

# 超音速流と衝撃波

帝京大学理工学部

久保田 弘敏\*

## Supersonic Flow and Shock Wave

\*Hirotohi Kubota, Faculty of Science and Engineering, Teikyo University

\*E-mail for correspondence: kubota@ase.teikyo-u.ac.jp

### 1 はじめに

音より速い流れを超音速流 (supersonic flow) と言うことはよく知られていますが, その現象は日常生活でもときどき経験することがあります. そのいくつかの例を取り上げてみます. 超音速の流体現象の面白さと実社会との関係について考えるきっかけとなれば幸いです.

### 2 超音速流とは?

飛行機が空中を飛ぶとき, 飛行機に乗った人から見ると気流が前方から流れてくると考えてもよく, 飛行機が音より速く飛んでいるときは, 前方から流れてくる気流は超音速流と言えます. また, ジェットエンジンやロケットエンジンの噴流, あるいは工業プラントでの各種噴流にも超音速流の現象が見られます.

これに対して, 音より遅い流れは亜音速流 (subsonic flow) と言います. 流れの速度を音速で割ったものはマッハ数 (Mach number)  $M$  で表わされますので, 亜音速流では  $M < 1$ , 超音速流では  $M > 1$  です.

ところで, 次のようなことを経験したことはないでしょうか. 電車から降りて改札口を通過して外へ出る人の流れを観察すると, 電車に乗っている人が少ない昼間は, 電車を降りて改札を通り過ぎた人は, 混んでいないので, そう急ぐ必要もなく, ゆっくりと歩いて帰るでしょう. ところが, 夕方のラッシュアワーでは電車は超満員なので, 車を降りた人は改札を通り過ぎると, 電車の中で圧迫されていたのを忘れたかのように我先にと家路を急ぎます. つまり, 改札を通り過ぎると人の流れは加速されます. 高速道路で料金所を通り過ぎた車がスピードを上げるのも, 料金所までに渋滞していた人の気持の表れかも知れません.

これは, 空気の流れでも同様です. 図1に示すような先細末広のラバールノズル (de Laval nozzle) に空気を流

すものとしましょう. 中央の狭くなった部分はスロート (throat) と言われ, その断面積を  $A_{th}$ , 出口断面積を  $A_e$  で表しておきます ( $A_{th} < A_e$ ).

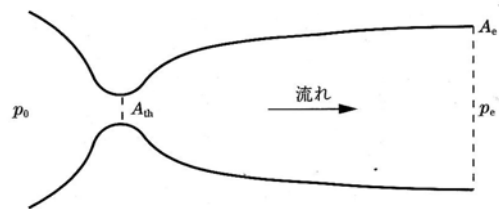


図1 ラバールノズル

上流部 (ノズル入口) の圧力を  $p_0$ , 下流部 (ノズル出口) の圧力を  $p_e$  とし,  $p_0$  を  $p_e$  より高くするとノズル内には流れが生じます.  $p_0$  を一定にして  $p_e$  を低くしてゆくと, 最初のうちは気流はスロートに向かって速くなって行きますが, スロートを過ぎた後はまた遅くなります. これは, 改札を通る人のたとえで言えば, 上流部は電車の中で, スロートは改札です. スロートを過ぎた流れは, ゆっくり歩く人と同様減速され, 亜音速流と言えます. ところが,  $p_e$  をどんどん下げて行くと, スロート部の圧力も下がってきますが, スロート部の圧力が  $0.528p_0$  となったところで様子が一変し, それより  $p_e$  を下げるとスロートより後では流れは加速します. このときスロート部では音速状態, スロート部より下流では超音速状態が実現していることとなります. つまり, ラバールノズル下流出口での圧力を下げてゆき, スロートで圧力比が  $0.528p_0$  になるようにすれば超音速流が実現します.

今の場合  $p_0$  を一定にして  $p_e$  を低くしましたが, 逆に  $p_e$  を一定にして  $p_0$  を高くしても同じことです. すなわち, ノズル出口の圧力を一定にしておき, 上流部の圧力を上げて行けば超音速流が作れるのですが, これは改札を通る人の例では, 電車の中は超満員で圧力が上がっていることと同じです.

このように, ラバールノズルを使用して超音速流を作

るようにした装置が超音速風洞 (supersonic wind tunnel) です。空気には圧縮性 (compressibility) があるので、それが可能と言えます。人の行動も空気と似ていますね。

### 3 衝撃波とはどんな波？

図2は1963年に東京大学航空研究所(当時)に設置され、2000年頃まで稼働していた超音速風洞でマッハ2(音速の2倍)の超音速流を作り、その中に超音速機の模型を入れたときに観察される流れ場を、密度変化を可視化するシュリーレン法という光学的方法を使って撮った写真です。気流は左から右へ流れ、模型の先端や翼の前方、および模型の支柱前方に黒く見える線が見られます。これが衝撃波 (shock wave) です。

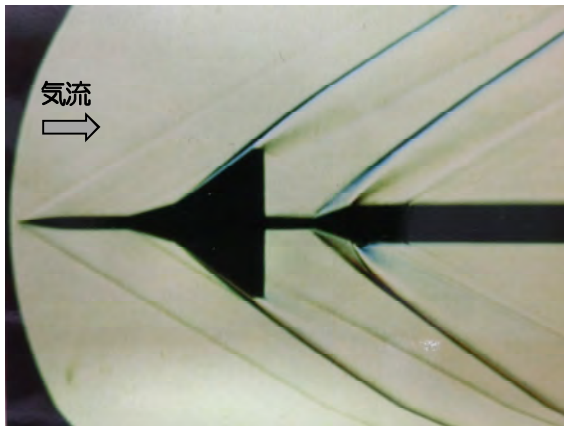


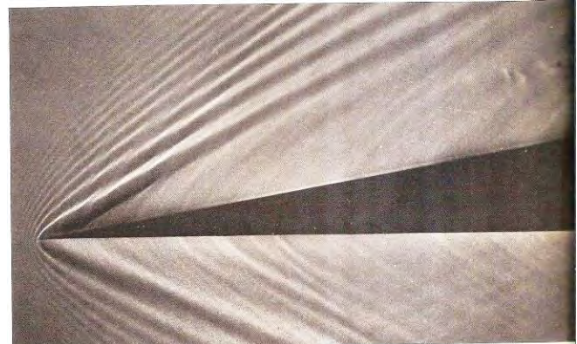
図2 マッハ数2の超音速風洞における超音速機模型まわりの流れの可視化<sup>1)</sup>

このような現象をどこかで見たことはないでしょうか。船に乗って見ていると先端(舳)から出る波がまさに超音速機模型の先端から出る衝撃波と似ていることに気が付くでしょう。

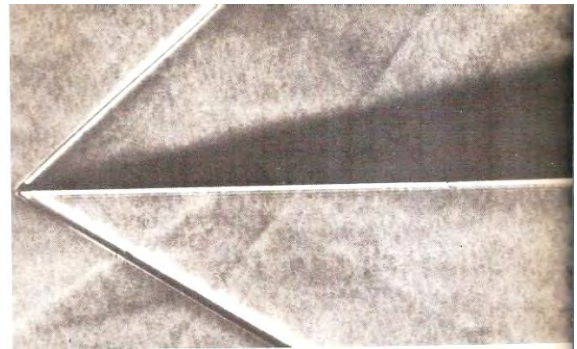
そこで、これを実際に実験してみます。深さがあまり深くない水槽(浅底水槽)に水を入れて回流させます。そして、そこに飛行機などの模型を入れると先端から波ができます。水の圧縮性は小さいので縮まない代り、その分波が盛り上がります。

図3(a)は模型を単純化して、半頂角10度のくさび形として水槽で可視化したものです<sup>2)</sup>。水の波はたくさん出ますが、その先頭の(最もくさび形に近い位置の)波のくさび形先端での角度を測ってみると40度ほどです。ただし、波は後ろに行くほど曲がってゆきますので、後方での角度は27度ほどになっています。別にマッハ数1.96の超音速風洞に半頂角10度のくさび形模型を入れ、シュリーレン法を使って撮った写真は図3(b)です。先頭から出る衝撃波の角度は約40度で、浅底水槽で測ったも

のほぼ同じです。理論値は40.14度ですので、水を使って衝撃波を模擬するのはある程度妥当です。ただし、浅底水槽で模擬できるのは比熱比2の気体で、空気の比熱比は1.4ですから、浅底水槽と超音速風洞での結果に定量的な相違が起こるのはやむを得ません。



(a) 浅底水槽写真



(b) 超音速風洞写真

図3 浅底水槽で超音速流を模擬してみる<sup>2)</sup>

このように、浅底水槽での波の高さを測ると、それは空気の場合の密度変化に相当しますから、水の波の高さから空気の密度上昇を推定することができます<sup>2,3)</sup>。超音速流を作らなくとも、水槽に水を流すだけで衝撃波のパターンの観察ができる利点があることがお分かりいただけるでしょうか。

それでは、衝撃波はなぜできるのでしょうか。

飛行機が速度 $V$ で飛んでいるとします。先に述べたように、飛行機に乗った人から見ると、前方から空気が速度 $V$ で流れてくることと同じです。音の速さを $a$ とすると、これは空气中で情報が伝わる速度と言えます。したがって、 $V < a$ の時は、空気より情報の方が速く進みます。すなわち、空気が飛行機に到着する前に、空気は飛行機がそこにあるということを知ることになります。そうすると、空気は飛行機を避けて回り込むことができますので、何も問題は生じません。一方、 $V > a$ の場合はどうでしょうか。飛行機がそこにあるという情報が来る前に空気は飛行機に到達してしまいます。そうすると、空気は飛行機直前まで来て飛行機の存在を知ることになりま

すので、そこで立ち止まります。後から後から空気が来ますので、そこで空気が溜まってしまいます。それが積み重なってできたものが衝撃波だと言えます。空気に圧縮性があるからこそ起こる現象です。

クーランとフリードリックス (Courant & Friedrichs) は、これを急坂を滑り降りるスキーヤーに例えています<sup>4)</sup>。図4をご覧ください。急坂の下に立木があるのですが、坂を滑り降りるスキーヤーの速度が大きいので立木に気が付かず(立木が前方にあるという情報が来るのより自分の方が速い、すなわち、上記の記号を使えば  $v > a$ )、スキーヤーは後から後から立木にぶつかってそこで「溜まって」しまうというアナロジーです。これがシュリーレン法で見える黒い線に相当します。流れの現象は人間の行動にも似ているという、たいへんおもしろいことです。筆者は大学院生時代、この絵を見て、なるほどと感心したことを覚えています。



図4 急坂を滑り降りるスキーヤー<sup>4)</sup>

#### 4 「音の壁」は越えられる？

1903年にライト兄弟が初めて動力飛行に成功して以来、飛行機の発達は著しく、より早く、より遠くへと進化してきました。しかし、飛行機が音よりも速く飛ぼうとすると、必ず「音の壁」にぶつかって、その向こうには行けない、行ったら地獄を見る、と信じられてきました。何故そんなことが起こるのでしょうか。

図5は飛行機が飛んでいるときの翼まわりの空気の状態を表していますが、(a)、(b)、(c)では少しずつ違っています。この訳を考えてみましょう。図5(a)では、翼の速度を一様流マッハ数  $M_\infty$  で表すと0.50程度です。翼から見ると空気がマッハ0.50の速さで流れてくることと同じで、どこも亜音速です。一方、図5(b)では翼の速度はマ

ッハ0.70程度としましょう。翼の上面は凸にカーブしていますから、そこを流れる気流は局所的に加速され、局所マッハ数  $M$  が1を越える領域が現れます。点線で描いた線がマッハ数1の線で、この後ろがマッハ数1を超える領域(超音速領域)です。図5(c)は翼の速度がマッハ0.90程度のときで、超音速領域 ( $M > 1$ ) はもっと広がります。このままずっと超音速であればいいのですが、翼面のカーブが止むと、気流は減速するので、もはや超音速ではいられなくなり、気流が圧縮された場所ができます。これが衝撃波で、図で黒い太線で表しています。ギリシャ文字の  $\lambda$  (ラムダ) という字に形が似ていますので、「ラムダ衝撃波」と言います。こういう衝撃波ができると翼面上の流れが剥離し、そのため、空気抵抗が急に大きくなります。このように、抵抗が急に大きくなるマッハ数が「抵抗発散マッハ数」です。

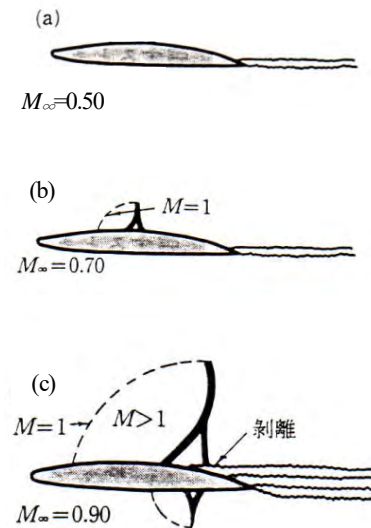


図5 翼面上に発生するラムダ衝撃波<sup>5)</sup>

このような衝撃波は普通肉眼では見えませんが、飛行機に乗って翼面上を注意深く見ていると、光線の関係で運よく見えることがあります。筆者の友人で、アメリカの物理学会に出席する途中の飛行機の中からそれをムービーで撮って、その学会の可視化優秀賞を獲得したという人もいます。

図6は翼形の抵抗係数  $C_D$  を一様流マッハ数(すなわち、飛行マッハ数)  $M_\infty$  に対して表したのですが、NACA64<sub>1</sub>-212という翼ではマッハ数が0.70から0.72あたりが抵抗発散マッハ数に相当します。つまり、音の速度の70%から72%くらいの速度で、抵抗係数が大変大きくなりますので、それ以上早く飛べないと思われていました。それが、最初に述べた「音の壁」だったのでしょう。

図6の「NASA スーパークリティカル翼形」と書いた抵抗係数の曲線を見てください。抵抗係数発散マッハ数はNACA64<sub>1</sub>-212より0.1ほど高くなり、0.80ほどになっています。これは翼形に工夫を加えて翼上面の衝撃波の発生を遅らせたものです。現在の旅客機はほとんどこのような翼形を採用し、できるだけ高いマッハ数で飛べるようにしています。超音速機の翼はもっと薄くして抵抗を減らすようにしているようです。

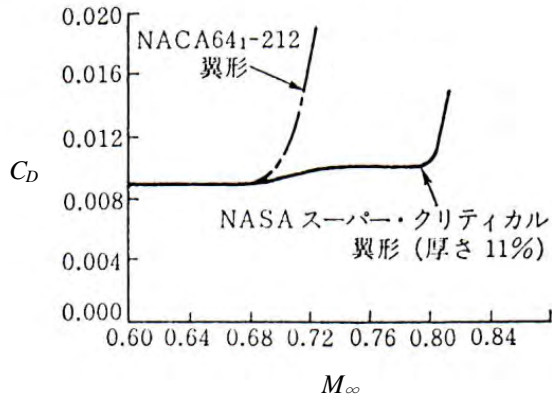


図6 抵抗発散マッハ数<sup>5)</sup>

さて、1947年10月14日、チャールズ・エルウッド・“チャック”・イエーガー(Charles Elwood “Chuck” Yeager)は実験機ベル XS-1に乗って「音の壁」に挑戦し、高度12,800m付近で3基のエンジンに点火して水平飛行を行い、音速より速い速度1,299km/h(マッハ1.06)を記録しました<sup>6)</sup>。その結果、どうなったのでしょうか。

チャック・イエーガーが語ったところによると、予想されたような振動もなく、意外なほどあっさりと「音の壁」を越えたとのことです。恐れていたような地獄は無かったのです。ただ、図6で説明したように、空気抵抗はずいぶん大きくなったはずですから、大きなエンジン推力が必要だったのでしょう。

そのおかげで、その後、超音速で飛ぶ旅客機も現れました。図7は、イギリスとフランスが共同で開発した超音速旅客機「コンコルド(Concorde)」<sup>7)</sup>です。



図7 関西国際空港に飛来したときのエールフランスの超音速機「コンコルド」(1994年9月5日)<sup>7)</sup>

先に述べたような抵抗の増大と戦っても、ひとたび超音速になれば、むしろ抵抗値も減って安定した飛行になります。筆者は2度ほど「コンコルド」に乗りましたが、音速を越えるまでのアフターバーナーの音の大きさに比べて、音速を越えた後の静かさは、地獄どころか安心感の方が大きかったことを思い出します。「コンコルド」は2003年に引退し、今では超音速旅客機はありませんが、超音速飛行ができるということを身を以て示したチャック・イエーガーの功績は大変大きいと言えます。

## 5 超音速機はなぜ都市の上を飛ばないのか?

普通の飛行機は人の住んでいる都市の上を飛んでいるのに、「コンコルド」は都市の上空を飛ぶことはありませんでした。それはなぜでしょうか。

「コンコルド」が飛ぶときに問題となったことがありました。「コンコルド」は高度25km程の成層圏を飛びますので、地上からは見えないことが多いのですが、上空を通り過ぎた後、しばらく経って、突然「バン・バン」という爆発音が地上でも聞こえたそうです。飛行機も何も見えないのに音だけが聞こえるので「原因不明の音」と怪しまれ、牧場の牛もびっくりして乳を出さなくなったとも言われました。ひどい時には、建物の窓ガラスが割れたりしたそうです。宇宙からの帰還時のスペースシャトルが着陸してくるときや、隕石が落ちて来る時も同じような音が聞こえたとのことです。

飛行機やスペースシャトルや隕石が衝突したわけでもないのに、なぜ爆発音が発生したり、窓ガラスが割れたりするのでしょうか。どちらも物体が空気中を音より早い速度で飛んだ時に起こっています。その理由はどうか、「超音速」ということにありそうです。つまり、これらの例で共通するキーワードは、超音速で飛んだときに発生する「衝撃波」と、衝撃波が集合して発生する「ソニックブーム(sonic boom)」です。

図8に見られるように、超音速で飛んでいる飛行機の各部からはたくさんの衝撃波が生じますが、これらは地上に向かって進んでいるうちに一つの衝撃波(先頭衝撃波)に統合されます。衝撃波の後ろでは圧力が高くなっていますので、地上に達したときは急激な圧力上昇が起ります。一つの衝撃波に統合されるのは、胴体の断面の増加や主翼の存在によって発生した強い衝撃波が後方から追いついてくるためです。この圧力上昇(過剰圧)が人の耳に入ると鼓膜を振動させ音として聞こえます。これがソニックブームです<sup>8)</sup>。したがって、過剰圧 $\Delta p$ が大きい程、ソニックブームは強いと言えます。先端衝撃波直後では圧力が上昇するため速度は一旦減少しますが、気流が飛行機に沿って流れているうちに加速され、機体

後縁では負圧になります。後縁での圧力が大気圧に回復するときには急激な圧力上昇が発生し、これは後縁衝撃波と呼ばれます。したがって、先頭衝撃波と後縁衝撃波がセットになって、英字の *N* の形をした波長 *c* の圧力波となります。圧力上昇が2回ありますので、人の耳に聞こえる音は2回起こることになります。最初に「バン・バン」という音が聞こえると言ったのはこのためです。

しかも、飛行機が見えず、音だけがいきなり聞こえてくるわけですから、これではとても超音速の飛行機は都市上空を飛ぶわけには行きません。

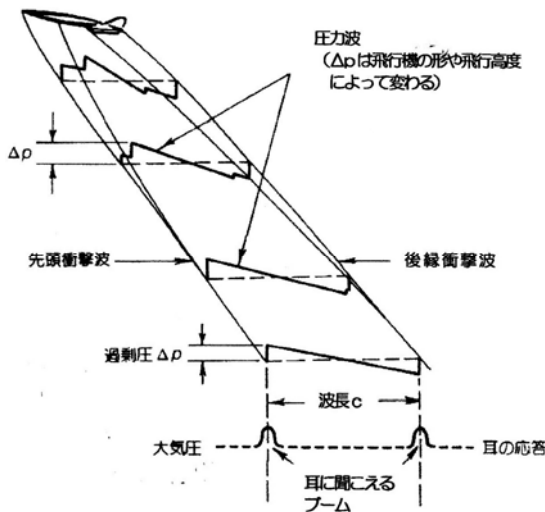


図8 ソニックブームが生じる理由<sup>8)</sup>

それでは、ソニックブームを和らげる方法はないのでしょうか。今までの説明では、*N*型の圧力波が生じると人間の耳には大きな音と感じられるということでした。それなら、*N*型ではない圧力波にすればいいではないか、と考えます。それには、図9のような台形型や屋根型やハイブリッド型などの圧力波形（低ソニックブーム圧力波形）がよいと考えられ、地上でそういう圧力波になるような機体形状を見つけるのが有効です。

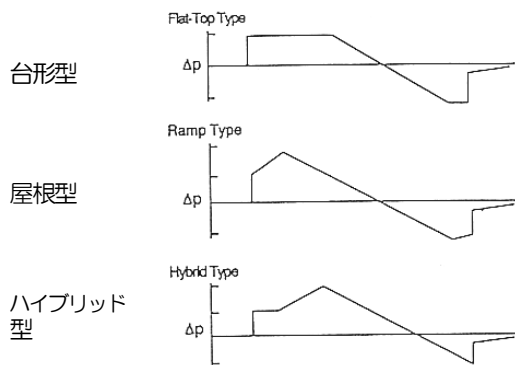


図9 低ソニックブーム圧力波形

JAXA（宇宙航空研究開発機構）では、そのような原理を使って、ソニックブームを低減する飛行機形状を設計し、2015年7月にスウェーデンのキルナ実験場で実験機 D-SEND#2 の飛行試験を行いました。空中と地上に置いたマイクロフォンで音を測ったところ、みごとに予想通りの結果を得たそうです<sup>9) 10)</sup>。実は、ソニックブームを低減する飛行機形状だと空気抵抗が増すと言う問題があるのですが、JAXAの研究ではソニックブームも空気抵抗も同時に減らすことができるようになりました。「斜め翼」という飛行機の形を使えば、やはり空気抵抗もソニックブームも減らすことができるのではないかという考えもあります。

超音速機が飛ぶ限り、衝撃波の発生は避けられませんが、和らげることができることが分かりました。超音速機が都市の上を飛ぶことも夢ではありません。

## 6 隕石が大気中に落下してきたら？

2013年2月15日、ロシア連邦ウラル連邦管区のチェリャビンスク州で不思議なことが起こりました。風も吹いていないのに、多くの建物の窓が壊れたそうです（図10）。小学校の窓ガラスが突然割れ、小学生が逃げ惑う情景がユーチューブで配信されました。なぜそんなことが起きたのでしょうか。

調べてみると、ちょうどそのとき、小惑星が大気圏に突入し、隕石となって強い閃光を放ち、煙の尾を引きながら上空を通過するのが観測されていたことがわかりました。隕石は上空で燃え、爆発・分裂し、わずかな破片が地上に落下したそうです<sup>11)</sup>。

建物の窓ガラスが割れたのは、隕石が落下してくる時にできた衝撃波によってソニックブームが発生し、それが原因だということが分かりました。それでは、隕石がなぜ上空で燃えたのでしょうか。



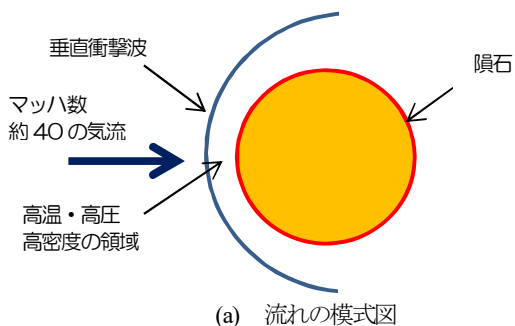
図10 ロシア・チェリャビンスク州に落下した隕石のソニックブームによって被害を受けた建物<sup>11)</sup>

チェリャビンスク隕石は、NASA（アメリカ航空宇宙局）の推定によると大気圏突入前は直径17m、質量10,000トンで速度18km/sだったそうです。また、ロシア科学アカデミーの発表では、上空での分解時の高度は30-50 km、重量10トン、落下速度15km/sと推定されました。

隕石が飛んでいる状態を想像してみましょう。隕石は普通球状をしていますので、その前方に強い垂直衝撃波ができ、その後方では密度、圧力、温度ともに上昇します（図11(a)）。高温になった衝撃波の後方ではどういうことが起こっているのでしょうか。

チェリャビンスク隕石の落下速度をマッハ数で表すと約40で、極超音速（hypersonic）という領域です。これは超音速流のうちでも、さらに高速の流れです。

垂直衝撃波後方の温度を計算すると、約86,000°Cという大変な高温であることが分かります。実際はもっと低い温度になりますが、高温であることには変わりありません。ここを熱源として空气中を熱が伝わってきます。これを空力加熱（aerodynamic heating）と言い、極超音速流に付随する大きな問題となります。大量の熱が隕石に伝えられると、隕石は溶け始め、これが長く続くと隕石は燃え尽きることとなります。チェリャビンスク上空でも同じことが起こったのでしょうか。図11(b)はその時の想像図です。



(a) 流れの模式図



(b) 隕石落下時の想像図

図11 隕石まわりの流れ

同じことが宇宙から帰還する宇宙船にも起こります。そのままでは宇宙船は溶けてしまいますので、溶けないような方法を講じなければなりません。アポロ宇宙船はアブレーションという冷却法を使いました。これは表面

物質をわざと溶かし、その相変化の潜熱に空力加熱を吸収させながら帰還するという、いわば「皮を切らせて骨を守る」方法です。アブレーション冷却法はまさに自然から学んだ宇宙技術で、将来はトランスピレーション冷却法やフィルム冷却法も可能でしょう<sup>12)</sup>。フィルム冷却法は航空機エンジンのタービンブレードにも使われている技術ですが、宇宙分野でも使われる可能性も大きいと言えます。

いかがでしたか？ 超音速流・極超音速流と衝撃波の世界を楽しんでいただけただけでしょうか。筆者の力量不足で説明が十分でない点多々ありますが、それは読者の皆さんに補っていただけることを希っています。

## 謝辞

本稿執筆に際し、首都大学東京 浅井雅人教授から有益な助言をいただいたことに謝意を表します。

## 引用文献

- 1) Kubota, H., Watanuki, T., Makino, Y., Sugiura, T. and Shigematsu, S.: Wind Tunnel Experiments for Estimation of Sonic Boom Intensity due to Supersonic Aircraft. *Proc. 1997 China-Japan Joint Symposium on Advanced Energy and Transportation Engineering*, (1997).
- 2) Van Dyke, M.: *An Album of Fluid Motion* (The Parabolic Press, 1982) 138.
- 3) 谷 一郎, 小橋安次郎, 佐藤 浩: 流体力学実験法 (岩波書店, 1977) 64-66.
- 4) Courant, R. and Friedrichs, K. O.: *Supersonic Flow and Shock Waves* (Interscience Publications, 1948).
- 5) 日本航空宇宙学会: 第3版航空宇宙工学便覧(丸善, 2005). 58-59.
- 6) ウィキペディア: チャック・イエーガー  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/チャック・イエーガー>.
- 7) ウィキペディア: コンコルド.  
<https://ja.wikipedia.org/wiki/コンコルド>.
- 8) Glass, I. I. (高山和喜訳): ショックウェーブ(丸善, 1978).
- 9) 吉田憲司, 本田雅久: D-SEND プロジェクトの全体概要, 日本航空宇宙学会誌, 64(2016) 3-8.
- 10) 牧野好和: D-SEND#2 空力特性モデル構築・評価, 日本航空宇宙学会誌, 64(2016) 173-179.
- 11) ウィキペディア: 2013年チェリャビンスク州の隕石落下 <http://ja.wikipedia.org/wiki>
- 12) 久保田弘敏, 鈴木宏二郎, 綿貫忠晴: 宇宙飛行体の熱気体力学(東京大学出版会, 2002).