

よく飛ぶ紙飛行機Ⅸ ～滑空生物の翼と飛ぶ力～

静岡大学教育学部附属浜松中学校

3年 三宅 遼空

1 動機

紙飛行機をよく飛ばすにはどうしたらいいのか？

小1から8年間、紙飛行機について色々な研究を続けてきた。

昨年の研究では、飛行生物の翼端形状の違いに注目し、鳥、トビウオなどの飛行生物の翼端形状を模倣した紙飛行機を作り、自作の風洞装置で空気の流れを可視化しながら翼端形状の役割、性能の違いについて調査した。

今年は、紙飛行機の飛び方である「滑空」に着目し、滑空する飛行生物について調査することで、「よく飛ぶ紙飛行機」のヒントになるのではないかと思い、研究テーマに選んだ。

2 研究の目的

滑空生物は、鳥類では渡り鳥や大型の鳥が滑空する。中でも寝ながら飛ぶグンカンドリやアホウドリ、コンドルが有名である。魚類ではトビウオ、爬虫類ではトビトカゲ、哺乳類ではコウモリ、ムササビ、昆虫では渡りをする蝶のアサギマダラやウスバキトンボ、植物ではウリ科の植物アルソミトラの種子などが知られている。

どれも様々な翼形状をして飛んでいる。紙飛行機も滑空して飛んでいるため、これら滑空生物の翼の飛行性能について調査することで、よく飛ぶヒミツを探る。

3 研究の方法

(1) 実験の進め方

色々な滑空生物の翼形状をまねた紙飛行機について、飛ぶ力にどのような違いが出るか調べる。

ア 翼の性能は、揚力を抗力で割った「揚抗比」が大きいほど良いため、色々な滑空生物の飛行機の揚力と抗力を測定する。

イ アの結果がなぜそうなったのか、空気の流れを高速カメラで観察する。

ウ 紙飛行機を実際に飛ばし、どれが一番良く飛ぶか対決する。

(2) 実験装置

ア 紙飛行機

これまでの研究同様、棒洞機N-1141を参考にした。

イ 揚力、抗力測定装置と測定方法

揚力は機体を固定した支柱の下におもり（分銅）を固定し、電子天秤の上に乗せ、浮き上がる力を測定する。

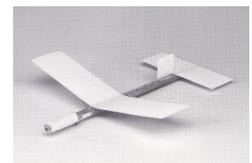
抗力は機体を固定した支柱と水平になるように取り付けたりニアガイドのスライドブロックとおもりを糸で結び、引っ張られる力を測定する。

風を前からあてた時の電子天秤の目盛りを読み、最初に比べて軽くなった分が揚力、抗力になる。

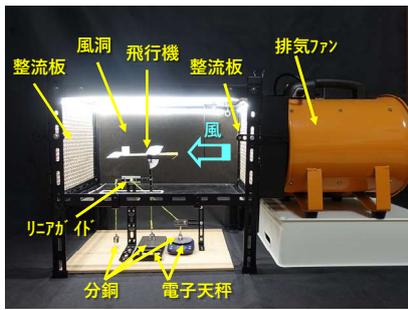
ウ 風洞実験装置と観察方法

スチールラックとL字金具を使用し枠組みを作り、透明なアクリル板とプラダン（黒）で風洞（奥行30cm、長さ45cm、高さ30cm）を作る。風洞の前後には機体に当てる風が一定になるように、塗装ブース用のハニカムフィルタを使用した整流板を置く。

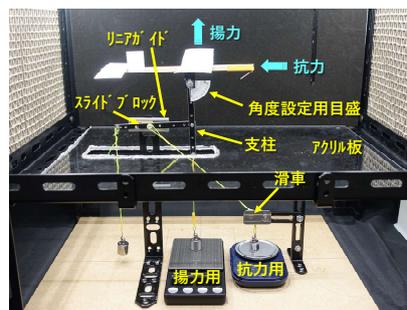
また、昨年同様、風洞の出口側に排気ファンを設置し、過去の研究で実施してきた扇風機による煙の押し込みではなく、吸い込み式にすることで風洞内の気流を安定させた。



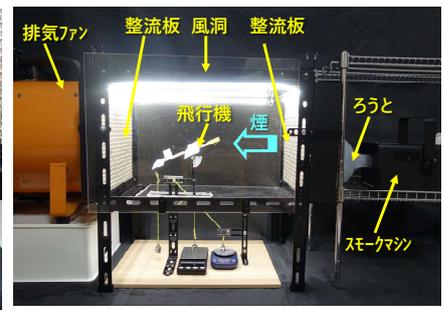
棒洞機 N-1141



揚力・抗力実験装置



揚力・抗力測定



風洞実験

4 研究の内容と結果

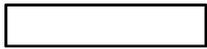
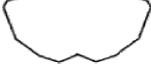
(1) 実験1 翼形状の違いによる揚力・抗力を調べる

滑空生物の翼形状をまねた紙飛行機を作り、揚力、抗力にどのような違いが出るか調べる。

ア 翼の形

次の滑空生物の翼形状をまねて製作した。

翼面積は、パソコンの画像ソフトを使用し、どの翼も基本形の面積と同等 (52.5 cm²) になるようにした。また、翼のキャンバーは約15度になるように調節した。

- | | | |
|---|---|---|
| ①長方形(基本形) | ②グンカンドリ (鳥類) | ③アホウドリ (鳥類) |
|  |  |  |
| ④コンドル (鳥類) | ⑤トビウオ (魚類) | ⑥トビトカゲ (爬虫類) |
|  |  |  |
| ⑦ムササビ (哺乳類) | ⑧アサギマダラ (昆虫:蝶) | ⑨アルソミトラ (植物:種子) |
|  |  |  |

イ 翼の断面形状

滑空生物でも、翼を広げた形が様々であり、各翼形状において通常の平形状とどのような違いが出るのか興味がわき、次の3つ断面形状を調査に加えた。

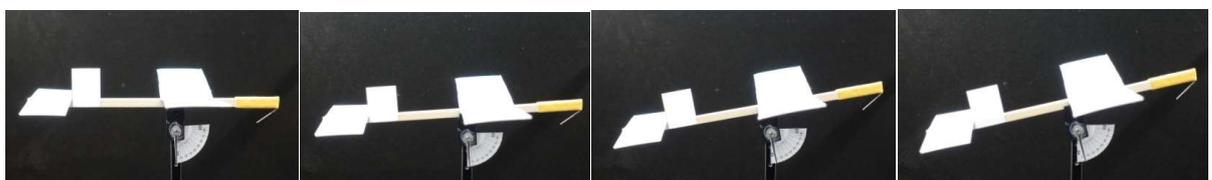


①平形状 ②M字形状 ③W字形状

ウ 尾翼の角度

翼の角度 (迎角) を0度から30度まで5度ごとに变化させた時の揚力、抗力を測定。

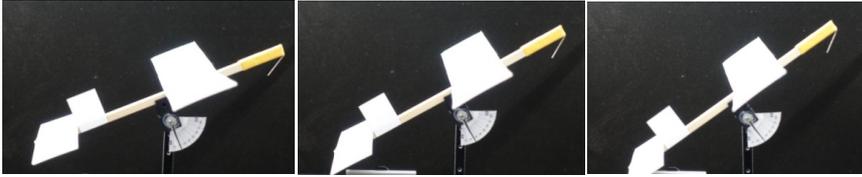
- ①0度 ②5度 ③10度 ④15度



⑤20度

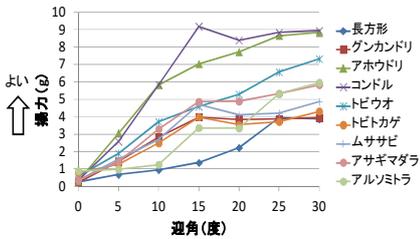
⑥25度

⑦30度

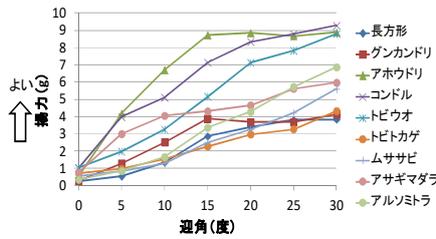


揚力測定結果

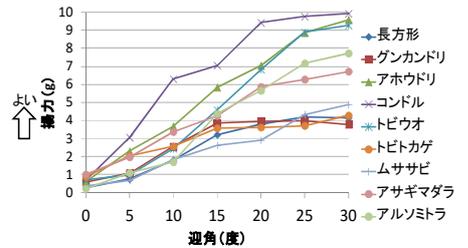
翼形状 (平)



翼形状 (M字)

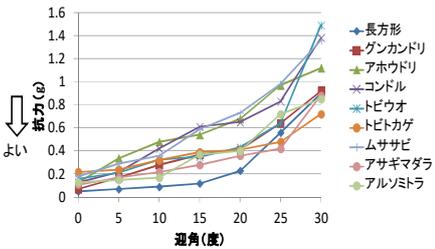


翼形状 (W字)

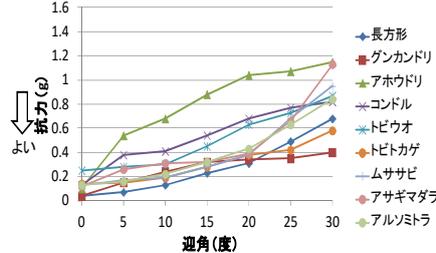


揚力測定結果

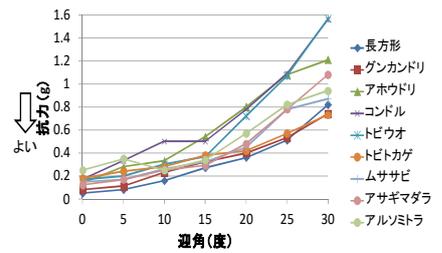
翼形状 (平)



翼形状 (M字)



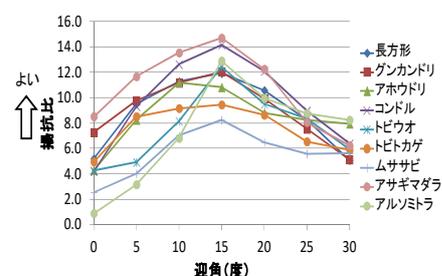
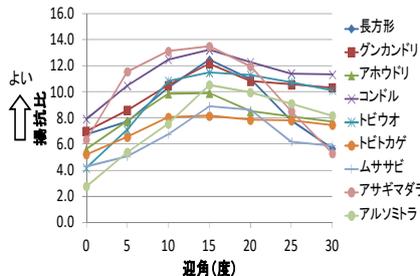
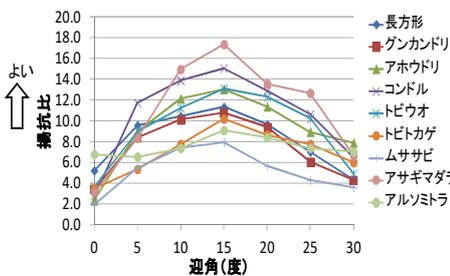
翼形状 (W字)



(分かったこと)

- 揚力は、翼形状 (平) ではアホウドリ、コンドルがよい結果となった。
- 揚力は、翼形状 (M字) ではアホウドリ、コンドル、トビウオがよい結果となった。
- 揚力は、翼形状 (W字) ではM字と同様、アホウドリ、コンドル、トビウオがよい結果となった。
- 抗力は、翼形状 (平) では長方形がよい結果となったが、あまり大きな差は見られなかった。
- 抗力は、翼形状 (M字) でも平形状と似た傾向となったが、何故かアホウドリの抗力が一番大きかった。
- 翼形状 (W字) ではM字ほど差は見られず、傾向は、平形状に似た結果となった。

揚抗比結果



揚抗比の結果より、アサギマダラ、コンドルの翼形状のように、ある程度の翼幅と翼弦長があり翼端が前方に突き出した特徴を持った翼形状で、翼の角度 (迎角) が 15 度のとき、1 番飛行特性が良いことが分かった。

(2) 実験2 翼形状の違いによる空気の流れを見る

翼の迎角を0度、15度、30度に変化させた時の翼にあたる風の流れを観察する。

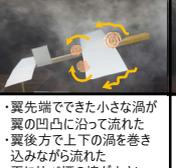
スモーク発生装置の煙を翼の周りにおいて、横方向（翼側面）から高速カメラで観察した。

(分かったこと)

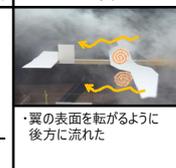
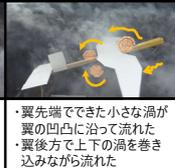
- どの翼形状でも、迎角0度では煙の流れ方に大きな差は見られなかった。
- どの翼形状でも、迎角が大きくなると翼先端の渦が大きくなり、翼周りの煙の塊も大きくなった。
- 翼形状の違いで翼周りにできる煙の塊の大きさに差が見られた。トビトカゲ、ムササビ、アルソミトラのような翼幅が短い飛行機では煙の塊が大きかった。
- 翼弦長が長いトビウオ、トビトカゲ、ムササビでは翼後方で下からの渦の巻き込みが見られなかった。
- 揚抗比結果がよかったアサギマダラとコンドルでは、他の翼形状に比べ、翼端周りの渦が大きかった。
- M字、W字の断面形状では、平形状に比べ翼の周りにできる煙の塊が小さかった。

※撮影写真中の矢印は煙の流れのイメージを描いた

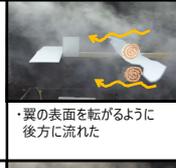
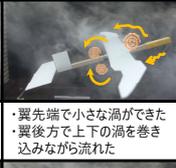
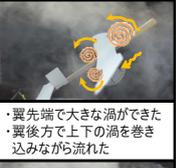
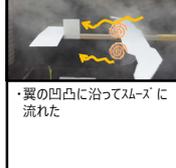
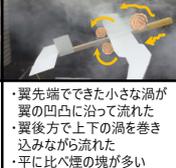
長方形：基本形

断面形状	迎角		
	0度	15度	30度
平	 ・翼の表面を転がるように後方に流れた	 ・翼先端で小さな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた	 ・翼先端で大きな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた
M	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が小さい	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が小さい
W	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が小さい	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が小さい

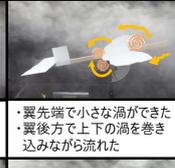
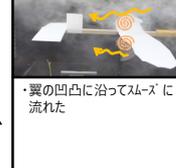
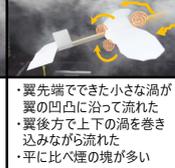
グンカンドリ：鳥類

断面形状	迎角		
	0度	15度	30度
平	 ・翼の表面を転がるように後方に流れた	 ・翼先端で小さな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた	 ・翼先端で大きな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた
M	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い
W	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い

アホウドリ：鳥類

断面形状	迎角		
	0度	15度	30度
平	 ・翼の表面を転がるように後方に流れた	 ・翼先端で小さな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた	 ・翼先端で大きな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた
M	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い
W	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い

コンドル：鳥類

断面形状	迎角		
	0度	15度	30度
平	 ・翼の表面を転がるように後方に流れた	 ・翼先端で小さな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた	 ・翼先端で大きな渦ができた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた
M	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い
W	 ・翼の凹凸に沿ってスムーズに流れた	 ・翼先端でできた小さな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い	 ・翼先端でできた大きな渦が翼の凹凸に沿って流れた ・翼後方で上下の渦を巻き込みながら流れた ・平に比べ煙の塊が多い

(分かったこと)

- どの翼形状でも、迎角0度では煙の流れ方に大きな差は見られなかった。
- どの翼形状でも、迎角が大きくなると翼先端で渦が大きくなり、翼周りの煙の塊も大きくなった。
- 翼形状の違いで翼周りにできる煙の塊の大きさに差が見られた。
トビトカゲ、ムササビ、アルソミトラのような翼幅が短い飛行機では煙の塊が大きかった。
- 翼弦長が長いトビウオ、トビトカゲ、ムササビでは翼後方で下からの渦の巻き込みが見られなかった。
- 揚抗比結果がよかったアサギマダラとコンドルでは、他の翼形状に比べ、翼端周りの渦が大きかった。
- M字、W字の断面形状では、平形状に比べ翼の周りにできる煙の塊が小さかった。

風洞実験結果から、迎角が大きくなると翼周りの煙の塊の大きさに変化が見られることから、この煙の大きさの違いが揚力、抗力に影響しているのではないかとと思われる。

迎角0度において、平断面のどの翼形状でも煙の流れ方に大きな差は見られず、揚抗比の結果を見ても差がない結果となっている。

揚抗比の結果がよかったアサギマダラ、コンドルでは、翼端での煙の大きさに他の翼形状との違いが見られたため、予想通り、翼端形状が影響しているものと思われる。

M字、W字の断面形状では、凹凸の溝に沿って煙を後方にスムーズに流しており、これが揚抗比のバラツキが小さかった要因になっているのではないかと思う。

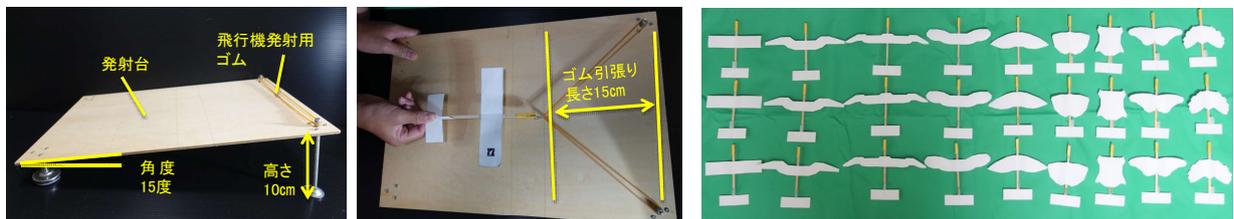
(3) 実験3 紙飛行機の飛距離対決 (検証実験)

実験1と同じ形の尾翼の紙飛行機を実際に飛ばし、どれが一番よく飛ぶか対決した。

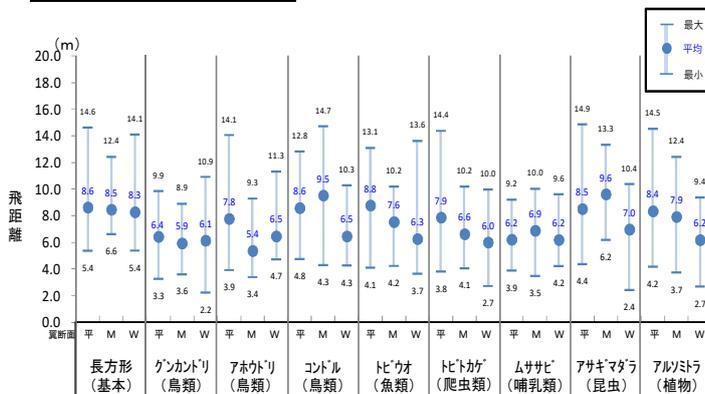
風のない体育館で10回ずつ飛ばし、飛んだ距離を測る。

飛ばし方は、発射台を作り、なるべく飛ばし方を一定にした。

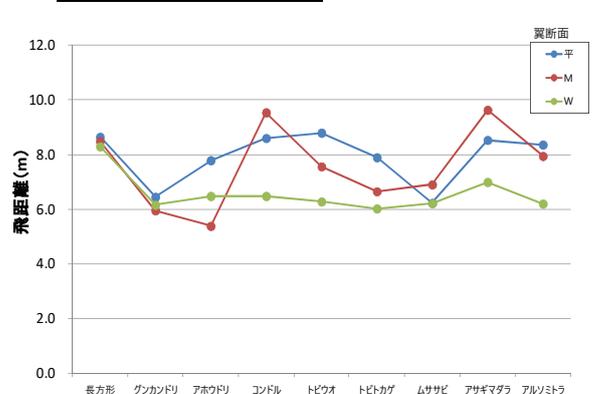
発射角度は15度、紙飛行機先端のフックにゴムを掛け15cm引張った所を発射位置とした。



飛距離結果 (まとめ)



飛距離結果 (平均値)



(分かったこと)

- 翼断面 (平) の最大値では、予想通りアサギマダラが一番よく飛んだが、平均値ではトビウオが一番よい結果となった。

- ・翼断面 (M) では、予想通り、最大値ではコンドルが、平均値ではアサギマダラが一番よく飛んだ。
- ・翼断面 (W) では、予想と違い、長方形が一番よく飛んだ。
- ・翼幅が短いトビトカゲやムササビは他の翼形状に比べ、飛距離のバラツキが小さかった。
- ・翼弦長が長い鳥類は空中で旋回してしまうことが多く、飛距離をロスする結果となってしまった。

実験 1, 2 の結果に近い傾向が見られたが、飛ばし方の問題なのか、発射してすぐに浮き上がってしまうものや、空中で旋回してしまうものが見られ、飛距離のバラツキが大きい実験結果となってしまった。

これは、発射時の推進力が強すぎて揚力や旋回力が過剰に働いてしまったためと思われるため、飛ばし方は次回の改善点としたい。

5 まとめ

- ・翼形状の違いによっても空気の流れが変わり、飛行性能に影響があることが分かった。
- ・揚抗比と風洞実験の結果から、滑空にはコンドルやアサギマダラのような、ある程度の翼幅と翼弦長があり、翼端が前方に突き出た特徴を持った翼形状の方が飛行特性がよいことが分かった。

予想ではアスペクト比が高いグンカンドリやアホウドリの方がよい結果になると思ったが、実験では違う結果となった。これは、今回選んだ紙飛行機の翼の位置 (構造) と翼幅が合っていなかったからかもしれない。

- ・飛距離対決の結果から、発射時の推進力が強すぎると、飛行性能に影響が出ることもわかった。

そのため、飛び立つ (発射) 時の翼形状と滑空する時の翼形状を変化させ、飛行状況に応じた翼形状にすることができれば、最適な飛行性能を得ることができるのではないかと思う。

- ・M字やW字の翼断面形状は、凹凸の溝に沿って気流をスムーズに流すことにより、翼の角度 (迎角) が変化しても飛行特性のバラツキを抑制できることが分かった。

このことから、飛行生物が滑空時に真っ平らな翼ではなくガル翼のような形状で飛んでいるのは、急激な飛行性能低下を招かないように安定して飛ぶための形状となっているのではないかと思う。

グンカンドリが長時間、寝ながら飛ぶためには、安定飛行することが重要ということだろう。

- ・今回は滑空生物の翼形状に着目し、その形状が飛ぶ力にどんな影響を及ぼしているのか調査した。

これまで、様々な飛行生物の飛ぶ力の秘密について調査してきたが、まだまだ飛行生物には多くの飛ぶ秘密が隠されているのではないかと思う。

これからも、よく飛ぶ紙飛行機を作るため、研究を続けていきたい。

6 参考にした本

- ・「二宮康明の紙飛行機集」 誠文堂新光社
- ・「高性能紙飛行機」 二宮康明 著 (誠文堂新光社)
- ・「生物の形や能力を利用する学問 バイオミメティクス」 (東海大学出版部)
- ・「カラー図解でわかる航空力学「超」入門」 中村寛治 著 (SBクリエイティブ)
- ・「航空機のひみつ (キッズペディア)」 (小学館)
- ・「空を飛べるのはなぜか」 秋本俊二 著 (SBクリエイティブ)
- ・ナショナル ジオグラフィック 「動物大図鑑」 <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/web/animals/>
- ・ギズモード・ジャパン

「やっぱり鳥って眠りながら飛んでたんだ。グンカンドリの調査によってその実態が初めて判明」

<https://www.gizmodo.jp/2016/08/bird.html>