

はじめに

自動車の空力デザインがまたしても世界的に注目されています。地球環境保全という切実な社会要求のもとに、CO₂を削減するには小排気量エンジンあるいはゼロエミッションの電気動力や水素エンジンの搭載と同時に、軽量で空力特性の優れた車体が必要だからです。

自動車が他の工業製品と明確に異なる魅力の一つは、人が自ら操って自宅から目的地まで、ときには高速で快適に移動する機能を備えていることにあります。走る彫刻といわれるスーパーカーの究極の姿は、まさに美学と空力学の絶妙な融合を示しているといえましょう。空力デザインは、レーシングカーやスーパースポーツカーなど、高速走行が可能な車ほどその威力を発揮します。そして空気抵抗の小さい車は燃料の消費が少ないことも事実です。空気に逆らわない車体のデザインは省資源と環境保全の視点からも社会が求める新たな価値基準になりつつあるのです。

自動車1台あたりがもたらす燃費改善は微々たるものですが、地球全体の車の総数というマクロな視点で考えれば、空力デザインは省資源・地球温暖化対策に少なからず寄与できます。自動車という便利な交通手段はまだ人類全体の8%しか普及していませんが、この10年間で爆発的に保有台数が増大しました。これまで国民人口当たりの自動車所有比率が比較的少なかった中国やロシア、インド、アジア、アフリカの人々が自動車の恩恵を求めるのは当然のことであり、その勢いはもはや誰にも止められません。だからこそ空力デザインがいま重視されているのです。

本書は主として乗用車の空力デザインを扱い、最先端ともいうべきレースカーの空力特性にも触れましたが、商用車、大型トラック／バス、二輪車については別の機会に譲ります。

デザイナー諸兄姉そしてカーデザイナーを志す学生の皆さんは、ぜひ本書から空力デザインの基礎を吸収し、役立ててください。デザイナー自身が空力学的知識を備え、空力特性と車両のデザイン性を高い次元で融合できれば、効率の良い風洞試験や設計変更で自動車の燃費・環境性能、操縦安定性・最高速度などを向上できます。本書がその一助になればと願っています。一般読者の皆さんは「空力特性がもたらす形態の理由」を通して、工学的に裏付けされたプロダクトの美を楽しんでいただければ幸いです。

東 大輔

Preface

The aerodynamic design of cars is once again receiving attention around the world. The reason is that, with the urgent demand of society to preserve the Earth's environment, reducing CO₂ emissions requires not only engines with smaller displacements or zero-emission electric drives or hydrogen engines, but also lightweight bodies with outstanding aerodynamic performance.

One element that makes automobiles distinctly more appealing than other industrial products is that their users themselves operate their car to carry them in comfort from their home to their destination, sometimes at high speeds. We could say that the ultimate form of supercars – often called moving sculptures – is a perfect blend of aesthetics and aerodynamics. The faster a car is meant to travel, the greater the effects of aerodynamic design; thus its importance for racing cars and Super Sport cars. It is also true that cars with lower drag consume less fuel. Cars with designs that resist air less are becoming an important new standard of value for society, from the perspective of saving resources and preserving the environment.

The improvements in fuel efficiency achieved through an aerodynamic design may seem insignificant in terms of single vehicles, but considering the total number of vehicles in the world, aerodynamic designs can contribute much to saving resources and reducing global warming. While automobiles, that convenient means of transportation, are only owned by 8% of the world's population, the total number of vehicles owned worldwide has grown explosively over the past 10 years. It is natural that the people of China, Russia, India, Asia and Africa, areas where per capita automobile ownership has been relatively low, would want to reap the benefits cars provide, and there is no stopping the growth of car ownership in these regions. It is for this very reason that so much store is being placed on aerodynamic designs today.

This books deals mainly with the aerodynamic design of passenger cars, and while some attention is also given to the aerodynamic performance of race cars – the cutting edge of aerodynamics for vehicles - we will leave a study of aerodynamics in commercial vehicles, large trucks, buses and motorcycles for a different occasion.

To my fellow designers and to students who are aspiring to become car designers, I hope you will put to good use the basics of aerodynamic design you absorb from this book. Designers themselves gaining knowledge of aerodynamics and able to fuse aerodynamic performance with body design at a high level will lead to improvements to fuel efficiency, environment performance, steering stability and top speeds through more efficient wind tunnel testing and changes in body engineering. I hope my book can contribute in some way to this. I would be very happy if general readers could learn to appreciate the beauty of products corroborated by engineering as they come to understand how the pursuit of aerodynamic performance results in a product's forms.

Dr. Daisuke AZUMA

はじめに	2	第2章 乗用車の空力デザイン開発プロセス	28
Preface	3	Chapter 2: The Process of Developing the Aerodynamics of a Car's Design	29
		2.1 パッケージ・レイアウト	30
		Package layout	31
序章 流体の不思議	8	2.2 スケッチとモデリング	32
Chapter 0: The Wonder of Fluids	9	Sketches and modeling	33
0.1 流体力学とは	10	2.3 モデルによる空力性能開発	34
Fluid dynamics	11	Developing aerodynamic performance with models	35
0.2 私たちの身の回りの流体现象	12		
Fluid phenomenon around us	13		
0.3 流体力学の研究はこんなところにも	14	第3章 風洞	36
Research on fluid dynamics is done in surprising places	15	Chapter 3: Wind Tunnels	37
		3.1 風洞の基本構造と種類	38
第1章 自動車の空力デザインとは	16	Basic structure and types of wind tunnels	39
Chapter 1: What Designing the Aerodynamics of Cars Involves	17	3.2 6つの空気を計測する	40
1.1 車両に影響する空気力と空力係数	18	Measuring the six air forces influencing a car	41
The influence of air forces and on car bodies and aerodynamic coefficients	19	3.3 空気抵抗係数の算出方法	42
1.2 空気抵抗	20	Methods for calculating the aerodynamic drag coefficient	43
Aerodynamic drag	21	3.4 実走行と風洞実験の違い	44
1.3 実在する乗用車の空気抵抗係数	22	Differences between actual running conditions and wind tunnel tests	45
The drag coefficient of real cars	23	3.5 境界層制御装置	46
1.4 揚力の影響	24	Boundary layer control systems	47
The influence of lift	25	3.6 風洞で可能な試験	48
1.5 車両の実用性と空力デザイン	26	Various types of wind tunnel tests	49
A Vehicle's utility and aerodynamic design	27	3.7 流れの可視化	50
		Flow visualization	51

第4章 数値流体力学 (CFD)	52	5.7 ファストバックのルーフ後端	76
Chapter 4: Computational Fluid Dynamics (CFD)	53	The rear edge of a fastback's roof	77
4.1 CFD のメリット	54	5.8 ノッチバックのルーフ後端部	78
Merits of CFD	55	The rear edge of a notchback's roof	79
4.2 CFD のシステム構成	56	5.9 ボディ後部側面の絞り込み	80
CFD system configuration	57	Refining the sides of the body's rear	81
4.3 CFD 結果の解釈	58	5.10 コーダトロンカ (カム・テール) 処理	82
Interpretation of the CFD results	59	Coda tronca (Kamm tail) treatment	83
4.4 CFD を応用したデザイン開発	60		
Design development by CFD	61		
		第6章 車体床下の最適化と冷却風	84
		Chapter 6: Optimization of the Underbody and Cooling	85
第5章 車体上部の空力デザイン	62	6.1 車体下面の空力対策	86
Chapter 5: The Aerodynamics of the Upper Body	63	Aerodynamic measures on the underbody	87
5.1 フロントエンドの側面形状と上端部形状	64	6.2 アンダーカヴァーの実例	88
Shape of the front end's sides and upper edge	65	Actual examples of under covers	89
5.2 フロントエンド下端部の形状	66	6.3 ダウンフォースの獲得例	90
Shape of bottom of the front - end	67	Examples of how downforce is generated	91
5.3 フロントエンド上端部からルーフへ	68	6.4 エンジンの冷却と空力特性	92
From the upper edge of the front - end to the roof	69	Engine cooling and aerodynamic performance	93
5.4 フロント・コーナー周辺部の形状	70	6.5 オイルクーラーその他の冷却システム	94
Shape of the front corner area	71	Oil cooler and other cooling systems	95
5.5 キャビン周りの形状	72		
Shape of the cabin area	73		
5.6 スクエアバックのルーフ後端	74		
The rear edge of a squareback's roof	75		

第7章 レース車両の空力デザイン 96

Chapter 7: Aerodynamic Measures on Race Cars 97

7.1 F1 ボディの前部 98

The front area of an F1 body 99

7.2 F1 ボディの後部 100

The rear of an F1 body 101

7.3 ルマン・レースカー 102

Le Mans race cars 103

7.4 WEC レースカー (トヨタ TS 030 の場合) 104

WEC race cars- the case of the Toyota TS 030 105

7.5 ツーリングカー 106

Touring cars 107

第8章 優れた空力デザインの実例 108

Chapter 8: Examples of Outstanding Aerodynamic Designs 109

8.1 ノッチバックの例 110

Examples of notchbacks 111

8.2 ハッチバックの例 112

Examples of hatchbacks 113

8.3 スーパーカーの例 (その1) 114

Examples of supercars (part 1) 115

8.4 スーパーカーの例 (その2) 116

Examples of supercars (part 2) 117

第9章 自動車空力デザインの歴史 118

Chapter 9: The History of Aerodynamic Car Designs 119

9.1 自動車誕生 ~ スピードに憧れた時代 120

The birth of the car: the enthrallment with speed 121

9.2 自動車空気学のパイオニアたち (その1) 122

Pioneers in automobile aerodynamics (part 1) 123

9.3 自動車空気学のパイオニアたち (その2) 124

Pioneers in automobile aerodynamics (part 2) 125

9.4 自動車空力デザインの系統的な研究 126

Systematic study of aerodynamic designs 127

9.5 流線型と第二次世界大戦後のアメリカ 128

The streamline and Post World War II US 129

9.6 第二次世界大戦後のヨーロッパ 130

Post World War II Europe 131

9.7 石油危機以降の車体デザイン (その1) 132

Body design after the oil crisis (part 1) 133

9.8 石油危機以降の車体デザイン (その2) 134

Body design after the oil crisis (part 2) 135

9.9 石油危機以降の車体デザイン (その3) 136

Body design after the oil crisis (part 3) 137

第10章 世界の主な自動車風洞 138

Chapter 10: Major Automotive Wind Tunnels in the World 139

10.1 最近建設された新型風洞 138

Recently built new generation wind tunnels 139

10.2 日本の自動車風洞 140

Automotive wind tunnels in Japan 141

10.3 ヨーロッパの自動車風洞 142

Automotive wind tunnels in Europe 143

10.4 アメリカの自動車風洞とF1用風洞 144

Automotive wind tunnels in the US and for F1 cars 145

第11章 流体力学の基礎理論 146

Chapter 11: The Basic Theory of Fluid Dynamics 147

11.1 境界層と流れの剥離 148

Boundary layer and the separation of the flow 149

11.2 レイノルズ数とは 150

The Reynolds number 151

11.3 連続の式とベルヌーイの定理 152

The continuity equation and Bernouilli's principle 153

11.4 ベルヌーイの定理と空力デザイン 154

Bernouilli's principle and aerodynamic design 155

11.5 ナヴィエ・ストークス方程式とCFD 156

Navier-Stokes equations and CFD 157

特別付録 DVD-ROM『クレイドル・ビューワー』の使い方 158

Special Supplement: Using the "CradleViewer" DVD-ROM

参考文献 Reference 160

謝辞 Acknowledgments 161

Chapter 0

流体の不思議 *The Wonder of Fluids*

Designing the aerodynamics of automobiles involves using technology that applies aerodynamics to control the flow of the wind to achieve cars that are gentle on the environment and offer excellent steering stability at high speeds. At the base of this technology is fluid dynamics, the science of analyzing the behavior of air and liquid. The branch of fluid dynamics dealing specifically with air is referred to as aerodynamics, and specialists in this field are called aerodynamicists or aerodynamic engineers.

In his later years, Leonardo da Vinci drew vortices almost obsessively, though fluid dynamics was not yet a structured discipline in the 15th and 16th centuries. Humans have benefitted from water and wind as long as they have been around, and aerodynamics is an academic field whose interest is inexhaustible.

(A massive hurricane photographed from space by NASA. You can see how huge the vortex is.)

自動車の空力デザインとは空気力学を駆使して風の流れを制御し、地球環境にやさしく高速操縦安定性に優れた自動車をデザインする技術のことである。この技術のベースである流体力学は気体や液体の振る舞いを解明する学問であり、特に空気を扱うものを空気力学といい、そのスペシャリストをエアロダイナミシストあるいは空力エンジニアと呼んでいる。

かのレオナルド・ダ・ヴィンチは晩年とリつかれたように渦の絵を描き続けた。流体力学は15～16世紀にはまだ体系化されてはいなかったものの、古来から水や風の恩恵を受けてきた人類にとって、興味の尽きない学問分野なのである。

(NASAが宇宙から撮影した巨大なハリケーン。渦の規模がいかに大きいかを示す)



Fig.0-1-1 NASA

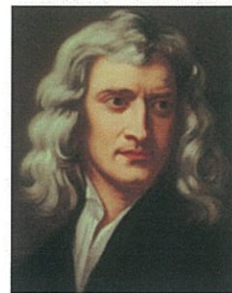
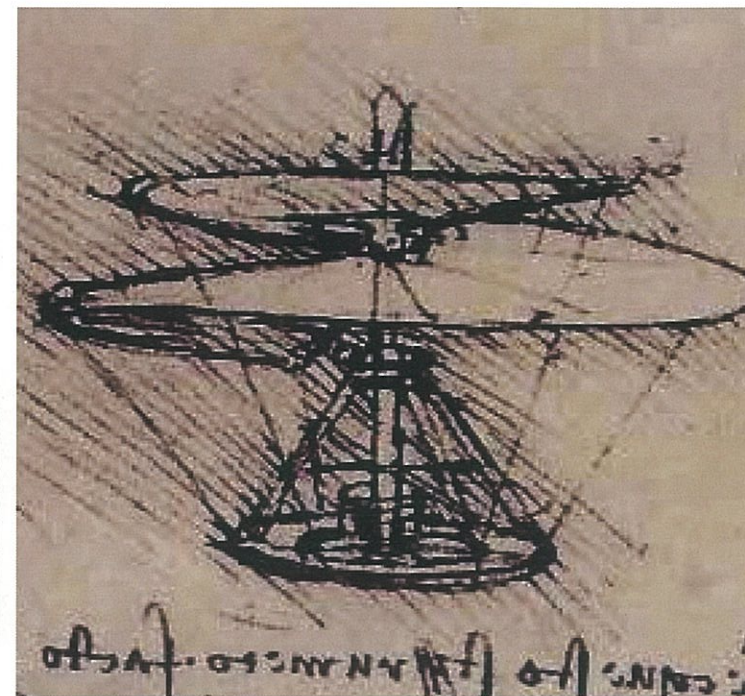
私たちは流体に囲まれて暮らしている

「流体」とは形を自由に変えながら流れる物体のことであり、空気などの「気体」と、水に代表される「液体」の総称である。ときには風や水が私たちの生命を危うくすることもあるが、地球上に水や空気が形成されたからこそ私たちは生きていられるのであり、その恩恵も計り知れなく大きい。その現象を解明し、危険を回避する技術や生活を豊かにする技術を探求する「流体力学」は私たち人間にとって最も重要な学問分野の一つである。(Fig.0-1-1)

そもそも流体力学の幕開けは古典力学の創成期であるアイザック・ニュートンの時代よりも古い。イタリア・ルネサンス期に『モナリザ』や『最後の晩餐』などの名画を残し、芸術のみならず技術や医学にも精通した万能の天才レオナルド・ダ・

ヴィンチはその鋭い観察眼によって川などに生ずる渦のスケッチを多数残している。彼の流体への関心は極めて深く、その情熱は現在のヘリコプターに通じる飛行機械のアイデアにつながっている。(Fig.0-1-2)

その後、流体力学はアイザック・ニュートン(1648-1727)、ダニエル・ベルヌーイ(1700-1782)等の偉大な学者たちにより実用工学である水力学に発展した。さらにオットー・リリエンタール(1848-1896)やウィルバー(1867-1912)とオーヴィル(1871-1943)のライト兄弟、ルートヴィヒ・プランドル(1875-1953)など、大空への憧れと情熱をもった航空界の偉人たちに支えられて現在のような極めて高度な学問に発展したのである。今日、流体力学は航空工学ばかりでなく、気象学や海洋学、河川工学などの基盤を支える重要な学問であり、私たちの生活にも欠かせないものとなっている。

Leonardo da Vinci
(1452-1512)Isaac Newton
(1648-1727)Fig.0-1-2
ダ・ヴィンチによるヘリコプターのアイデア・スケッチ

An idea sketch for a helicopter, by Leonardo da Vinci.



Fig.0-1-3 ダ・ヴィンチから500年後に創られた飛行物体, NASA X45A. The NASA X45A, a flying object made 500 years after da Vinci.

We live surrounded by "fluids"

"Fluids" are materials that flow, changing their form freely. They include both "liquids", the most representative of which is water, and "gases" such as air. Wind and water at times put our lives in danger, but it is thanks to the formation of air and water that we exist on Earth, and their benefits are immeasurable. "Fluid dynamics", a discipline treating these fluid phenomena, is one of the most important areas of study for human beings. (Fig.0-1-1)

The beginnings of fluid dynamics date back before Isaac Newton the period that saw the origins of dynamics. Leonardo da Vinci, the Italian Renaissance genius who left us not only the Mona Lisa and other masterpiece paintings but was also thoroughly acquainted with technology and medicine, applied his sharp powers of observation to draw many sketches of vortices generated in rivers. His interest in fluids ran very deep indeed, and this passion led to idea sketches for flying machines similar to today's helicopters.

Later, fluid dynamics was developed into the practical engineering discipline of hydrodynamics by such great scholars as Isaac Newton and Daniel Bernoulli (1700 - 1782). The science was subsequently supported by the yearning and passion for the sky of such great aviators as Otto Lilienthal (1848 - 1896), the Wright brothers (Wilbur: 1867 - 1912; Orville: 1871 - 1948) and Ludwig Prandtl (1875 - 1953) to become the extremely advanced science it is today. Fluid dynamics is an important science that supports the foundations not only of aeronautical engineering but also of meteorology, oceanography and river engineering. It is essential for our daily lives.



Fig.0-2-1 NASA

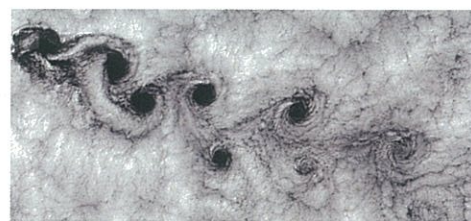


Fig.0-2-2 wikimedia



Fig.0-2-3 wikimedia

カナリア諸島の上空に発生したカルマン渦列

山頂より低い位置に雲が分布し、比較的強い風がほぼ一定して同じ向きに吹くなどの条件がそろったような渦列が発生する。カルマン渦とは流れの中に置かれた円柱状の物体の後方に左右逆向きの渦が交互に規則的に並ぶ渦現象をいう。この現象は物体に振動を起こさせ、破壊や騒音の原因になるため、建築物などではこれを避けるデザインが求められている。ハンガリーの空力学者テオドア・フォン・カルマン(1881-1963)に因む。(Fig.0-2-1,2)

洋上に発生した竜巻

ときとして流体のエネルギーは脅威である。質量の軽い空気であつても竜巻や台風のように非常に強い渦に発達するとその破壊力は凄まじく、毎年地球上のどこかで甚大な被害をもたらしている。しかし現代の高度な流体力学をもってしてもその発生の正確な予測は困難で、科学者たちは巨大な渦の発生メカニズムの解明や規模の抑制の研究に取り組んでいる。(Fig.0-2-3)

水の落下エネルギーを利用した水力発電

1878年にイギリスのウィリアム・アームストロング男爵

(1810-1900)によって発明され、以後だいに大型化された。火力や原子力に頼らないクリーンなエネルギーが自然界には豊富に存在する。(Fig.0-2-4)

波の力

水(波)と空気(風)のエネルギーが合体してできる大波。このエネルギーを活用する仕組みはできないのか。(Fig.0-2-5)

風力発電

水力発電と同様にクリーンなエネルギーである風力発電は1891年に発明されたが実用化されたのは1970年代以降である。その設置位置やプロペラの形状は高度な航空工学(空力学)の技術が生かされている。(Fig.0-2-6)

人類の文明を育んだ河川

ゲルマン民族が「父なる川」と呼ぶライン川。太古から人は川の流れの恩恵を受けて生活を営み、文明を築いてきた。(Fig.0-2-7)

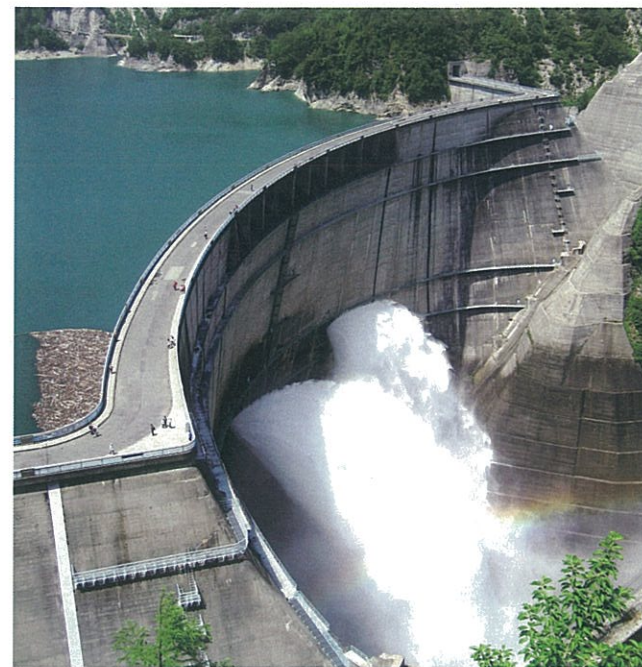


Fig.0-2-4 wikimedia



Fig.0-2-5 PD Photo.org



Fig.0-2-6 wikimedia



Fig.0-2-7 wikimedia

A Karman's vortex street in the sky over the Canary Islands

Such vortex streets are generated when certain conditions are present, such as stratocumulus distributed at a position lower than a mountain top, a relatively strong wind blowing in a virtually constant direction, etc. A Karman's vortex street is a phenomenon by which vortices that are mutually in opposite directions are generated systematically behind such an object as a cylinder within a flow. With this phenomenon, oscillation is generated in the object, resulting in destruction or noise, so buildings must have designs that avoid this. The phenomenon is named after Hungarian fluid dynamicist Theodore von Karman (1881 - 1963). (Fig.0-2-1,2)

The tornado that was generated on the sea

The energy of fluids can at times be a threat. Even such a light matter as air can have remarkable powers of destruction that can cause massive disasters when it becomes an extremely strong vortex, such as in a tornado or typhoon. Even with today's advanced fluid dynamics technology it is difficult to accurately predict such vortices, and scientists are working determinedly to elucidate the mechanism by which they are generated and on research to restrict their size. (Fig.0-2-3)

Hydroelectric power plants use the energy of falling water

The hydroelectric power plants was invented in 1878 by British

William Armstrong baron (1810-1900) and was gradually upsized afterward. Clean energies not relying on heat or nuclear power are abundantly available in nature. (Fig.0-2-4)

The wave power

Giant waves are the result of the combined energies of water (waves) and air (wind). Couldn't their energy be used effectively? (Fig.0-2-5)

Wind electric power plants

The wind-generated electricity that was clean energy was invented like hydraulic power generation in 1891. But, it is the after 1970s that it was in use. Advanced aeronautical engineering (aerodynamic) technology is used to determine the position of wind turbines and the shapes of their blades. (Fig.0-2-6)

The river which brought up culture of the human

The Rhine, which Germans refer to as "Father Rhine". Since ancient times people have established lives based on the benefits of the flow of rivers, leading to civilization. (Fig.0-2-7)

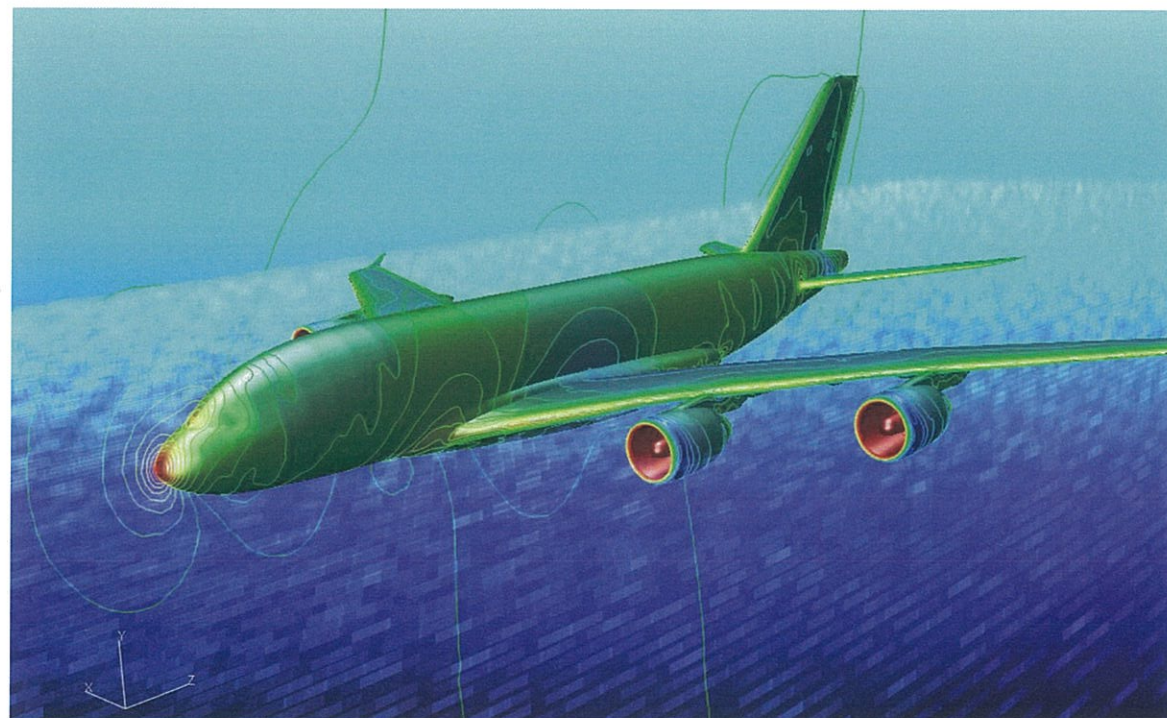
Research on fluid dynamics is done in surprising places

Fig.0-3-1 [CradleViewer]

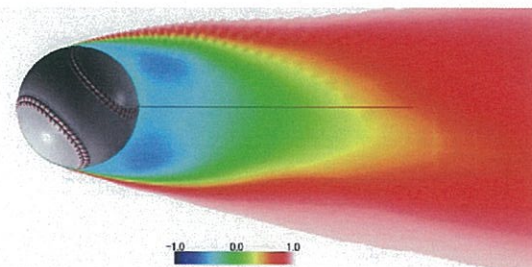
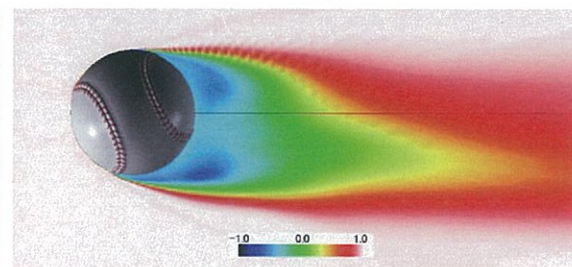


Fig.0-3-2, Ref.29(p.160)

**スポーツ界では流体力学が勝利へのカギ、**

自動車や航空機 (Fig.0-3-1) の空力学、海洋学に限らず、流体力学は実に様々な分野で研究、応用されている。たとえば生物周りの流れの研究では鳥の飛行や魚の遊泳のメカニズムの多くが解明され、スポーツの世界ではボールの周辺の流れの解析から変化球のメカニズムまで明らかにされている (Fig.0-3-2)。

水の抵抗が勝敗に大きく影響する競泳水着の開発でも流体力学の技術が活用されている。英国ノッティンガムに本社を置く Speedo 社は早くから CFD 技術を導入して人体まわりの流れを解析してきた。LZR Racer では CFD の結果に基づいて最適な位置へ LZR Panel と呼ばれる素材を配置し、理想的なストリームラインを保ち、表面摩擦抵抗を従来の製品にたいして最

大で 24% も低減したという (Fig.0-3-3,4)。1910 年、若きスコットランド人アレキサンダー・マクレイがシドニー近郊のボンディ・ビーチで開業した小さな水着屋が現在の発展のルーツ。金メダル稼ぎで有名になったのは 50 年も前のことである。

さらに近年では、人が呼吸する際の気管支内部の空気の流れを解析したり (Fig.0-3-5)、血管中の血液の流れを解析して血栓を治す器具の開発を行うなど、医学分野への応用にも期待が高まってきている。またビル風などの解析は都市計画には不可欠な技術である (Fig.0-3-6)。

このように流体力学が様々な分野で活用され始めた背景には、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) 技術の急速な進歩がある。

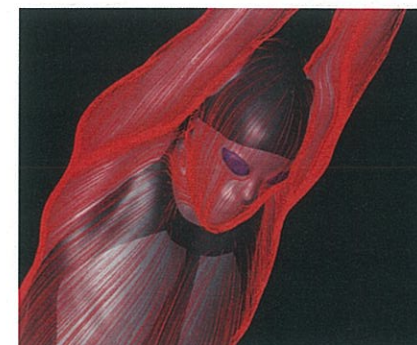


Fig.0-3-3,4 Speedo

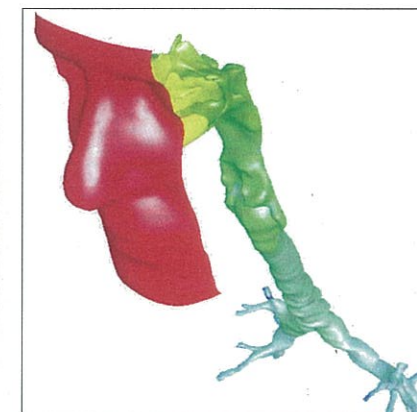
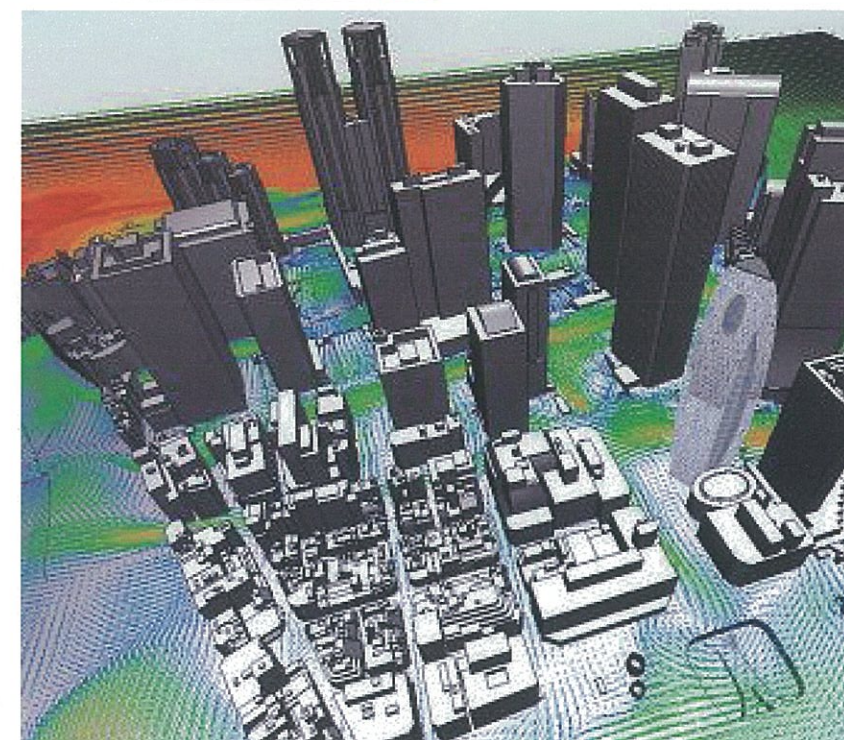
Fig.0-3-5 ansys.jp
鼻腔と気管の呼吸中の解析
Analysis of sinuses and trachea during breathing

Fig.0-3-6 [CradleViewer]

The Fluid dynamics is the key to victory by sports

Fluid dynamics are researched and applied to a variety of areas, not only in automobile and aircraft aerodynamics (Fig.0-3-1), environmentology or oceanography. For example, research in the flows around living organisms has elucidated much about the mechanisms by which birds fly and fish swim, and in sports analysis of the flow around a baseball is now revealing the mechanism of curve balls (Fig.0-3-2).

Fluid drag plays a major role in the outcome of swimming competitions, and fluid dynamics technology is applied to the development of competition swimwear. Speedo introduced CFD technology early on and has analyzed the flow around the human body. For the LZR Racer, a material called the LZR Panel was placed at the optimum position based on CFD results to maintain the ideal

streamline, reducing surface friction resistance by up to 24% as compared to conventional products (Fig.0-3-3,4). It all started in 1910 when a young Scotsman named Alexander MacRae opened a small swimwear shop on Bondi Beach in the suburbs of Sydney. It was already 50 years ago that Speedo became famous for taking gold medals.

Furthermore, there are rising expectations in recent years for the application of fluid dynamics to medicine (Fig.0-3-5) through the analysis of the flow of air within bronchial tubes when people breathe and the flow of blood in blood vessels. In addition, the analysis such as the strong wind amplified by skyscrapers is the techniques that are indispensable for city planning (Fig.0-3-6). One of the reasons for the fact that fluid dynamics is beginning to be applied to so many different fields is the rapid progress in computation fluid dynamics (CFD).

自動車の空力デザインとは

What Designing the Aerodynamics of Cars Involves

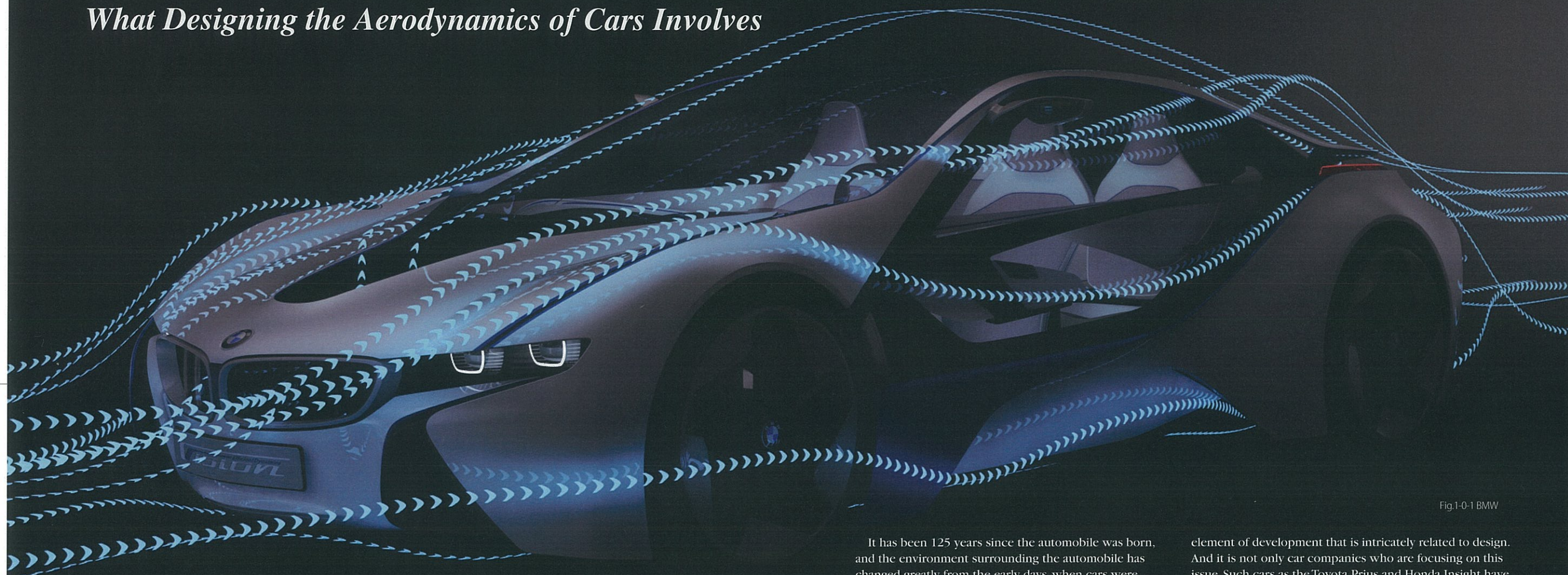


Fig.1-0-1 BMW

自動車が誕生して 125 年以上が経過し、スピードを追い求めた開発黎明期と環境破壊が問題視される現代とでは自動車を取り巻く環境が大きく様変わりした。地球温暖化、環境破壊、化石燃料の枯渇などの問題が深刻化し、各自動車メーカーはエネルギー効率に優れた燃費の良い自動車を開発しなければ市場から追放される厳しい時代になったのである。さらに、エンジン性能の向上に伴い一般車でも高速走行が可能になったため、高速操縦安定性を高めることも必須課題となっている。燃費と高速操縦安定性の両方を高めることが自動車空力デザイン開発の最重要課題なのである。

自動車の燃費を向上させる方法には車両の軽量化、エンジンの燃焼効率改善、転がり抵抗の低減など様々ある。なかでもデザインに密接に関連する空気抵抗低減技術は

極めて重要な開発項目として再注目されているが、注目しているのは自動車メーカーばかりではない。トヨタ・プリウスやホンダ・インサイトなどが販売台数を伸ばし、ルーフ形状などの特徴的なエアロシェイプに新しさや魅力を感じるユーザーが増えていることを考慮すると、市場自体が空気抵抗を低減する空力デザイン技術に注目していると言っても過言ではないだろう。

自動車空力デザイン開発においては環境性能ばかりでなく高速操縦安定性も充分に考慮する必要がある。自動車空力デザイン技術は自動車にとって最も重要な「安全性」と「環境性能」の両方に密接に関係しているのである。この章では、空気抵抗低減や揚力低減といった自動車空力性能とデザインの関わりや、自動車空力デザイン開発を行う意義について概説する。(source: BMW)

It has been 125 years since the automobile was born, and the environment surrounding the automobile has changed greatly from the early days, when cars were developed in the pursuit of speed, to today with the awareness of environmental destruction. The problems of global warming, environmental destruction and depletion of fossil fuels are deepening, and the situation is tough for car manufacturers, who are being forced to develop cars with outstanding fuel efficiency if they are to remain in the market. Furthermore, because even ordinary cars can run at high speeds thanks to improvements to engine performance, it is essential to achieve better handling stability at high speeds. Improving both fuel efficiency and handling stability at high speeds are the most important issues in developing a car's aerodynamics.

There are various approaches to improving a vehicle's fuel efficiency, such as by decreasing body weight, improving the engine's combustion efficiency or reducing rolling resistance. Among these, technologies for reducing drag are receiving renewed attention as one important

element of development that is intricately related to design. And it is not only car companies who are focusing on this issue. Such cars as the Toyota Prius and Honda Insight have been selling in greater numbers, and considering that a growing number of users are attracted by their distinctive aerodynamic shapes, such as the forms of their roofs, it is no exaggeration to say that the market itself is focusing attention on aerodynamic design technologies that reduce drag.

When developing a car's aerodynamic design, developers must consider not only environmental performance but also high speed handling stability. The technologies for designing the aerodynamics of automobiles are intricately related to both safety – the most important issue for cars – and environmental performance. In this chapter we describe the relationship between design and such issues of aerodynamic performance as reducing drag and lift, as well as the significance of aerodynamic design development for automobiles.

1 車両に影響する空気力と空力係数

The influence of air forces and on car bodies and aerodynamic coefficients

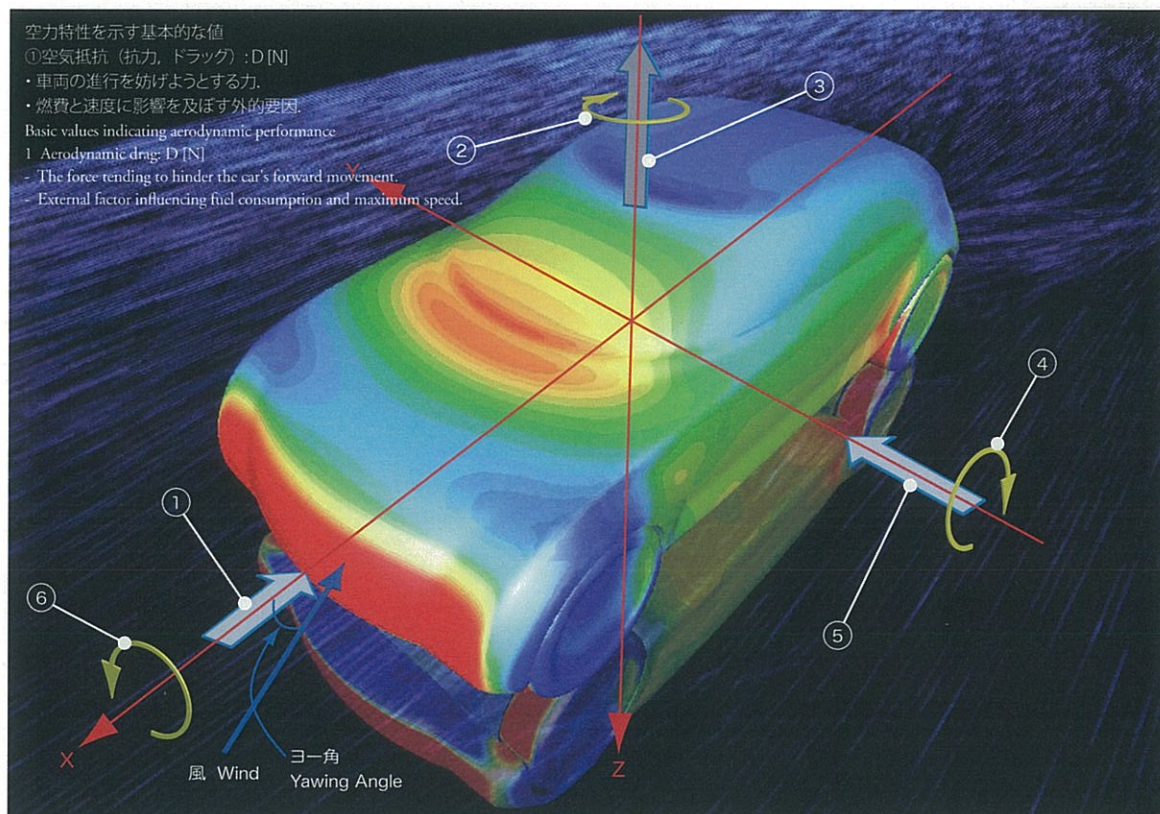


Fig.1-1-1 [CradleViewer]

車両にかかる空気の6つの力

自動車は走行中に車体の周りを流れる空気からさまざまな力を受ける。中でも特に重要なものが車両の進行を妨げる「①空気抵抗」と、車体を浮き上げる「③揚力」である。空気抵抗は燃費や環境性能に影響するためよく知られているが、実はヨーロッパでは揚力低減に対する意識も高い。というのも、ヨーロッパにはアウトバーンという速度無制限の高速道路があり、一般ユーザーでも超高速走行を行うことが日常的にある。大きな揚力が発生する車ではタイヤのグリップ力が確保できないため安心して運転できないのである。環境性能に関わる「①空気抵抗」だけでなく、高速操縦安定性に関わる「③揚力」も考慮した車でないグローバルな車とは言えないだろう。

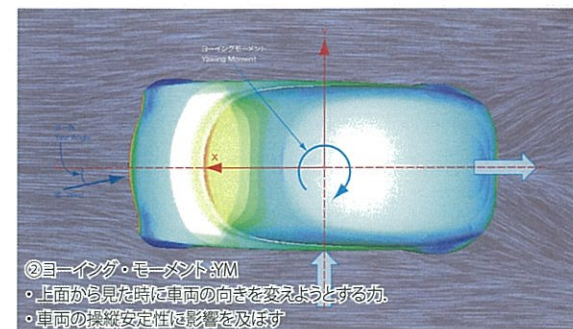
そのほかの空気力としては、横風を受けた時に生ずる「⑤横力」、それぞれの力の働く軸を中心軸とした3つの回転モーメント、「②ヨーイング・モーメント (偏揺回転偶力)」、「⑥ローリング・モーメント (横揺回転偶力)」、「④ピッチング・モーメント (縦揺回転偶力)」があり、これら6つを合わせて「空力6分力」と呼んでいる (Fig.1-1-1 [CradleViewer])。

車両のデザイン性や実用性を高く保ちつつ、これら空力6分力を適正な状態にデザインすることを空力デザインという。

空力係数とは

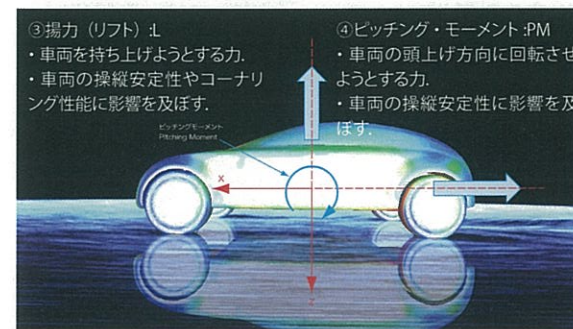
空気力は車両の走行速度によって大きく変化する。それはおよそ速度の二乗に応じて大きくなり、走行速度が2倍になると空気力はおおよそ4倍、走行速度が3倍なら空気力は9倍に大きくなる。つまり、走行速度が速いほど空気の影響は高まるのである。言い換えると、空気力の大きさを議論する場合はその時の走行速度も合わせて示さないと意味がないと言える。しかし毎回「速度～km/hのときの空気抵抗は…」と議論するのは煩わしい。そこで考案されたのが、純粋に形状(デザイン)の空力性能を比較するのに便利な「空力係数」である。

例えば空気抵抗の場合、車両にかかる「空気抵抗」を「流れの運動エネルギー (主流動圧)」と「車体の前面投影面積」で割って得られる値を「空気抵抗係数: C_d 」と呼ぶ (詳細は3.3)。これらの値は無次元数と呼ばれ、わかりやすくいうと「単位のない値」のことである。例えば、3[m]を10[m]で割ると0.3だが、単位は[m]ではなく、単に割合を示す単位のない値になる。空気抵抗係数などの空力係数も、形状(デザイン)に対する空気力の大きさを示す割合のようなものと理解すれば馴染みやすいだろうか。車両速度によらず純粋に形状の空力性能を比較できる指標があれば空力デザイン開発が行いやすくなるのだ。



2 Yawing moment: YM

- The force tending to change the vehicle direction as seen from above.
- Influences the vehicle's steering stability.

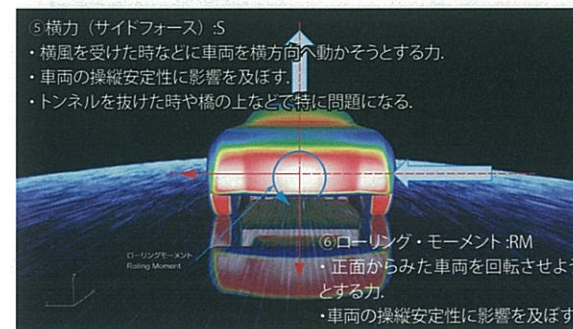


3 Lift: L

- The force tending to lift the vehicle
- Influences the vehicle's steering stability and cornering performance.

4 Pitching moment: PM

- The force tending to rotate the vehicle in the longitudinal direction.
- Influences the vehicle's steering stability.



The six components of aerodynamic force exerted on car bodies

When a car is running, various forces are exerted on its body from the airflow. Two of the most typical are the ①drag to prevent the car from traveling forward and the ③lift to raise the car off the ground. There is also ⑤side force exerted by crosswinds, and three rotational moments around specific axes: ②the yawing moment, ⑥rolling moment and ④pitching moment. These are collectively referred to as the six components of aerodynamic force.

Aerodynamic design consists of making sure these six components of aerodynamic force are properly dealt with while improving the body's design characteristics and practicality.

Aerodynamic coefficients

Aerodynamic forces differ greatly according to the vehicle's running speed. They increase at a rate of approximately a power of 2 of the increase of speed: about 4 times for double the speed, about 9 times for triple the speed. In other words, the higher the running

各空力係数の計算式
Aerodynamic coefficient formulae

C_d : 空力抵抗係数 (抗力係数)
 C_d : Coefficient of Drag

$$C_d = \frac{D}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

C_{YM} : ヨーイング・モーメント係数
 C_{YM} : Coefficient of Yawing Moment

$$C_{YM} = \frac{YM}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot L}$$

C_L : 揚力係数
 C_L : Coefficient of Lift

$$C_L = \frac{L}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

C_{PM} : ピッチング・モーメント係数
 C_{PM} : Coefficient of Pitching Moment

$$C_{PM} = \frac{PM}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot L}$$

C_S : 横力係数
 C_S : Coefficient of Side Force

$$C_S = \frac{S}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

C_{RM} : ローリング・モーメント係数
 C_{RM} : Coefficient of Rolling Moment

$$C_{RM} = \frac{RM}{1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot L}$$

5 Side force: S

- The force tending to move the vehicle sideways when exposed to crosswinds, etc.
- Influences the vehicle's steering stability.
- Particularly a problem when leaving tunnels or on bridges.

6 Rolling moment: RM

- The force tending to rotate the vehicle as seen from the front.
- Influences the vehicle's steering stability.

speed, the greater the influence of the aerodynamic forces. To put it another way, it is meaningless to debate aerodynamic forces without specifying the running speed at that time. But it is too complicated to have to say "the drag is x at a speed of y km/h" each time you want to mention aerodynamic performance. For this reason we use "aerodynamic coefficients" as a convenience when we want to simply compare the aerodynamic performance of different shapes (designs).

In the case of drag, for example, the value we obtain when we divide the kinetic energy of the flow (the main flow's dynamic pressure) by the body's frontal projected area is called the "coefficient of drag: C_d ", expressing the air resistance applied to the body (this is discussed in detail in section 3.3). These values are dimensionless numbers, which to put it simply can be thought of as "values without units". For example, when we divide 3 [m] by 10 [m] we get 0.3. [m] is not a unit here but simply a unitless value indicating a ratio. You can probably get used to the coefficient of drag and other aerodynamic coefficients more easily by understanding them as ratios indicating the magnitude of aerodynamic forces with respect to the shape (design). Having indices that allow us to easily compare the aerodynamic performance of different shapes irrespective of the vehicle speed facilitates aerodynamic design development.

Aerodynamic drag

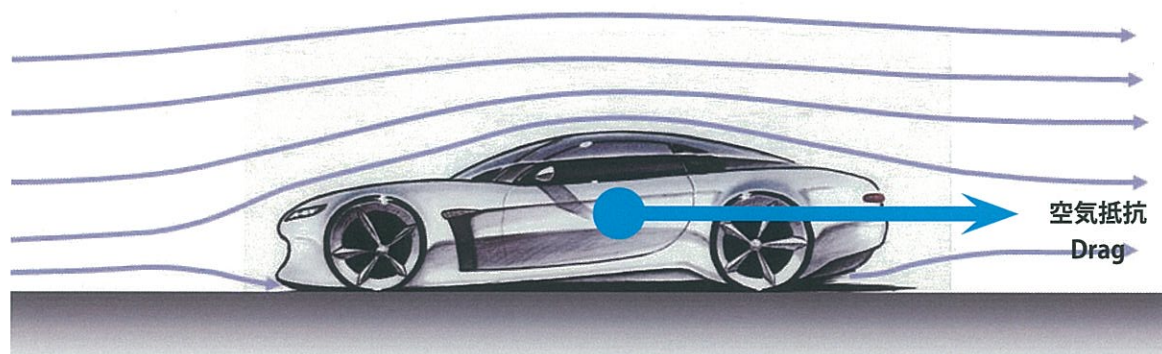


Fig.1-2-1

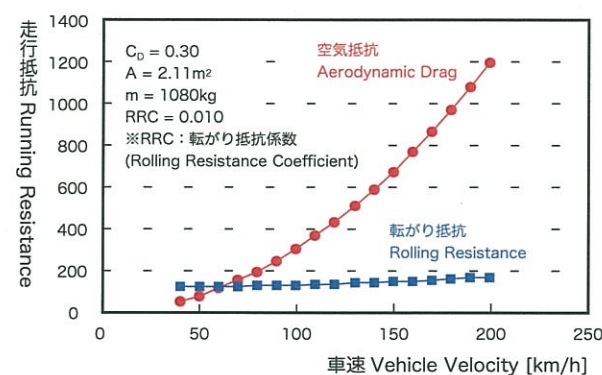


Fig.1-2-2, Ref.32

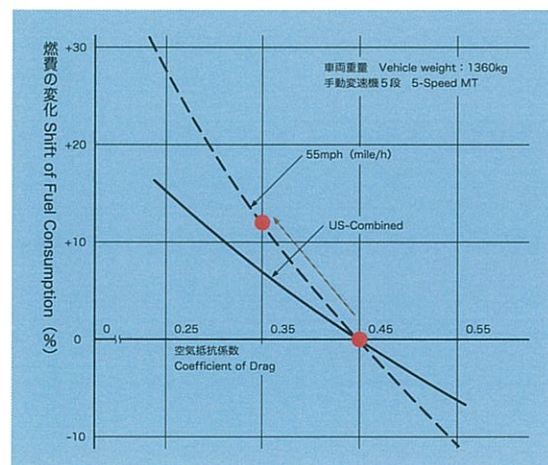


Fig.1-2-3, Ref.33

走行中の車体の抵抗にはどのようなものがあるか？

車体にかかる走行抵抗は、大別して転がり抵抗と空気抵抗の2つがあり (Fig.1-2-2)、60km/h より低い速度ではタイヤなどの転がり抵抗が空気抵抗を上回っている。しかし速度が上昇すると空気抵抗は速度の二乗に比例して増加し、200km/h のときには全抵抗のほとんどが空気抵抗となる。スポーツカーやレーシングカーの最高速度付近ではまさに空気の壁と闘っていることになる。

空気抵抗を下げると燃費はどのくらい改善される？

空気抵抗は速度の二乗に比例して大きく変わるので、全体抵抗における空気抵抗の割合は車両の速度によってまったく異なる。したがって「空気抵抗を何%低減させると燃費は何%向上する」といった単純な表現は難しい。しかし、ここに興味深いデータがある (Fig.1-2-3)。車速が 55mph (100km/h) の時、空気抵抗係数 C_D を 0.45 から 0.35 に低減すると燃費が約 12%

向上することが示されている。仮に空気抵抗低減以外の方法、たとえば重量軽減や動力性能の調整でこれほどの燃費改善結果を得るには大きなコストアップや何らかの性能低下は避けられない。しかし空気抵抗の小さいボディ・デザインならば、さほどコストをかけなくても燃費を改善できるのである。

空気抵抗にはどのような種類があるのか？

自動車の空気抵抗は大きく 2 つの成分に分けることができる。1 つは摩擦抵抗、もう 1 つは圧力抵抗である。なお圧力抵抗は形状抵抗と内部流抵抗に分けられる。中型車の場合の各成分の割合を Fig.1-2-4 に示す。摩擦抵抗とは空気と物体の間で発生する摩擦力による抵抗のことで、形状抵抗の小さい航空機では大きな問題となるが、自動車では摩擦抵抗の割合は低いのでさほど問題視されない。形状抵抗とは車体の前後圧力差や床下抵抗物による抵抗を合わせたもののことで、内部流抵抗はエンジンや各種熱源を冷却するために車体に空気を取り入れる際に生ずる抵抗のことである。 (Fig.1-2-5)

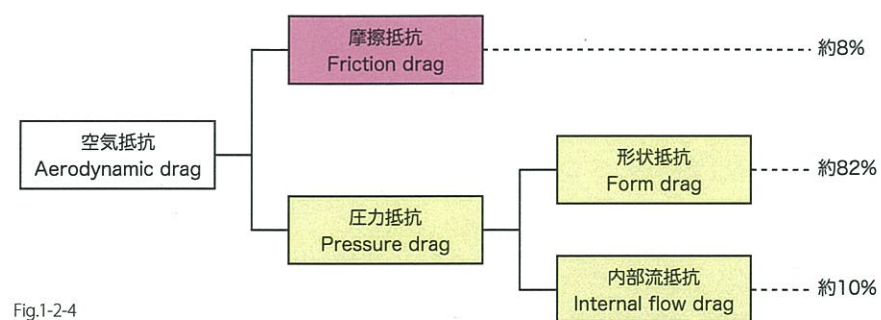


Fig.1-2-4



Fig.1-2-5 Daimler

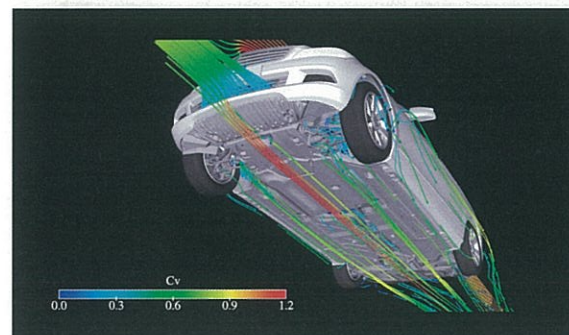


Fig.1-2-5 Daimler



Fig.1-2-5 Mitsubishi

What types of resistance are there for a running car?

The resistance to vehicle forward movement can be divided into two major groups, rolling resistance and aerodynamic drag. At speeds of under 60 km/h, the rolling resistance is greater than the aerodynamic drag. As the speed increases, however, the aerodynamic drag increases proportionally to the square of the speed, so at 200 km/h the air resistance accounts for most of the total resistance. At their top speed ranges, sports cars and racing cars struggle against a barrier of air.

How much is fuel consumption influenced by aerodynamic drag?

Aerodynamic drag changes greatly, proportionally to the square of the speed, so the percentage of aerodynamic drag with respect to the total resistance differs greatly according to the car's speed. Because of this, we cannot simply state that "reducing aerodynamic drag by x% improves fuel consumption by y%". Still, there is some interesting data (Fig.1-2-3) indicating that at a speed of 55 mph (100 km/h), decreasing the coefficient of drag (C_D) from 0.45 to 0.35 improves fuel consumption by about 12%. If it were possible to improve fuel consumption by this much through measures other than reducing

aerodynamic drag, for example by reducing weight or adjusting dynamic performance, this would result in either major cost increases or degradation of other elements of performance. But designing the body with little aerodynamic drag makes it possible to improve fuel consumption without increasing costs substantially.

What types of aerodynamic drag are there?

With automobiles, the aerodynamic drag can be divided into two major groups. One is friction drag, the other pressure drag. Pressure drag is divided into form drag and internal flow drag.

Fig.1-2-4 shows an example of the proportions of the different components for a mid-size car. Friction drag refers to the resistance generated by friction between the air and the object. It is a major issue for aircraft which have a low form drag, but is treated as unimportant for automobiles, where its proportion is low. Form drag combines the pressure difference between the front and rear of the body with the resistance caused by underfloor resisting media, while internal flow drag refers to the resistance generated by the air introduced into the body to cool the engine and other sources of heat. (Fig.1-2-5)

1 3
章 実在する乗用車の空気抵抗係数

The drag coefficient of real cars

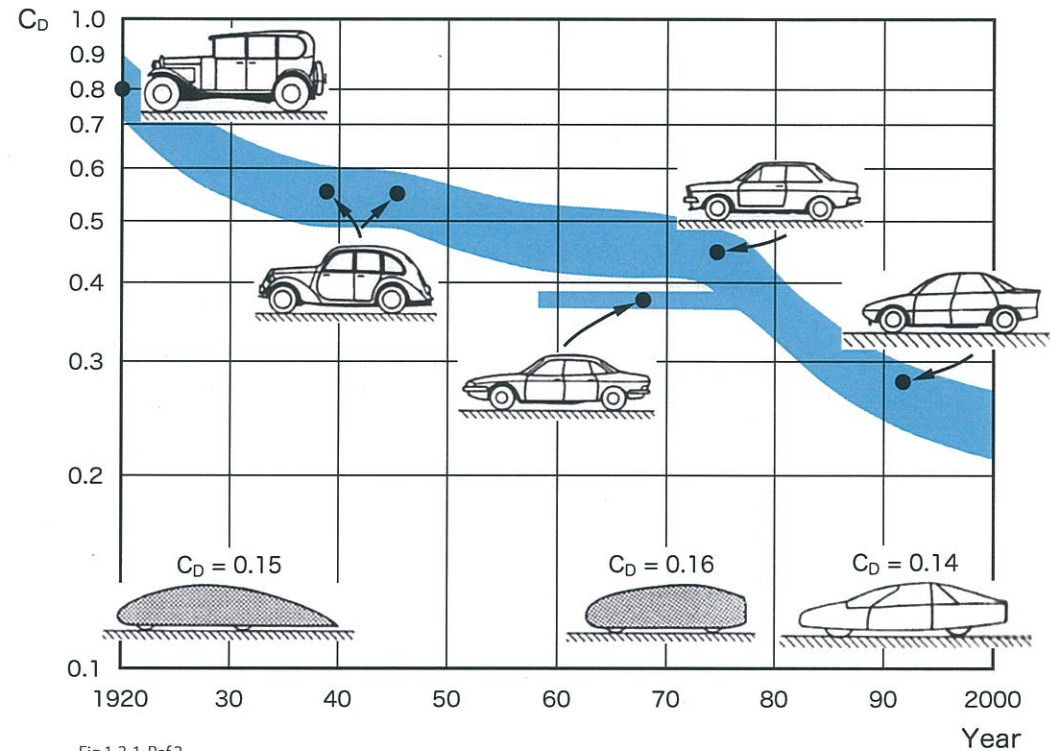


Fig.1-3-1, Ref.3

自動車の空気抵抗係数はどのくらいか？

現代のノッチバックタイプの C_D 値は0.3弱だが、かつてはどうだったのだろうか。ベンツが自動車を生産させた1885年から1920年頃までの自動車はエンジンの出力が低く、空気抵抗を意識するほどのスピードが出せなかった。そのため、デザインに空力的な配慮は見られず、馬車のような木骨の箱型ボディが主流で平均 C_D 値も0.8と大きかった (Fig.1-3-1)。しかしその後、エンジン性能が向上して最高速度が高まると空気抵抗の存在が無視できなくなり、空力的な処理が車両デザインに施されるようになっていった。

1940～50年代、車体製造方法にモノコック・ボディ（ユニット・コンストラクション）が導入されると曲面多様型のボディ・デザインが普及し、空気抵抗も次第に低くなった。1960年代には乗用車の平均 C_D 値は0.4～0.5程度にまで低減。その後、自動車のボディ・デザインは金型技術の進化によって様々に変化し、アメリカ車のように低く長くスマートになった。一方で車体重量は増加し、その走行性能を保つためにエンジン排気量が増大してしまった。安価で豊富なガソリンの存在もあったのだろう。いつしか空気抵抗の存在は特殊なスポーツカーやレーシングカーでのみ語られるようになり、一般には忘れ去られて

いった。

ところが中東紛争に端を発した1970年代の二度のオイルショックは省資源・省エネルギーのコンセプトをほぼ全人類に植え付ける結果となった。自動車産業が生き残るためには車体の軽量化と低燃費の車の開発が急務となり、空力デザインは再び注目を浴びることになったのである。ここで研究成果をいち早く学会で発表したのが、ピニンファリーナ社とイタリアの学術国家機関CNRである (Fig.1-3-2)。テーマは「自動車の空力学における改善」。簡単に言えば空力学は本当に燃費節約により結果をもたらすのかという研究であり、一定の車速において C_D 値が50%低減すると燃費が15%改善されるという内容であった。世の中の自動車スタイルが角型から丸型にいつせいにシフトし始めたのは1978年のこのCNRとピニンファリーナの研究以降であるといわれている。当時は極端に丸みを帯びた形状に違和感を覚えたそうだが、ハイブリッド車をはじめとする低燃費車のデザインに慣れてくると美しく見える。工業製品の美というものは技術の進歩とともに変化するのであろう。ヨーロッパでは新型車の C_D 値を公表することが義務付けられ、世界的に空力特性は自動車の性能の一部であるとみなされるようになってきた (Fig.1-3-3)。

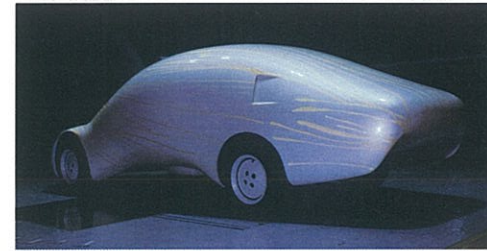


Fig.1-3-2 Pininfarina

Type	Year	C _D	Maker	Brand
Sedan	2000	0.32	Peugeot	406
		0.26	Mercedes-Benz	C-CLASS
	2001	0.30	Honda	CIVIC FERIO
		0.28	Audi	A4
	2002	0.28	Opel	VECTRA
		0.26	Honda	ACCORD
	2003	0.26	Mercedes-Benz	E240
		0.28	Subaru	LEGACY
		0.26	Toyota	PRIUS
		0.28	Saab	9-3
		0.27	Toyota	CROWN
	2004	0.28	Toyota	AVENSIS
		0.29	Peugeot	407
		0.30	Mercedes-Benz	CAMRY
	2005	0.31	Citroen	CLS
		0.28	Lexus	C6
	2006	0.28	Lexus	GS
		0.28	Lexus	IS
2007	0.28	Nissan	FUGA	
	0.29	Audi	A5	
	0.29	Jaguar	XF	
2008	0.27	Mercedes-Benz	C-CLASS	
	0.28	BMW	320i	
	0.28	BMW	530i	

Type	Year	C _D	Maker	Brand
Sedan	2008	0.29	BMW	740i
		0.31	BMW	M5
		0.27	Mazda	ATENZA
		0.29	Citroen	C5
	2010	0.25	Toyota	PRIUS
	2012	0.26	BMW	320i
Wagon	2014	0.22	Mercedes-Benz	CLA
	2000	0.30	Alfa Romeo	156
	2001	0.31	Mercedes-Benz	C-CLASS
	2003	0.29	Subaru	LEGACY
		0.30	Toyota	WISH
		0.29	Toyota	AVENSIS
	2005	0.33	Saab	9-3
	2007	0.29	Ford	FOCUS C-MAX
	2008	0.29	BMW	320i
		0.30	BMW	530i
0.28		Mazda	ATENZA	
Compact	2001	0.29	Opel	CORSA Eco
		0.34	Renault	AVANTIME
	2002	0.32	Nissan	MARCH
	2004	0.29	Nissan	TIIDA
		0.30	Toyota	SIENTA
		0.31	Toyota	PASSO
	2005	0.34	Chevrolet	MATIZ
		0.30	Toyota	VITZ
	2006	0.31	Toyota	RACTIS
	2007	0.30	VW	POLO B/M
2008	0.29	BMW	116i	
2012	0.27	Mercedes-Benz	A-CLASS	

Fig.1-3-3

Type	Year	C _D	Maker	Brand
Coupe	2001	0.28	Opel	ASTRA
	2002	0.30	Nissan	FAIRLADY Z
		0.29	Nissan	SKYLINE G35
		0.32	Honda	NSX-R
		0.28	Mercedes-Benz	CLK
		0.29	Mercedes-Benz	SL
	2004	0.28	Porsche	911 (997)
		0.28	Chevrolet	CORVETTE
	2006	0.29	Porsche	911 GT3
		0.34	Ferrari	599
		0.29	Porsche	BOXTER
	2008	0.30	BMW	650i
		0.28	BMW	325i
0.31		BMW	M3	
0.32		BMW	M6	
0.27		Nissan	GT-R	
2011	0.19	VW XL1	concept	
2013	0.24	Tesla	Model-S	
Open	2003	0.30	Porsche	911 Cabriolet
	2008	0.35	BMW	Z4 M
SUV	2007	0.36	GM Saturn	OUTLOOK
		0.35	Nissan	DUALIS
	2008	0.34	BMW	X3 2.0d
		0.34	BMW	X5 3.0d
		0.35	Toyota	SEQUOIA

What sort of drag coefficients do cars have?

Automobiles of the 1920s had low engine outputs, so they did not travel at high speeds and their drag was low. The box-like wooden bodies carrying over the designs of horse-drawn carriages had no aerodynamic considerations, and their average C_d was high at 0.8 (Fig.1-3-1). Later, however, as engine performance increased, so did top speeds. Aerodynamic drag could no longer be ignored, so bodies came to be given aerodynamic treatments.

In the 1940s and 1950s, when monocoque bodies (unit constructions) were introduced to automobiles, body designs with diverse curves became common, and aerodynamic drag gradually decreased. By the 1960s, the average C_d for passenger cars had lowered to between 0.4 and 0.5. Bodies, particularly those of American cars, were low, long and smart, but they were also heavier, so to maintain their performance, engine displacement was increased, and because of the abundance of cheap gasoline aerodynamic drag was all but forgotten expect for special sports cars and racing cars.

With the two oil shocks provoked by war in the Middle East, however, virtually all humankind came to recognize the importance of conserving resources and energy. Developing bodies with lighter weight and lower fuel consumption was an urgent issue for the automobile industry to survive, and aerodynamics once again drew much attention. The first to announce their research results were Pininfarina and the CNR (the Italian National Research Council), in a paper titled "Improvements to Automobile Aerodynamics". Put simply, the study examined whether aerodynamics could truly provide good results in terms of reducing fuel consumption. We will introduce the details of the study a bit later. Suffice it to say here that the report claimed a 50% reduction in the C_d improved fuel efficiency by 15%. It was after the results of this CNR/Pininfarina project were announced in 1978 that the styles of cars around the world began shifting from squarish to rounded forms. In Europe companies are required to announce the drag coefficients of their new models, and today aerodynamic characteristics are considered around the world to be one element of automobile performance (Fig.1-3-3).

The influence of lift

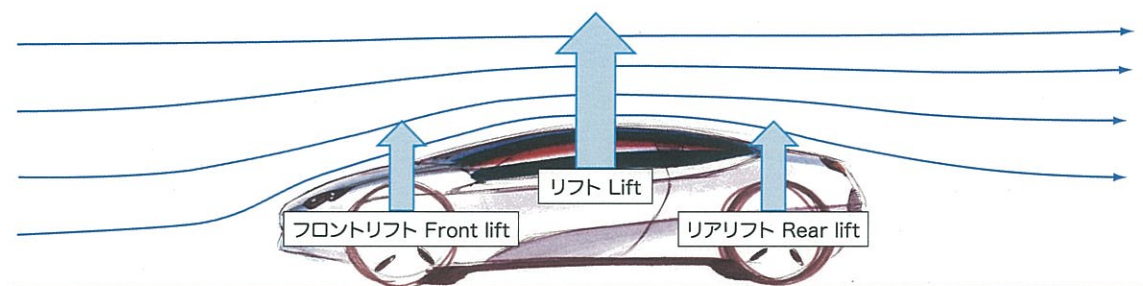


Fig.1-4-1

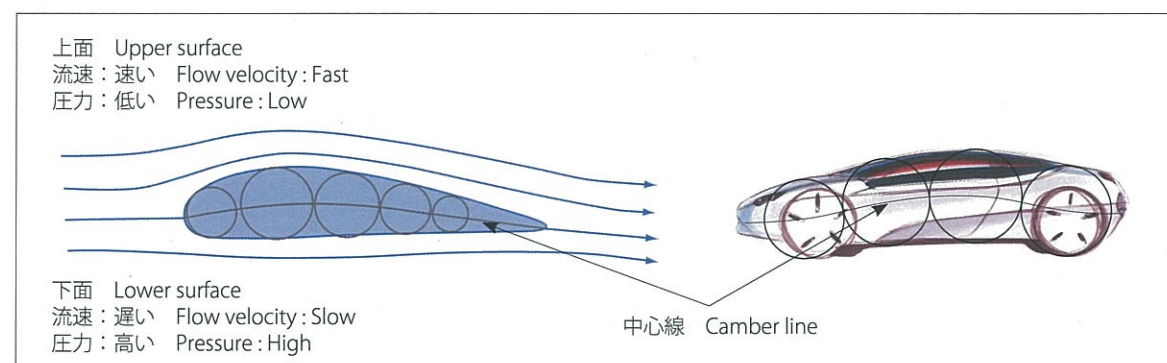


Fig.1-4-2

自動車にかかる揚力（リフト）とは？

航空機の翼の断面はその中心線（カンバーライン）が上にふくらんだ形状をしている（Fig1-4-2）。このような形状では流れの速度は翼の下面よりも上面のほうがより加速され、上面の圧力は下面よりも低下するため、翼を上を持ち上げる力「揚力（リフト）」が生じる。いっぽう自動車の側面形状は、大雑把にいえばその中心線は翼断面に近い。つまり自動車も基本的には走行風によって揚力を生じやすい形をしている。そして揚力は空気抵抗と同じ空気力なので走行速度の二乗に比例して大きくなる。したがって高速走行する車では揚力に特に注意して開発する必要がある。もちろんスポーツカーやレーシングカーに限らない。ドイツのアウトバーンでは一般乗用車であっても200km/hを超えるスピードで走行することができるので、揚力の発生を防ぎ、むしろ下向きの力（ダウンフォース）を得られるボディ形状が望ましい。現在、日本でも車の性能向上に伴って高速道路の上限速度引き上げが検討されているなど、今後一般のドライバーが高速で走行する機会はますます増えるだろうから、空力特性には充分注意して開発されるべきである。

揚力（L[N]）も C_D と同様に主流動圧（ $1/2 \rho v^2$ ）と前面投影面積 $A[m^2]$ で割ると揚力係数 C_L が得られる。また、揚力を

前輪車軸と後輪車軸に分配して議論する場合、前車軸にかかる揚力をフロントリフト、その係数をフロントリフト係数 C_{LF} という。同様に後車軸にかかるリフトをリアリフト、その係数をリアリフト係数 C_{LR} という（Fig.1-4-1）。

揚力を低減する意味

車両に揚力が働くとタイヤの接地力が減少し、グリップ力が低下する。それがコーナリング中であれば車両がスピンして大惨事になりかねない。Fig1-4-3はBMW 5シリーズ開発時に行われたリアリフトと車両操縦安定性の関係を調査した実験結果である。図には、リアリフト係数0.06（ C_{LR1} ）と0.15（ C_{LR2} ）である2台のテスト車両がそれぞれ速度160km/hで400Rのコーナーに進入した場合のヨー角速度（自動車が向きを変える速さ）の時間履歴が示されている。リアリフト係数が0.06と小さい場合、ヨー角速度はほぼ一定で急激な車両姿勢変化はなく、安定してコーナーを走行していることがわかる。いっぽう、リアリフト係数が大きい0.15の場合は3秒あたりから徐々にヨー角速度が増加し、強いオーヴァーステアの状態に陥り、10秒付近で急激な車両姿勢変化を生じている。これでは一般のドライバーにとっては極めて危険な車両特性ということになる。

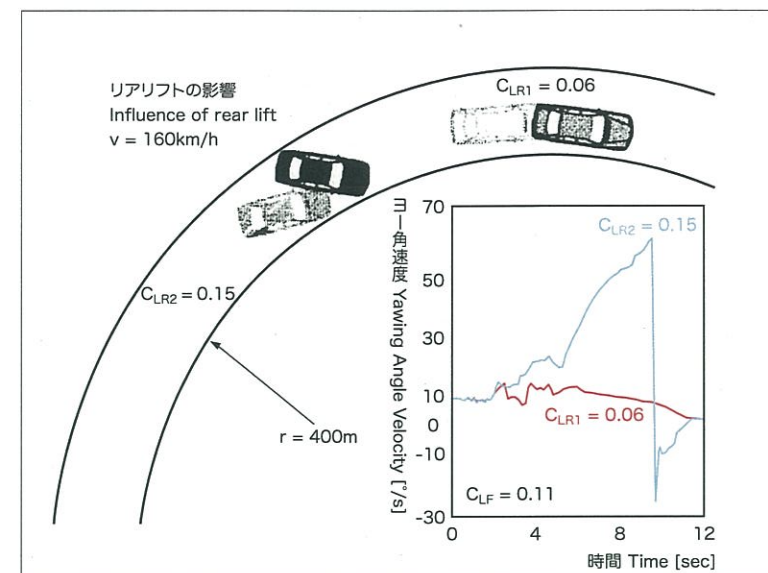


Fig.1-4-3, Ref.34



Fig.1-4-4 Aston Martin

What is the lift exerted on cars?

The sections of aircraft wings have shapes in which the center line ("camber line") bulges upward.(Fig.1-4-2) With such shapes, the flow is faster over the upper surface of the wing than over the lower surface, so the pressure is lower above than below, and this acts as a force called "lift", literally lifting the wing. If we look at a car in side view, we can loosely say its center line is near that of a wing section. In other words, automobiles basically have a shape by which lift is generated by the air through which the car travels. Lift is an aerodynamic force like aerodynamic drag, and it also increases proportionally to the square of the speed. Because of this, special attention must be paid to lift for vehicles meant to run at high speeds. This is not limited to sports cars and racing cars. Even regular passenger cars can run at speeds of over 200 km/h on the autobahn in Germany, so lift must be avoided, and in fact body shapes generating downforce are preferable. With the increase in the performance of cars, the Japanese government is now considering raising the top speed on highways, and regular drivers will have more opportunities to drive at high speeds in the future, so cars must be developed with attention to their aerodynamic characteristics.

Like for the coefficient of drag (C_D), the coefficient of lift (C_L) can be found by dividing the lift (L [N]) by the free-stream dynamic pressure ($1/2 \rho v^2$) and frontal projected area (A [m^2]). When discussing the lift distributed between the front and rear axles, we

call the lift exerted on the front axle the front lift, its coefficient the coefficient of front lift or C_{LF} . Likewise, the lift exerted on the rear axle is called the rear lift, and its coefficient is the coefficient of rear lift or C_{LR} .

The significance of reducing the lift

When lift is exerted on a car body, the force holding the tires against the ground decreases, and so does the grip force. When this happens while cornering, the car can spin, resulting in a tragic accident. Fig.1-4-3 shows the results of tests on the relationship between rear lift and steering stability performed when developing the BMW 5 Series. The figure shows the time-history analysis of the yawing angle velocity (the speed at which the direction of the car changes) of two test cars with respective coefficients of rear lift of 0.06 (C_{LR1}) and 0.15 (C_{LR2}), as they enter a 400R corner at a speed of 160 km/h. With the lower rear lift coefficient of 0.06, the yawing angle velocity is virtually constant, there is no sudden change in the body's attitude, and the car travels through the corner stably. With the higher rear lift coefficient of 0.15, however, the yawing angle velocity increases gradually after about three seconds, resulting in a state of strong over-steering, and the body's attitude changes suddenly at about the 10-second point. This is an extremely dangerous situation for regular drivers. In this way, to improve a car's aerodynamic characteristics, reducing not only the coefficient of drag (C_D) but also the lift is an important development item for improving steering stability and thus ensuring the safety of the driver.

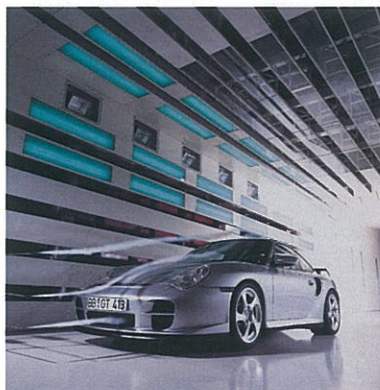
A Vehicle's utility and aerodynamic design

Fig.1-5-1 Porsche

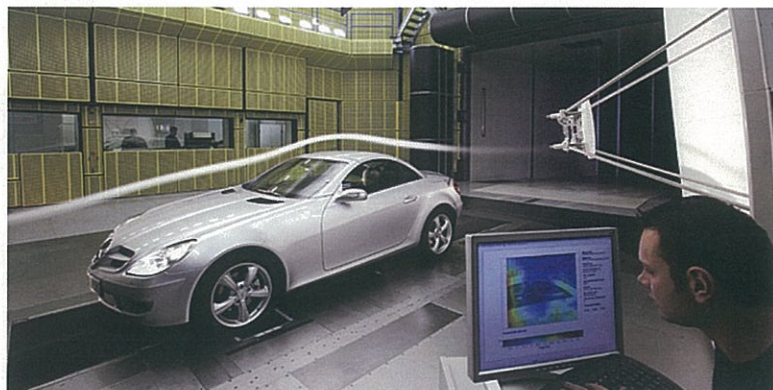


Fig.1-5-2 Daimler



Fig.1-5-3 Audi

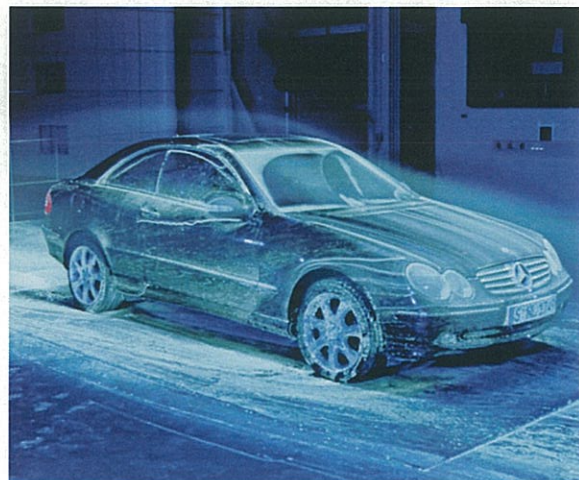


Fig.1-5-4 Daimler

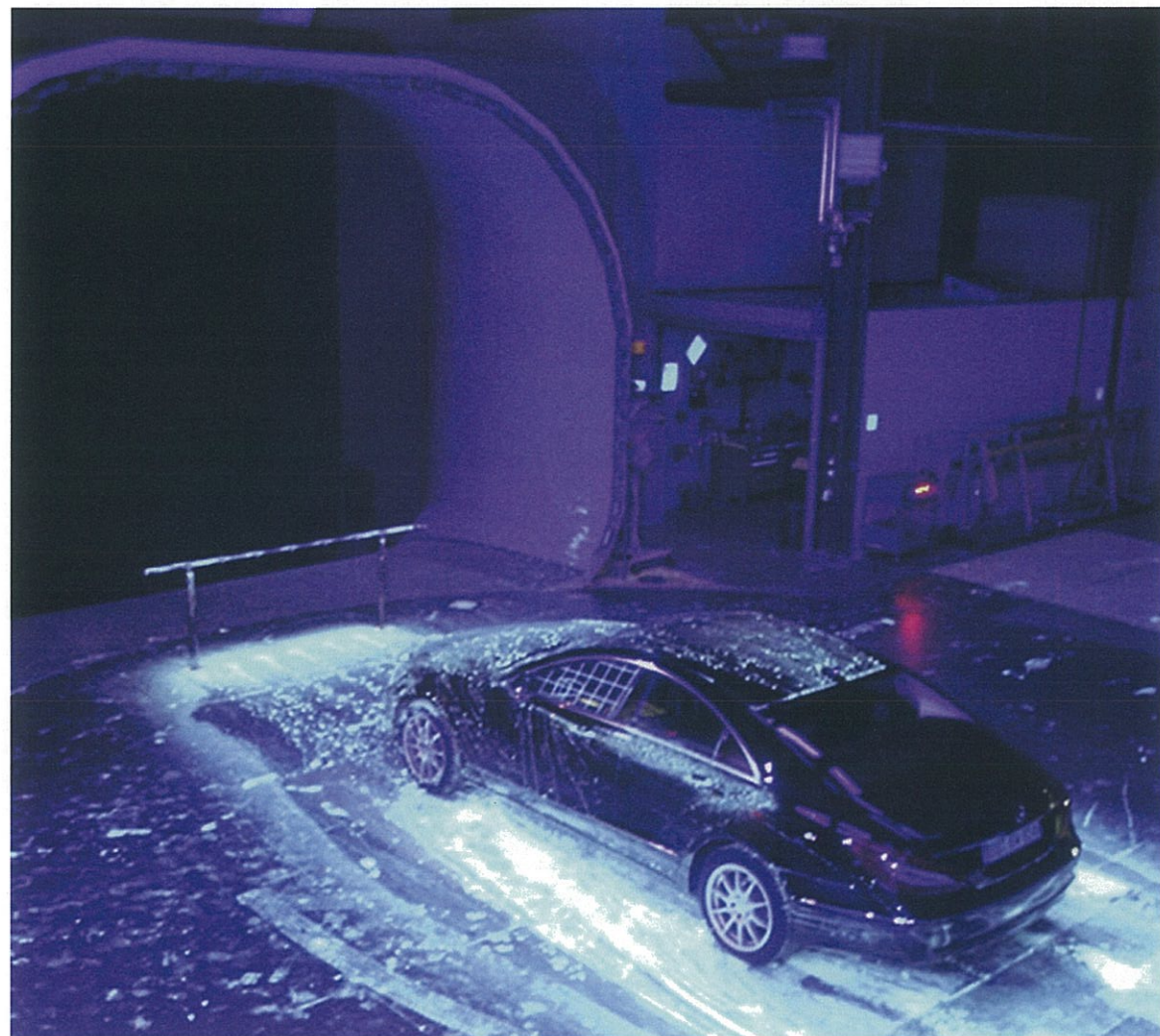


Fig.1-5-5 Daimler

車両の実用性を高めるために

これまで空気抵抗低減（燃費改善）や揚力低減（操縦安定性向上）の話をしてきたが、空力デザインは以下に示す車両の実用性などにも深く関係している。

- ・横風特性
- ・エンジンやブレーキ周りの冷却
- ・風切り音
- ・サイドウィンドウへの雨滴の付着
- ・リアウィンドウへの泥の巻き上げ
- ・室内の換気
- ・ワイパーの浮き上がり
- ・極地（寒冷、高温）での各種実用性能

空力デザイン開発は空力6分力だけでなく、上記のように多岐にわたる項目も考慮して総合的に進めなければならない。特に各種冷却は燃費やドライバーの安全に関わるため慎重に検討すべきだ。冷却風を多く取り入れると冷却には有利だが、空気抵抗や揚力が悪化してしまうからだ。デザイン開発初期には試作車がないため、安全を見越して大きな開口を開けるのだ

が、これが後になって車両の空力性能で問題になることがある。日頃から既存車の開口面積と冷却の関係を調査し、必要最小限の開口面積を把握しておくべきだろう。なお、開口面積は入り口付近の隙間シールと出口形状などによって最適な面積が変わることも忘れてはならない。

電気自動車のようにエンジンをうけない車が登場して特に注目を浴びようになったのが風切り音（空力騒音）である。モーターで走行すると、それまでエンジン音で掻き消されていた風の音が気になってくる。例えばドライバーのすぐそばにあるドアミラーから発生する風切り音は大きな騒音の音源だ。日産リーフはこのミラーから発生する空力騒音を低減する狙いでヘッドライトの形状に工夫を凝らしている。ヘッドライトを山形にすることで流れを二手に分け、ミラーに直撃する流れを弱めているのである。

これら以外のサイドウィンドウの雨水付着やリアウィンドウへの泥の巻き上げ、ワイパーの浮き上がりなど、どれも安全な走行に欠かせない項目ばかりであり、空力デザインが車両開発でいかに重要かが理解できよう。

(Fig.1-5-1,2,3,4,5)

Improving a vehicle's utility

Up to here we have discussed such issues as reducing drag (improving fuel efficiency) and decreasing lift (improving steering stability), but aerodynamic design is also intimately related to the elements of a vehicle's utility listed below.

- Crosswind characteristics
- Cooling of the engine and brake area
- Wind roar
- Adhesion of raindrops to the side windows
- Kicking up of mud onto the rear window
- Cabin ventilation
- Windshield wiper uplift
- Various elements of practical performance in extreme conditions (cold and heat)

Aerodynamic design development must proceed in a comprehensive manner, taking into account not only the six components of aerodynamic force but also the elements listed above. In particular, cooling of the different parts must be considered scrupulously, because the driver's safety is involved. As discussed in chapters 1 and 2, taking in large quantities of cooling air is advantageous in terms of cooling, but has a negative effect on drag and lift. Since there is no prototype in the early stages of design

development, openings are made large in consideration of safety, but later on this sometimes proves problematic in terms of the vehicle's aerodynamic performance. Designers should routinely examine the relationship between the area of the openings and cooling efficiency on existing cars and grasp the minimum area the openings are required to have. They must also not forget that the optimum area of the opening depends on the presence of clearance seals near the entrance, the shape of the outlet, and so forth.

With the appearance of engineless cars such as electric vehicles, particular attention is now being given to wind roar (air noise). When running on motor, occupants are more aware of the sound of the wind, since it is no longer drowned out by the sound of the engine. For example, the wind roar generated by the side mirror located just next to the driver is a major source of noise. On the Nissan Leaf, the headlights are given a special shape in the aim of reducing the air noise generated by the side mirrors. The chevron shape of these headlights splits the flow in two, weakening the wind that hits the mirrors directly.

Such issues as the adhesion of rain droplets to the side windows, the kicking up of mud onto the rear window and windshield wiper uplift are all essential in terms of driving safety. This demonstrates the importance of aerodynamic design in the development of the body. (Figs. 1-5-1 to 1-5-5)

Boundary layer and the separation of the flow



Fig.11-1-1

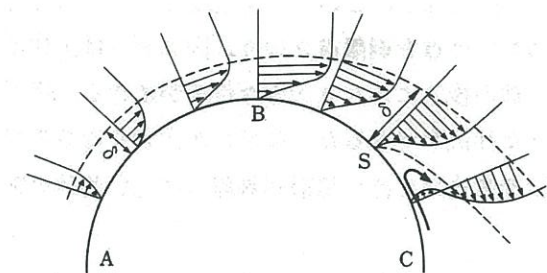


Fig.11-1-3, Ref.48

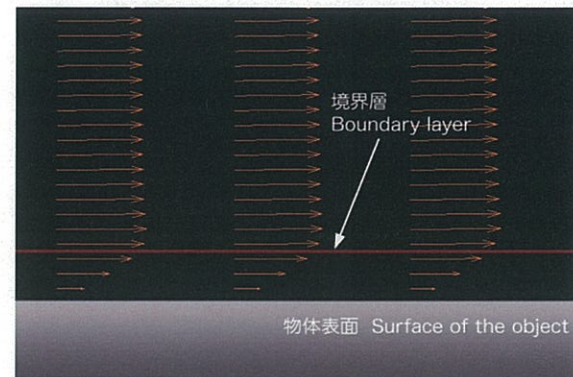


Fig.11-1-2

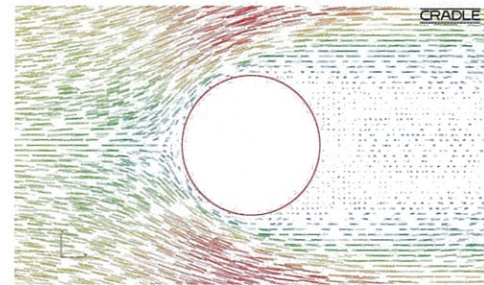


Fig.11-1-4 [CradleViewer]

ため、物体の空気抵抗などに大きな影響を与える。自動車の場合、流れはルーフやトランクの後端で剥がれて大きな後流領域を形成する (Fig.11-1-5)。いっぽう航空機の翼の場合は後端が緩やかに収束しているので流れの剥離に伴う後流領域はほとんど見られない (Fig. 11-1-6)。そのため巡航状態の翼の空気抵抗は一般的な車の 1/10 にも満たないのである。

粘性の作用で境界層が発達し、流れが剥がれると剥離点の後方では逆流が生じて渦を形成し (Fig.11-1-7)、物体後方の圧力が低くなる (Fig.11-1-8)。物体後方の圧力が低くなるということは、物体を後ろに引く力が働くということである。つまり物体の前面には衝突する流れによる後ろに押す圧力、背面には後ろに引っ張る力が作用していて、どちらの面にも後ろ向きの圧力が働くのである。これが、圧力による空気抵抗すなわち圧力抵抗である。

このように流れの剥離は空気抵抗に大きな影響を及ぼすが、この剥離点の位置は境界層が層流か乱流かによって変化するので注意が必要だ (層流と乱流の詳細は次節参照)。結論的には境界層は層流よりも乱流が好ましい。境界層内部が乱流になると、境界層内部の渦が外部の速い流れのエネルギーを多く取り込むため、境界層がパワフルで剥離しにくくなり、剥離点が後方に移動するのだ (Fig.11-1-9, 10)。すると物体後方の後流 (ウェイク) 領域が縮小して空気抵抗が減少するのである。ゴルフボールにディンプル (くぼみ) が設けられていることや、サメの肌に突起が付いていること、空を飛ぶ鳥の肌が毛で覆われているのも物体表面付近の境界層を乱流にするためである。

流体の粘性と境界層

水をはじめ、あらゆる流体には粘性と呼ばれる性質がある。スプーンでコップの水を掻き回すのと蜂蜜を掻き回すのでは要する力がまったく違う。これはそれぞれの流体が持っている粘性が異なるからだ (Fig.11-1-1)。このような粘性は空気のような気体にも存在するのだが、粘性があると流体は物体表面に付着する (速度がゼロになる) ので、物体表面近くには速度の遅い薄い層状の領域ができる (Fig.11-1-2)。これを「境界層」と呼ぶ。

境界層の中では粘性摩擦により運動エネルギー (流れの勢い) が弱くなる。そのため、流れの進行を妨げる圧力勾配があると流れは物体に沿って続けることができなくなって途中で剥がれてしまう (Fig.11-1-3)。進行を妨げる圧力勾配とは進行方向に向かって圧力が上昇していく状態のことである。ボールが高いところから低いところへ落ちていくように、空気は圧力の高いところから低いところへ流れようとするので、圧力が高まる勾配のところでは流れの勢いが弱くなっていくのである。自転車でも勢いを付けて坂道を登ろうとしても途中で力尽きて足をついてしまう。流れの剥離もそんなイメージでとらえると理解しやすいのではないかな。この流れの剥がれる位置を剥離点と呼ぶ。

流れの剥離と空気抵抗

流れが剥離すると渦を伴う後流 (wake: ウェイク) (Fig. 11-1-4 [CradleViewer]) を形成して流体のエネルギーを損失する

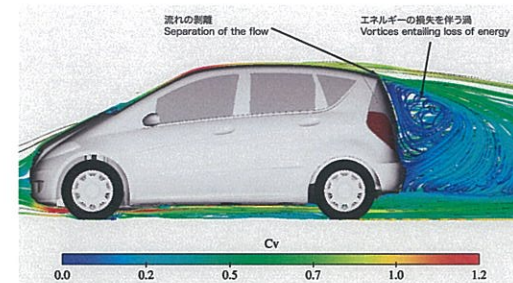


Fig.11-1-5 Daimler

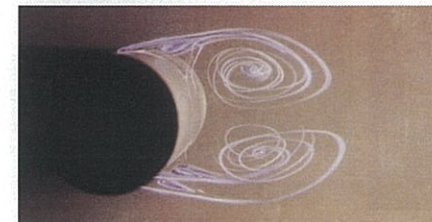


Fig.11-1-7 ATLAS OF VISUALIZATION, PERGAMON PRESS

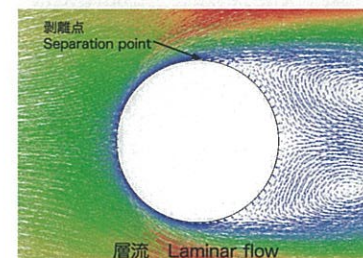


Fig.11-1-9

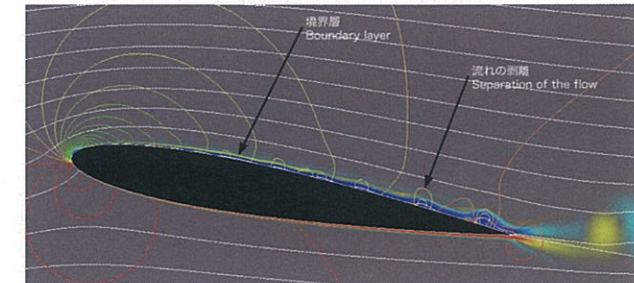


Fig.11-1-6 計算流体力学研究所

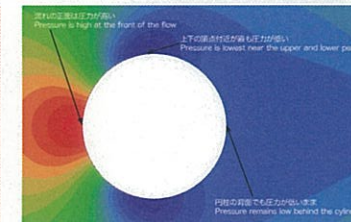


Fig.11-1-8



Fig.11-1-10

Fluid viscosity and boundary layer

Water and all other fluids have the property of viscosity. Using a spoon to stir a glass of water requires a very different amount of force than stirring a glass containing honey. This is because the two fluids have different viscosities (Fig. 11-1-1). This property of viscosity exists in air and other gases as well. Viscosity causes the fluid to adhere to the surface of an object (where the velocity is zero), forming an area with a thin layer of low velocity near the object's surface (Fig. 11-1-2). This is called the "boundary layer".

In the boundary layer, the kinetic energy (the momentum of the flow) is weakened by the viscous friction. Because of this, if there is a pressure gradient obstructing the travel of the flow, the flow can no longer continue along the object and separates from it (Fig. 11-1-3). This pressure gradient obstructing the travel of the flow is the status in which the pressure rises in the direction of travel. Like a ball drops from a high place to a low place, air flows from where the pressure is high to where it is low, so in places with a gradient in which the pressure increases, the momentum of the flow weakens.

When riding a bicycle, even if you gain momentum before climbing a hill, at some point you run out of energy and the bicycle stops. Imagine this and you can probably understand the separation of the flow better.

Flow separation and drag

This separation of the flow forms a wake (Fig. 11-1-4 [CradleViewer]) with eddies causing a loss in the fluid's energy, greatly affecting the object's air resistance (drag). Taking automobiles as an example, the flow separates at the rear edge of the roof and trunk lid, and a large slipstream is formed (Fig. 11-1-5). In the case

of aircraft wings, the rear edge of the wing gently converges from the top and bottom, so there is almost no slipstream (Fig. 11-1-6). Thus, the drag of a cruising aircraft's wings is less than 1/10th that of an ordinary car.

When the boundary layer develops due to the action of viscosity and the flow separates, a wake is generated past the separation point, eddies form (Fig. 11-1-7), and the pressure behind the object decreases (Fig. 11-1-8). This decreased pressure behind the object acts as a force pulling the object backwards. In other words, pressures pushing the object to the rear are exerted both in the front and at the back, in the front by the flow colliding on the object, in the rear through the pressure pulling the object backwards (negative pressure). This is air resistance caused by pressure, in other words pressure resistance.

In this way, separation of the flow greatly affects air resistance. The position of the separation point differs depending on whether the airflow at the boundary layer is laminar or turbulent (see the following section for details on laminar and turbulent flows). A turbulent flow at the boundary layer is preferable to a laminar flow in terms of reducing air resistance. When the flow inside of the boundary layer is turbulent, the eddies inside the boundary layer take in much of the energy of the fast flow on the outside, so the boundary layer separates with more difficulty, moving the separation point towards the back (Fig. 11-1-9, 10). As a result, the area of the flow at the rear of the body (the wake) is reduced, thereby decreasing air resistance. The dimples on golf balls, the small bumps on shark skin and the hair covering the skin of flying birds all create a turbulent flow in the boundary layer near the object's surface. There is truly a lot we can learn from the natural world.

The Reynolds number

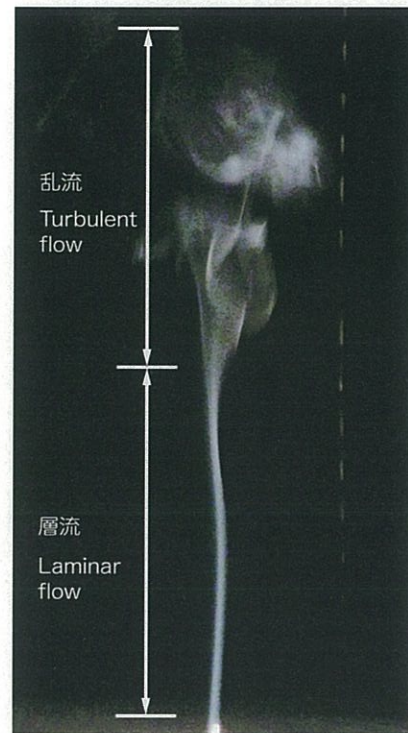


Fig.11-2-1

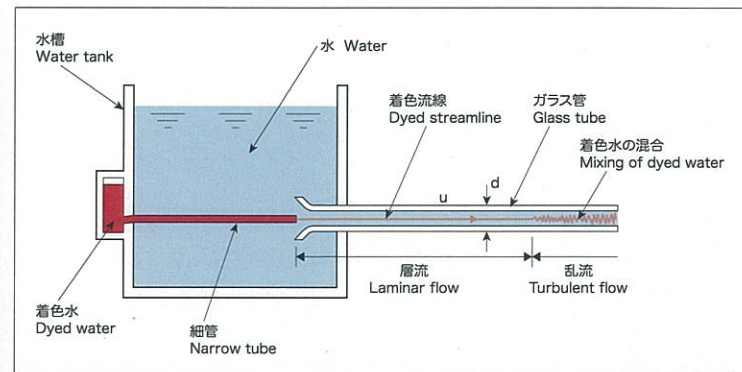


Fig.11-2-2

レイノルズ数 Reynolds number

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

U : 主流速度 (Flow velocity)
 L : 代表長さ (Length)
 ν : 動粘性係数 (dynamic coefficient of viscosity)

Fig.11-2-3

Osborne Reynolds
(1842-1912)

層流と乱流を区別するレイノルズ数

流れには層流と乱流がある。風のない部屋でたばこや線香の煙を観察すると、火のそばには真っ直ぐ上に伸びる線状の煙が見られるが、上方では煙の流れは乱れて広がる (Fig.11-2-1)。この下方のまっすぐ上昇する流れが「層流」で、上方の乱れた流れが「乱流」である。そして、層流から乱流へ遷移する流れの条件を実験で調べたのが、弱冠 26 歳で 1868 年にマンチェスター・オーエンス・カレッジの初代工学部教授に招かれたオズボーン・レイノルズ (1842 - 1912) である (Fig.11-2-2)。レイノルズは円管内の流れに染料を乗せ (Fig.11-2-2)、流速や円管の直径などを変化させて流れが層流から乱流に遷移する条件を調査し、慣性力と粘性力の比を表わすレイノルズ数という無次元数によって分類した (Fig.11-2-3)。

このレイノルズ数は物体まわりの流れを分類する上でも極めて重要なパラメーター (変数) である。Fig.11-2-4 は円柱まわりの流れの様子をレイノルズ数で分類した図である。レイノルズ数が十分に小さい場合 ($Re < 1$) は円柱後方の流れに渦は見られない (a)。レイノルズ数が $1 < Re < 10$ 程度になると円柱後方に上下対称な双子渦が見られるようになり (b)、さらにレイノルズ数が $10 < Re < 10^2$ 程度になると円柱後方に回転の向きが異なる渦が交互に放出されるカルマン渦が見られるようになる (c: Fig.11-2-6 [DVD-ROM])。このカルマン渦が発生すると物体が振動する。サッカーボールが揺れるのはそのためだ。

150

また、カルマン渦は自動車でも問題となり、ロッドアンテナやスキーキャリアなどから生ずるエオリアン・トーンと呼ばれる流体騒音の原因にもなっている。

そして、さらにレイノルズ数が大きく、 $10^2 < Re < 10^5$ になると規則的な渦はなくなり後流は複雑に乱れた状態になる。ややこしい話だが、後流が乱れているといっても境界層内部は層流である。前節でも話したように、境界層が層流だと勢いが弱いので比較的早い段階で流れが剥がれる。そのため後流領域は大きい (d)。ところが、さらにレイノルズ数が大きく、 $10^5 \leq Re$ になると境界層が乱流に遷移して勢が増し、剥がれにくくなるため後流領域が小さくなるのである (e)。

このように物体の周囲の流れはレイノルズ数によって様子が異なるため、空気抵抗係数もレイノルズ数によって変化する (Fig.11-2-5)。上述の境界層が層流から乱流へ遷移する $10^5 < Re < 10^6$ 付近を見ると、空気抵抗係数値が大きく低下している。この魅力的な状態をレイノルズ数を変えずに実現するのが前節でも述べたゴルフボールのディンプルである。このディンプルに近いものを自動車のルーフエンドやサイドパネル、リアディフューザーなどに設けると効果がありそうだ。

さらに大きなレイノルズ数、 $Re > 10^7$ 程度になると空気抵抗係数 (C_d) 値は比較的安定する。そのため、自動車の空気抵抗係数を計測する場合はこの安定したレイノルズ数領域 ($Re > 10^7$) で計測するように流れの速度を設定すると良い。風速 50m/s (180km/h) にすれば十分安定するだろう。

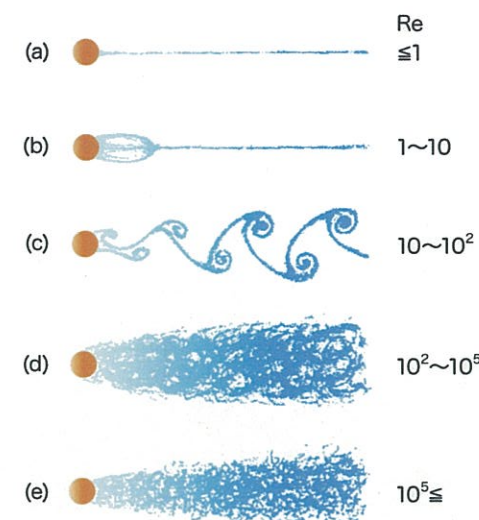


Fig.11-2-4 Ref. 46

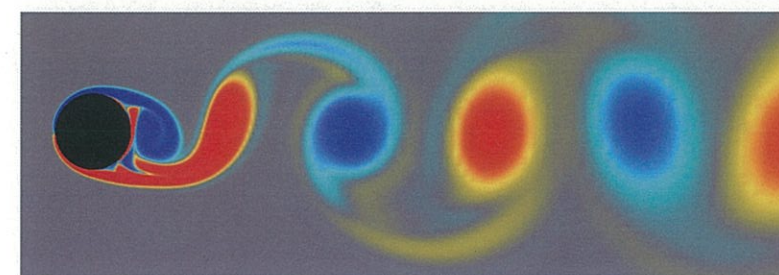


Fig.11-2-6

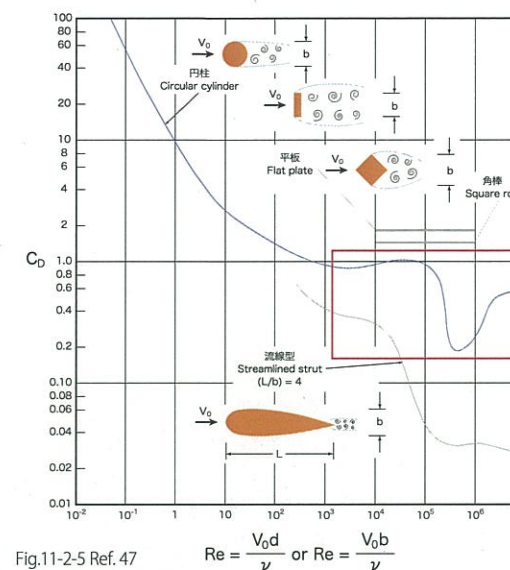


Fig.11-2-5 Ref. 47

$$Re = \frac{V_0 d}{\nu} \text{ or } Re = \frac{V_0 b}{\nu}$$

The Reynolds number – distinguishing between laminar and turbulent flow

Flows can be laminar or turbulent. If you observe the smoke of a cigarette or incense in a windless room, you see the smoke rising in a vertical line near the source, but further up the flow becomes disturbed and spreads out (Fig. 11-2-1). The vertical flow below is a "laminar" flow, while the disturbed flow above is the "turbulent" flow. The conditions by which the flow shifts from laminar to turbulent were examined by a man named Osborne Reynolds (1842 - 1912), who in 1868, at the young age of 26, became the first engineering professor at the Owens College in Manchester (Fig.11-2-2).

Reynolds placed dye in flows inside pipes (Fig. 11-2-2), varying the current velocity, the diameter of the pipe, etc., to study the conditions for the transition from laminar to turbulent flow, and classified this using a dimensionless coefficient expressing the ratio of inertial forces to viscous forces. This ratio came to be called the "Reynolds number" (Fig. 11-2-3).

This Reynolds number is an extremely important parameter for classifying the flow around objects. Figure 11-2-4 shows the flow around a cylinder classified according to the Reynolds number. If the Reynolds number is low enough ($Re < 1$), there are no eddies behind the cylinder (a). With a Reynolds number of $1 < Re < 10$, there are twin eddies symmetrical at the top and bottom, and with a Reynolds number of $10 < Re < 10^2$, Karman vortices - eddies turning in opposite directions - are released alternately behind the cylinder (c: Fig. 11-2-6 [DVD-ROM]). When Karman vortices are generated, a force causing the object to vibrate is produced; this is what causes a

volleyball or soccer ball to shake.

Karman vortices also cause problems for cars. They are the cause of the fluid noise called "Aeolian tone" produced by rod antennas or ski carriers.

At even higher Reynolds numbers of $10^2 < Re < 10^5$, there are no regular eddies, the flow is complex and disturbed. Even if the flow is disturbed, however, the flow inside the boundary layer is laminar. As described previously, if the flow at the boundary layer is laminar, the momentum is weak so the flow separates at a relatively early stage. Because of this, the wake area is large (d). However, with even higher Reynolds numbers of $10^5 \leq Re$, the flow at the boundary layer becomes turbulent, gains momentum and separates less easily, so the wake area is smaller (e).

In this way, the flow around objects appears different according to the Reynolds phenomenon, and the air resistance coefficient also differs according to the Reynolds number (Fig. 11-2-5). When we look at the area around $10^5 < Re < 10^6$ where the boundary layer flow shifts from laminar to turbulent as described above, the coefficient of drag decreases substantially here. The dimples on golf balls mentioned above achieve this desirable state with no change in the Reynolds number. It may be effective to apply something like these dimples to the roof end, side panel or rear diffuser of cars.

At higher Reynolds numbers, around $Re > 10^7$, the coefficient of drag (C_d) is relatively stable, so when measuring a car's air resistance coefficient, the velocity of the flow should be set so that the drag is measured in this stable Reynolds number range ($Re > 10^7$). The Reynolds number is sufficiently stable with a vehicle speed of 50 m/s (180 km/h).

151

特別付録 DVD-ROM『クレイドル・ビューワー』の使い方

Special Supplement: Using the "CradleViewer" DVD-ROM

本書 DVD-ROM に収録されている CradleViewer はソフトウェアクレイドル社のポストプロセッサで作成した図やアニメーションを単体で表示する簡易ビューワーです。各章の図番号に [CradleViewer] と記されている CFD (空力シミュレーション) 結果を表示することができます。

CradleViewer, which is included on the DVD-ROM, is a simple tool for viewing objects and/or animations created with Cradle's post processor. It can be used to view the CFD results wherever [CradleViewer] is indicated after the diagram numbers.

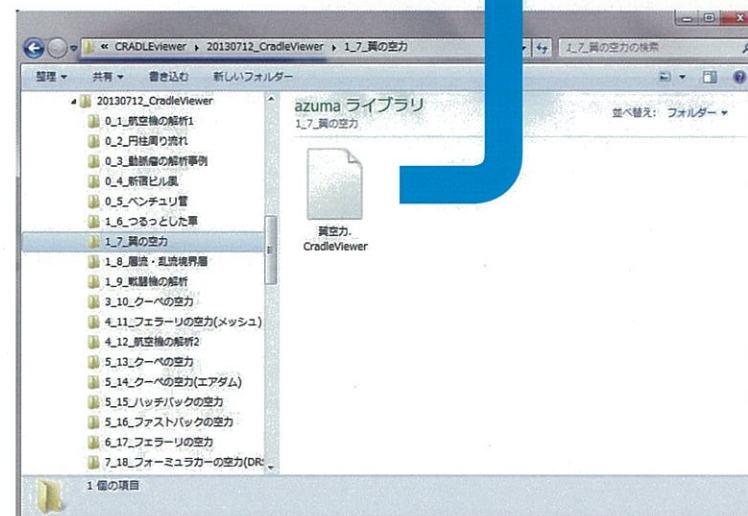
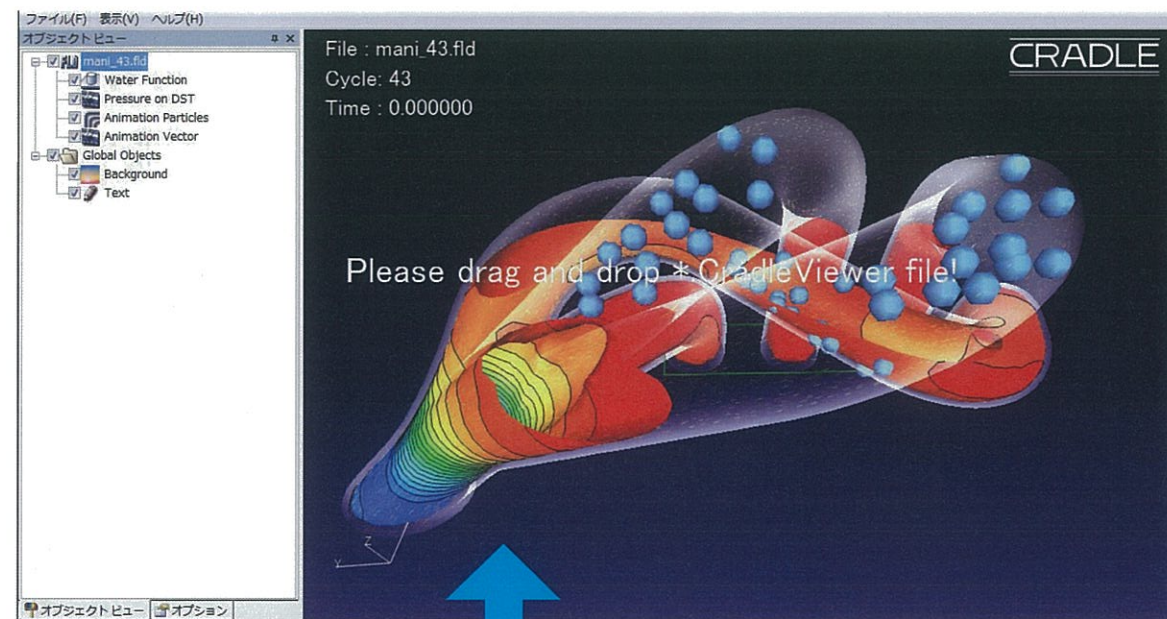
■ CradleViewer の起動

DVD-ROM に収録されている「CradleViewer_Bi32.exe」を起動してください。

■ Launching CradleViewer

Launch [CradleViewerBi32.exe] from the DVD-ROM.

<訂正> DVD-ROM 本体の解説にある "CD-ROM" の表記を "DVD-ROM" に訂正いたします。
Correction: Please correct "CD-ROM" in the commentary sentence of the DVD-ROM to "DVD-ROM".

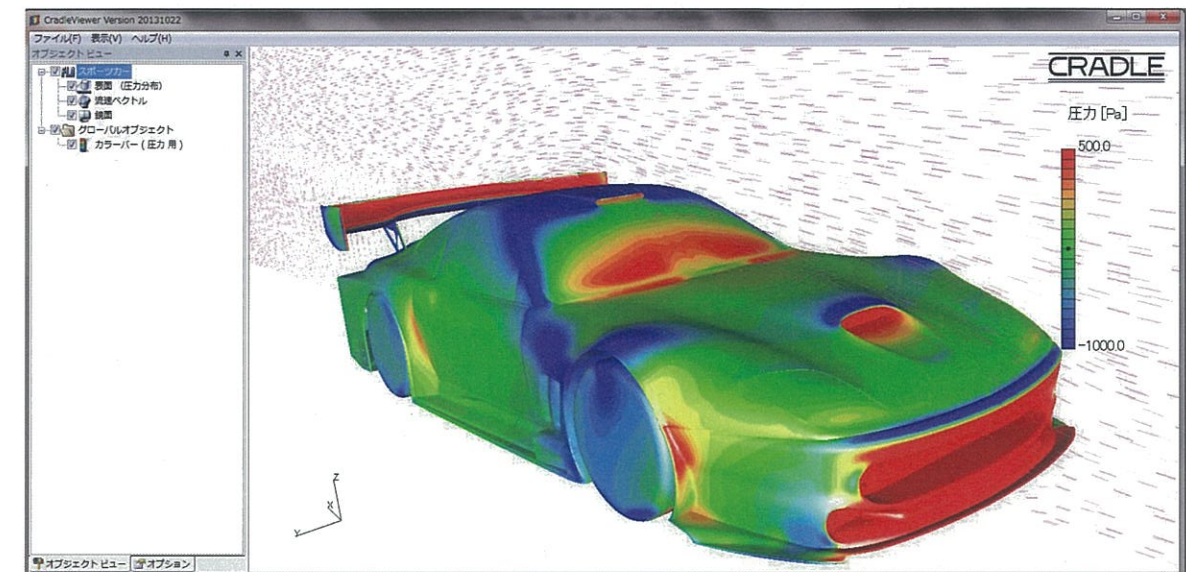


■ ファイルを開く

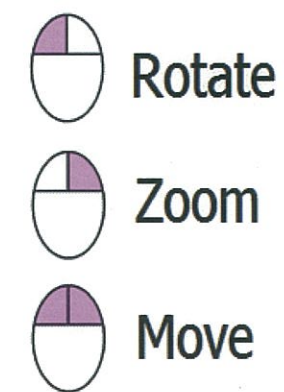
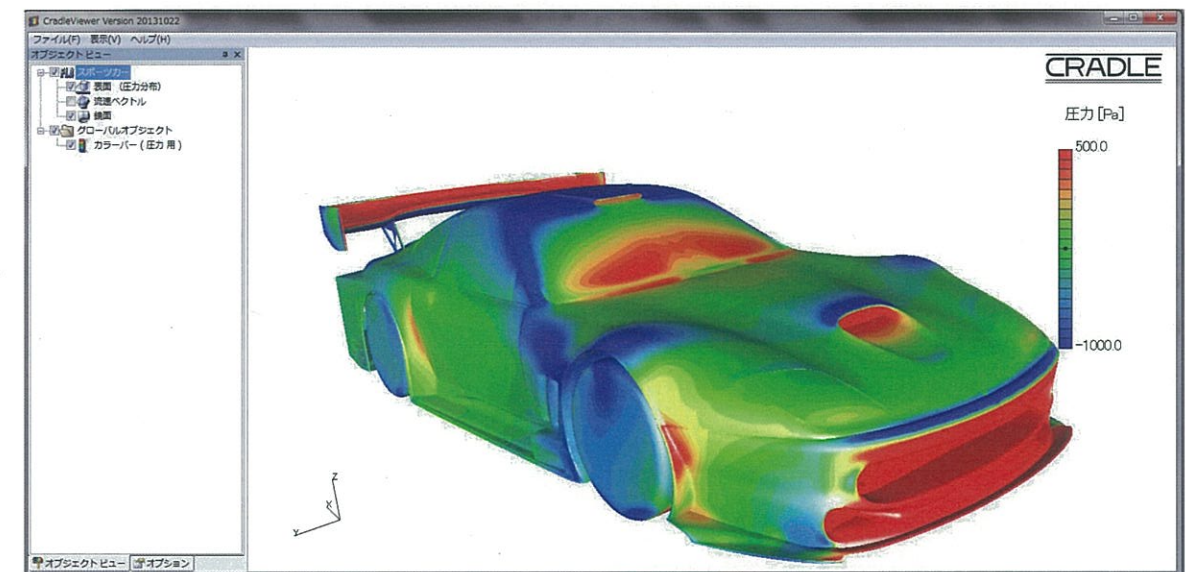
DVD-ROM に収録されている「Fig1-1-1. CradleViewer」などのファイルを Cradle Viewer のウィンドウにドラッグ＆ドロップしてください。

■ Opening a file

Drag & drop the file from the DVD-ROM (e.g. "Fig. 1-1-1 CradleViewer") to the CradleViewer window.



Window に図が表示されます。左のチェックボタンを押すと、オブジェクトごとの表示／非表示を切り替えることができます。
The image appears in the window. Click the check buttons on the left to show or hide the objects.



■ マウスの操作方法

マウスの操作方法は左図のとおりです。

■ Operating the mouse

Operate the mouse as shown at the left.

参考文献 Reference

1. CAR STYLING 別冊『おもしろ自動車空力学』武藤真理 Automotive Aerodynamics, Shinri Muto, 三栄書房
2. "CAR STYLING" : No.183, No.185, No.186, No.187, No.188, No.189, No.190, No.192, No.193, 三栄書房
3. "Aerodynamics of Road Vehicles", Wolf-Heinrich Hucho, Society of Automotive Engineers, Inc.
4. 『自動車のデザインと空力技術』小林敏雄, 農沢隆秀, 朝倉書店
5. 『空力とカーデザイン』畔柳俊雄, グランプリ出版
6. 『スピードのかたち』折口透, グランプリ出版
7. "Fundamentals of Aerodynamics", John D. Anderson, Jr., McGraw-Hill
8. "Introduction to Flight", John D. Anderson, Jr., McGraw-Hill
9. "Low-Speed Aerodynamics", Joseph Katz, Allen Plotkin, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
10. "Race Car Aerodynamics: Designing for Speed", Joseph Katz, Bentley Publishers
11. "Road Vehicle Aerodynamic Design", R H Barnard, MechAero Publishing
12. "Competition Car Aerodynamics", Simon McBeath, Haynes Publishing
13. 『流体力学』日野幹雄, 朝倉書房
14. 『数値流体力学』越塚誠一, 矢川元基, 山川宏, 培風館
15. 『流れのシミュレーションの基礎!』河村哲也, 山海堂
16. "Vehicle Aerodynamics", V. Sumantran, Gino Sovran, SAE, PT-49
17. "Vehicle Aerodynamics Design and Technology", SAE, SP-1600
18. "Vehicle Aerodynamics 2003", SAE, SP-1786
19. "Vehicle Aerodynamics 2004", SAE, SP-1874
20. "Vehicle Aerodynamics 2007", SAE, SP-2066
21. "Vehicle Aerodynamics 2008", SAE, SP-2151
22. "Vehicle Aerodynamics 2011", SAE, SP-2305
23. 『自動車デザイン 歴史・理論・実務』釜池光夫, 三樹書房
24. 『自動車の基本計画とデザイン』齋藤孟, 山中旭, 山海堂
25. "How to Design Cars Like a Pro", Tony Lewin, Ryan Borroff, Motorbooks
26. 『F1 テクノロジーの最前線』檜垣和夫, ソフトバンク クリエイティブ
27. "Honda R&D Technical Review 2009 F1 Special"
28. 『自動車におけるトータルエアロダイナミクス』炭谷圭二, 自動車技術会シンポジウム No.20124285
29. 『野球の変化球と流れ』姫野龍太郎, ながれ 20 (2001)
30. 『ローリングロード付新風洞の紹介』(学術講演会前刷集 No.153-10), 是本健介ほか, 社団法人自動車技術会
31. 『新設ムービングベルト付 50%スケール風洞』(学術講演会前刷集 No.4-08), 臼井美智子ほか, 社団法人自動車技術会
32. 『自動車と流体力学』炭谷圭二, 前田和宏, 一之瀬健一, ながれ 23 (2004)
33. 『自動車と設計技術』大河出版
34. 『Aerodynamics of the New 5 Series Model』, M. MARQUARDT, JSAE Annual Congress Proceedings No. 35-03
35. 『自動車デザイン自由度を高める流体制御デバイス』(デザイン学研究 2011), 東大輔, 石井明ほか, 日本デザイン学会第 5 支部
36. 『RACING ON No.440』三栄書房
37. 『モーターファン・デザイン①』三栄書房
38. 『モーターファン・デザイン②』三栄書房
39. 『Motor Fan Illustrated Vol.17 ランサーエボリューション X に見る自動車技術』三栄書房
40. 『Motor Fan Illustrated Vol.23 エアロダイナミクス』三栄書房
41. 『Motor Fan Illustrated Vol.71 ル・マン 24 時間』三栄書房
42. 『Motor Fan Illustrated Vol.43 スポーツカーのテクノロジー』三栄書房
43. 『Motor Fan Illustrated Vol.79 レーシングカー・エアロダイナミクス』三栄書房
44. 『Motor Fan Illustrated 特別編集 F1 のテクノロジー 4』三栄書房
45. 『Motor Fan Illustrated 特別編集 F1 のテクノロジー 5』三栄書房
46. 『乱流現象の科学』巽友正, 東京大学出版
47. "Engineering Fluid Mechanics", C. T. Crowe, J. A. Roberson and D. F. Elger, John Wiley & Sons, Inc
48. 『流体抵抗と流線型』牧野光雄, 産業図書

謝 辞

本書は国際的な CAR STYLING 誌 185 号 (2008.8) から 193 号 (2009.11) にわたって連載された『環境にやさしい自動車の空力デザイン』を集大成し加筆したものです。途中休載もあり、最後まで完成せずに連載を終了し、読者の皆様の期待に添えなかったことを深く反省し、お詫びします。しかし自動車空力デザインの解説書を望む声は多く、また関係各社の方々にも励まされて執筆を再開、ようやく上梓することができました。

導入部は流体力学としての基礎知識に始まり、自動車空力学の基本的な知識と実例、デザイン開発のプロセス、空力対策の具体例、流れの可視化、CFD の理解、最後にやや専門的な記号や数式を扱う流体力学の基礎理論を解説しました。

空力学はこれからの新しい乗り物にとってますます重要な研究分野であり、社会に大いに役立つものと確信しています。この本をきっかけに多くの方が流体力学と乗り物のデザインに興味を深めて頂けることを願っています。

最後になりましたが、私をカーデザインの世界に導き、終始ご指導のうえ、本書の監修にあたってくださった九州大学の石井明先生、そして私の基盤ともいべき航空宇宙工学をご指導くださった名古屋大学の中村佳朗先生に深く感謝申し上げます。さらに本書の出版を支援してくださったソフトウェアクレイドル社の皆様、三樹書房の皆様、各種の資料をご提供くださった関係各社の皆様、執筆・編集で多大なるご支援をいただいた CAR STYLING の藤本彰編集長に深く感謝いたします。また本書の執筆中に終始私を支えてくれた妻・久美子と長男・龍義、次男・久義に心から感謝します。

東 大輔

Acknowledgments

This book is an appended, reconstituted edition of "Sustainable Aerodynamic Design for Automobiles" originally published in a series of eight installments beginning from Issue 185 of Car Styling, the internationally-renowned car design magazine. We were sorry for readers that there were breaks during the series and that at the end were not able to complete it due to health reasons. This weighed on our conscience, but encouraged by readers around the world asking for more observations on aerodynamic design, we are happy now to finally be publishing our completed work.

The contents of this book include general knowledge on fluid dynamics as an introductory section, followed by an introduction to the basic techniques of aerodynamic design applied to passenger cars with some information on the basic process of designing cars. We have put off a basic study of aerodynamics through specialized symbols and formulae for a later date so as to keep our study accessible to non-specialists interested in aerodynamic design.

Finally, I would like to express my deepest gratitude to Kyushu University Professor Akira Ishii, who led me to the world of design and provided me thorough guidance and supervision for this publication, and to Nagoya University Professor Yoshiaki Nakamura for his guidance in aerospace engineering, which served as the foundation for my academic endeavors. I would also like to wholeheartedly thank all those at Software Cradle and Miki Press for their support on this publication, those at the various companies who provided me valuable material, and to Car Styling Editor in Chief Akira Fujimoto for his immense support on writing and editing my work. My heartfelt thanks also go to my wife Kumiko and sons Tatsuyoshi and Hisayoshi for their constant support as I wrote these pages.

Dr. Daisuke Azuma

【著者】東 大輔

久留米工業大学大学院 空力デザイン研究室 教授
博士（工学，名古屋大学 航空宇宙工学専攻）
博士論文『デルタ翼における前縁回転：後縁ジェットを用いた高揚力装置に関する研究』
2003 年，三菱自動車工業（株）入社，開発本部・スタジオ・パッケージング技術部配属
主にスポーツカーの空力デザイン開発に従事
2007 年，久留米工業大学大学院 自動車システム工学専攻 講師
2008 年，九州大学大学院 オートモーティブサイエンス専攻 非常勤講師
2010 年，久留米工業大学大学院 自動車システム工学専攻 准教授
2014 年，久留米工業大学大学院 自動車システム工学専攻 教授
研究分野：デザイン工学，自動車空力デバイス，航空機空力デバイス
外部メーカーとの自動車および二輪車用空力デバイスのデザイン共同開発
自動車デザイン開発支援システムの研究
所属学会：日本航空宇宙学会（西部支部 幹事）
自動車技術会（九州支部 学生フォーミュラ幹事）
アメリカ航空宇宙学会
日本デザイン学会
芸術工学会

【Author】

Daisuke AZUMA: Ph.D, Professor, Aerodynamic Design Laboratory, Kurume Institute of Technology. Completed his Ph. D. in Aerospace Engineering at Nagoya University in 2003. Joined Mitsubishi Motors Corporation in 2003. Assigned to the Research & Development Office's Studio Package Engineering Department. Main involved in the development of aerodynamic designs for sports cars. Obtained his Ph. D in 2006 (Nagoya University).
Research theme: Aerodynamic Design of Automotive and Aircraft. Product Design.
Member: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (Western Branch organizer), Design Research Association, Japanese Society for the Science of Design, and Society of Automotive Engineers of Japan (Kyushu Branch organizer).

【監修】石井 明

九州大学大学院 芸術工学研究院 教授
1977 年，九州芸術工科大学卒業
日本の自動車メーカーで車の外装及び内装デザインに従事した際，「空力デザイン・プロジェクト」に参画し，「芸術と工学」の両立をめざす。
1990 年春，イタルデザイン社に入社
10 年余りデザイナーとして働き，超高速車の開発では風洞実験等にも参加
2000 年秋，イタルデザイン社を退職。母校の教授に就任
2003 年，合併に伴い九州大学大学院 芸術工学研究院教授となる。
研究分野：プロダクトデザイン（特に自動車の外装および内装）
家電製品，家具等の工業製品一般のデザイン開発
イタリア人デザイナーおよびミラノ工科大学との共同研究
イタリアン・テイストの高級家具開発
およびコーディネート
所属学会：芸術工学会
日本デザイン学会

【Supervisor】

Akira ISHII: Professor, Kyushu University Graduate School of Design. Graduated from the Kyushu Institute of Design in 1977. After working in automotive exterior and interior design at a Japanese car company, participated in an aerodynamic design project aiming at fusing art and technology. Joined Italdesign in the spring of 1990, working there as a designer for nearly 10 years, participating among others in wind tunnel testing for the development for an ultra-high speed vehicle. Left Italdesign in the fall of 2000 and assumed the position of professor at his alma mater. After a merger in 2003, became professor of the Kyushu University Graduate School of Design. Research theme: Product Design (particularly automobile interiors and exteriors) and design development for home appliances, furniture and industrial products in general. Member: Design Research Association and Japanese Society for the Science of Design.

Car Aerodynamic Design

with CradleViewer

自動車空力デザイン

著 者 東 大輔

Author: Daisuke AZUMA

監 修 石井 明

Supervisor: Akira ISHII

編集長 藤本 彰

Editor Akira FUJIMOTO

編 集 カースタイリング出版

Editing: CAR STYLING Publishing Co.

デザイン 岡島敏之

Editorial design: Toshiyuki OKAJIMA

翻 訳 フィリップ・ビーム／MKC

Translator: Philip BEAHAM/MKC

発行者 小林謙一

Publisher: Ken-ichi KOBAYASHI

発行所 三樹書房

Publishing Co.: MIKI PRESS

101-0051 東京都千代田区神田神保町 1-30

1-30, Jinbocho, Chiyoda-ku, Tokyo, JAPAN 101-0051

Phone +81-(0)3-3295-5398, Fax +81-(0)3-3291-4418

印刷・製本 シナノ パブリッシング プレス

Printed by Shinano Publishing Press

Printed in Japan

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写・複製することは，法律で認められた場合を除き，著作者および出版社の権利侵害となります。個人で使用する以外の商業的印刷・映像などに使用する場合はあらかじめ弊社の版權管理部に許諾を求めてください。

落丁・乱丁本はお取り換えいたします。

© Daisuke Azuma/CAR STYLING Publishing. Co./MIKI PRESS