングを用いるのが良い。RC サーボと同軸で、2 個のベアリングをアームの上下面に描き加えてみる。
- ③ ベアリングと同径の回転軸を描き加えてみる。アームの高さ方向の位置を固定すると同時に回転軸をロボットの土台にしっかり固定したいので、軸は六角の段つきで先端に M6 ネジが加工されているものを既製品のカタログから選び、長さ等の寸法を決定する。
- ④ 最後に回転軸とアームに対して RC サーボを固定するためにアルミ L アンゲル材を使ったフレームを描き加えてみる。これならばアームはフレームに対してしっかり支持されつつ滑らかに回転でき、RC サーボは出力軸に余計な力を受けることなくトルクだけをアームに伝達できる。

以上のように、各 부품の機能をうまく発揮できるように組み合わせながら、方眼紙の上で部品の寸法を決定していけば詳細設計ができる。この例を参考に、自分のマシンの目的及び概念設計に適した機械要素を選び、オリジナルマシンを詳細設計してみよう。

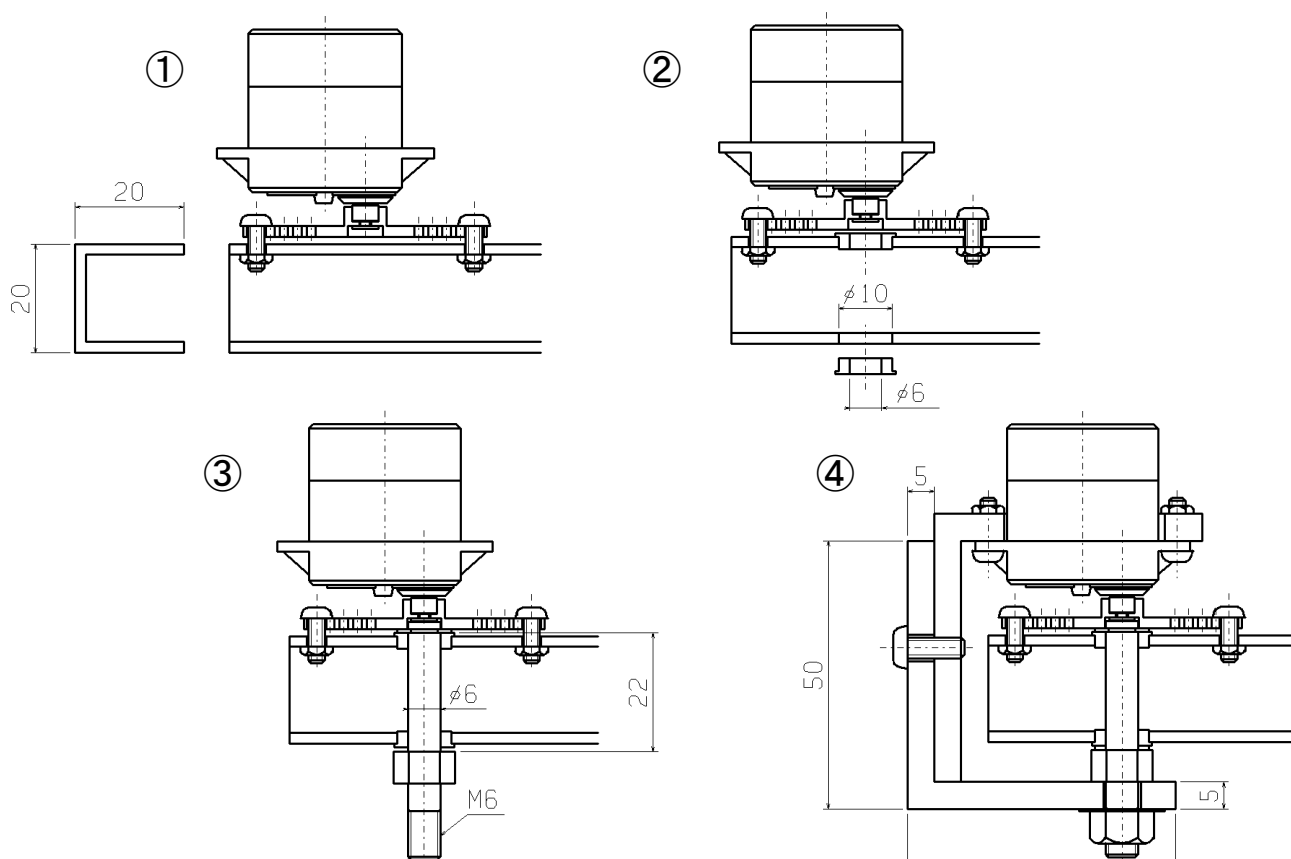


図 12 詳細設計の思考の流れ