

2022 博物ふえすていばる! 8 ガクモンからエンタメ☆ テーマ

きのこのこのデザインを 流体力学で考えよう

ブース B-34 役に立たないきのこのこの小部屋

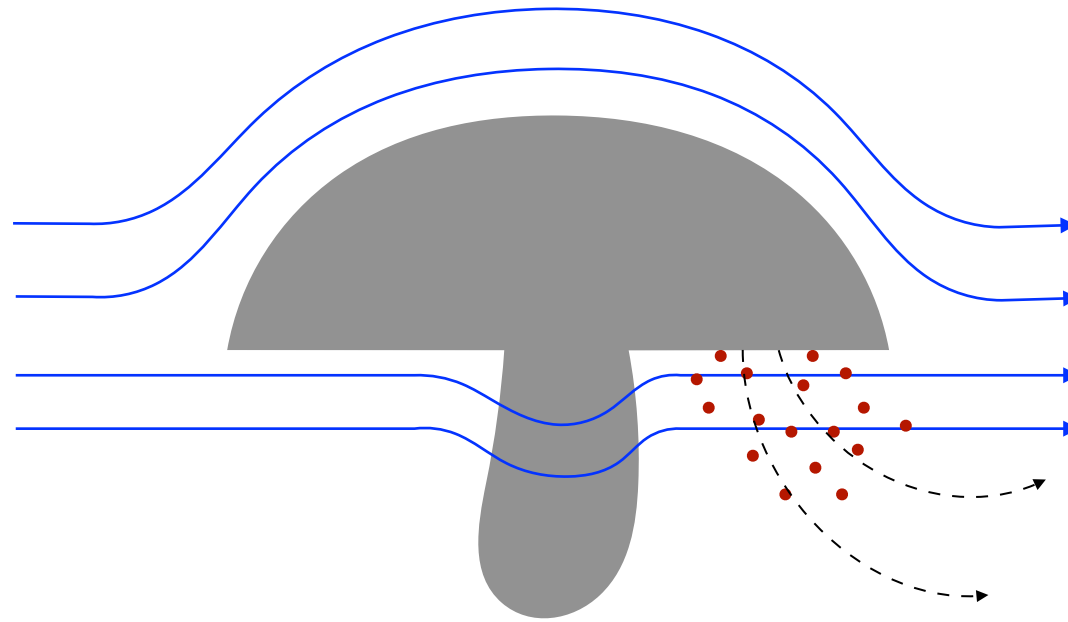


① きのこのデザインとエアロダイナミクス

きのこの形といえば多くの方は傘と柄のある姿^{*1}を思い浮かべるでしょう。ほとんどのきのこは孢子^{*2}によって子孫を殖やしますが、多くのきのこで孢子は傘の裏側^{*3}から空中に放出されます。

風に乗って運ばれ、はるか上空で雨雲の元になるともいわれるきのこの孢子、その出どころとなる傘の形状については、揚力を利用しているなどの説もあるようですが、実際に流体力学の視点で見るとどのようなことが起きているのでしょうか。

ここではきのこの傘や柄の周囲で起きている風の動きを解き明かしながら、きのこのデザインがどのような形で孢子散布に影響しているのかを考察しましょう。



*1： 袋状、棒状など、傘や柄といった構造とは全く異なる形状のきのこも多くいます。

*2： ここでは有性孢子を指します。きのこの種類によっては有性生殖以外の手段で殖えるものもあります。

*3： 傘の上面に孢子(無性の厚膜孢子)を生じるヤグラタケなど、裏側以外から孢子を出すきのこもあります。

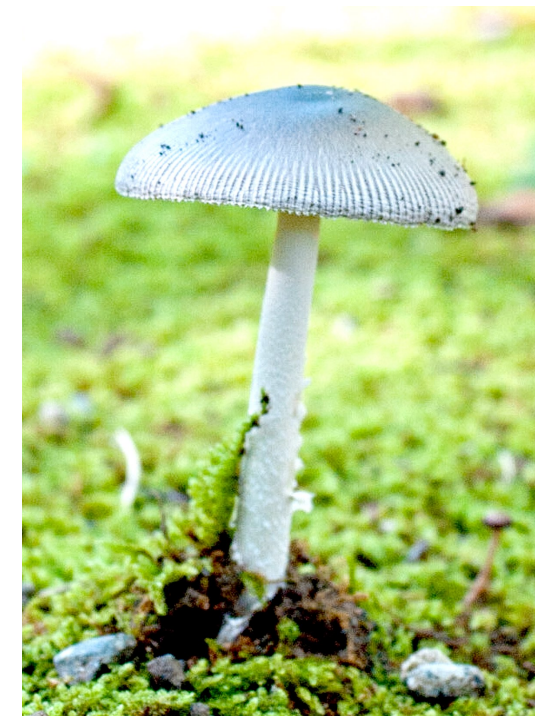
② 実際のきのこのこの胞子散布

買ってきたシイタケの傘と柄を湿らせ、暗い部屋の中で後方から光を当てると、傘裏のヒダから胞子が漂い出すのを観察することができます。

下左の写真は横方向から微風を当てて、胞子が風下に舞う様子を撮影したものです。実際の環境では風のコントロール等、条件の均一化が難しいため、ここではコンピュータソフトを用いてきのこのこの形状が胞子飛散に及ぼす影響をシミュレーションしています。



シイタケの胞子飛散の様子



ツルタケ

なお、流体シミュレーションには、ドーム型の傘を持つシンプルな形状から、上右の写真のツルタケをモデルとした仮想のきのこのこを使用します。

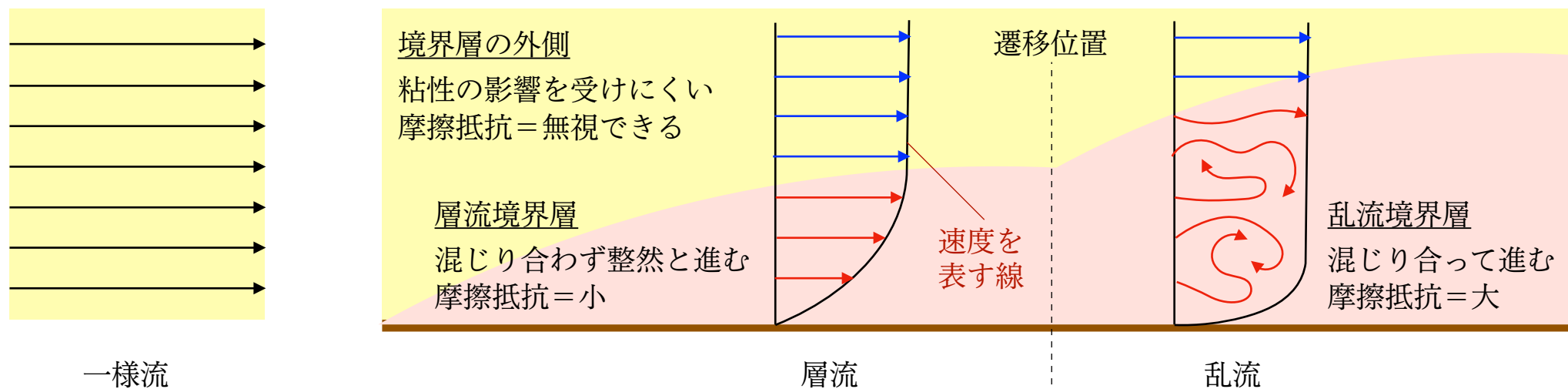
3 流体の粘性

水や油などの流体には粘性があり、接した物体との間に摩擦が生じるため、かき混ぜたりすると抵抗を感じます。空気にもじつは粘性があり、気流に接した面には摩擦が生じます。

きのこ孢子飛散と風の関係を考える上で、この空気の粘性が大きな役割を果たしています。本題に入る前に、まずはこの粘性により何が起きるのかを確認しましょう。

接するものがない広い空間を進む流体はすべて同じ速度で流れる一様流です。しかし流体に接する物体があると、その粘性によって摩擦が生じ物体表面に近い部分で速度の減衰が発生します。物体表面から主流の99%の速度の範囲を境界層といい、境界層の外側では流体は粘性の影響を受けにくく、一様流と同様の状態になります。

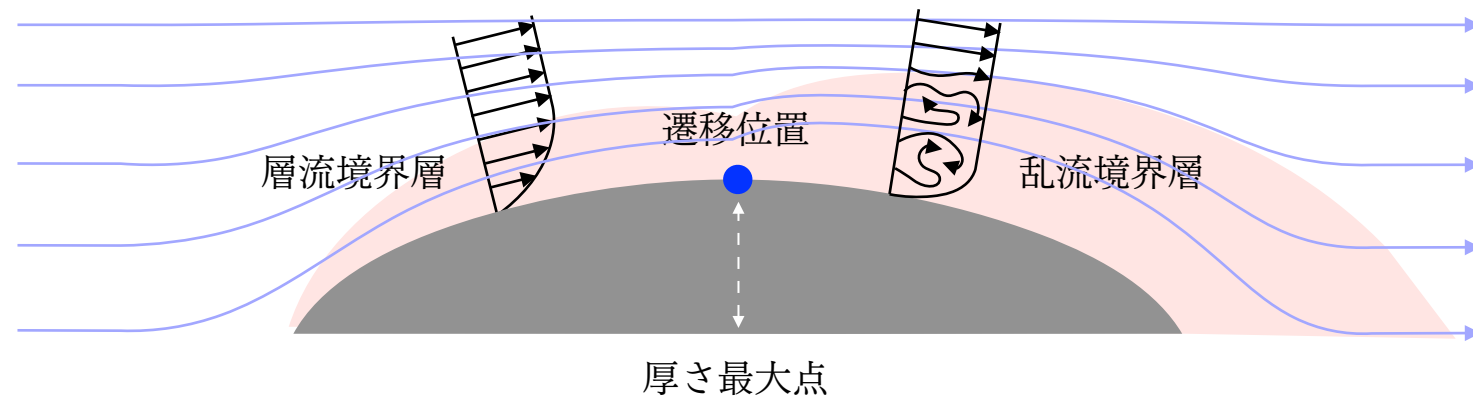
最初は流体が整然と混じり合わずに進む層流ですが、物体表面の粗さなどの要因で途中から不規則に混じり合う乱流に遷移し、乱流境界層となって物体表面を進みます。



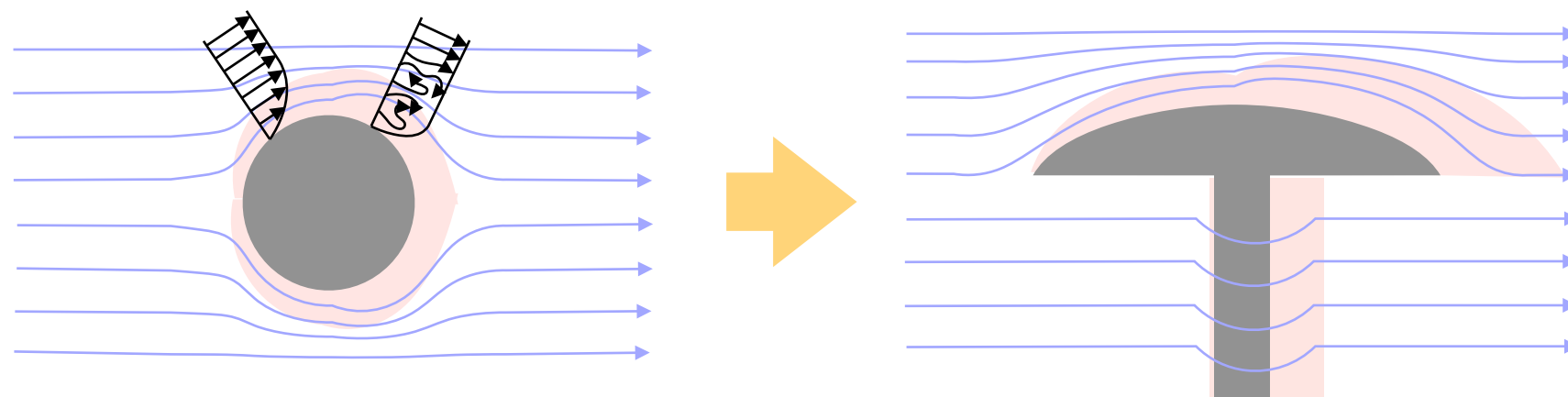
4 境界層

この粘性流体である空気の性質を、きのこにあてはめて考えてみましょう。

きのこの傘にぶつかった気流は、層流境界層を形成しながら曲面に沿って流れます。厚みが最大となる点から先は乱流に遷移し、乱流境界層となって進みます。

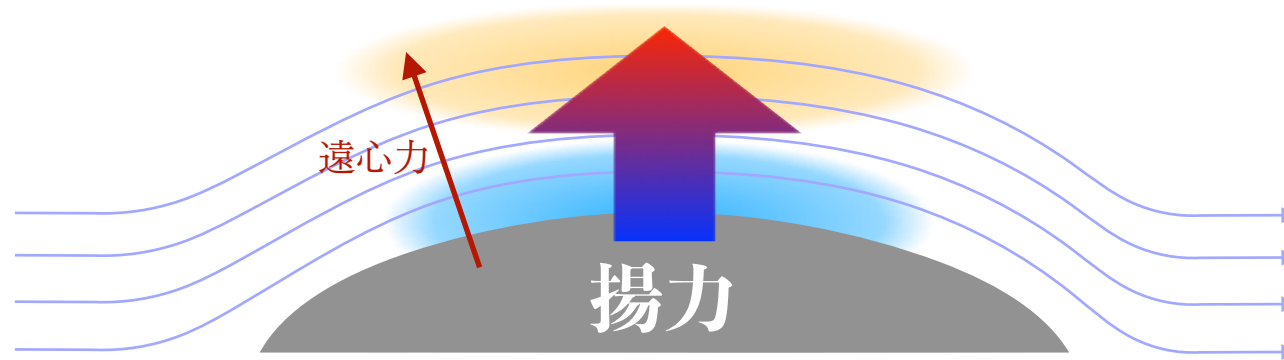


傘だけでなく、きのこの柄にも同じことがあてはまります。断面はほぼ円柱ですので、柄の両側を通り抜ける気流は境界層を発生させながら進みます。こうしてきのこの周囲には境界層ができ、それが孢子散布に関わるさまざまな現象のもとになります。



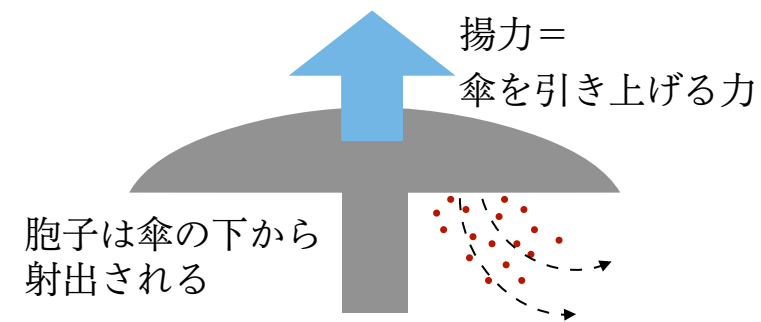
5 揚力の影響

きのこの傘の上では気流が境界層を作り曲面に沿って進みます。その際遠心力*1が働いて流れの外側と内側に気圧の差が生じ、傘の表面が低圧となるために上に向かう力が発生します。これが揚力で、きのこの傘を上を引き上げようとする力です。



きのこは揚力を利用して胞子を遠くに飛ばしているという説があります。はたしてそうでしょうか。

揚力は基本的には傘本体に作用する力です。いっぽう胞子は傘の下側のひだから射出されます。



きのこがドローンのように空を飛んで空中から胞子を撒くわけではないので、揚力が直接胞子散布に影響している可能性は低い*2と考えられます。

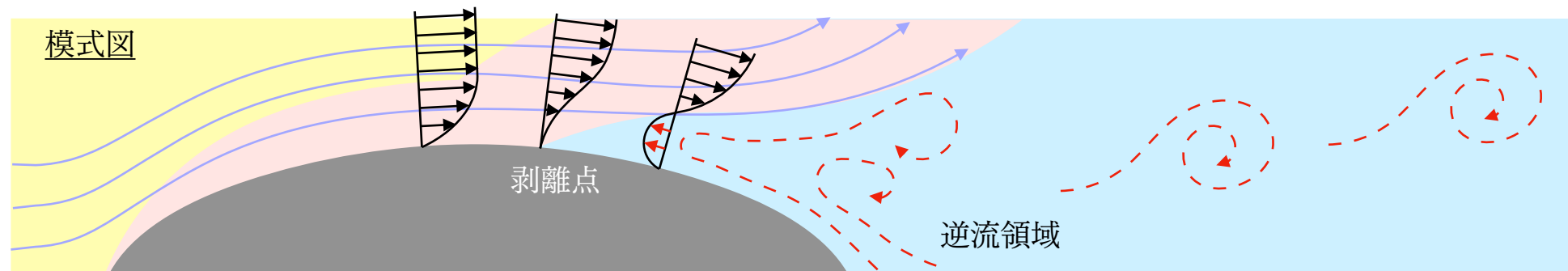
では風によってもたらされるもので、他に何か作用するものはないのでしょうか。

*1： 揚力の発生原理の説明で、傘の上下で経路の距離が異なるため長距離となる上側が高速となりベルヌーイの定理により低圧化するというものがありますが、流れが同時に傘の後端に到達する必要は無いため正しくありません。

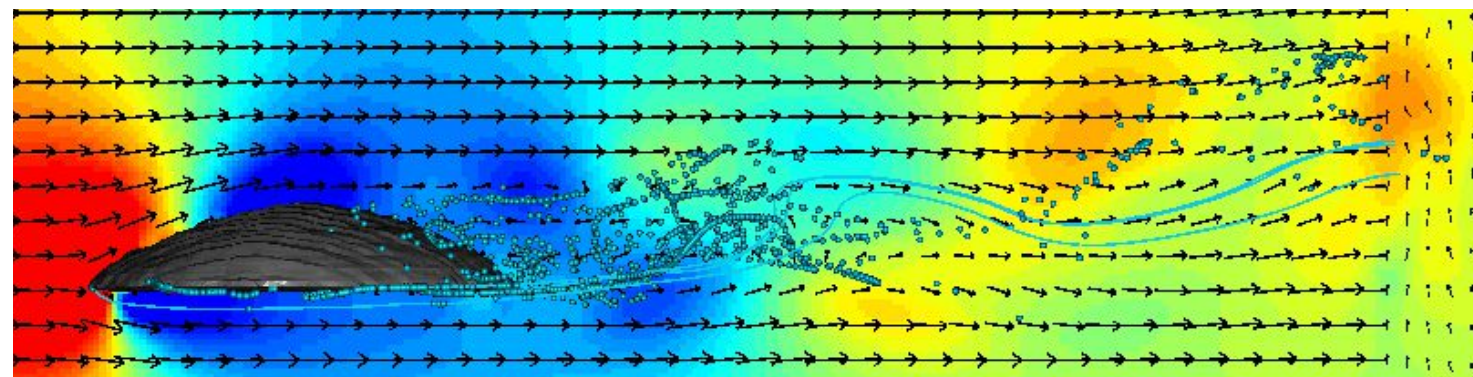
*2： 例外の一例でヤグラタケは傘の表面に厚膜胞子を生じるため、揚力が直接胞子散布に作用する可能性があります。

6 境界層の剥離(1)

境界層を作ってきたこの表面を進む気流は摩擦による圧力で減速し、やがて停止、逆流が発生して物体表面から剥がれてしまいます。これを境界層の剥離といい、逆流している領域では渦を生じるとともに圧力が下がります。傾斜が大きいなど逆流が強い場合は、渦が成長しながら周期的に発生するカルマン渦となって進みます*1。



この境界層剥離による低圧や渦により、傘裏から射出された孢子が傘の上に巻き上げられる可能性があります。実際に流体シミュレーションソフトで計算*2してみると、傘の下から出た孢子が後端に主じた逆流に巻き上げられる様子が再現されます。



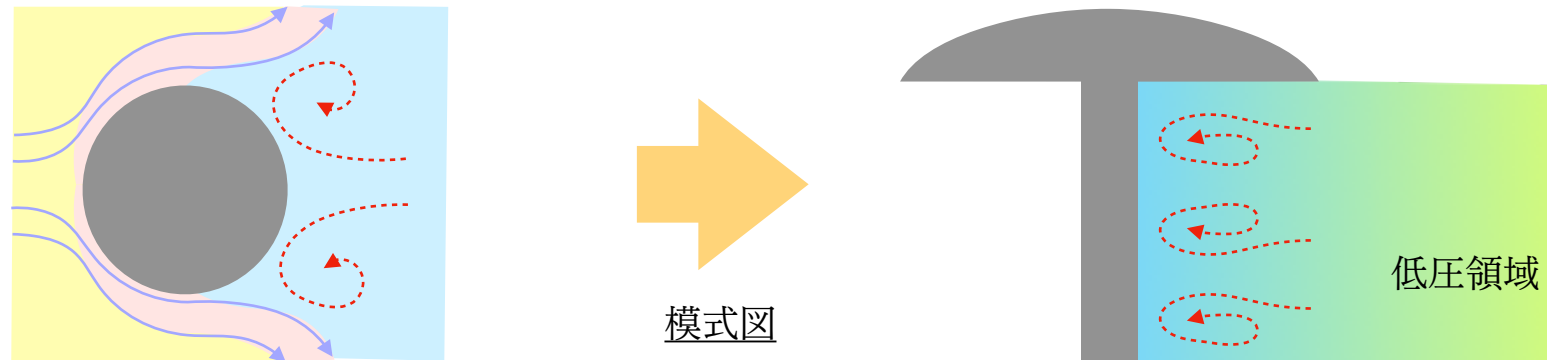
流体シミュレーションの予測
背景色は圧力の高低を示す
逆流による孢子の巻き上げ発生
風下に周期的な渦が生じている

*1： このカルマン渦の典型的な例が鳴門の渦潮です。また葉っぱが1枚だけ大きく揺れる現象もカルマン渦によるものです。

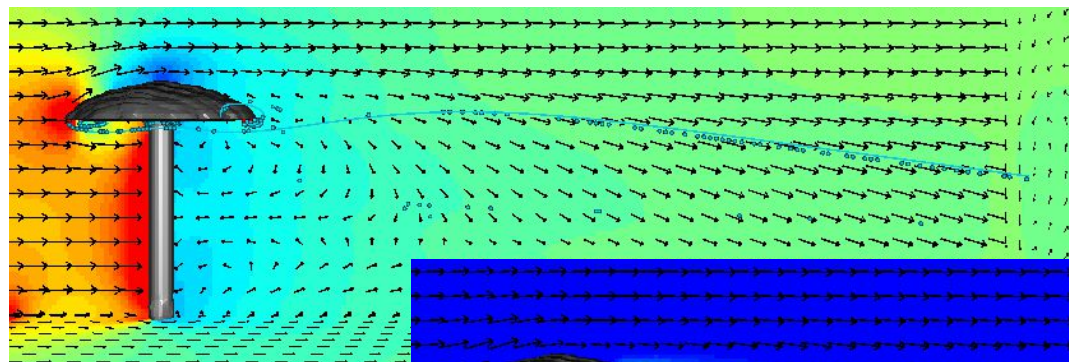
*2： ここではまず単純化するために、柄を省略して傘だけの状態でシミュレーションしています。

7 境界層の剥離(2)

こんどは柄の周囲の気流を考えましょう。柄を真上から見るとほぼ円形なので、柄の横を進む気流は傘と同様に境界層を作り、風下側には剥離による渦と低圧が生じます。

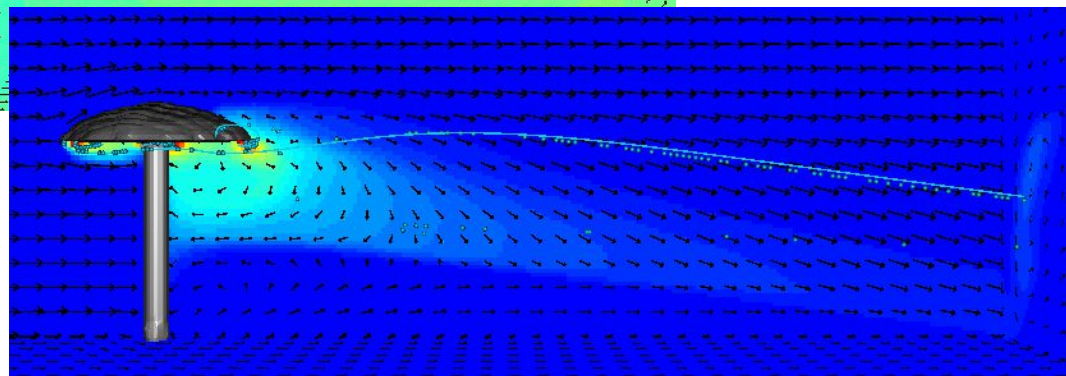


傘だけのモデルでは後端で孢子の巻き上げが起きましたが、柄を含めて考えると、柄の後方の低圧により孢子の大半は引きずり降ろされ、全体的には地表に落下*1します。



流体シミュレーションの予測 (圧力)

背景色は圧力の高低を示す
柄の後方に低圧領域が発生



流体シミュレーションの予測 (濃度)

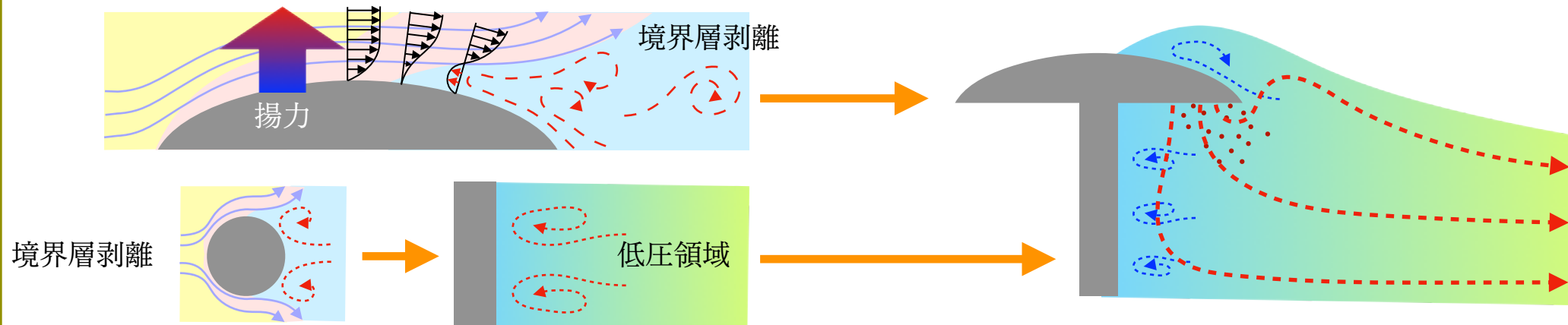
背景色は粒子の濃度を示す
傘後端の孢子の巻き上げは相殺
結果的に流れは地表に向かう

*1： 孢子の役割としては広範囲に勢力を広げることの他に、重要なものとして有性生殖があり、遺伝子の交雑で遺伝的多様性を生じ、環境変化などの逆境から生き残る確率を上げる効果があります。近くに落下するのも無駄ではありません。

8 ツルタケモデルのまとめ

ここまでの説明を整理してみましょう。

- 空気には粘性があり、物体に接した所は摩擦により流速が落ちる（境界層）
- 気流が境界層を作りきりのこの傘の曲面に沿って進むと、揚力が発生する
- 境界層は摩擦による減速で逆流を起こし、曲面から剥がれてしまう（剥離）
- 傘で生じた境界層剥離は、渦と低圧により傘の下の胞子を巻き上げる可能性がある
- 柄で生じた境界層剥離は傘の下に低圧領域を生み、胞子の巻き上げを相殺する



ではきのこの胞子の飛散に影響するのは、揚力と境界層剥離のどちらでしょう。

一つの流れの上の物理現象を完全に分離することはできないので、どちらかが100%ということはありませんが、傘の形や柄の太さなど条件を変えてシミュレーション^{*1}すると、境界層剥離によりきのこの風下に生じる渦と低圧の影響が大きいと思われます。

*1： ちなみにありえない仮想的な条件で境界層剥離を抑制すると、胞子の飛散範囲は単調で狭くなります。

9 柄の違いによる変化

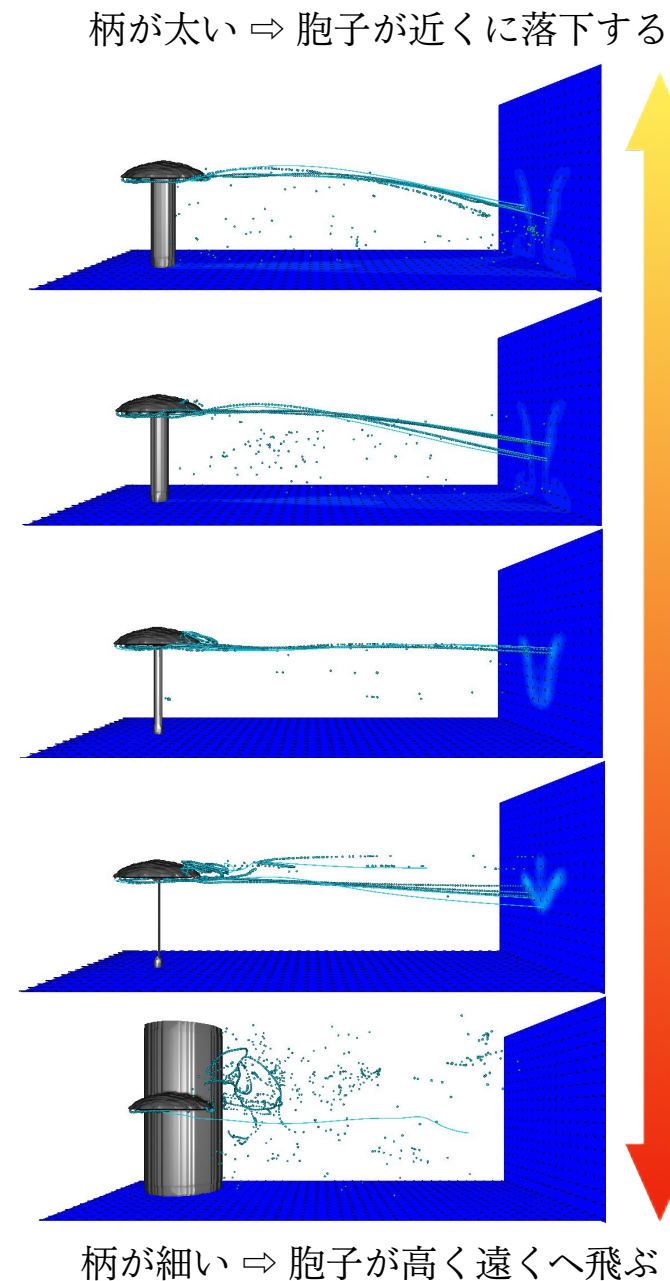
実際のきのこの傘を見ると、丸かったり平たかったりと変化に富んでいます。同様に柄もさまざまな太さのものがあり、これらはどう見ても気流に影響しそうです。実際にこれらを変化させてシミュレーションすると、次のような関係が見られます。

まず傘の深さを変えずに柄の太さを変化させてみると、柄が太くなるほど気流が弧を描くように下方に引き下ろされ、胞子の拡散範囲が低く近くなっています。

これは柄の径が大きいほど境界層剥離による柄の後方に生じる圧力低下が大きく、低圧領域も大きくなるために、傘の後端に生じた境界層剥離による低圧を相殺するためと考えられます。

反対に柄の径が細くなると、柄の後方の圧力低下も低圧領域も小さくなるため、傘の後端の胞子の巻き上げはあまり影響を受けなくなり、傘だけの状態に近くなります。

なお、サルノコシカケ型のきのこでは、自身に柄が無い代わりに、生えている樹の幹が柄と同様の働きをします。ただこの場合、幹は傘の上側にも続いているために上にも大きな境界層剥離と低圧領域を生じ、胞子の巻き上げをさらに強力に後押しすることになります。



10 傘の違いによる変化

こんどは柄の太さを変えずに傘の深さを变化させてみましょう。

傘の深さを变化させてみると、傘が深いほど胞子が高く広範囲に拡散し、浅くなると低く近い範囲に落下する傾向が見られます。

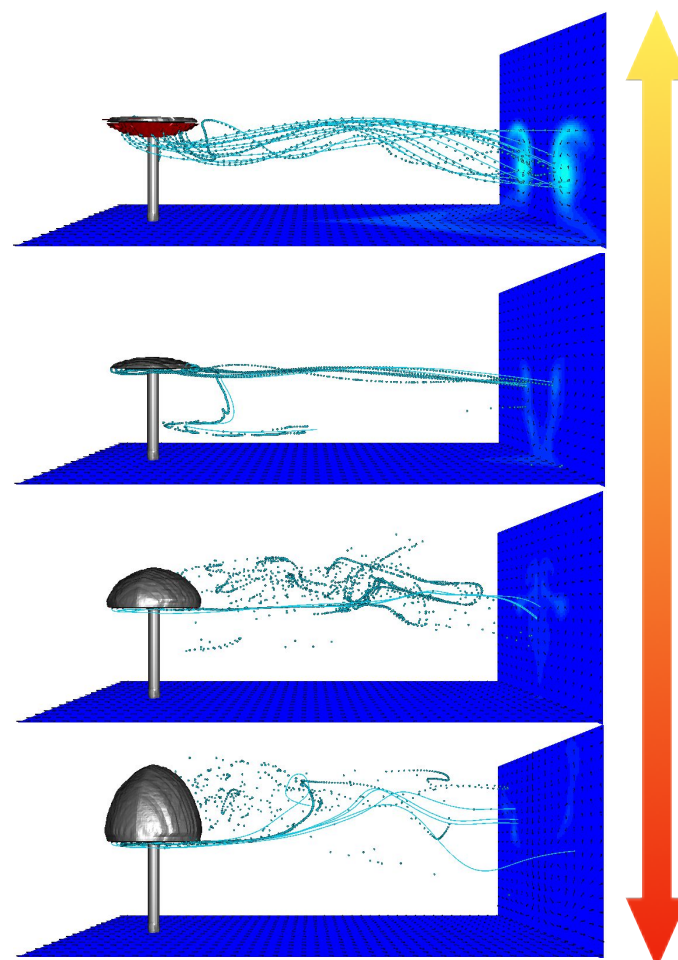
これは曲面の角度変化が急なほど境界層剥離が起きやすく、逆流と低圧でより胞子を巻き上げる力が増すためと考えられますが、傘の場合はもう少し事情が複雑です。

多くのきのこのこの傘は形がドーム状のため、傘が深くなるほど周囲に生じる層流は垂直方向だけでなく、水平方向の成分の割合が高くなります。傘の径は通常柄の径よりも大きいため、境界層剥離による低圧領域も大きくなり、胞子の巻き上げは強力かつ複雑になります。

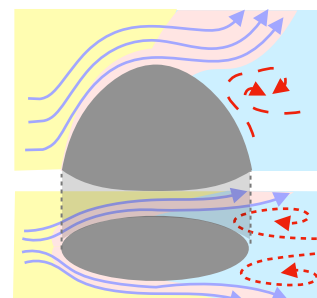
また、テングタケの仲間で開き切った傘が反対に反り返る*1ことがあります。この場合胞子が出る傘の下側で、下向きの境界層剥離が起きるため、傘の下側の低圧領域は柄と傘からの剥離の相乗効果で強力になります。

*1： 厳密には傘の深さは逆に深くなりますが、傘が開き切った先ということと、その効果の点からマイナス方向の深さとして「浅い」側に入れました。

傘が浅い ⇒ 胞子が低く近くに落下



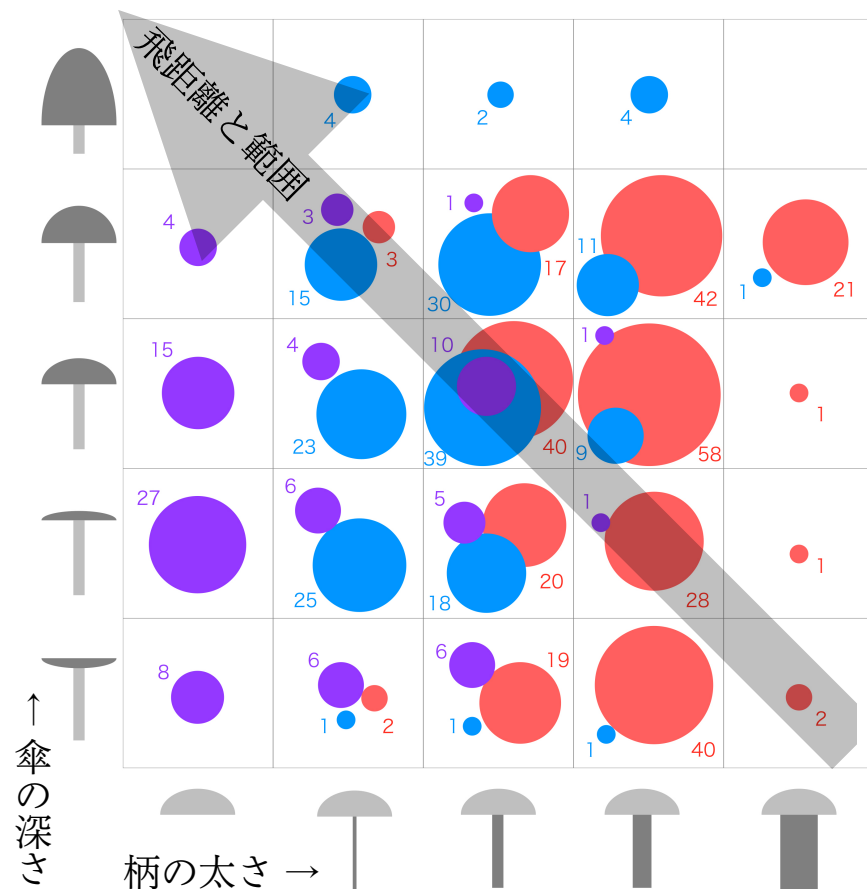
傘が深い ⇒ 胞子が高く広範囲に飛ぶ



傘が深くなると
垂直方向の剥離
+
水平方向の剥離

11 実際のきのこのこに見られる傾向

傘と柄の違いによる孢子飛散の傾向を実際のきのこのこに当てはめてみましょう。傘の深さ・柄の太さときのこのライフスタイル(何を糧に生きるか)の関係に注目すると、不明瞭ながらも以下の緩い相関関係が見られます。



山と溪谷社『日本のきのこ』に掲載された担子菌門で、傘と柄のあるきのこ、および傘のみのサルノコシカケ型のきのこから、塊状に密集したもの除いた575種を、傘の深さと柄の太さにより仕分けして、菌根菌・地上生腐生菌・樹上生木材腐朽菌別に該当数を図示したもの。

● 菌根菌

植物と根を介して共生し、養分や無機物の交換を行う種類。
 テングタケ、ベニタケ、マツタケ等

● 地上生腐生菌

地上の落葉、動物の死骸、糞などを栄養に育つ種類。
 ツクリタケ、ヒトヨタケ、オチバタケ等

※木材腐朽菌で地上の落ち枝に育つ種類はこちらに入れた

● 樹上生木材腐朽菌

枯木や弱った樹木に取りつき、分解して栄養にする種類。
 ヒラタケ、サルノコシカケ、ツキヨタケ等

これはあくまで憶測ですが、相関関係にはこんなことがあるのかもしれない。

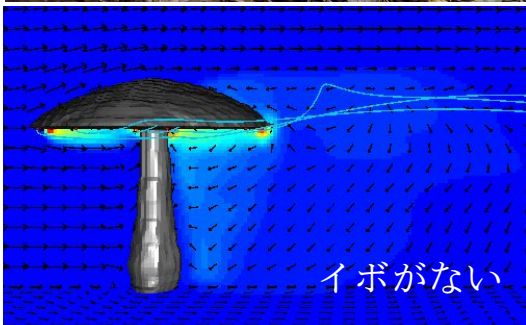
菌根菌は樹木との共生で食糧事情は安定的 ⇒ 新天地開拓より交雑による遺伝的多様性

地上生腐生菌は今後も食糧は得られそう ⇒ できれば新天地も開拓しておきたい

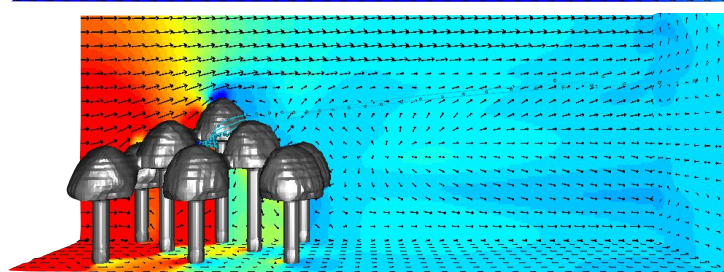
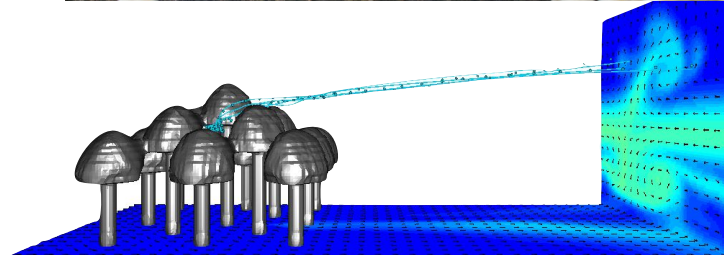
樹上生木材腐朽菌は材を食べ尽くしたら終わり ⇒ 新天地開拓しなければ未来はない

12 いろいろなきのこの空力特性

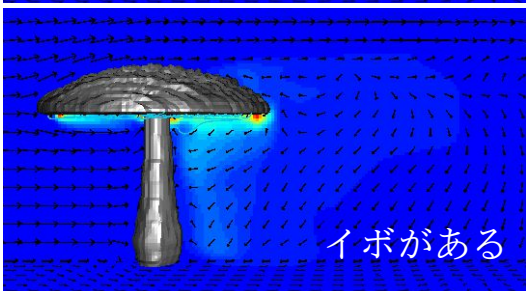
ここまではツルタケをモデルとした仮想的なきのこで考察を行いましたが、実際のきのこでは傘や柄の形がさまざまなだけでなく、密集したりイボだらけのものがあつたりと曲者だらけです。これらは必ずしも説明可能なものばかりではありませんが、流体力学的な効果が想定できそうな例もあり興味は尽きません。



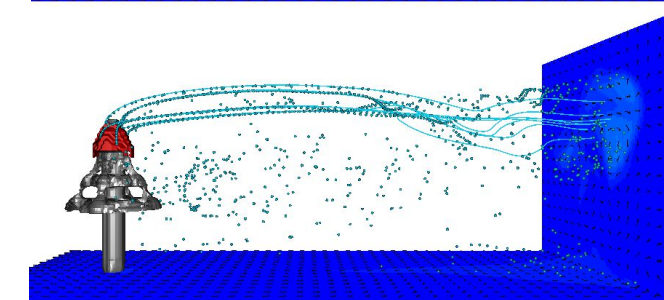
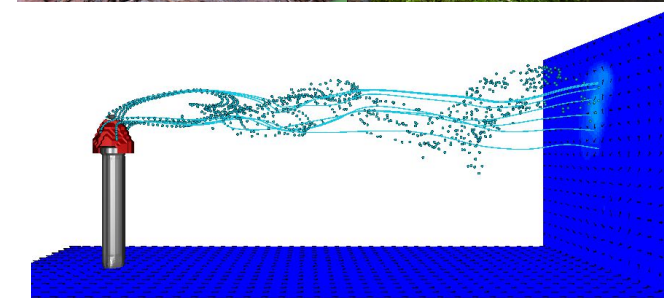
イボがない



イヌセンボンタケのような密集したきのこ
密集中心部での圧力低下が少ない
→ 胞子が傘の間から上に吸い上げられる？



イボがある



スッポンタケとマクキヌガサタケ
レースによる大きな剥離渦の発生
→ 虫を誘う悪臭が広範囲に拡散？

シロオニタケのような傘が凸凹のきのこ
凹凸による乱流境界層の発生
→ 境界層が剥離しにくい
→ 整流効果？ (ゴルフボール, 鮫肌水着)