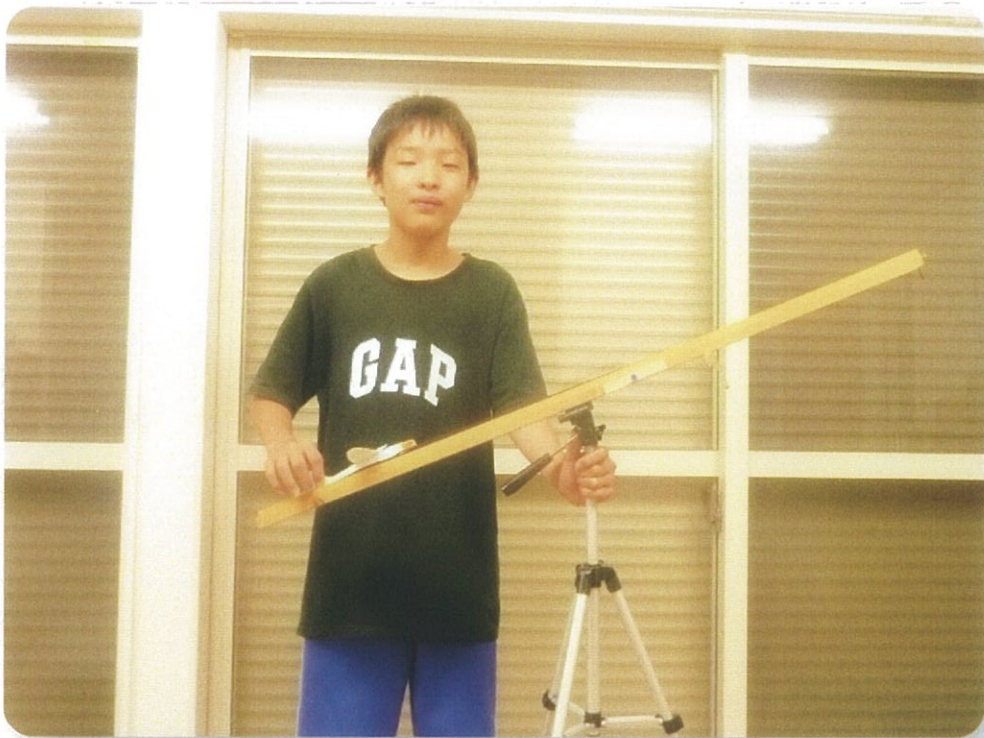


紙飛行機の研究

どうしたら長く飛ぶ  
紙飛行機が作れるか  
～主翼の翼型と飛行時間～



富津市立富津中学校

1年4組 茂木 幹太

## 1 研究の目的

どうしたら、  
長く飛ぶ飛行機が作れるか？

## 2 研究の動機

保育園の頃、紙飛行機を作るのが好きで作って飛ばしていた。その時、どうしたら良く飛ぶかいろいろなかたちの飛行機をつくって飛ばしてみた。小学校に入って、もっと科学的に調べようと思い2、3、4年とどうしたら長く飛ぶ紙飛行機ができるかを研究してきた。2年生の時は、紙の材質や主翼の大きさ、飛ばす角度などについて研究した。3年生では、プロペラをつけてプロペラの数やひねり角について研究した。プロペラをつけた時は、2年生の時より飛ばなくなってしまったので、4年生では、「揚抗比」を大きくするために、主に主翼の仰角を変えて調べてみた。その結果、仰角を大きくすると、揚力が増すが、抗力も増してしまい、飛行機は以前より飛ばなくなってしまった。5年生の時は、なるべく「抗力」を小さくした上で、「揚抗比」を大きくするにはどうしたら良いかを考えた結果、主翼をグライダーのようにアスペクト比の非常に大きい形にすることで「揚抗比」を上げ、なるべく高く投げ上げて滑空時間を増やすことを考えた。理論的にはこれで滑空時間が長くなるはずだった（シミュレーションソフト「PPsim」ではよい結果が出た）が、実際はアスペクト比を高めることで、主翼が細くなり発射時や滑空時に主翼がたわんでしまい、揚抗比を（＝滑空比）増やすことができなく、滑空時間が少なくなってしまった。昨年は、主翼のたわみが少なければ、グライダーのようなアスペクト比の大きい機体の方が滑空時間も長くなるのではないかと考え、翼の材質を変えて発射時や滑空時に主翼に変形が少ない機体を作ることでシミュレーションソフトで得られた結果に近い紙飛行機を作り、滑空時間を増やそうと考えた。その結果、主翼の材質を硬いものにするのでたわみは少なくなったが飛行機全体の重さが重くなり滑空時間が減ってしまった。

そこで今年は、すべてケント紙で作成し、主翼もたわまない程度のアスペクト比のままにどうしたら滑空時間が増えるのかを考えようと思った。そんな時、母の実家近くの大学のオープンキャンパスに行く機会があった。そこで、航空力学についてのコーナーがあり、そこで説明してくれた大学生さんが人力飛行機の設計をしていると言うので相談にのっていただいた。学生さんの話では、機体の重心と翼の断面の形（翼型という）により飛行機の滑空性能は変わることを教えていただいた。機体の重心については、小学生の時に調べたことがある（主翼の前から1/3に重心が良い）ので、今回は「翼型」について調べてみることにした。

今回も昨年同様条件に飛行シミュレーションソフト「PPsim」を使い、翼型を変えた機体を作って「揚抗比」等を計算し、飛行シミュレーションを行う。また、実際に風洞実験を行って揚力や抗力を測定したり、主翼の変形具合を調べる。そして実際に飛ばして見て飛行時間を測定し、シミュレーションしたものと比較してみた。

## 3 研究の方法

長く飛ぶ飛行機を作るために次の点について研究する

- 1 翼型を変え、それぞれの場合の揚力と抗力を測定する。
- 2 カタパルトからの発射角度（上下角）、バンク角（水平に対する機体のねじれ角）を変えて、それぞれの場合の飛行時間を測定する。

<実験装置について>

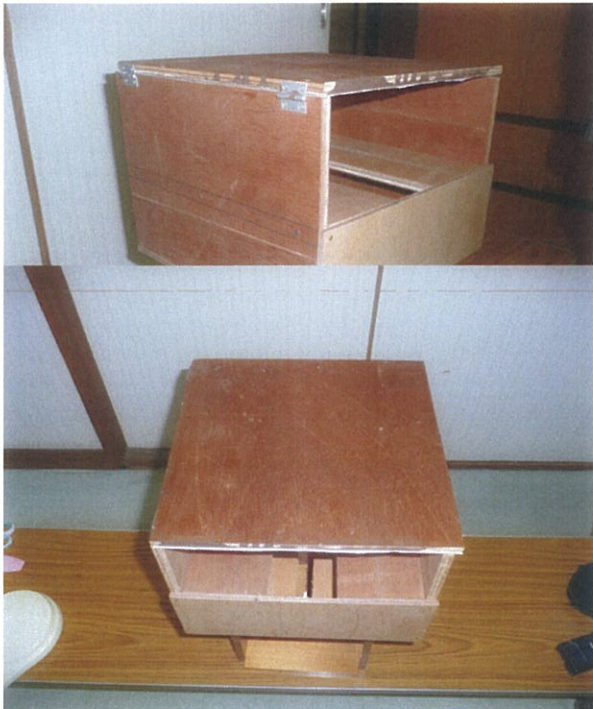
この実験を行うために、写真のような実験装置を使った。

①揚力、抗力実験装置

昨年同様に測定方法は、はかりの上に機体に比べて十分重い(100g位)重りを置き、重さを量っておく。その後、機体の先、または翼の下の部分とひもで結ぶ。風を前から当てた

時のはかりの目盛りを読み、最初に比べて軽くなった分が揚力や、抗力になる。

(今年のもの)

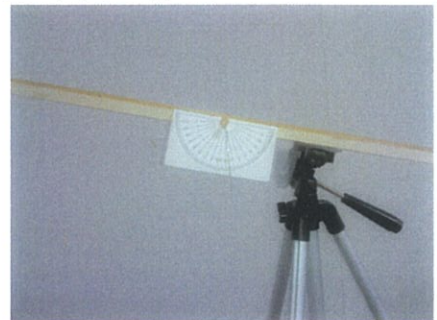


②発射装置(カタパルト)

ほぼ昨年度の発射装置と変わらない。三脚と発射台のつながりがしっかりしていなかったのが、今回はしっかりと固定した。発射角、バンク角がともに調整できる。



(上下角を計る)



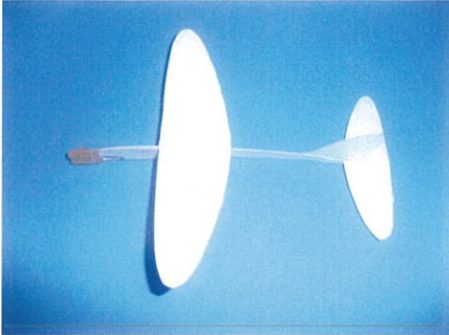
(バンク角を計る)



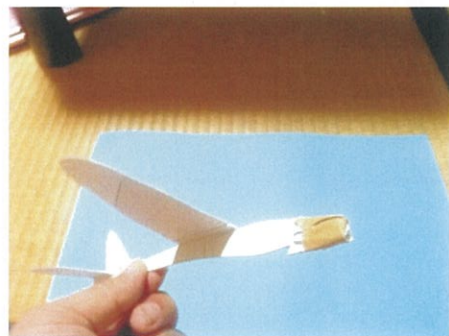
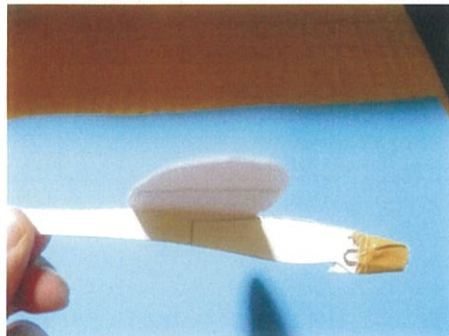
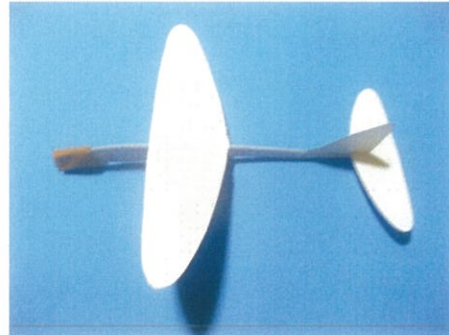
### ③ 飛行機

「PPSim」を使って垂直上昇用の基準になる機体を設計し、主翼の形状(翼型)を変えた機体(平板のまま、曲面〔流線型〕、曲面+下側をサララップで塞ぐ、止める曲面+下側を上質紙で塞ぐ)を製作する。

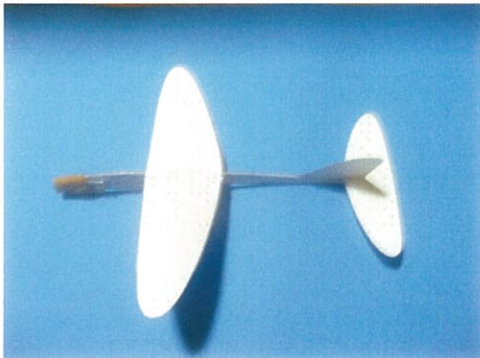
(主翼が平板)



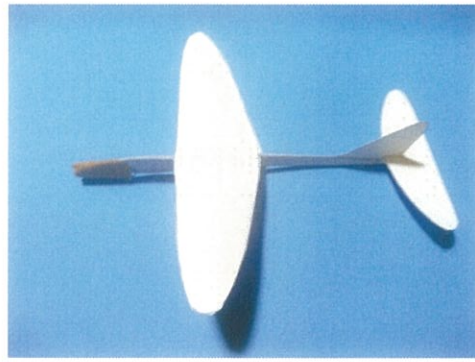
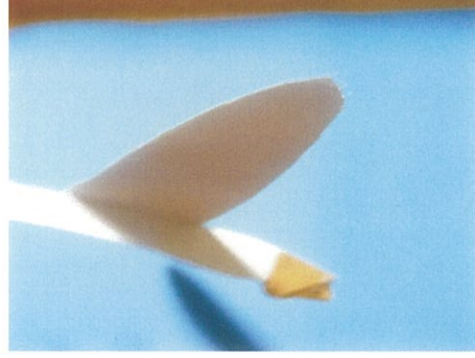
(主翼が流線型)



(主翼が流線型+下側がサララップ)



(主翼が流線型+下側が上質紙)



#### ④ブロアー

昨年同様ブロアーを使うことにした。風速の調整がしやすいように吹き出し口を囲う布は使用しない。



(風速計)

### 4 研究の内容

#### <実験1>

それぞれの機体の揚力と抗力を測定する。また、主翼の変形を見る。

#### <方法>

用意する物

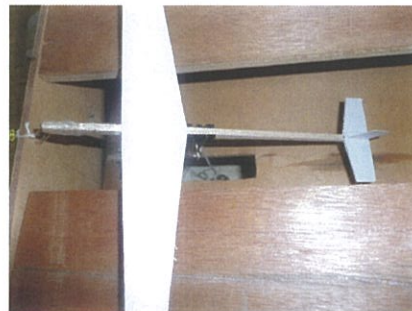
- ・それぞれの飛行機
- ・風速計、揚力抗力測定装置、ブロアー

実験方法

- 1 風速計を使って風速22.2m/秒(時速80km/時)の位置に装置を置く。



- 2 飛行機の先端をひもとクリップで固定して、それぞれの場合の揚力を測定する



- 3 それぞれの飛行機の抗力を測定する。



4 主翼の変形具合を調べる。

5 85km/時, 90km/時, 95km/時, 100km/時の場合を同様に測定する。

<予想>

揚力、抗力の計算式から、速度が上がるほど揚力も抗力も大きくなるう。

翼の断面の形状から



①平板

②流線型



③流線型+下側平板

では、③>②>①の順で揚力が大きくなるので、揚抗比も③>②>①の順で大きくなると思う。

そこで、サランラップは柔らかく変化しやすいので上質紙より揚力は上がらないと予想される。



そこで、揚抗比は、大きい方から

主翼が流線型+下側上質紙

主翼が流線型+下側サランラップ

主翼が流線型

主翼が平板

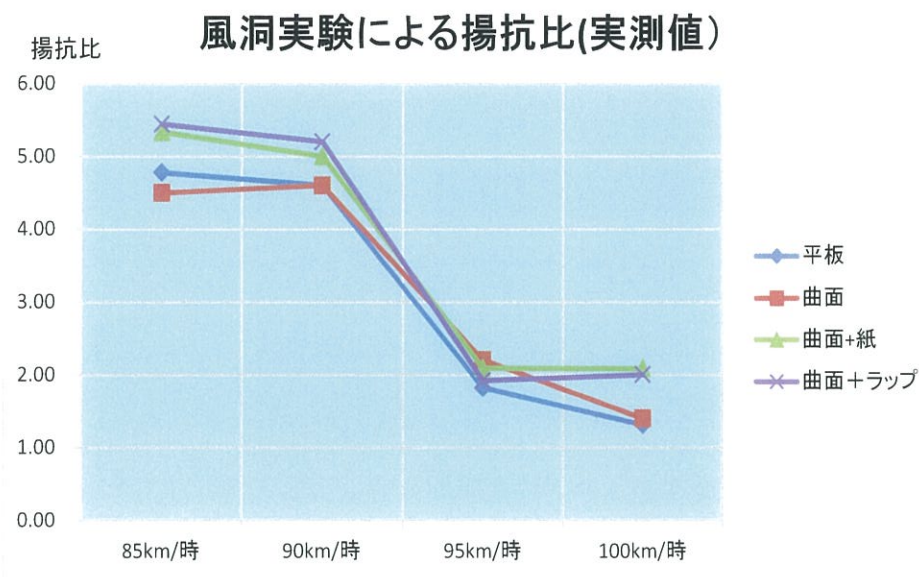
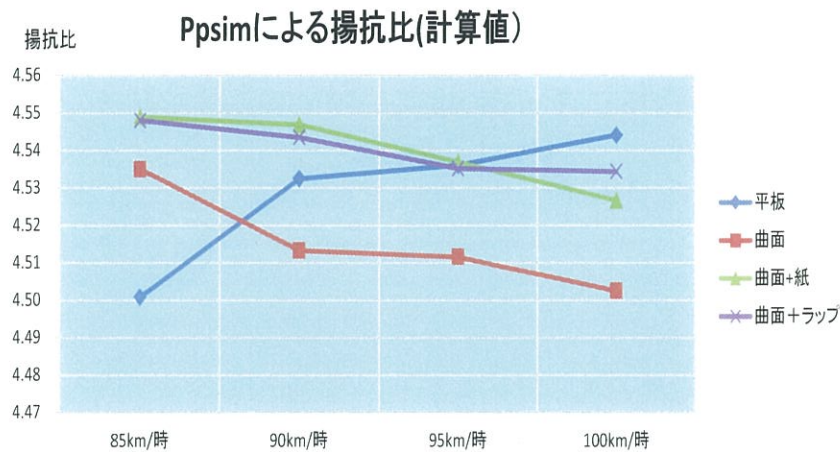
となると予想される。

<結果>

結果は、次のようになった。

主翼の翼型	速度 (km/時)	ppsimによる計算値			実測値			主翼の変形
		揚力係数	抗力係数	揚抗比	揚力(g)	抗力(g)	揚抗比	
平板	85	0.8610	0.1913	4.5008	43	9	4.7778	上向き
	90	0.8690	0.1617	5.3741	46	10	4.6000	上向き
	95	0.8700	0.1918	4.5360	20	11	1.8182	大きく上向き
	100	0.8720	0.1919	4.5440	17	13	1.3077	大きく上向き
曲面	85	0.9020	0.1989	4.5349	45	10	4.5000	上向き
	90	0.9040	0.2003	4.5132	46	10	4.6000	上向き
	95	0.9041	0.2004	4.5115	22	10	2.2000	大きく上向き
	100	0.9050	0.2010	4.5025	21	15	1.4000	大きく上向き
下曲面紙+	85	0.9103	0.2001	4.5489	48	9	5.3333	上向き
	90	0.9104	0.2002	4.5468	50	10	5.0000	上向き
	95	0.9110	0.2008	4.5369	23	11	2.0909	大きく上向き
	100	0.9112	0.2013	4.5266	25	12	2.0833	大きく上向き
ラ曲面 ップ+	85	0.9105	0.2002	4.5480	49	9	5.4444	上向き
	90	0.9105	0.2004	4.5434	52	10	5.2000	上向き
	95	0.9111	0.2009	4.5351	23	12	1.9167	大きく上向き
	100	0.9114	0.2010	4.5343	26	13	2.0000	大きく上向き

グラフで表すと次のようになった。



#### <考察>

予想通り、③流線型+下側平板、②流線型、①平板の順に揚抗比は大きくなった。③の下側を覆う素材では、上質紙よりサランラップの方が揚力が大きかった。

これは、サランラップの方が軽いため、飛行機全体の重さが軽くなるからだと思う。また、どの機体も風速95km/時を越えると主翼の変形が始まるため揚力が上がらず、揚抗比も小さくなってしまった。

以上のことから、主翼の翼型は下図のような②、③のものが良いと考えられる。更に②、③で比較すれば、③の方が若干良いと思われる。



また、飛行機の発射速度も90km/時を最大として実験していくことにする。(90km/時以上では主翼はたわんでしまうため)

次に、上下角(発射角度)とバンク角(機体と水平面とのねじれ角)を変えて飛行時間を計り、どうすれば長く飛ぶかを調べてみたい。この時、PPsimを使って、飛行の様子をシミュレーションし、実際の飛行と比較してみたい。そのためには発射装置(カタパルト)

の発射速度(初速)を知る必要があるので、次のようにして求めてみた。

＜発射装置の発射速度の測定＞

発射速度は以下のようにして測った。

- 1 発射装置を水平にして飛行機を乗せ、最大までゴムを引く(100cm)
- 2 発射装置全体がビデオカメラの画面に入るようにする。
- 3 飛行機が手を離してから、発射台を飛び出すまでを撮影する。  
(後で編集するので少し長めに撮影する)
- 4 パソコンで取り込んで、ビデオ編集ソフトを使って、飛行機が手を離してから発射台をでるまでの正確な時間を読み取る。

その結果次のような値が測れたので発射速度を計算した。

発射台の長さ(ゴムを引いた距離) : 100cm

飛行機が発射台を移動した時間 : 0.04秒

$$100 \div 0.04 = 2500$$

$$2500 \text{ cm/秒} = 25 \text{ m/秒} \quad (90 \text{ km/時})$$

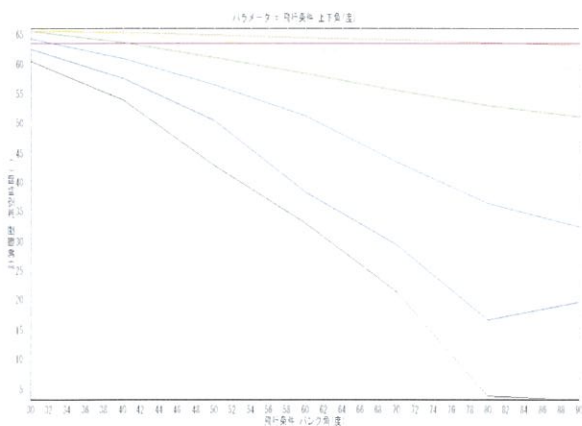
よって、紙飛行機の発射速度は最大で90km/時であることがわかった。

そこで、PPsimでも初速を90km/時で、シミュレーションを行うことにした。

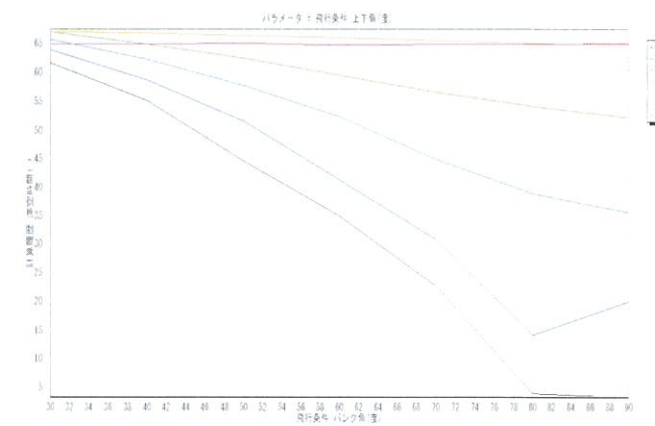
＜PPsimによるシミュレーション＞

PPsimにより上下角とバンク角を変化させながらシミュレーションしてみると以下のようなになった。

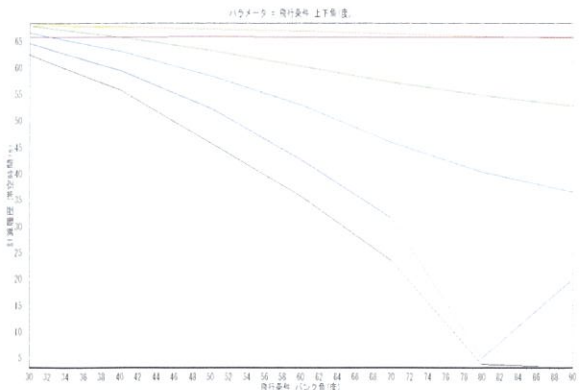
(主翼が平板)



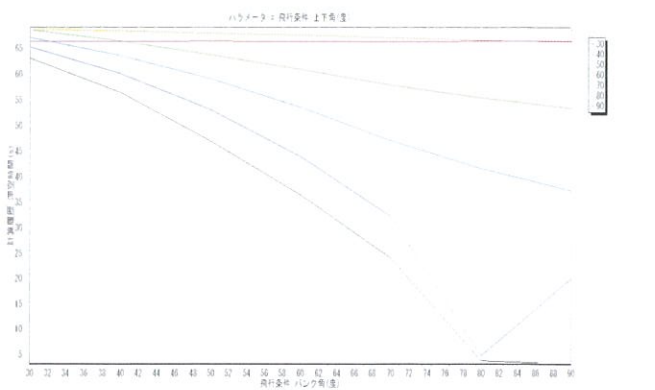
(主翼が曲面)



(主翼が曲面+下側が上質紙)



(主翼が曲面+下側がサララップ)





どの機体も上下角70°以上、バンク角70°以下で飛行時間が長くなっているのので、実測でもその近くより測定すれば良いと考えられる。しかし、昨年度も機体によっては、シミュレーションと実測では異なることもあったので念のため、シミュレーションと同じ範囲で調べていきたい。

### <実験2>

上下角、バンク角を変化させて、それぞれの飛行機を飛ばし、飛行時間と飛行の仕方を調べる。

用意する物

- ・それぞれの飛行機
- ・発射装置(カタパルト)、ストップウォッチ

実験方法

- 1 上下角30°に固定し、バンク角を30°から10°ずつ上げていき、それぞれの飛行機の飛行時間を計る。
- 2 上下角を40°、50°、60°、70°、80°、90°のそれぞれの場合について同様に調べる。
- 3 1つの場合について5回計測し、その平均を出す。



### <予想>

風洞実験の結果を考えると、発射速度が90km/時までは、主翼の変形があまり見られないので、シミュレーションの結果に近い値が計測されると思う。  
つまり、主翼の翼型は、曲面〔流線型〕の方が滑空時間が長く、曲面の下側を平板で覆った方が更に良いとも思われる。また、シミュレーションの結果より、上下角が70°以上、バンク角が70°以下の時が滑空時間が長くなると思われる。

### <結果>

結果は、次のようになった。PPsimで計算された値と比較してみた。赤は滞空時間の長い方から5番まで。

青は滞空時間の短い方から5番までを表している。

(主翼が平板)

(Ppsimによる滑空時間の計算値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	60.55	54.06	42.85	33.08	21.53	3.84	3.17
	40°	62.61	57.66	50.56	38.33	29.49	16.74	19.78
	50°	64.38	61.06	56.61	51.23	43.53	36.50	32.52
	60°	65.61	63.65	61.19	58.40	55.55	53.03	51.19
	70°	66.11	65.14	63.98	62.70	61.41	60.25	59.30
	80°	65.61	65.44	65.02	64.58	64.13	63.70	63.30
	90°	63.58	63.58	63.54	63.56	63.55	63.61	63.55

(主翼が曲面)

(Ppsimによる滑空時間の計算値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	61.72	55.16	44.63	34.91	22.78	3.87	3.20
	40°	63.86	58.80	51.63	41.26	30.83	14.13	20.04
	50°	65.70	62.29	57.74	52.30	44.88	38.88	35.65
	60°	66.98	64.97	62.44	59.58	56.68	54.12	52.25
	70°	67.52	66.53	65.33	64.02	62.71	61.53	60.56
	80°	67.02	66.85	66.43	65.98	65.52	65.07	64.67
	90°	64.94	64.96	65.03	64.81	64.92	64.95	65.08

(滑空時間の実測値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	41.17	33.08	26.22	22.49	14.64	2.35	2.16
	40°	42.57	39.21	34.38	26.06	20.05	10.24	13.45
	50°	43.78	37.37	34.65	31.35	29.60	22.34	22.11
	60°	44.61	38.95	41.61	35.74	37.77	36.06	31.33
	70°	44.95	44.30	43.51	38.37	41.76	36.87	36.29
	80°	44.61	44.50	44.21	39.52	43.61	43.32	43.04
	90°	43.23	43.23	38.89	38.90	38.89	38.93	43.21

(滑空時間の実測値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	48.88	39.72	32.13	22.62	13.12	2.23	2.54
	40°	45.98	42.34	33.46	32.68	22.20	9.16	12.99
	50°	52.03	35.88	41.57	37.66	25.85	30.79	20.53
	60°	38.58	51.46	49.45	42.90	44.89	31.17	41.38
	70°	53.48	52.69	51.74	41.48	49.67	35.44	39.24
	80°	53.08	38.51	38.26	38.00	37.74	46.85	51.22
	90°	42.08	37.42	37.46	51.33	37.39	37.41	37.49

(主翼が曲面+下側上質紙)

(PPsimによる滑空時間の計算値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	62.44	55.87	45.83	35.78	23.51	3.89	3.22
	40°	64.63	59.52	52.38	42.70	31.60	5.01	20.10
	50°	66.51	63.04	58.47	53.00	45.96	40.40	36.58
	60°	67.83	65.79	63.22	60.32	57.39	54.81	52.92
	70°	68.39	67.38	66.17	64.84	63.52	62.31	61.34
	80°	67.90	67.72	67.30	66.85	66.38	65.93	65.52
	90°	65.74	65.76	65.85	65.80	65.81	65.79	65.77

(滑空時間の実測値) 秒

		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	49.45	32.18	29.70	23.19	15.23	2.80	2.55
	40°	51.19	42.85	37.71	30.74	22.75	2.89	11.58
	50°	43.10	45.39	37.89	41.98	26.47	23.27	23.70
	60°	48.84	37.90	40.97	43.43	37.19	31.57	34.29
	70°	54.16	53.36	42.88	51.35	45.73	44.86	35.33
	80°	53.78	43.88	53.30	52.95	43.01	37.98	42.46
	90°	47.33	47.35	47.41	47.38	52.12	37.90	42.62

(主翼が曲面+下側サランラップ)

(PPsimによる滑空時間の計算値) 秒

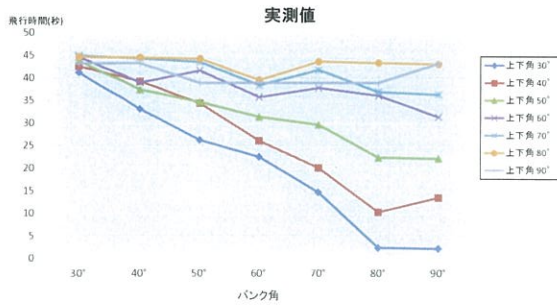
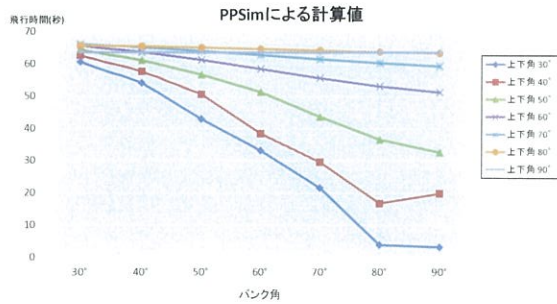
		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	63.13	56.56	46.99	36.51	24.19	3.91	3.24
	40°	65.35	60.21	53.13	43.94	32.29	4.94	20.09
	50°	67.28	63.76	59.17	53.70	47.13	41.58	37.31
	60°	68.63	66.55	63.95	61.01	58.07	55.49	53.59
	70°	69.21	68.19	66.96	65.61	64.27	63.05	62.07
	80°	68.73	68.55	68.12	67.66	67.19	66.74	66.32
	90°	66.41	66.38	66.50	66.37	66.45	66.54	66.57

(滑空時間の実測値) 秒

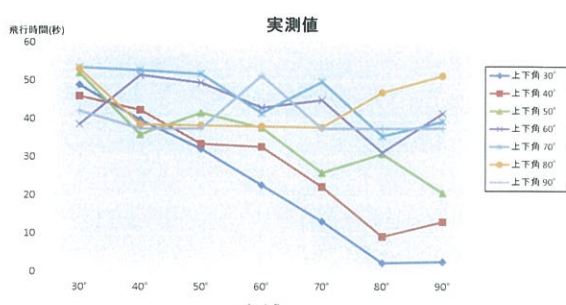
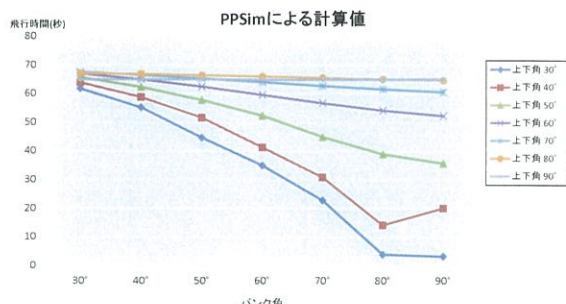
		バンク角						
		30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
上下角	30°	52.08	46.66	38.77	21.91	19.96	2.64	2.18
	40°	49.01	36.13	39.85	26.36	24.22	3.34	12.05
	50°	50.46	47.82	35.50	32.22	31.81	34.30	25.18
	60°	56.62	39.93	52.76	45.76	34.84	41.62	32.15
	70°	57.10	56.26	40.18	54.13	53.02	42.56	41.90
	80°	56.70	56.55	40.87	45.67	40.31	45.05	49.74
	90°	44.83	39.83	49.88	49.78	49.84	49.91	49.93

グラフにすると

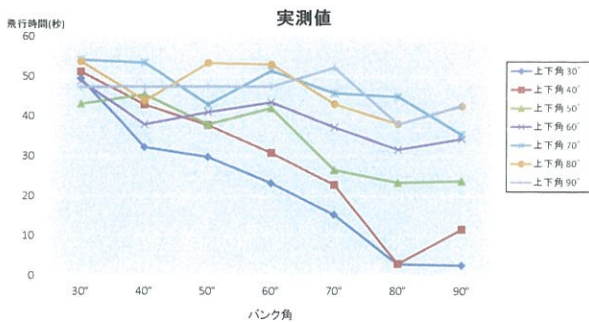
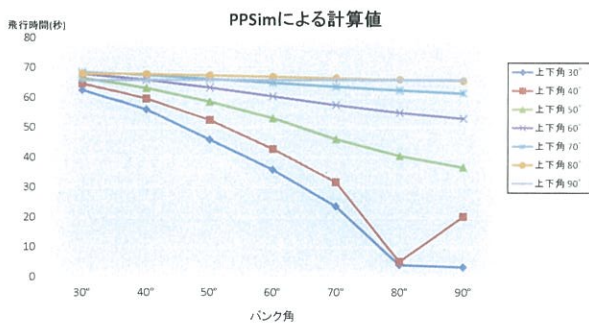
(主翼が平板)



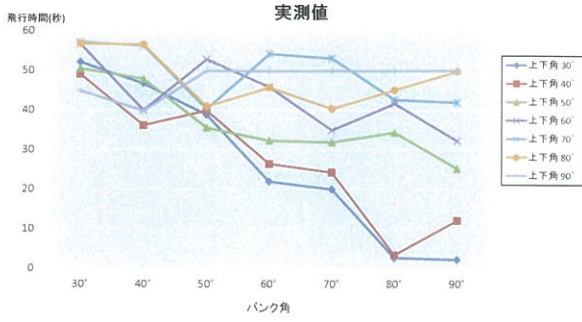
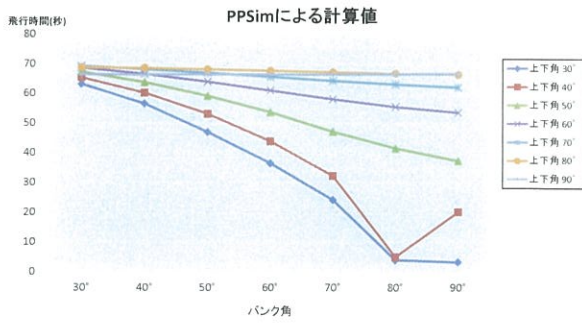
(主翼が曲面)



(主翼が曲面+下側上質紙)



(主翼が曲面+下側サランラップ)



## <考察>

予想通り、翼型が曲面で下側を平板で覆った機体が滑空時間が長かった。下側を覆う素材は、サランラップのような柔らかい素材でも問題が無かった。むしろ機体の重さを考えて、なるべく軽い素材の方が良いと考えられる。また、発射時の上下角やバンク角は、ほぼシミュレーション通りで、上下角70°以上、バンク角70°以下とすれば滑空時間を長くすることができるといえる。

## 5 まとめ

### <実験でわかったこと>

滑空時間を長くするためには、

- 1 主翼の変形が始まる前の90km/時で発射させれば良い。この時、機体の上下角（発射角度）は70°以上。バンク角を70°以下にする。
- 2 主翼の翼型は、上側を曲面〔流線型〕にし、下側を平板にすると揚力が上がり滑空時間が長くなる。

ということがわかった。

### <反省と感想>

紙飛行機を長く飛ばすために揚抗比の改善に注目して研究をするようになって、今年で3年目になった。

揚力と抗力は互いに背反する関係にあって、揚力を上げようとするとう抗力も上がってしまい、結局飛行機の滞空時間が短くなってしまう。また、本物のグライダー等と違って紙という材質なため、主翼の形状を極端に変えるとたわんでしまい、理論上は揚抗比が上がっても実測するとあまり飛ばない。かといって硬い材質のものにすると機体全体が重くなってしまいやはり飛ばない。軽くて硬い素材も現在はいろいろ出ているが、

（カーボン等）これを使っては紙飛行機といえないと思う。（そのことを考えると去年のバルサ材もやや反則だと思う）そのよう理由でこの二年間は、なかなかいい結果が出なかった。どうにか紙素材だけで、揚抗比を上げて滞空時間（=滑空時間）を伸ばせないかといつも考えていた。今回、大学の学生さんからいただいたヒントを元に主翼の翼型を変えることで揚抗比を上げることができ、結果、滞空時間を伸ばすことができて良かった。更に、シミュレーションの結果と実測値が、同じようなことから、実験も間違っていなかったのではと考えている。

今回の研究の反省としては、翼型を大きく3種類に分けて調べていったが、作った曲面はほぼ流線型（翼の前方より1/3の位置を平面より5mm上げ、前後を丸くした）が、正確なものでは無かったということ。

また、曲げ方をもっと深くした方がいいのか、浅くした方がいいのか、翼の下側は平板でいいのか、上側のような曲面がいいのか等、調べなければわからないことはまだまだ多くあると思う。

本当にベストな翼型は見つかっていない。今後の研究課題であると思う。

最後に、今回も昨年と同様にシミュレーションソフト「PPsim」を使用した。このソフトを使用することで短時間に数百通りのシミュレーションができるので、結果を参考にして実際に行う実験の範囲を狭めることができたのは、大変有効だったと思う。

### ※ 参考文献等

V-Tails <http://www.ac.cyberhome.ne.jp/~v-tails/>  
紙飛行機用シミュレータ 「PPsim」