

# 鳥の小翼羽の働きについて

千葉市立大椎中学校 3年B組 17番

田谷昌仁

# 目 次

1. 動機 .....	1
2. 目的 .....	1
3. 研究の概要 .....	2
4. 文献調査 .....	3
(1) 小翼羽とは何か .....	3
(2) 失速とは何か .....	3
(3) 食性 .....	3
(4) 飛翔方法について .....	4
(5) 鳥が飛ぶ目的 .....	4
(6) 翼の先端の形について .....	5
(7) 鳥の翼に生えている羽根の名称 .....	6
(8) 翼の部位を示す飛行機用語 .....	7
5. 小翼羽の計測 .....	8
(1) 目的 .....	8
(2) 方法 .....	8
(3) 仮説 .....	10
(4) 結果 .....	10
(5) 考察 .....	13
(6) まとめ .....	25
6. 手羽先の観察 .....	26
(1) 目的 .....	26
(2) 方法 .....	26
(3) 予想 .....	26
(4) 結果 .....	26
(5) 考察 .....	26
7. モデル実験① .....	27
(1) 目的 .....	27
(2) 方法 .....	27
(3) 仮説 .....	32
(4) -1 予備実験① .....	32
(4) -2 予備実験② .....	32
(5) 本実験 .....	33
(6) モデル本実験①全体のまとめ .....	40

8. モデル実験②.....	41
(1) 目的.....	41
(2) 方法.....	41
(4) 結果.....	44
(5) 考察.....	48
(6) まとめ.....	51
9. 研究のまとめ.....	52
10. 今後に向けて.....	53
11. 参考文献.....	54

## 1. 動機

私は、昨年の研究で鳥の翼の形状と飛翔生態との関係について調べた。その結果、鳥の翼の形状は食性や飛び方などの生態に関係していることが分かった。鳥の飛翔に重要な働きをする羽は、推進力を発生させる初列風切羽と揚力を発生させる次列風切羽である。昨年度は主にこれらの羽の形状に注目して研究したが、その他に飛翔に関係する羽として、翼には小翼羽（しょうよくう）と呼ばれる特殊な羽が生えている部位があることを本で知った。小翼羽があることで失速を防げると本に書いてあったが、それ以上の詳しいことは本にあまり記載されていなかった。そこで今年度は、小翼羽について興味を持ち、小翼羽の働きや失速との関係について詳しく研究してみようと思った。

## 2. 目的

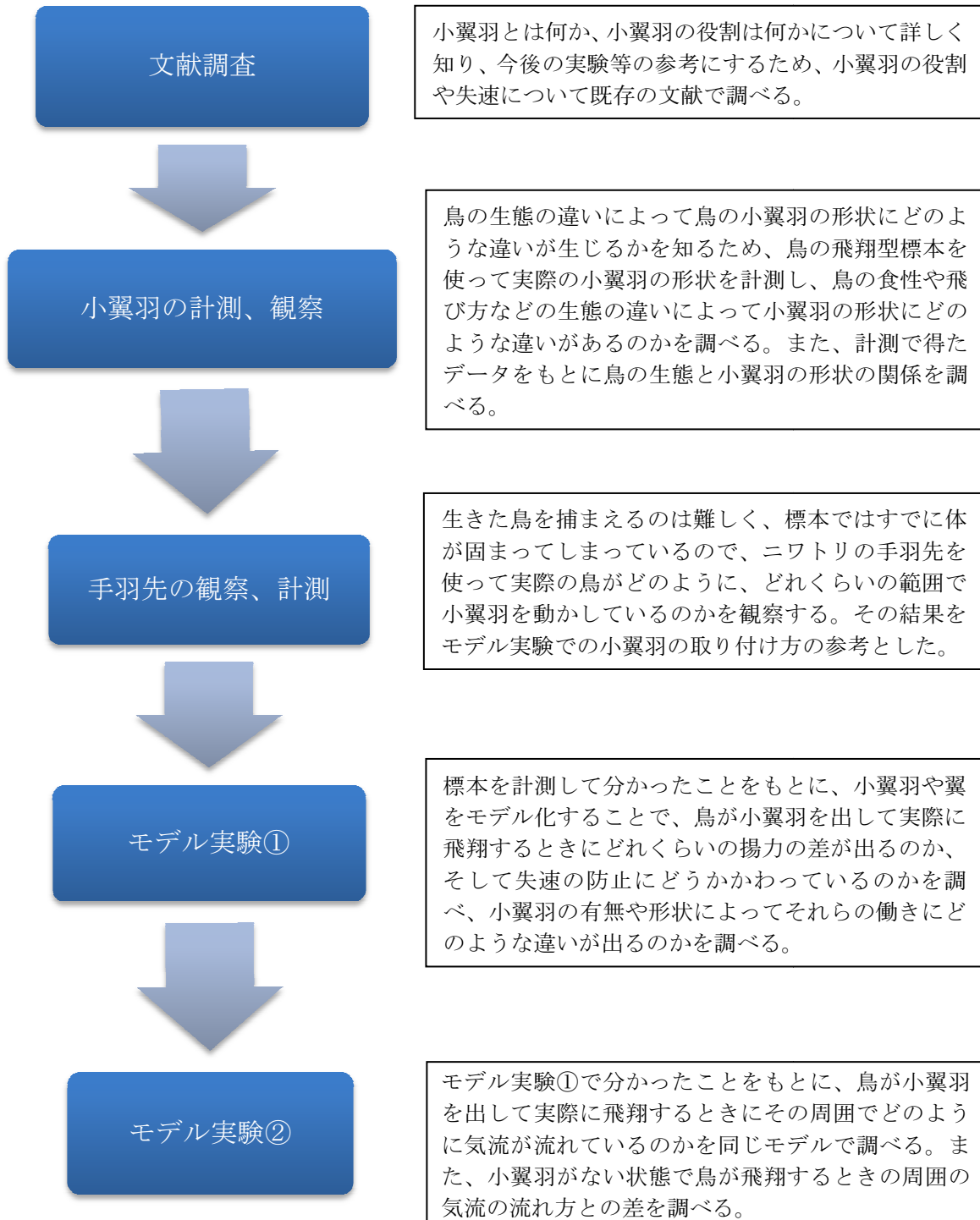
鳥にとって小翼羽がどのような働きをしているのかについてを明らかにすることを目的に次のような観察や実験を行った。

鳥の生態が違えば鳥の飛び方が変わり、それによって小翼羽の働き方も変わるのではないかと考え、そうすると小翼羽の形状にも差があるのではないかと考え、鳥の生態の違いによって小翼羽の形状にどのような違いが出るかを調べ、それに基づいて小翼羽の働きについて考察した。

また、実際の鳥は小翼羽をどのように動かしているのかを調べた。そして、実際にその小翼羽の形状の差が違えば、生ずる揚力の大きさを調べた。そして、その揚力の大きさの違いが生じているときに、小翼羽や翼の周りにどのような気流が流れているのかを調べ、揚力が生じることと気流の流れ方の関係を調べた。これらの形の違いによる揚力の発生の違いや周辺の気流の流れ方の違いから、形の違いと働きの違いについて検討した。

### 3. 研究の概要

今回行った研究の流れや概要を以下に示す。



#### 4. 文献調査

小翼羽や失速について詳しく知り、今後の計測や実験、考察に役立てるため、11. に挙げた参考文献から鳥や飛行機に使われる語句、小翼羽や失速、飛翔に関することを詳しく調べた。

##### (1) 小翼羽とは何か

小翼羽とは、翼の指骨(人間の親指にあたる第1指)についている数枚の正羽(羽にしっかりとした羽軸がある羽)である。鳥が低速で飛行するとき翼の前方に広げ、その隙間を勢いよく流れる気流で翼の上面に発生する乱流を吹き飛ばして失速するのを防いでいる。小翼羽は、低速で滑空飛行するワシやタカの仲間、潜水時に補助的に翼を使うクロガモなどでよく発達している。

##### (2) 失速とは何か

失速とは、翼の上面に沿って流れていた気流が、迎え角(進行方向に対して翼を立てた角度)を大きくしていったときに境界層剥離という現象によって離れてしまい、揚力が急減する現象、あるいはそうなった後の状態である(図1)。また、失速した時の翼の迎え角のことを失速迎え角という。

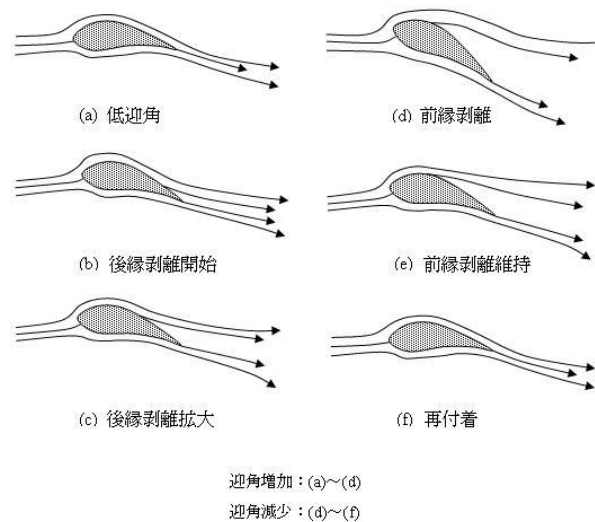


図1 失速時の気流の流れ方

##### (3) 食性

鳥の食性は大きく分けて次の7種類に分けることができる。鳥が飛ぶことの目的のひとつは餌を取ることであり、対象とする餌が異なれば、飛び方も餌に合わせて変化することになる。

飛び方が異なれば、飛ぶための器官である翼や羽の形状にも変化があると思われる。

- ・蜜  
花の蜜を飲む。ハチドリなど。
- ・果実  
植物の種子を覆っている果肉を食べる。ヒヨドリなど。
- ・植物  
植物の花や葉、茎などを食べる。ハトなど。
- ・種子  
植物の種子そのものを食べる。スズメなど。
- ・腐肉  
動物などの屍肉を食べる。カラスなど。
- ・小動物  
ネズミやイタチなどをはじめとする小さい動物を食べる。哺乳類に限らず、魚やほかの鳥類などもここに含まれる。タカなど。
- ・昆虫  
チョウやガなどの幼虫や、ハエやカゲロウなどの飛ぶ昆虫など、さまざまな昆虫を食べる。モズなど。

#### (4) 飛翔方法について

鳥の飛翔方法には、次の4つがある。

- ・羽ばたき飛行  
羽ばたきながら前進する飛び方。一般的な鳥はほとんどがこれにあたる。
- ・滑空  
翼をひろげたままはばたかずに徐々に高度を下げる飛び方。トビなど。
- ・帆翔  
翼をひろげたままはばたかずに風を利用して高度を下げずに飛び続ける飛び方。大型の鳥類全般。

#### (5) 鳥が飛ぶ目的

鳥が飛ぶ目的は大きく分けると次の4つがある。種によってその目的の優先が違うと思う。そしてその目的の優先度によって飛び方が変わり、それによって飛ぶための器官の形も変わると思う。

- ・採餌(さいじ)：餌を捕るために飛ぶ  
餌を捕ること。鳥は飛んでいる時間のうちでほとんどの時間、採餌をしている。
- ・帰巢：巣に帰るために飛ぶ  
主に昼間行動する鳥は決まった時間(主に日没)にきまった場所で集団もしくは単独で眠る習性がある。ねぐらに行くことを帰巢と呼ぶ。

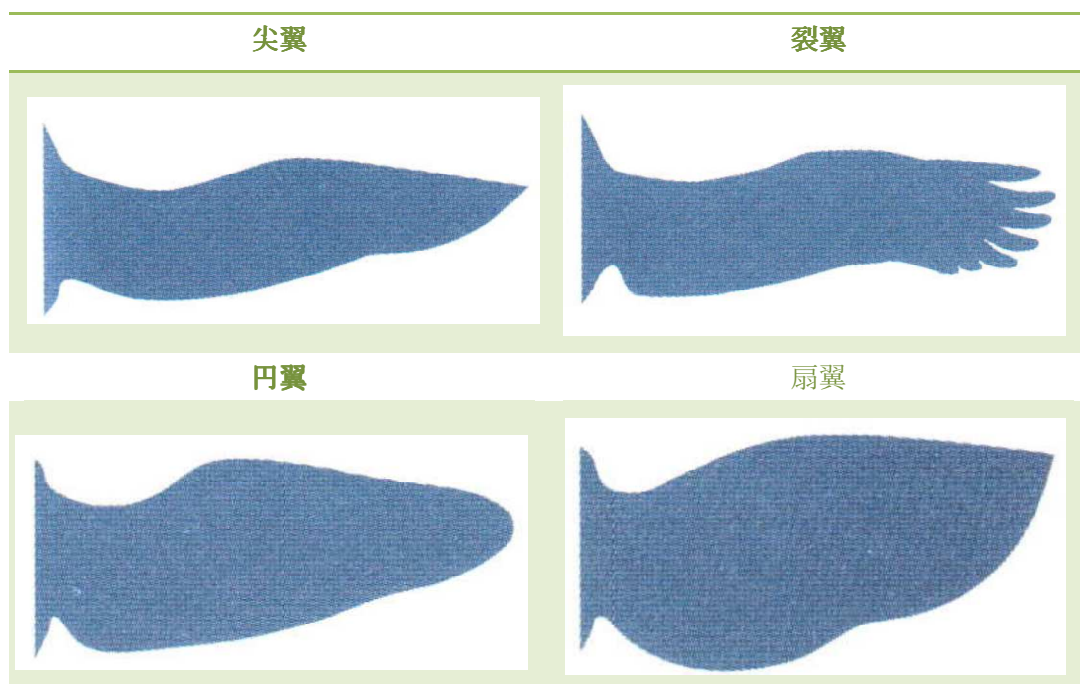
- ・対敵反応：敵から逃げるために飛ぶ  
鳥は外敵から身を守る方法として単独分散か集団で対処する。一般に、地上からの外敵(哺乳類)には単独分散、空からの外敵(猛禽類)には集団で対処する。
- ・渡り：渡り(移動)のために飛ぶ  
鳥は生活しやすい気候を手に入れる、別の地域の餌資源を有効に活用するなどの生理的な理由で季節的に特に繁殖地と越冬地の間を移動する。

(6) 翼の先端の形について

翼の先端の形には、次の4種類がある。

- ・尖翼  
翼の先端がとがっていて、高速滑空性能に優れている。
- ・裂翼  
翼の先端が割れていることで翼の周りにできる乱気流を吹き飛ばすため、低速で飛んだときに失速しにくい。
- ・円翼  
翼の先端が丸く、林の中など込み入ったところでも飛ぶことができる。
- ・扇翼  
翼全体が扇の形をしていて、さまざまな飛行に応用が利く。

表 1 翼の先端の形状





(7) 鳥の翼に生えている羽根の名称

翼の羽の名称は次の8つがある。

- ・初列風切羽  
翼の先端に付いている。羽ばたいたときに推進力(前に進む力)をうみだす。
- ・次列風切羽  
翼の中央付近についている。飛ぶときに揚力(上に浮きあがろうとする力)をうみだす。
- ・三列風切羽  
翼の付け根付近についている。翼と胴体との隙間を埋める。
- ・初列雨覆  
初列風切羽だけでは隙間ができてしまうので、初列風切羽の上にかぶさって隙間を埋めている。雨水等を防ぐ役割もある。
- ・大雨覆・中雨覆・小雨覆  
初列雨覆と同様に、次列風切羽の上にかぶさって隙間を埋めている。
- ・小翼羽  
翼の前方に生えている羽根。ゆっくり飛ぶときや、急降下する時など、特別な飛び方をするときには動かす羽。今回の研究では、この羽を対象とした。

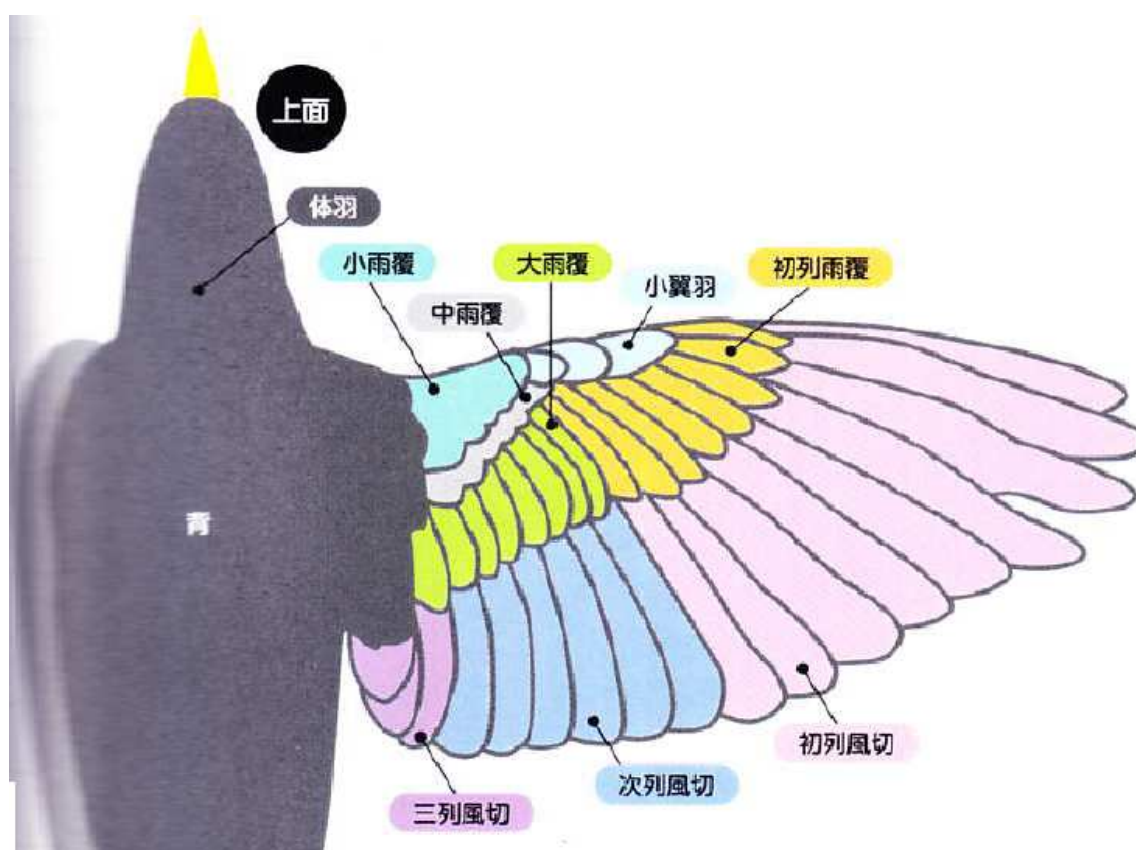


図 2 翼に生えている羽根の種類

(8) 翼の部位を示す飛行機用語

- ・前縁：翼の一番前の縁
- ・後縁：翼の後端
- ・翼弦線：前縁と後縁を結んだ線
- ・翼弦長：翼弦線の長さ
- ・キャンバー：翼弦線と平均線のなす距離(矢高)
- ・平均線：翼のふくらみの中心の線(中心線)
- ・翼幅：翼を水平方向に投影した時の両端の距離
- ・アスペクト比：翼幅を翼弦長で割った数値。翼の細長さを示す。数値が大きいほど飛翔する時のエネルギー効率が良い
- ・最大翼厚：翼下面と翼上面の間の中で最も厚い場所。
- ・最大キャンバー位置：キャンバーが最も大きい場所

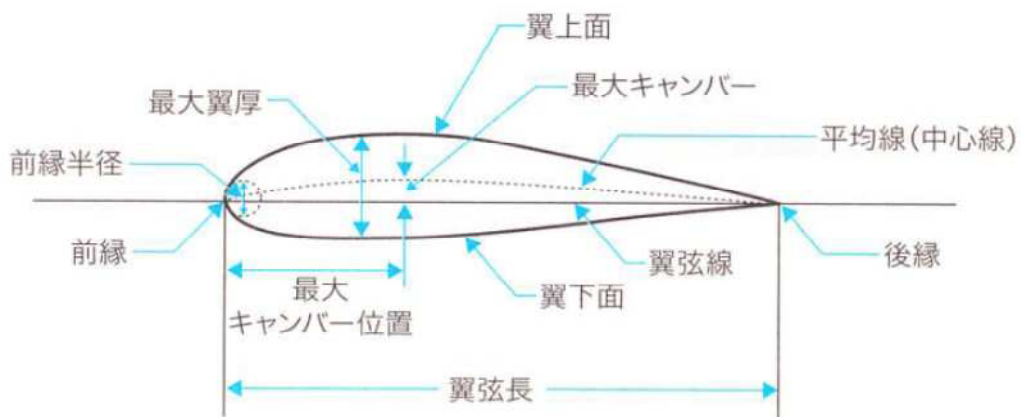


図 3 翼の部位を表す飛行機用語

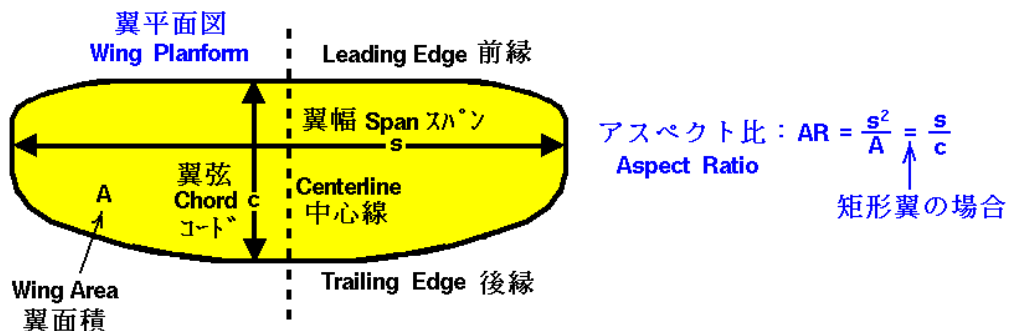


図 4 翼の部位を表す飛行機用語

## 5. 小翼羽の計測

### (1) 目的

食性や飛び方、餌を捕る場所や渡りの有無などの生態によって小翼羽の形状は変わるはずだと考えた。そこで、小翼羽の形状を計測し鳥の生態が違うことによって小翼羽の形状はどのように違うのかを調べた。

### (2) 方法

鳥類の翼をできるだけ多く計測しようと思ったが、生きた鳥を捕まえることや事故死した鳥などを持ってくることは難しく、生物の保護という観点からもしないほうが良いと考えた。そこで、前年度に引き続き、学術的に標本を保存している我孫子市鳥の博物館にお願いして、飛翔型標本の翼の計測をさせていただくことにした。

計測においては、前年度計測させていただいた標本だけでなく、新しい種類の標本も計測させていただくことになったので、全て合計して43種類の飛翔型標本を計測させていただくことになった。

計測は、まず、観察記録用紙を作ることから始めた。翼の計測項目は全長、翼幅、翼弦、翼厚の4つについて測定した。なお、翼幅と翼厚は飛行機用語を参考に自分で決めた。翼幅は体の中心から翼の先端まで、翼厚は揚力をつかさどる次列風切羽の部分の厚さを肘関節、手首関節、その中間の3か所を計測した。また、峰の位置も計測した。翼のいちばん厚いラインにひもを置いて写真を撮り(図-5)、画像からいちばん厚いラインの前側と後側の長さを測った。そして、前側/後側で割合を求めた。

次に、計測に際して用いる道具を自作した。揚力をつかさどる次列風切羽の厚さ計測には、ノギスのジョウに定規を張り付けたものを使った(図6)。大型の鳥の場合は曲げ尺にクリップボードを挟み、大型ノギス状にしたもの(図7)を作った。

そして、鳥の生態と翼の厚さ、翼弦と厚さの割合などを計算によって求めた。

今回計測した標本の一覧を表-2に示す。小翼羽の計測も、まず記録用紙を作るこ



図 5 翼のいちばん厚いラインに糸を置く



図 6 ノギスのジョウに定規を張り付ける



図 7 曲げ尺にクリップボードを挟む

とから始めた。小翼羽の計測項目は翼幅、翼弦、翼厚、枚数の4つについて計測した。翼幅は、小翼羽の生えている第一指の関節から小翼羽の先端まで、翼厚は小翼羽全体の厚さ、翼弦は小翼羽の前端から後端までの幅の中で最も幅が大きい場所を測定した。翼幅、翼弦は定規を使って計測した。翼厚は、自由に曲がる曲げ尺を用い、小翼羽の中央付近のカーブに沿わせるように曲げ、グラフ用紙にそれを写し取って翼厚を計測した。また、翼の計測と同じように峰の位置も計測した。糸を小翼羽の最も厚いラインにあて、写真を撮り、前側/後ろ側で峰の位置の割合を出した。

そして、計測をすることで得た数値をもとに、小翼羽のアスペクト比(縦横比)や翼厚と翼弦の割合(翼弦の大きさに比べて翼厚の大きさはどれくらいか)、小翼羽の面積が翼全体の面積に占める割合、小翼羽を円弧の一部とみたときのその円の半径など、さまざまな数値を計算して出した。そして、小翼羽の形状を定量的に表し、さまざまな数値をもとに生態と小翼羽の形状の関係を考察した。



図 8 小翼羽が生えている場所



図 9 小翼羽の厚さの計測の仕方

### (3) 仮説

小翼羽の形状は生態によって異なり、その中でも小翼羽を使う回数が多い鳥ほど小翼羽が発達していると思う。また、小翼羽には失速を防ぐ役割があると文献調査でわかったが、私は小翼羽には他の役割もあるのではないかと思う。

### (4) 結果

計測した標本の一覧を表2に、その計測結果のデータを表3に示す。

表 2 計測した標本の種類一覧

サンプルNo.	標本番号	鳥種	雌雄	採捕場所
1	03972	シロチドリ	♂	沖縄県八重山郡竹富町西表
2	004678	キョウジョシギ	♀	茨城県潮来市大洲
3	01010	オオミズナギドリ	♂	長野県松本市岡田
4	04299	コシジロウミツバメ	♂	宮城県金華山沖300km
5	01797	ヒメアマツバメ	不明	沖縄県石垣市
7	02887	モズ	♂	北海道滝川市
8	03064	スズメ	♂	千葉県我孫子市栄
9	00475	キジバト	♂	千葉県我孫子市紫崎
10	03289	シジュウカラ	♂	秋田県秋田市中通
11	01342	シメ	♀	長野県北佐久郡軽井沢町長倉
12	02888	アカゲラ	♂	北海道滝川市
13	01749	アオゲラ	♂	栃木県那須郡那須町高久丙
14	01877	フクロウ	♀	千葉県印西市白幡八幡
15	02053	カワセミ	♀	千葉県我孫子市日の出
17	01682	ハシブトガラス	♂	北海道根室市西厚床
18	00606	コジュケイ	♂	千葉県松戸市千駄堀
19	01542	ツツドリ	♂	茨城県つくば市観音台
20	00576	コサギ	♀	茨城県土浦市神立町
21	01462	ヨシゴイ	♀	秋田県南秋田郡大湊村方口
23	01480	アカショウビン	♂	沖縄県石垣市真栄里
24	01005	ヤマセミ	♀	長野県木曾郡奈良井
25	02962	ウズラ	♂	茨城県つくば市観音台
26	01535	キジ	♀	千葉県我孫子市我孫子
28	03140	マガモ	♀	(購入)
29	04425	ハイタカ	♀	秋田県大曲市
30	91-35-1	ノスリ	♀	—
31	02135	サシバ	♀	沖縄県石垣市久守良
32	00486	トビ	♀	秋田県本庄市
33	01418	ウミネコ	♀	青森県八戸市蕪島
34	00449	ユリカモメ	♂	千葉県我孫子市手賀沼
13-36	01478	カケス	♀	柏市十余二348
13-37	04527	オナガ	♀	長野県長野市小田島町
13-38	03938	ハシボソミズナギドリ	♀	千葉県千葉市源町
13-39	02637	オシドリ	♂	飼育
13-40	03144	コガモ	♀	購入
13-41	03141	カルガモ	♂	購入
13-42	03152	オナガガモ	♀	購入
13-43	01454	バン	♀	千葉県松戸市栄町6丁目
13-44	00439	ヤマシギ	♀	沖縄県石垣市川原
13-45	00970	ハマシギ	♀	茨城県土浦市手野町
13-46	01820	ウトウ	♀	秋田県本荘市松ヶ崎茅川
13-47	04680	マミジロ	♂	長野県八千穂村八千穂荘
13-48	04148	ツグミ	♂	我孫子市つくし野

表— 3

(5) 考察

①全長と小翼羽の面積について

i 方法

グラフの x 軸を全長、y 軸を小翼羽の面積として散布グラフを作った。

ii 結果

図 10 の通り。

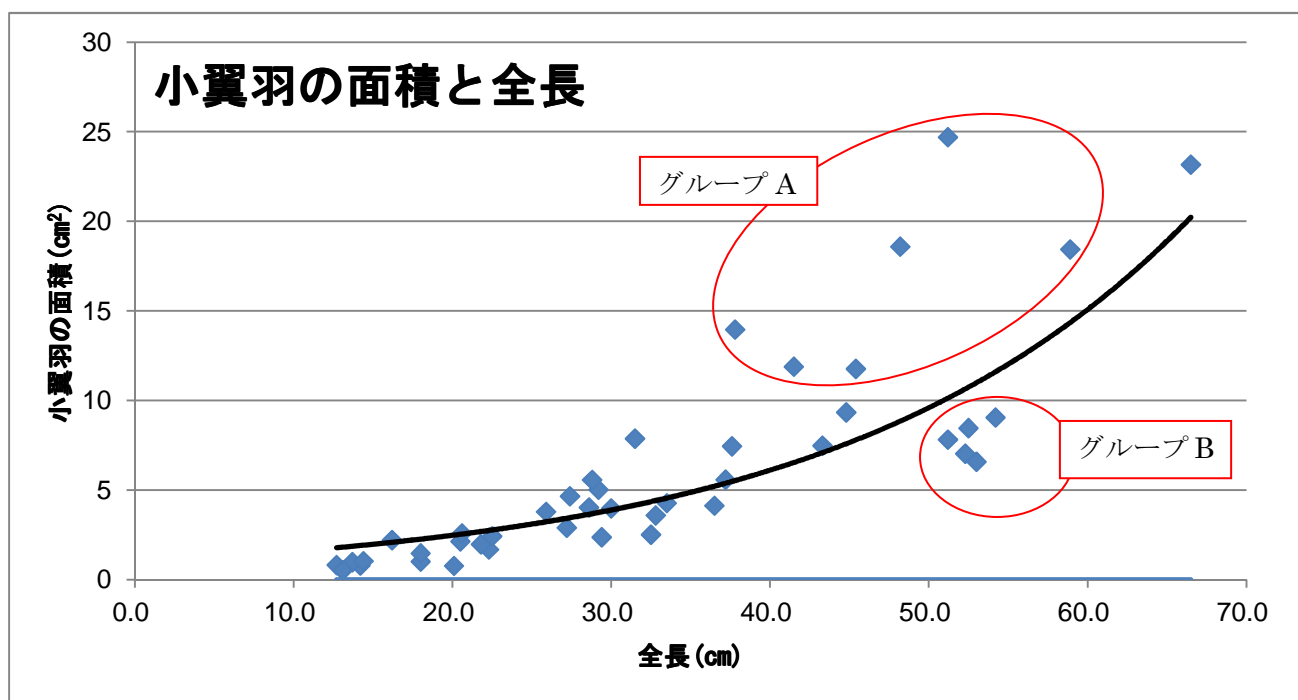


図 10 小翼羽の面積と全長の関係

iii 考察

鳥類の小翼羽は、全長が大きくなると面積も大きくなる。

また、比較的大型の(全長が大きい)鳥において、小翼羽が大きい鳥(グループ A)と小さい鳥(グループ B)とに分けられる。

グループ A: フクロウ、ハシブトガラス、サシバ、トビ、ウミネコ、ハイタカ  
グループ B: コサギ、キジ、マガモ、カルガモ、オナガガモ

それぞれのグループの違いをみると、グループ A は餌を取る時に飛翔を伴う鳥で、グループ B は餌を取る時には飛翔を伴わない鳥である。このことから、餌を取る時に飛翔を伴う鳥は小翼羽がよく発達していて、餌を取る時に飛翔を伴わない鳥はあまり発達していないことが分かった。餌の取り方の違いが小翼羽の形態の違いに影響しているのではないかと思う。



## ②小翼羽の使用頻度と面積について

### i 方法

次の観点にしたがって小翼羽の使用頻度が高いかどうかを分け、x 軸を全長、y・軸を小翼羽の面積として散布グラフにした。

(小翼羽の使用頻度が高い鳥)

- ・林、草地で餌を取る鳥(他の鳥の餌になりやすいため、逃げるために飛び立つ回数が多いため)
- ・飛びこんだり、急降下したり、ホバリングしたりしながら餌を取る鳥(このような特殊な飛び方をするときは小翼羽が頻繁に使われるため)

(小翼羽の使用頻度が低い鳥)

- ・使用頻度が高い鳥で選択した鳥以外

①で、全長と小翼羽の面積は一次関数の関係にあることが分かったため、グラフの傾きが大きいものは全長に対して小翼羽の面積が大きく、傾きが小さいものは全長に対して小翼羽の面積が小さいと表すことができる。

### ii 結果

図 11 の通り

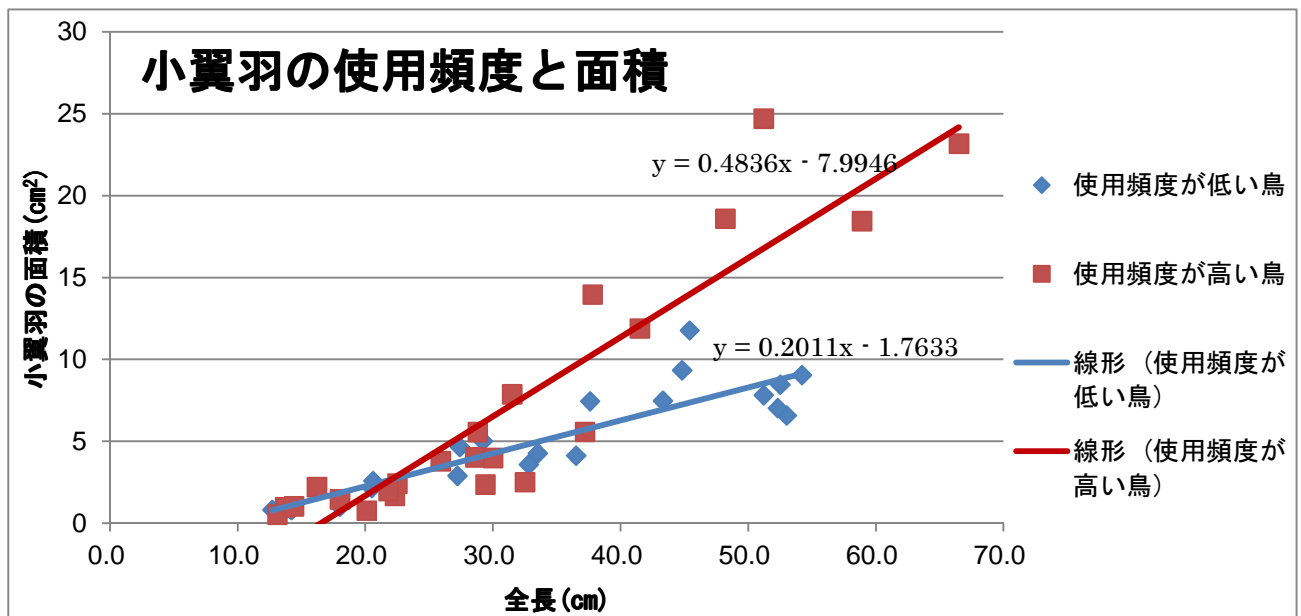


図 11 小翼羽の使用頻度と面積の関係

### iii 考察

小翼羽の使用頻度が高い鳥は低い鳥に比べて小翼羽の面積が全長に対して大

きい。

### ③採餌場所と小翼羽の面積について

#### i 方法

グラフの x 軸を全長、y 軸を小翼羽の面積としてグラフを作り、採餌場所との関係を調べた。

#### ii 結果

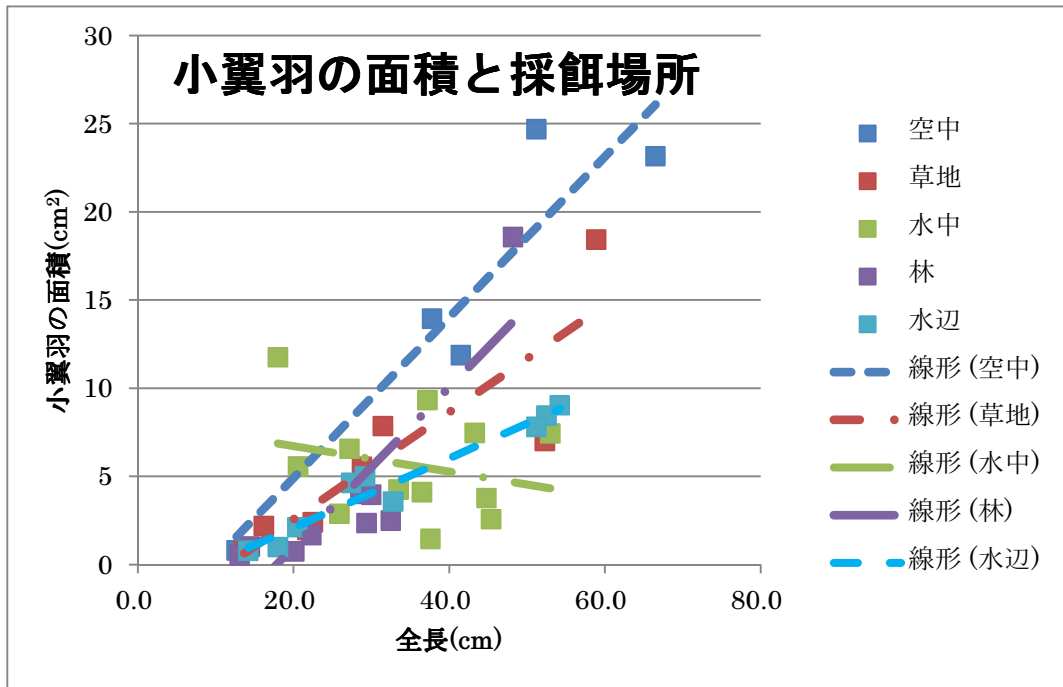


図 12 小翼羽の面積と採餌場所の関係

#### iii 考察

空中、草地、林、水辺で餌を取る鳥は全長が大きくなると小翼羽の面積も大きくなるのに対し、水中で餌を取る鳥は全長が大きくなっても小翼羽の面積はあまり変わらない。つまり、水中で餌を取る鳥は全長にかかわらず、一定の面積の小翼羽が必要である。

#### ④ 飛翔方法と小翼羽の面積について

##### i 方法

グラフの x 軸を全長、y 軸を小翼羽の面積として散布グラフを作成し、飛翔方法(滑空、羽ばたき)との関係を調べた。

##### ii 結果

図 13 の通り

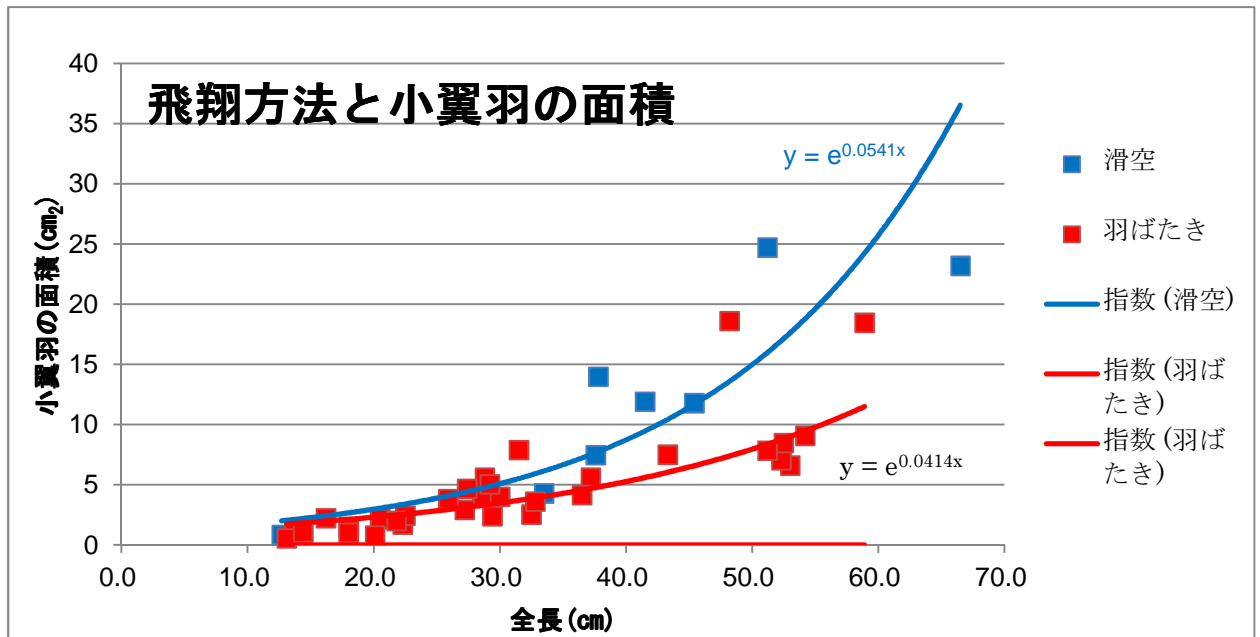


図 13 飛翔方法と小翼羽の面積

##### iii 考察

滑空をする鳥は羽ばたきをする鳥に比べて小翼羽の面積が大きい。つまり、滑空をする鳥は羽ばたきをする鳥に比べて小翼羽の使用頻度が多い。

⑤小翼羽の面積が全長の大きさに占める割合と飛翔方法

i 方法

小翼羽の面積が全長の大きさに占める割合を飛翔方法ごとに上から大きい順で表に並べ、他の生態との関係を調べた。

ii 結果

表4の通り

表 4 小翼羽の面積が全長の大きさに占める割合と飛翔方法の関係

サンプル No.	種名	飛翔方法	採餌場所	面積 (cm <sup>2</sup> )	全長(cm)	小翼羽が全長に占める割合
30	ノスリ	滑空	空中	24.7	51.2	0.48
29	ハイタカ	滑空	空中	13.96	37.8	0.37
32	トビ	滑空	空中	23.17	66.5	0.35
31	サシバ	滑空	空中	11.89	41.5	0.29
33	ウミネコ	滑空	水中	11.77	45.4	0.26
14	フクロウ	羽ばたき飛行	林	18.59	48.2	0.39
17	ハシブトガラス	羽ばたき飛行	草地	18.44	58.9	0.31
18	コジュケイ	羽ばたき飛行	草地	7.87	31.5	0.25
9	キジバト	羽ばたき飛行	草地	5.57	28.8	0.19
13-39	オシドリ	羽ばたき飛行	水中	7.48	43.3	0.17

iii 考察

滑空をする鳥の中で、小翼羽の面積が全長の大きさに占める割合が大きい鳥は、空中で餌を取る鳥が多い。また、羽ばたき飛行をする鳥の中で、小翼羽の面積が全長の大きさに占める割合が大きい鳥は、林や草地など、小翼羽の使用頻度が多い場所で餌を取る鳥が多い。

⑥小翼羽の R(半径)と採餌場所について

i 方法

小翼羽の断面を円の一部とみたとき、次ページの図のようになるため、三平方の定理を利用して  $R = (\ell/2)^2 + (r-h)^2 / ((r-h)/2)$  とし、その数値が大きいかほどカーブは緩やかであり、小さいほどカーブがきついと表した。そして、その数値を散布グラフにし、採餌場所との関係を調べた。

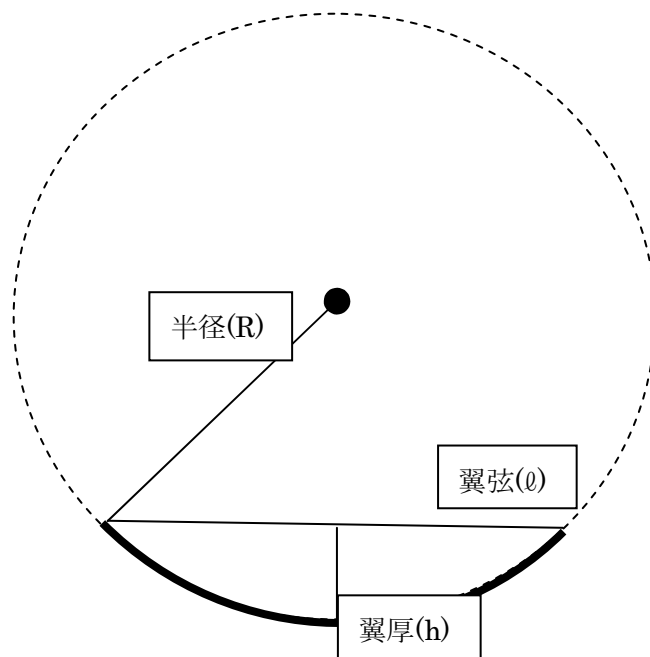


図 14 小翼羽を円の一部とみたときの半径(R)

ii 結果

図 15 の通り

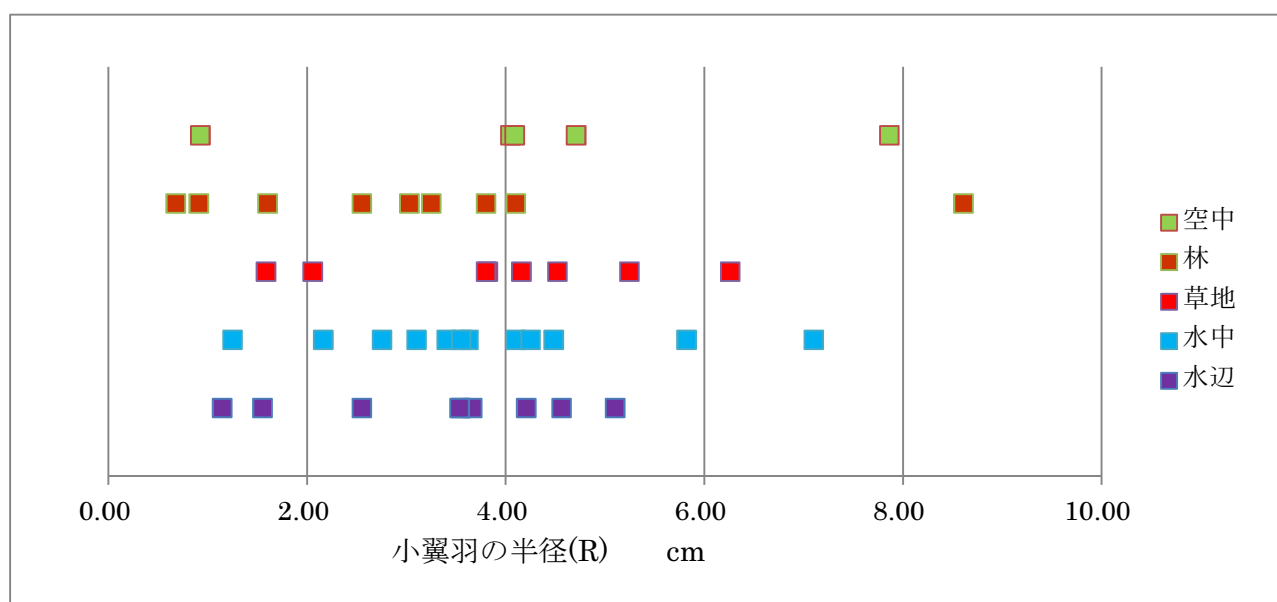


図 15 小翼羽を円の一部とみたときの半径(R)の大きさと採餌場所の関係

### iii 考察

小翼羽を円とみたときの半径(R)の大きさは、採餌場所にあまり大きく関係しない。ただ、Rの値が8.0前後の鳥はフクロウ(8.61)とハイタカ(7.86)だった。これらの鳥は、餌を取る時に急降下をする鳥である。急降下と小翼羽のRの値は何か関係があるかもしれない。

## ⑦小翼羽のRと翼の先端の形状

### i 方法

⑥と同様に小翼羽を演習の一部だと見立てたときの半径(R)を求め、それを散布図にし、翼本体の先端の形状と比較した。

### ii 結果

図16の通り

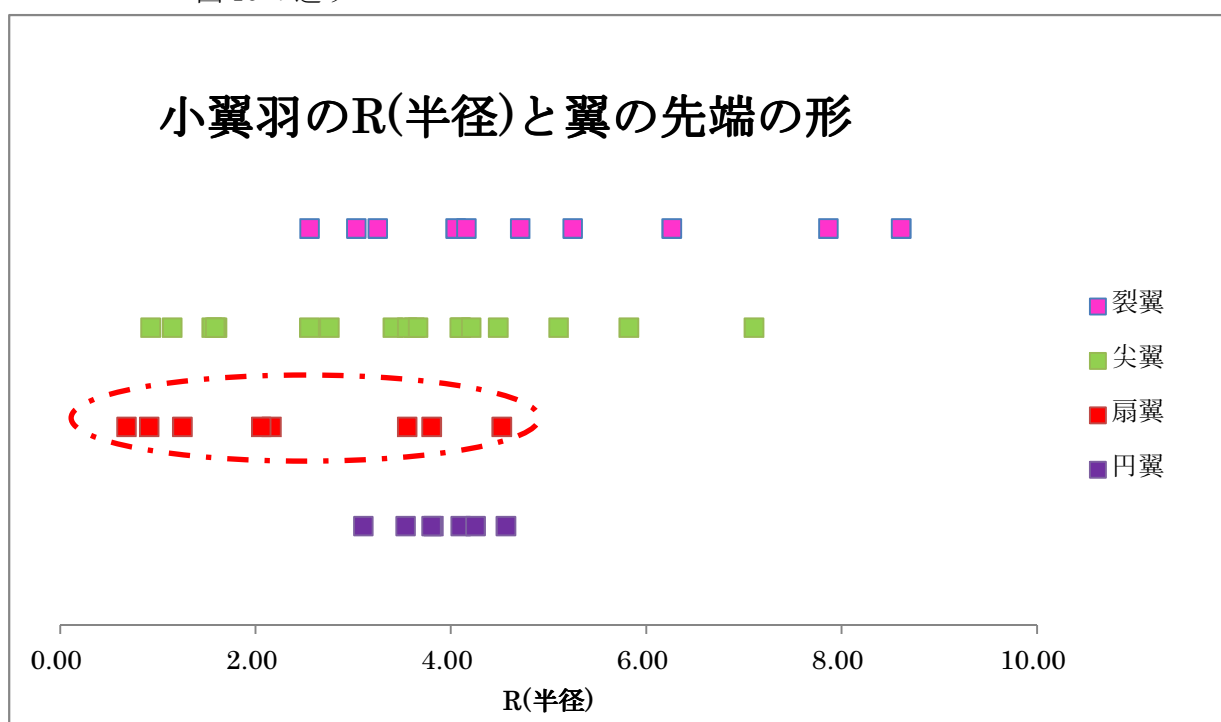


図 16 小翼羽を円の一部とみたときのその円の半径(R)の大きさと翼の先端の形

### iii 考察

小翼羽を円の一部だとみたときのその円の半径(R)の大きさと翼の先端との関係はあまり見られないが、扇翼の翼ではRが小さい(カーブがきつい)ものが多い。

### ⑧小翼羽のアスペクト比と採餌場所

#### i 方法

小翼羽のアスペクト比(縦横比)を翼幅÷翼弦で求め、それを散布図にプロットして採餌場所との比較をした。

#### ii 結果

図 17 の通り。

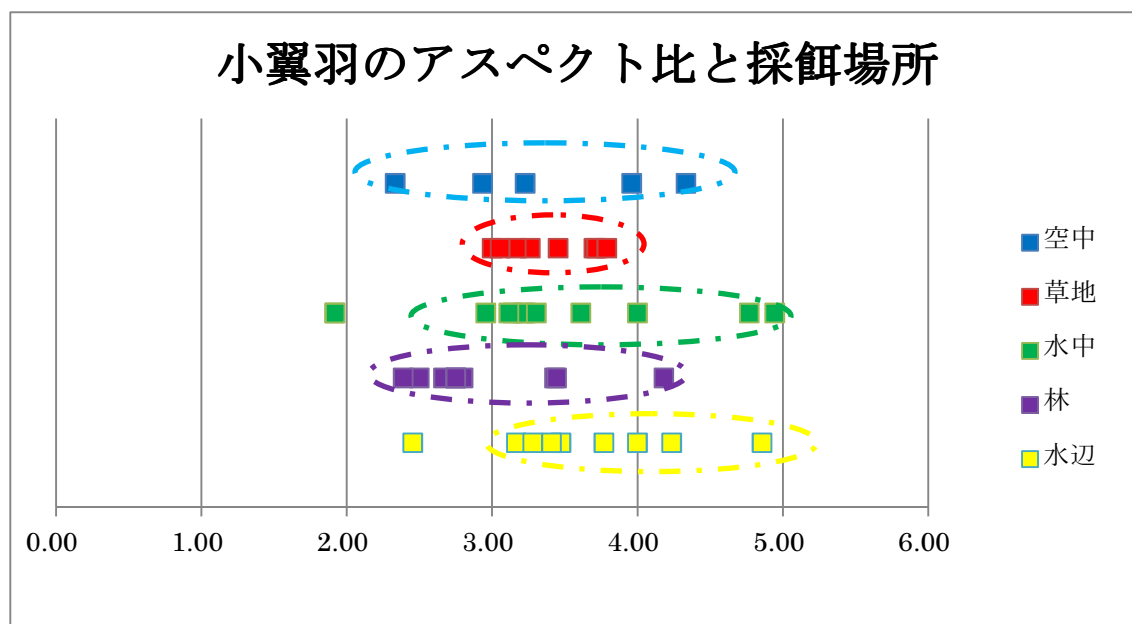


図 17 小翼羽のアスペクト比と採餌場所の関係

#### iii 考察

紫の円で囲んだように、林で餌を捕る鳥は小翼羽のアスペクト比が小さい(太短い)種が多いが、他の場所で餌を捕る鳥はあまり関係がみられない。

### ⑨小翼羽の先端の形状と小翼羽の面積が翼全体の面積に占める割合

#### i 方法

小翼羽を観察するうち、小翼羽の形状はいくつかの種類に分けることができることに気づき、形状を種類分けした。そして、その種類ごとに小翼羽の面積が翼全体の面積に占める割合を散布グラフにし、小翼羽の全体の形状との関係を調べた。

小翼羽の先端の形状の分け方の観点

- ・木の葉形：先端が丸い
- ・笹の葉型：全体的に細長く、先端はとがっている
- ・ひし形：全体的にひし形、平行四辺形の形をしている

それぞれで分類した典型的な例を図に示す。

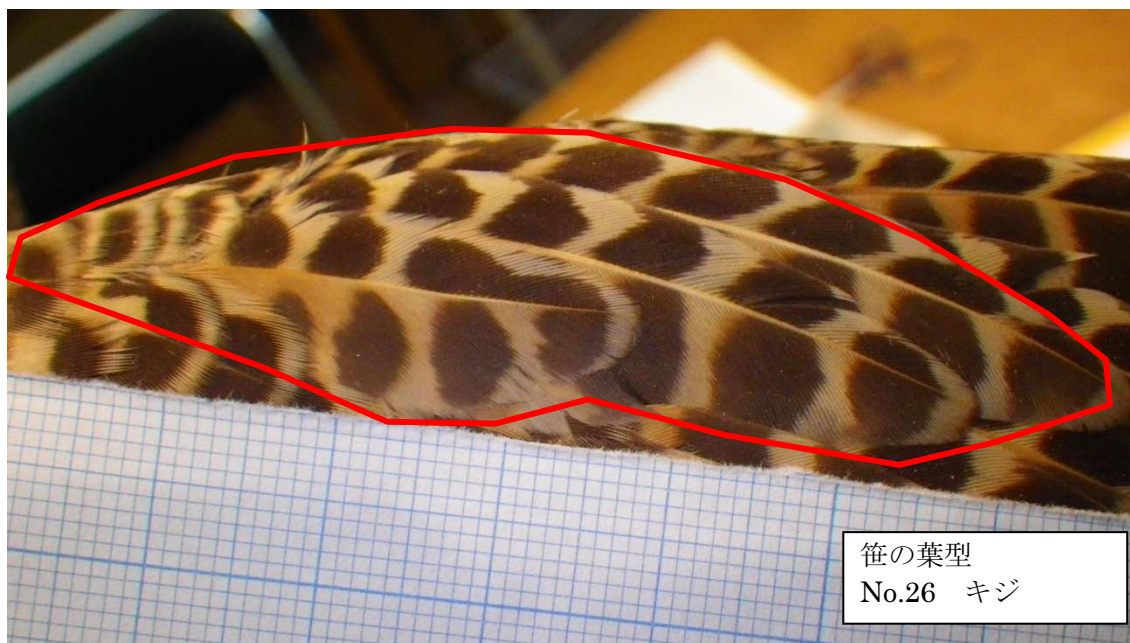


図 18 笹の葉型の小翼羽をもった鳥の代表的な例

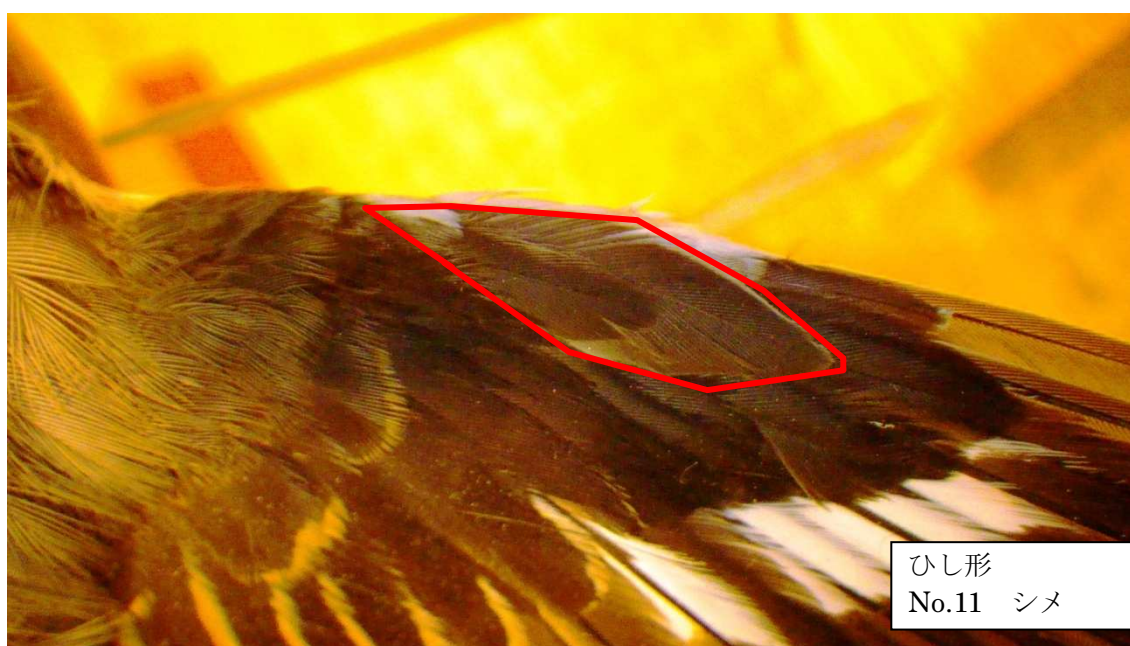


図 19 ひし形の小翼羽をもった鳥の代表的な例



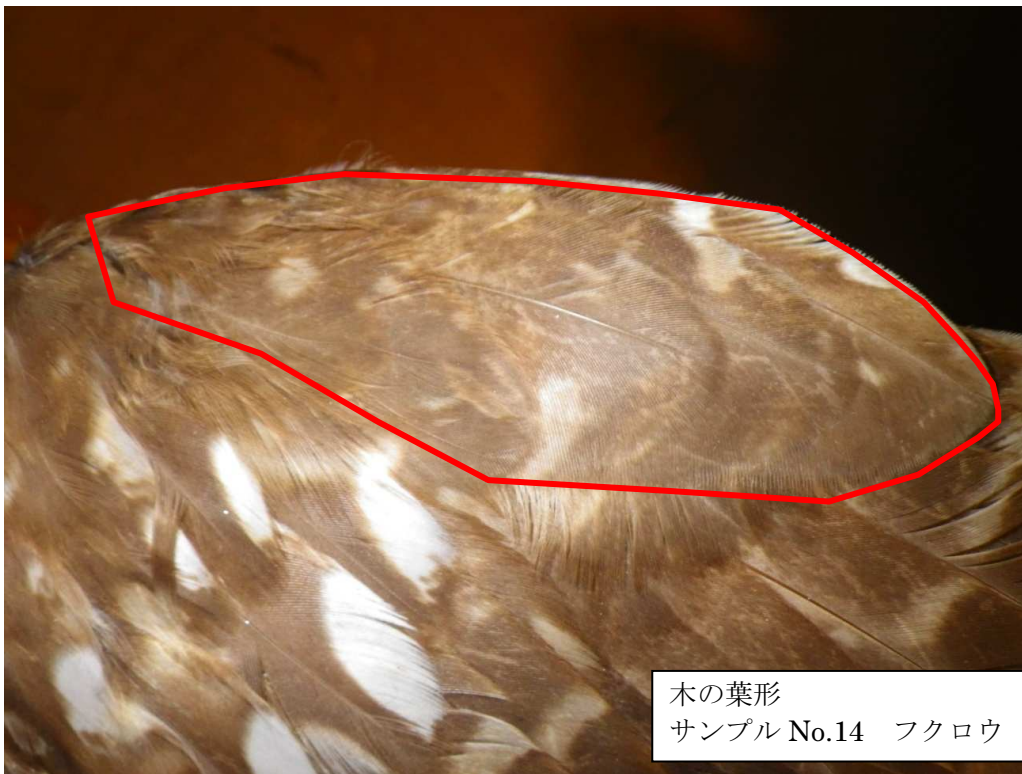


図 20 木の葉形の小翼羽をもった鳥の代表的な例

ii 結果

グラフの通り

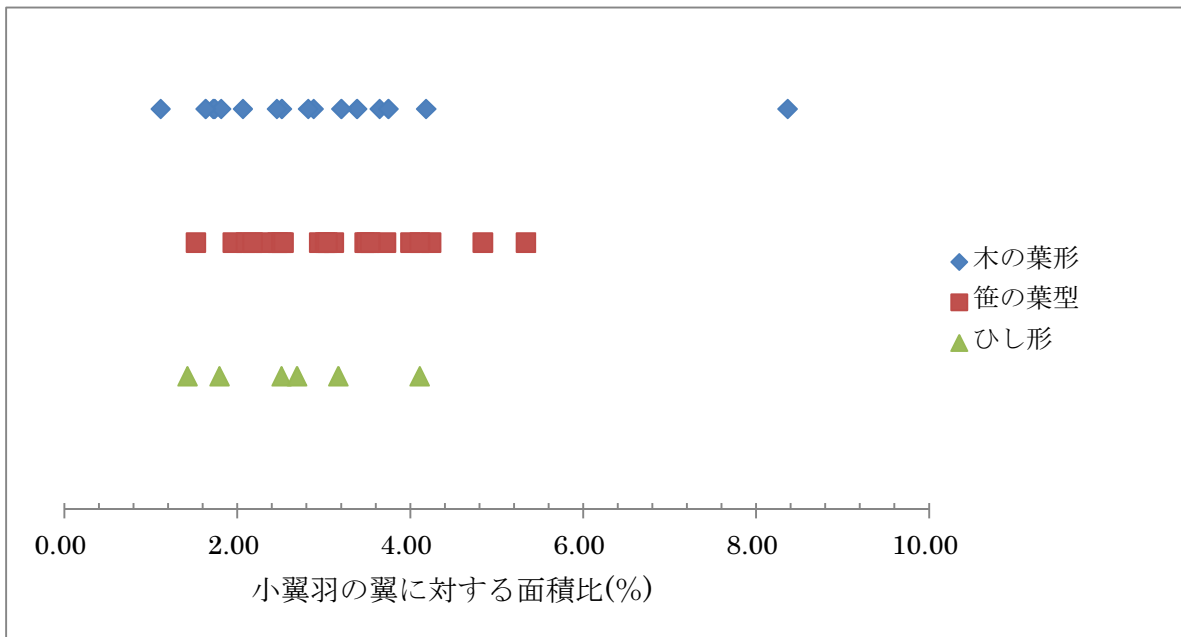


図 21 小翼羽の全体の形状と小翼羽の面積が翼全体の面積に占める割合の関係

### iii 考察

小翼羽の全体の形は、小翼羽の面積が翼全体の面積に占める割合にはあまり関係がない。なお、面積比が 8 を超える大きな値を示しているのは、ハイタカである。ハイタカは餌を取る行動において頻繁に急降下をする鳥であり、そのことと関係があるのかもわからない。

## ⑩小翼羽の全体の形状と翼本体の先端の形状

### i 方法

⑨で分類した小翼羽の形状を利用し、翼本体の先端の形状と比較した。

### ii 結果

表の通り。表の数字はそれぞれサンプル数である。

表 3 小翼羽の全体の形状と翼本体の先端の形状の関係

	木の葉形	笹の葉型	ひし形
円翼	2	5	0
扇翼	2	1	5
尖翼	6	13	0
裂翼	6	3	1

### iii 考察

扇翼とは翼の全体が扇型をしていて、さまざまな飛行に応用が利く翼である。円翼とは翼の先端が丸い翼で、林等の込み入った場所も飛べる翼である。昨年の研究では、どちらの鳥も林や草地で餌を取る鳥が多く、羽ばたいて急に飛び上がる鳥が多いため、羽ばたきの抵抗にならないようにアスペクト比が小さいことが分かった。

尖翼とは先端がとがった翼で、高速滑空性能に優れた翼である。昨年の研究では、尖翼の翼をもった鳥は空中で餌を取る鳥が多く、滑空により有利なようにアスペクト比が大きいことが分かった。

裂翼とは初列風切羽が分かれていて翼の先端が裂けている翼である。昨年の研究では裂翼の鳥はさまざまな場所で餌を取るため、翼のアスペクト比の大きさも種によって異なり、さまざまな種類の飛び方をする鳥に多い翼であることが分かった。

今回の観察では、円翼や尖翼の翼には笹の葉型の小翼羽が多く、扇翼にはひし形の小翼羽、裂翼には木の葉形の小翼羽が多くついていることが分

かった。このことから、ひし形の小翼羽は扇翼の鳥の特徴的な行動である急に飛び立つことに役立つ、つまり離陸時に有利なように働き、笹の葉型の小翼羽は円翼や尖翼の鳥の特徴的な行動である滑空時と離陸時に有利に、そして木の葉形の小翼羽は裂翼の鳥の行動の特徴である失速が起きそうな飛び方の時に対して効果を持つのではないかと考えた。

## (6) まとめ

- 小翼羽の大きい鳥とは、①小翼羽の使用頻度(着陸、離陸、急降下、ホバリング、餌になりやすい)が多い鳥 ②滑空をする鳥 の2つである。
- 水辺で餌を取る鳥は、その全長にかかわらず一定の面積の小翼羽が必要である。
- 扇翼の鳥の小翼羽は、小翼羽の断面を円周の一部だとみたときのその円の半径(R)が大きいものが多い。
- 林で餌を捕る鳥は小翼羽のアスペクト比が小さい(太短い)が、他の場所で餌を捕る鳥は小翼羽のアスペクト比とはあまり関係がみられない。
- 小翼羽の全体の形状と翼との面積比にはあまり関係が見られない。
- 小翼羽の全体の形状と翼の先端の形状は、円翼や尖翼の翼には笹の葉型の小翼羽が多く、扇型の翼にはひし形の小翼羽、裂翼の翼には木の葉形の小翼羽が多く付いているという関係がある。
- ひし形の小翼羽は急に飛び立つときに有利で、笹の葉型の小翼羽は滑空時だけでなく羽ばたいて飛ぶときにも有利である。木の葉形の小翼羽はどのような飛び方の時でも小翼羽としての効果を持つ。
- 例外もいくつかあったが、それは、小翼羽には他にも役割があるということを示していると考えている。

以上のようなことから、木の葉形の小翼羽をもった鳥は翼の先端の形が裂翼や尖翼であるものが多かった。裂翼の鳥の代表的な例としてフクロウがあるが、フクロウは林の中で急降下して小動物を捕獲し、餌としている。そのため、餌を取る時に失速してしまうと餌が取れなくなってしまうため、失速をしないようにしなければならない。そのようなフクロウに発達している木の葉形は、失速を防ぐことのできる小翼羽の形なのではないかと考えた。

笹の葉型の小翼羽をもった鳥は翼の先端の形が尖翼であるものが多かった。尖翼の代表的な例としてウミネコやユリカモメをはじめとする海鳥があるが、海鳥は海の上などで長時間飛び続ける必要がある。そのため、海鳥では安定して揚力を得る必要がある。このことから、海鳥に多く生えている笹の葉形の小翼羽は揚力を増強させて、さらに安定した揚力を作り出す働きがあるのではないかと考えた。

そして、ひし形の小翼羽をもった鳥は翼の先端の形が扇翼であるものが多かった。扇翼の鳥の代表的な例としてスズメやシジュウカラなどの小鳥がある。小鳥は、長距離を飛ぶことが苦手であるため、短距離を飛んでは着陸し、飛んでは着陸しを繰り返して移動する。そのため、他の鳥に比べて離着陸の回数が多い。何度も離着陸するたびに失速していると天敵に狙われやすくなるので、離陸と着陸の両方で失速を防ぐことができないといけない。このことから、ひし形の小翼羽は離陸時に補助的な揚力を発生し、着陸時に失速を防ぐ笹の葉型の小翼羽と木の葉形の小翼羽の両方の性質をもった小翼羽ではないかと考えた。

## 6. 手羽先の観察

### (1) 目的

この後のモデル実験を行う前に、実際の鳥の小翼羽の可動域はどれくらいなのかを調べ、モデル実験で用いるモデル翼の作成の参考にした。

### (2) 方法

他動することのできる関節は自動することでもできることを利用して、スーパーマーケットでニワトリの手羽先を購入し、小翼羽が生えている第1指を指で動かし、第1指の関節の可動域を調べる。このとき、小翼羽が生えている状態を再現するために小翼羽が生えていた毛穴に細いアルミ棒を差し込み、アルミ棒の先端と関節のなす角度を調べる。また、第1指の動きだけでなく、毛穴の筋肉による小翼羽の動きもあると考え、アルミ棒のみを無理のない範囲で動かし、可動域を計測した。



図 22 小翼羽が生えていた穴に針金を差し込む

### (3) 予想

第1指の可動域は小さいが、第1指が動くことで小翼羽の生えていた毛穴付近の皮膚がのばされ、小翼羽自体の可動域は第1指の可動域より大きいと思う。

### (4) 結果

図の通り。

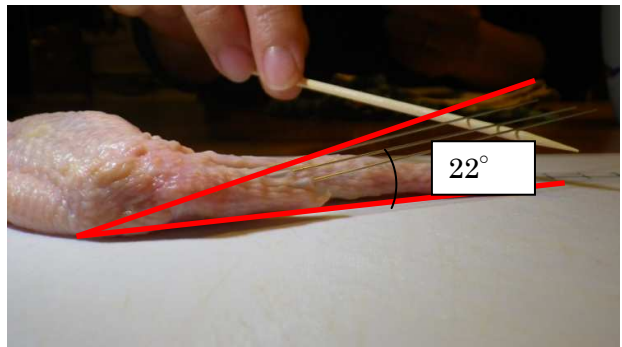
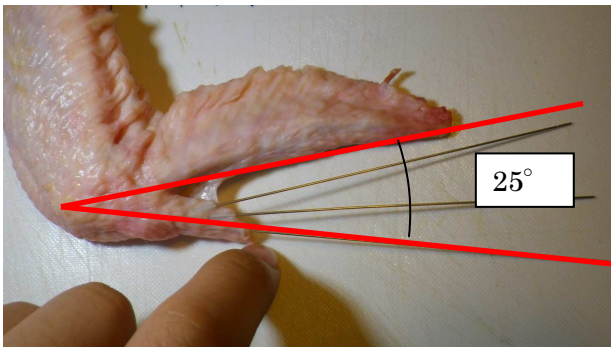


図 23 結果

### (5) 考察

鳥の小翼羽が生えている第一指は前方向に  $25^\circ$ 、上方向に  $22^\circ$  動く。

## 7. モデル実験①

### (1) 目的

小翼羽の形状を計測して分かったことをもとに、鳥が実際に小翼羽を出して飛翔することでどれくらいの揚力を発生するのか、あるいは失速を防止することができるのかや、小翼羽の有無や形状によってそれらの力の大きさに差が出るのかを翼をモデル化することで調べた。

### (2) 方法

#### 1) 実験の概要

翼は本来空中を移動しているが、そのようにして翼を空中で動かして揚力の発生を計測するのは難しいので、周りの空気自体を動かす(風を起こす)ことにした。

また、揚力が発生するということはそのものが上向きに引っ張られることであり、物体自体の質量は変化しないが、秤では本来の質量よりも軽く表示され、定量的に揚力が計測できるのではないかと考えた。

ケント紙で翼の模型を作り、家庭用キッチンスケールに乗せて風袋として表示を 0 にし、前から扇風機で風を当てた。そして、天秤の目盛がマイナスの表示になるかを調べた。なお、翼はそのまま天秤に乗せるのではなく、厚紙で台を作ってそれにクリップで止めて使った。台の中にも空気が流れるように空洞を作った。

しかし、前から扇風機で風を当てるだけでは扇風機の風は乱れているため秤の数値が安定しない。そのため、風洞実験装置を作成して安定した風を流し、揚力を計測することにした。

#### 2) 風洞実験装置の作製

昨年度のモデル実験では、波板を細く切ったものを重ねて段ボール箱に入れた整流板を扇風機につなげ、風を流して揚力の計測を行っていた。しかし、整流板で風を整えたが、秤の数値が安定しないときがあった。安定しなかった原因は横からの風があたったからではないかと考え、このモデル実験を行うに当たって、前年度よりもより他の影響を受けない風洞実験装置を作成することにした。特に横からの風の影響を防ぐため、板で三方を囲うことにした。その際、中が見えるように板には透明の塩ビ板を用いた。風洞実験装置は以下の手順で作成した。

- ①外枠として木の角材を直方体の形に組み、釘で固定した。
- ②透明の塩ビ板を切り取り、溝付きの角材を四方にはめ込み、塩ビ板を補強した。
- ③①で作った大きいフレームに、②で作った塩ビ板を張り付けた。この際、上の面だけはモデル翼を取り出すために接着せず、自由に開くようにした。
- ④昨年度に作った整流板を風洞に固定し、段ボールで目張りをした。
- ⑤実際の揚力の計測では、風が扇風機の中央に集まることを防ぐため、風を中央

だけでなく隅まで分散させるため、扇風機のすぐ後ろに網戸を貼った。また、失速を再現する実験ではより弱い風が必要なので、網戸をベニヤ板に穴をあけた自作のスリットに付け替えて風力を弱くした。

⑥昨年度は扇風機によってモデル翼に風を送って揚力を計測したが、今年度はより均一で微風な風を発生させるため扇風機で風を風洞から吸い出すことで風を発生させて計測した。



図 25 整流板



図 24 風洞実験装置



図 26 風洞実験装置全景

### 3) 実験の手順

前年度と同様に、ケント紙を用いてモデル翼を作成した。この際、用いるデータは今年度新たに計測した翼のデータを使用し、翼厚の値は翼厚と翼弦の割合の平均(6.55%)を用いた。アスペクト比は考えないものとし、風洞実験装置の大きさにあうようなモデル翼を作成した。翼の計測の際の翼の面積は投影図で計測しているため、曲げた分の面積は考えないものとし、投影図が  $14\text{cm} \times 18\text{cm} = 252\text{cm}^2$  の長方形になるようにした。そして、小翼羽の形状と発生する揚力の大きさを調べるため、さまざまな形状の小翼羽のモデル翼を作成した(表6)。

小翼羽の面積は、計測で得たデータをもとに、翼本体の面積に占める小翼羽の面積の割合の最大値(8.36%、ハイタカ)、平均値(2.95%)、最小値(1.11%、トビ)の3種類の面積のものを作成した。

また翼本体の形状と同様に、小翼羽の全体の形状が鳥によって違うことに気付き、①木の葉型、②ひし形、③笹の葉型の3種類の形状の小翼羽モデルを作成した(表6)。小翼羽のアスペクト比は、アスペクト比が大きいくほど高速飛行時に揚力がより大きく出ると考え、①、②のアスペクト比を基本として③のアスペクト比を2倍として作成した。

小翼羽を翼に取り付ける際の角度については、ニワトリの手羽先を観察したデータをもとに決定した。手羽先の観察では、小翼羽部分は前方向に  $22^\circ$  出ることが分かったことから、モデル小翼羽も前に  $22^\circ$  出るようにした。また、翼に対する傾きは手羽先の観察の際の可動範囲の最大と最小である  $25^\circ$  (翼に対して  $25^\circ$  立てた状態)と  $0^\circ$  (翼と平行に寝かした状態)の2ケースを作成した。

面積を3種類、全体の形状を3種類、上方向の迎え角2種類に分けて作成したので、合計で18種類の小翼羽を作成した。小翼羽のモデル翼は、翼本体のモデル翼に切り込みを入れ、そこに差し込んで装着し、抜けないようにモデル翼の裏面からテープを張って固定した。そして、小翼羽の有無、付ける小翼羽の形状などの違いによってどのように揚力に差が出るのかを調べた(図27)。

また、小翼羽の失速防止装置としての役割を調べるため、翼の後縁を



図 27 実験時  
(モデル翼にモデル小翼羽を装着した状態を上から見た)



軸として回転し、角度を  $10^\circ$  ごとに調節できる装置を作成し、どれくらいの角度で失速するか、また、失速した状態で小翼羽がつくと揚力は復元するかを調べた。(図 29)

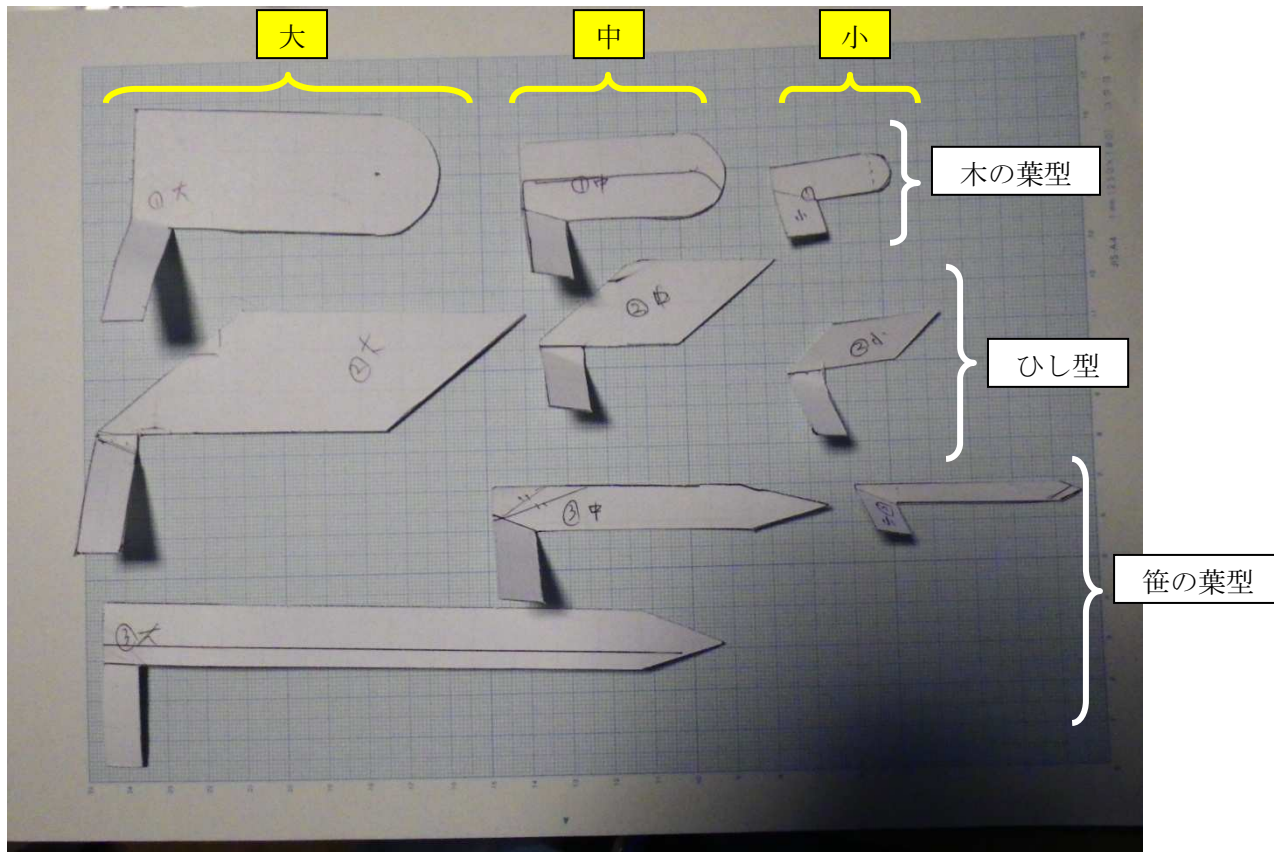


図 28 作成したモデル小翼羽




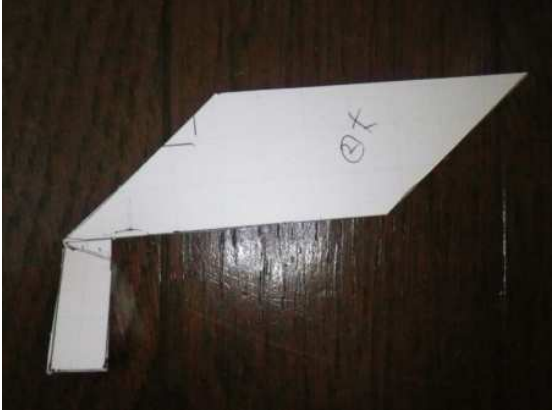

正面斜め上から見た



横から見た

図 29 モデル翼の迎え角を  $10^\circ$  刻みで調節できる装置

表 6 作成したモデル小翼羽とモデルにした鳥

番号	名称	モデルにした鳥	写真
①	木の葉型	フクロウ、ハシブトガラスなど	
②	ひし形	シジュウカラ、スズメなど小鳥全般	
③	笹の葉型	コサギ、キジ、ウズラなど	

### (3) 仮説

より実際の小翼羽の使用条件(着陸時など)に近い微風において最も効果を発揮し、その中でも、実際に使用頻度が多いフクロウや小鳥などの小翼羽の形状である①、②が微風でより大きい揚力を発生すると思う。高速飛行を想定した強風においては、アスペクト比の大きい③の小翼羽がより揚力を発生すると思う。

### (4) -1 予備実験①

#### ①目的

実際に小翼羽に発生する揚力を計測する前に、作成した風洞実験装置の風が一定の風速で吹き、安定した計測ができるかを確かめる。

#### ②方法

作成した風洞実験装置の中の、実際にモデル翼を設置するところに小型の風速計を針金で吊り下げて3通りの風を流し、風速をそれぞれ10回ずつ繰り返し計測した。

#### ③結果

表7に示した風速がそれぞれ10回の測定においても±0.1の範囲に収まって計測され、安定して風を流せることが確認できた。

**表 7 風洞実験装置の中で流れる風の風速**

	風速 (m/s)	備考
強	3.0	扇風機強+網戸
弱	2.1	扇風機弱+網戸
微	0.6	扇風機弱+穴あきベニヤ板

### (4) -2 予備実験②

#### ①目的

小翼羽による失速防止効果を確認するために、モデル翼で失速を実験的に起こすことが必要であり、またその状態をいつでも再現できるようにしなくてはならない。そのため、モデル翼の迎え角を変えながら、どの迎え角で失速が起こるかを調べる。

#### ②方法

モデル翼の迎え角を10°刻みで調節できる装置を厚紙で作成し(図29)、迎え角を変化させながら、風洞装置内で揚力の変化を調べる。

### ③結果

図 30 に示す。今回のモデル翼では、迎え角が  $40^\circ$  の時に最も揚力が大きくなり、それより迎え角を大きくすると次第に揚力が小さくなって、 $60^\circ$  ではほぼ揚力が無くなり、 $70^\circ$  以上では揚力より抑えつける力が上回った。

この予備実験の結果から、今後の実験では、失速するときの状態を再現するときには迎え角を  $60^\circ$  にして実験を行うこととした。

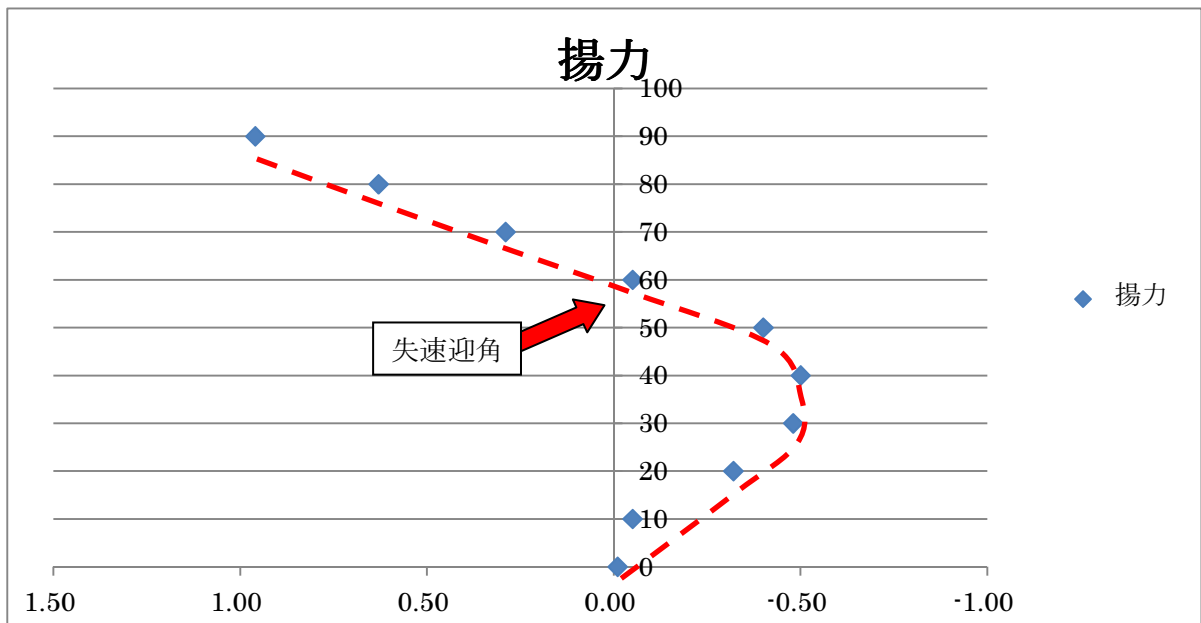


図 30 モデル翼の迎え角の変化と揚力の変化

### (5) 本実験

#### ①小翼羽の有無や形状と揚力の関係を調べる実験

##### 1) 目的

小翼羽の有無や形状、つく角度の違いによって発生する揚力の大きさに違いが出るかを調べる。

##### 2) 方法

5. (2) に記載したように計測を行った。9 種類の小翼羽を小翼羽と翼の角度を  $0^\circ$  と  $25^\circ$  の 2 種類に変え、それぞれにおいての揚力の発生を調べた。

3) 結果

結果を表 8 と表 9 にまとめる。

表 8 結果 小翼羽を翼に平行寝かした場合(角度 0° )

小翼羽の条件		風速 (m/s)	実験回数										
形	大きさ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(平均)
無		強風 (3.0)	-1.8	-1.8	-1.9	-1.7	-1.7	-1.7	-1.6	-1.8	-1.7	-1.7	-1.74
①	大		-2.5	-2.5	-2.5	-2.3	-2.4	-2.5	-2.5	-2.4	-2.5	-2.5	-2.46
②			-1.6	-1.5	-1.4	-1.4	-1.3	-1.5	-1.5	-1.4	-1.6	-1.6	-1.48
③			-2.7	-2.6	-2.9	-2.7	-2.7	-2.8	-3.1	-2.8	-2.9	-2.8	-2.80
①	中		-2.4	-2.4	-2.3	-2.2	-2.3	-2.1	-2.2	-2.3	-2.0	-2.0	-2.22
②			-1.5	-1.7	-1.3	-1.7	-1.4	-1.3	-1.3	-1.7	-1.4	-1.4	-1.47
③			-1.7	-1.6	-1.6	-1.6	-1.8	-1.7	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6	-1.66
①	小		-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.2	-2.1	-2.2	-2.1	-2.2	-2.3	-2.27
②			-2.7	-2.7	-2.5	-2.5	-2.5	-2.8	-2.7	-2.7	-2.5	-2.6	-2.62
③		-1.4	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.2	-1.1	-1.7	-1.6	-1.6	-1.38	
無		弱風 (2.1)	-1.0	-0.9	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.97
①	大		-1.5	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.3	-1.2	-1.26
②			-1.1	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	-0.7	-0.8	-0.75
③			-1.9	-1.8	-1.8	-1.5	-1.7	-1.6	-1.7	-1.6	-1.7	-1.4	-1.67
①	中		-1.4	-1.2	-1.2	-0.8	-0.8	-1.0	-0.7	-0.8	-1.2	-1.2	-1.03
②			-0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.7	-0.75
③			-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-0.9	-0.9	-0.9	-0.94
①	小		-0.7	-0.6	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0	-1.1	-0.8	-1.1	-1.2	-0.96
②			-1.3	-1.3	-1.2	-1.3	-1.2	-1.2	-1.3	-1.3	-1.3	-1.3	-1.27
③		-0.7	-0.5	-0.7	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.55	
無		微風 (0.6)	-0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.16
①	大		-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.31
②			-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.24
③			-0.2	-0.3	-0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.28
①	中		-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.25
②			-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.2	-0.29
③			-0.2	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.29
①	小		-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.5	-0.3	-0.3	-0.29
②			-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.29
③		-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.27	

小翼羽の形 ①:木の葉形 ②:ひし形 ③:笹の葉型

表 9 結果 小翼羽を翼から立てた場合(角度 25° )

小翼羽の条件		風速 (m/s)	実験回数										
形	大きさ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(平均)
無			-1.8	-1.8	-1.9	-1.7	-1.7	-1.7	-1.6	-1.8	-1.7	-1.7	-1.74
①	大	強風 (3.0)	-1.7	-1.6	-1.6	-1.8	-1.9	-1.9	-1.7	-1.8	-1.8	-1.8	-1.76
②			-2.1	-2.0	-2.1	-1.8	-1.7	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.92
③			-3.3	-3.3	-3.1	-3.3	-3.3	-3.3	-3.3	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3
①	中		-2.9	-2.6	-2.9	-2.9	-3.1	-2.9	-2.7	-2.7	-3.1	-3.2	-2.90
②			-2.7	-2.7	-2.7	-2.7	-2.8	-2.6	-2.7	-2.7	-2.6	-2.7	-2.69
③			-2.4	-2.2	-2.1	-2.2	-2.1	-2.1	-2.0	-2.3	-2.1	-2.0	-2.15
①	小		-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.4	-2.31
②			-2.4	-2.3	-2.5	-2.3	-2.3	-2.3	-2.4	-2.4	-2.2	-2.2	-2.33
③			-2.2	-2.1	-2.3	-2.3	-2.2	-2.0	-2.3	-2.3	-2.3	-2.2	-2.22
無			-1.0	-0.9	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	0.0	-1.0	-1.0	-1.0	-0.87
①	大	弱風 (2.1)	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-1.0	-1.0	-0.82
②			-1.2	-1.2	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-0.9	-1.03
③			-2.0	-1.8	-1.7	-1.7	-1.6	-1.6	-1.7	-1.9	-1.8	-1.9	-1.77
①	中		-1.8	-1.7	-1.7	-1.6	-1.7	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.65
②			1.6	-1.7	-1.6	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.15
③			-1.7	-1.7	-1.4	-1.4	-1.3	-1.4	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4	-1.44
①	小		-1.4	-1.1	-1.3	-1.3	-1.2	-1.0	-1.4	-1.2	-1.1	-1.2	-1.22
②			-1.4	-1.2	-1.2	-1.3	-1.3	-1.2	-1.1	-1.2	-1.1	-1.2	-1.22
③			-1.1	-1.1	-1.2	-0.8	-1.0	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.2	-1.11
無			-0.2	-0.2	0.0	-0.2	0.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.16
①	大	微風 (0.6)	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.32
②			-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	-0.40
③			-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.45
①	中		-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.4	-0.34
②			-0.3	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.5	-0.6	-0.37
③			-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.5	-0.33
①	小		-0.4	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.35
②			-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.36
③			-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.24

小翼羽の形 ①:木の葉形 ②:ひし形 ③:笹の葉型

4) 考察

揚力の大きさに基づいて結果を並べ替えて表に示す。

表 10 小翼羽を寝かした(0°)時に揚力の大きい順にソート

小翼羽の迎え角0° (翼に平行に寝かせた)の時						
風力 順位	強風 (3.0m/s)		弱風 (2.1m/s)		微風 (0.6m/s)	
	小翼羽の種別	平均揚力	小翼羽の種別	平均揚力	小翼羽の種別	平均揚力
1	笹の葉型 大	-2.80	笹の葉型 大	-1.67	木の葉型 大	-0.31
2	ひし型 小	-2.62	ひし型 小	-1.27	ひし型 中	-0.29
3	木の葉型 大	-2.46	木の葉型 大	-1.26	笹の葉型 中	-0.29
4	木の葉型 小	-2.27	木の葉型 中	-1.03	木の葉型 小	-0.29
5	木の葉型 中	-2.22	無 -	-0.97	ひし型 小	-0.29
6	無 -	-1.74	木の葉型 小	-0.96	笹の葉型 大	-0.28
7	笹の葉型 中	-1.66	笹の葉型 中	-0.94	笹の葉型 小	-0.27
8	ひし型 大	-1.48	ひし型 大	-0.75	木の葉型 中	-0.25
9	ひし型 中	-1.47	ひし型 中	-0.75	ひし型 大	-0.24
10	笹の葉型 小	-1.38	笹の葉型 小	-0.55	無 -	-0.16

表 11 小翼羽の迎え角 25° の時に揚力の大きい順にソート

小翼羽の迎え角25° (翼に対して立たせた)の時						
風力 順位	強風 (3.0m/s)		弱風 (2.1m/s)		微風 (0.6m/s)	
	小翼羽の種別	平均揚力	小翼羽の種別	平均揚力	小翼羽の種別	平均揚力
1	笹の葉型 大	-3.29	笹の葉型 大	-1.77	笹の葉型 大	-0.45
2	木の葉型 中	-2.90	木の葉型 中	-1.65	ひし型 大	-0.40
3	ひし型 中	-2.69	笹の葉型 中	-1.44	ひし型 中	-0.37
4	ひし型 小	-2.33	木の葉型 小	-1.22	ひし型 小	-0.36
5	木の葉型 小	-2.31	ひし型 小	-1.22	木の葉型 小	-0.35
6	笹の葉型 小	-2.22	ひし型 中	-1.15	木の葉型 中	-0.34
7	笹の葉型 中	-2.15	笹の葉型 小	-1.11	笹の葉型 中	-0.33
8	ひし型 大	-1.92	ひし型 大	-1.03	木の葉型 大	-0.32
9	木の葉型 大	-1.76	無 -	-0.87	笹の葉型 小	-0.24
10	無 -	-1.74	木の葉型 大	-0.82	無 -	-0.16

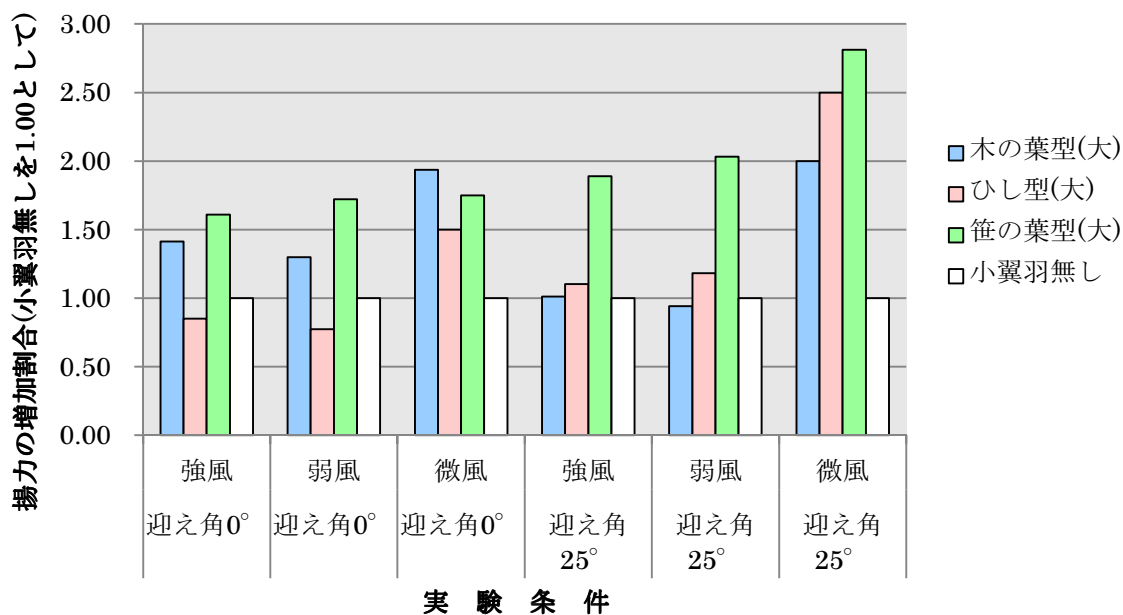


図 31 小翼羽の形の違いによる揚力発生状況の違い

小翼羽の3つの形の違いを大サイズのモデルでの結果で比較した(図 31)。笹の葉型は迎え角 0° で微風の条件以外において他のモデルより揚力の増加が大きい。木の葉型は、その迎え角 0° で微風の条件で最も揚力増加が大きい。

木の葉型は迎え角(25°)を与えた場合より迎え角を与えない(0°)場合のほうが揚力の増加が大きいのに対して、笹の葉型は逆で迎え角を与えたほうが大きい。

笹の葉型の小翼羽は、迎え角があることでより揚力が大きくなり、面積が大きいほど大きい揚力が発生するという翼と似た性質をもっていることから、笹の葉型の小翼羽は第二の翼として飛行時に揚力を増強することが主な目的ではないか。

一方の木の葉型の小翼羽は、迎え角が無い状態つまり翼と前後方向に隙間を作ることによって揚力を発生させ、微風で最も効果的であることなどから、失速を防ぐことが主な目的ではないかと考えた。

つまり、失速を防ぐにはアスペクト比が小さい(太短い)ことと翼との前後方向の隙間を作ることが必要であり、第二の翼として飛行のための揚力を増強させるために必要な要素は、アスペクト比が大きい(細長い)ことと、翼との上下方向の角度をつけることである。

そして、微風で飛ぶときには小翼羽を寝かせたときは全ての種類において揚力が増したが、迎え角がついたときは木の葉形の小翼羽はあまり揚力が増さなかったことから、木の葉形の小翼羽は失速の防止に効果があり、笹の葉型の小翼羽は飛行のための揚力の発生に効果があることが分かった。なお、ひし型は、これらの中間型としてどちらの特徴も兼ね備えているのではないかと考えた。



## ②失速と小翼羽の有無の関係を調べる実験

### 1) 目的

翼の迎え角を変化させたときの揚力の大きさを計測し、失速する角度を調べるとともに、失速した角度において小翼羽が出ていると失速状態から抜け出すことができるのかを調べる。

### 2) 方法

板目紙で図 29 のような装置を作り、翼の迎え角を  $10^\circ$  刻みで  $0^\circ$  から  $90^\circ$  までの 10 段階調節できるようにした。そして、それぞれの角度で発生する揚力の大きさを計測し、最も揚力の大きく出る角度と失速する角度を求めた。そして、水平の角度と失速する角度において、小翼羽を出すと揚力は復元するかを調べた。

小翼羽の有無による揚力の大きさの違いを調べる実験で、笹の葉型の小翼羽は迎え角をつけることで揚力が発生する翼のような性質をもった小翼羽であり、木の葉形の小翼羽は迎え角をつけず、翼との隙間を作ることで揚力が発生する、失速を防ぐための役割を持っている小翼羽であることが分かった。また、ひし形の小翼羽は木の葉形と笹の葉型の両方の性質を持っていることが分かった。

それぞれの性質とは、失速防止はアスペクト比が小さいこと、補助的な揚力の発生は小翼羽の先端が尖翼であることが分かった。

そこで、笹の葉型の小翼羽と木の葉形の小翼羽を使って失速が防止できるかを調べた。笹の葉型と木の葉形それぞれで、翼の迎え角  $0^\circ$  と  $60^\circ$  でそれぞれ、小翼羽を前に出した状態と、小翼羽を  $25$  度の高さに立てた状態(図 32)を再現し、それぞれで発生する揚力の大きさを計測した。

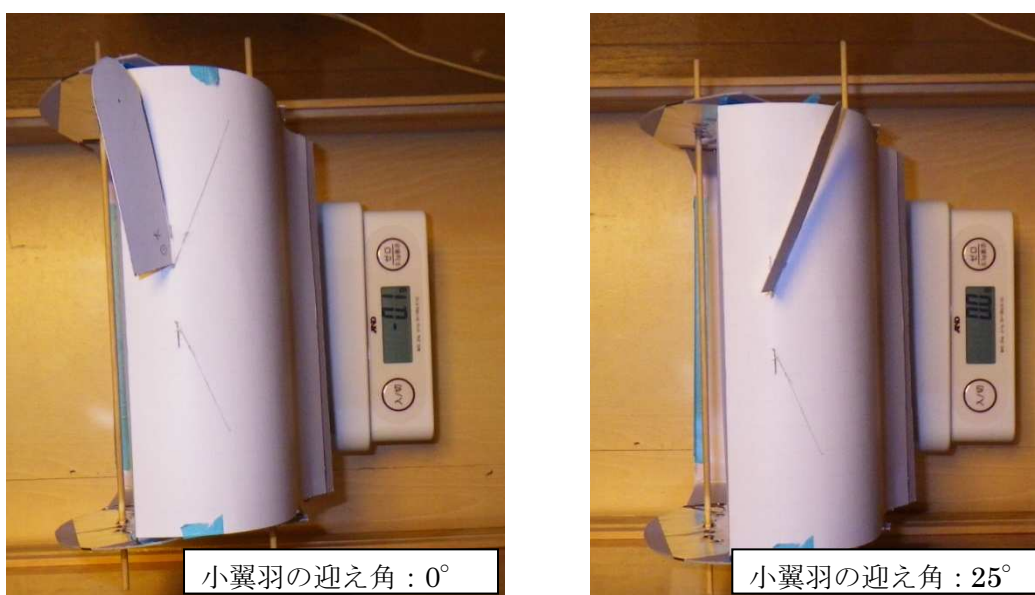


図 30 小翼羽の迎え角の違い( $0^\circ$  と  $25^\circ$ )

4) 予想

小翼羽の有無の実験結果から予想したように、木の葉形の小翼羽を出すことで失速は防げるが、笹の葉形の小翼羽はあまり失速には効果がないと思う。

5) 結果

表 12 結果 小翼羽の迎え角 0°、翼の迎え角 0°、60°

小翼羽の迎え角0° (翼に平行に寝かせた)の時												
小翼羽	迎え角※	実験回数										平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
木の葉型(大)	60°	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2
	0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
笹の葉型(大)	60°	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.3	-0.2
	0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

※迎え角:主翼の迎え角のこと

表 13 結果 小翼羽の迎え角 25°、翼の迎え角 0度、60°

小翼羽の迎え角25° (翼に対して立たせた)の時												
小翼羽	迎え角※	実験回数										平均
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
木の葉型(大)	60°	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3
	0°	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
笹の葉型(大)	60°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0

※迎え角:主翼の迎え角のこと

6) 考察

小翼羽を 0 度に寝かせたときは①も③も効果はあまり変わらなかったが、小翼羽を 25° に立てたときは③よりも①のほうが、揚力の復元に効果があった。つまり、小翼羽の有無と揚力の大きさの関係の実験結果をもとに予想したことと同じ結果になった。

7) まとめ

失速時に効果のある小翼羽の形状は、先端が丸い①の木の葉形の小翼羽である。また、翼の迎え角が小さい時に揚力が出ているので、笹の葉形の小翼羽は失速を防ぐよりも補助的に揚力を発生している。

(6) モデル本実験①全体のまとめ

小翼羽には補助的な揚力の発生と失速の防止の 2 つの役割があり、補助的な揚力の発生には細長く、先端がとがった笹の葉型の小翼羽が向いているが、失速の防止には先端が丸い木の葉形の小翼羽のほうが向いている。また、アスペクト比が小さく、先端がとがっているという 2 つの性質を併せ持ったひし形の小翼羽は 2 つの役割両方に向いている。

小翼羽の迎え角がつくことで、どの小翼羽も揚力が増し、それぞれ翼に似た性質を持っているが、小翼羽の迎え角がなくなり、翼との隙間ができるだけになると失速を防ぐことのできる木の葉形の小翼羽の揚力が増すが、笹の葉型の小翼羽はあまり揚力を発生しない。

標本の計測で推察された小翼羽の形と鳥の生態の関係について、モデル実験でもそれを証明するような結果が得られたと思う。

つまり、木の葉形の小翼羽をモデルにした実験では、失速を防ぐような結果となり、笹の葉型の小翼羽をモデルにした実験では、揚力を補強するような結果となった。そして、ひし形の小翼羽をモデルにした実験では、その中間でどちらの性能も持ち合わせるような結果となった。

これらの結果は、標本の計測結果をもとに推察したことを裏付けることになった。

## 8. モデル実験②

### (1) 目的

モデル実験①では、小翼羽の失速防止と補助的な揚力の発生の 2 つの役割や、木の葉形、笹の葉型、ひし形 3 つの形状の関係が分かった。そこでは、形状の違いによって発生する揚力の大きさに差が生じた。そこで、揚力の差が生じたときの翼の周りに発生する気流の流れを可視化し、モデル実験①で揚力の大きさに差が出た際に、翼や小翼羽の周囲ではどのように気流が流れていたのかを調べ、揚力の大きさに差が出たことの原因を調べる。

### (2) 方法

翼や小翼羽の周囲にできる気流の流れを可視化し、飛行中に翼の周りでどのような気流が生じているのかを調べる。昨年度の研究では可視化するための煙はドライアイスの霧を使用し、小さいモデル翼を使って実験を行ったが、今年度の研究ではモデル実験①で使った大きいモデル翼の周囲にできる気流の流れを直接可視化するため、ドライアイスの霧では量が少なすぎると考え、安定して多くの量の煙を発生させることができるように、煙を発生させるための装置を中学校から借用した。この装置を使うことで、安定して多量の消えにくい煙を作りだすことができるので、実験で用いる煙はこれを用いることにした。

昨年度の研究では、ドライアイスの煙を板状に流し、そこに小さいモデル翼を置くことで翼の周囲にできる気流の流れを可視化した。しかし、今年度の研究では小翼羽を出した時の気流の流れ方を調べるため、平面的に煙を流すのでは実験の再現性が低いと考えた。そこで、モデル実験①で使った風洞実験装置を使い、モデル実験①と同じモデル翼を置き、その中に煙を流すことで気流の流れを観察しようと思った。しかし、煙発生装置はそのまま煙を出すと風洞実験装置の中に全体的に煙が広がってしまい翼の周りの気流がよく見えないため、一定の箇所に筋状に煙を流すような装置を作ることにした。

煙を流す装置は、写真(図 36)のように、煙を一度ビニール袋にため、それを一定の速さで風洞実験装置の中に送り出し、筋状に流すことができるようにした。手順としては、

- ①ビニール袋の中に接続用の口金としてペ



図 31 煙発生装置だけでは全体的に広がってしまう



図 32 ビニール袋の端と端に接続用口金をつける

ットボトル用の園芸散水用の口金をペットボトルの切断した頭(ネジ口部分)で固定した。(図 34)

②ビニールテープでビニール袋の開口部を密封した。(図 34)

③水槽用品の八股の分岐管で煙を 8 つに分け、分けた先にシリコンチューブとそれにつないだアルミパイプを取り付け、その中に煙を流すようにした。(図 35)

④アルミパイプは、整流板の波板の穴に差し込み、風洞内側で煙を出すようにし、反対側は、箱に通して固定した。(図 35)

⑤最後に、分岐管の太いほうをシリコンホースでビニール袋の口金につないだ。

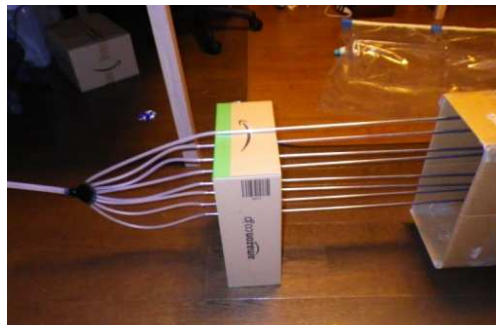


図 33 煙を 8 つにわけ

また、扇風機は微風で作動させ続け、風洞実験装置の中に煙がたまらないようにした。実験をするときは、煙がよく観察できるように部屋を暗くしライトで一定の方向から光を当てた。そして、その煙をカメラで撮影した。

使用するモデル翼は、モデル実験①で使用したモデル翼を使い、小翼羽は失速防止に効果の高い木の葉型と、揚力補強に効果の高い笹の葉型の 2 つの小翼羽を用い、失速を防いでいるときと揚力を補強しているときの 2 つの状況を再現し、その時の気流の流れを観察した。失速を防ぐために乱流を消す時、揚力を補強しているとき、そして小翼羽がない時のそれぞれの気流の流れを観察した。



図 34 気流可視化装置全景

(3) 仮説

小翼羽をつけると、小翼羽がない時は翼の上面を離れていた気流が翼の上面にそって流れるようになり、乱流が消えると思う。また、木の葉形のほうが失速の防止に効果があったので、木の葉形の小翼羽のほうが翼の上面に沿いやすくなると思う。

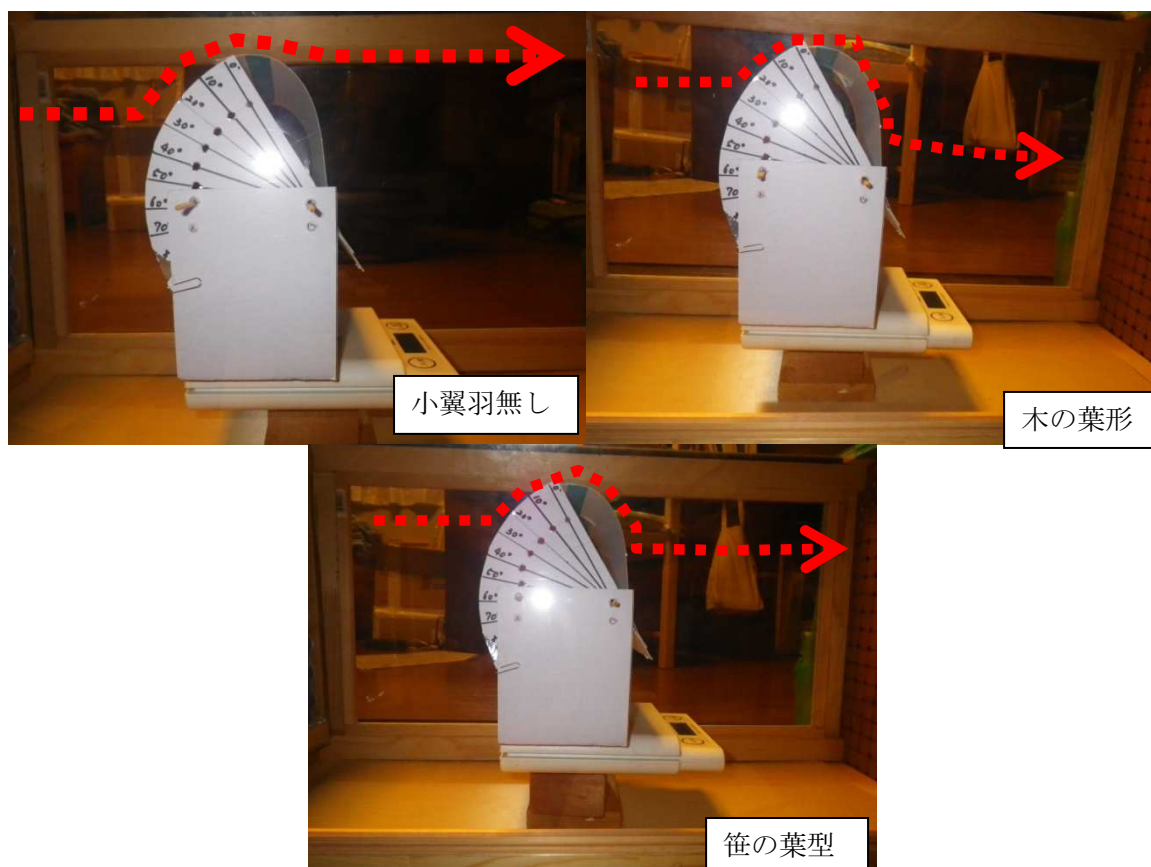


図 35 予想される気流の流れ方

(4) 結果

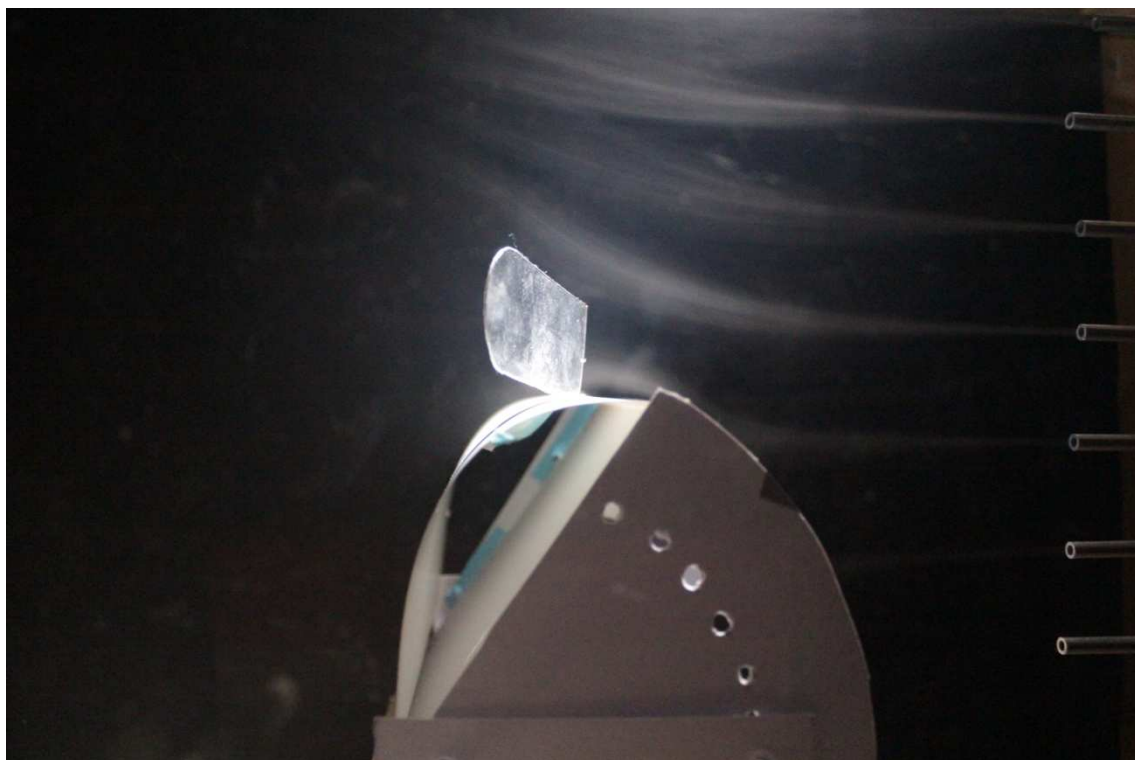


図 36 結果 60° 木の葉形



図 37 結果 60° 笹の葉型

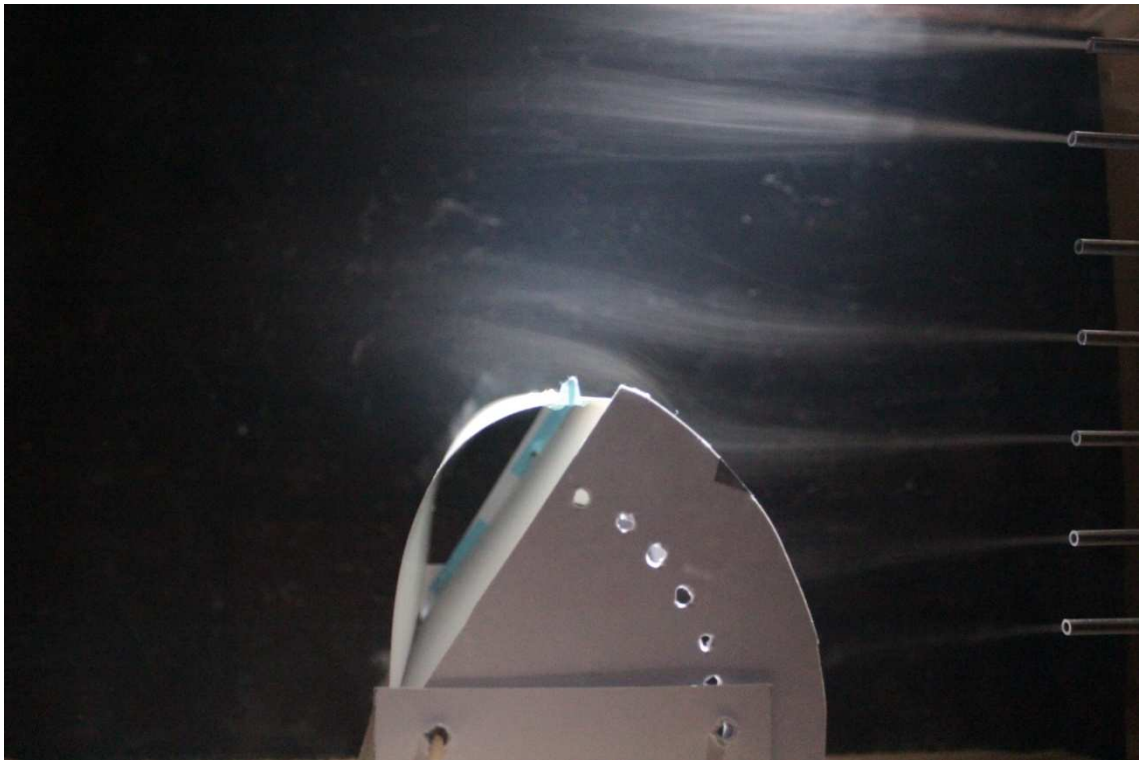


図 40 結果 60° 小翼羽無し

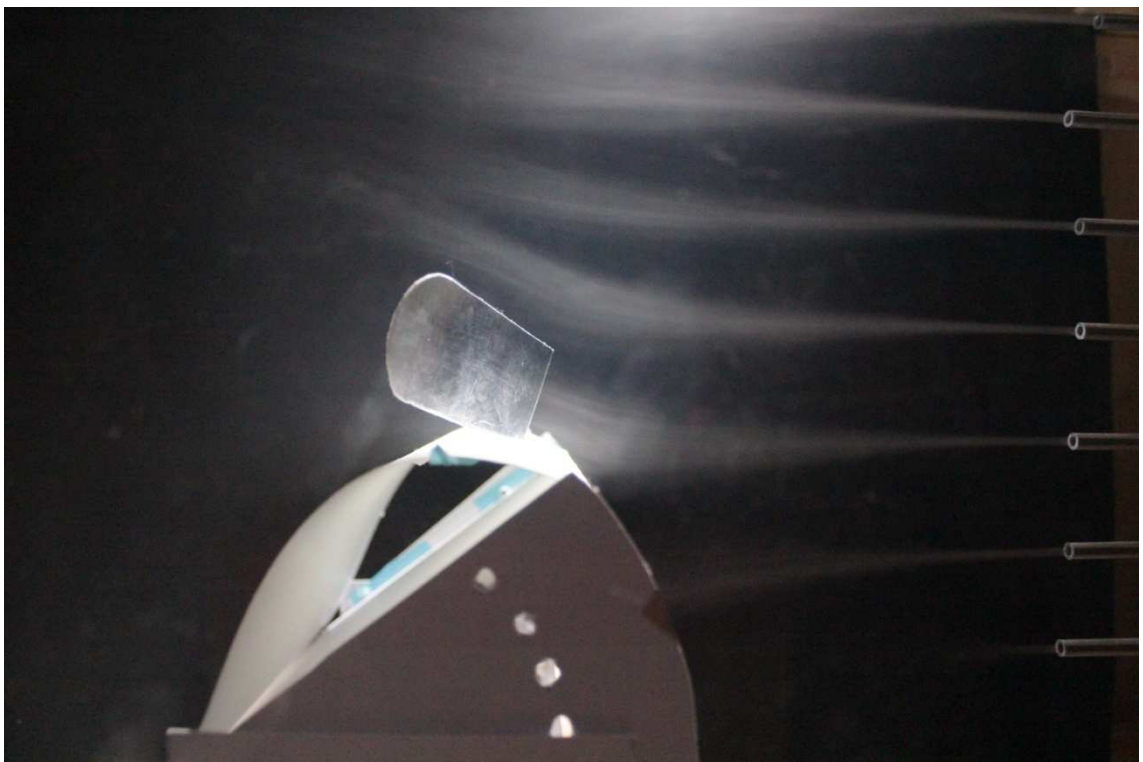


図 38 結果 40° 木の葉形



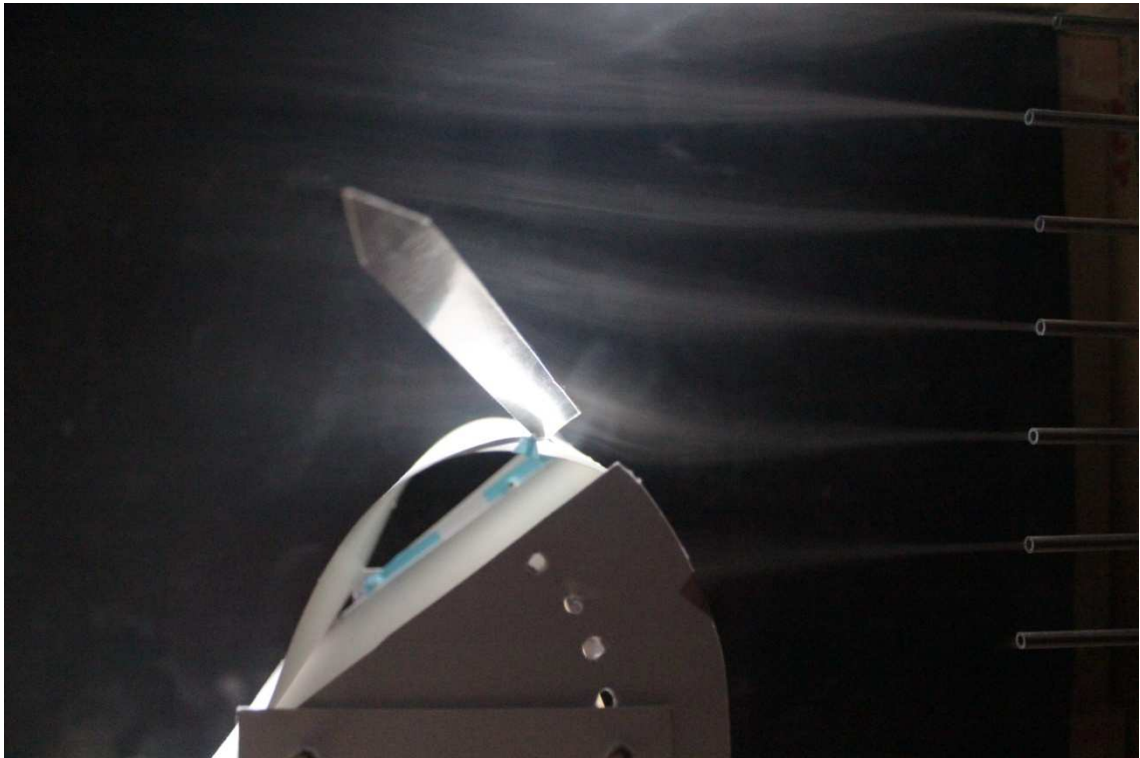


図 39 結果 40° 笹の葉型

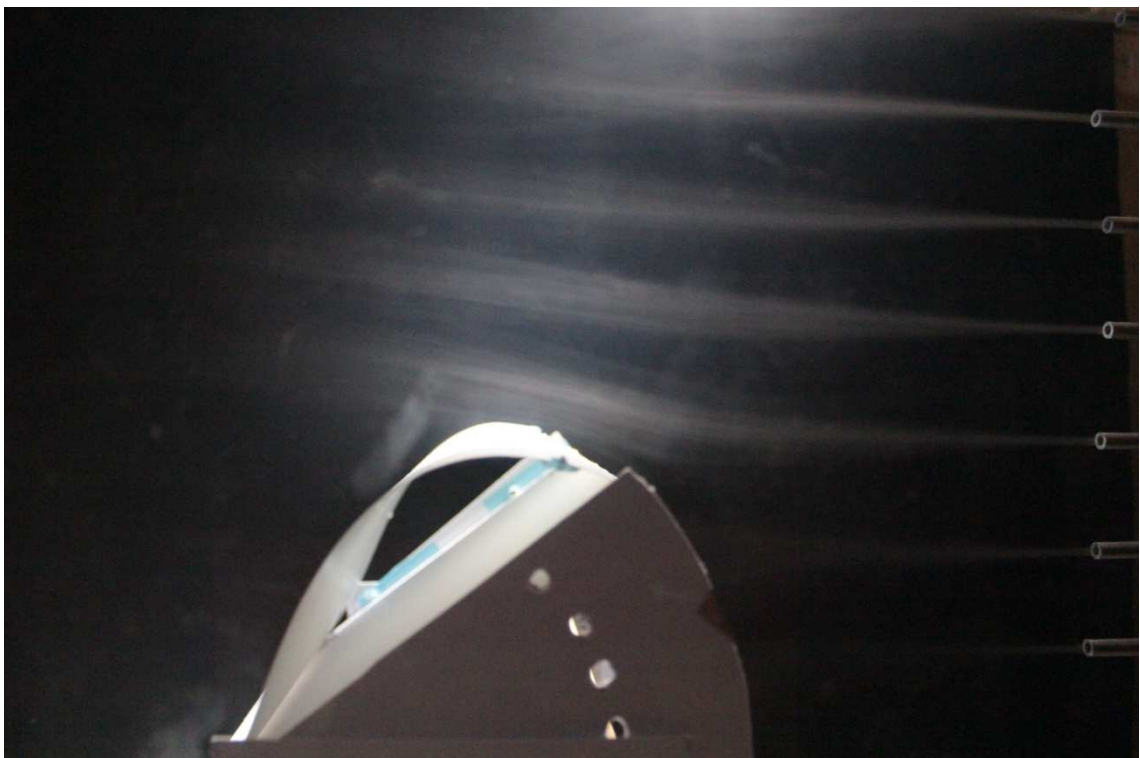


図 40 結果 40° 小翼羽無し



図 41 結果  $0^\circ$  木の葉形



図 42 結果  $0^\circ$  笹の葉形



図 43 結果 0° 小翼羽無し

(5) 考察

失速時の気流の流れ方と失速状態から回復した時の気流の流れ方について翼の迎え角が 60 度の時は小翼羽がないと失速の状態である。そのため、小翼羽がないと気流が剥離して翼の上には気流がそって流れていないが、小翼羽がつくと翼の上面に気流が流れるようになる。また、モデル実験①で木の葉形の小翼羽のほうが笹の葉形の小翼羽より失速に効果があるとわかったが、この実験では木の葉形の小翼羽のほうが笹の葉形の小翼羽よりも翼の上面に気流がそっており、より失速に効果があるのはより気流が上面に沿うようになるからだ分かった。

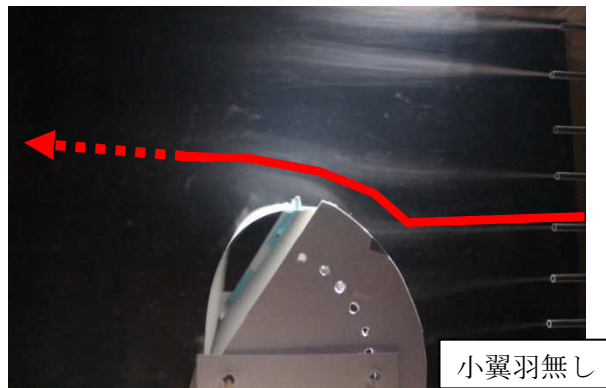
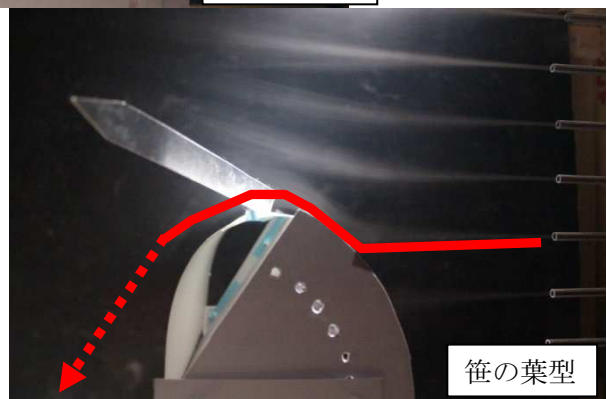
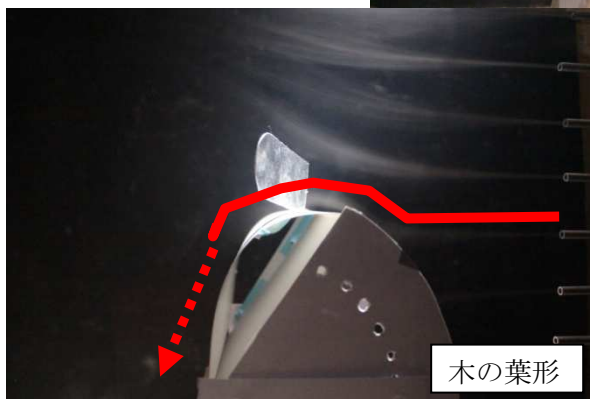


図 44 観察された気流の流れ方



・揚力が最も大きい迎え角の時の気流の流れ方

揚力が最も大きくなる時の迎え角は  $40^\circ$  であることがモデル実験①で分かったが、迎え角が  $40$  度の時でも、小翼羽を出すことでより翼の上面に気流が沿うようになる。また、木の葉形の翼型よりも笹の葉型の翼型の小翼羽のほうがより上面に気流が沿うようになる。

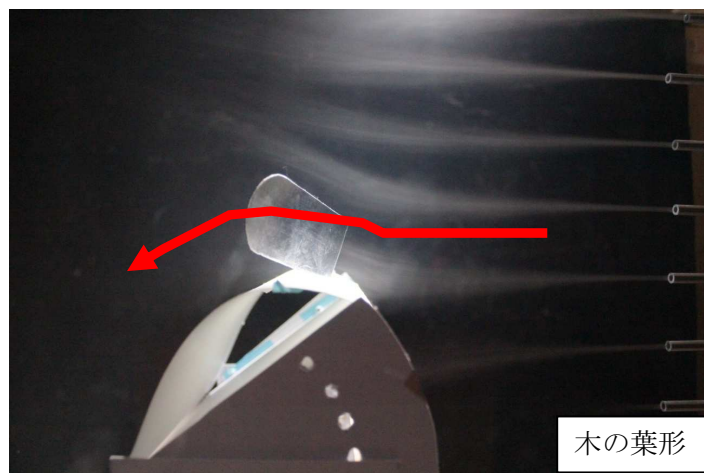
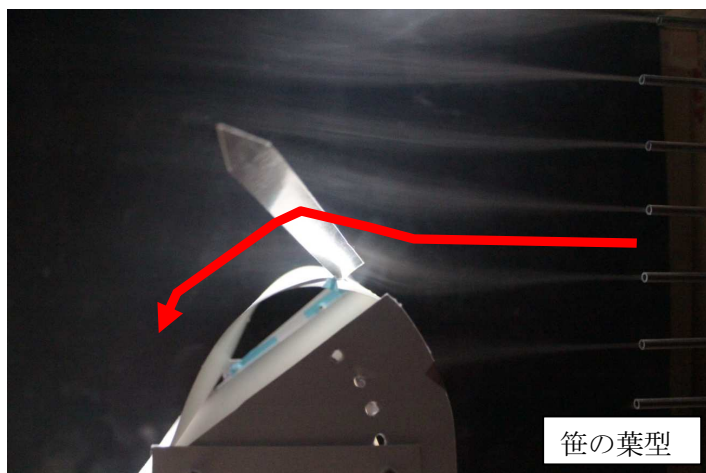
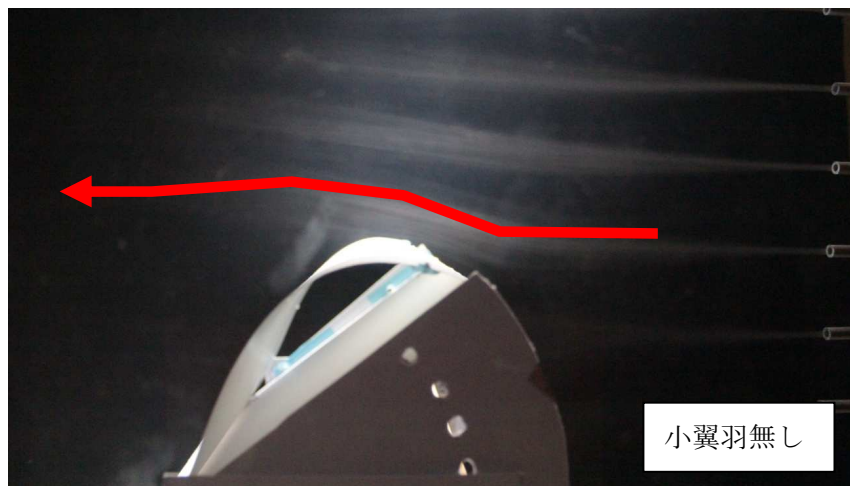


図 45 観察された気流の流れ方

・通常飛行時の気流の流れ方

通常飛行するときには翼の迎え角は $0^\circ$ であり、そのような状態の時も、小翼羽がないとあまり翼の上面に気流が沿わないが、小翼羽があることで気流が沿うようになる。また、笹の葉型の小翼羽より木の葉形のほうがより翼の上面に気流が沿う。

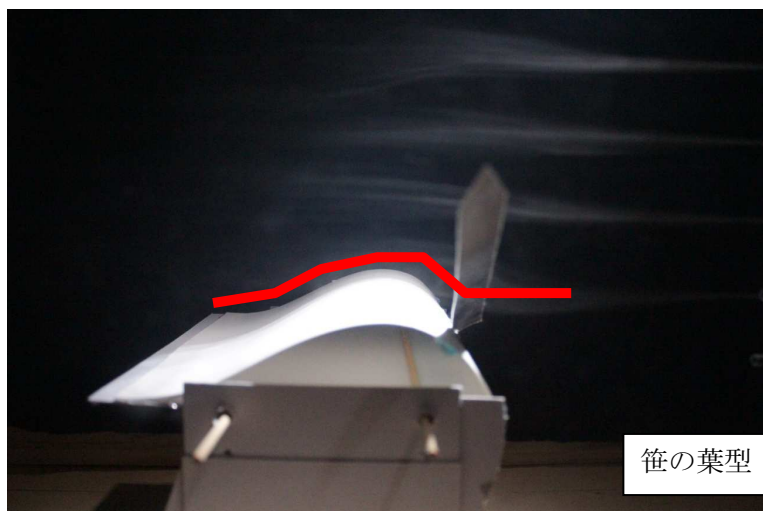
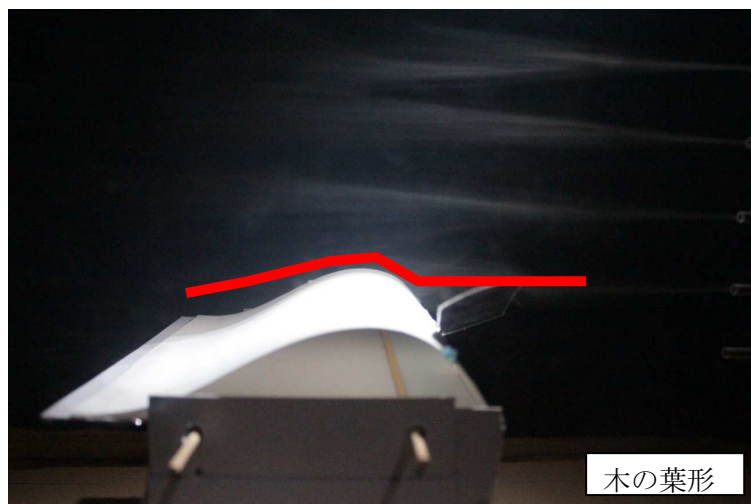


図 46 観察された気流の流れ方

#### (6) まとめ

- どんな迎え角の時も、小翼羽をつけることで気流が翼の上面に沿うようになるが、角度によって気流が沿いやすい小翼羽の形状が異なった。
- 失速時(迎え角  $60^\circ$ )の時は笹の葉型の小翼羽より木の葉形の小翼羽のほうがより翼の上面に気流が沿いやすく、木の葉形の小翼羽のほうが失速には効果が高い。
- 最も揚力が大きくなる迎え角( $40^\circ$ )の時は小翼羽がないと気流は翼の上面の中ほどで剥離し上方方向に曲がってしまうが、小翼羽をつけることで翼の後端まで気流が沿うようになる。また、より翼の後端まで気流が沿うようになった小翼羽は笹の葉型の小翼羽である。
- 通常飛行時(迎え角  $0^\circ$ )の時は小翼羽がないと翼の上面の中ほどで剥離しそこから後方に直線的に流れるが、小翼羽があることで、気流が翼の上面の後端まで沿うようになる。また、より翼の後端まで気流が沿うようになった小翼羽は木の葉形の小翼である。

## 9. 研究のまとめ

- 小翼羽の先端の形、翼との面積比やアスペクト比などの形状は餌を取る場所や飛び方などの生態に関係し、鳥の生態が違うことで小翼羽の形状は異なる。
- 小翼羽の使用頻度が多い鳥ほど小翼羽は発達しており、使用頻度が少ない鳥ほどあまり発達していない。また、翼の先端の形が裂翼である鳥は木の葉形の小翼羽が主に生えていて、扇翼はひし形、円翼、尖翼の翼には笹の葉型の小翼羽が主に生えている。
- 小翼羽の役割には2つあり、1つは失速の防止、もう1つは揚力を補強することである。
- 着陸時の失速を防止する必要がある大きい裂翼の鳥では失速を防止する木の葉形の小翼羽が生えており、長時間飛び続け、安定した揚力の発生を必要とする尖翼の鳥では補助的に揚力を発生する笹の葉型の小翼羽が生えている。また、離着陸を繰り返す扇翼の鳥ではその2つの役割が両方必要なので、扇翼の翼には失速の防止と補助的な揚力の発生との2つの役割を持ったひし形の小翼羽が生えている。
- 風速が遅く迎え角をつけない時は木の葉形の小翼羽のほうがより揚力が大きくなるのに対し、風速が速く迎え角をつけた時ほど笹の葉型の小翼羽のほうがより小翼羽が大きくなることから、低速飛行時に起こりやすい失速の防止には先端が丸い木の葉形の小翼羽のほうがより効果があり、揚力を補強するには先端がとがっていてアスペクト比が大きい笹の葉型の小翼羽のほうがより効果が高いといえる。
- どんな迎え角の時も、小翼羽があることで気流が翼の上面に沿うようになり、揚力が大きくなるが、翼の迎え角によって気流が沿いやすい小翼羽の形状は異なる。
- モデル実験②の翼付近の気流の可視化において、翼の迎え角を大きくした失速状態で、木の葉形の小翼羽を取り付けると、翼の上面から離れていた気流が翼の上面に沿うようになり、揚力が回復したことが確認できた。それに対して、笹の葉型の小翼羽の場合は、翼の揚力が最大時になる迎え角の状態において取り付けることによって、気流が翼のより後方まで沿うようになることが確認できた。つまり木の葉形の小翼羽にはより失速防止機能が、笹の葉型の小翼羽にはより揚力補強機能があることが、気流の変化からも確認できた。

## 10. 今後に向けて

今回の研究では小翼羽の失速防止と補助的な揚力の発生の2つの役割があることが分かったが、飛翔に大きく関係する羽は小翼羽だけではない。特に、初列風切羽は小翼羽と同じように乱流を吹き飛ばすことで安定した飛翔が得られているという。今後は、小翼羽のほかに飛翔に大きく関係する羽や体の動かし方などについても調べてみようと思った。



## 11. 参考文献

- ・失速—ウィキペディア <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%B1%E9%80%9F>
- ・弦長と矢高から弧長を計算する—高精度計算サイト  
<http://keisan.casio.jp/exec/user/1286543554>
- ・鳥の形とくらしⅢ—つばさと飛行— 我孫子市鳥の博物館
- ・鳥の渡りの謎 我孫子市鳥の博物館
- ・鳥の形とくらしⅠ—餌とくちばし— 我孫子市鳥の博物館
- ・世界文化生物大図鑑鳥類 世界文化社
- ・野鳥観察図鑑 成美堂出版
- ・フィールドガイド日本の野鳥 日本野鳥の会
- ・エアロアクアバイオメカニクス／エアロ・アクアバイオメカニズム研究会編 森北出版株式会社
- ・生物から学ぶ流体力学／望月修・市川誠司共著 養賢堂
- ・鳥と飛行機何が違うか／ヘンク・テネケス,高橋健次訳 草想社
- ・現代の鳥類学／森岡弘之・中村登流・樋口広芳 朝倉書店
- ・自然はともだち／吉良幸世 婦人之友社
- ・子供の科学 2012年5月号 誠文堂新光社
- ・BIRDER 2011年02月号 文一総合出版
- ・yahoo!オンライン野鳥図鑑 <http://www.yahoo.org/>
- ・翼—ウィキペディア <http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%BF%BC>
- ・翼理論の芽生え [http://fnorio.com/0113flight\\_to\\_the\\_sky0/flight\\_to\\_the\\_sky0.html](http://fnorio.com/0113flight_to_the_sky0/flight_to_the_sky0.html)
- ・航空実用事典 <http://www.jal.com/ja/jiten/dict/p051.html>
- ・鳥類用語—ウィキペディア  
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%B3%A5%E9%A1%9E%E7%94%A8%E8%AA%9E>
- ・飛び方のいろいろ平塚市博物館  
[http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan\\_archive/seibutsu/00000059/28.html](http://www.hirahaku.jp/hakubutsukan_archive/seibutsu/00000059/28.html)

# 資料編