

論文の内容の要旨

Mitigating Porpoising in Planing Simulation of Seaplanes

(水上飛行機の滑走シミュレーションにおけるポーポイズングの抑制)

伊藤 景一

1 要約

本博士論文では、水上飛行機の平水面滑走時における安定性について考察する [1, 2]。2005年12月に横浜国立大学の水槽実験において双フロート模型の牽引実験を行った際、二つの興味深い現象が観察された [3]。一つは滑走速度が上昇しある値に達すると、ピッチングとヒーピングが連成したポーポイズングと言う運動が起こり、じゃじゃ馬が暴れる様な不安定な状態になるが、その運動の抑制に重心を後方にずらす事が有効であった事。もう一つは、フロートと機体の間の支持構造を車のサスペンションに相当するような柔構造に置き換えた所、ポーポイズングの発現が抑制された事であった。何れも波のない平水面を滑走する際に確認した現象である。この事象を理解するために、2自由度の剛体線形モデルと柔支持構造を含む4自由度の線形モデルを作成しその挙動の再現を試みた。その結果、二つの線形モデルは、実験結果を定性的に再現した。また定量的にも振動の発散条件（滑走速度と重心位置）において比較的良好な一致を見せた。

滑走線形モデルは飛行力学の線形モデルと同様に微小擾乱を仮定し、状態変数（ピッチとヒーブ）及びその速度と加速度を考慮した。またダンピングを含む外力及び付加質量はFaltinsen [4] に準拠した。これはポテンシャル理論や水槽実験を基にした半実験式で成り立っている。

以上を元に、どの様な条件によって滑走が不安定になるかパラメトリックに調査した。剛支持モデルに関しては、滑走面及び慣性を定義する設計パラメータに値を入れて、全ての振動モードが減衰する時を安定とした。また柔支持モデルに関しては、上記の設計パラメータに加えて前後柔支持機のパラメータ、即ちばね係数とダンパー係数の値を様々に変える事によって発散

モードの有無を調べた。具体的には、振動解析と感度解析を行って、発散振動モードの滑走速度による変化や設計変数の安定性への影響を調べた。また、設計パラメータを同時に変化させて安定な滑走を実現する値を探索する際に、独自に開発したアルゴリズム、**Self-Organizing Map Based Adaptive Sampling (SOMBAS)**を用いた[5, 6, 7]。このアルゴリズムを用いれば、目的関数がある閾値を満たす（ここでは線形モデルの固有値の実数解の最大値がゼロ以下になるような）多様な解を効率的に求める事が出来る。解は多次元のベクトルであるが、本研究ではこれを所望の二変数の分散図に投射することによって、各々の設計変数が固有値に及ぼす影響や、変数間の相関関係を調べた。

新たな知見として、ポーポイジングの発散振動は柔支持構造によってその発現が抑えられ、より高速の滑走速度においてフロートと機体が、ピッチ角で、ほぼ逆位相となる、より高い周波数の共振振動が発生する事が計算によって示唆された。この共振によって不安定になる滑走速度は、ばね係数とダンピング係数等を調節することによって変える事が出来る。よって、柔支持モデルは剛支持モデルより高速な速度まで、安定に滑走し得る事が示された。これは水槽実験の結果とも整合している。また、水上飛行機の重心の縦方向（つまり前後方向）移動は、柔支持においては不安定化に（必ずしも）繋がらない事や、フロートのビーム長（フロート幅）が重要である事が計算で示された。

SOMBASを使った解析では、柔支持ではビーム長が、ある特定の設計変数の上下限值内では、短い方がより安定なデザインを生成している。これは、フロート周りのピッチングによる付加質量の低減が上記の共振周波数を上げ、ポーポイジングの周波数との間隔を広げる事に貢献しているためと思われる。剛支持では逆にビーム長が長い方が水力学的なダンピングが効くため、安定なデザインを得られると推測される。ただし柔支持における共振は、現状の線形モデルでも多くの変数が連成し複雑であるため、正確な理解には更なる研究が必要である。

2 制約

1. 水上飛行機の滑走安定性をテーマとしたが、水槽実験模型においても数値モデルにおいても尾翼や主翼の空力は考慮されていない。これは今後の研究の重要課題である。
2. 本研究では水槽実験の後に数値モデルを構築している。モデルの精度を上げるために、数値モデルによる予見を元に更なる水槽実験を行うのが望ましい。
3. フロートの水力学モデルは滑走面付近に限られ、水による動圧のみを考慮している。艇体先端部の湾曲面とステップ以後の艇体後部は考慮されていない。しかし既存の半実験式ではこれらの部位のモデル化は微小擾乱の範疇を超える。フロート全体を考慮したシミュレーションには、数値流体等の計算やそのための新たな実験が必要である。
4. 柔支持構造の制御について本論文では検討していないが、自動車同

様、セミアクティブやアクティブサスペンション等、様々な可能性がある。

3 貢献

1. ポーポイジングは水上飛行機の危険要因として古くから知られていたが、その発現条件はあまり良く分かっていなかった。これに対して、航空機設計においては、経験則に頼る所が多く、広範なパラメトリック調査は、私が知る限り皆無である。本研究は、水上飛行機の概念設計において、水上滑走時の縦安定性をより詳細に考慮するための基盤を与えるものである。
2. 従来、ポーポイジング発現時に、重心を前後どちらに移動させればよいかは、一貫した知見が無かった。本研究は、その理由を縦方向に存在する不安定帯域の存在によるものであると示唆した。重心の位置が不安定帯域の前方にあれば、更に前方に重心を移動した方が良く、逆に不安定帯域の後方にあれば、重心を更に後方にずらす方がよい。また、この不安定帯は速度が上がるほど、前後に拡張して行くと言う計算結果を得た。
3. 柔支持構造がポーポイジングにもたらす影響を初めて数値モデルを用いて調査した。
4. 多次元変数空間をSOMBASと言うアルゴリズムを適用して得られた解集合より多数の設計変数が安定性に及ぼす影響を総合的に分析した。また数値モデルを用いた感度解析により、それらの設計変数が安定な滑走速度の限界値、或いは振動固有値に与える影響を解析した。またこれらによって新たな設計指針を得られる事を示した。

References

- [1] Keiichi Ito, Yoshiaki Hirakawa, Tsugukiyo Hirayama, Tatsumi Sakurai, and Tom Dhaene. Longitudinal stability augmentation of seaplanes in planing. In *Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference (Aviation 2015)*, Dallas, Texas, June 22 - 26 2015. AIAA.
- [2] Keiichi Ito, Yoshiaki Hirakawa, Tsugukiyo Hirayama, Tatsumi Sakurai, and Tom Dhaene. Longitudinal stability augmentation of seaplanes in planing. *AIAA Journal of Aircraft*, 53(5):1332–1342, 2016.
- [3] Yoshiaki Hirakawa, Takehiko Takayama, Asuka Kosaki, Hiromitsu Kikuchi, Tsugukiyo Hirayama, and Tatsumi Sakurai. Model experiment of a suppression-system for wave impact and porpoising phenomena. *Conference Proceedings of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers (in Japanese)*, 3:239–242, 2006.

- [4] Odd M. Faltinsen. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press, 2005.
- [5] Keiichi Ito, Tom Dhaene, Naji El Masri, Roberto d’Ippolito, and Joost Van de Peer. Self-organizing map based adaptive sampling. In *Proceedings of 5th International Conference on Experiments/Process/System Modeling/Simulation/Optimization (5th IC-EpsMsO)*, volume II, pages 504 – 513, Athens, Greece, July 3 - 6 2013. ISBN:978-618-80527-2-7 or 978-618-80527-0-3.
- [6] Keiichi Ito, Ivo Couckuyt, Roberto d’Ippolito, and Tom Dhaene. Design space exploration using self-organizing map based adaptive sampling. *Applied Soft Computing*, 43:337 – 346, June 2016.
- [7] Keiichi Ito. *Sampling High-Dimensional Design Spaces for Analysis and Optimization*. PhD thesis, Ghent University, December 2016. ISBN: 978-90-8578-952-9.