

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22560184

研究課題名(和文)三次元鈍頭物体の風洞壁干渉評価方法に関する研究

研究課題名(英文)A Study of Wind Tunnel Wall Interference Correction for 3 Dimensional Bluff Bodies

研究代表者

澤田 秀夫(SAWADA, HIDEO)

東北大学・流体科学研究所・研究支援者

研究者番号：30344245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁力支持天秤装置により支持干渉の影響が無い阻塞効果について調べた。細長比4の円柱模型では阻塞比0.44%の模型まで試験し、阻塞比が小さい場合(3%以下)は阻塞比と抗力係数間に線形関係があること見出した。更に、細長比2の円柱模型では阻塞比1.97%未満の試験ができなかったが、同様の傾向を見出した。また、前縁で流れが剥離する場合でも、流れが模型上に再付着する場合は、少なくとも流線型物体の阻塞効果と鈍頭物体の阻塞効果の単純和を取る必要が有る事が判った。更に、3通りの相似な大きな揚力を持つ模型を用いて、阻塞効果への揚力の影響を評価し、既存の評価法では阻塞効果を正しく求められないことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Blockage effects for bluff bodies were examined using a magnetic suspension and balance system which has no support interference. Cylinder models of fineness ratio 4 were tested of which the blockage ratio of the smallest model was 0.44%. From the obtained results, there is a linear relation between the ratio and the drag coefficient if the ratio is less than 3.14%. Although the models of less than the ratio of 1.97% were not tested in case of fineness ratio 2, the similar tendency was observed in the tested blockage ratio range as in case of the fineness ratio 4. Total blockage correction for the model is the sum of the corrections for a streamlined body and for a bluff body if the separated flow at the leading edge reattaches to the model surface. In addition, three scale models on ground with a large lift coefficient were tested. Existing blockage effect evaluation methods could not estimate corrections correctly.

研究分野：流体工学

キーワード：風洞壁干渉 阻塞効果 鈍頭物体 抵抗 磁力支持天秤装置

### 1. 研究開始当初の背景

三次元鈍頭物体の塞阻効果の存在は古くから知られているが、その影響を定量的に評価する方法は、現在のところ Maskell により提案された方法基本である<sup>1)</sup>。この方法では、実験結果による仮定が多く、この評価法の適用範囲を狭めている。しかしながら、近年、Cooper らが Maskell の手法を展開して、翼の失速後の空力性能の測定試験結果に対する壁干渉量の評価を試み、合理的な修正に成功している<sup>2)</sup>。このように、Maskell の手法には仮定が多くありながら、実用上利用できる可能性が高く、彼の仮定を実験的に証明できれば、更に剥離流れを含む風洞試験における壁干渉評価方法の一層の発展が期待でき、様々な試験結果を統一的に比較でき、鈍頭物体の空力性能、剥離流れの研究にとって、優れた環境を提供できる。Maskell の仮定の基となった実験では、平板を流れに直角にワイヤーで支持し、その後流部分の圧力と後流域の大きさを測定したものを使用しており<sup>3)</sup>、測定自体の信頼性、試験方法について多くの問題点が指摘できる。例えば、模型をワイヤーで支持している時に、後流にワイヤーの影響が無いといえるか、後流域の広さの測定が当時の方法では不確定要素が多すぎることなどである。また、鈍頭物体前縁から流れが完全に剥離する場合を基本として考えているが、多くの鈍頭物体でも球のように模型前縁以外でも流れが剥離している場合が多い。こうした場合は、レイノルズ数効果が現れ、Maskell の手法の基本仮定が崩れてしまう。しかし、彼の評価方法で求めた塞阻効果の修正量は球の場合ですらおおむね合理的であることから、本質的な点で流れの状況を正しく捉えているものと考えられる。

### 2. 研究の目的

トラック、列車等の様々な輸送手段の抵抗を正しく知るために、磁力支持天秤装置を用いて支持干渉が無く、風洞壁干渉のみが抵抗に影響する状態で三次元鈍頭物体の風洞壁干渉量を評価する方法について、既存手法の妥当性と適用限界等の知見を得ることにより、新たに有効な三次元鈍頭物体の風洞壁干渉評価手法を提案し、鈍頭物体として取り扱われているトラック、列車等の様々な輸送手段の抵抗低減、及び二酸化炭素発生量を抑える技術革新に貢献することを本研究は目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) 三次元鈍頭物体の壁干渉量評価では模型周りに大規模な剥離域が有るため、その評価では様々な方法が提案されている。しかし、流れの中に固定されている三次元鈍頭物体の抵抗測定では模型支持装置の干渉が必ず存在し、その影響を正確に評価することが不可能なため、塞阻効果の評価も困難であった。そこで、模型を空中に磁力で支持して模型に

作用する空気力により模型が運動しない様に磁気力を作用させ、その作用させた磁気力から空気力を評価する磁力支持天秤装置の利用により、支持干渉の影響を根本的に除去して正確な壁干渉量を評価し、既存の塞阻効果評価法について検証する<sup>4)</sup>。試験に用いる模型の形状は単純であるが、模型周りに形成される流れは剥離を伴う気流に平行な円柱模型とした。また、模型の細長比は4と2を基本として、円柱模型前縁で剥離した流れが模型表面に再付着しない細長比1の模型でも同様の試験を検討することにした。下図参照。



A cylindrical model magnetically suspended in the JAXA 60 cm MSBS wind tunnel.

(2) 支持干渉の無い試験と見なせるもう一つの場合として地面板上の構造物がある。この場合の塞阻効果評価では、地面板は近似的に鏡面として流れ場に作用し、模型とその鏡像を一体化したものを考え<sup>5)</sup>、その抵抗を測定すると考えるならば、近似的には支持干渉の無い場合と考えることができる。その例として、地上に設置されている太陽光発電装置の架台に作用する抵抗について調べた。この場合はトラックや鉄道と比べると、架台の抵抗測定の際に移動地面板を使用しないで済み、塞阻効果の評価が輸送機器に比べれば容



易であるという利点がある。下図参照  
A model of evaluating blockage effect in case of the lifting bluff body.

#### 4. 研究成果

(1) 細長比 4 の模型では阻塞比 0.44%以上の製作した総ての模型の抵抗値を測定し、阻塞効果の評価を行うことができた。細長比 4 の模型では流れは前縁で剥離し、円柱直径の 1.5 倍程度下流で再付着し、その後は乱流境界層を形成し、模型後縁で再び剥離して大きな後流域を形成している<sup>6),7)</sup>。下図に示す試験結果から、阻塞比が 3%以下と十分小さい場合は阻塞比と抗力係数との間には線形な関係が維持されている。この関係は、Maskell の阻塞効果評価式を微小な阻塞比で級数展開することによっても得られる妥当な結果である。但し、所謂 blockage factor と呼ばれる値は Maskell は約 2.5 としているが、本試験結果では約 5.7 となり大きく異なっている。その原因は Maskell が仮定した前縁で剥離した流れは再び模型表面に再付着しない場合と異なることが原因の一つと考えられる。

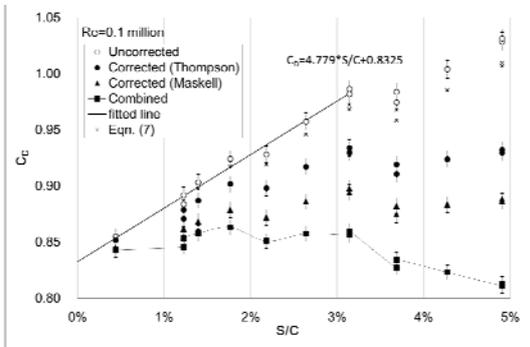


Figure 2.  $C_D$ -blockage ratio plots for 10 cylinders with fineness ratio of 4 aligned with air stream.

この結果は前縁で流れが剥離する鈍頭物体でも、その流れが模型上に再付着する場合は、少なくとも流線型物体の阻塞効果<sup>8)</sup>と鈍頭物体の阻塞効果の単純和を取る必要が有ることを示している<sup>9)</sup>。細長比 4 の模型の試験結果を更に詳細に見ると、この単純和でも未だ不十分であることも判り、今後、さらに研究を進める必要が有る。更に、阻塞比が 3.5% よりも大きな範囲では、試験点数が 3 点と少ないが、3.5%以下の阻塞比の場合と阻塞効果が異なっている傾向が伺えた。データの確認をしたが、単純な計測ミスではないという結論に達し、その原因は不明なままである。詳細に検討すると、3.5%以下の阻塞比の場合でも、誤差評価からは有意な量とは言えない量ではあるが、阻塞比 2%強の所で同様の傾向が伺えている。この事は模型ベース圧が阻塞比により複雑に変化している可能性を残すものであり、今後、更なる測定例の蓄積が必要と思われる。

(2) 細長比 2 の模型では、阻塞比 1.94%未満の試験は磁力支持制御調整が充分できずに、抗力測定がでなかった。このため、細長比 2 の場合の阻塞効果の評価は不完全な形にならざるを得ない。しかし、阻塞比 2%以上の模型の抵抗測定結果からは、細長比 4 の模型

と基本的に同様な結果を見出せ、阻塞効果は細長比 2 と 4 ではほぼ同じ傾向を示すものと考えられることが判った。下図参照。

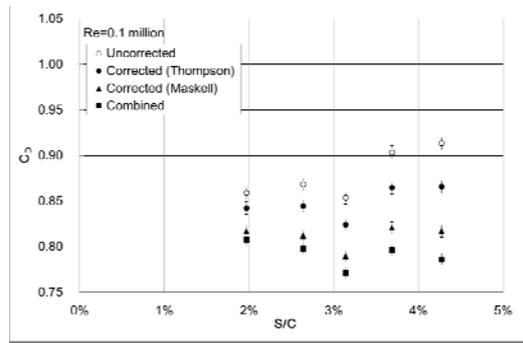


Figure 3.  $C_D$ -blockage ratio plots for 10 cylinders with fineness ratio of 2 aligned with air stream.

また、測定した抗力係数が阻塞比 3%を超える辺りで、それまでの阻塞比と抗力係数の関係とは異なった挙動を示しており、これは細長比 4 の模型の場合と同じ挙動であり、今後さらに詳細な試験をして、その原因を特定する必要が有る。

(3) 地上に有る鈍頭物体の阻塞効果評価試験では、地面板を設置してその上に模型を置いて抗力を測定する試験が実施されている。地上のビルや地表を走るトラック等では作用する揚力が零か非常に小さい。一方、地上設置型太陽光発電システムのパネル面は、風向きにより正負の大きな揚力を発生する場合が有り、その影響を含めた阻塞効果の評価を試みることは後流の影響や模型周りの剥離域の影響が阻塞効果にどの様に影響するかを考える上で貴重な試験となるものと考えた<sup>10)</sup>。3種類の相似模型を用いた阻塞効果の評価では下図に示す様に 15%程度の模型までも阻塞比に対しての抗力係数、揚力係数の変化が線形な関係にあると見なすことができるので、阻塞比零の場合の抗力係数、揚力係数を推定でき、本試験の様に阻塞比の異なる模型を用いた阻塞効果修正、揚力干渉修正法が適用可能であると考えられることが判った。

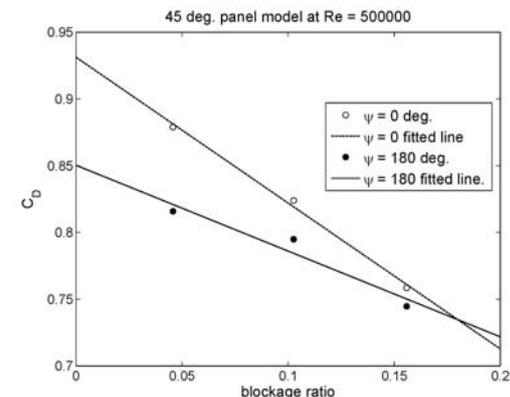
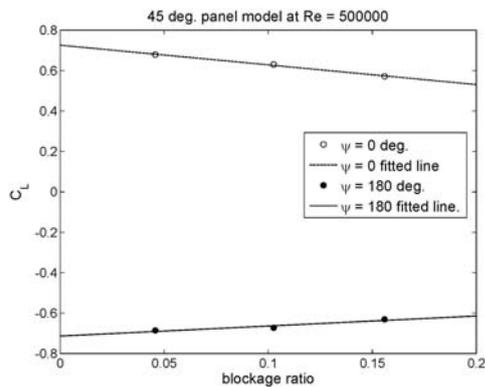


Figure 4. Relation between drag coefficient and blockage ratio in case of a lifting bluff body



Relation between lift coefficient and

blockage ratio in case of a lifting bluff body

また、既存の阻塞効果評価の手法では鏡像関係の模型自体とその鏡像を一体として捉え、その阻塞効果を評価する方法が有るが<sup>5)</sup>、この方法は揚力が有る場合に利用できるか、相似な模型による阻塞効果評価試験により調べた。下表は太陽光パネルの傾斜角が45度の場合の阻塞効果、揚力干渉効果の評価結果を示している。 $\phi$ は風向を示し、太陽光パネルに対して順風が $0^\circ$ で、逆風が $180^\circ$ に対応している<sup>11)</sup>。表中の予測値が鏡像の考え方で鈍頭物体の阻塞効果を評価して補正したもので、3つの相似模型から風洞壁干渉量进行评估して補正した表中の補正值の値とは大きく異なっているのが判る。この結果、鏡像の考えを用いた阻塞効果評価では、大きな揚力が発生している場合は適切な修正量を得ることができないことが判った。

45° 傾斜模型の阻塞効果

Re=500000	$\psi = 0 \text{ deg.}$			$\psi = 180 \text{ deg.}$		
	$C_D$	$C_L$	$C_m$	$C_D$	$C_L$	$C_m$
実験値	0.831	-0.791	0.330	0.735	0.641	0.439
補正量	0.097	-0.075	0.051	0.165	0.147	0.107
補正值	0.928	-0.866	0.381	0.900	0.789	0.546
補正率	11.7%	9.5%	15.4%	22.5%	23.0%	24.3%
予測値	0.985			0.859		

#### <引用文献>

- 1) E. C. Maskell, A Theory of the Blockage Effects on Bluff bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel, A. R. C. R&M 3400, (1965)
- 2) K. Cooper, Bluff-Body Blockage Corrections in Closed- and Open-Test-Section Wind Tunnel, AGARD-AG336, 1998, pp.6-1-33
- 3) R. Fail, J.A. Lawford, and R. C. W. Eyre, Low-Speed Experiments on the Wake Characteristics of Flat Plates normal to an Air Stream, R.A.E. RM 3120, (1957)
- 4) 澤田秀夫、風洞用磁力支持天秤装置、東北大学流体科学研究所報告、第23巻(2012)
- 5) ESDU Data Memorandum 80024, "Blockage corrections for bluff bodies in confined flows", Endorsed by the Royal Aeronautical Society, Issued November (1980) with Amendments A, (1998)

- 6) Hiroshi Higuchi, Hideo Sawada, Hiroyuki Kato, Sting-free measurements on a magnetically supported right cylinder aligned with the free stream, J.Fluid Mech., vol.596(2008), pp.49-72
- 7) 澤田秀夫、樋口 博、加藤裕之、国益徹也、磁力支持風洞における円柱の非接触計測、日本風工学会論文集、第33巻第3号、(2008)
- 8) C. R. Pankhurst, and W. D. Holder, Pitman, London, (1952), pp. 327-348
- 9) Hideo Sawada, Hiroki Sugiura, Ryo Konomi, An Experimental Study about the Blockage Effects on Circular Cylinders aligned with Uniform Flow00, ICFD2011 (2011)
- 10) 澤田秀夫、他8名、「太陽光パネル用架台の風洞試験に於ける阻塞効果評価の試み」、日本機械学会東北支部講演会、(2015)
- 11) 太陽光アレイ用支持物設計標準 (JIS C 8955:2011)、(2011)

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5件)

- ① Hideo Sawada, Shinichi Suda, Study on Aerodynamic Force Acting on a Sphere with and without Boundary Layer Trips around the Critical Reynolds Number with a Magnetic Suspension and Balance System, Experiments in Fluids, 査読有、第57巻、第668号、2010、363-371 DOI:10.1007/s00348-010-0920-2
- ② 澤田秀夫、風洞用磁力支持天秤装置、東北大学流体科学研究所報告、査読無、第23巻、2012、1-11
- ③ Hideo Sawada, Keisuke Umezawa, Tomohiro Yokozeki, Akihito Watanabe, Takenori Otsu, Wind Tunnel Test of Japanese arrows with the JAXA 60-cm Magnetic Suspension and Balance System, Experiments in Fluids, 査読有、第53巻、第2号、2012、451-466 DOI:10.1007/s00348-012-1300-x
- ④ 大林茂、澤田秀夫、小西康郁、磁力支持天秤を活かしたフライト計測融合低乱熱伝達風洞設備、日本航空宇宙学会誌 査読有、62巻6号、2014、214-221 <http://ci.nii.ac.jp/naid/110009818550>
- ⑤ 澤田秀夫、磁力支持天秤装置付風洞、日本流体力学会誌 「ながれ」、査読有、第33巻、第3号、2014、267-272 [http://www.nagare.or.jp/download/noa\\_uth.html?d=33-3tokushu5.pdf&dir=90](http://www.nagare.or.jp/download/noa_uth.html?d=33-3tokushu5.pdf&dir=90)

[学会発表] (計 2件)

- ① Hideo Sawada, Hiroki Sugiura, Ryo Konomi, An Experimental Study about

the Blockage Effects on Circular  
Cylinders aligned with Uniform Flow、  
ICFD2011、Sendai-shi、Japan、2011、  
Nov. 11

- ② 澤田秀夫、他 8 名、「太陽光パネル用架台  
の風洞試験に於ける阻塞効果評価の試  
み」、日本機械学会東北支部講演会、宮城  
県仙台市、2015、Mar. 13

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.ifs.tohoku.ac.jp/windtunnel/  
index.html](http://www.ifs.tohoku.ac.jp/windtunnel/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澤田 秀夫 (SAWADA, Hideo)

東北大学・流体科学研究所・研究支援者

研究者番号：30344245