



2015年 高校生のためのオープンキャンパス 模擬講義
隕石落下からはじめる空気力学の世界入門
(鈴木宏二郎、新領域創成科学研究科)

東京大学大学院
新領域創成科学研究科
先端エネルギー工学専攻



GRADUATE SCHOOL OF
FRONTIER SCIENCES
THE UNIVERSITY OF TOKYO



隕石落下からはじめる空気力学の世界 “入門”

～大気圏突入、高速空気力学とか～



2015年 高校生のためのオープンキャンパス
模擬講義
8/5(水) 14:30-15:15 工学部2号館213番教室
担当: 鈴木 宏二郎(新領域創成科学研究科)



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



発端と目的

2013年2月15日、ロシアチェリャビンスクで起こった隕石落下。
地上の人や建物に大きな被害。

空気中で何かが起こった。

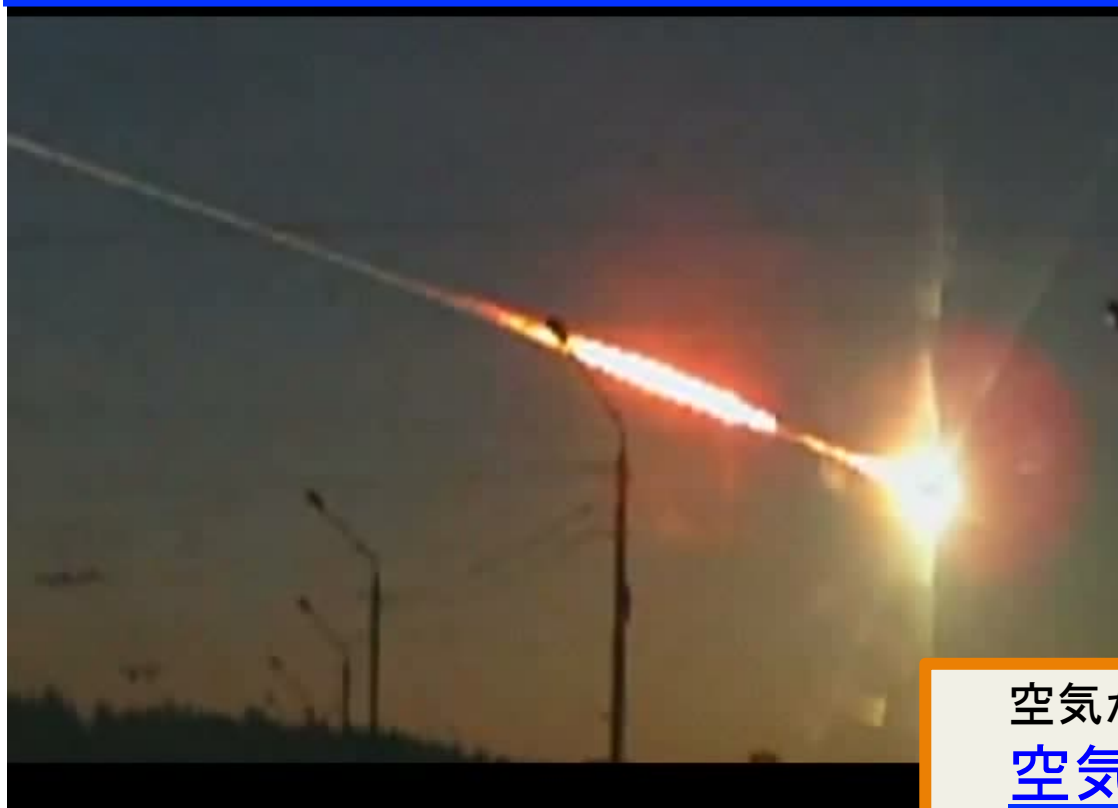
これを題材にして**高速空気力学**の世界を覗いてみよう。

キーワード: 極超音速、マッハ数、空力加熱、大気圏突入





大気圏突入は、地球から宇宙に向けて開かれた唯一の窓



直径10~20m、高度30kmくらいで、
速度は15km/sくらい、落下しながら減速。

●光っている

ということは。。

●分裂した(ダメージを受けた)

何が、どのようにして？

空気が何かをしているらしい。

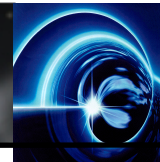
空気の運動を知る必要。

そこで、

空気力学、特に高速空気力学

ロシア隕石落下の全貌(コズミックフロント、NHK-BS、2013,6,13 on air)より





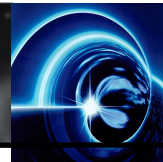
空気力学におけるものの考え方

空気力学(あるいは科学すべて?)では:

- ものごとを**相対的**にみること
- 似ている／似ていないを見つけること
(類推＝アナロジー)

が大切！





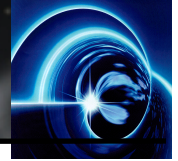
空気力学におけるものの考え方

空気力学の極意

ものごとを**相対的**にみること

空気になったつもりで考える



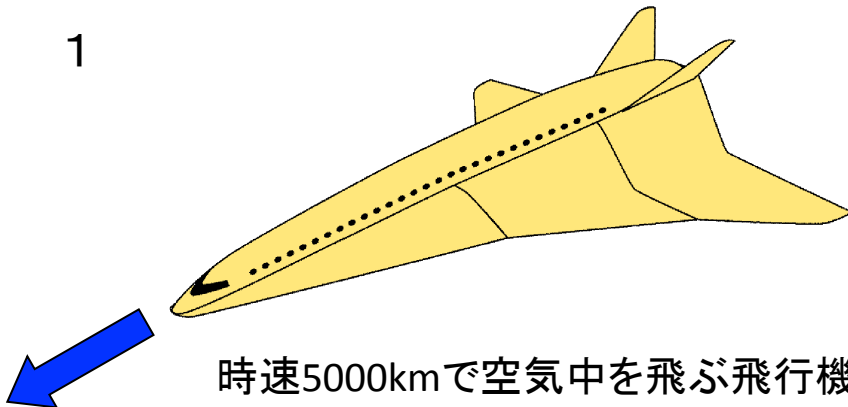


空気力学におけるものの考え方

ものごとを相対的にみること(その1)

～ 動くのは我か空気か? ～

1

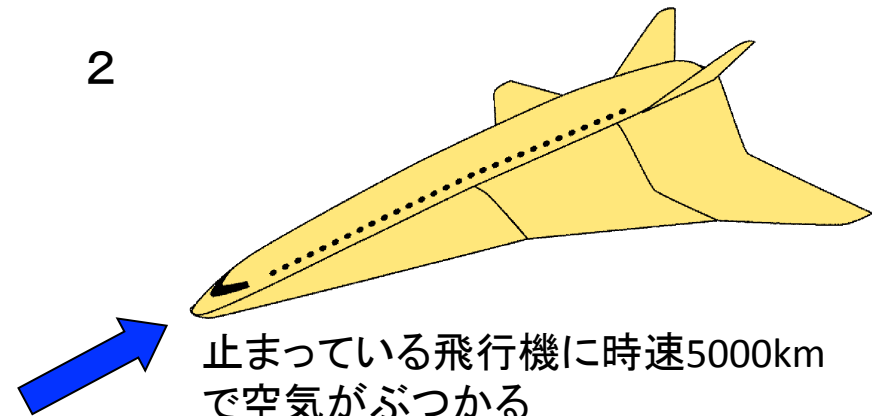


時速5000kmで空中を飛ぶ飛行機

類推)

- ・ルームランナー
- ・流れるプール
- ・電車の中に吹く風

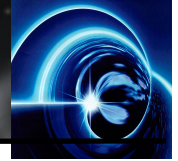
2



止まっている飛行機に時速5000km
で空気がぶつかる

両者は同じこと?
もし同じなら2の方が
考えやすい(風洞の原理)





空気力学におけるものの考え方

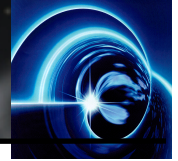
「隕石が空中を飛行すること」と
「静止した隕石に空気が逆のスピードでぶつかってくる」
ことは相対的に同じこと。

ここで「空気のエネルギー」について考える。

空気は運動することもできるし(運動エネルギー)、温度もある(熱量)。
両者を合体した

空気のエネルギー保存則:
$$\frac{1}{2}|\vec{v}|^2 + CT = \text{const.}$$

- ・ただし、1kgあたりで考える(形がないもののため、その方が便利)。
Cは熱容量(空気の場合、 $C \doteq 1000\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)
ちなみに、圧力が空気を押しつぶそうとすることで仕事をしている。



流れの速度を温度に換算すると。。

速度Vの空気をせき止めた時の温度上昇は

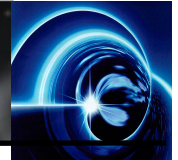
$$\Delta T(^{\circ}C) = \frac{V(m/s)^2}{2000}$$

隕石のビデオ解析から $V=10\text{km/s}$ だとすると $\Delta T=5\text{万}^{\circ}\text{C}$ ！

超高温→火の玉→隕石を加熱(空力加熱)→ダメージ

というシナリオが作れる。





空気力学におけるものの考え方(つづき)

ものごとを相対的にみること(その2)

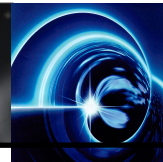
～ スピードの大小は常に相対的 ～

絶対的に「速い」なんてあり得ない。

「速い」か「遅い」かは、何かと何かを比較してはじめて言えること。

隕石まわりの空気の流れは何と比べたらいいのだろうか？





空気力学におけるものの考え方



流しでよく見る水道水の流れ:A点とB点では物(図は赤い色の棒)を置いたとき波の立ち方が違う)

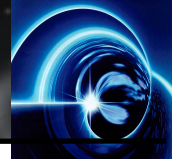
A点とB点に物を置いた時の様子を観察すると:

全体の流れを読む流れ

と

全体の流れを読まない流れ





空気力学におけるものの考え方

全体の流れを読まないところに「波」あり。
(ex. 「波風が立つ」)

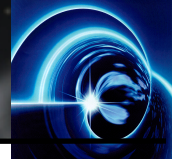
何の前触れもなく何かが起こったとき、そこに波が立つ。

流れそのものである「空気」や「水」が「全体の流れを読まない」
ことや「空気や水にとって寝耳に水のような事態」があるのか？

そもそも空気や水はどうやって「流れを読ん」でいるのだろうか？

空気や水はどうやって流れについての「情報を得」ているのだろうか？





空気力学におけるものの考え方

■「情報の伝わるスピード」より「流れのスピード」が大きい場合

「寝耳に水」状態が発生→「波」が発生

波＝**衝撃波(ショックウェーブ)**

■「情報の伝わるスピード」より「流れのスピード」が小さい場合

「流れを読む」ことが可能→「波」は立たない

※2つのスピードの**相対的關係**で現象が決まっていることに注意.





空気力学におけるものの考え方: マッハ数

空気でも「情報を伝える担い手」があれば,
水でみられたことは空気でも観測されるはず.

類推(アナロジー)を利かせる

「情報の伝わるスピード」= 音速

$$\text{流速} \div \text{音速} = \text{マッハ数}$$

※空気中を伝わる音速

(空気の温度で変化。教科書では、例えば
 $V(\text{m/s}) \sim 331.5 + 0.6t(^{\circ}\text{C})$
みたいに書いてある。)

「マッハ数が1より大きい(=超音速)」とは、空気にとって
「寝耳に水」状態が発生すること→衝撃波の発生





空気力学におけるものの考え方: マッハ数

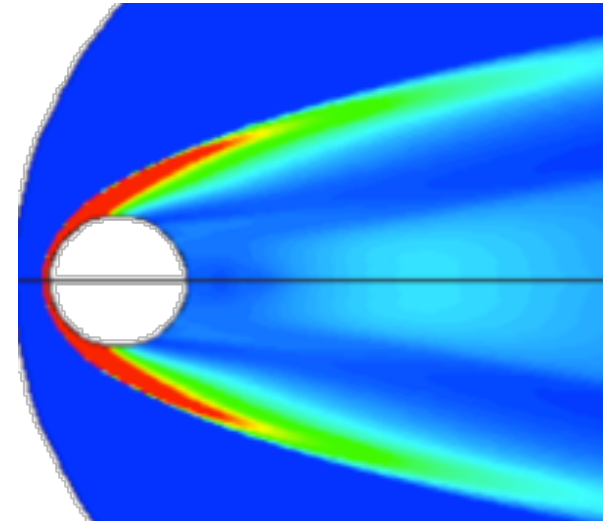
- ・マッハ数 < 1 亜音速 (あおんそく)
空気は流れが読める
 - ・マッハ数 > 1 超音速 (ちょうおんそく: 英 = スーパーソニック)
“寝耳に水”状態 → 波 (衝撃波) が立つ
“衝撃波の世界”
 - ・マッハ数 > 5 極超音速 (ごくちょうおんそく: 英 = ハイパーソニック)
極めて厳しい波の立ち方
空気のエネルギー保存則 (P.8参照) を思い出すと
“衝撃波と熱の世界”
- ※ 流れの全てが同じ状態 (一様) のこともあるし、場所によって
状態が全く異なることもある (空気力学はダイナミックな世界)



風洞：空気力学者の力強い味方

空気力学を研究するための道具

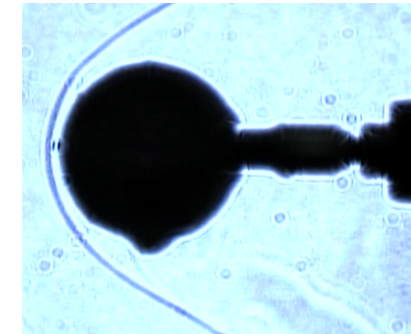
○コンピュータ(シミュレーション)

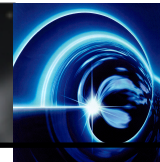


○実験(実験室実験、実際にものを飛ばす飛行実験などいろいろ)
代表的な実験装置が「**風洞**」(ふうどう)

ものを動かす代わりに空気を動かす(←その方がずっと簡単)

P6参照





隕石の飛行と同じ条件を実験室で作り出すのは無理。
アナロジーと相対的視点の精神で現象の模擬をする。(考える材料づくり)

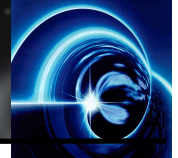
隕石の模擬: 融けるもので扱いやすいもの → それは **氷**

気流の模擬: **極超音速**の領域(**衝撃波と熱の世界の再現**)であること

ようこそ

東京大学柏キャンパス極超音速高エンタルピー風洞へ



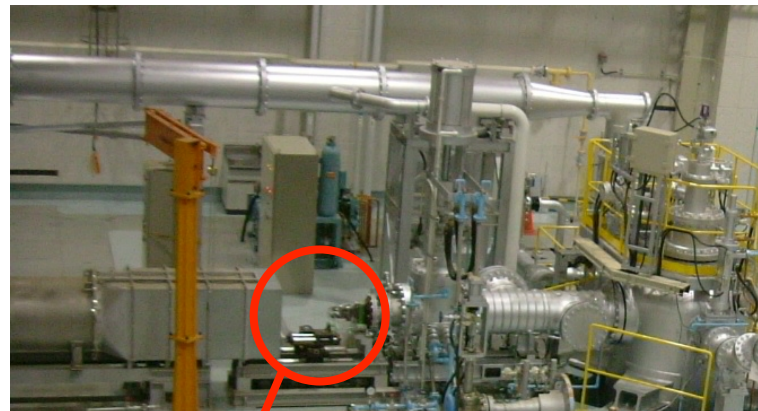


大気圏に突入する氷天体まわりの極超音速高温流れ (隕石を氷で模擬)

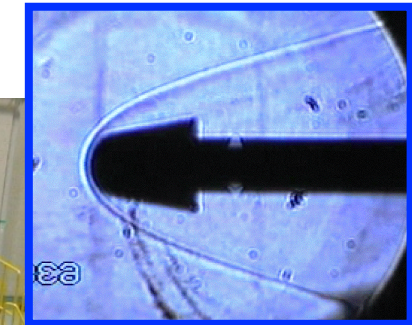
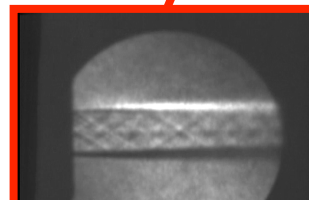
衝撃波, 空力加熱, 相変化... 等を伴う複雑な現象.
⇒ まずは**極超音速風洞実験**による**観察**が有効.

東京大学柏キャンパス
極超音速高エンタルピー風洞
(**柏 極超** で **検索**)

- ・マッハ7 (秒速約1.2km)
- ・最大 $P_0=0.95\text{MPa}$
- ・最大 $T_0=1000\text{K}$
- ・ノズル出口径200mm
(一様流コア径120mm)
- ・持続時間max. 60 s
- ・模型を射出投入可能
- ・1時間以内に1回の高頻度



High Enthalpy Combustion Wind Tunnel



Hypersonic Wind Tunnel

隕石の飛行と全く同じ条件は望めないが、現象について考える材料を与えてくれるはず。

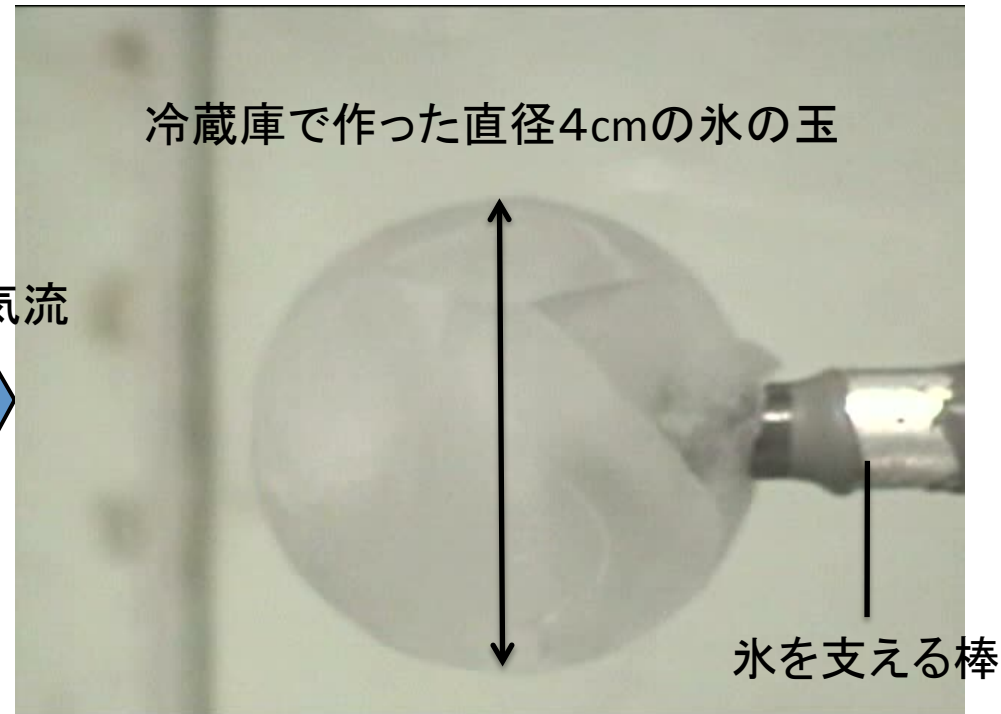
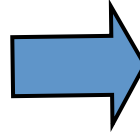


氷のアブレーション実験(相変化: 気体、液体、固体、潜熱)

答えを見る前に、
まず想像してみよう。

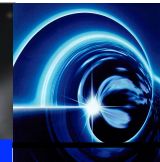
これだけの設備に
氷玉を入れる素朴な
実験ができるのは
大学ならでは。。

風洞の気流

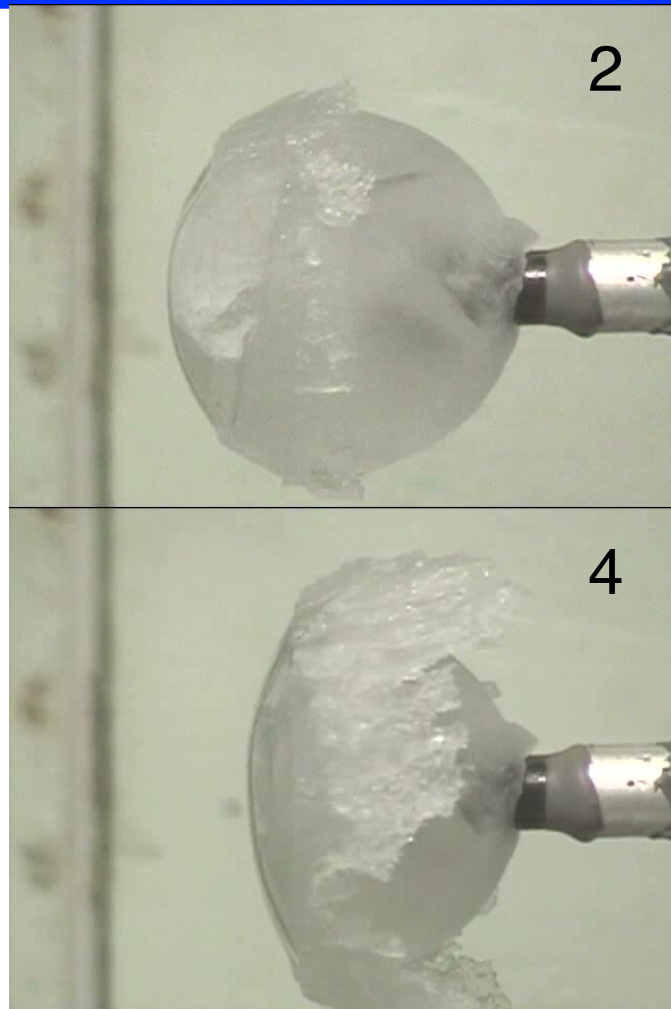
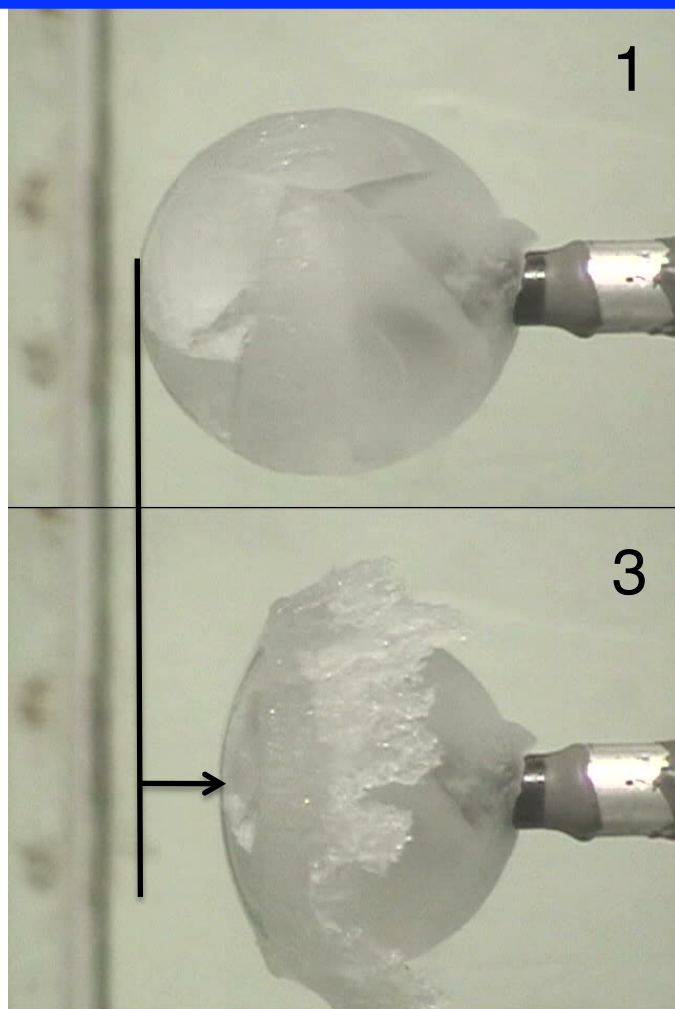


棒付きのアイスクャンデーみたいなもの
を秒速1.2kmの風に入れる
＝秒速1.2kmで飛行する氷の模擬





氷のアブレーション実験(相変化: 気体、液体、固体、潜熱)



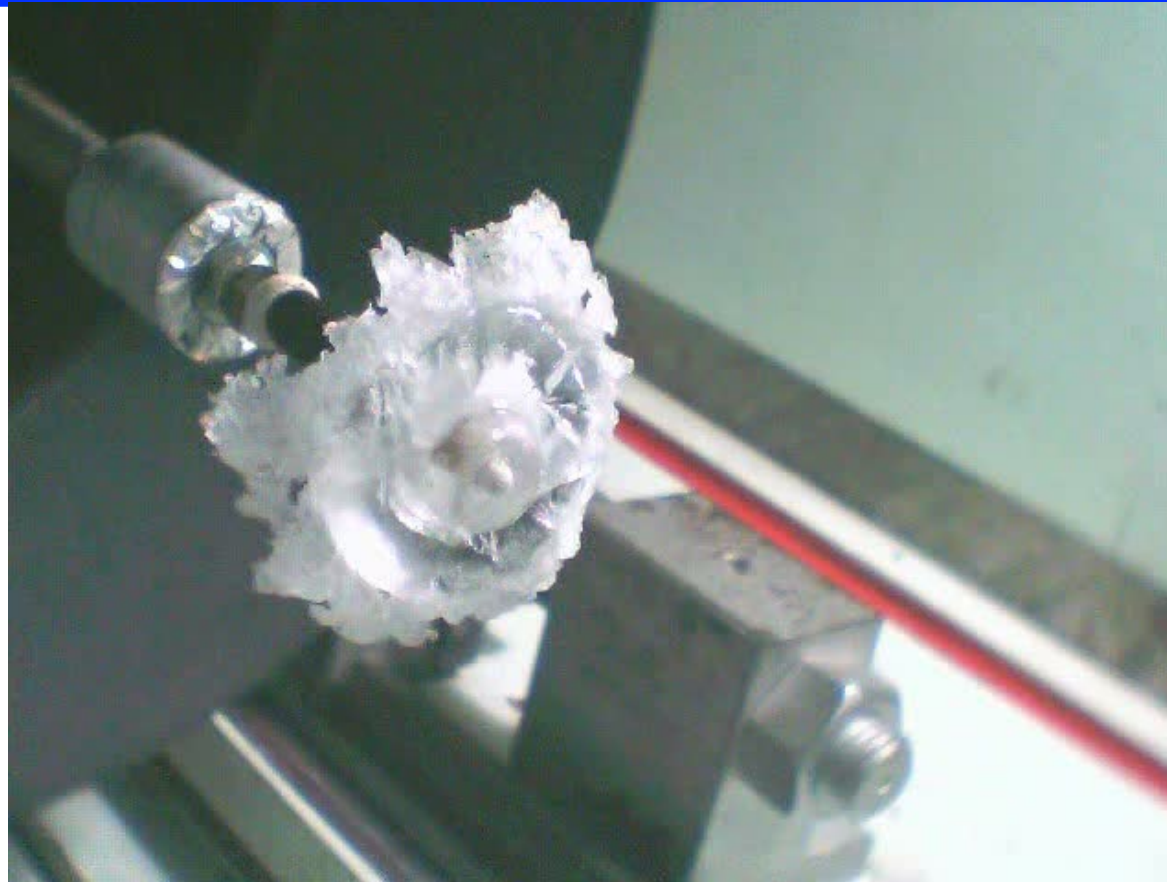
減るところもあれば、増えるところもある。

気流への投入から約30秒



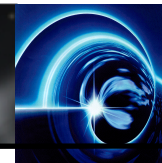


氷のアブレーション(相変化: 気体、液体、固体、潜熱)



斜め前方から見るとこんな感じ





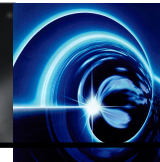
発見: 氷のスプレーション(破壊して飛散: 相変化ではない)



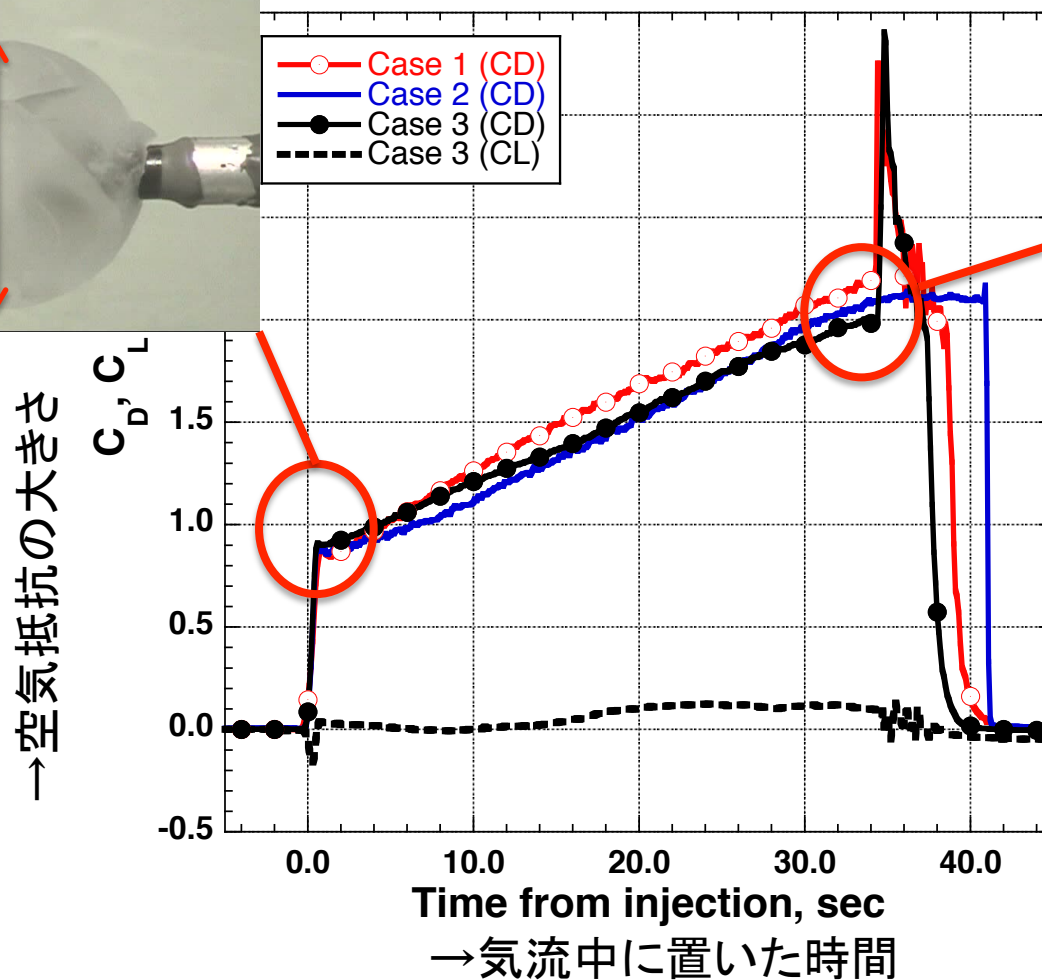
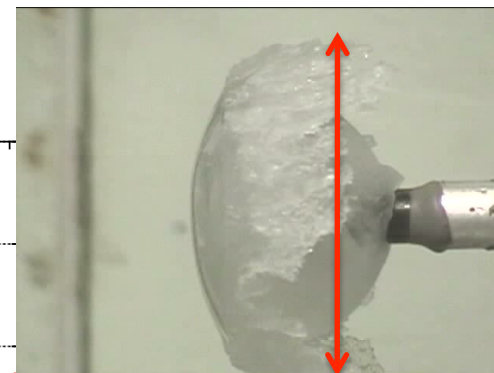
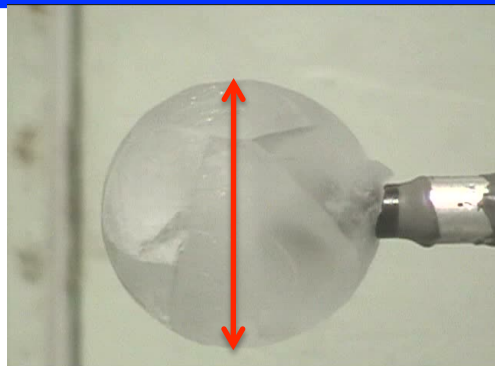
- ・直線状やカーブ状など軌跡は多様。

Run#1249 on Feb. 18, 2010 #1 P0=950kPa, T0=810-920K, t=20-54sec, Recorded at 200 Hz, Played at 10Hz.





氷の空気抵抗を測ってみよう アイスクャンデーの棒にはかりを付ける



なぜだか、氷は気流中で直径が大きくなり空気抵抗も大きくなる



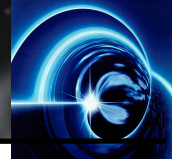
風洞で隕石空中分裂&爆発を再現したい

隕石の空中分裂&爆発のシナリオ:

- 空力加熱
- アブレーションで外殻(の一部)が失われる
- 揮発性のコアが露出
- 同時にコアに亀裂が走り、露出する表面積が急増
- アブレーションガスが一気に噴出す。。。。。

→ これを(実験室で)再現したい。





風洞で隕石まわりの流れがどうなっているか見たい ～ 流れの可視化 ～

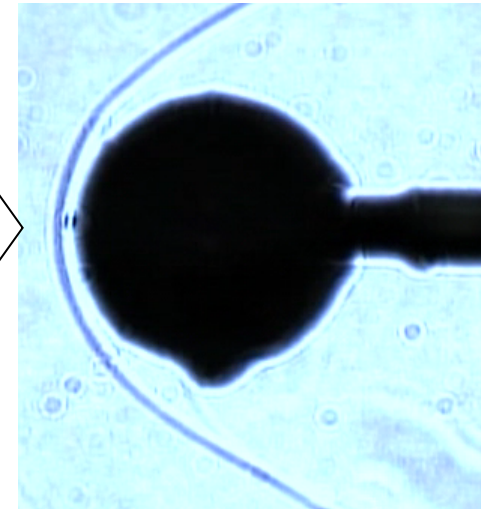
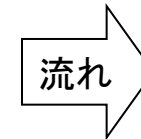
見ることは、科学における最も基本的なアプローチ。

特に空気は透明で見えないので、現象の理解には「流れの可視化」技術が必須。
(水流にインクを流してその模様を観察するのも立派な「流れの可視化」研究。)

ここでは、「シュリーレン法」を使って氷にできる衝撃波を可視化する。

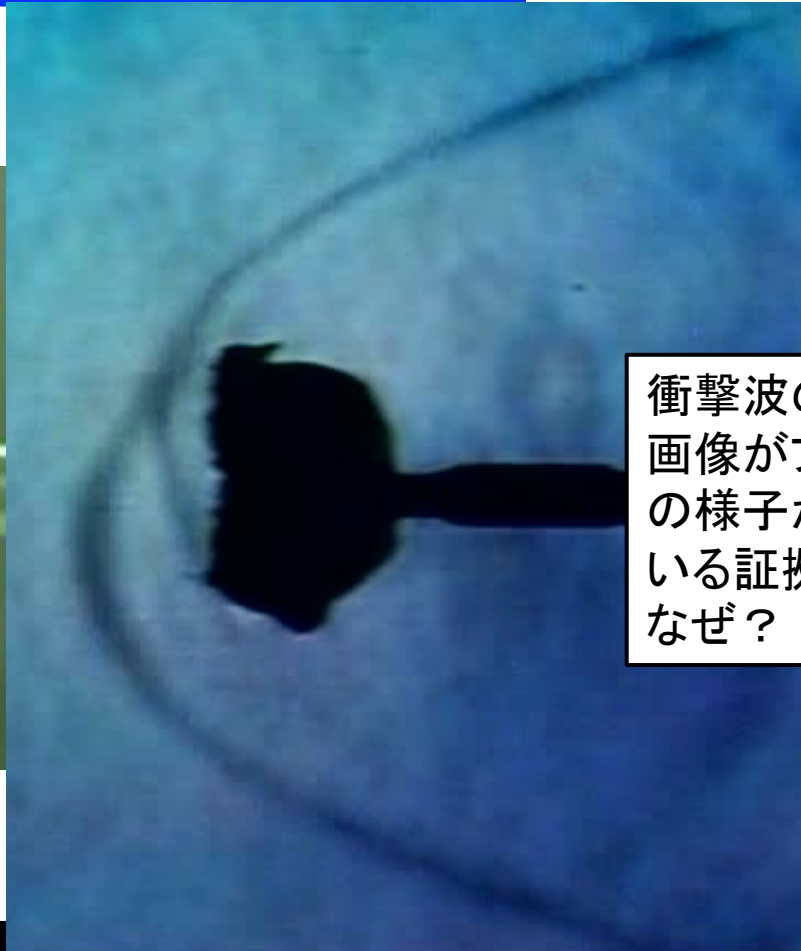
シュリーレン法による衝撃波の可視化(ごく簡単な説明):

- ・光に対する空気の屈折率は、空気の密度で変化する
- ・衝撃波(空気が物体に当たって、急ブレーキがかかるため
渋滞を起こす現象)ができると、その先は空気の密度が
急上昇。(衝撃波は超音速流れでしか起こらない。なぜ?(P9～))
- ・衝撃波のところで空気の屈折率が変わる。
- ・衝撃波のところで光の通り方が変わる。
- ・衝撃波のところでその映像に濃淡(強弱)が現れる。
- ・逆に言うと、映像に濃淡が現れたら、衝撃波が見えている可能性がある。
(濃淡が現れる要因は、衝撃波の発生だけとは限らないので注意が必要)



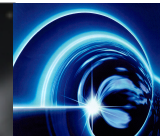


風洞で隕石空中分裂&爆発を再現したい
隕石は均一な物質ではなさそう。
そこで、氷にドライアイスのかけらを仕込むと。

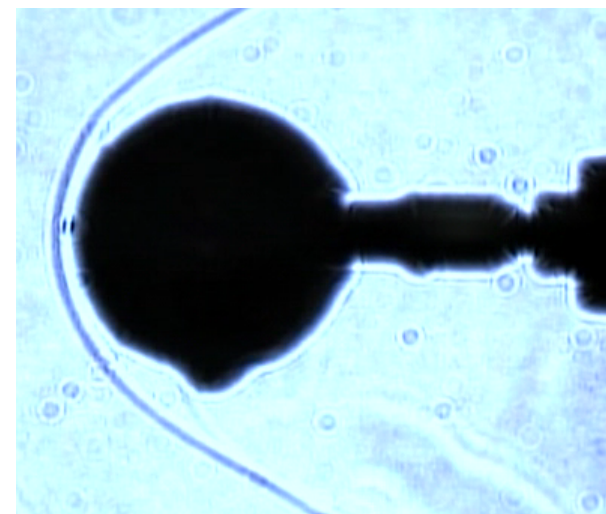
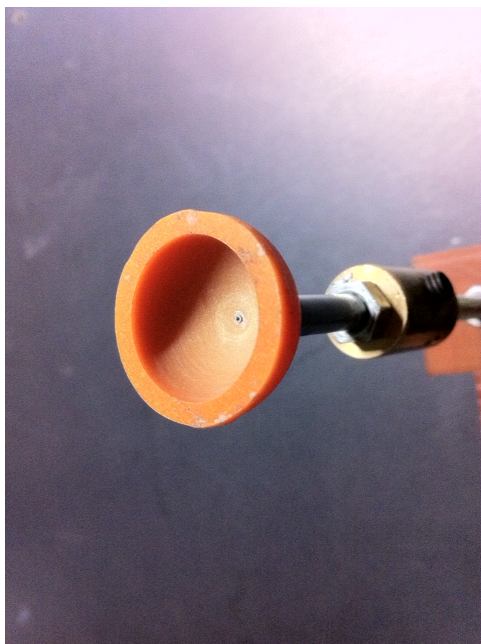


衝撃波の映像が乱れる。
画像がブレるのは、流れ
の様子が絶えず変動して
いる証拠。
なぜ？





ものは動かなくとも、周りの流れが安定な場合と不安定な場合がある (流れの安定性理論)



凸な形状(球とか)の衝撃波はくっきり写る(右の写真)。
凹んだものにできる衝撃波(左の写真)はうまく写らない。

@柏オープンキャンパス
2014/10/25にて撮影

画像がブレるのは、流れの様子が絶えず変動している証拠。





風洞で隕石空中分裂&爆発を再現したい

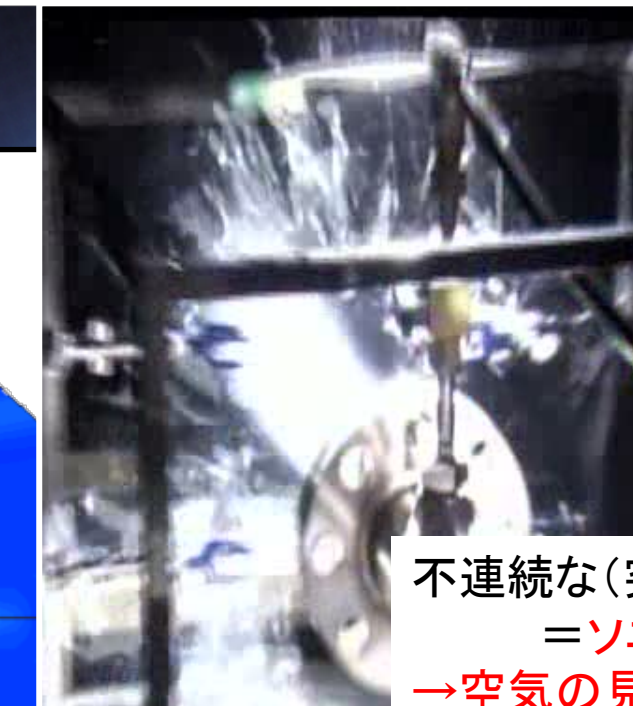
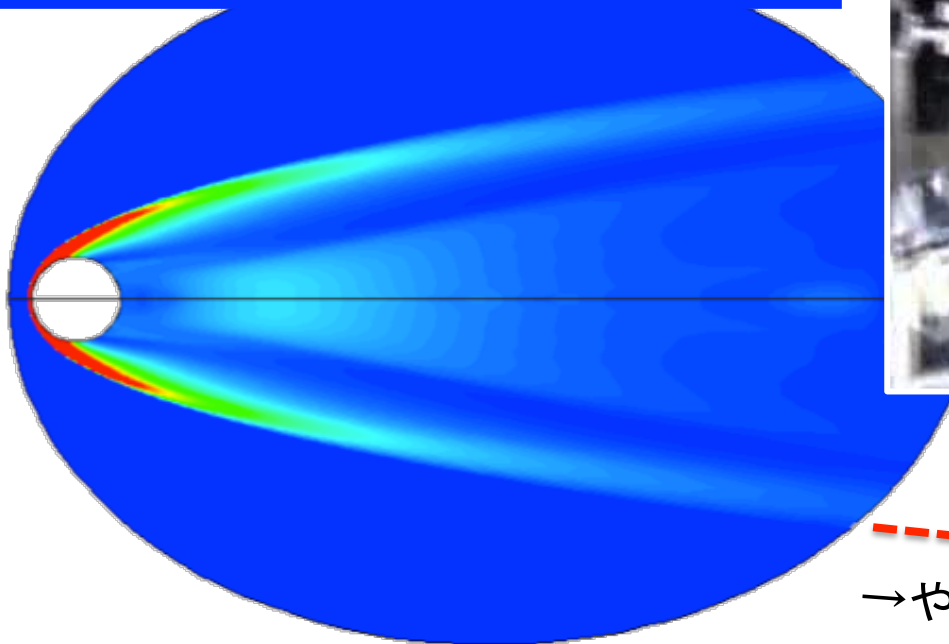
隕石ができている材料／材質の**不均一性**が鍵か？

隕石自体の問題だけではなく、まわりの**空気の流れ**も関係しているらしい。





衝撃波はどこまで続く？ ソニックブームの世界



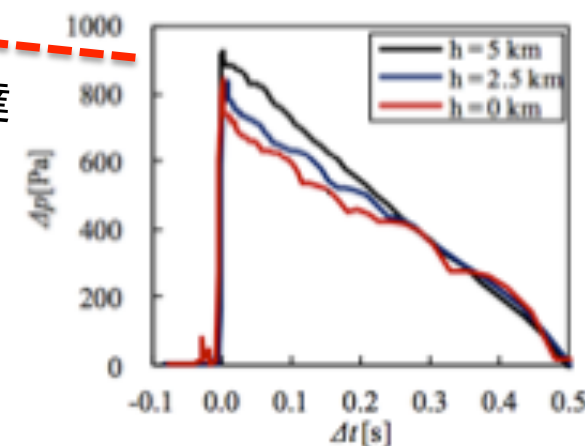
←衝撃波管(空気発射装置)によるガラス破壊実験:
ロシア隕石落下の全貌(コズミックフロント、NHK-BS、2013,6,13 on air)より

不連続な(突然の)圧力上昇
=ソニックブーム
→空気の見えないハンマーで殴られるようなもの。
→ 人体や物への被害。

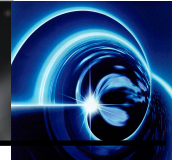
→やがて地上に到達

ソニックブームが弱い超音速旅客機を作るにはどうしたらいいか？の研究

興味のある人は、例えば「JAXA 超音速機」で検索



山下、鈴木、JpGU2014

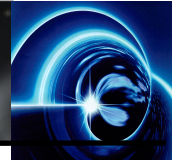


工学の道具(装置、数値解析法、知識、経験
etc.)で自然現象をみる。

ありふれたものでも、設定と見方で
不思議なもの、わからないものは
いっぱいある。

また、そこが研究の出発点でもあります。





誘導結合プラズマ装置
 による実験

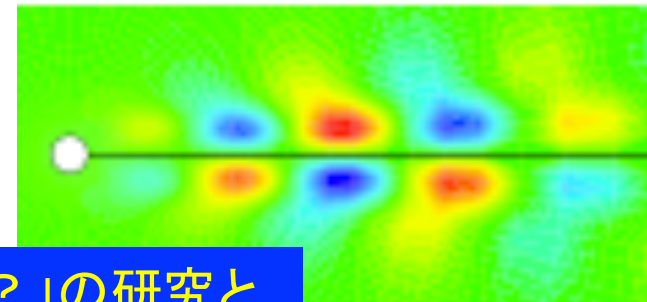
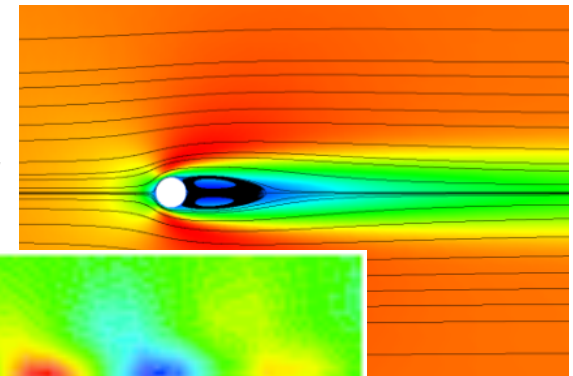


プラズマ放電による極超音速気流制御



流体物理研究

CFD(計算機シミュレーション)による流体安定性解析

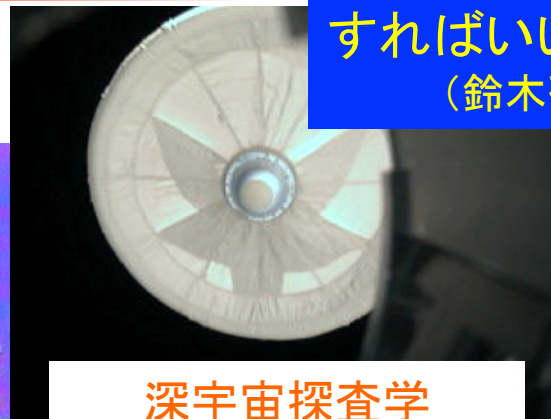


実験研究

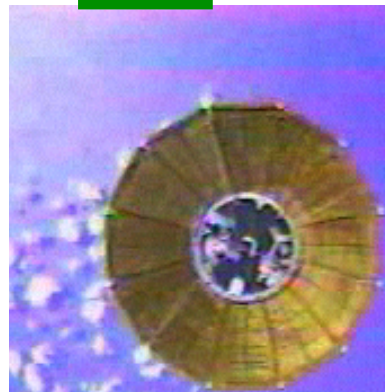
「どうなるのか？」の研究と、
 「そうならないためにはどうすればいいのか？」の研究
 (鈴木研究室の例)

数値解析

深宇宙探査学
 太陽系探査(火星)へ

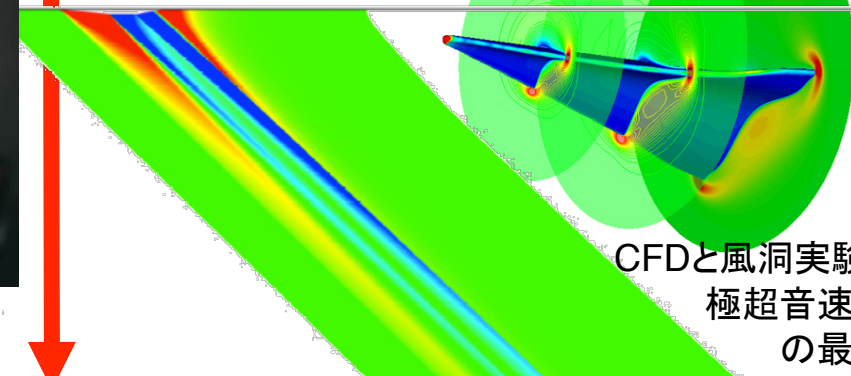


展開型柔構造膜面エアロシエル
 宇宙機MAACプロジェクト



ものづくり・開発

CFDによるソニックブーム全空間解析



CFDと風洞実験による
 極超音速機形状
 の最適設計