卒業論文要旨

群制御を用いた渡り鳥のフォーメーション形成に関する研究

A Study on the Formation of Migratory Bird Using Group Control

システム工学群

機械・航空システム制御研究室　1240032　大西利桜

1　緒言

渡り鳥の群れが空を飛行する際，V 字フォーメーションを形成しながら巡行飛行している．鳥が羽ばたくと翼の先端から渦上の気流（翼の下方から上方へと流れる）が発生し，この渦は前へと向かって飛ぶ鳥の後方へと流れ隊列のすぐ後ろの鳥にぶつかってしまうため，後列の鳥はこの渦のアップウォッシュ（上昇する力にうまく乗る位置につくこと）をする必要がある．前の鳥の後方やや横側にいることも必要であるため後方側面に位置する鳥はV 字型に集まることになる．これがV 字フォーメーションを形成する理由である．また渡り鳥は長距離を飛行する際には疲労を蓄積しやすく，飛行中に休息が必要である欠点をV 字フォーメーションでは，前方の鳥が風を切って空気抵抗を減らし後方の鳥がその風よけを受けることで，飛行の負担を分散することができる．この風よけにより鳥たちはより長い距離を飛ぶことができ、効率的な巡行飛行を実現している．さらにV 字フォーメーションによる集団飛行は、鳥同士の視界を確保することも重要である．後方側面に位置する鳥は前の鳥の後方やや横側にいることで、周囲の状況を把握しやすくなる．このような配置により，鳥たちは集団として安全に飛行することができる．この飛行方法はエネルギーの節約，飛行負担の分散，安全性の確保など様々な利点を持っている．渡り鳥たちは長い距離を飛ぶ旅を成功させるために，このV 字フォーメーションを活用しているのである．

渡り鳥と同様，空を飛行している航空機もV 字フォーメーションを適用することでより長距離を飛行でき，航空機の燃料効率を向上できるのではないか．そこで本研究では通常のフライトと同距離を飛行するという条件下で，V 字フォーメーション適用の航空機の消費燃料の節約を目指す．

2　matlab を用いたV 字フォーメーションの再現

V 字フォーメーション飛行を叶えるために,matlab を用いて実際どのように航空機が作動するのかというシミュレーションを行った.その際に用いた数式や理論について以下に述べる.

2.1　代数的グラフ理論[3]

代数的グラフ理論は,グラフに関連する問題に対して代数的な手法が適用される理論である.具体的には,グラフの構造を数学的なオブジェクトとして表現し,それに基づいて問題を解析する手法が用いられている.グラフ G=(V,E)は,頂点集合 V と辺集合 E で定義される.代数的グラフ理論は,グラフについての問題に対して『代数的方法が適用されるものである』という理論のことを指し,具体的には代数的な概念や演算を使ってグラフの性質や特徴を解析し,問題の解を導き出すことが目的である.

2.2　グラフラプラシアン[3]

グラフラプラシアンは,グラフの有用な性質を見つけるために利用されるものであり、グラフ理論において重要な役割を果たしている．グラフラプラシアンによる分析は,さまざまな応用分野で活用されている.たとえば,ソーシャルネットワーク分析では,グラフラプラシアンを用いてユーザー間のつながりや影響力を計算し,コミュニティの特定や情報の拡散の解明に役立てられる,また,電力ネットワークや交通ネットワークなどのインフラストラクチャー分野では,グラフラプラシアンを用いてネットワークの安定性や効率性を評価し,改善策を提案することもある.本研究ではこのグラフラプラシアンを用いることで matlab でのシミュレーションを達成することを目指す.

3　燃料（エネルギー）効率について

V 字フォーメーションを用いての飛行と通常の水平飛行とで燃料（エネルギー）効率が本当に変わるのかを調べる. そこで翼を馬蹄形渦で表し, V 字飛行の際に必要なエネルギーと通常の水平飛行の際に必要なエネルギーを比較検討する.

3.1　馬蹄形渦について

Fig.1 のような剛体の矩形翼を考える. 矩形翼が一様な流れの中に置かれたと考えると翼の後縁からは渦層が流れ出す. そして端の方から巻き込んで一対の渦になる. これは Fig.2 のように馬蹄形渦が重ね合わさったものである. 揚力線と同様に後縁渦も一本の線に置き換えることで馬蹄形渦を考える. 揚力や後縁渦のまわりの循環や翼中心の単位翼幅当たりの循環 Tがそれぞれ等しくならなければならない. 一様な流速 V, 翼幅 b, 空気密度ρにとし, 楕円の面積より全揚力 L は $L = \frac{\pi b}{4} \rho V T$となる. 等価な馬蹄形渦の場合の揚力線の翼幅を b ‘ とすると, 全揚力は $L = \rho V T b$ ‘ となる. したがって翼幅 b ‘ は b ‘$= \frac{\pi b}{4}$ となる. 馬蹄形渦の外側を吹き上げ, 内側が吹き下ろしとなることで V 字飛行が可能となる.

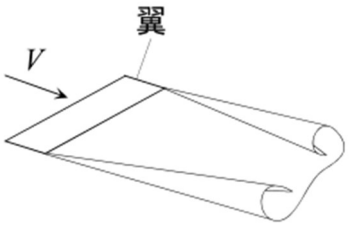

Fig.1 eddy layer

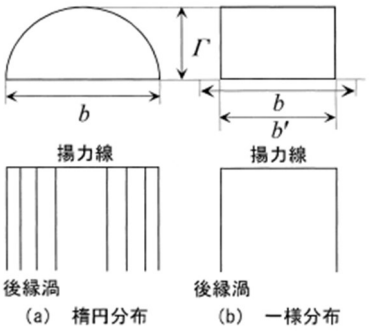

Fig.2 wing span

3.2　V 字飛行をする際に必要なエネルギー

同一の速度で水平飛行する同一の大きさの翼の V 字飛行について考える. 飛行速度Vは一定であり, 時間にかかわらず V 字の形は変化しないとし, 動圧を q とおく. 翼の重量をW_μとすると, 揚力係数$c_{L\mu}$は$c_{L\mu} = \frac{W_\mu}{S_\mu q}$ と表すことができる. 単独の翼が水平飛行する場合揚力$L_{0\mu}$は重量W_μに等しくなり, 抗力を$D_{0\mu}$とすると必要なエネルギー$N_{0\mu}$は$N_{0\mu} = D_{0\mu} V$と表すことができる.

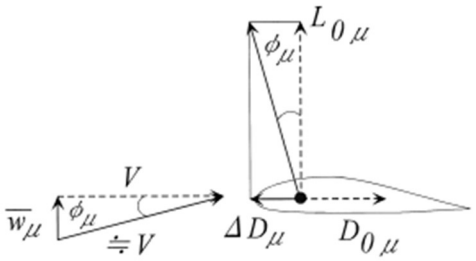

Fig.3 ΔD_μ,which is a decrease in drag of wing μ

V 字飛行中は他のすべての翼による吹き上げの中を飛行することになるため,一様な吹き上げ $\bar{\omega}_\mu$ のために,Fig.3 のように流れの方向と揚力の方向が吹き上げ角 $\phi_\mu = \frac{\bar{\omega}_\mu}{V}$だけ曲げられる.この吹き上げにより前方に揚力の分力が発生し,抗力が減少することになる.この抗力の減少分 ΔD_μ は$\Delta D_\mu = L_{0\mu}(\frac{\bar{\omega}_\mu}{V})$, 必要パワーの減少分 ΔN_μ は$\Delta N_\mu = \Delta D_\mu V = L_{0\mu}\bar{\omega}_\mu$,単独飛行する翼 μ を n 枚集めたときの全必要パワー N_0 は$N_0 = \sum_{\mu=1}^{n} N_{0\mu}$, n 枚の翼を含むＶ字編隊全体の全必要パワーN_0 は $\Delta N = \sum_{\mu=1}^{n} N_\mu$ と表すことができる.本研究では 2024 年 2 月 2 日の高知（KCZ）発,羽田（HND）着のデータを用いてこれらの数式を用いて計算した結果の比較検討を行う.

4　matlab での V 字フォーメーション飛行の再現結果

本研究では３機のエージェント（航空機）を用いて,代数的グラフ理論・グラフラプラシアンを使用し,matlab 上での V 字フォーメーションを行った結果,以下のようになった.

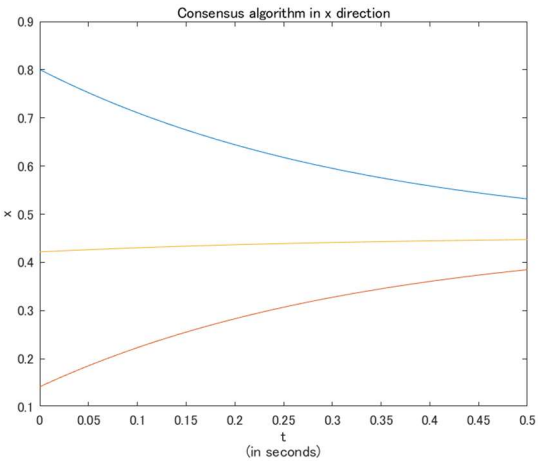

Fig.4 V-shaped flight of three planes as seen in the x-coordinate

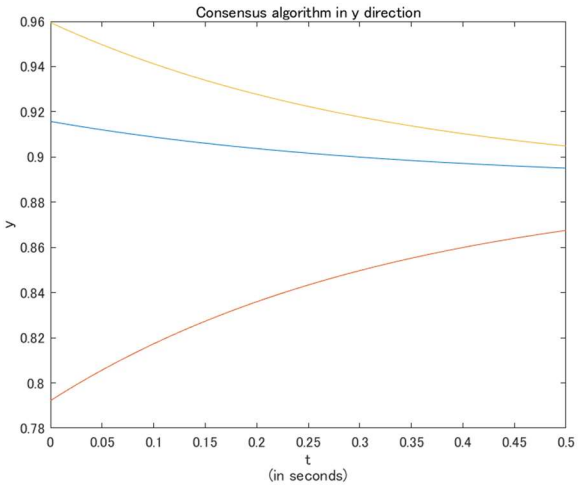

Fig.5 V-shaped flight of three planes as seen in the y-coordinate

x 座標平面から見た 3 機の飛行の様子と, y 座標平面での 3 機の飛行の様子はほとんど相似であり,どちらもおおよそ等間隔で飛行することができている.このシミュレーションでは水色のエージェントを渡り鳥のリーダーと設定することにより,3 機の中で先頭を飛行するようにした.だが実際,先頭を飛行することは風の影響を最も受けやすいため,3 機が先頭を入れ替わりながら飛行することが望ましい.また, x 座標上では 3 機が常に等間隔に飛行できているようにみえるが y 座標上では,2 つのエージェントが近づきすぎているとみることもできる.どの座標からみても等間隔でなければならないため, 少し改善が必要である.

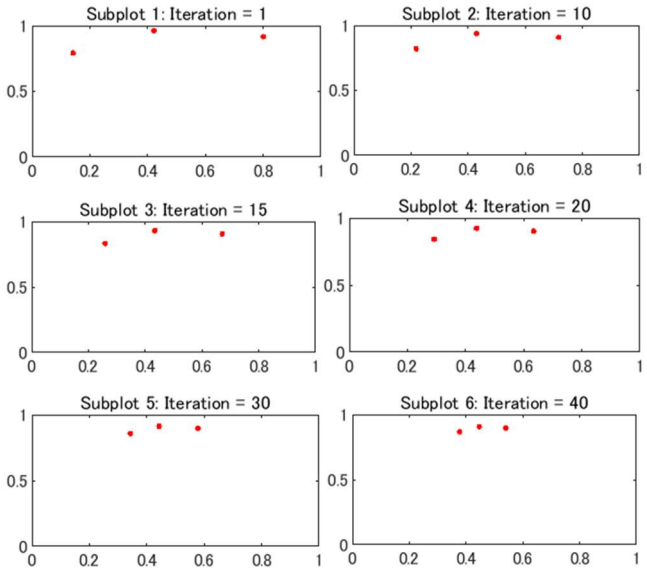

Fig.6 Changes in movement of three planes over time during V-flight

5　燃料（エネルギー）効率の比較結果

本研究では flightaware[6]の情報より, 2024 年 2 月 2 日（金）の高知龍馬空港（KCZ）発の東京国際空港（HND）着のデータを使用した. フライトの情報・機体の情報の詳細に関しては以下のとおりである.

Fig.7 time of departure

Fig.8 time of arrival

最大離陸重量	77,000kg
全幅	34.1m
全長	37.6m
垂直尾翼の高さ	11.8m
客室の幅	3.7m
翼面積	122.4m^2
平均巡航速度	863km/h
巡航高度	8,899m～11,887m
最大燃料容量	23,860L
最大積荷重量での航続距離	4,800km/2,600m
最大推力	110.31kN/24,800lb
エンジン	V2527-A5 x 2基

Fig.9 Airframe information (Airbus A320)

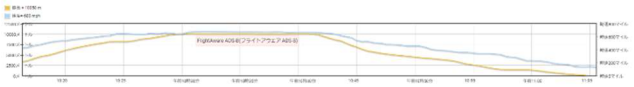

Fig.10 flight log

このフライトの所要時間は 1 時間 10 分であることがわかる. また図 11 のフライトデータより飛行速度は毎時 410 マイル, 飛行距離は 433 マイルであるが, 今回, 値を導入する式は, 同一の速度で水平飛行する同一の大きさの翼の V 字飛行について考えているため, 安定化したときのデータを使用する必要がある. フライトログより, 午前 10 時 30 分から午前 10 時 43 分の間がほぼ一定の速度・高度（約 10, 000m）で飛行しているため, この時間帯のデータを用いることとする. この時の速度は毎時約 660～680 マイルであることから, 平均をとって毎時 670 マイルを用いる. 必要なエネルギー$N_{0\mu}$は$N_{0\mu} = D_{0\mu}V = 890 \times (1.6 \times 670) = 954080 = 954\ (MW)$. また, 式翼が 3 枚（$\mu$ =3）の場合の必要なエネルギーは, N_0 =

$\sum_{\mu=1}^{n} N_{0\mu} = \sum_{\mu=1}^{3} 954 = 2862\,(MW)$. V 字飛行中は他のすべての翼による吹き上げの中を飛行することになるため, 一様な吹き上げ $\bar{\omega}_\mu$ のために, Fig. 3 のように流れの方向と揚力の方向が吹き上げ角 ϕ_μ だけ曲げられる. 吹き上げにより減少した抗力 ΔD_μ は, $\Delta D_\mu = L_{0\mu}\left(\frac{\bar{\omega}_\mu}{V}\right) = 77000 \times \left(\frac{\bar{\omega}_\mu}{1.6\times 670}\right) = 71.8\,\bar{\omega}_\mu$. 必要パワーの減少分 ΔN_μ は, $\Delta N_\mu = \Delta D_\mu V = L_{0\mu}\bar{\omega}_\mu = 77000\bar{\omega}_\mu$. n 枚の翼を含むV字編隊全体の全必要パワーの減少分 ΔN は, $\Delta N = \sum_{\mu=1}^{n} \Delta N_\mu = \sum_{\mu=1}^{3} 77000\bar{\omega}_\mu$. 吹き上げ角 ϕ_μ （> 0）より, マイナスの値をとることはないため, 必要パワーは必ず減少するといえる. この結果から, 必要パワーの減少によりエネルギー消費も必ず減少するため, 燃料の消費も抑えられるといえる. しかし, 本研究では吹き上げ角 ϕ_μを検出することができなかったため, 吹き上げ $\bar{\omega}_\mu$の値が求められず, V 字飛行の際に必要なエネルギーと通常の水平飛行の際に必要なエネルギーを数字やグラフとして詳しく比較することはできなかった.

6 結言

本論では渡り鳥のＶ字型フォーメーション飛行を航空機に適用することで燃料消費量が抑えられる（燃料効率が上がる）可能性について調査した. 実際に matlab を用いてシミュレーションをすることができたこと, またＶ字飛行の際には必要なパワー（エネルギー）を抑えることができることが分かったことで, 将来航空機も渡り鳥のようにＶ字フォーメーションを作って飛行することができる未来への第一歩にはなったのではないかと考える. 今後の課題としてはより多くのデータを用いること, 今回の失敗点ともいえる吹き上げ角のデータを見つけ, 算出することであると考えている. また, 今回は航空機３台での場合を考えたが, もっと機数を増やしてみること, 航空機がＶ字型のまま巡行する際, どうしても先頭機の負担が大きいことを踏まえ, 先頭機の交代パターンの最適方法を考えること, など様々な課題が残っている. Ｖ字飛行のメリットは燃料節約だけでなく，航空機の航続距離の向上や排出ガスの削減にもつながる可能性がある．また，航空機同士の安全性も高まることが報告されている．ただし，Ｖ字飛行は航空交通の管理やパイロットの訓練などの課題も伴う．航空機の燃料効率向上は，航空業界や環境にとって重要な課題であり，編隊飛行はその一つの解決策になるのではないかと考えられる．将来的には航空業界や環境保護団体などに対して，燃料消費の削減や環境負荷の低減に役立つ情報の提供を目指している．

参考文献

⑴ Airbus,2019 ,「fello'fly」, AIRBUS ホームページ, (2023 年 12 月 30 日取得, https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/biomimicry/fellofly#:~:text=fello%27fly%20fello%E2%80%99fly%20aims%20to%20demonstrate%20the%20technical%2C%20operational,of%20a%20commercial%20aircraft%20flying%20in%20this%20configuration.)

⑵ Anokina Shalimoon, “Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Consensus, Flocking and Formation Control”, 2018

⑶ 東 俊一 , マルチエージェントシステムの制御, コロナ社, 2015

⑷ Bemhard Voelkl, “Matching times of leading and following suggest cooperation through direct reciprocity during V-formation flight in ibis”, 2015

⑸ 河邊 博康, 編隊飛行の最適編隊形状と先頭交代方法に関する研究, 2006

⑹ FlightAware , 2024 , 「ANA564 flight schedule 」, FlightAware flight schedule , (2024 年 2 月 2 日取得, https://ja.flightaware.com/live/flight/ANA564/history/20240202/0120Z/RJOK/RJTT)

⑺ Qantas , 2024 ,「エアバス A320-200 カンタス航空 - Qantas 」,QANTAS ホームページ, (2023 年 12 月 28 日取得, https://www.qantas.com/jp/ja/qantas-experience/onboard/seat-maps/airbus-320-200.html)

⑻ Steven J Portugal, Tatjana Y Hubel, Johannes Fritz, Stefanie Heese, Daniela Trobe, Bernhard Voelkl, Stephen Hailes, Alan M Wilson, James R Usherwood, “Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight”, 2014