

二枚の帆がおりなす非線形現象——分岐とヒステリシス

杉本 剛

神奈川大学工学部、横浜市神奈川区六角橋 3 - 2 7 - 1

e-mail: take@is.kanagawa-u.ac.jp

Non-linear phenomena in a pair of sails in a flow: bifurcation and hysteresis

Takeshi SUGIMOTO

Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa Ward, Yokohama

Abstract: This is the first report of complex bifurcation and many-fold hysteresis phenomena in physics behind a pair of sails set in a flow in two dimensions. Numerical analyses predict three sets of solutions: the convex-convex sail shapes, the concave-convex sail shapes and the concave-concave sail shapes as well as two- or three-fold hysteresis in aerodynamic and structural characteristics. Experimental observations confirm the existence of all the three solution sets, and moreover another set, the convex-concave sail shapes, is found by the experiment.

Keywords: flow-structure interaction, sails, bifurcation, hysteresis

1. いとぐち

帆の形が境界条件を決める一方で、帆は流体力の影響で容易に変形する。この非線形効果により、帆の構造・空力特性には、多解が存在し、ヒステリシス現象が起こることが知られている。このことは2次元の帆のみならず3次元のばあいにも見出されている。ヨットでは、メイン・セールだけでなく、ジブ・セールを用いて、高揚力を得る工夫がなされるが、2枚の帆と流れの干渉については、特殊なばあいの2次元解しか知られていない。本研究では、構造的に独立した2つの帆の張力を決定する数値解法による結果と小型模型による実験結果によって、2枚の帆がおりなす複雑な現象を明らかにする。

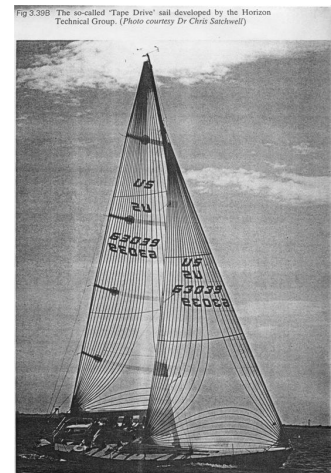


Figure 1. A yacht with jib and main sails

2. 理論と実験の構成

帆は細長く、その周りの流れのレイノルズ数は十分大きいので、2次元非粘性流れを仮定する。帆の変形は、たるみによって生じるものとする。帆の厚みは無視できるので、渦層理論を活用する。基礎方程式系は、連立のフレッドホルム型線形積分方程式と連立のたるみに関する非線形積分条件で構成される。支配パラメータは、帆と流れのなす角（迎え角）および二つの帆に働く張力である。基礎方程式系を境界要素法とパラメータ空間でのニュートン法を用いて数値解析する。

実験には小型の循環型風洞を用いる。テスト・セクションは、幅 5cm×高さ 10cm と小さい。帆は、OHP 用の透明シートを前縁と後縁に見立てたステンレス製丸棒に固定したもので模した。二つの帆の位置関係は、実際の帆の組合せを想定した3とおりを用意した。

3. 結果と考察

Figures 2-4 に、解析結果と実験結果をまとめて示す。いずれも、流れは左から右である。図に示されているのは、帆の断面形状の写真と解析結果（写真近傍の2本の太い曲線）である。 α および度数記号付きの数字は、迎え角を示している。より上流にある帆が、ジブ・セール、下流にある帆がメイン・セールに相当している。角度の変遷を数直線に付けた矢印で示した。

いずれのばあいも、形状の変化にヒステリシスが存在することが見て取れる。角度の絶対値が大きくなばあいには、二つの帆の形状は、凸・凸または凹・凹の組合せになるが、角度の絶対値が小さいばあいには、凹・凸の組合せの状態が現れる。この凹・凸の組合せでは、二つの帆の間に狭いチャンネルが成立し、そこを流れる空気のベンチュリー効果によって、帆は吸い寄せられる。したがって、この状態は安定に保たれる。

Figure 4 に示した例では、実験により (d)すなわち凸・凹の組合せが発生して、さらに複雑なヒステリシス現象が観察できた。ただし、広大なパラメーター空間を、初期値を変えて探索したものの、数値解析ではこの組合せを見出すことはできなかった。その原因の一端は、理論では無視した自重の影響が挙げられる。写真の紙面でいえば、右向きに重力が帆を引っ張るように働いている。このため、凹・凹の状態から迎え角を上げていったときに、先にジブ・セールが凸の状態になり、凸・凹が実現したと考えている。

4. むすび

流れと構造の連成問題では、多解が存在し、複雑な分岐やヒステリシス現象が起こることを、二枚の帆でも見て取ることができた。

[文献] T. Sugimoto, *Phys. Fluids*, **19**, 122102 (2007).

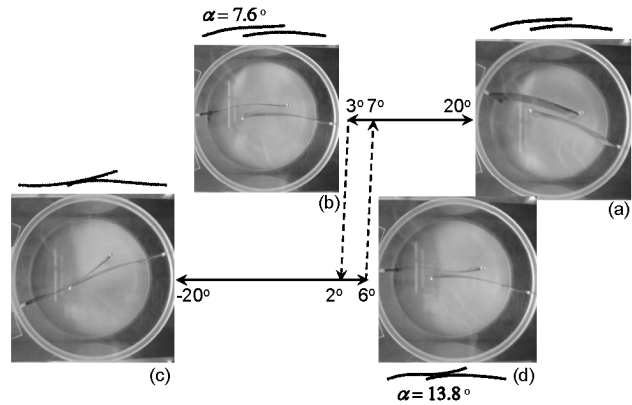


Figure 2. Largely overlapping case.

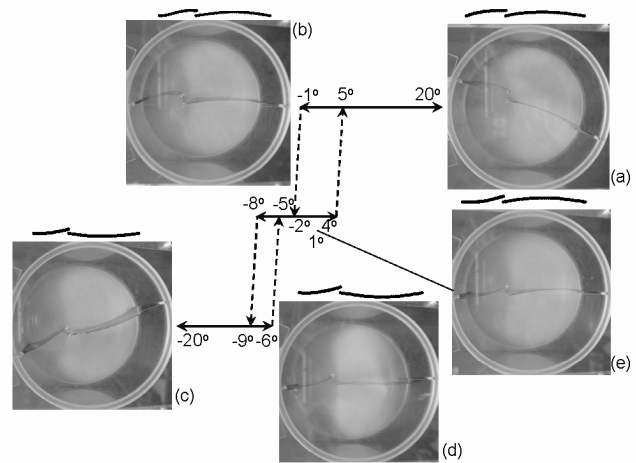


Figure 3. Less overlapping case.

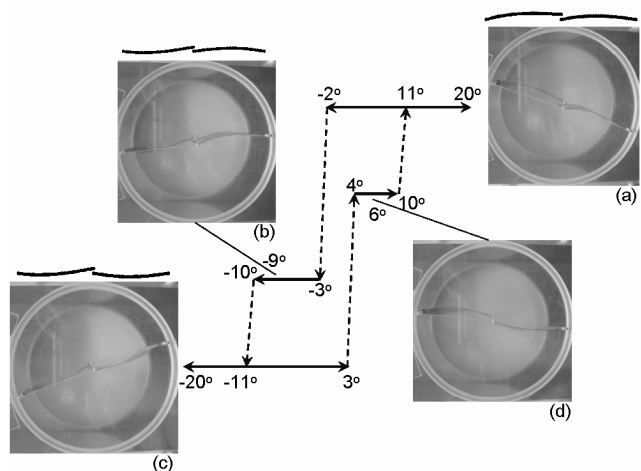


Figure 4. Less overlapping case.