

 第6回  
科学の甲子園 全国大会

# 実技競技③ 「ばんえい競走 in つくば」

## 解説



ばんえい十勝

## ばんえい競走とは

実技競技③「ばんえい競走 in つくば」のモチーフとなった「ばんえい競走」は、馬がそりを牽引しながら力と速さを争う競馬の競走で、北海道開拓期に木材を運び出していた馬の力比べに起源を持ちます。重い荷物を牽引する馬は輓馬（ばんば）と呼ばれますが、ばんえい競走では馬が鉄ソリを曳くことから「輓曳」（ばんえい）と表記されるそうです。ばんえい競馬は、明治



図1 坂を登るばんえい馬

の終わりごろから農耕馬の祭典として定着し、現在は、帯広市のみで開催されています。北海道が育てた世界でたったひとつの「ひき馬」競馬として、内外の注目を集めています。

ばんえい競馬は、全長 200 m、途中 2 ヲ所に障害（高さが 1.0 m 及び 1.5 m の坂）のある直線コースで競うレースです。牽引するソリの重量は、最高で 1 トンです。北海道で開催されることから、農耕馬として有名な「道産子（どさんこ）」のレースと思われがちですが、ばんえい馬のルーツはフランス、ベルギーと様々であり、現在の競走馬はこれらの馬の混血が主流になっています。ばんえい馬の体重は 1 トン前後で、平坦なコースで行われる平地競馬に用いられるサラブレッドの約 2 倍です。

ばんえい競馬オフィシャルサイト「ばんえい競馬とは」

[http://www.banei-keiba.or.jp/baneiguide/whats\\_banei.html](http://www.banei-keiba.or.jp/baneiguide/whats_banei.html)

## ペルチェ素子と熱電発電

ペルチェ効果とは、種類の異なる金属または半導体を接合し、電圧をかけて電流を流すと、接合点で熱の吸収や放出が起こる効果で、1834 年にフランスの物理学者ペルチェによって発見されました。ペルチェ素子とは、このペルチェ効果によって、電気で温度を制御する熱電素子で、小型の冷蔵庫や冷温庫などに用いられています(図2)。



図2 ペルチェ素子を用いた小型冷蔵庫

ペルチェ効果の逆の効果、つまり金属や半導体における温度差から電圧が発生する効果は、ゼーベック効果と呼ばれ、ペルチェ効果が発見される 13 年前の 1821 年に、ドイツの物理学者ゼーベックによって発見されました。このゼーベック効果により、ペルチェ素子は熱(温

度差)から電気を作る熱電発電モジュールとしても機能します。本競技では、ばんえい馬を模した4足歩行ロボットを駆動する電源として、ペルチェ素子を用いました。

半導体の熱起電力は金属よりもかなり大きいので、一般に熱電素子には半導体が用いられます。正電荷を持つホールが移動するp型の半導体と負電荷を持つ電子が移動するn型の半導体では、温度差を与えたときに発生する熱起電力の向きが逆になります。そこで、図3のようにp型及びn型の半導体をπ型に組み合わせて熱電素子を構成すると、発生する熱起電力がうまく足し合わされます。それでも、1対の熱電素子で得られる起電力は小さいため、熱電素子を電源として使用するには、数多くの熱電素子を直列につないだサーモ・モジュールに組み立てて利用されます。

熱電素子を用いた温度差発電技術は、工場、発電所、焼却炉や自動車などの排熱、地熱や温泉の熱などの未利用熱エネルギーを電気エネルギーとして利用するための手段として注目されています。また、熱電発電モジュールは可動部分が存在しないため、寿命が長く、長期にわたって保守作業を必要としないという利点もあります。熱電発電の発電効率は、現在のところ最高でも10%程度で、火力発電(40%~60%)やガソリンエンジン(20%~30%)に比べて低いですが、より高い発電効率を持つ熱電材料の研究開発が進められています。

### 保冷剤と発熱剤

本競技で低熱源として使用した保冷剤の原料は、ほとんどが水です。表1に示すように、水や氷は金属と比べて大きな比熱(その物質1gの温度を1℃上げるのに必要な熱量)を持ちます。これに加えて、氷は解ける際に1gあたり333Jという大きい融解熱を必要とします。これは、1gの水を約80℃にまで温めるのに必要な熱量です。水を用いた保冷剤の保冷効果は、水の比熱というよりも、この大きな融解熱によるものです。

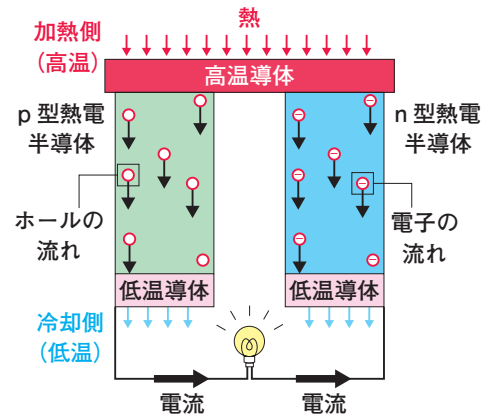


図3 熱電発電の原理

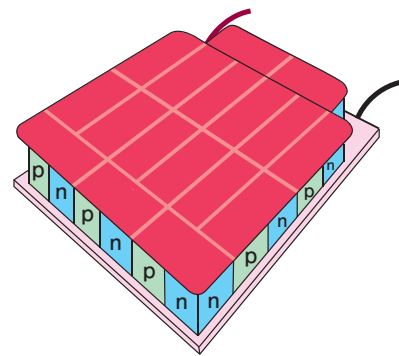


図4 熱電素子を直列に接続したサーモ・モジュール

物質	比熱 [J/K]
水	4.2
氷	2.1
アルミニウム	0.88
鉄	0.44
銅	0.38
銀	0.24
金	0.13

表1 様々な物質の比熱(0℃での値)

図5は、本競技で使用した保冷剤（小、30g）を冷凍庫（約-18℃）から取り出して室温（約20℃）に放置した際の温度変化を表しています。最初の10分間で速やかに氷の融点である0℃に達しますが、その後は約2時間にわたって0℃を維持します。この間は、周囲から奪う熱は氷の融解熱として使われます。融解熱として奪う熱量は、保冷剤の温度が-18℃から0℃に上がる際に奪う熱量（1gあたり38J）の約9倍です。保冷剤は溶けることによって大きな冷却効果を持つので

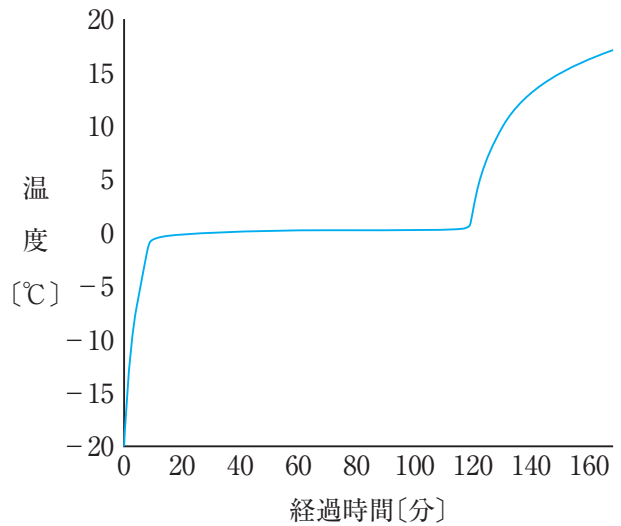


図5 室温に置かれた保冷剤の温度変化

本競技で高熱源として使用した発熱剤の主な成分は、生石灰（酸化カルシウム）とアルミニウム粉末です。生石灰は、乾燥剤としてよく用いられますが、水と反応すると以下の反応式により1gあたり1340Jの熱を発生するので、お弁当や缶飲料を温めるための発熱剤としても用いられています。



本競技で用いた発熱剤では、上記の反応で生成された水酸化カルシウムとアルミニウム粉末との2次反応により、最終的に1gあたり約4700Jの熱が発生します（製造元の資料による）。したがって、この発熱剤10gと水を反応させると、約47000Jの熱が発生し、これは-18℃に冷やされた保冷剤（氷）130gを完全に溶かすために必要な熱量に相当します。本競技で配布された大小の保冷剤の質量は、それぞれ50gと30gでしたから、どちらを（もしくは両方を）使用したとしても、発熱剤1個で完全に溶かすことができる計算になります。

### 電源車の製作について — ペルチェ素子による効率的な発電 —

試作・試走の結果を踏まえれば、本競技で鍵を握っているのは、電源車の製作、すなわちペルチェ素子による効率的な発電であると言えるでしょう。換言すれば、発熱剤と保冷剤によって大きな温度差を持続させる工夫です。発熱剤は水と反応して急速に高温になります。その状態で、発熱剤と保冷剤でペルチェ素子を両面から挟んで温度差を作っても、その温度差を持続させるのが困難です。その理由としては、発熱剤の発熱量が非常に大きいことやペルチェ素子の厚さが3.5mmしかないことが考えられます。一つの工夫としては、発熱剤に加える水の量を調節すること、熱伝導率の大きなアルミ板を加工して保冷剤の冷却効果を上げること、などが考えられると思います。図6は試作例です。



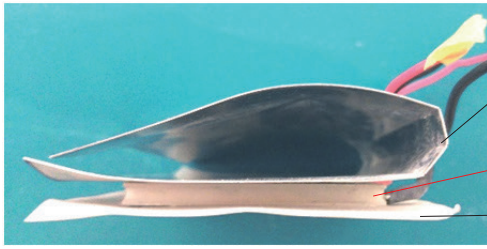


図6 アルミ板の活用例

アルミ板(厚さ 0.5 mm)  
上の面の弾力で、間に挟んだ保冷剤を下の面に押し付け、冷却効果を上げる。

ペルチェ素子

アルミ板(厚さ 0.5 mm)  
発熱剤に直接載せる。熱い蒸気を遮る効果もある。

#### 4 足歩行ロボットの機構

機械とは、歯車、チェーン、ベルト、カム、クランク等の機構(しくみ)によって、機械を構成する部品に伝えられた運動を伝達し、与えられたエネルギーを仕事に効率的に変換していく装置です。機械が動く機構を扱う学問は機構学と呼ばれ、機械工学の一分野を成しています。

現在から 200 年以上前の江戸時代(1796 年)に、細川半蔵頼直(通称からくり半蔵)が著した機械書、「機巧図彙(からくりずい)<sup>(1)</sup>」には、茶運(ちやくみ)人形の内部の機構(機巧：からくり)の図解があります。図7左は「機巧図彙」に載っている茶運人形の全体図であり、中央は内部の機構図です。右の図は足を前後に動かす機構ですが、ゼンマイ(鯨のヒゲ)の動力で偏心円盤Aが回転すると、Aを挟んでいる逆U字型の部品Bは左右に動き、Bに連結されている人形の足は前後に動くこととなります。また、左右の足の偏心円盤の位相を 180° ずらせば、左右の足は交互に前後に動くこととなります。ただし、足は接地しておらず、人形は左右の車輪によって動きます。茶運人形には、その他に発進と停止、おじぎ、方向転換などの様々な機構が備わっています。

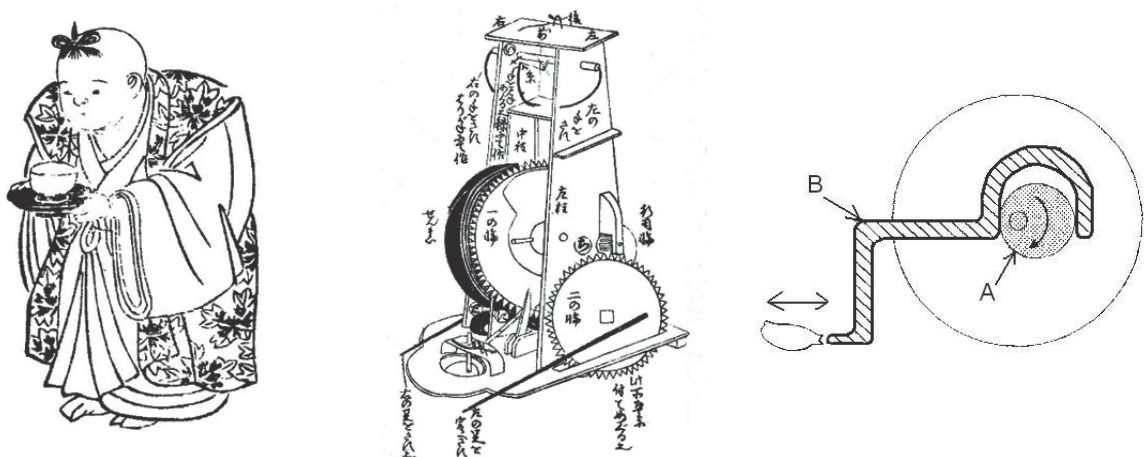


図7 茶運人形(左：全体, 中央：内部の機構, 右：足を前後に動かす機構)

茶運人形ほどの複雑な機構を考えるまでもなく、4足歩行ロボットは製作できると思います。規定に則った4足歩行ロボットを、市販のモーターとギヤボックス、それぞれ1個で製作する際に、モーターの動力をギヤボックスの出力シャフトに伝えるまでの機構で悩むのは、4通りあるギヤ比の選択くらいではないでしょうか。問題は出力シャフトの回転を4本の足すべてに伝える機構と、伝えた力で足の接地部分を動かしてロボット全体を進める機構を、それぞれどのように工夫して製作するかです。

事前公開資料では2種類のクランク機構<sup>(注)</sup>を紹介しましたが、出力シャフトからクランク軸までの長さ、リンクアームや足の長さ、リンクロッドの長さなど、部品の寸法だけ取り上げても未知数が多いため、実際に設計図を描くなどして、接地部分の動き(軌跡)を確認する必要があります。そうすると、どちらの機構でも接地部分の動きが、クランクアームに結合している足では楕円のような形になり、リンクロッドで動力を伝えられた足では、振り子のような往復運動をしていることに気づくと思います。

事前公開資料で紹介した、2種類のクランク機構を持つ4足歩行ロボットの試作機を図8に示しました。図8左の2本のリンクロッド(ゼムクリップを加工)のうちの1本は、クランク状に曲げられていますが、これは動きを観察しながらリンクロッドの長さを調節したためです。図5右は前足上部にスリットがあり、固定軸を挟んでスライドするようになっています。また、後足に動力を伝えるリンクロッドは1本です。

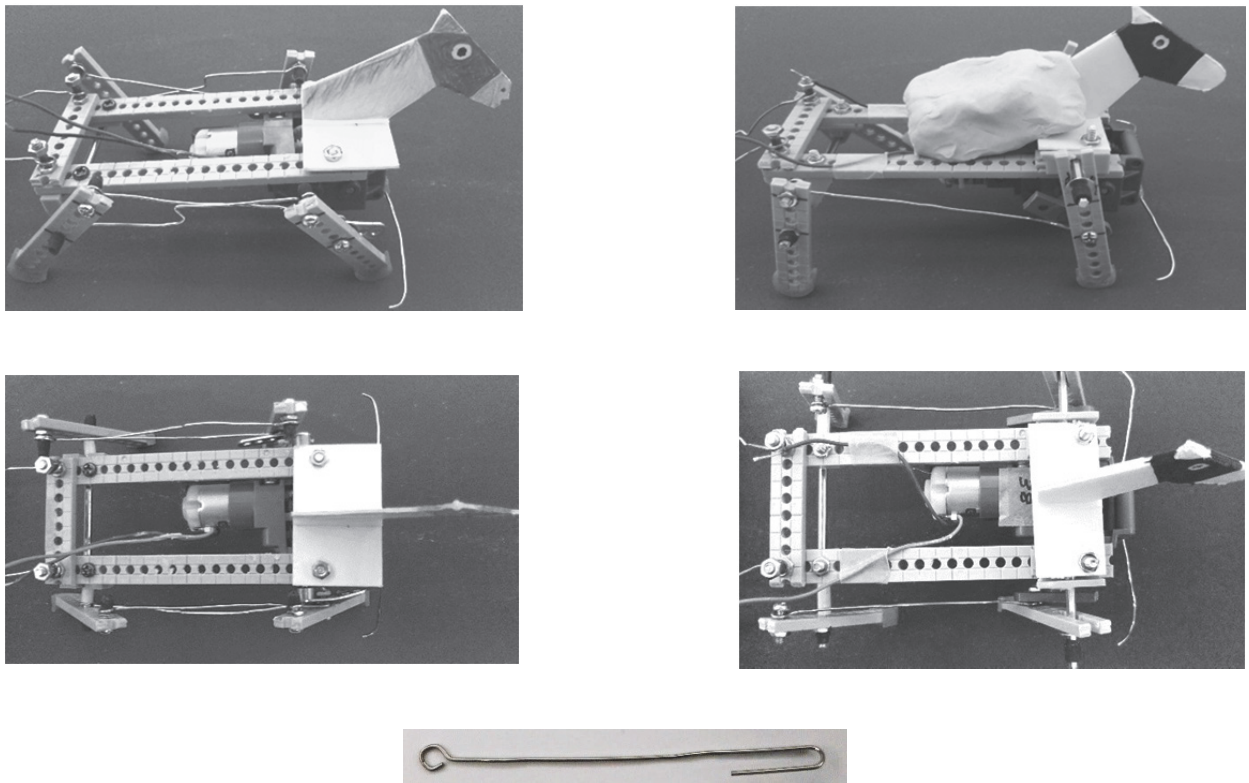





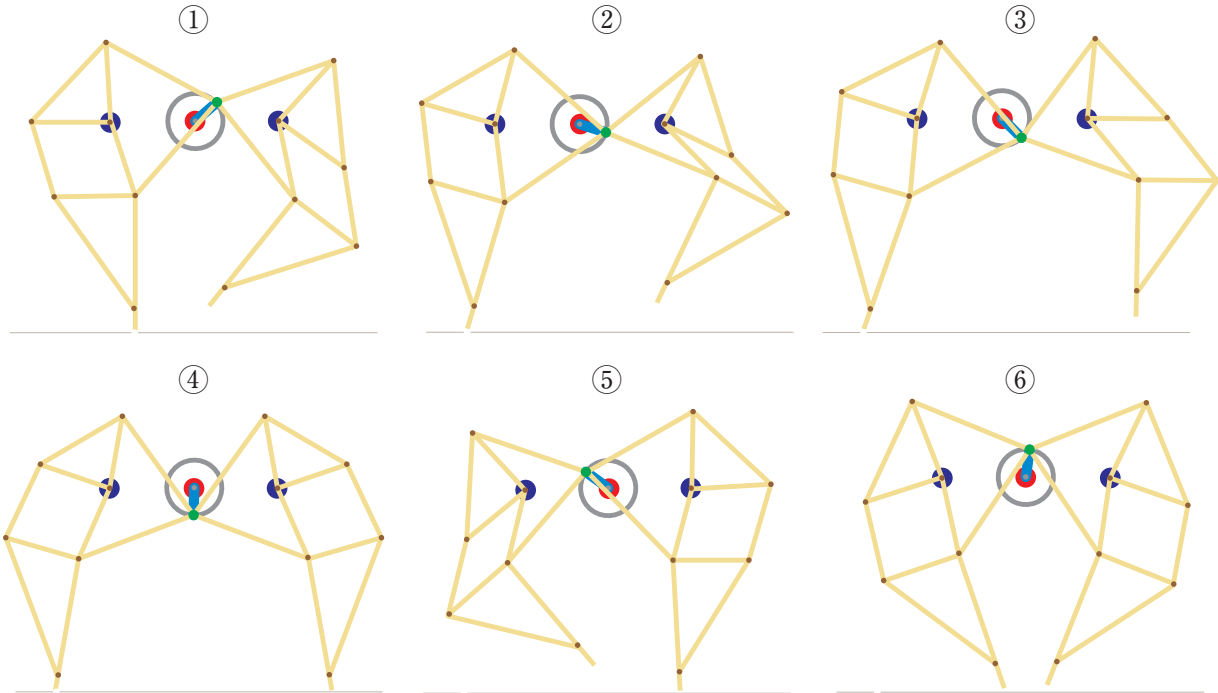
図8 試作機のクランク機構(左側：てこクランク機構，右側：スライダクランク機構)とゼムクリップで加工中のリンクロッド(中央下)

(注) 剛体の機械部品はリンク(結合)といい、ある軸周りに1回転できるリンクをクランクという。<sup>(2)</sup>


クランク機構には多くの種類がありますが、次に紹介する機構は、4足歩行ロボットにも応用できるのではないのでしょうか。

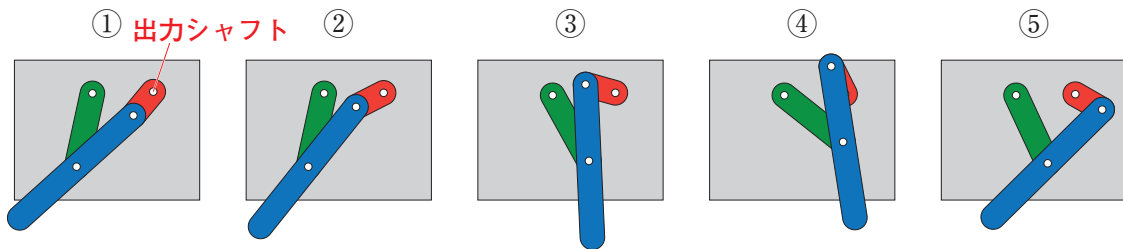
1. テオヤンセンビースト (Theo Jansen Strand beast) 機構<sup>(3)</sup>

クランクアーム  は時計回りに回転し、クランク軸  は出力シャフト(中央の ) の周りを円運動しています。足の先端の動きに注目してください。



2. チェビシェフリンク (Chebyshev Link) 機構<sup>(4)</sup>

出力シャフトの左右に足  を取り付けて位相差を  $180^\circ$  にすれば、2足歩行になります。残り2本の足に動力を伝えるにはどうすればよいか、考えてみてください。



引用文献

- (1) 菊池俊彦 (1976). 江戸科学古典叢書 3 機訓蒙鑑草 / 機巧図彙 恒和出版.
- (2) 重松洋一, 大高敏男 (2008). 機械系教科書シリーズ 23 機構学 コロナ社.
- (3) DVD で見る テオ・ヤンセン ストランドビーストの世界 学研教育出版.
- (4) かわさきロボット競技大会非公式 Wiki

<http://uemurakoubou.xsrv.jp/kawarobowiki/index.php?FrontPage>