

# おもしろ科学たんけん工房 アイテム交換会

## 実施報告

日時：2019年7月18日 13:30~17:00

会場：フォーラム南太田・大会議室

### 1. チリメン・モンスターをさがそう (神谷邦子)

ちりめんじゃこの中から小さな海の生物たち(稚魚や幼生など)を探して図鑑で調べ、コレクションカードを作る。海の環境や生物の多様性について関心を持ってもらったり、私達が生き物を食べていることの大切さを知ってもらう。

サンプル入手は和歌山県の株式会社「カネ上」から <https://www.kanejo.com/tirimon/tirimon.html> オンラインショッピングで可能。ただし、「食品」としての扱いではないので食べないこと。



ネイルアート用のレジン (セリアで入手) を使って、標本を封入したメダルを作ることができる。紫外線を当てて硬化させる。



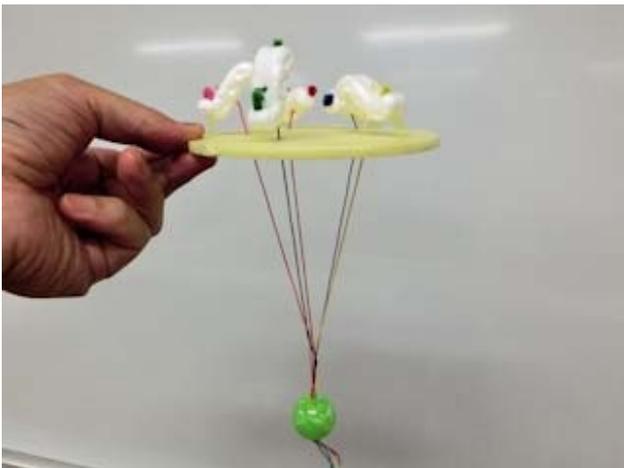
## 2. くるくるリングの針金撚り機 (島田祥生)

人気アイテム「くるくるリング」の軸の針金を、これまでは苦勞して手作りしてきた。これをハンドルを回すだけで、だれでも簡単に撚れる量産用ツールを開発した。各地区担当から注文殺到！



## 3. ニワトリの食事 (島田祥生)

ボールを揺らすと5羽の鶏が順にエサを啄む。戸田盛和著「おもちゃの科学・4」日本評論社(1995)pp85-86 にロシアのおもちゃとして紹介されているものを、手近な材料で作ってみた。殆ど百均の材料で作れる。本物は木製で、コツコツと啄む音をする。



## 4. 輝く北斗七星を作ろう LED とマイコンによる電子工作 (山本定)

マイコン、LED、ガーデンライトを用いた電子工作。

1. 実験：豆電球とLEDを電池にどのようにつなげば点灯するかをミニブレッドボードを使って回路を組みながら確かめる。LEDには極性があること、低消費電力であるが、ある電圧以上でないと点灯しな

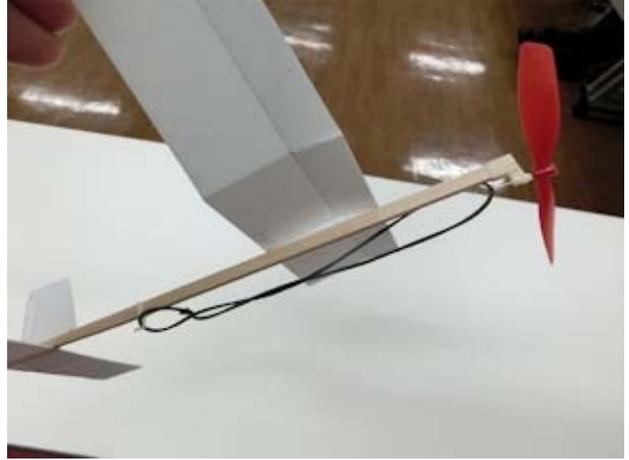
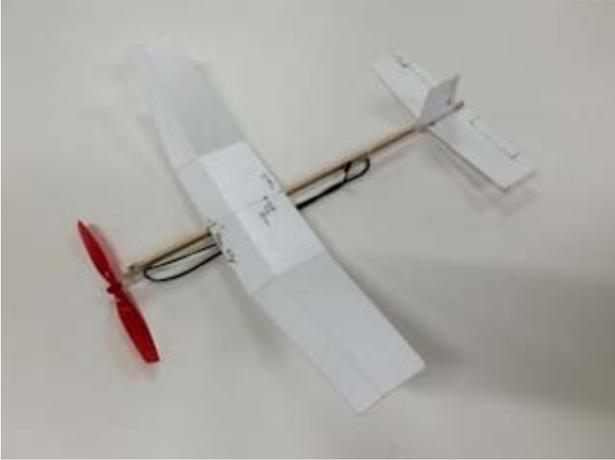


いことなどを実験で確認する。

2. 電子工作：センサーに手をかざすと北斗七星が輝く。詳細は後ろの資料を参照。

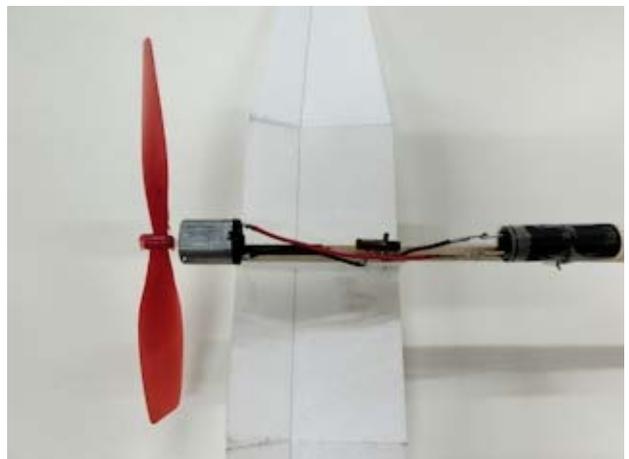
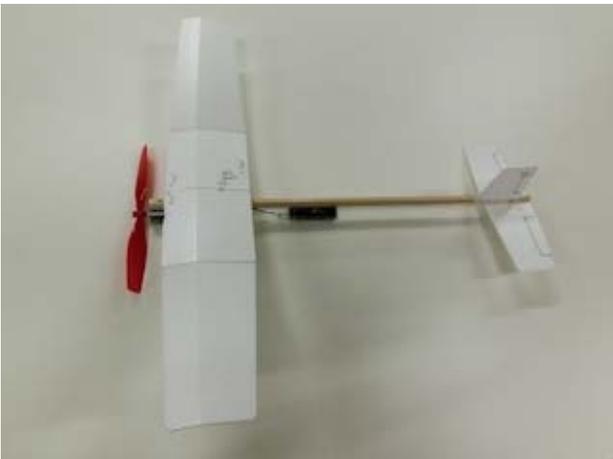
#### 5. ミニ・ミニプレーン (辻ただす)

身近で、安価で手軽に入手できる材料を用い、簡単に工作でき、狭い場所でも本格的な飛行を楽しめる、小型のゴム動力模型飛行機「ミニ・ミニプレーン」の提案。工作の難しい翼中央部と胴体接合部を簡略化し、加工が容易で強度の上がる△断面を採用した。主翼の取付角を $0^\circ$ とし、胴体への取付加工のばらつきを回避した。プロペラは市販の既製品を利用し、組み立てを簡略化した。



#### 6. イー・ミニ・プレーン (辻ただす)

ゴム動力フリーフライト機、ミニ・プレーンを下敷きにし、動力に小型のDCモーターと電源に軽量のケミコンを組み合わせて飛行できる「イー・ミニ・プレーン」の試み。ゴムと同じように、充電量（ゴムの巻き数）だけをトルクとして取り出し飛行が楽しめる、時流に乗ったフリーフライト機を模索した。現状、機体重量に比して推力が不足しているため改良を継続中。



## 7. 針金1本でも揚力? (柴田憲男)

ヒコーキの羽根の形状で得られる揚力の説明手法として、スプーンと水流の実験が使用されることが多いが、1本の針金をスプーン状に曲げたものでも、更に針金を直角に曲げたものでも、更にまた針金をわずかに“く”の字に曲げたものでも、同様の現象が起こる。

一方、前回報告したように、スプーンを撥水処理するとスプーンは吸い込みとは逆に、水に押されて逆方向に動く。スプーンの実験は片面が水、他面が空気と、飛行機とは状況も大きく異なり、揚力の説明としては適切でないと考ええる。

なお、竹とんぼの場合、翼型断面をもっているにもかかわらず迎角がないとよく飛ばない。



## 8. 揚力に関する文献情報の紹介 (山本明利)

揚力が発生する仕組みについて、さまざまな解釈と説明があって混乱するが、本当のところはどうか、子どもにはどう説明したらよいのか、を議論する材料として文献を紹介した。

物理学の世界では「クッタ・ジュコーフスキーの定理」として百年以上前にきちんと説明されているし、実験と整合することも確認されている。ただ、そのままは子どもには難しすぎる。

そこで、少し易しい言葉で説明しようとして、いわゆる「同着説」「ベルヌーイの定理説」「コアンダ効果説」そして「衝突説」のような、誤った、あるいは誤解を招きやすい説明が登場するが、ウソを教えないように気をつけたい。

高校生なら「流線曲率の定理」によるのが比較的わかりやすい説明になるだろう。あるいは、流線が全体として翼後方で下に曲がっていることから翼は気流全体から反作用を受けていると言ってもよい。流体の場を全体としてとらえる視点は大切である。

高木正平「なぜ翼に揚力が発生するか?・ベルヌーイの定理か流線曲率の定理か」日本機械学会誌 201004・Vol. 113 No. 1097 が参考になる。後ろの資料を参照のこと。

## アイテム交換会発表プログラム

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
1	20	体験出前	チリメン・モンスターを さがそう	神谷邦子	ちりめんじゃこの中の小さな生物たちをよく知ることで、海の環境や生物の多様性について関心を持ってもらったり、私達が生き物を食べていることから、食べ物の大切さを知ってもらう。
2	20	技術改良	くるくるリングの針金撚り機	島田祥生	ハンドルを回すだけで、だれでも針金を撚れます
3	20	簡単工作	ニワトリの食事	島田祥生	ボールを揺らすと、順に5羽の鶏がエサを啄みます。殆ど百均の材料で作れます。
4	15	体験出前	輝く北斗七星を作ろう LEDとマイコンによる電子工作	山本定	マイコン、LED、ガーデンライトを用いた電子工作
5	10	体験出前	「ミニ・ミニプレーン」	辻ただす	身近で、安価で手軽に入手できる材料を用い、簡単に工作でき、狭い場所でも本格的な飛行を楽しめる、小型のゴム動力模型飛行機「ミニ・ミニプレーン」の提案。
6	15	技術改良	「イー・ミニ・プレーン」	辻ただす	ゴム動力フリーフライト機、ミニ・プレーンを下敷きに、動力に小型のDCモーターと電源に軽量なケミコンを組み合わせて飛行できる「イー・ミニ・プレーン」の試みをまとめる。
7	15	技術改良	針金1本でも揚力?	柴田憲男	スプーンと水流の実験は、針金1本でも出来るが??
8	15	情報提供	揚力に関する文献情報の紹介	山本明利	揚力が発生する仕組みについて、さまざまな解釈と説明があって混乱するが、本当のところはどうか、子どもにはどう説明したらよいか、を議論する材料として文献を紹介する。

※当日、RikaTan誌の在庫整理品（新品）を無料で配布します。数に限りがあります。

### 次回予告

次回の会場は、9月19日(木)9:30～12:30 フクシア です。午前中ですのでご注意ください。

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要			
	20	体験出前	チリメン・モンスターをさがそう	神谷邦子	ちりめんじゃこの中の小さな生物たちをよく知ることで、海的环境や生物の多様性について関心を持ってもらったり、私達が生き物を食べていることから、食べ物の大切さを知ってもらおう。			
詳細説明 (別紙も可)		① 身近な食べ物である選別前のちりめんじゃこの中から小さな生き物（チリメン・モンスター）を探す。 ② 虫眼鏡、ルーペ、モバイル顕微鏡をつかって観察し、なかま分けをする。 ③ 図鑑やWebを使って、名前調べをして、チリモンカードを作成する。 ④ チリモンをレジンで固めて、標本のアクセサリーを作る。						
主な材料 (削除可)		材料	仕様	入手先	材料費	数量	備考	
		教材用ちりめんじゃこ	200g	カネ上	¥832			
		紙皿	18cmx30枚	セリア	¥108			
		製本用カバーフィルム	B5	島忠	¥650			
		速乾UVレジン	4 g	セリア	¥108			
		型（ミール皿）	25mm	Amazon	¥980			
		ボールチェーン	10本	ダイソー	¥108			
		飾り用シール・ラメ・砂		ダイソー	各¥108			
		つまようじ	500	ダイソー	¥108			
		チリモン図鑑シート	B4コピー		¥25			
必要な工具等 (削除可)		ピンセット・虫メガネ・ルーペ						
		モバイル顕微鏡			Life is small. Company	¥1,080		
		UV・LEDランプ		36W	Amazon	¥1,750		
		PC						
体験塾等を想定した所要時間	2時間	完成度（体験塾の場合・5段階）	4	備考・参考書等	チリモン図鑑( <a href="http://www.chirimon.jp/">http://www.chirimon.jp/</a> )、チリメンモンスターをさがせ！ /偕成社、チリメンモンスターのひみつ さぐれ! 海の生き物の暮らし/偕成社			



目的： 「チリモン探し」は、身近な食べ物であるチリメンジャコと、混じっている生き物を教材とする。それらを観察し、よく知ること、海の環境や生物の多様性、人間が生き物を食べていること、食べ物の大切さを知ってもらう目的で作られている。そして、何よりも子どもたちが夢中になるおもしろさがある

内容：

- 1 チリモン（ちりめんモンスター）を探そう
- 2 チリモンを観察してみよう
- 3 見つけたチリモンを分けて、コレクションカードにはろう。
- 4 見つけたチリモンを図鑑を使って調べてみよう。
- 5 チリモンの標本を作ろう



材料費概算：

		材料	サイズ	単価	1回使用量	使用個数	単価
消耗材料	チリモン探し	チリメンジャコ	200 g	¥832	3 パック	24	¥104
		紙皿	30枚	¥108	24枚	24	¥4
		製本用カバー	B4	¥650	24	24	¥11
		分別表・カード	A4	¥5	24枚	24	¥5
		チリモン図鑑	B4	¥25	24枚	24	¥25
チリモン標本	UVレジン液	4 g	¥108	24本	24	¥108	
	型	32枚	¥980	24個	24	¥31	
	ボールチェーン	10本	¥108	24	24	¥11	
	つまようじ	500本	¥108	48本	24	¥0	
	飾りシール	24枚	¥108	2パック	24	¥5	
	飾りラメ		¥108	2パック	24	¥9	
	飾りサンド		¥108	2パック	24	¥9	
小計①							¥321
参加者1人						①×1.25	¥401

		材料	サイズ	単価	1回使用量	使用個数	単価
使用機材	ピンセット			¥108	24本	24	¥108
	虫メガネ			¥108	24個	24	¥108
	モバイル顕微鏡			¥1,080	6個	6	¥270
	UVLEDライト			¥1,750	3個	3	¥219
	チリモン図鑑						¥0
小合計②							¥705
小合計② 10回使用で算出							¥71

管理運営費 D		¥300
---------	--	------

総合計	¥772
-----	------

## チリモン(ちりめんモンスター)を探そう

### 目的

ちりめんじゃこを食べていて、イカやタコなどが交じっていることがある。選別前のちりめんじゃこの中から小さな生き物を探し観察しよく知ること、海の環境や生物の多様性に関心を持ってもらう。生き物は食物連鎖を通して憩っていることから、食べ物大切さを知る食育にもなる。

「チリモン探し」は、身近な食べ物であるチリメンジャコと、混じっている生き物を教材とする。それらを観察し、よく知ること、海の環境や生物の多様性、人間が生き物を食べていること、食べ物大切さを知ってもらう目的で作られている。そして、何よりも子どもたちが夢中になるおもしろさがある

### 用意するもの

○選別前のちりめんじゃこ

：スーパーなどで売っているものは選別を経ていて他の生き物が少ないので、ちりめんじゃこを加工している工場から直接買うか、問屋さんから購入します。和歌山県産の海産物店「カネ上(じょう)」

○ピンセット

：「チリメン・モンスター」を取り分けるのに使います。

○虫眼鏡、ルーペ、顕微鏡(スマホ顕微鏡)

○チリモン図鑑

：参考書籍や、きしわだ自然友の会のウェブサイト「チリモン図鑑」を参考にします。

○紙皿や白い紙

：準備したチリモンをひろげるのに使う。

○選別したチリモンを載せる台紙・カード

：珍しいチリモンに出会ったら取っておきます。

○セロハンテープ

### 手順】

- 1 ちりめんじゃこをお皿、または紙の上に広げる。
- 2 ちりめんじゃこの中からチリモンを探し出す。
- 3 チリモンが見つかったらピンセットで、分別表の紙の上に取り出す。
- 4 見つけたチリモンを虫メガネやルーペを使って、じっくり観察する。
- 5 見つけたチリモンを魚のなかま、エビのなかま、などに分けて、コレクションカードにはる。
- 6 見つけたチリモンは何だろう？図鑑を使って調べてみよう。

### チリモンを観察してみよう

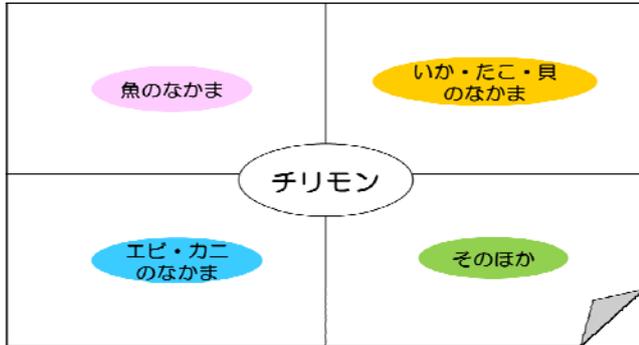
見つけたチリモンは いろいろな倍率のレンズで、いろいろな方向からじっくり観察しよう。

### 反射型モバイル顕微鏡のつかい方(バックカメラ編)

- 1 L-eyeレンズユニットを、バックカメラにのせる。
- 2 L-eyeレンズユニットとモバイル端末を、クリップで止める。
- 3 レンズユニットをサンプルに押し付ける。
- 4 写真を撮る。



チリモン分別表 B5判で作成



チリモンコレクションカード B5判で作成

### チリ・モン コレクションカード

1

2

3

4

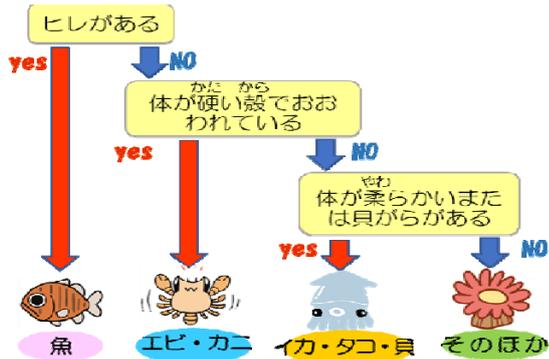
なまえ
なまえ
なまえ
なまえ

---

さがした日 年 月 日

なまえ

### チリモンのなかま分けをしよう



### チリモンのなかまたち

- 魚** 魚 : タイのなかま、アジのなかま、ヨウジウオのなかま
- エビ・カニ** せつそくどうぶつ 節足動物: カニ、エビ、シャコ、ゾエア (カニ・エビのなかまの幼生)、メガロバ (カニ・エビの幼生でゾエアが成長したもの)
- いか・たこ・貝** なんたいどうぶつ 軟体動物: タコ、イカ
- その他か** きょくひどうぶつ 棘皮動物: ヒトデ、ウニ  
しほうどうぶつ 刺胞動物: クラゲのなかま、タツノオトシゴのなかま

……などなど、とてもたくさんの種類の生き物がいます。

## チリモンの標本作り

### 型にUVレジンを流す前準備

- 型のほこりをしっかりとる
- デザインを考える
- パーツを封入する前に、形を整えておく



### 型にUVレジン液を流す作り方

- ① UVレジン液を型に流しこむ
- ② 型を動かし、UVレジン液を型全体に広げ、縁まで行き渡らせる
- ③ UVレジンに入った気泡をつまようじで取り除く
- ④ ラメなどのかざり、チリモンなどの封入物を入れる。
- ⑤ UVレジン液を硬化させる。太陽光で10分、UVLEDライトで2分
- ⑥ ①～⑤を繰り返し、最終の硬化は30分～  
流すレジンの量が多いと効果に時間がかかるので、3回くらいに分けて  
1回目はラメやカラーサンドなど、2回目はチリモン、3回目にはぷっくり  
となるようにレジン流すとよい。

UVレジン液を硬化させるには、「太陽光」か「UVライト」を使います。

それぞれの硬化時間は以下の通り。

- 太陽光（晴天時）：10～30分
- 太陽光（曇天時）：30～60分
- UVライト（9W）：15～30分
- UVライト（36W）：2～10分
- UVLEDライト（36W）：1.5～2分

太陽光は時間が掛かります。



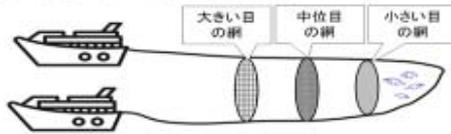
## わたし てもと く チリモンが私たちの手元に来るまで

### 1. 海からすくう

大きな網の目⇒中位の網の目⇒細かな網の目  
を通ったちりめんたちが、海からすくいあげられる。

### 2. 天日干し

太陽の下で乾燥させる。



### 3. 選別する

ゴミやちりめん以外のものをとりのぞく。

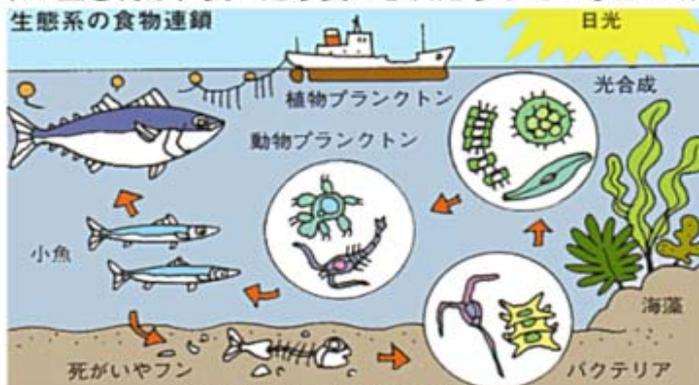
選別の方法・

- 風力 (重いものや軽いもの)
- 磁石の力 (金属)
- カメラ、人の目



## チリメン・モンスターと食物連鎖

海の中の生き物は、食べたり食べられたりしてつながっているよ



公益財団法人 日本海事広報協

うみと船なるほど豆辞典 海の自然のなるほど より

[https://www.kaijipr.or.jp/mamejiten/shizen/shizen\\_4.html](https://www.kaijipr.or.jp/mamejiten/shizen/shizen_4.html)

## チリメン・モンスターと食物連鎖

- 海の中にはものすごく小さい生き物たちがいっぱいいて、エサとして食べられることで小魚や大きな動物たちの生活を支えている。「食べる・食べられる」の関係でかわりあって、くらしている。
- 植物性プランクトンを動物性プランクトンが食べて、動物性プランクトンを小魚が、そして小魚を大きな魚が食べるということを、食物連鎖という。
- ちりめんじゃこの中には、そんな小さな生き物たち=チリメン・モンスターが隠れている。多くは動物プランクトンである。
- チリメン・モンスターがいなければ、私たちが食べる魚やほかの生き物もくれない。

# うみ まも チリモンたちのくらす海を守ろう

うみ よご 海が汚れると、たくさんのい ちの生き物がすむことができない。  
おせん 汚染されたい ちの生き物を、べつ い ちの生き物が食べることで、さらにおせんぶつしつ  
からだ なか が体の中にたまっていく。ひと うみ よご 人が海を汚していると、食物連鎖の頂点  
にんげん かえ がある人間に返ってくるんだよ。

チリモンたちたくさんの生き物がくらすことができるように、  
うみ だいじ まも 海を大事に守ろう。



公益財団法人 日本海事広報協  
うみと船なるほど豆辞典 海の自然のなるほど より  
[http://www.kaijipr.or.jp/mamejiten/shizen/shizen\\_4.html](http://www.kaijipr.or.jp/mamejiten/shizen/shizen_4.html)



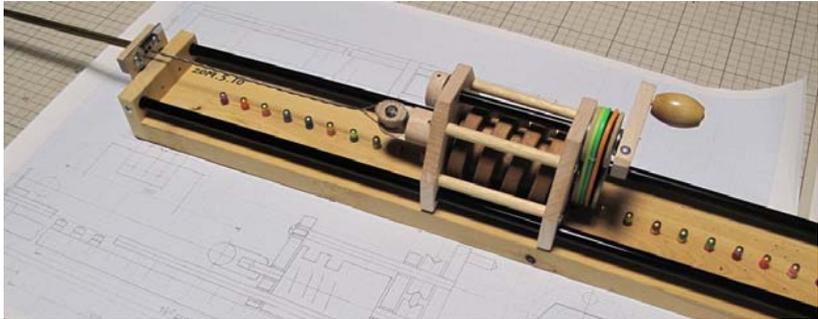
# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
	20	技術改良	くるくるリングの針金撚り機	島田祥生	ハンドルを回すだけで、だれでも針金を撚れます

詳細説明 (別紙も可)	<p>くるくるリングの針金撚りは、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①電ドルでは、撚り回数がばらつく</li> <li>②手撚りは、持ち替え回数を数えていなければならない</li> <li>③腕が痛くなる</li> <li>④針金によっては、焼きなましが甘く、均一に撚れないものがある</li> <li>⑤できれば、そのような硬い材料で作りたい</li> </ul> <p>ちょっとしたメカニズムの、撚り機を拵えてみました。</p> <p>購入品は、ドライベアリングとネジ程度。</p>	
----------------	--	---

主な材料 (削除可)	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	備考
		ドライベアリング			ダイドー工業		

必要な工具等 (削除可)							
-----------------	--	--	--	--	--	--	--

体験塾等を想定した所要時間	時間	完成度 (体験塾の場合・5段階)		備考・参考書等	
---------------	----	------------------	--	---------	--

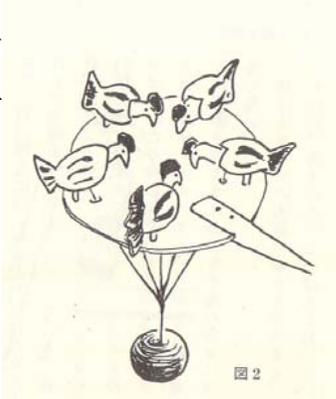
# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

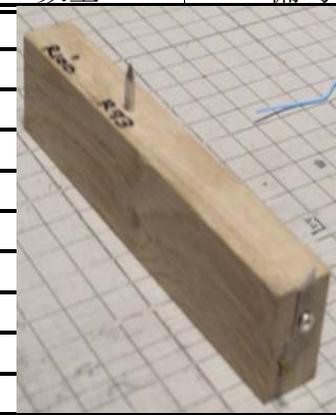
時間： 13:30~17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
	20	簡単工作	ニワトリの食事	島田祥生	ボールを揺らすと、順に5羽の鶏がエサを啄みます。 殆ど百均の材料で作れます。

詳細説明 (別紙も可)	<p>1995年発行の本に載っていて 手短の材料で作ってみました</p> <p>出来上がったその日に、 何と、久保田さんから、 写真が届きました。</p> <p>本物は、木製で、 コツコツと 啄む音がするようです。</p>			
----------------	---	--	---	---

主な材料 (削除可)	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	備考
		スチレンボード	5mm	DAISO			
		クッション材		ホームセンター			
		リリアン糸		DAISO			
		アイロンビーズ		DAISO			
		モール		DAISO			
		クリアホルダー		DAISO			
		両面テープ	10mm				
		スーパーボール	大	DAISO			



必要な工具等 (削除可)	特製サークルカッター						
体験塾等を想定 した所要時間	時間	完成度 (体験塾の 場合・5段階)	1 時間半	備考・参考書等			

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30~17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間(分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
15		体験出前	輝く北斗七星を作ろう LEDとマイコンによる電子工作	(北1) 山本 定	マイコン、LED、ガーデンライトを用いた電子工作

詳細説明 (別紙も可)	<p>1. 実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>豆電球とLEDを電池にどのようにつなげば点灯するか実験する。回路配線はミニブレッドボードを使う。 ⇒LEDには極性があること、低消費電力であるが、ある電圧以上でないと点灯しないことなどを実験で確認する。</li> </ul> <p>2. 電子工作</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>センサーに手をかざすと、北斗七星が輝く電子工作。</li> <li>詳細添付ファイル参照 (シート2)</li> </ul>	
----------------	---	---

主な材料 (削除可)	部品名	材料	仕様	入手先	材料費(円)	数量	備考
	青色LED		高輝度Φ5mm	秋月電子	20	7	
	マイコン		pic12F683	〃	120	1	
	ガーデンライト			ダイソー	108	1	
	ダイオード		1S1588		20	1	
	ミニブレッドボード	Rasbee	SY170	amazon	60	1	
	木台						
	R,C						
	黒画用紙						

必要な工具等 (削除可)							
-----------------	--	--	--	--	--	--	--

体験塾等を想定した所要時間	2時間	完成度 (体験塾の場合・5段階)	3	備考・参考書等	宮丸氏：電子ホテル、2018, 9, 5
---------------	-----	------------------	---	---------	----------------------

# 輝く北斗七星を作ろう！

## 青色LEDとマイコンを用いた電子工作

☆センサーに手をかざすと、北斗七星が輝きます。（夜間自動点灯）

☆点灯パターンがあらかじめプログラムされた数種類のマイコンを選ぶことができます。

星座の配置も自由にできます。

☆ガーデンライトには太陽電池パネル、明るさセンサー、昇圧回路が内蔵されておりこれらを有効に活用して安価にシステムを構成できます。

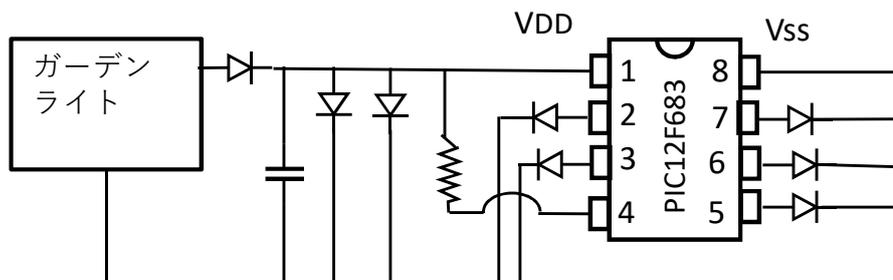
☆消費電力が少ない。単4電池1本（1.5V）で動作する。

### 主要部品

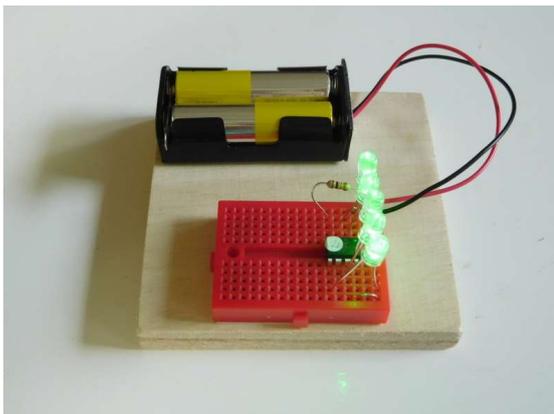
- ・青色LED（20¥/p）7個
- ・マイコンpic12F683(120¥)
- ・ガーデンライト（108¥）
- ・C 100 $\mu$ F
- ・R 10K $\Omega$
- ・ダイオード1S1588
- ・プリント基板
- ・木台
- ・配線
- ・プラスチックボード、黒画用紙



回路図



### 実験用ブレッドボード



### プログラム開発環境

- ・ MICRO CHIP MPLAB IDE V8.84
- ・ EEPROM Writer K150(750¥)

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
10	体験出前	「ミニ・ミニプレーン」	辻 ただす	身近で、安価で手軽に入手できる材料を用い、簡単に工作でき、狭い場所でも本格的な飛行を楽しめる、小型のゴム動力模型飛行機「ミニ・ミニプレーン」の提案。

詳細説明	<p>*機体の仕様と構造</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主翼：面積1.27dm<sup>2</sup> 翼幅2.8dm スチレンペーパー1.0mm厚、翼端上反角、三角断面翼、取付角0°</li> <li>・尾翼：水平0.46dm<sup>2</sup> 垂直0.11dm<sup>2</sup> スチレン1.0mm厚、翼型フラット、取付角-2.5°</li> <li>・胴体：全長250mm x 幅3.0mm x 高6.0mm、バルサ材</li> <li>・動力：□1.0mm x 長360mm、糸ゴム2条掛け、プロペラ径100mm (シャフトなど市販セット)</li> <li>・重量：4.0gr (含動力ゴム)</li> </ul> <p>*特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・工作の難しい翼中央部と胴体接合部を簡略化し、加工が容易で強度の上がる△断面を採用した事。</li> <li>・主翼の取付角を0° とし、胴体への取付加工のばらつきを回避した事。</li> <li>・プロペラは市販の既製品を利用し、組み立てを簡略化した事。</li> </ul> <p>*体験塾で伝えたいこと</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・空気より重い飛行機が飛ぶのはなぜか？</li> <li>・主尾翼、プロペラはどんな働きをするか？</li> <li>・自分の作った飛行機を飛ばすのが楽しいこと！</li> </ul>	

主な材料	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	1機あたり価格
	主尾翼	スチレン	1.0mm厚	一般文具店	¥680/B4-5枚	¥136/1枚-3機	¥45
	プロペラセット	樹脂	内径3x6mm	コトブキ	¥1155/10 s		¥115
	ペラシャフト	ピアノ線	0.6mm	コトブキ	¥399/8本	¥50/1本	¥50
	胴体	バルサ	3x60x600mm	木村バルサ	¥170/1枚	1枚/18本-加工	¥10
	動力ゴム	ゴム	1mm角断面	スタジオミド	¥864/10M	360mm/1機	¥30
							¥250/1機

体験塾等を想定した所要時間	約3時間	完成度 (体験塾の場合・5段階)	4	備考・参考書等	野中繁吉著「室内模型飛行機」誠文堂、その他
---------------	------	------------------	---	---------	-----------------------

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30~17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
15	技術改良	「イー・ミニ・プレーン」	辻 ただす	ゴム動力フリーフライト機、ミニ・プレーンを下敷きに、動力に小型のDCモーターと電源に軽量なケミコンを組み合わせて飛行できる「イー・ミニ・プレーン」の試みをまとめる。

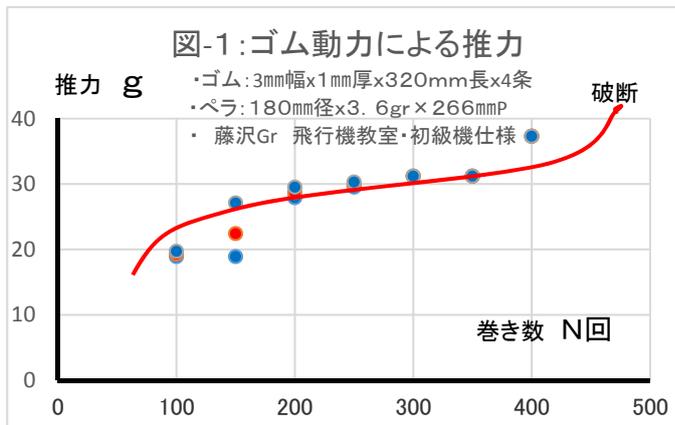
<p>詳細説明 (補足資料あり)</p>	<p>*機体の仕様と構造</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・主翼：面積1.27dm<sup>2</sup> 翼幅2.8dm スチレンペーパー1.0mm厚、パラソル型、翼端上反角、△断面翼、取付角0°</li> <li>・尾翼：水平0.33dm<sup>2</sup> 垂直0.11dm<sup>2</sup> スチレン1.0mm厚、翼型フラット、取付角-2.5°</li> <li>・胴体：全長250mm x 幅3.0mm x 高6mm、バルサ材</li> <li>・動力：DCカーボンマイクロブラシモーター、電気二重層コンデンサー10F2.5V、樹脂製プロペラ径100mm</li> <li>・重量：12.7gr (含モーター、コンデンサー)</li> </ul> <p>*特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・動力をゴムから、小型軽量のモーターと軽いケミコンの組み合わせに交換。考えたことは、ゴムと同じような出力を、充電量（ゴムの巻き数）だけをトルクとして取り出し、飛行が楽しめる、時流に乗ったフリーフライト機を模索した。</li> <li>・機体側は、主翼に翼台を新設して、飛行安定性の向上を図った。</li> </ul> <p>*現状</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・全備重量から見て推力は15gr程度が良いと思われるが、この動力系では2Vで4gr程度とかなり不足。30%程度では水平飛行がやっと！試験継続中！</li> </ul>	
--------------------------	---	--

主な材料	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	1機あたり価格
	主尾翼	スチレン	1.0mm厚	一般文具店	¥680/B4-5枚	¥136/1枚-3機	¥45
	ペラ改造セット	樹脂	改造軸受内径3x6	コトブキ	¥1155/10 s		¥115
	胴体	バルサ	3x60 x 600mm	木村バルサ	¥170/1枚	1枚/18本-加工	¥10
	動力	DCモーター	GWS製	秋月電子	¥475/5個	¥95/1個	¥95
	電源	ケミコン	10F2.5V	秋月電子	¥1080/4個	¥270/1個	¥270

体験塾等を想定した所要時間	時間 未	完成度 (体験塾の場合・5段階)	2	備考・参考書等	田中光一著「みんなで作ろう インドアー・プレーン」CQ出版社 その他
---------------	------	------------------	---	---------	------------------------------------

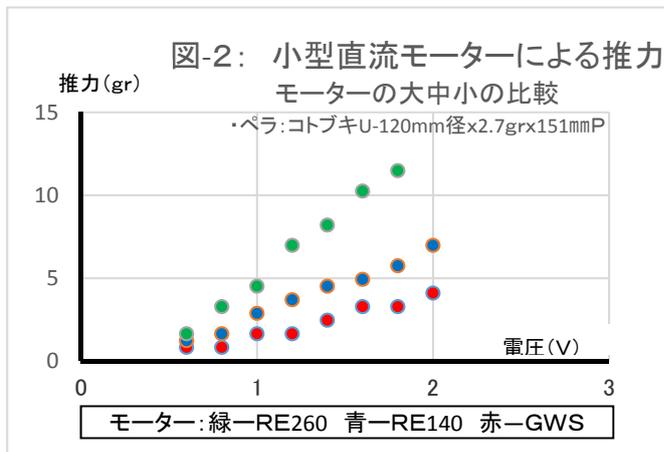
**前置き** すでに世の中では、動力にモーターを使用した模型飛行機は古くから飛行をしており、新規性のあるものではありません。今回は、科学体験塾用のゴム動力の室内自由飛行型の提案を、そのまま利用し、小さなモーターと軽いコンデンサーを使って飛行させようと試みたものの紹介です。

**ゴム動力** 一般に、ゴム動力飛行機の、ゴム巻き戻りによるプロペラ推力は、図-1に示すように、平均推力の持続時間が長く、機体の設計に即した適切なプロペラ仕様とゴム束を組み合わせると、目的に適う良い飛行が出来ます。



: 註記:  
藤沢Grでの初級機は24. 3gr、単純な比較をすれば、対象機は12. 7grで約半分のため、推力は最低でも10gr程度、目的に適うためには15gr以上の推力が望ましい。

**モーター** 単純にモーターにゴムと同様のペラを装着して推力を計測すると、図-2のようになった。



: 註記:  
モーター自重は緑28. 0gr、青18. 9gr、赤GWS6. 7grで、推力は電圧に比例する。2VでGWSは僅か4grの推力しか得ることが出来ず、ケミコンでは持続時間も短かった。

- 課題**
- ① 目的とするゴムの巻き数Nとトルクまたプロペラとの組み合わせによる推力を調べなおす事。
  - ② 目的推力が得られるペラ(径とピッチ)、回転数、電圧を探す事。
  - ③ 適正なケミコンを探し、充電時間(ゴムの巻き数に相当する)と放電電圧の関係を調べる事。
  - ④ 動力系の重量配分と機体のデザインを適正にする事。
  - ⑤ 動力系も含め、より軽量化を図る。

以上

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム（南太田）

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
	15	技術改良	針金 1 本でも揚力?	柴田憲男	スプーンと水流の実験は、針金 1 本でも出来るが??

<p>詳細説明 (別紙も可)</p>	<p>ヒコーキの羽根の形状で得られる揚力の説明手法として、スプーンと水流の実験が使用されることが多いが、                      1本の針金をスプーン状に曲げたものでも、更に針金を直角に曲げたものでも、更にまた針金をわずかに“くの字”に曲げたものでも、いずれも同様の現象が起こる。                      更にスプーンを横にして、スプーンの縁に水を流してもスプーンは横に動く。                      一方、前回報告したように、スプーンを撥水処理するとスプーンは吸い込みとは逆に、水に押されて逆方向に動く。</p> <p>つまりこのスプーンの実験は、水の表面張力によって吸い込まれる力と、その結果水流の方向を変えることによる水の反作用による力の2つの力の合成によるもので、決して揚力ではないことが確認された。                      スプーンの実験は揚力の説明として適切でないと考える。</p>						
<p>主な材料 (削除可)</p>	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	備考
<p>必要な工具等 (削除可)</p>							
<p>体験塾等を想定した所要時間</p>	時間	完成度 (体験塾の場合・5段階)		備考・参考書等			

## スプーンと水流関連各種実験

2019.07.17 柴田

- ◆ 水道から流れる水にスプーンを当てると水流に引き込まれる。おなじみの揚力実験
  - ★片面にだけ水流で、もう片面は空気。こんな世界は船にはあっても、飛行機にはない
  
- ◆ スプーンを撥水処理すると —— 揚力現象が無くなる …… 逆方向に動く
  - 水流に吸い込まれず、逆に水にはじかれる
  - ★表面張力が働かないと、上記の現象は無くなる
  
- ◆ 揚力現象が起こる実験各種 …… スプーンなどが水流に吸い込まれる
  - スプーンを横にしてその縁に水流を当てる
  - スプーン型に切りとった平らなプラスチック板
  - スプーン型に曲げた針金
  - 直線の針金をクランク状に曲げた
  - 直線の針金をくの字に曲げた
  - ★その方向に曲面が無いのに、水に吸い込まれる
  
- ◆ 翼型断面で水平の竹トンボを作ってみた
  - どんなに強く回しても、浮上はしない、落下速度は遅くなりゆっくり落ちる
  - 強く回したときの外周の速度は200Km 程になるがそれでも浮上はしない
  - ★つまり揚力は有るが、支配的に大きくはない様だ
  - もし揚力が支配的に大きいとすれば、背面飛行はあり得ない
  
- ◆ 参考
  - 飛行機の羽は下面が平らだが、鳥の羽は下面も上面とほぼ同じ曲面でうすく、飛行機とは違う

# アイテム交換会エントリーシート

実施日： 2019年7月18日

時間： 13:30～17:00

会場： フォーラム南太田・大会議室

No	発表時間 (分)	分類	タイトルまたはアイテム名	提案者	概要
	10	情報提供	揚力に関する文献情報の紹介	山本明利	揚力が発生する仕組みについて、さまざまな解釈と説明があつて混乱するが、本当のところはどうか、子どもにはどう説明したらよいか、を議論する材料として文献を紹介する。

詳細説明 (別紙も可)	次の文献は、揚力の発生機構の説明の諸説について、包括的に解説されており、信頼すべき内容と考える。  高木正平「なぜ翼に揚力が発生するか?・ベルヌーイの定理か流線曲率の定理か」 日本機械学会誌201004・Vol. 113 No. 1097 (別紙資料参照・マーキングは山本)  次のサイトで紹介している実験動画 (Youtube) や説明も参考になる。  一般社団法人 日本機械学会 流体工学部門 Home > 活動内容 > 楽しい流れの実験教室 > 翼の原理 <a href="http://www.jsme-fed.org/experiment/2010_2/002.html">http://www.jsme-fed.org/experiment/2010_2/002.html</a>  これらの文献に目を通した上で、「揚力」を子どもにどう解説すべきかについて議論したい。
----------------	--

主な材料 (削除可)	部品名	材料	仕様	入手先	材料費	数量	備考

必要な工具等 (削除可)	
-----------------	--

備考・参考書等	<a href="http://www.wattandedison.com/JSME-Takagi.pdf">http://www.wattandedison.com/JSME-Takagi.pdf</a> <a href="http://www.jsme-fed.org/experiment/2010_2/002.html">http://www.jsme-fed.org/experiment/2010_2/002.html</a>
---------	--



# なぜ翼に揚力が発生するか？

## —ベルヌーイの定理か流線曲率の定理か—

### How do Wings Generate Lift

#### —Bernoulli Theorem or Streamline-Curvature Theorem—

#### 執筆者プロフィール



高木 正平  
Shohei TAKAGI

- ◎1978年東京大学大学院工学系研究科航空学専攻博士課程修了，博士（工学），2009年宇宙航空研究開発機構を退職し，現職。
- ◎研究・専門テーマは，境界層遷移，流れの制御
- ◎室蘭工業大学教授 航空宇宙機システム研究センター  
(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1/  
E-mail : pantaka@mmm.muroran-it.ac.jp)

## 1. はじめに

ジャンボジェット機よりさらにひと回り大きいエアバス社の最新旅客機 A380 の最大離陸重量は 560t である。この重量を数字だけでイメージすることは難しいが、次のようなたとえで考えればその数字の大きさが描ける。JR 東海の 700 系新幹線は 16 両編成で総重量 708t であることから、12~13 両編成の車両が空を飛んでいる計算になる。左右の主翼がその大部分の揚力発生を担い、主翼 1m<sup>2</sup> 当たり 660kg の揚力が発生している。このような想像を超える揚力を生み出す翼の仕組みに多くの人々が関心と疑問を抱くのもごく自然である。それゆえ、しばしば翼の揚力に関する話題が取り上げられ、インターネットのホームページでも閲覧できる<sup>(1)</sup>。

ポテンシャル流と等角写像を用いた古典的な Kutta-Joukowski (K-J) 定理では、**揚力を発生している翼はそれを取り囲む循環を持ち、Kutta の条件あるいは Joukowski の仮定（以下、Kutta の条件）を翼の後縁に課せば、そこから求まる循環値は揚力に比例して実験とよく整合すること**が示されている。すなわち、歴史的には 100 年前にこの K-J 定理で揚力の発生機構は言い尽くされているわけである。ただ、問題なのはこの定理は翼を含めて物体の周りになぜ循環が発生するかについて何も示していないことであろう。それゆえ、この循環の発生について、「翼を取り巻く時計方向に回転する大きな渦が存在」する、といった説

明がなされているが、では「なぜそのような渦が作られるか」と切り返されると、たちどころに答えに窮してしまう。そこで本論ではこの「**循環、すなわち揚力が発生する条件とは何かを整理し、その結果として揚力が発生した物体周りの流線に着目する。そして、「流線と揚力の関係」について可能な限り平易な解説を試みることにする。そのため前提となる流体の性質について以下に確認しておきたい。**

K-J 定理は、自明のように対象とする流れは非粘性流であるが、Kutta の条件は流体が粘性を持つことを暗黙に仮定している。そして、Kutta の条件は唯一つのポテンシャル解を与え、実測と整合するという意味で確かに重要である。しかし、たとえば後縁に鋭い角を持たない翼でも揚力は発生する事実を鑑みると、揚力の発生原理そのものを理解するうえでそれほど重要視する必要はなさそうである。また、流体粘性は十分大きなレイノルズ数の流れにおいては物体のごく近傍のみに影響を及ぼすのであって、揚力発生に直接かかわる流体の加速・減速になら影響を与えない。以上の流体の性質を理解すれば、渦度 (vorticity) や剪断 (shear) といった流体力学の難しい部分に足を踏み入れることなく、本課題の根本原理についてはポテンシャル流で十分説明できることが期待される。このような前提の下で、K-J 定理を中心に再考するが、すでに多くの流体力学のテキストに記述されているので引用する式は最小限に止め、揚力発生に不可欠な「循環」が発生する条件に着目する。

循環発生条件から直ちに揚力の発生機構を解説することは難しい。この解説こそ本論に課された最重要課題である。たとえば、静止した翼が急激に動き出した際に翼後縁から放出される出発渦 (starting vortex) と、翼に取り残された出発渦と逆の循環を持つ渦から揚力の発生が説明されているが、Kelvin の渦不生不滅の原理の仮定や、渦と循環との関係など一般向けの説明には不向きである。また、従来から揚力の発生にしばしば引用されるベルヌーイの定理は、エネルギー保存式であり、「翼上面に沿う流れは下面のそれより速い」といった条件のもとで初めてその威力が発揮されるが、この条件の正当性をどのように保証するかが大きな問題であった。そこで本論では、**循環が発生している翼を回り込む流線の曲がりに着目する。すなわち、湾曲した流線に沿う流体粒子の向心力とこれに見合う圧力こう配**

の関係から直接揚力の発生原理を説明するもので、ベルヌーイの定理のような付加条件を要求しない。

## 2. クッタ・ジューコフスキーの定理

### 2.1 循環を伴う円柱周りの流れ

一様流速の中に静止した円柱周りの流れは、流れの粘性を考えなければ、複素ポテンシャル理論を用いて解析的に解くことができる。この円柱が時計方向に回転している場合は、円柱とさらにその中心に渦度が集中した渦糸を配置すれば、円柱周りの流れを解析的に記述することもよく知られているところである。この渦糸の循環の強さを  $\Gamma$  (反時計方向を正にとる) とし、一様流速を  $U$ 、半径  $a$  の円柱中心を通る水平軸と円柱最下流端から時計方向に回転角  $\theta$  をとるならば円柱表面の速度  $v_\theta$  は、

$$v_\theta = -2U \sin\theta - \frac{\Gamma}{2\pi a} \quad (1)$$

である。図1には、一様速度  $U=1$  の流れの中に、半径が1の円柱とそれが回転していない場合  $\Gamma=0$  と  $\Gamma=2\pi$  で回転している場合の流線を描き、両者を比較したものである。円柱の前後に流れの速度が0となる特異点、すなわち二つの淀み点が存在し、 $\Gamma=0$  の場合円柱の中心軸上に存在するが、円柱の回転によって、淀み点位置は円柱の中心軸より下方へ移動する。その位置は、本条件では(1)より  $v_\theta=0$  とすることで、 $\theta_s = -30^\circ$  と求められる。 $\Gamma=0$  の場合、前方の淀み点から直角の位置  $\theta = \pm 90^\circ$ 、すなわち円柱の最も厚くなる位置において流れは一様速度の2倍に加速されることは式(1)で明らかである。この事実は、図1(a)の  $\theta = \pm 90^\circ$  で円柱と流線  $\psi = \pm 0.4$  の間隔が円柱の影響が及ばない上下流の流線間隔の半分である事実からでも確認できる。当然のこととして、流れは連続の式を満足しているわけである。円柱近傍の流れが加速されることによって、ベルヌーイの定理によれば円柱表面の圧力は遠方の圧力よりは低くなるが、円柱周りの流れは上下対称であることから揚力は働かないことは明らかである。

一方、円柱が回転している場合には、円柱の上方では円柱回転の方向が流れと同じであることから流れはさらに加速され、下方では円柱回転が逆に作用するために減速される。流れの加速減速の様子は流線の間隔からも明瞭であり、注目すべき点は円柱回転によって流線は大きく湾曲してい

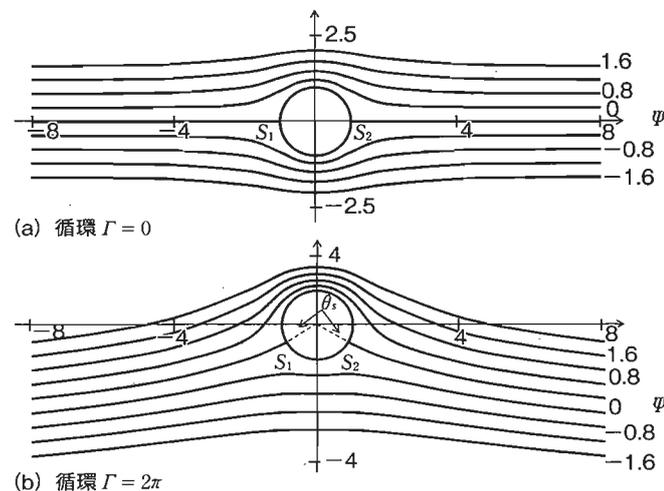


図1 円柱周りの流線

ることである。円柱が回転している場合には、ベルヌーイの定理によれば、円柱の上方側は下方側比べて圧力が下がることから、円柱は上向きの力、すなわち揚力を受けることになる。別の見方をすれば、円柱はその後方下向きに流れを偏向した反力として揚力が発生していると解釈することもできよう。揚力は圧力によってもたらされることから、ベルヌーイの定理を用いて円柱表面の圧力を求め、この圧力分布を流れ方向とその直角成分に分離して円柱表面に沿って一周積分すると、抗力と揚力が得られる。積分した結果によると、円柱には流れ方向には抵抗が働かないが、それと直角方向には  $\rho U \Gamma$  の大きさの揚力が発生している。円柱に限らず、完全流体の一様な流れの中に置かれた任意の対称物体には抵抗が働かず、日常の実感に反している。これは、ダランベール (d'Alembert) の背理として知られている。また、一様流速  $U$  の中に置かれた物体周りの循環を  $\Gamma$  とすれば、物体には  $\rho U \Gamma$  なる揚力が働く。これを、クッタ・ジューコフスキーの定理という。

K-J定理は円柱のような二次元柱体に適用されるものであるが、三次元物体についても定性的には適用できる。たとえば、野球のボールが回転運動しているとそれと直角方向に揚力が発生しカーブすることは、マグナス (Magnus) 効果としてよく知られている。回転する円柱に引きずられてその周りに回転運動が生じるのは流体に粘性が存在するためであるが、渦糸は非粘性理論において円柱回転をモデル化したものであることは言うまでもない。

### 2.2 ジューコフスキー変換

循環を持つあるいは持たない円柱周りの流れについては前節で示したとおり、ポテンシャル理論で記述することができたことから、等角写像で任意の形状を持つ物体周りの流れを調べることができる。  $\xi$  面から  $z$  面への等角写像

$$z = \xi + \frac{a^2}{\xi}, \quad a > 0 \quad (2)$$

はジューコフスキー変換と呼ばれる。例えば図2に示すように、 $\xi = ae^{i\theta}$  とすれば  $\xi$  面で半径  $a$  の円  $C_0$  は、 $z$  面では  $z = 4a \cos\theta$  となることから、長さ  $4a$  の平板  $K_0$  に写像される。同様に、 $\xi$  面上の円  $C_1$  の中心が虚軸上にある場合には、円弧翼 (キャンバ (反り) 付平板)  $K_1$  に写像される。さらに図3に示すように  $\xi$  面上の実軸に中心を持つ円  $C_2$  は、 $z$  面で前縁が丸みを帯びた対称翼型形状 (ジューコフスキー翼)  $K_2$  に写像される。また円中心が一般複素平面上にある円  $C_3$  は、キャンバ付ジューコフスキー翼  $K_3$  に、写像されることは知られているところである。なお、 $K_3$  のキャンバ線は、図2の  $K_1$  であることは言うまでもない。したがって、反りのない平板、反りのある平板、さらには

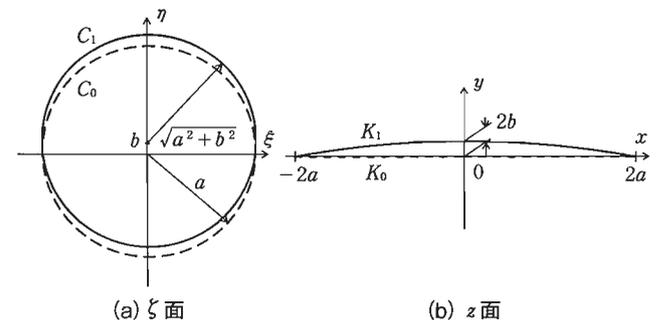


図2 平板と円弧翼

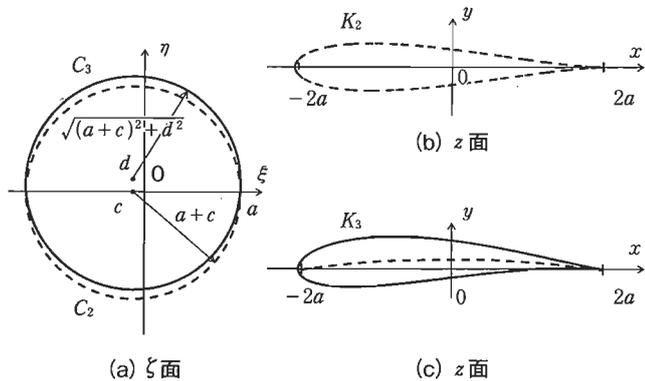


図3 対称と反り付 Joukowski 翼

反り付の翼周りの流れを解くことができるわけである。  
 具体的な手順としては、 $\zeta$ 面で循環を持つ円柱の周りの流れは $z$ 面ではどのように写像されるかを考えればよい。循環を持たない円柱の二つの淀み点は、流れは平板に平行に流れていることからその前縁および後縁に写像されることは明白である。一方、時計方向の循環 $-\Gamma > 0$ を持つ円柱の二つの淀み点は、(2)式に $v_\theta = 0$ を課すと、

$$\sin\theta_s = -\frac{\Gamma}{4\pi aU} \quad (3)$$

となつて図1に示すように円柱の中心線より下側 $\theta_s$ に移動する。これらの二つの円柱上の淀み点は平板の下面に移動する。

さて $z$ 面において一樣流は平板に平行であるが、もし平板が一樣流に対して $\alpha$ の迎角を持つ流れ場に対応した円柱周り流れに適用する場合には、 $\zeta$ 面において一樣流の向きを反時計方向に $\alpha$ だけ回転させればよい。そのために、 $\zeta$ の代わりに $\zeta e^{-i\alpha}$ として円柱周りの流れの回転を行えばよい。この回転によって円柱表面の速度は式(1)と同様の手順で求めると

$$v_\theta = -2U \sin(\theta - \alpha) - \frac{\Gamma}{2\pi a} \quad (4)$$

となり、淀み点も角度 $\alpha$ だけ回転する。一方、ジューコフスキー変換における数学的問題点は、円柱表面( $\zeta = a$ )の $z$ 面写像点で速度が無限大となることである。前述のように円柱表面に二つの淀み点が存在し、その写像点での発散は明らかに不合理である。そこで、円柱の後方側の淀み点が丁度 $\zeta$ 軸上にあるとき、すなわち $z$ 面では後縁に写像されるとき発散は回避でき、(4)式で $\theta = 0$ のとき $v_\theta = 0$ とすることにより

$$\Gamma = 4\pi aU \sin\alpha \quad (5)$$

に帰着できる。この条件は、Kuttaの条件あるいはJoukowskiの仮定と呼ばれ、数学的な特異性を単に回避しただけでなく、翼上下面の流れが合流する後縁で流体が滑らかに流れ去ることを要求するもので、以下に示すように粘性のある現実の流体運動ときわめてよく一致している。

さて、これまで未定であった循環が式(5)のように求まると、回転していない平板に発生する揚力はK-J定理より

$$L = \rho U \Gamma = 4\pi \rho U^2 a \sin\alpha \quad (6)$$

となる。さらに、平板の単位幅当たりの揚力を無次元化すると、

$$C_L = \frac{L}{(1/2)\rho U^2 \cdot 4a} = 2\pi \sin\alpha \quad (7)$$

となり、迎角が小さい場合には近似的に

$$C_L = 2\pi \sin\alpha \cong 2\pi\alpha \quad (8)$$

と表せる。次に反り(キャンバ)を持った平板、すなわち図2のような円弧翼の場合も、反りの大きさ $\gamma = b/2a$ の定義より新しい角度 $\beta$ を $\gamma = \tan\beta/2$ とするならば小さな反りの場合、同様な解析から揚力係数は

$$C_L = \frac{L}{(1/2)\rho U^2 \cdot 4a} = 2\pi \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos\beta} \cong 2\pi(\alpha + \beta) \quad (9)$$

のように近似できる。円弧翼は流れに対する迎角を設定しない場合( $\alpha = 0$ )でも揚力は発生し、その大きさは、反りを持たない平板翼が迎角 $\beta$ を持つ場合と同等であることがわかる。同様に反りを持つジューコフスキー翼についても迎角が小さいならば、揚力係数は式(9)で近似できる。

以上、K-J定理をまとめると、**平板を含めて対称翼では、循環すなわち揚力を発生させるためには、一樣流に対して迎角を持たなければならない。**一方、反り付の翼では、**流れに対する迎角を持たない場合でも循環が発生する。**さらにK-J定理が示すところは、迎角と反りが小さい範囲では、式(7)および(9)は翼の形に依存していないことで、揚力傾斜は1度当たり、およそ0.11である。AbbottとDoenhoff<sup>(2)</sup>の著書には翼弦長に基づくレイノルズ数が $10^6$ を越えたさまざまな対称翼、厚みの異なる翼、さらには反りを持つ翼の揚力・抗力係数の風洞実験結果が記されている。これらの翼に対して、揚力が発生しはじめる近傍の揚力特性はK-J定理とよく一致し、**翼断面形状の依存性はきわめて小さい**ことがわかる。反り付ジューコフスキー翼の下面は上に凸であるが、下に凸の一般的な翼型についてもジューコフスキー変換を一般化した等角写像法でその揚力係数は式(9)のようになることは知られている。

**平板あるいは対称翼に迎角、あるいはそれらに反りを持たせることで、循環すなわち揚力が発生することが明らかとなった。その結果として物体を回り込む流線はどのように変化したのであろうか。**

### 3. 翼周りの流れ場

K-J定理では時計方向の循環が生じている翼に正の揚力が発生していることが確認できたので、循環と揚力との因果関係について式を用いて掘り下げてみたい。そこでまず先に反り付の翼で迎角を持つ流れ場について観察しよう。図4に掲載した画像は、左から右方向に流れる一樣な流れの中にNACA2412翼を迎角5度に設置した場合の流れの様子を、煙流脈法で可視化したものである<sup>(3)</sup>。翼弦長と一樣速度に基づくレイノルズ数は、 $Re = 0.21 \times 10^6$ である。白い筋はケロシンをミスト化した煙で、翼の上流に煙を噴き出す櫛状に並んだ円管が等間隔に取り付けられ、その下流端から煙が自然と流れ出るよう工夫されている。図4を注意深く観察すると、流れは翼の前縁のやや下方位置で分岐し、下面の流れはほぼ前縁近傍から緩やかな吹き下ろしが観察される。一方、上面に沿う流れは翼の最大厚みより下流では下面に沿う流れより大きく吹き下ろされている。また、翼の上面の前縁近傍領域に注目すると、煙の間隔は一樣速度領域におけるそれに比べて明らかに狭く、その狭い領域は翼の中程まで続いている。このような煙線の間隔の狭まりは、流れが局所的に加速されていることを示している。これに対して下面では煙の間隔はやや広がって、流

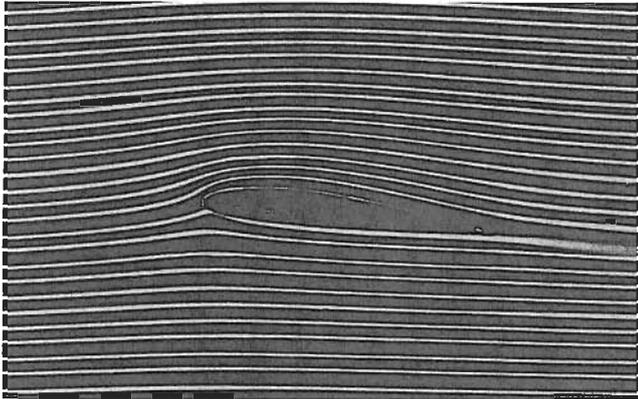


図4 NACA2415翼周りの流れを煙線流脈法で可視化. 迎角は5度, 主流速度8m/s, 翼弦長400mm,  $Re = 0.21 \times 10^6$ . 流れは左から右

れはやや減速されている。「翼上面の流れは下面のそれより速いことから、ベルヌーイの定理より翼上面の圧力は、下面のそれより低く、揚力の発生が説明できる」という一般向けの説明は、このような実験的事実に基づいている。

さて、本論に戻ろう。揚力が発生している場合は翼の前縁近傍には一部流線の凹が存在するが、おおむね流線の揚力発生方向に凸の曲りを伴うことである。その曲りの及ぶ範囲は、下面より上面で広いことを図4でも確認できる。そこでこの流線の曲率に着目し、数式を用いて、湾曲した流線と揚力の関係を調べることにする。

外力が働かない非粘性流体の定常流を考えるならば、Eulerの運動方程式の時間項は省略できて、

$$(\vec{v} \cdot \text{grad})\vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}p \quad (10)$$

となる。ここに、 $\vec{v}$ は速度ベクトル、 $\rho$ は流体の密度、 $p$ は圧力である。図4に示したように、煙が翼に沿って滑らかに流れ、煙が時間変動することなく定常とみなせるならば1本の煙線は1本の流線とみなしてよいであろう。そこで、ある流線に沿って測った長さを $s$ 、接線方向の単位速度ベクトル（接線ベクトル）を $\vec{m}$ 、流速の大きさを $q = |\vec{v}|$ とするならば、

$$\vec{v} \cdot \text{grad} = q \frac{\partial}{\partial s}, \quad \vec{v} = q\vec{m} \quad (11)$$

である。(11)より、

$$(\vec{v} \cdot \text{grad})\vec{v} = q \frac{\partial}{\partial s}(q\vec{m}) = q \frac{\partial q}{\partial s}\vec{m} + q^2 \frac{\partial \vec{m}}{\partial s} \quad (12)$$

ここで、微分幾何学のフレネ＝セレの公式、

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial s} = \frac{1}{R}\vec{n}, \quad \kappa = \frac{1}{R} \quad (13)$$

を用いる<sup>(4)</sup>。ここに、 $\vec{n}$ は流線の法線ベクトル、 $\kappa$ は曲率、 $R$ は曲率半径である。したがって、(10)式は、

$$\text{grad}p = -\frac{\rho}{2} \frac{\partial q^2}{\partial s}\vec{m} - \rho q^2 \kappa \vec{n} \quad (14)$$

と書き下せる。圧力は $\vec{m}$ と $\vec{n}$ で作る平面内で変化するから、それぞれのベクトル方向のこう配は

$$\frac{\partial p}{\partial s} = -\frac{\rho}{2} \frac{\partial q^2}{\partial s}, \quad \frac{\partial p}{\partial n} = -\rho q^2 \kappa \quad (15)$$

で与えられる。流体の密度は圧力のみ関数と見なせば、(15)の第1式は

$$\frac{\partial}{\partial s} \left( \int \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} q^2 \right) = 0 \quad (16)$$

と書き換えられ、 $s$ について積分するとよく知られた流体のエネルギー保存を示すベルヌーイ (Bernoulli) の定理が得られる。冒頭にも述べたとおり、この式は従来の揚力発生機構の説明にしばしば登場する。

一方、(15)の第2式は流線と直角方向、すなわち法線方向の圧力こう配と流体運動との関係を与えている。流線が正の揚力の方向、すなわち凸に湾曲している場合には、曲率中心、すなわち翼表面に向かって圧力が低下し、そのこう配は流速の2乗と曲率の積に比例することを示している。曲率が大きい、あるいは、曲率半径が小さい翼近傍には、大きな圧力のこう配が発生する。圧力こう配の向きから、翼近傍の圧力が最も低く、遠ざかるにつれて次第に大気圧に近づくことから、翼には下から上向きの力、すなわち揚力が働くことになるわけである。流線が凸に湾曲した領域では、「周りに比べて圧力が低くなることから、ベルヌーイの定理より流れは加速されている」ということもできる。この説明は従来の「流れが加速された結果、圧力が低下する」という論理の逆である。湾曲した流線に沿う流体に働く向心力とバランスした圧力のこう配で流れは加速され、翼周りに循環を生んでいるのである。また、正の循環（揚力）をもつ翼を回り込んだ流れは、結局翼を過ぎた後方で吹き下ろされている。流体を曲げた反力として揚力が発生している訳で、翼は流れの方向を効率良く偏向する装置と見なすことができよう。

## 4. まとめ

「なぜ翼に揚力が発生するか」について、より平易な説明を心がけたつもりであったが、思いのほか数式が多くなってしまった。重要な式(15)のみを提示するにはあまりにも不親切と思ったからである。本稿の前半にK-J定理から揚力の公式を導くために多くの紙面を割いたが、揚力発生の本原理の数理的根拠を提示するためである。この根拠の上に立って、後半では循環の発生と流線の曲がりとの関係に着目し、流体に働く向心力と圧力のこう配から揚力の発生原理を説明した。著者が知る限りにおいてこの流線曲率の定理を用いた揚力の最初の説明を、今から40年ほど前に出版された『続物理の散歩道』<sup>(6)</sup>に見いだすことができる。著者は数名の匿名ロゲルギストであるが、おそらく該記事の執筆者は今井功先生であると思われる。本稿を執筆するに当たり参考にさせていただいた。ここに深甚なる感謝の意を表したい。

最後に、本稿は既刊のトピックス<sup>(6)</sup>を大幅に加筆したものである。

(原稿受付 2010年1月22日)

### ●文献

- (1) たとえば、<http://hitomix.com/taruta/paperplane/Bernoulli-1.html>
- (2) Abbott, I. H. and von Doenhoff, A. E., *Theory of wing sections*, (1959), Dover.
- (3) 日本機械学会編, 写真集 流れ, (1984), 70, 丸善.
- (4) たとえば, 矢野健太郎・石原 繁, ベクトル解析, (1968), 63, 裳華房.
- (5) ロゲルギスト, 続 物理の散歩道, (1971), 157-162, 岩波書店.
- (6) 高木正平, 流線の曲がりから揚力の発生機構を説明する試み, 日本航空宇宙学会誌, 58-672 (2010), 30-32. (印刷中)



一般社団法人日本機械学会

# 流体工学部門

- Home
- 部門概要
- 部門賞
- 活動内容
- 講習会・講演会
- イベントカレンダー
- ジャーナル・書籍
- English

## 楽しい流れの実験教室

- 一覧

[Youtubeで動画を見る](#)

## 今この論文／技術／研究開発が熱い！

- 一覧

## ラボにおじゃまします！

- 一覧  
(研究室紹介)

## コンテスト

- 流れの夢コンテスト
- 流れのふしぎ展
- 流れのふしぎ科学教室

## 分科会・研究会

- 活動中の分科会
- 活動中の研究会
- 終了した分科会・研究会
- 分科会・研究会活動報告
- 分科会・研究会の募集

## 活動報告

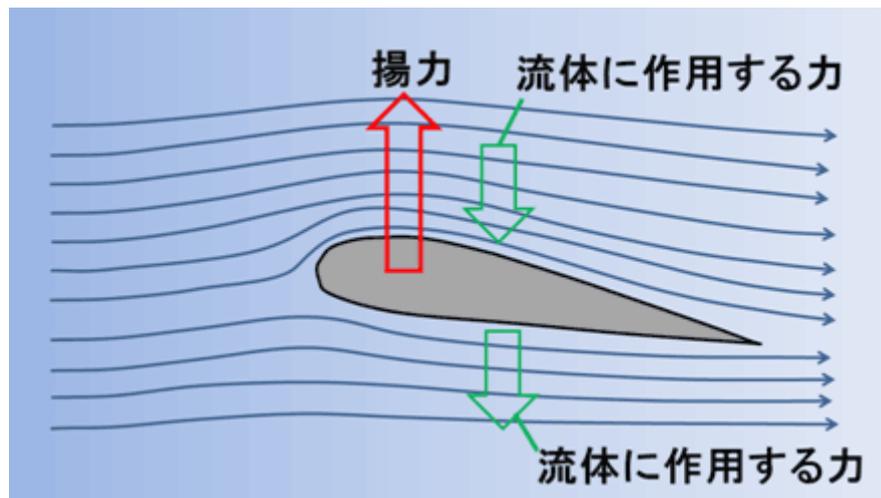
- 一覧

## 公募情報

- 人事公募
  - 人事公募情報
  - 過去の人事公募情報
- 研究公募

## まずは見てみよう！

## どんな実験？



## 実験手順と種あかし

- 飛行機は、主翼にはたらく揚力で空中に浮くことができます。
- 翼は前方が丸く、後方がとがっていて、このような形を「流線形」といい、抵抗の小さな形です。
- しかし、これだけでは浮きません。後ろのほうが少し下に下がっています（迎え角をつける）。さらに、全体を湾曲させています（そりをつける）。



一般社団法人日本機械学会

# 流体工学部門

Home

部門概要

部門賞

活動内容

講習会・講演会

イベントカレンダー

ジャーナル・書籍

English

**【注意】 「上面が下面よりも距離が長く、同じ時間で通過するので上側で速く、下側で遅くなり、ベルヌーイの定理から上側が低圧、下側が高圧となり揚力が発生する」という説明は間違いです。「同じ時間で通過する」ことが間違いです。多くの科学書でこのような間違いが書かれていますので注意してください。**

**【キーワード】** 揚力、運動量理論

**【参考】** 日本機械学会編「流れのふしぎ」講談社ブルーバックス、P168－169 およびP156－161。  
石綿良三「図解雑学流体力学」ナツメ社、P218－219 およびP84－87。

[楽しい流れの実験教室へ戻る](#)

更新日：2010.1.28

## 部門概要

部門概要

流体工学部門の概要  
部門長一覧  
運営組織  
各委員会からの報告  
お問合せ

部門入会・登録

メーリングリスト

概要  
配信規定  
登録・配信停止  
情報配信依頼  
お問合せ

リンク集

流体工学関連学会  
リンク募集

当サイトについて

当サイトへのリンク  
について  
個人情報保護方針  
サイトマップ

## 部門賞

部門賞候補および一般  
表彰候補の公募

フェロー賞候補および  
優秀講演表彰候補の公  
募  
受賞一覧

## 活動内容

ニュースレター

楽しい流れの実験教室  
今この論文／技術／研  
究開発が熱い！  
ラポにおじゃましま  
す！

コンテスト

流れの夢コンテスト  
流れのふしぎ展  
流れのふしぎ科学教  
室

分科会・研究会

活動中の分科会  
活動中の研究会  
終了した分科会・研  
究会  
分科会・研究会活動  
報告  
分科会・研究会の募  
集

活動報告

公募情報

人事公募

人事公募情報  
過去の人事公募情報

## 講習会・講演会

講習会予定

部門講演会開催形式の  
変更について  
講習会聴講(または教  
材のみ)申込

## イベントカレンダー

イベントカレンダー  
過去のイベントカレン  
ダー

## ジャーナル・書籍

部門英文ジャーナル  
流体工学関連書籍

新刊案内  
機械学会流体関連書  
籍  
機械工学年鑑「流体  
工学」  
機械工学便覧