

ハイパーループポッドの空力特性に関する研究

課題責任者

西村 秀和 慶応義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科

著者

狼 嘉彰^{*1}, 熊谷 直武^{*1}, 大橋 開^{*2}, 勝目 拓海^{*2}, 白鳥 英^{*3}, 安岡 育子^{*3}, 河西 聖^{*4},
三笠 雅捷^{*3}, 矢島 卓^{*5}, 加藤 裕之^{*5}, 廣谷 智成^{*5}, 浅野 俊幸^{*6}, 廣川 雄一^{*6}, 西川 憲明^{*6}

*1 慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科附属研究所

*2 慶應義塾大学大学院 システムデザイン・マネジメント研究科

*3 東京都市大学 工学部 機械システム工学科

*4 東京都市大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻

*5 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 空力技術研究ユニット

*6 国立研究開発法人海洋研究開発機構

利用施設： 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 6.5m×5.5m 低速風洞
国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 29 年 11 月 1 日～平成 30 年 3 月 12 日

アブストラクト

減圧したチューブ内を高速移動する新しい交通手段：Hyper Loop が構想されており，その移動体(POD)に関する要素技術がコンペ形式で募られている．2018年7月にはSpaceX社が主催する第3回コンペが予定されており，日本からは筆者らのチームが唯一選出されている．現段階では最高到達速度の向上に重きが置かれており，これを左右する性能として空力抵抗の低減が重要な設計課題となっている．本プロジェクトではプロトタイプのPODに掛かる空力特性を把握し，これを低減させるようなボディ形状の改善に反映することを目的として風洞実験と数値流体解析を行った．抵抗係数 C_D および横力係数 C_S については風洞実験と数値計算とで良く一致する結果が得られた．抵抗係数の値は検討範囲内で $C_D < 0.15$ 程度であり，迎角とヨー角に対する感度も小さいことが分かり，全体として概ね良好な空力特性が達成されていることが確認できた．揚力については小さいながらも正の値になっており，安定走行を考えるとダウンフォースになるように形状を微調整する余地があることが分かった．

キーワード： 風洞実験，数値流体力学，Hyper Loop，空力抵抗低減

1 背景および目的

交通手段の高速化は人類にとって半永久的な要求と言っても良いかもしれない．サンフランシスコとロサンゼルスで35分，東京-大阪間に換算すると45分での移動を実現しようという新交通手段構想がある．SpaceX社およびTesla社のCEOとして知られるElon Muskによって提案された

Hyper Loop プロジェクトである。Hyper Loop は減圧したチューブの中を POD と呼ばれる移動体を高速走行させるものであり、この概念自体は 1972 年から存在しているが¹⁾、2013 年頃からの Elon Musk の具体的な取り組みによって、実現可能性が見え始めている。チューブの建設に関しては技術面以外の課題も多いが、移動体である POD に関わる要素技術についてはコンペ形式で世界中からアイデアが募られている。慶應義塾大学では、POD に関する技術を競う Hyperloop Pod Competition²⁾への出場・優勝を目指して、学生を中心とした Team Keio Alpha を結成して要素技術の研究開発に取り組んでおり、2017 年秋からは東京都市大学のメンバーも参加している。本稿執筆のちょうど先般、2018 年 7 月に開催予定の第 3 回コンペに出場する 20 チームが発表されたが、日本からは唯一、著者らの Team Keio Alpha が選出されている。

Hyper Loop は交通手段であるため、自動車や新幹線等の場合と同様に、POD の設計においては駆動系やバッテリーなどの主要コンポーネントの配置、さらに乗員快適性などの優先度が高く、ボディ形状については制約条件が多い。Team Keio Alpha では回転磁石を用いて POD を浮上・駆動させる方式を採っており、最高到達速度を競うためには、POD 下部に径の大きな回転磁石をなるべく多く配置したい。チューブ内は減圧されるため、空力抵抗は常圧下に比較して小さくなるが、極度の減圧下では放電が懸念されるため、減圧度としては 10^{-1} atm オーダーを想定しており、この減圧度では依然として空力抵抗が POD の走行性能に及ぼす影響が大きい。一方で、チューブ内のガイドレールの施工精度などに起因して、POD の姿勢が予期せずに変化し、流れに対して迎角や偏角を生じる場面が想定される。これらの背景を鑑みて、本プロジェクトでは、暫定的な POD のボディ形状についての空力特性を把握し、必要に応じて形状を修正するために、その方針を得ることを目的として、風洞実験と数値流体力学(Computational Fluid Dynamics: CFD)の両面からボディに掛かる空力特性の把握を行った。

2 風洞実験

2.1 供試体

図 1 に本研究で用いた POD ボディの形状と座標系の定義を示す。ボディ形状は、前縁側は曲率を小さく丸みを持たせた形状にしているが、下面については回転磁石の配置、側面と後面については内部空間を確保するために直線的な形状で構成している。座標系は図のように主流方向に x 、高さ方向に z を取る。 $z = 0$ はボディの下面に取り、 x, y の原点は風洞実験での天秤の中心軸と一

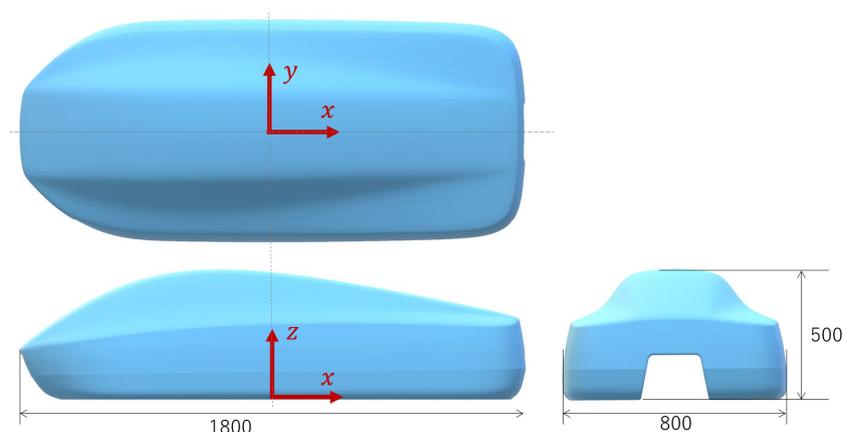


図 1 供試体と座標系定義

致させている。空力特性を無次元化する際の代表面積として前面投影面積 $S = 0.3503 \text{ [m}^2\text{]}$ ，代表長さにはその平方根 \sqrt{S} を用いて抗力 F_D ，横力 F_S ，揚力 F_L ，レイノルズ数 Re を以下のように書くことにする。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S,$$

$$F_S = \frac{1}{2} C_S \rho U^2 S,$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 S,$$

$$Re = \frac{U\sqrt{S}}{\nu}$$

ここで U は主流速度， ρ は密度， ν は動粘性係数， C_D, C_S, C_L はそれぞれ抗力係数，横力係数，および揚力係数である。

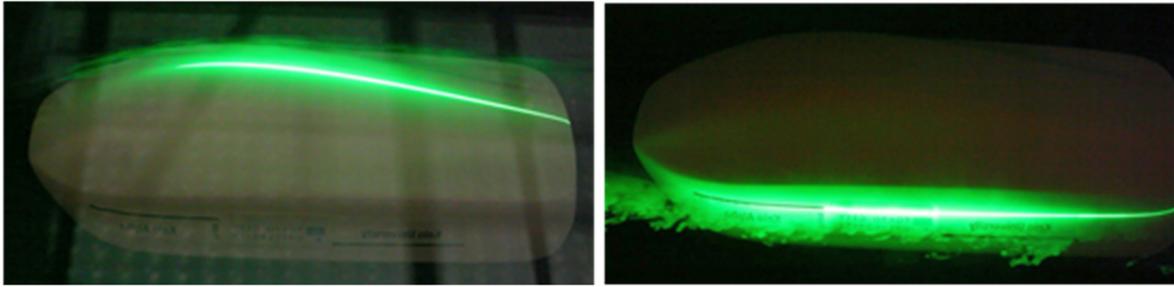
2.2 実験方法

実験での空力特性測定は，宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センターの $6.5\text{m} \times 5.5\text{m}$ 低速風洞にて行った。速度は $2 \sim 45\text{m/s}$ までの範囲で複数条件設定し，レイノルズ数の範囲としては $7.3 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^6$ であった。大気圧下で速度 45m/s の条件は， 0.3 気圧まで減圧した場合にレイノルズ数が等しくなる速度として 150m/s (時速 540km/h) に相当する。力の測定には 4 分力天秤を用いて x 方向と y 方向の力，および x 軸周りと z 軸周りのモーメントを測定した。乱流領域であるため本質的に非定常な現象であるが，サンプリングレート 500Hz での測定を 1 秒間行って時間平均を算出し，これを 1 水準あたり 3 回測定した。天秤自体は風洞のテストセクションの床面下に配置されているが，供試体は支柱などの治具を介して天秤に取付られており，これらの治具はテストセクションに露出するため，これに掛かる空力も天秤で計測されてしまう。この影響を最小限に留めるために，供試体下部の治具を覆うような風防を設置して測定を行った。ヨー角 β については風洞実験装置に設けられているターンテーブルを使用して通風中に可変となっており， ± 1 度の範囲は 0.1 度ずつ変えながら測定を行った。迎角 α については天秤への取付治具に別途傾斜を設けたアダプターを装着して実現した。迎角の変更には，一旦通風を停止して供試体の取り外しを伴うため，迎角 α の水準は 0 度， ± 1 度と ± 2 度の 5 水準と少なめに設定した。傾斜アダプター部分は，前述した風防で覆われておらず，アダプターに掛かる空力も天秤で計測されてしまう。したがって，迎角が $\alpha \neq 0$ の条件では $\alpha = 0$ の場合に比べて抗力の絶対値が大きく測定されることになる。この点はアダプターに掛かる抗力を推算して補正を施した。

また，この実験では天秤(4 分力)の仕様と供試体の向きの都合上，揚力は直接測定していない。揚力特性については，実験と数値解析との比較検証を行った上で，数値解析の結果から議論する。また，力の測定とは別に，オイルミストとシート状のレーザー光を用いて流れの可視化も行った。

2.3 実験結果

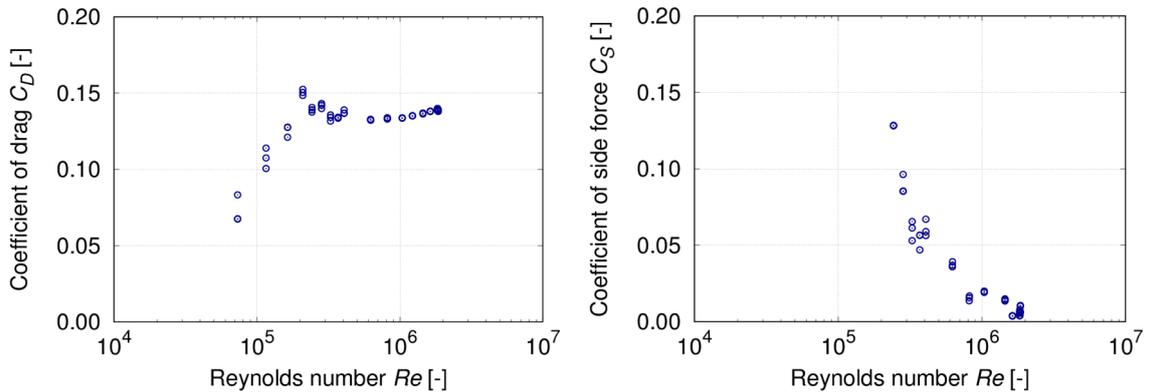
まず，実験結果について概観する。図 2 はオイルミストとシート状レーザーにより風速 5m/s の場合の流れ場を可視化した様子である。図だけでは判断しにくい部分もあるが， $x - z$ 断面(a)，



(a) $x - z$ 断面

(b) $x - y$ 断面

図2 オイルミストとレーザーによる流れの可視化の様子



(a) C_D 値の Reynolds 数依存性

(b) C_S 値の Reynolds 数依存性

図3 抵抗係数(a)および横力係数(b)の Reynolds 数依存性 (風洞実験)

$x - y$ 断面(b)のいずれにおいても、シート光で可視化している前縁から上面・側面の範囲ではボディ付近での逆流は確認されず、最後方まで剥離せずに流れていることが確認できた。ボディ後面付近では、後述する CFD の結果からも、剥離領域が形成されていると推察される。

次に、抗力係数と横力係数について概観する。図3はレイノルズ数を変えた場合の抗力係数 C_D (a)と横力係数 C_S (b)を示したものであり、迎角・ヨー角ともにゼロの場合である。レイノルズ数が比較的小さい範囲では、 C_D 値の単調増加と C_S 値の単調減少が確認できる。 C_D 値が増加しているのは、レイノルズ数の増加に伴って乱流遷移し、摩擦抵抗が増大したことに依るものと理解される。レイノルズ数が 5×10^5 程度になってくると C_D 値の変化はほとんど見られなくなっている。ボディ形状は左右対称に設計しているため、理想的には C_S 値はゼロになると考えられるが、天秤への取付精度と角度のアライメント精度によって低レイノルズ数側である程度大きな値が測定されたものと理解される。

図4はヨー角 β を変えた場合の抗力係数 C_D および横力係数 C_S の変化を迎角 α ごとに示したものであり、レイノルズ数 $Re = 1.9 \times 10^6$ の条件のみプロットしている。前述したように、迎角を付ける場合には別途アダプターを取り付けており、 $\alpha \neq 0$ のデータについてはアダプターに掛かる空力の分を推定して補正を施している。それでも尚 $\alpha \neq 0$ の場合と $\alpha = 0$ の場合とでヨー角依存性のカーブが定性的に異なることに気付く。 $\alpha \neq 0$ の場合にはアダプターの分だけ高さが上がって供試体が風防から離れているのに対し、 $\alpha = 0$ の場合には風防と供試体との間隔が狭いため、風防による

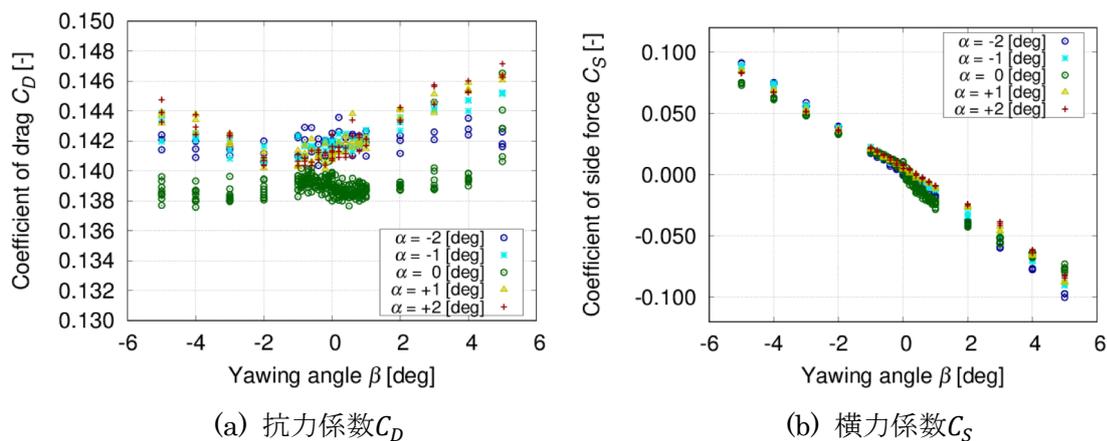


図4 ヨー角に対する C_D, C_S の変化 (風洞実験). $Re = 1.9 \times 10^6$

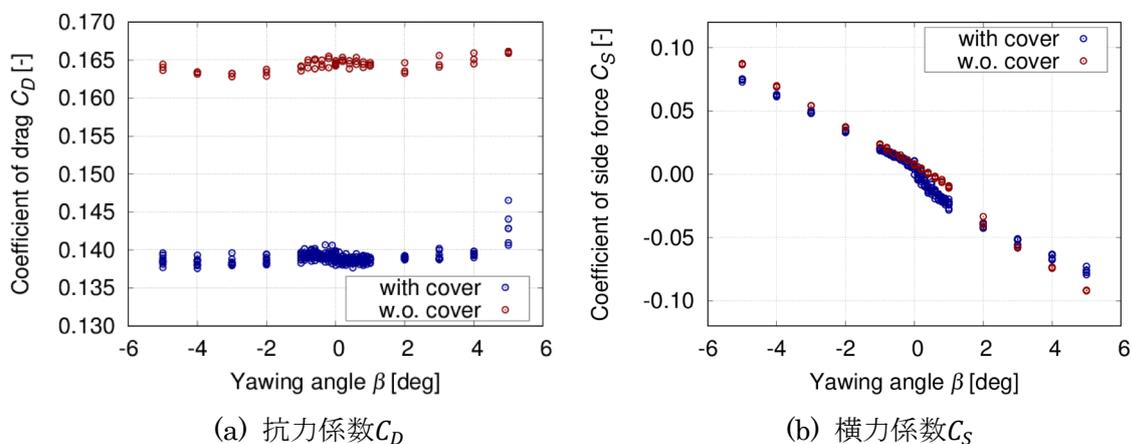


図5 風防の有無による C_D, C_S のヨー角依存性の比較 (風洞実験). $Re = 1.9 \times 10^6$

局所的な流れの影響が供試体に及んでいる可能性がある。そこで、 $\alpha = 0$ の場合に風防の一部を取り外した測定を行い、風防の影響を切り分けることを試みた。図5は風防の有無による抗力係数と横力係数の違いをヨー角依存性としてプロットしたものである。抗力については風防が無い場合は支柱に掛かる空力が計測されるため C_D の絶対値は大きくなっているが、風防が無い場合のヨー角依存性には $\alpha \neq 0$ の場合と同様の下凸の傾向が確認できる。図5(b)の横力係数については風防の有無による差異がより明確に表れている。風防を付けた場合に $\beta = 0$ 付近に見られるS字状のヨー角依存性は、風防がない場合には消滅していることから、風防による流れ場の違いが有意に影響していることが分かる。この点を踏まえた上で、図4に目を戻してみると、抗力係数については全体的に $\beta = -1$ 度付近に極小値が見られる。ボディ形状はx軸に対して対称に設計しており、製作もNC加工で行っているが、供試体の取り外しを伴う迎角変更を経ても $\beta = -1$ 度付近に極小値が現れることから、ボディ自体が有する非対称性が表れていると理解される。いずれにしても、 β を $\pm 5^\circ$ 度の範囲で変えた場合の抗力係数の変動幅は0.06程度であり、総じてヨー角依存性は小さいと言える。横力係数のヨー角依存性については、 $\alpha = 0$ の場合を除いてほぼ直線的になっており、この範囲のヨー角変動に対しては、流れ場の構造が大きく変わっているようなことはなさそうである。

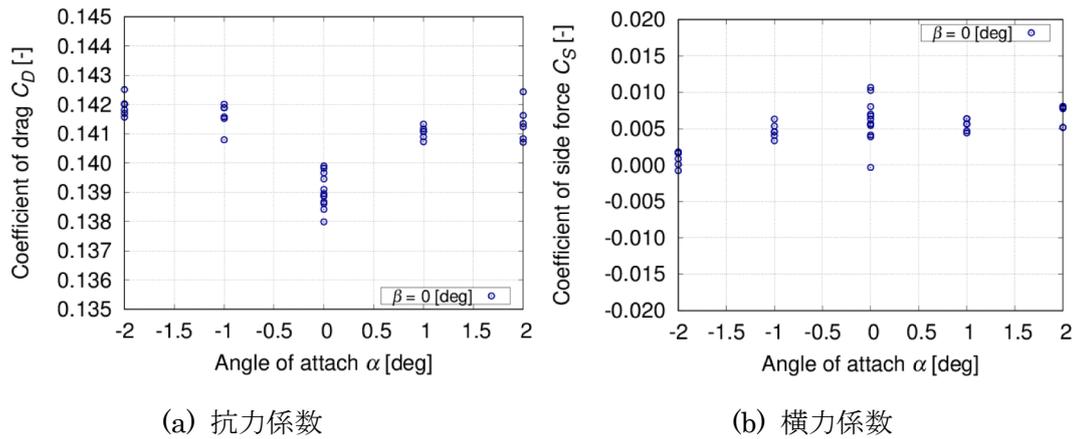


図6 迎角に対する抗力係数と揚力係数の変化 (風洞実験). $Re = 1.9 \times 10^6$

次に、迎角依存性を概観する。図6は $\beta = 0$ の場合の抗力・横力係数を迎角 α に対してプロットしたものである。抗力係数については $\alpha = 0$ で極小となり、 α の正負に対してほぼ対称形の特徴が見て取れる。図6(b)に示した横力係数については、一見複雑な迎角依存性を示しているように見えるが、縦軸の範囲が極めて小さく、天秤の計測値のダイナミックレンジを考えると有意な依存性は認められない。 α を $\pm 2^\circ$ の範囲で変えた場合の抗力係数・横力係数の変動幅はいずれも極めて小さいと結論できる。

3 数値流体解析

3.1 計算方法

CFDによる空力特性の計算には大規模共有メモリシステム UV2000 を利用し、ソルバーには OpenFOAM の商用版である Helyx Core を用いた。流体は非圧縮性として、RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)の $k-\omega$ SST モデルで乱流の影響を考慮して定常状態の計算を行った。メッシュについては、ボディの CAD データを基に snappyHexMesh で生成した。図7は代表的な条件でのメッシュ

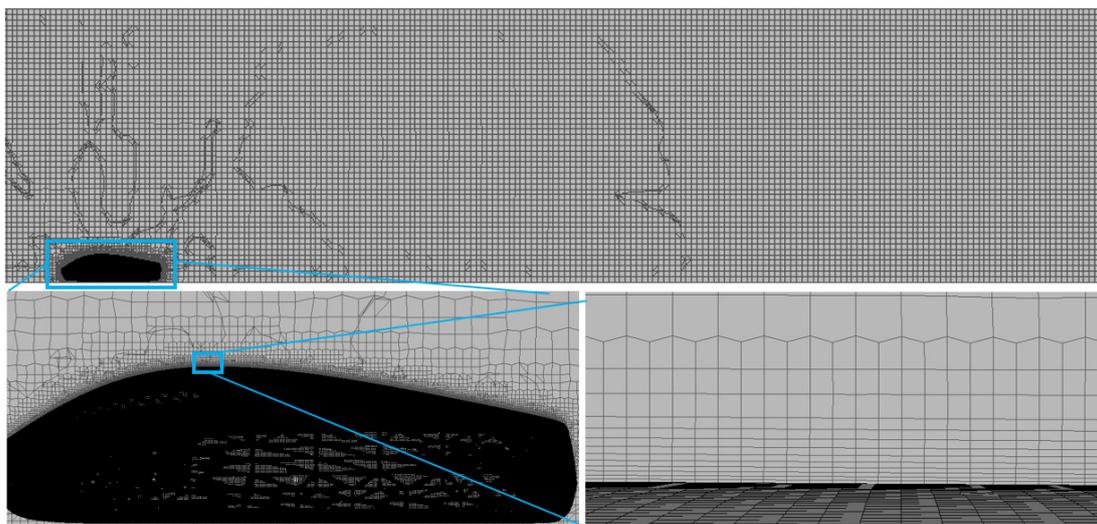


図7 CFDでの代表的なメッシュ形状

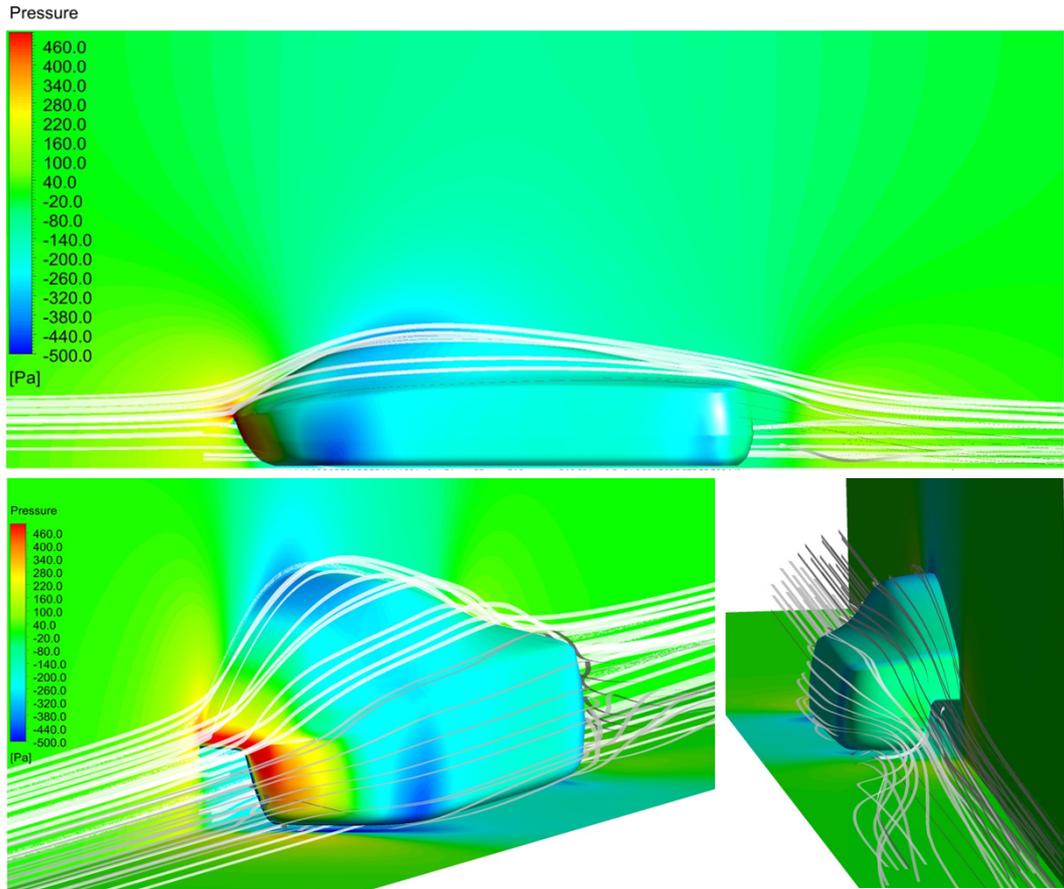


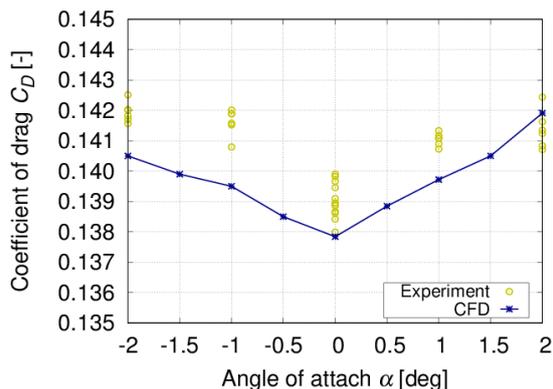
図8 CFD 結果の圧力分布（コンター）および流線. $\alpha = 0, \beta = 0, Re = 1.9 \times 10^6$

シュの様子であり、ボディ付近で格子密度が高くなるように配置し、ボディ表面付近の境界層部分にレイヤー状のメッシュを配置した。迎角 α とヨー角 β を変えた条件毎にメッシュを生成したため、メッシュ総数には多少変動があるが、平均してセル数で2000万程度とした。並列数については事前にスケーラビリティを確認し、80コア並列で実行した。

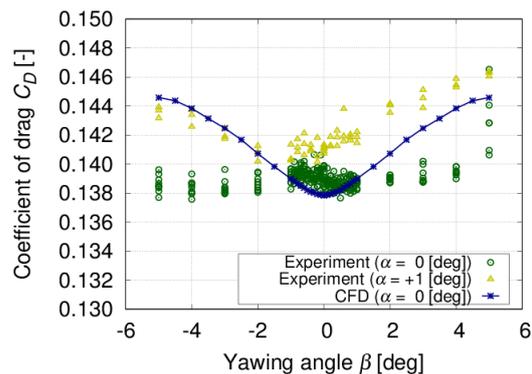
3.2 計算結果

図8に $\alpha = 0, \beta = 0$ の場合の圧力分布と流線を示す。圧力分布を見ると、ボディの前縁部分で高圧域が見られ、ここがよどみ点になっている。ボディ上面に沿って下流に向かうに従って圧力低下が見られる。流線を見てみると、最下流のボディ後面付近で剥離領域が形成されているが、ボディの上面や側面では剥離せずに表面に沿って流れていることが分かる。この点は実験でのオイルミストによる可視化結果と定性的に一致する。

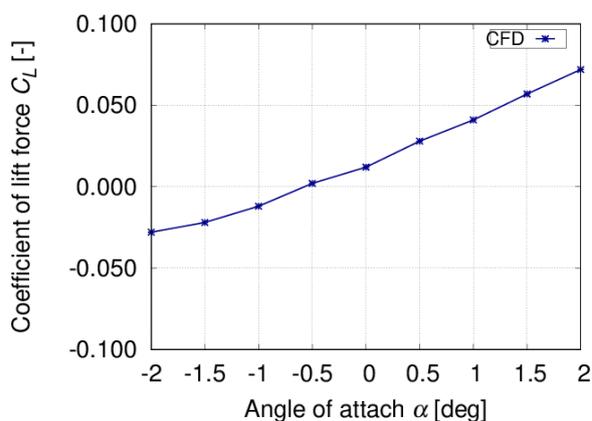
図9(a,b)には、 α および β を変えた場合の抗力係数を実験値と共にプロットした。迎角依存性については実験値との相対誤差が2%以内に収まっており良く一致していると言える。ヨー角依存性については $\alpha = 0$ の場合の実験値が前述のように風防の影響を受けていると考えられるため、単純な比較が難しいが、風防の影響が小さい $\alpha = 1$ 度の場合の実験値とCFDとの結果が極めて類似していることから、ヨー角依存性についても実際の流れ場の特徴をCFDで良く再現できていると考えられる。揚力係数については実験では天秤の仕様上測定していないが、CFDでは当然算出可能



(a) 抗力係数の迎角依存性



(b) 抗力係数のヨー角依存性



(c) 揚力係数の迎角依存性

図9 迎角とヨー角を変えた場合の空力特性 (CFD 結果)

である。図 9(c)は迎角 α に対する揚力係数 C_L の変化をプロットしたものであり、この範囲においては迎角に対して揚力係数が単調増加する傾向が確認できる。注目されたいのは $\alpha = 0$ における C_L がわずかに正値になっていることである。PODは磁気浮上させる構成なので、正の揚力によって浮上をサポートする効果が見込めるが、過度な揚力は不必要である。ボディ形状を変えずに静止状態から速度 100km/h まで加減速させることを考えると、正の揚力はむしろ走行安定性の観点では望ましくない。したがって、少なくとも $\alpha = 0$ 付近のニュートラルな姿勢においてダウンフォースが得られるようにボディ形状を微調整する余地があると言える。

4 まとめ

新交通手段構想 Hyper Loop の移動体である POD について、コンペ形式で要素技術の研究開発が競われており、現段階では最高到達速度の向上に重きが置かれている。筆者らのチームでは、回転磁石を用いて浮上・駆動する方式を採り、これに付随した制約条件の中でボディに掛かる空力抵抗を低減することを目指している。本プロジェクトでは、プロトタイプのボディ形状を作成し、6.5m×5.5m 低速風洞を用いた実験と、UV2000 を用いた CFD 解析の両面からボディに掛かる空力特性を把握し、空力抵抗低減のための形状改良指針を獲得した。2018 年 7 月には SpaceX 社による POD 要素技術のコンペが予定されており、筆者らのチームが日本から唯一選出されている。コンペでは最高到達速度が競われるが、本プロジェクトで得られた知見に基づいて駆動系の

性能向上と空力抵抗の低減が両立され、最高速度の記録を更新することが期待され、ひいては本プロジェクトの成果が新交通手段 Hyper Loop の実現を通じて広く社会・経済へ波及することが期待される。

謝辞

風洞実験用の供試体の設計・製作にあたっては、株式会社日南 猿渡氏に、また実験用治具の設計製作にあたっては小野電機株式会社 森田氏ならびに石丸氏に多大なるご協力を賜りました。また、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の 6.5m×5.5m 低速風洞運転・計測においては、株式会社 I H I エアロスペース・エンジニアリング技術部 JAXA グループの藤野氏、伊藤氏、堀ノ内氏、山口氏、西村氏にも多大なる協力を賜りました。記して深謝致します。

参考文献

- 1) Robert M. Salter; "The very high speed transit system," RAND CORP SANTA MONICA CA. (1972).
- 2) SpaceX 社 Hyper Loop WEB サイト <http://www.spacex.com/hyperloop>

Aerodynamics on POD: Vehicle of Hyper Loop

Project Representative

Hidekazu Nishimura Graduate School of System Design and Management, Keio University

Authors

Yoshiaki Ohkami^{*1}, Naotake Kumagai^{*1}, Kai Ohashi^{*2}, Takumi Katsume^{*2}, Suguru Shiratori^{*3}, Ikuko Yasuoka^{*3}, Akira Kasai^{*4}, Masatoshi Mikasa^{*3}, Takashi Yajima^{*5}, Hiroyuki Kato^{*5}, Tomonari Hirotsu^{*5}, Toshiyuki Asano^{*6}, Yuichi Hirokawa^{*6}, Noriaki Nishikawa^{*6}

*1 Research Institute in Graduate School of System Design and Management, Keio University

*2 Graduate School of System Design and Management, Keio University

*3 Dept. Mechanical Systems Engineering, Tokyo City University

*4 Mechanical Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo City University

*5 Japan Aerospace Exploration Agency

*6 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Abstract

This project investigated an aerodynamics on a vehicle in a new transportation system: Hyperloop. Elon Musk's version of the Hyperloop concept incorporates reduced-pressure tubes in which a pod may travel with free of mechanical friction. Authors' group is designing and building a prototype pod, and they were selected as one of participants in the 3rd pod competition which will be held in July 2018. Because a level of pressure-reduction is planned to be 1/3 of atmosphere in authors' pod design, aerodynamics and design of the body cover play a significant role in the pod performance. This project is aimed to obtain a direction of improvement in the prototype body design. We investigated the aerodynamic drag on the prototype shape of the pod, by means of wind tunnel test and the Computational Fluid Dynamics executed on the Earth Simulator. The obtained values of the coefficient of drag C_D showed good agreements between the experiments and the calculations. C_D was ranged at most 0.15 and its dependence is not strong both on the attack of angle and yawing angle. The coefficient of the lift force is found to be a small positive value when the body is directed parallel to the flow. From a stand point of the running stability, the shape of the body is remained to be improved so that a down-force acts on the body. The results obtained from this project is expected to contribute to the improvement of the pod performance, consequently the realization of the Hyperloop.

Keywords: Hyper Loop, Wind tunnel test, Computational Fluid Dynamics, Aerodynamics drag reduction

この報告書に掲載の記事・写真等の二次使用を禁じます。
著作権は、国立研究開発法人海洋研究開発機構及び報告書作成者にあります。
これらの情報は、「私的使用」又は「引用」など著作権法上認められた場合を除き、国立研究開発法人海洋研究開発機構に無断で転載、複製、放送、公衆送信、翻訳、販売、貸与などの利用をすることはできません。国立研究開発法人海洋研究開発機構以外の著作権者がいる場合は著作権者の許諾も必要です。