

翼のフラッターに及ぼす地面効果に関する研究

(風洞壁面上の境界層の影響)

菊地 正憲¹⁾・立野 誠²⁾・弓削 俊夫³⁾・市川 明夫⁴⁾・平野 公孝¹⁾

An Experiment of Ground Effects on Aerofoil Flutter – Effects of Wall Boundary Layer –

Masanori KIKUCHI, Makoto TATENO, Toshio YUGE, Akio ICHIKAWA, Kimitaka HIRANO

Abstract

A new transport system “Aero-train” with low energy consumption and sufficient energy efficiency has been proposed. It has wing and flies close to the grounds along a guide way of an open channel. The aerodynamic characteristics of the wing are strongly affected by the ground. In order to clarify the aerodynamic stability of the aero-train, it is necessary to consider effects of the ground on the flutter speed. Our aim of this thesis is to clarify the flutter speed under effects of ground by using two flutter apparatuses. To achieve this, we have to remove the effect of boundary layer which develops on the wall of wind tunnel. So we have made a boundary layer suction device and tried remove them all. As a result, we could see the ground effects on aerofoil flutter more clearly.

Key Words:

Flutter, Wind tunnel, Boundary Layer, Ground Effect

1. 緒言

近年、化石燃料の枯渇や地球温暖化がさらに深刻さを増しており、交通、輸送の分野においてもCO₂の排出削減及び省エネルギー化が求められている。そのなかで省エネルギーにして高速輸送を実現する新交通システムとしてエアロトレインが提案されている。エアロトレインは翼によって車体を僅かに浮かしU字型のガイドウェイ内を高速で走行できる。また地面効果を積極的に利用し誘導抵抗を抑えることにより軌道沿い

に敷設した風車やソーラーパネルによる電力のみでの走行が可能となる。上記の地面効果とは飛行中の翼を地面に近づけると翼の揚抗比が増加する現象であり、このとき揚力に対し相対的に抗力が減少するため消費エネルギーを減らすことができる。地面効果に関する研究は現在まで揚力や抗力などが注目され、翼の安定性に及ぼす地面効果の研究はあまり行われていないが、その中で翼のフラッター現象は翼の破壊を引き起こすことから大変重要である。本研究では自作のフラッター装置によってモデルによって実際にフラッター現象を起こし地面効果のフラッター速度への影響を観察する。また今回実験に使用する乱流風洞においては風洞壁面に境界層が生じるためこの影響を考慮する必要がある。本実験では境界層吸い込みの機構を備えた地面を新たに製作することにより境界層の影響がない条件

1) 機械システム工学科教授

2) 機械システム工学専攻大学院生

3) 機械システム工学科技官

4) 航空大学校教授

でフラッター速度を計測することを目的とする。

2. フラッター速度測定実験

2.1 境界層吸込み付き地面

風洞壁面境界層の影響を考慮し、図1に示すような境界層吸込みの機構を有した地面を作製し風洞壁面に設置する。本装置は主に亚克力製の地面と境界層を吸い込むためのダクト状流路により構成されており、この地面に空けられたスリット状の穴は地面下側を通る流路とつながっている。スリット位置の流路内にはノズルを設けてあり、ここで引き起こされるベンチュリー効果によって流路内の圧力は地面上の圧力に比べ相対的に減少する。この圧力差を利用することで地面上を覆っている境界層を地面の下に吸い込み、境界層の影響が少ない地面を作り出すこととした。

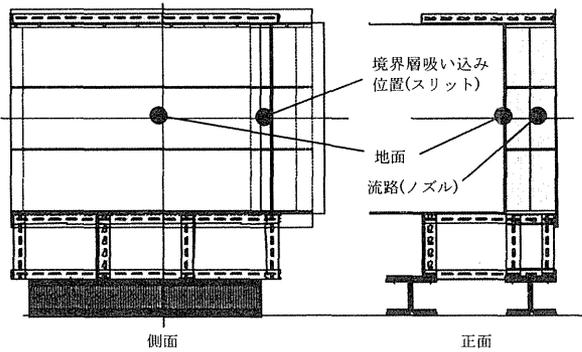


図1 境界層吸込み付き地面概観

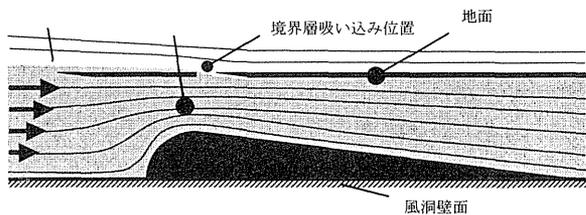


図2 境界層吸込み位置断面

2.2 フラッター実験装置

実験に用いるフラッター装置は翼型と曲げ、振りのばねによって構成され、2自由度を持つ。また各ばね部に貼り付けたひずみゲージによりピッチングとヒービング振動の変位を測定することができる。本装置の翼型には対象翼である NACA0012 を用いた。翼型の骨格は木製で、表面を滑らかにするため翼表面にフィルム膜を貼っている。今回は翼と空気の質量比による違いがフラッター速度に及ぼす影響を明らかにするために以下のような2つの翼型を使用し実験を行った。

- 翼型 (i) 翼半弦長 $b=100(\text{mm})$, 翼幅 $l=300(\text{mm})$
質量比 $\mu = 12.727$
- 翼型 (ii) 翼半弦長 $b=50(\text{mm})$, 翼幅 $l=150(\text{mm})$
質量比 $\mu = 29.186$

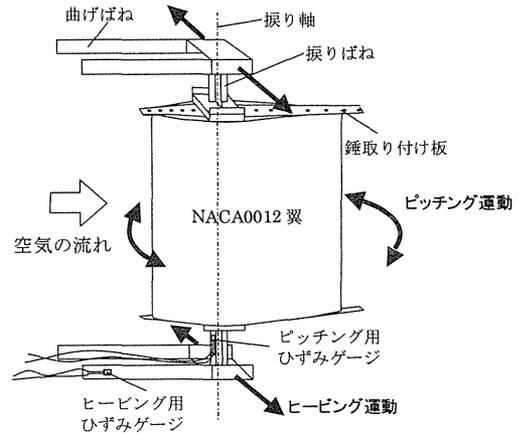


図3 フラッター実験装置

2.3 風洞特性及び地面上の流れ特性に関する実験

本実験では風洞壁面及び今回設置した境界層吸込み付き地面上における速度分布を測定する。設定風速は 10m/s で測定箇所は風洞壁面及び装置の地面からそれぞれ 10mm 間隔ずつ 25 箇所とする。

2.4 境界層吸込み

ここでは境界層吸込み付き地面の吸い込み強さを変化させ、地面上の速度分布の変化をピトー管により測定する。境界層吸込みの強さは地面に設けられたスリットの幅を変化させることで行い、主流方向に 8 箇所、地面からの高さ方向に 11 箇所の計 88 箇所を測定する。

2.5 固有振動数の測定実験

U-g 法によりフラッター速度を算出する際に必要となるねじり軸まわりの慣性モーメント及び曲げばねのばね定数を求めるために、ピッチングとヒービング振動の固有振動数を測定する。周波数発信機を用いて一定周波数の信号をパワーアンプを介してスピーカーに入力し、その音波を静止流体中の翼にあてることで翼を振動させる。翼型の振動は装置の曲げと振りのばねに取り付けたひずみゲージにより測定し、ブリッジボックス、ストレインアンプ介して FFT アナライザに入力する。このようにして採取したパワースペクトル図から各固有振動数を求める。実験装置の概略図を図4に示す。

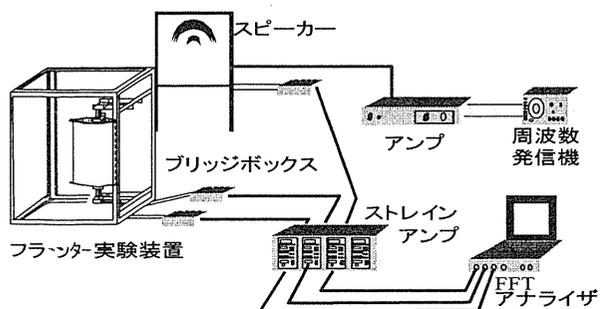


図4 実験装置

2.6 翼のフラッター速度に及ぼす地面効果に関する実験
本実験では翼が地面に近づくことによるフラッター速度の変化を観察する。また本実験は風洞内壁に存在する境界層がフラッター速度に及ぼす影響を明らかにするために自作の境界層吸い込み地面を用いて実験を行った。本実験では地面から翼の弾性軸までの無次元高さ H/h を ∞ , 4.0, 1.0, 0.75, 0.5 と設定し、風洞内の流速を 0.1m/s の間隔で増加させていくことで翼のフラッターを起こさせ、そのときの流速をピトー管により測定する。同時にピッチングとヒービング振動のデータも採取し振動のパワースペクトル及び相互相関関数を求める。重心位置を翼型 (i) は 15 段階、翼型 (ii) は 7 段階変化させることで、翼の重心位置とフラッター速度との関係を調べる。

3. 実験結果及び考察

3.1 風洞特性と境界層吸い込み地面上流れ特性の実験結果及び考察

図5に、ピトー管で測定した風洞壁面付近の速度分布を示す。図から地面近傍に近づくにつれ流速が大きく低下していることが分かる。これは壁面近くで境界層が発達していることが要因として考えられる。図中には乱流境界層厚さ δ の理論値も記載しており、これと測定の結果から類推される境界層厚さが理論値にほぼ一致していることがわかる。同じ測定位置を熱線流速計により測定した結果乱れ度は地面に近づくにつれ上昇していることが分かった。また熱線流速計によって風洞壁面付近の卓越周波数を測定した結果壁面からの高さ 20mm の位置では $2\sim 6\text{Hz}$ 、高さ 50mm 、 80mm の位置では $3\sim 4\text{Hz}$ 、 150mm 、 200mm の位置では 1Hz 付近に卓越した周波数が存在することが分かった。

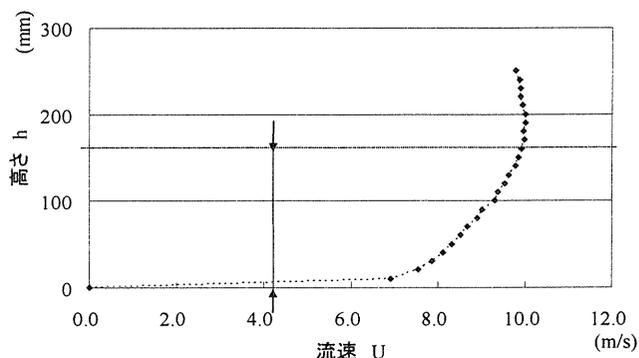


図5 風洞壁面流速分布

3.2 境界層吸い込み付き地面上流れの特性の実験結果と考察

図6に、ピトー管で測定した境界層吸い込み地面上の速度分布を示す。このときの吸い込みスリット幅は 10mm である。この図より地面上の速度分布は風洞壁面の速度分布に比べて一様な流れに近い形になっていることが分かる。高さ 20mm から 150mm にかけて流速が若干速くなっているがこれは装置の存在によって装置前方の流れが減速され、装置の流路に流れ込むはずの空気が地面上に流れ込んできたためと思われる。この図中には乱流境界層厚さ δ の理論値も記載しておりこの値より下の地面に近い位置で流速が急激に遅くなっていることから実際の境界層厚さが理論値にほぼ一致していることがわかる。

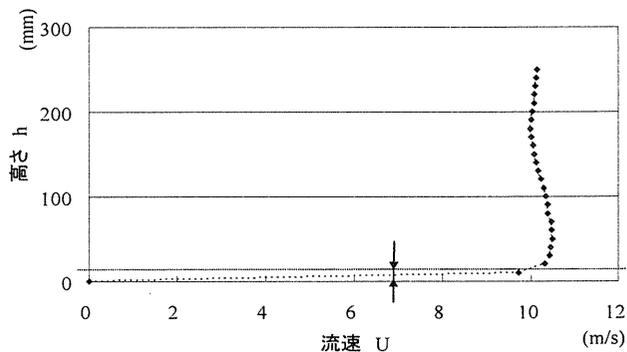


図6 境界層吸い込み地面上流速分布

上記と同じ位置を熱線流速計により測定した結果、乱れ度は地面に一番近い位置で最大値を示し、地面から離れるに従い急速に小さくなる。また地面上の流れの周波数は高さ 20mm の位置で $4.8, 9.8\text{Hz}$ 付近に卓越した周波数が観測されたもののそれ以外の高さでは卓越した周波数は観測されなかったことから今回の実験に卓越周波数の影響はほとんどないものと考えられる。

3.3 境界層吸い込み付き地面上の速度分布測定結果及び考察

本実験では装置の吸い込み強さを変化させることで地面上の速度分布がどのように変化するかを調べた。図7にスリット幅 10mm のときの速度分布を示す。グラフは主流速度からの変化量を示しており装置前端から 0mm 位置の流速データを例に取ると、図の横軸(装置前端からの距離)が 0 である位置の破線上の流速は 10m/s となり、それより右にプロットされているものは流速が 10m/s より速い。図からスリット位置(前端から 125mm)より前方の地面付近の流速が吸い込みの影響で増速している様子が分かる。また速度分布は位置 200mm で一度様な分布になるが下流に流れるにつれ地面付近の流速が速くなる様子が分かる。これは地面からの高さ 10mm 位置での流速が装置前端から下流方向にいくに従って減速していることから、地面上で新たに発達した境界層による影響であると考えられる。スリット幅を変化させた中でスリット幅 10mm の測定結果が他のスリット幅の結果に比べ装置中央位置における境界層厚さが薄く最も様な速度分布を得られたことから、今回の実験はスリット幅 10mm の条件のもと行うこととした。

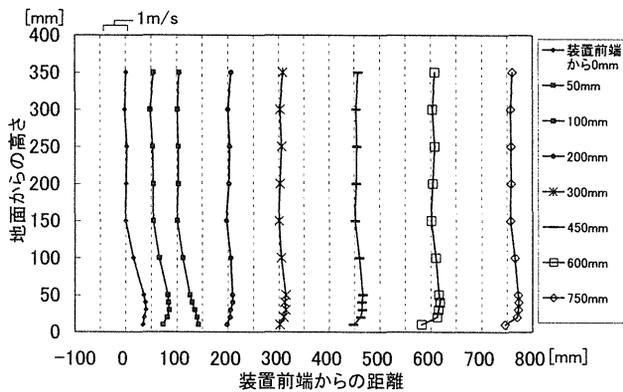


図7 地面上速度分布(スリット幅=10mm)

3.4 固有振動数の測定結果及び考察

振りの固有振動数、振りの角振動数、曲げの固有振動数、曲げの角振動数、弾性軸まわりの回転半径をそれぞれ f_α , ω_α , f_h , ω_h , r_α で表し、質量、質量比、振りのばね定数をそれぞれ m , μ , K_α としてその結果を表1に示した。表から振りの固有振動数は錘位置が弾性軸(1/4 弦長点)に近づくにつれ大きくなるのが分かる。これは弾性軸からの錘の距離が近くなることで振り軸まわりの慣性モーメントが小さくなり、振りの固有振動数と慣性モーメントの関係から固有振動数が増

加したためである。また、曲げの固有振動数は、ばね定数 K_h と全体の質量 m が変わらないため以下の式より翼型(i), (ii)ともに錘の位置にかかわらず一定であることがわかる。

$$f_\alpha = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_\alpha}{J}}, \quad f_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_h}{m}}$$

J : 振り軸まわりの慣性モーメント

表1 翼型(ii)パラメータ

No.	錘位置	全質量	ピッチング質量	質量比	f_α	r_α^2	f_h	x_α	ω_h/ω_α
1	75	0.09	0.044	29.186	6.58	1.252	5.95	0.587	0.905
2	70	0.09	0.044	29.186	6.90	1.137	5.95	0.541	0.862
3	65	0.09	0.044	29.186	7.55	0.950	5.95	0.496	0.788
4	60	0.09	0.044	29.186	8.18	0.810	5.95	0.450	0.728
5	55	0.09	0.044	29.186	8.90	0.683	5.95	0.404	0.669
6	50	0.09	0.044	29.186	9.50	0.600	5.95	0.359	0.626
7	45	0.09	0.044	29.186	10.10	0.531	5.95	0.313	0.589

3.5 U-g法によるフラッター速度計算結果及び考察

今回測定した実験装置のパラメータを用いて U-g 法によりフラッター速度を計算した。この計算結果は単独翼に対する揚力とモーメントを使用しているため $h/b = \infty$ 位置での計測結果に対応する。図8はねじり軸位置に対するフラッター速度の依存性を示している。

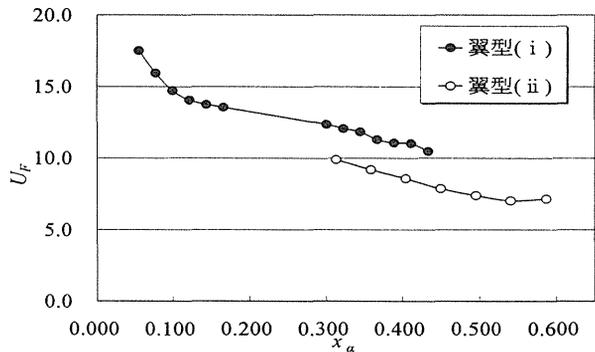


図8 u-g法によるフラッター速度計算結果

図より翼型(i), 翼型(ii)ともに重心位置が弾性軸に近づくにつれフラッター速度が上昇していることが分かる。また重心が弾性軸により近づき $x_\alpha = 0.1$ 近くになるとフラッター速度の上昇がより顕著になっていることがわかる。

3.6 フラッター発生時の練成振動数

フラッター発生時におけるパワースペクトルからフラッターの連成振動数を求めその特性を考察する。パワースペクトルの一例を図9に示す。この図からフラッター発生時には、ピッチングとヒービングの振動数が一致することが分かる。このようにして求めた練

成振動数をピッチング及びヒービング振動の固有振動数と共に図 10, 図 11 に示す. 翼型(i)に関して, フラッター発生時の連成振動数は重心が振り軸に近い場合ピッチングとヒービング振動の固有振動数の間に位置するが, 翼型(ii)では両方の固有振動数よりも高い値を示している. また翼型(i)において, 連成振動数は重心位置が弾性軸から離れるに従い増加する傾向にあることが分かる.

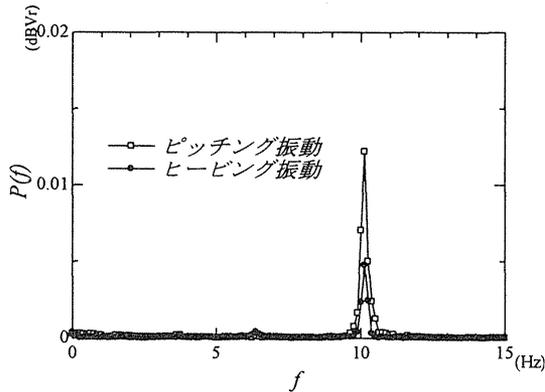


図 9 フラッター発生時のパワースペクトルの一例 (翼型 ii)

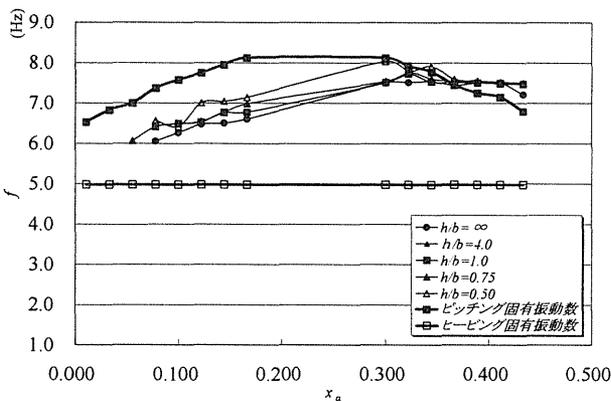


図 10 フラッター発生時の連成振動数 (翼型 i)

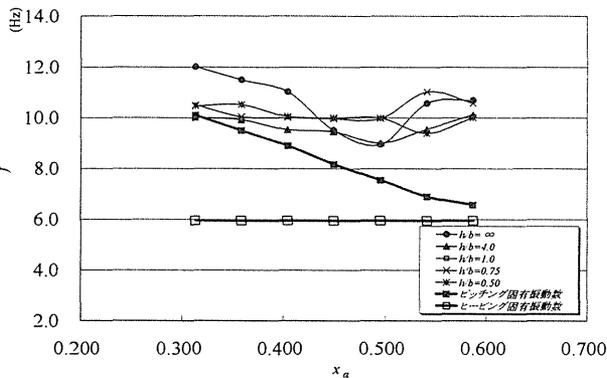


図 11 フラッター発生時の連成振動数 (翼型 ii)

3.7 フラッター速度に関する結果及び考察

図 12 は風洞壁面境界層がある場合の翼型(i)のフラッター速度を示しており, 図 13 は境界層の吸込みがある場合のフラッター速度を示す. またこれらの図中には u-g 法によるフラッター速度の計算結果を併せて記載している. 図から境界層の有無に関わらず重心が弾性軸に近づくつれフラッター速度が上昇することが分かる. また, 翼が地面に近づくつれフラッター速度が低下することから地面はフラッターに対して危険側に働いていることが分かる. フラッターが発生するときは, ヒービング振動の位相はピッチング振動よりも進んでおり, 翼は頭下げの状態では地面に近づき, 逆に頭上げの状態では地面から遠ざかることを意味している. すなわち, 地面に近づくときは翼と地面の間でベンチュリー効果が働き翼は地面に引き付けられる. また, 頭上げで地面から遠ざかるときは, 地面効果で揚力が増加する. これは, 地面があるとフラッターが起り易いことを示している⁹⁾.

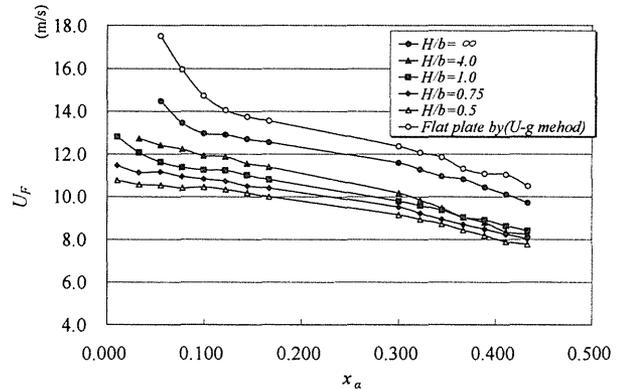


図 12 翼型(i)のフラッター速度に及ぼす重心位置と地面高さの影響 (壁面境界層あり)⁹⁾

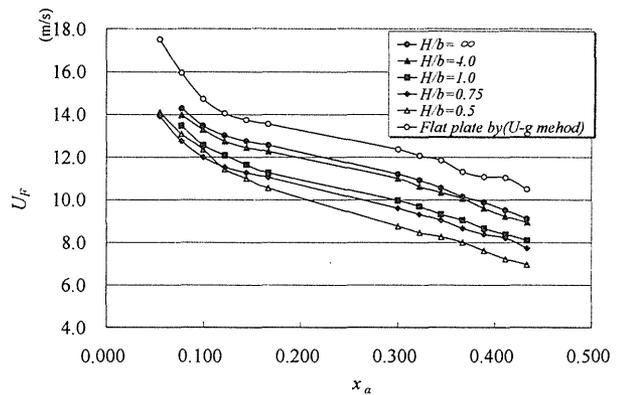


図 13 翼型(i)のフラッター速度に及ぼす重心位置と地面高さの影響 (壁面境界層の吸込あり)

翼型(i)に関する図12と図13の比較および翼型(ii)に関する図14と図15の比較から、地面上の境界層を吸い込むことによりその影響が弱くなると地面高さの影響がより顕著に現れていることが分かる。また、翼型(i)における理論計算では、重心位置がピッチング軸に近づく急速にフラッター速度が上昇するが、境界層の吸込みがある場合にだけその傾向が現れている。これらのことから、風洞でフラッター実験をする場合、風洞壁面境界層の吸込みが必要であることがわかる。

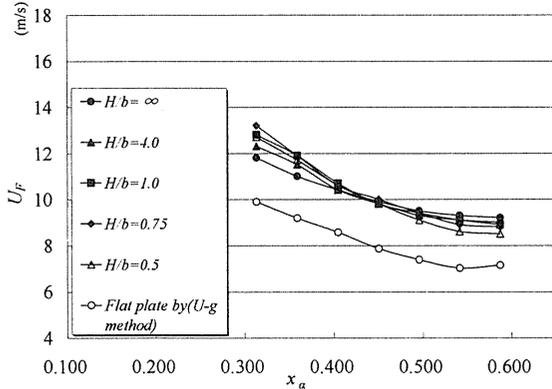


図14 翼型(ii)のフラッター速度に及ぼす重心位置と地面高さの影響（壁面境界層あり）⁹⁾

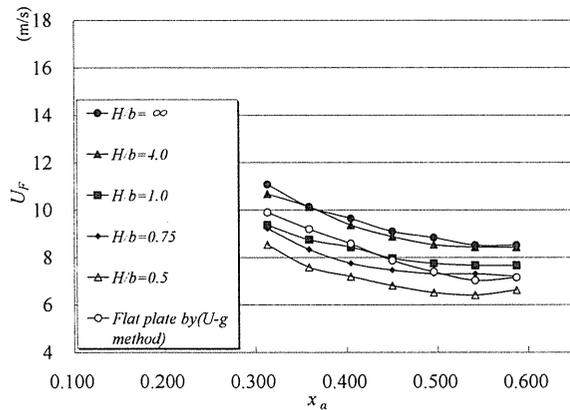


図15 翼型(ii)のフラッター速度に及ぼす重心位置と地面高さの影響（壁面境界層吸込あり）

結言

本研究で得られた結果を要約すれば以下のようになる。

- (1) ベンチュリー効果を利用し、境界層を吸い込む地面を自作し、その効果をピトー管による速度分布の計測により確認した。
- (2) 境界層を吸い込むことにより、地面効果を明確に示すことができた。すなわち、風洞装置によりフラッター特性を求める場合、境界層の影響をなくすことが決定的に重要であることがわかった。
- (3) 風洞における乱れの卓越周波数はフラッターの連成振動数と異なり、フラッター速度には影響を及ぼさないことを確認した。

参考文献

- 1) 小濱, 機誌, 102-964(1999), 93-95
- 2) Y.C.Fung, An introduction to the theory of aeroelasticity, Dover publication
- 3) 菊地ら, 機講論, No.048-1(2004), 273-274
- 4) 日野 幹雄, 流体力学, 朝倉書店
- 5) By ira H.abbott and Albert E.von doenhoff, Theory of wing sections including a summary of airfoil data, Dover publication
- 6) 田中, 航空工学概論, 地人書館
- 7) 前田, U-g法を用いた地面近傍における翼のフラッター特性(平成14年度修士論文)
- 8) 緒方, 翼のフラッター速度に及ぼす地面効果に関する実験(平成15年度卒業論文)
- 9) 大川, 翼のフラッター速度に及ぼす地面効果に関する研究(平成16年度修士論文)