

揚力型水平軸風車（風力タービン）が 回転する仕組み超入門 （β版）

内容の一部は“簡単に説明するため”に、専門用語を極力使用しないようにしています。
厳密な理論などは、（スライド中に表記した）リンク先などを参照してください。

クリエイティブコモンズライセンスについて

Wind Turbine Generator Paper Model by [Kazuyoshi WASEDA](http://www.kobe-kosen.ac.jp/~waseda/wtgpapermodel/index.html) is licensed under a [Creative Commons 表示 - 継承 4.0 国際 License](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).
<http://www.kobe-kosen.ac.jp/~waseda/wtgpapermodel/index.html>にある作品に基づいている。
このライセンスで許諾される範囲を超えた利用の可能性については以下のアドレスもご覧下さい。<http://www.kobe-kosen.ac.jp/~waseda/wtgpapermodel/index.html>



内容

- 揚力型水平軸風車(風力タービン)の種類
- 流体力学と翼型(翼素理論)の基礎
- 揚力型水平軸風車が回転する仕組み
- レイノルズ数(Re)とは？

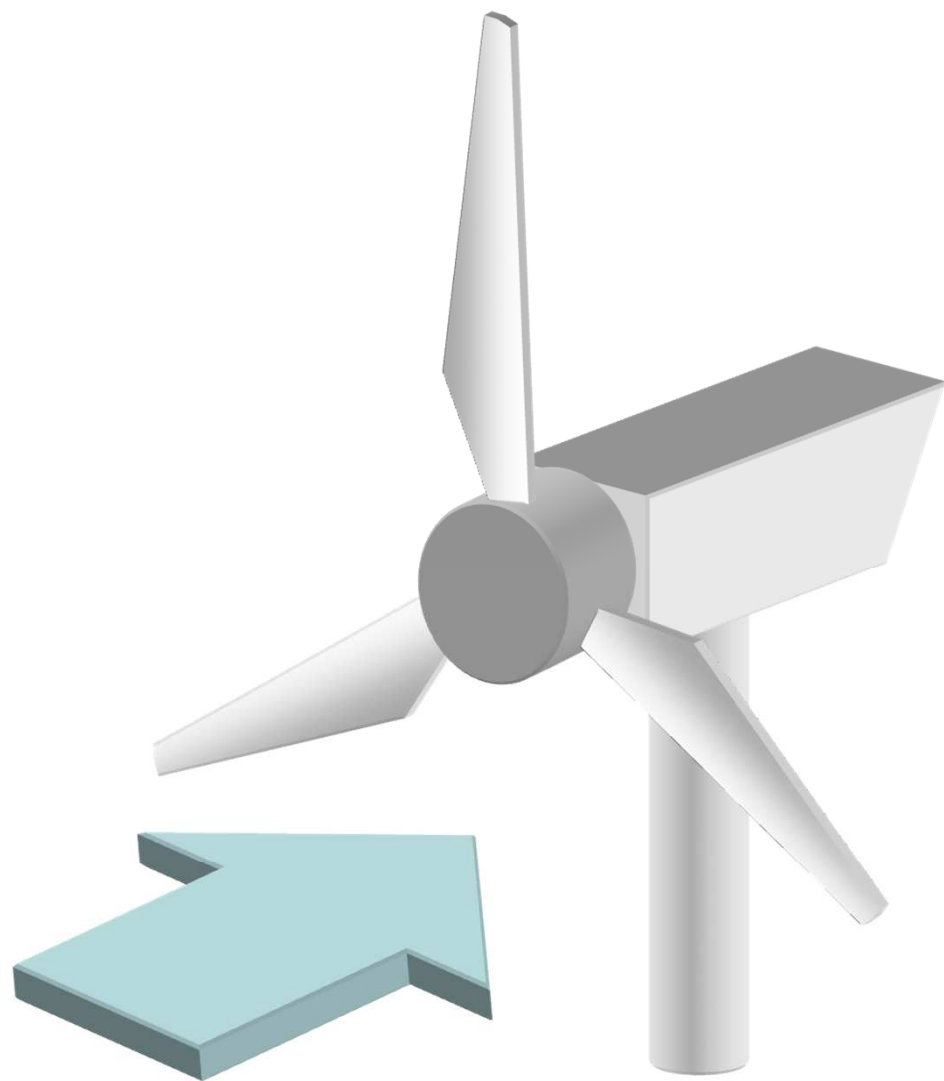
揚力型水平軸風車 (風力タービン)の種類

揚力型水平軸風車（風力タービン）の中で

アップウィンド型・ダウンウィンド型

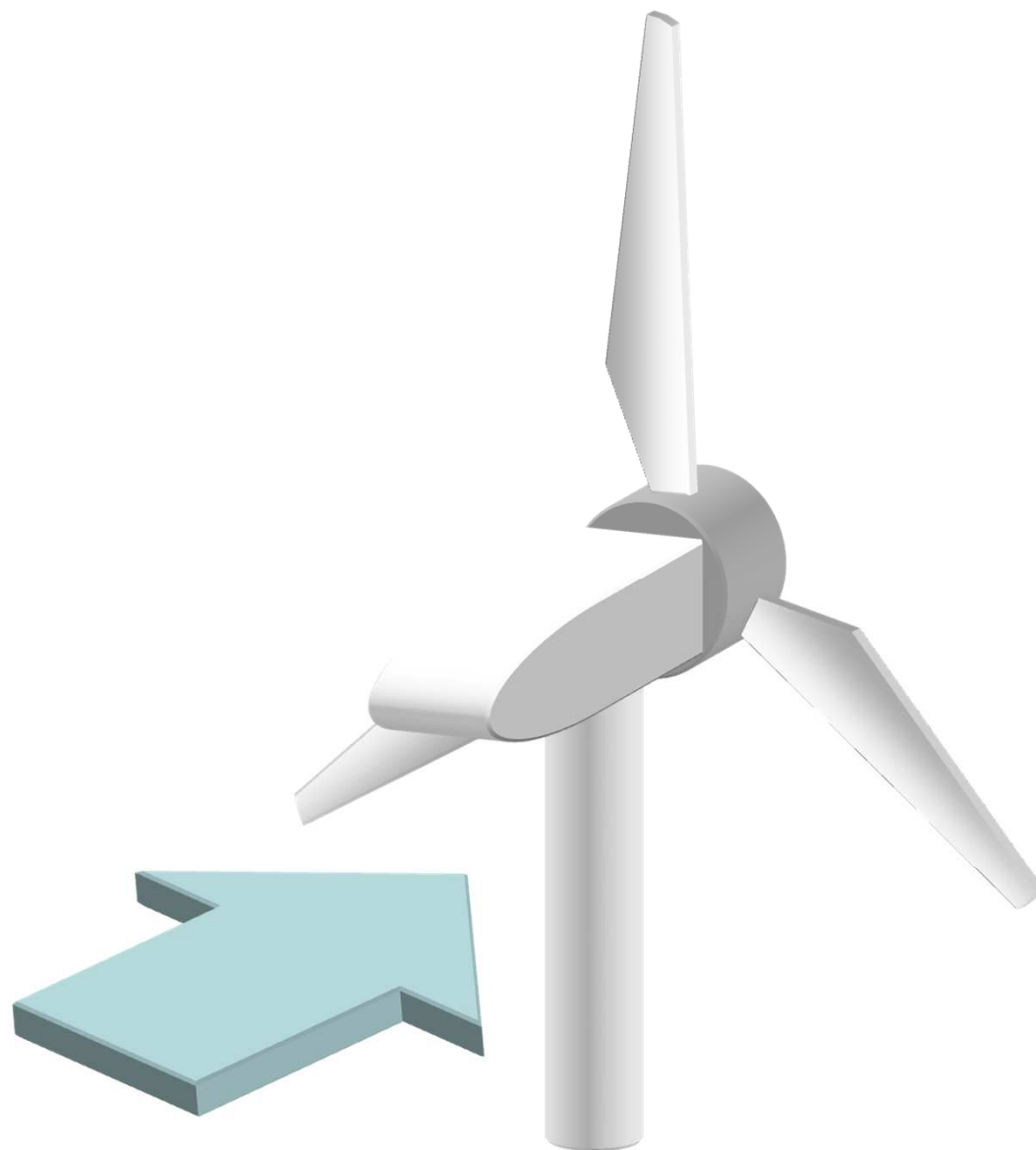
がある

アップウィンド型



ローターブレードがタワーの風上側

ダウンウィンド型



ローターブレードがタワーの風下側

メリット・デメリットがある

アップウィンド型（主流の形）

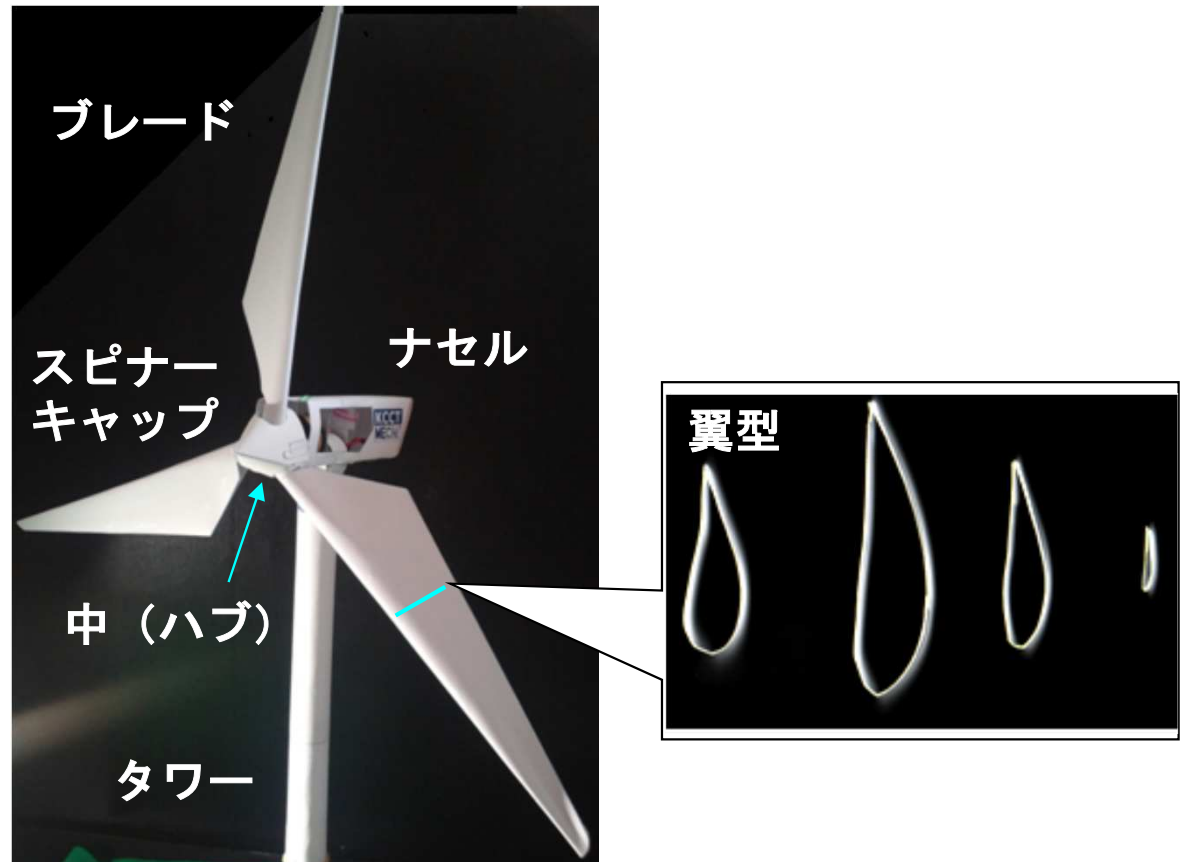
- ・ローターの前に風の流れを妨げるものがない
- ・ローターを風上に向ける装置が必要（アクティブヨーコントロール）
など

ダウンウィンド型

- ・ローターの前にタワーがあるので少し流れが乱れる
- ・ローターを風上に向ける装置が動かなくなっても（故障、電源喪失）、風見鶏効果で自動的に風上を向く（フリーヨーコントロール）→ 厳しい環境（風況）下に強い
など

風車の主要な各部名称

- 翼型 (airfoil)
- (ローター)ブレード (翼型が並んでいる)
- ナセル
- ハブ (ブレードの根元)
- スピナーキャップ
- タワー



揚力型水平軸風車が回転する仕組み

その前に、、、

流体力学と翼型（翼素理論）の基礎

より正確な流体力学と翼型（翼素理論）の情報は以下を参照

日本機械学会 流体工学部門: 活動内容: 楽しい流れの実験教室 <http://www.jsme-fed.org/experiment/>

飛行機はなぜ飛ぶかのかまだ分からない?? - NPO法人 知的人材ネットワーク・あいんしゅたいん

Wikipedia: 揚力とベルヌーイの定理

<http://jein.jp/jifs/scientific-topics/887-topic49.html>

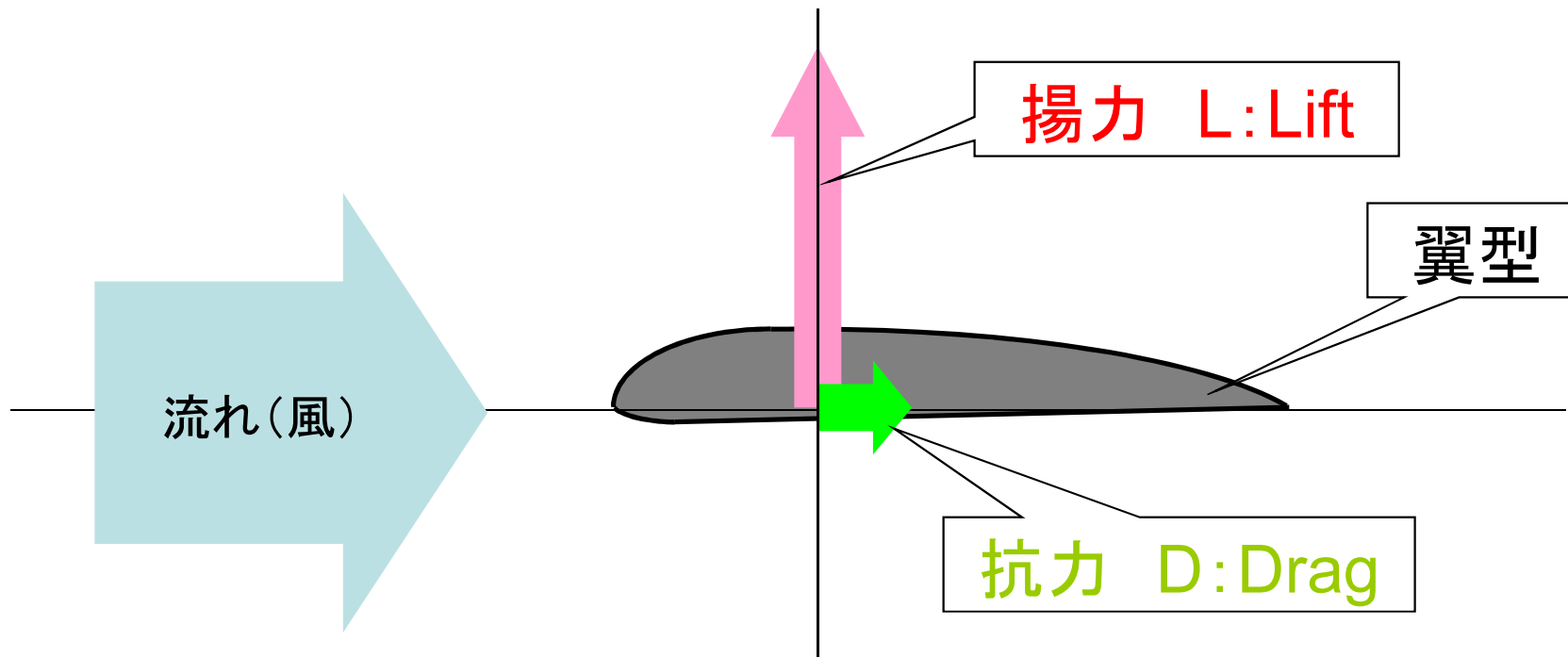
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%8C%E3%83%BC%E3%82%A4%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86%E6%8F%9A%E5%8A%9B%E3%81%A8%E3%83%99%E3%83%AB%E3%83%8C%E3%83%BC%E3%82%A4%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%90%86>

NASA: Incorrect Lift Theory <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/wrong1.html>

NASA: Incorrect Lift Theory #2 <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/wrong2.html>

揚力・抗力とは？

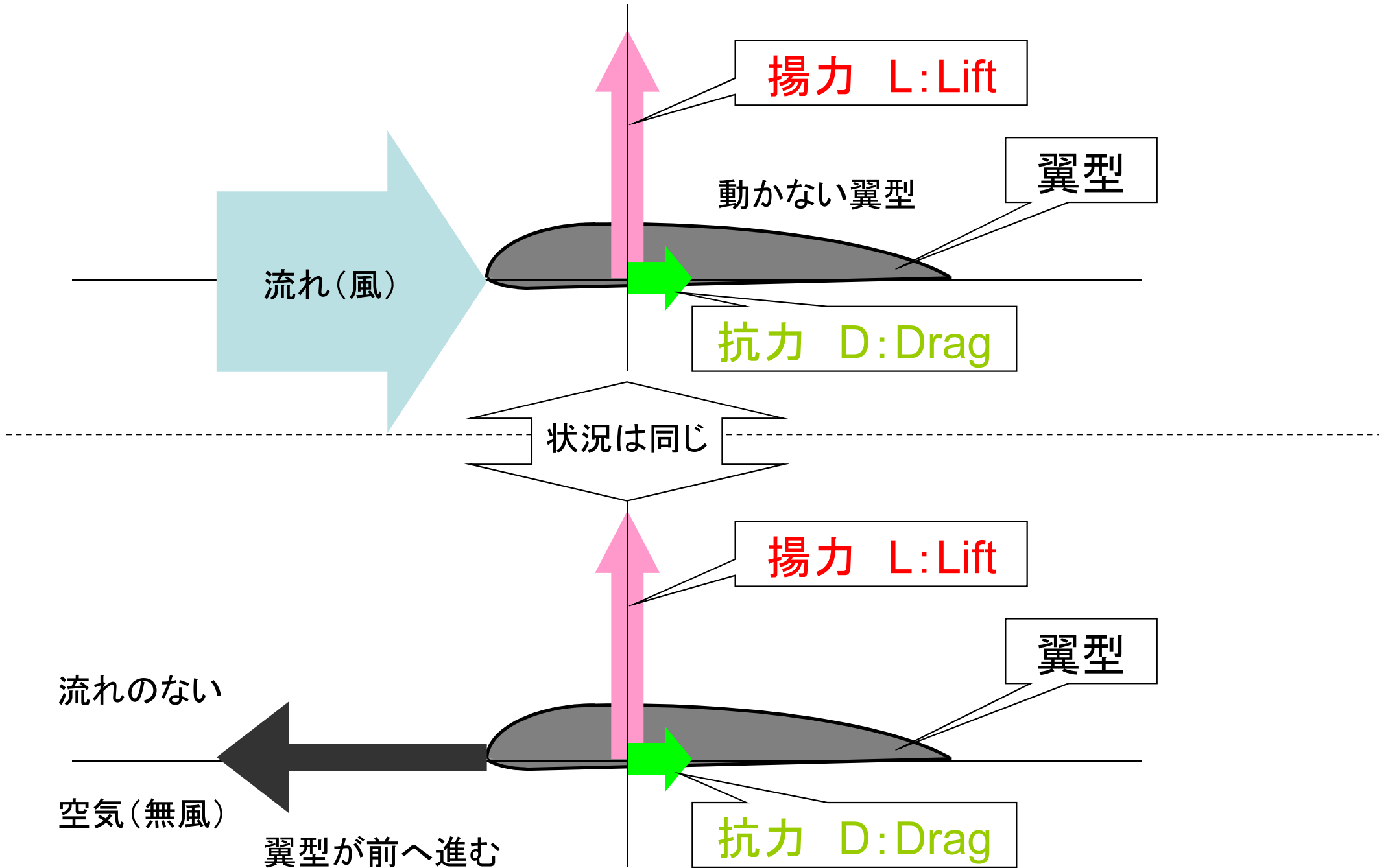
- **揚力** = 風向に対して垂直方向に発生する力
- **抗力** = 風向に対して水平方向に発生する力



翼型：できるだけ抗力を少なくし、できるだけ揚力を得るように工夫した形状

ちなみに、状況は同じです

「動かない翼型」を「空気の流れの中に入れる」=「流れの無い空気中」で「翼型を前に動かす」



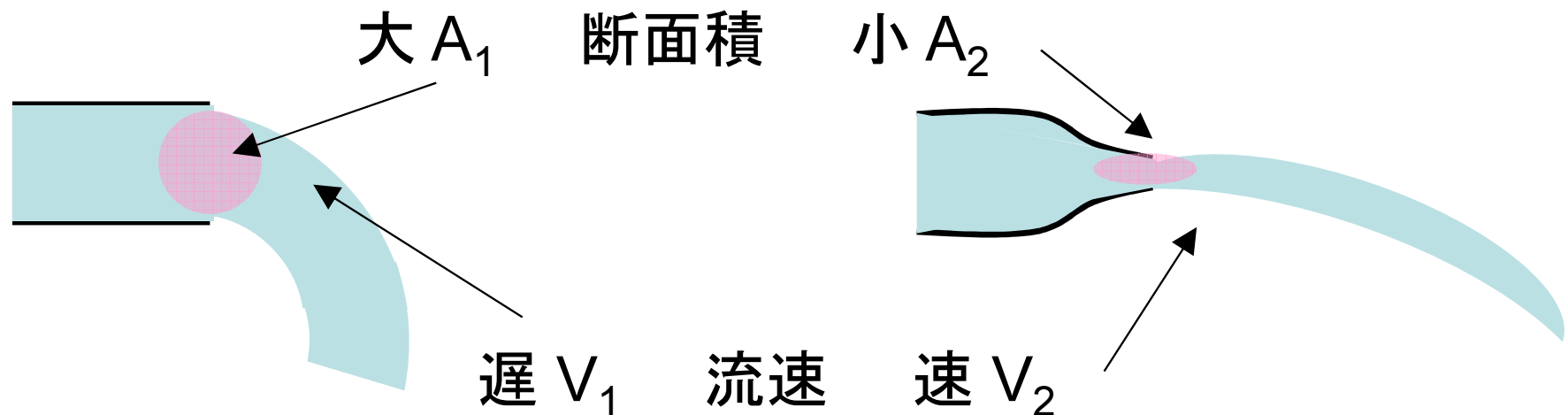
連続の法則 (流量(Q)一定の法則)

$$Q[\text{m}^3/\text{s}] = A[\text{m}^2]V[\text{m}/\text{s}] = \text{流量一定}$$

A: 断面積(m^2)

V: 流速(m/s)

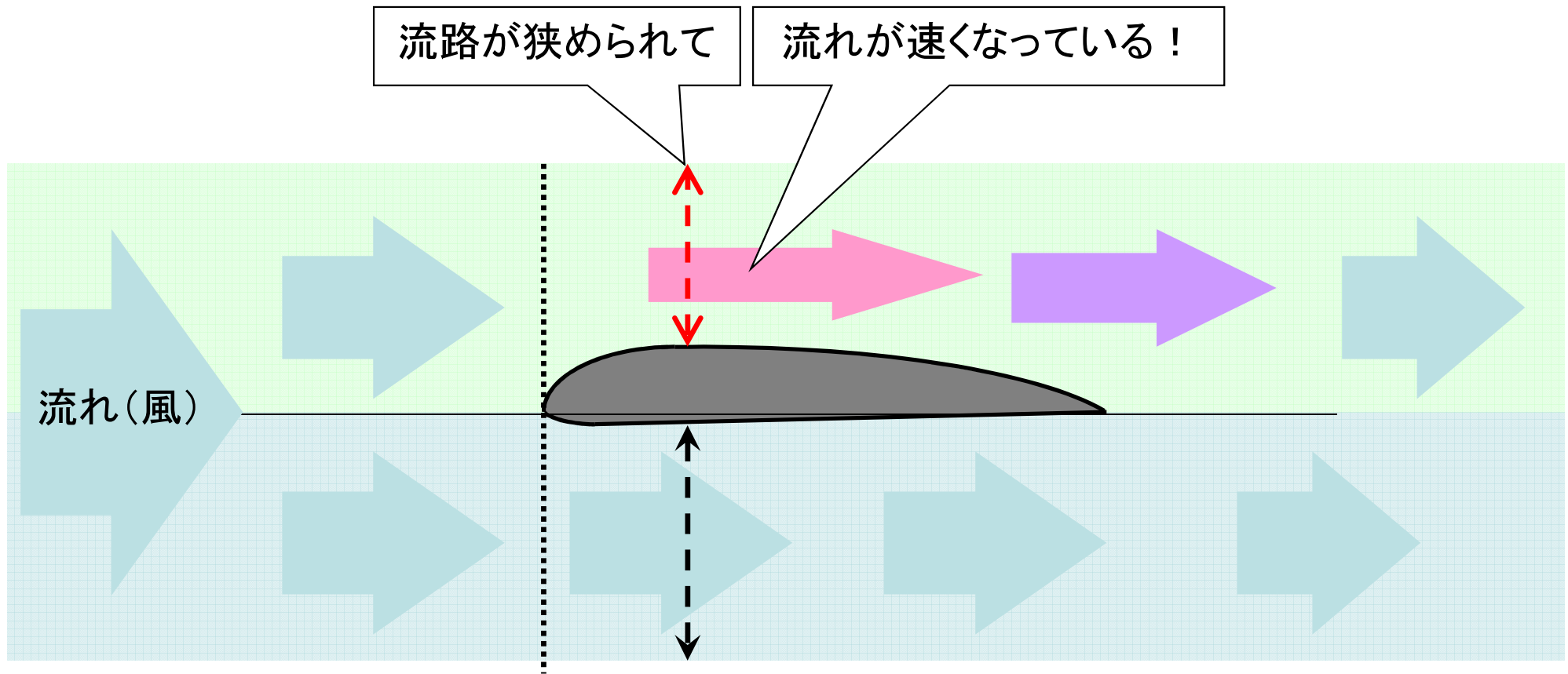
ホースの先をすぼめると水の勢い(速度)が増す!



$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$ 1秒間当たりに出ている量(流量 $Q[\text{m}^3/\text{s}]$)は一緒

流路(の断面積)が狭められると→流れが速くなる!!

翼型の周りでは何が起こっているのか？
(=なぜ飛行機が飛ぶのか？)
=上面の方が空気の流れが速い



ベルヌーイの定理 (流体のエネルギー保存則)

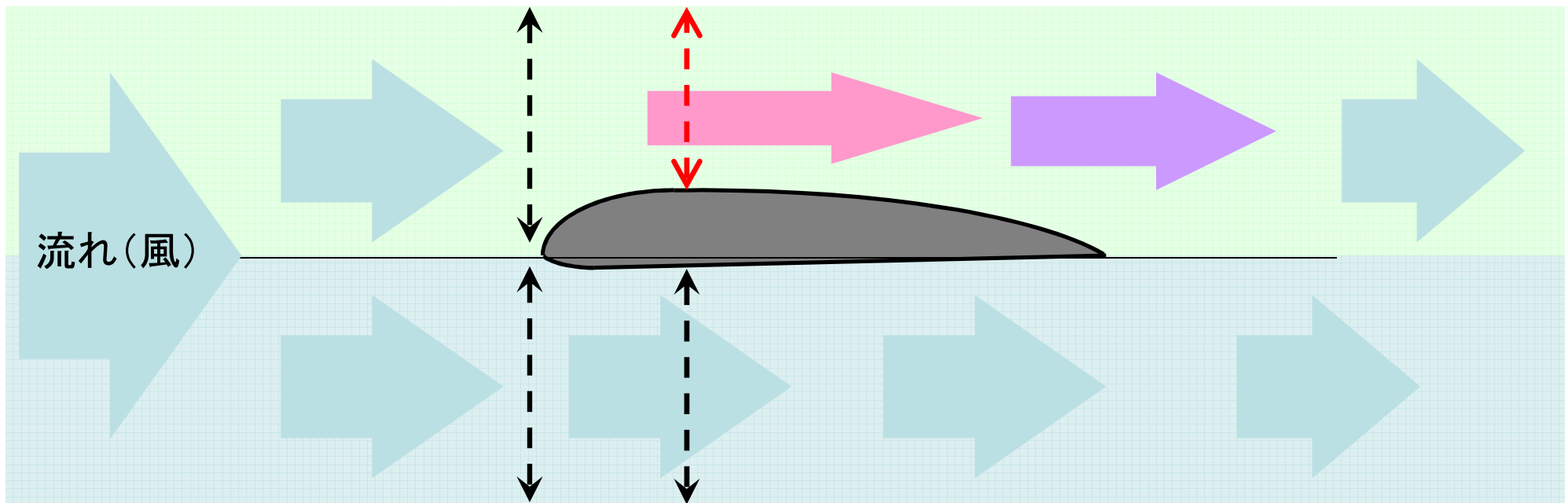
$$\frac{1}{2}V^2 + \frac{p}{\rho} = \text{const.}$$

速度エネルギー + 圧力エネルギー = 一定

V : 流速[m/s]

p : 圧力[Pa]

ρ : 空気密度[kg/m³]



注) ベルヌーイの定理だけでは翼型と揚力の説明は不足しています

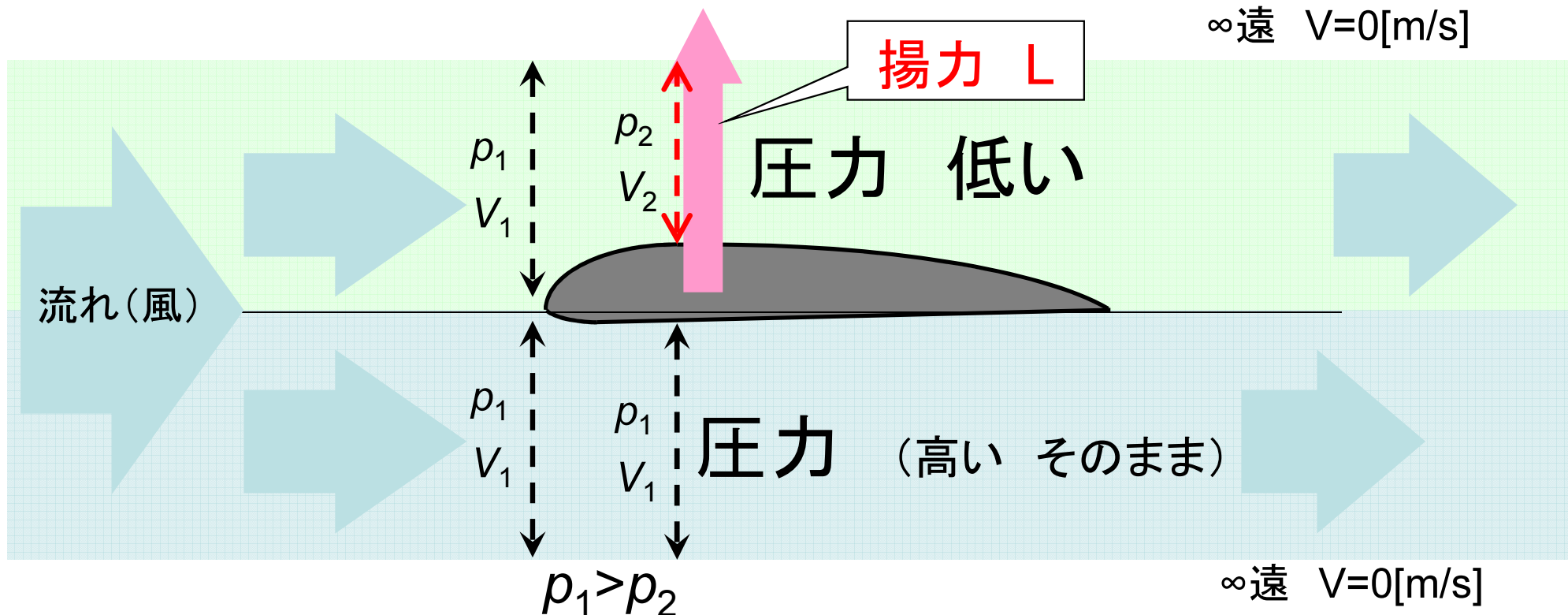
ベルヌーイの定理 (流体のエネルギー保存則)

$$\frac{1}{2} V_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{1}{2} V_2^2 + \frac{p_2}{\rho} = \text{const.}$$

速度エネルギー + 圧力エネルギー = 一定

V_1, V_2 : 測定位置での流速
 p_1, p_2 : 測定位置での圧力
 ρ : 空気密度

∞ 遠 $V=0$ [m/s]



翼型背面(上面)で速い流れをつくりだし→圧力を低くして、引張りあげる→揚力

細かい話(本来は翼周りの渦の話もしなければなりません)はさておき、、、

翼型:

できるだけ抗力を少なくし、

できるだけ揚力を得るように工夫した形状

です

翼型ごとに揚力を大きくかつ抗力を小さく発生する最適な角度がある

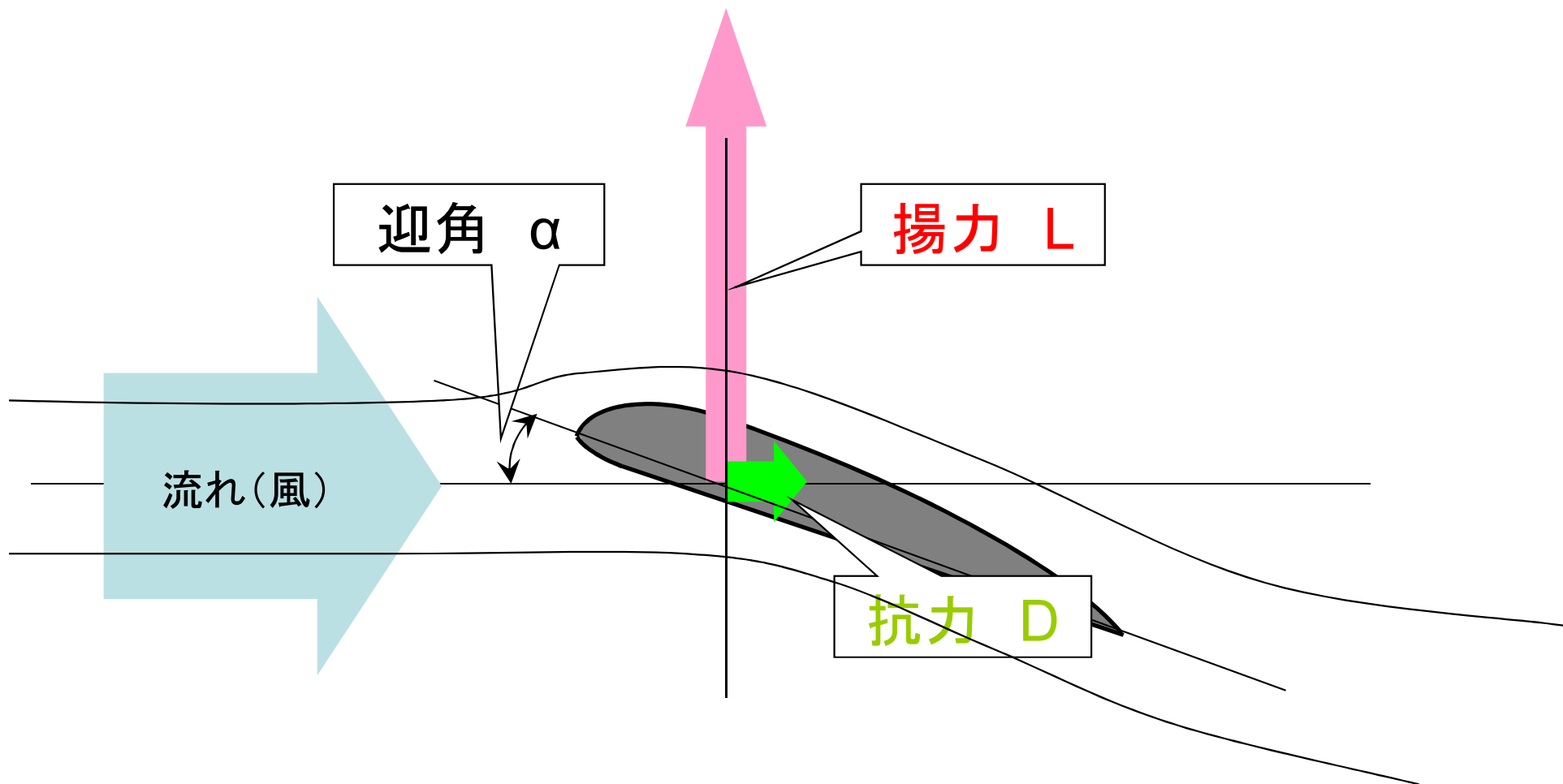
- 翼型の風向に対する角度＝迎角 (α)
- 角度を上げると揚力 (L) が上がるが抗力 (D) も大きくなる
- 角度を上げすぎると失速 (Stall) する
- 最適な迎角 (揚抗比 (L/D) が大きい) を保つのが理想

翼型ごとに揚力を大きくかつ抗力を小さく発生する最適な角度がある

- 翼型の風向に対する角度＝迎角 (α)
- 角度を上げると揚力 (L) が上がるが抗力 (D) も大きくなる
- 角度を上げすぎると失速 (Stall) する
- 最適な角度 (揚抗比 L/D) が大きい迎角を保つのが理想

むかえかく

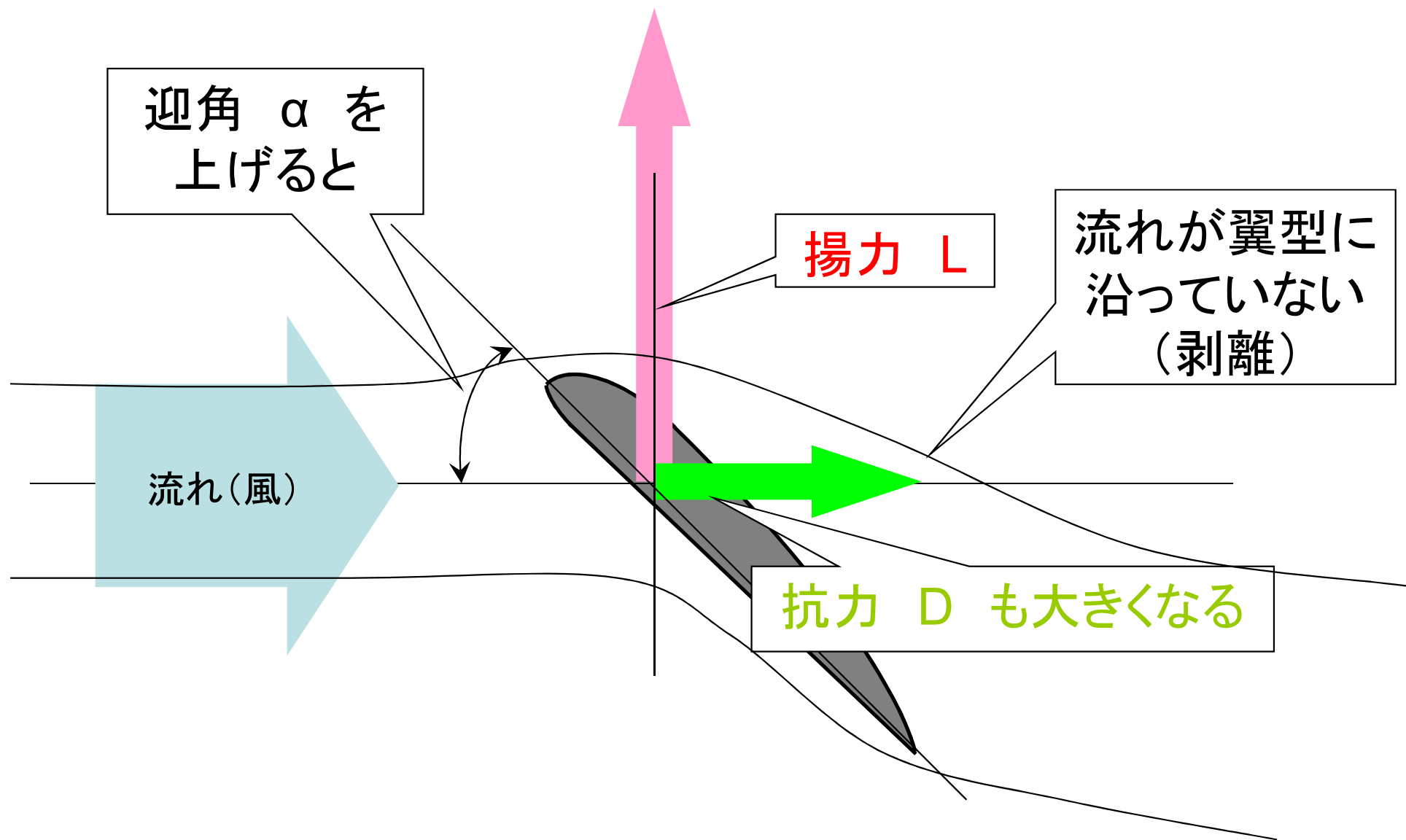
迎角 (α) はどこ？



揚力を発生する最適な角度がある

- 翼型の風向に対する角度＝迎角 (α)
- 角度を上げると揚力(L)が上がるが抗力(D)も大きくなる
- 角度を上げすぎると失速(Stall)する
- 最適な角度 揚抗比 L/D が最も大きい迎角を保つのが理想

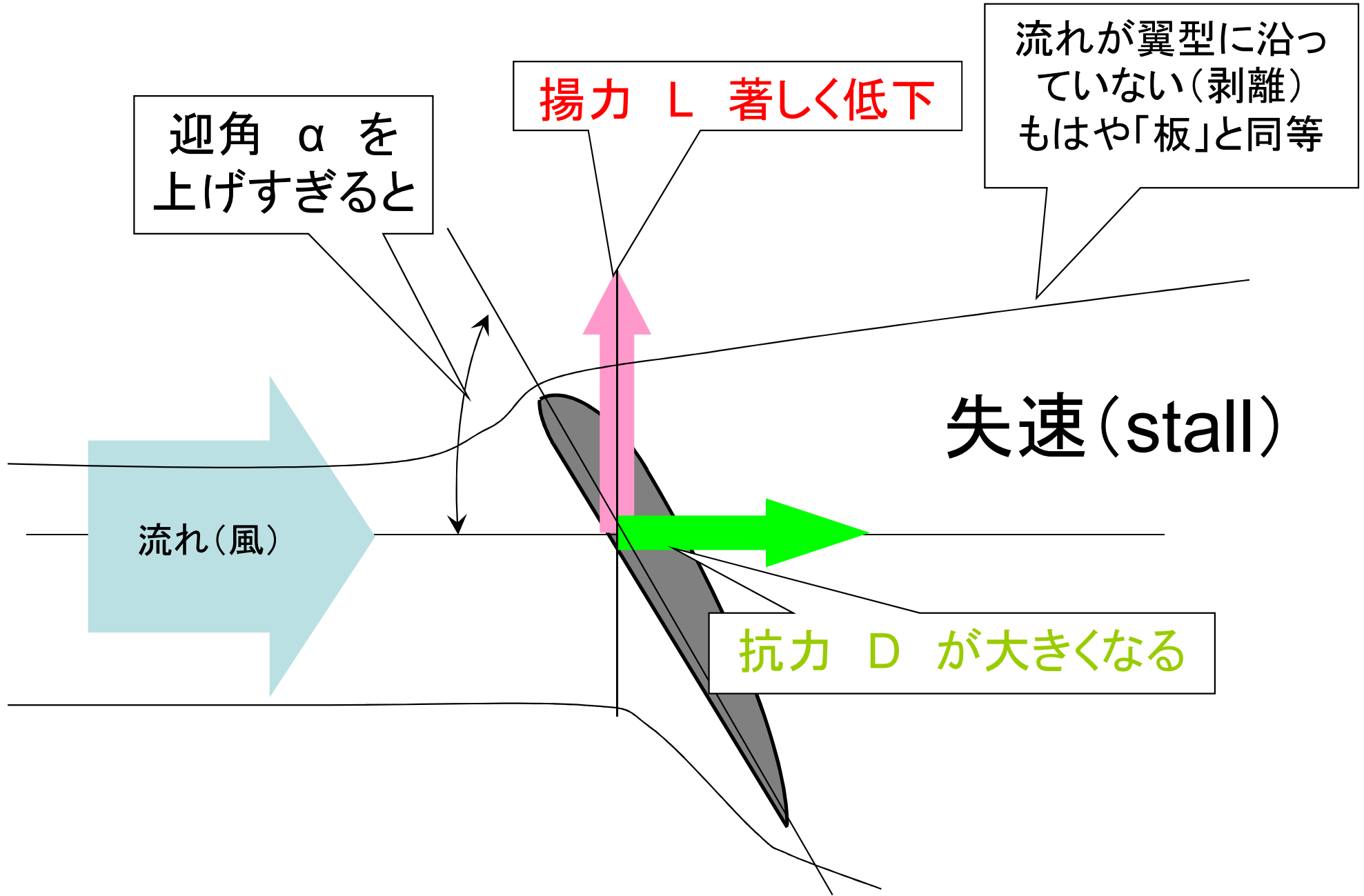
角度を上げると揚力(L)が上がるが 抗力(D)も大きくなる



揚力を発生する最適な角度がある

- 翼型の風向に対する角度＝迎角 (α)
- 角度を上げると揚力 (L) が上がるが抗力 (D) も大きくなる
- 角度を上げすぎると失速 (Stall) する
- 最適な角度 揚抗比 L/D が最も大きい迎角を保つのが理想

角度を上げすぎると失速 (Stall) する



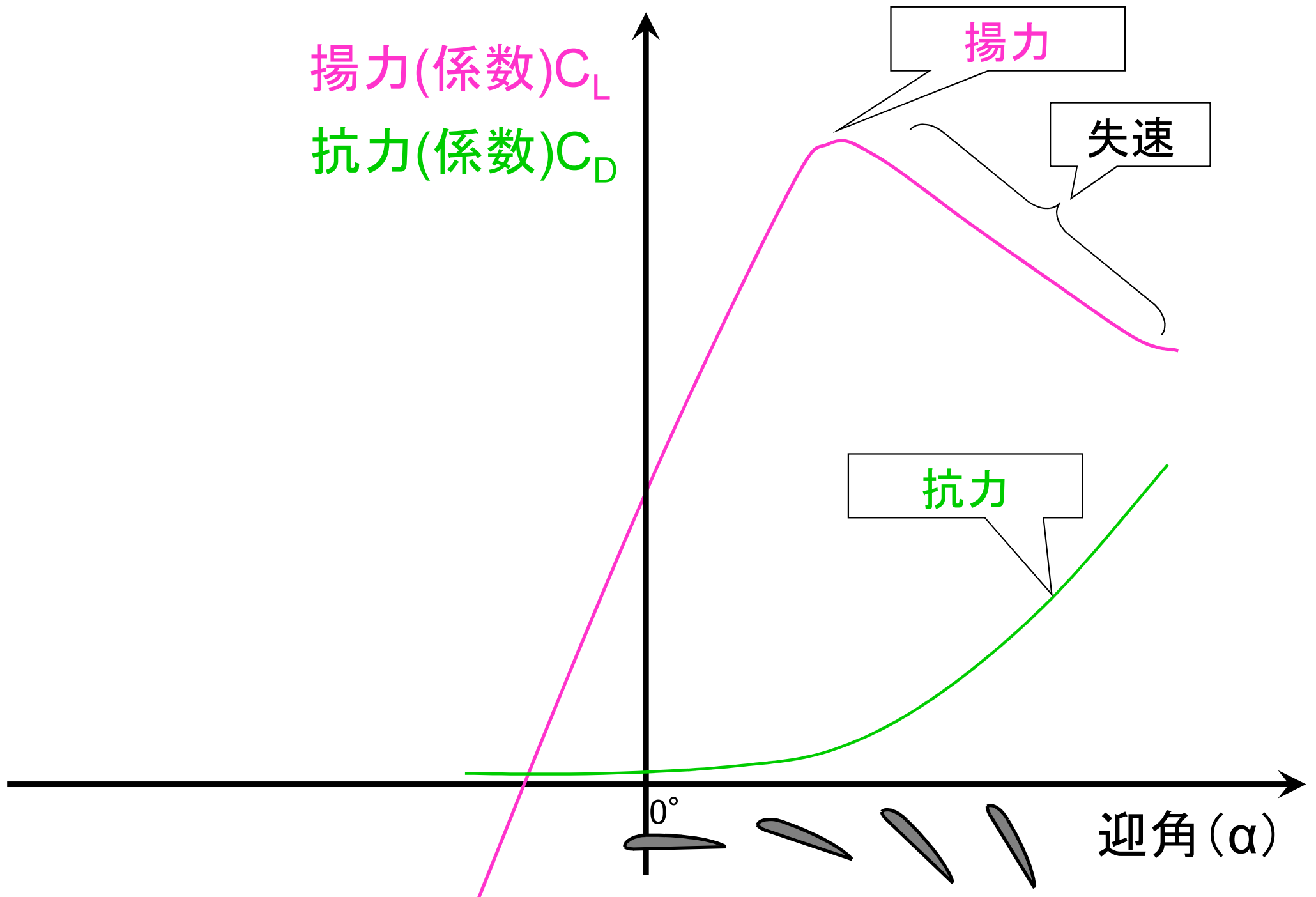
最適な角度

“揚抗比 L/D ” が大きい

迎角 (α) を保つのが理想！

そのために、翼型の(様々な角度での)性能試験を実施します

角度を上げると揚力(L)が上がるが抗力(D)も大きくなる

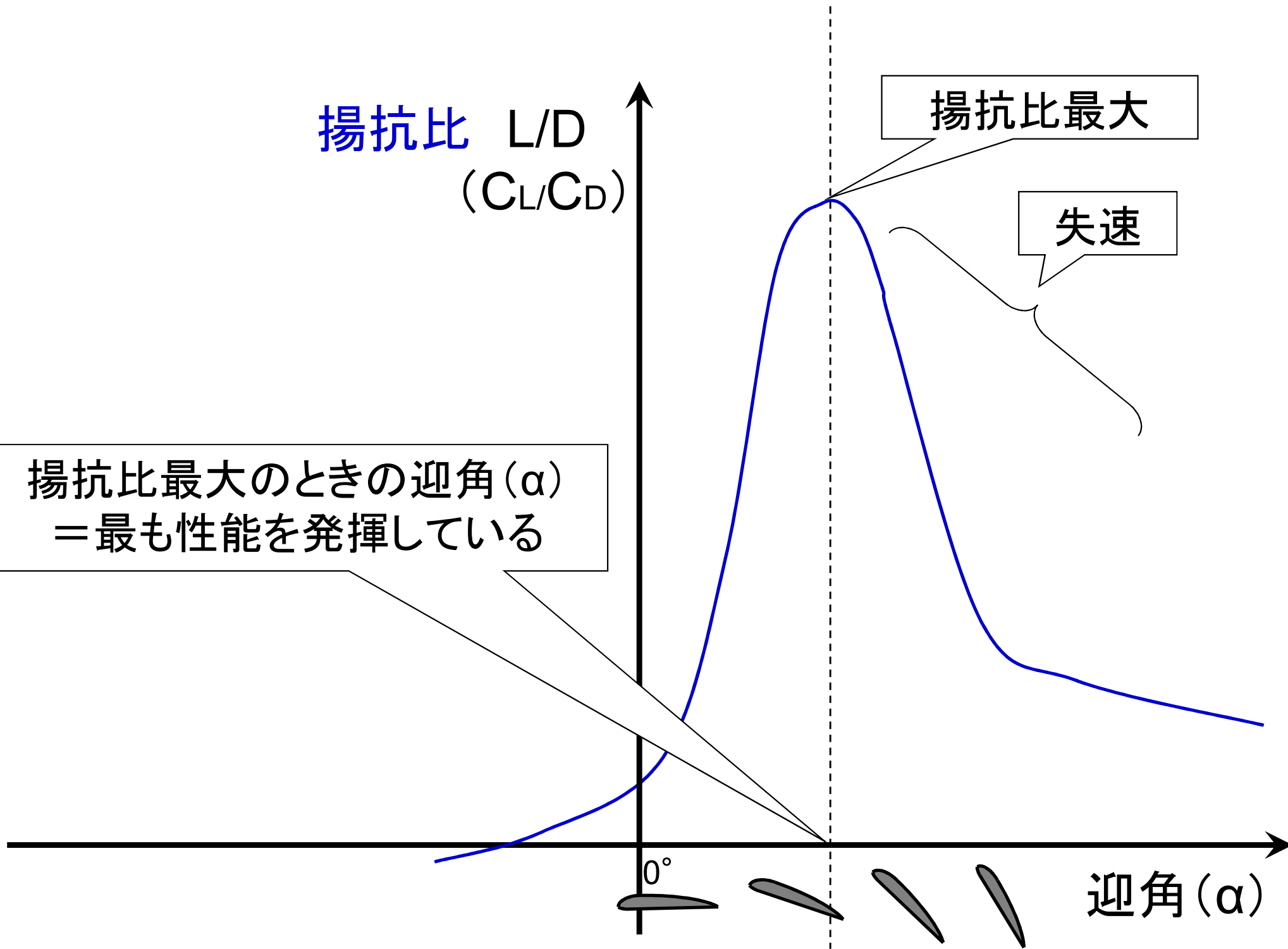


揚抗比 L/D
(C_L/C_D)

揚抗比最大

失速

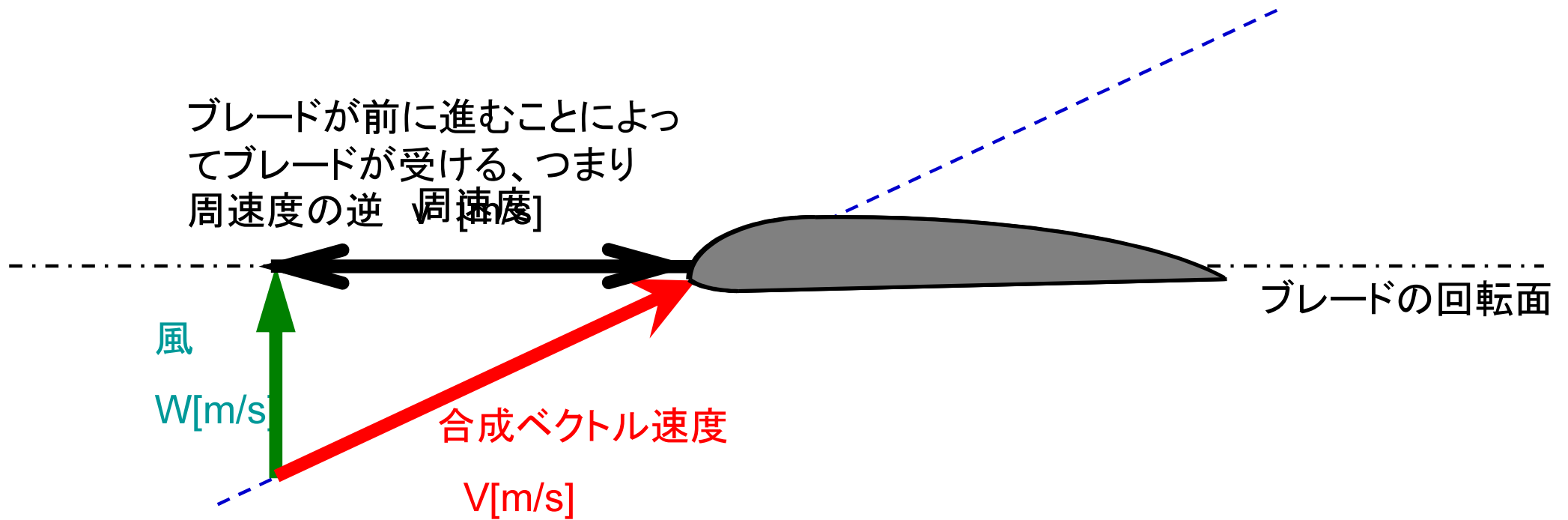
揚抗比最大のときの迎角(α)
= 最も性能を発揮している



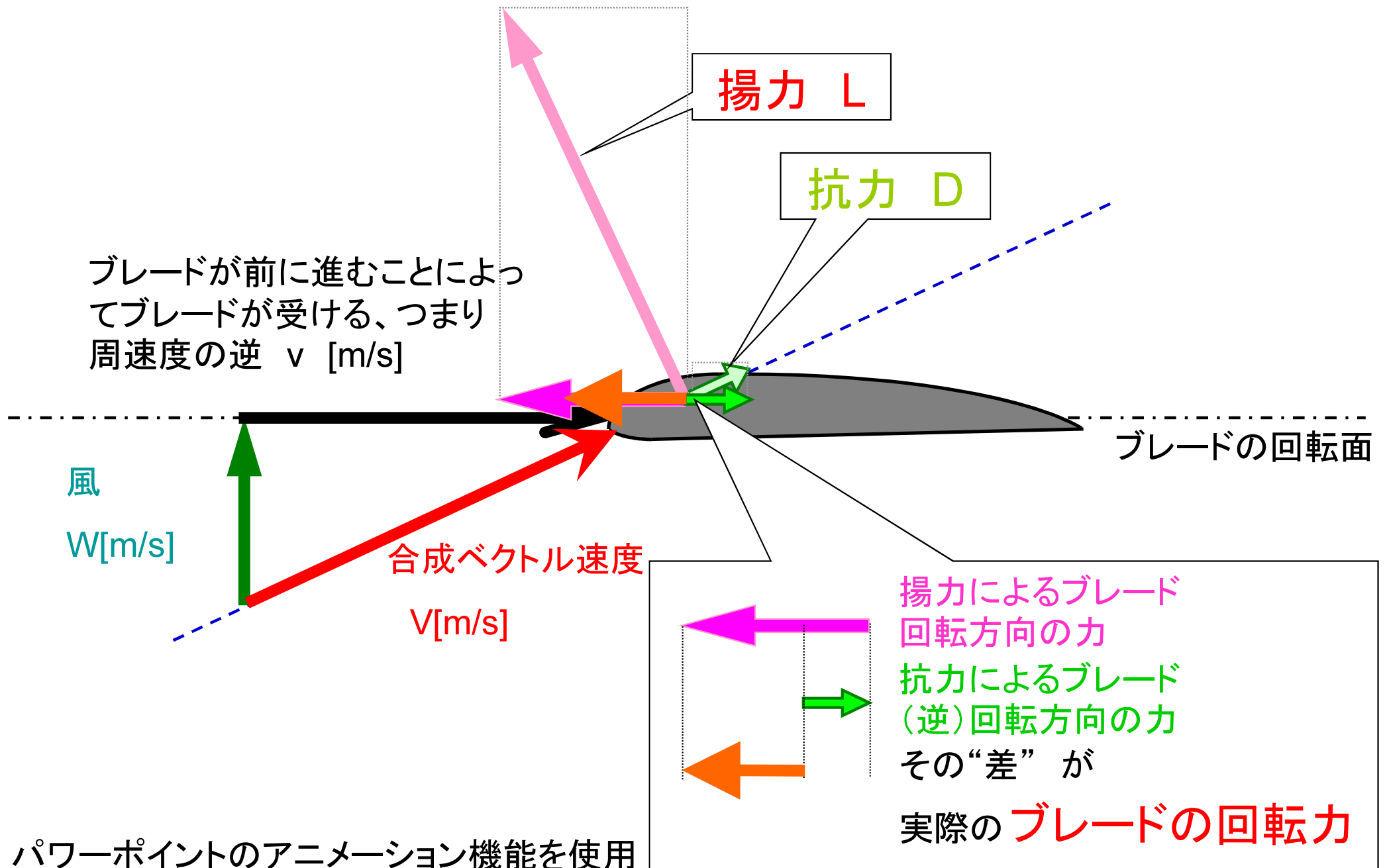
ようやく
揚力型水平軸風車が回転する
仕組みの話

風車は「揚力」で回転している！！

揚力をどのように風車の回転力にしている？



揚力をどのように風車の回転力にしている？



つまり、、、

“揚抗比 L/D ” が大きい翼型形状にすれば、

風車もよく回転する！！

ということ！！

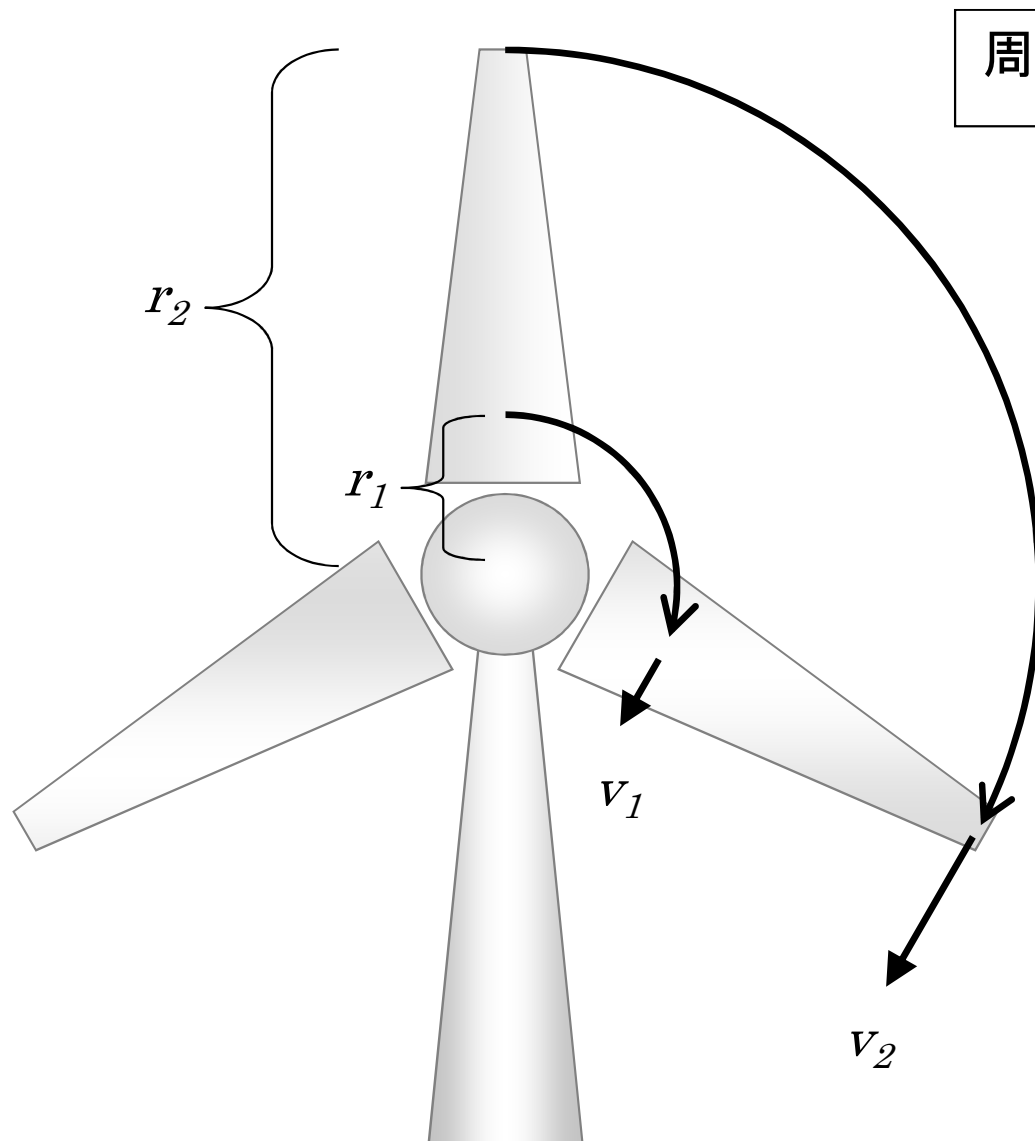
さらに、、、

風と周速度の合成ベクトル速度で
風車が回っていることがわかった、、、

風車のブレードは
なぜねじれて(ひねって)いるのか？
がわかる！

ブレードはなぜねじれている？

ブレードのチップ(先端・外側)とハブ(内側)で速度差がある！



周速度(円運動の速度)

$$v = r\omega = \frac{2\pi r}{T} \quad \left(\omega = \frac{2\pi}{T} \right)$$

ω : 角速度 ラジアン毎秒[rad/s]

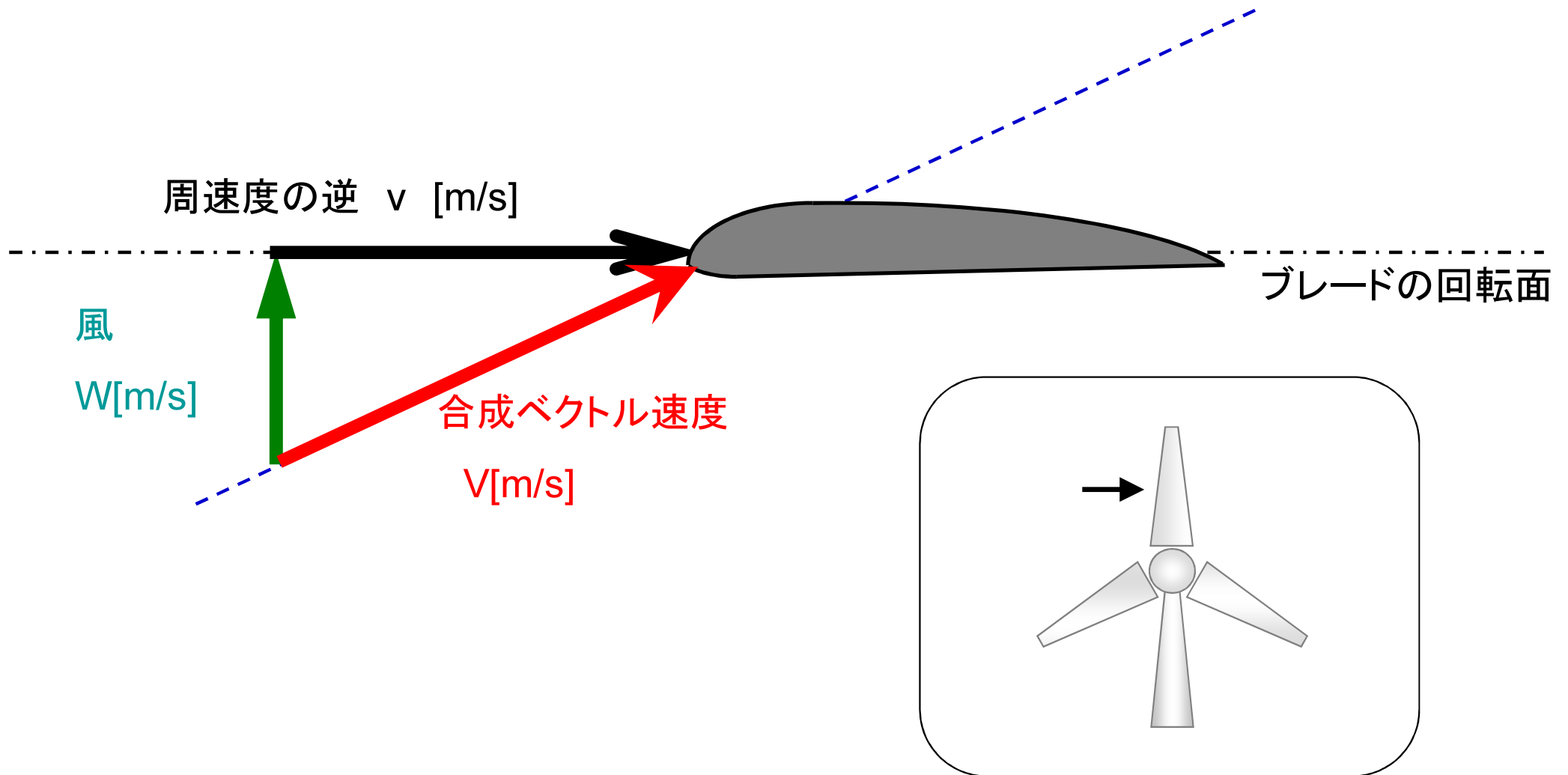
T : 1回転にかかる時間

$$v_1 = r_1\omega = \frac{2\pi r_1}{T} < v_2 = r_2\omega = \frac{2\pi r_2}{T}$$

ブレード先端の方が
速度が高い！！

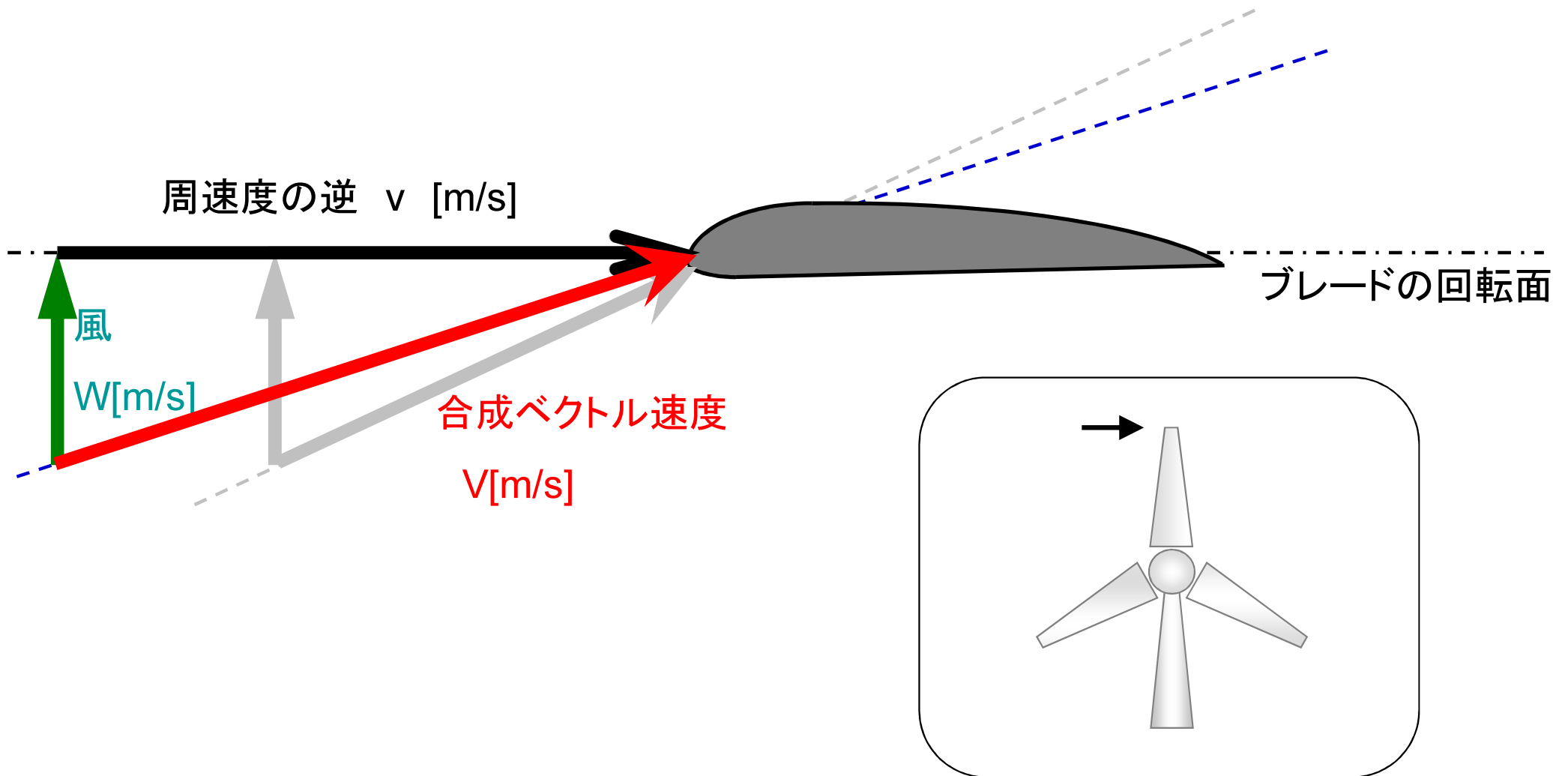
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

仮にブレード中央で、このような状態なら



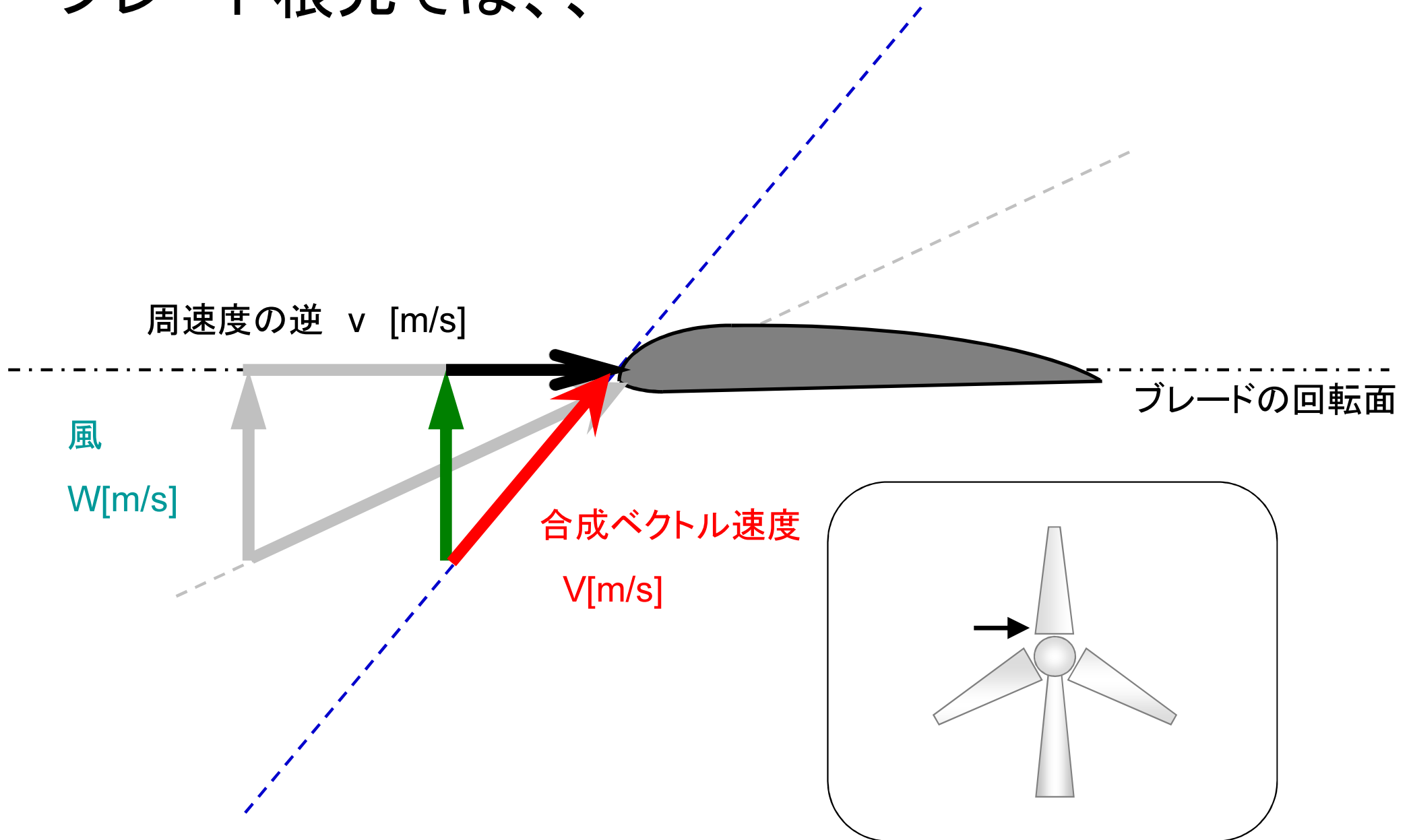
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

ブレード先端では、、



翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

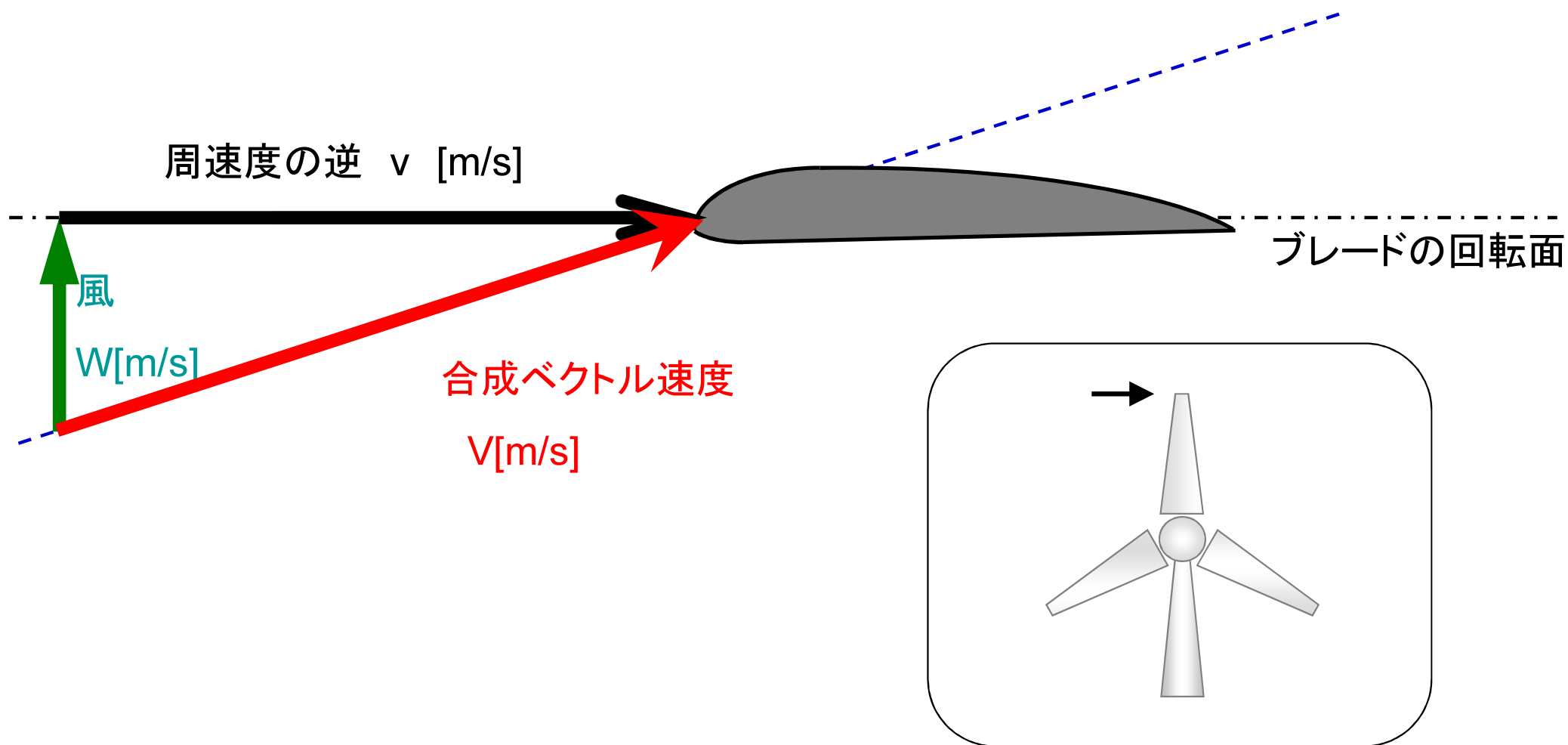
ブレード根元では、、



連続してみてもみると、、、

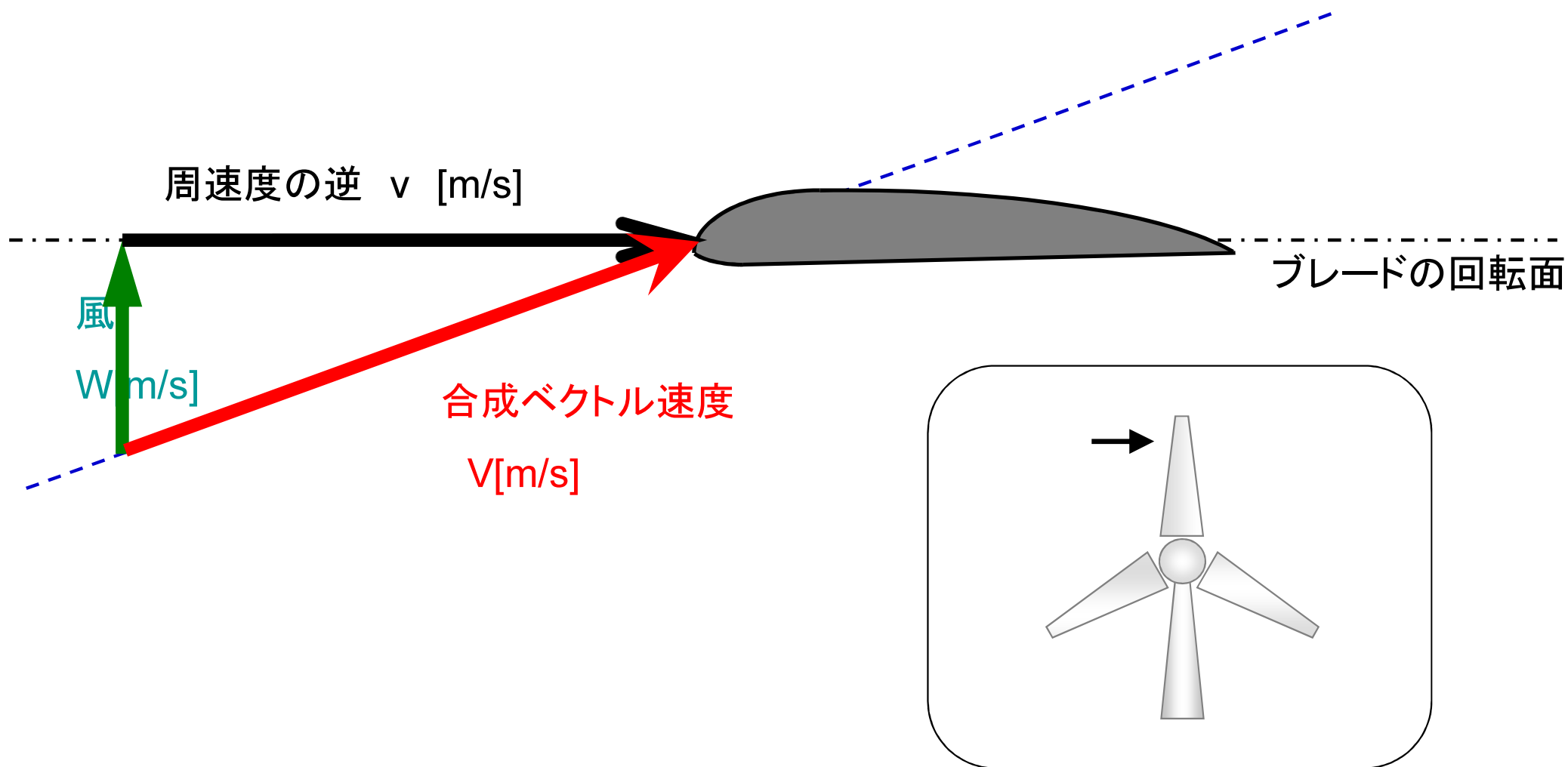
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続して見てみると、、、



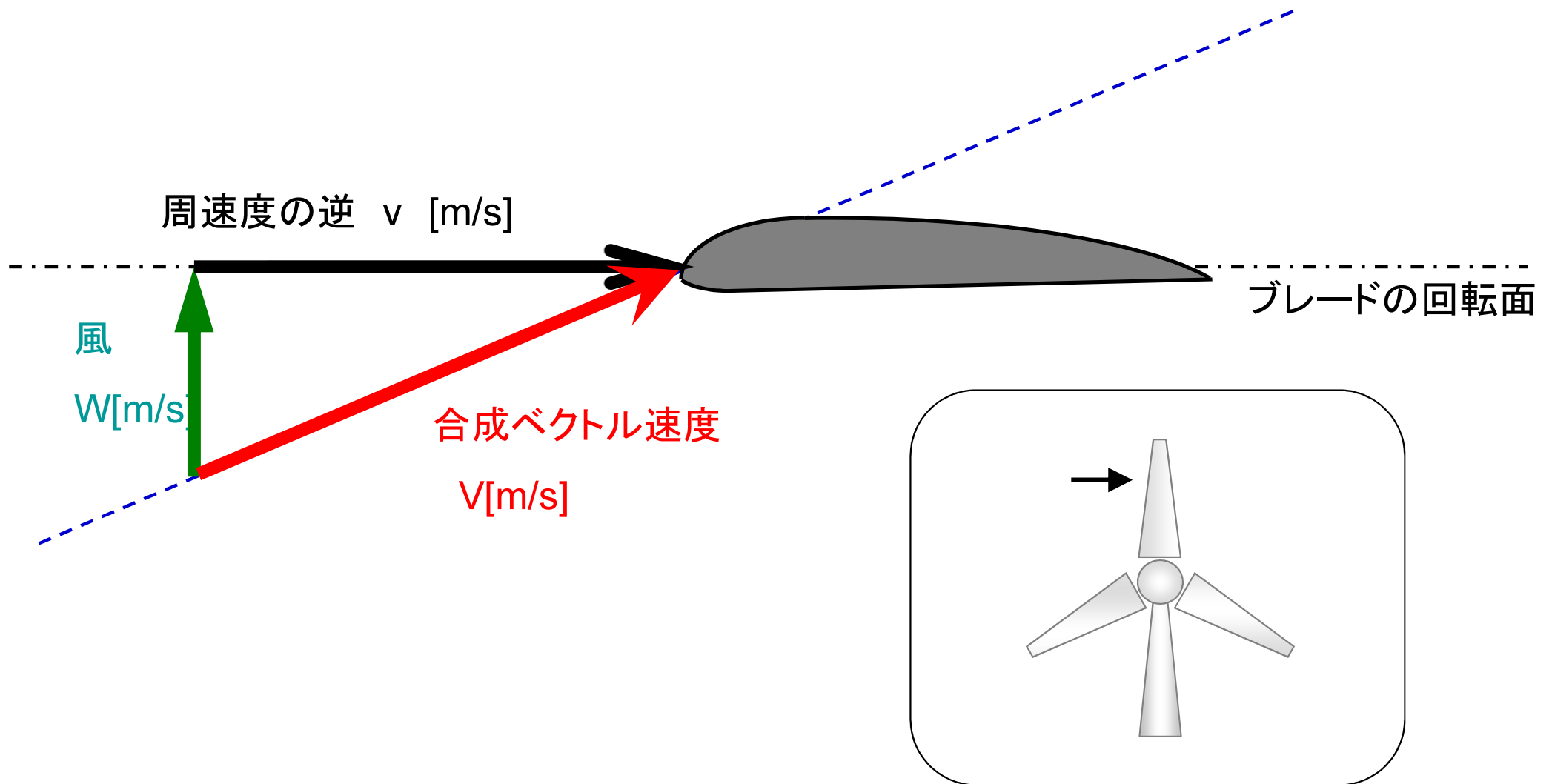
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続して見てみると、、、



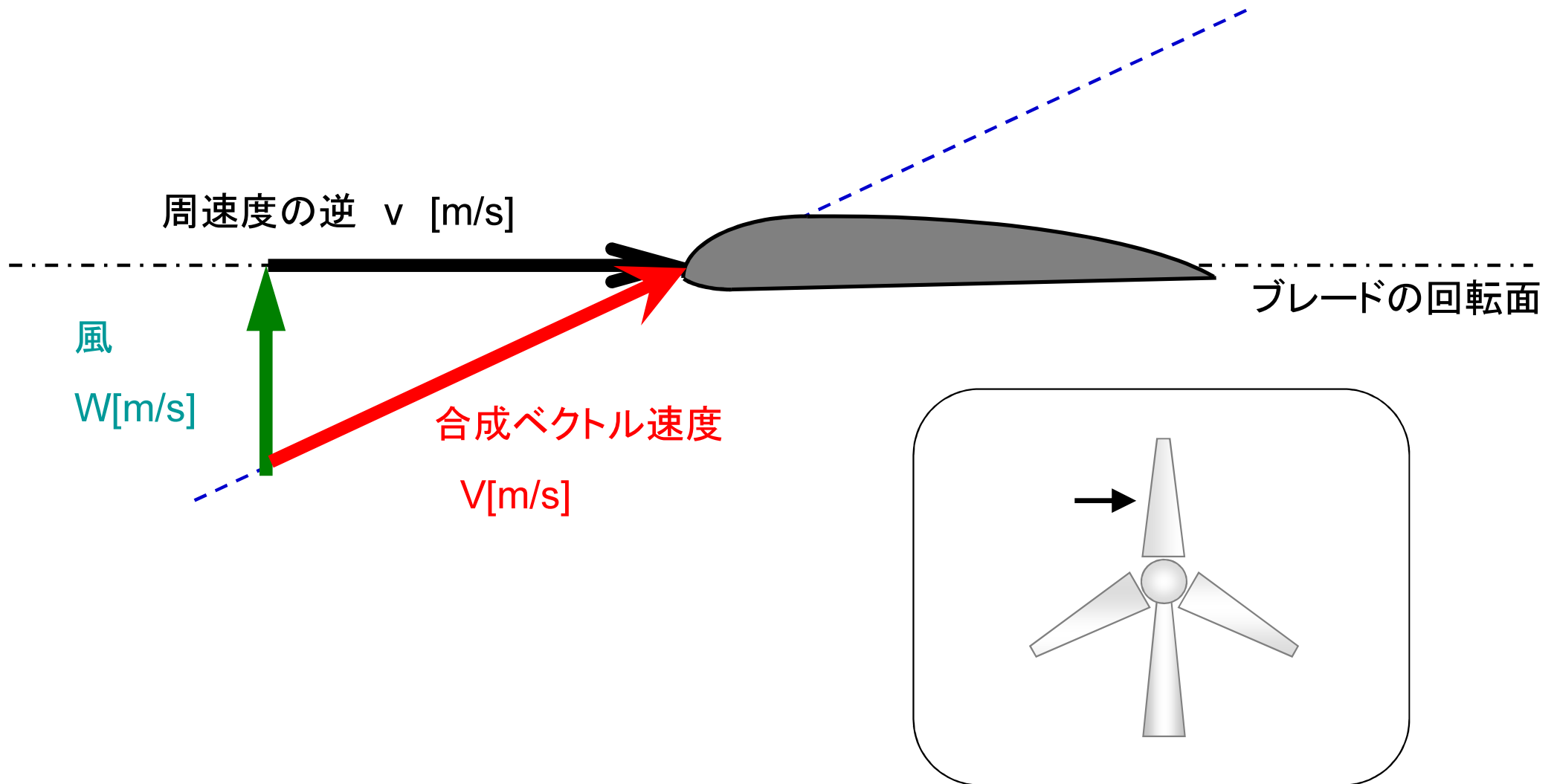
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続して見てみると、、、



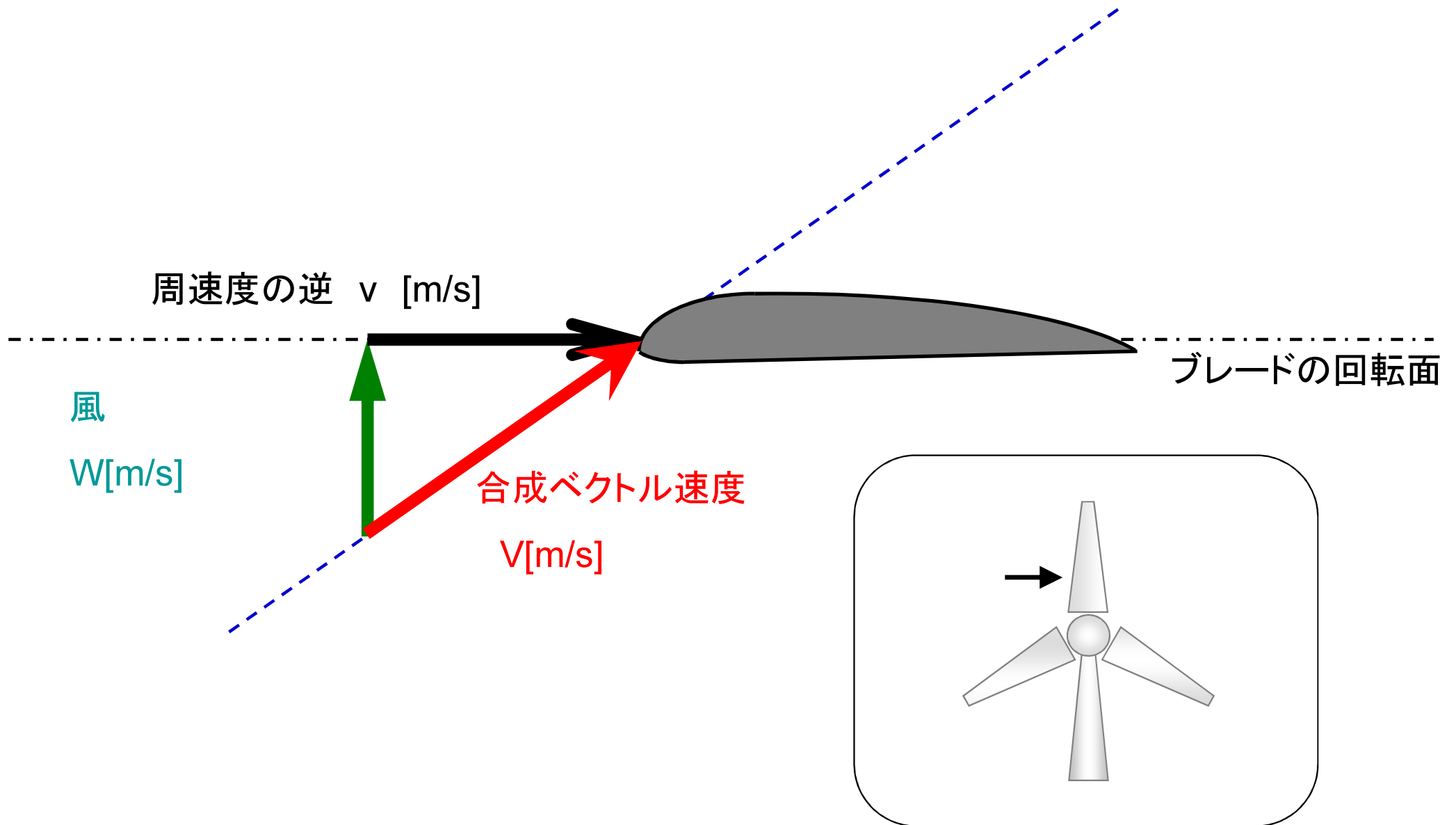
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続してみてもみると、、、



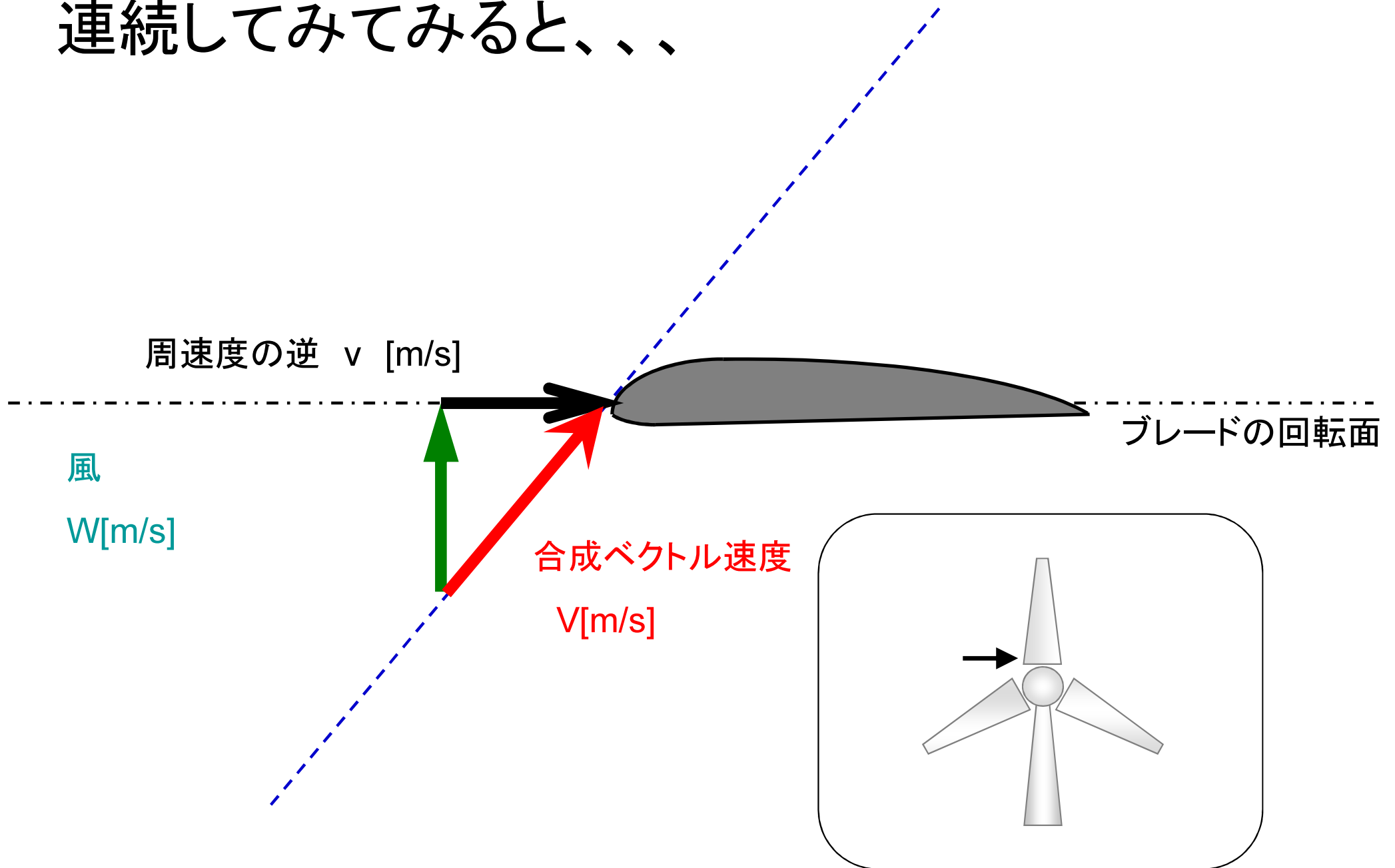
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続してみてみると、、、



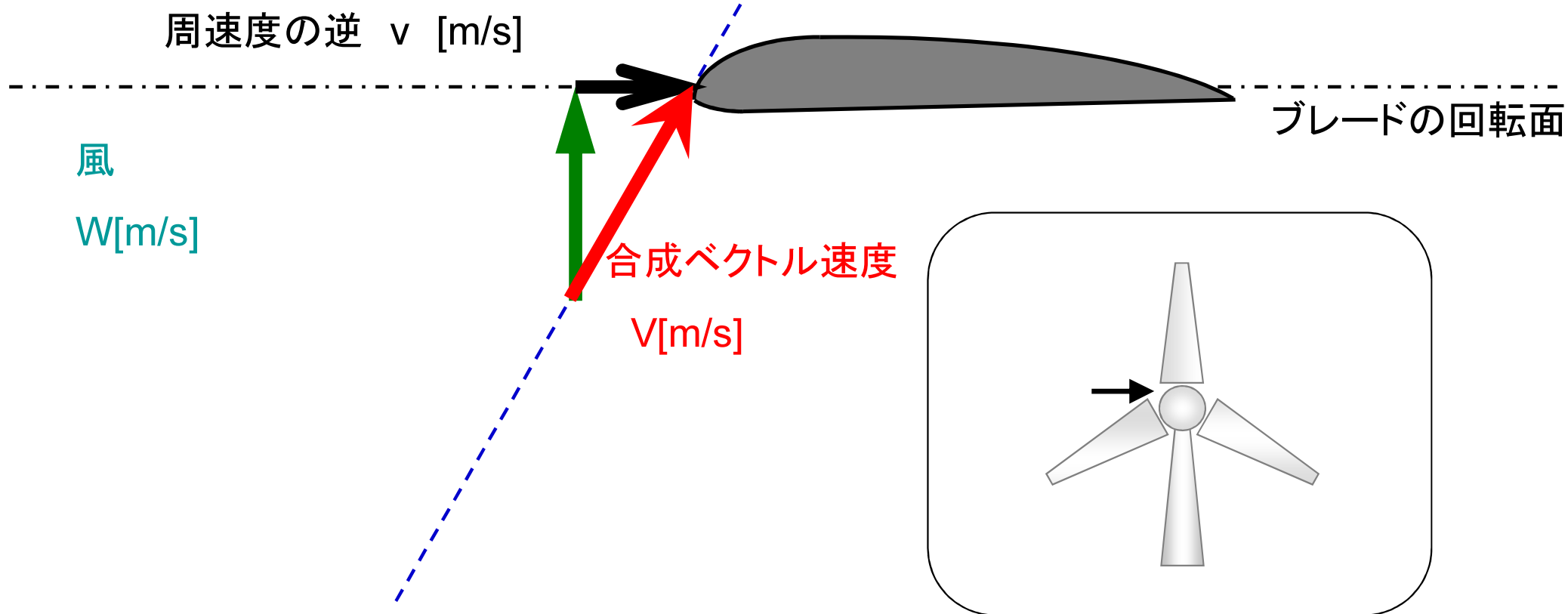
翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続してみてもみると、、、



翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

連続してみてもみると、、、

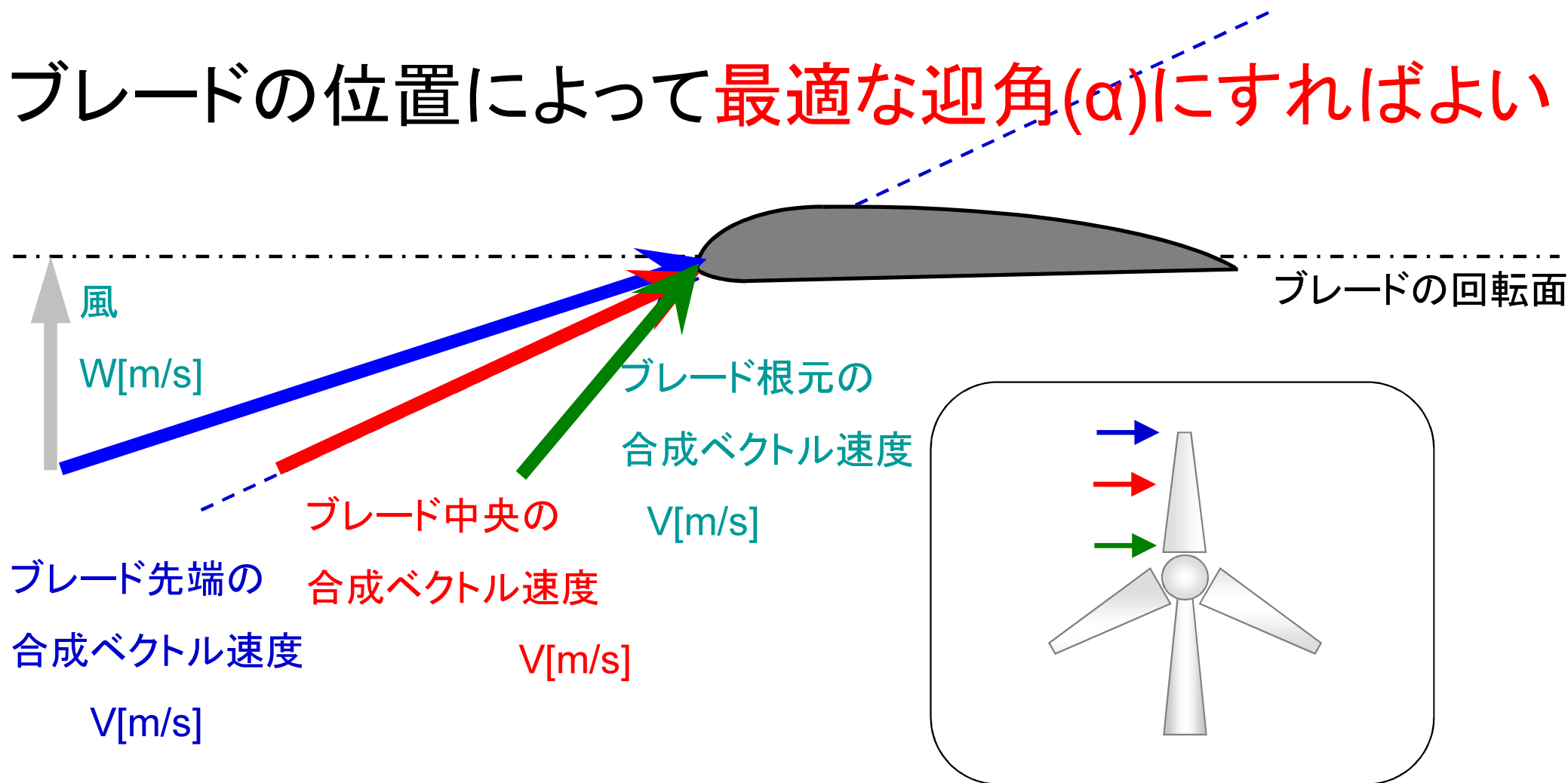


翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

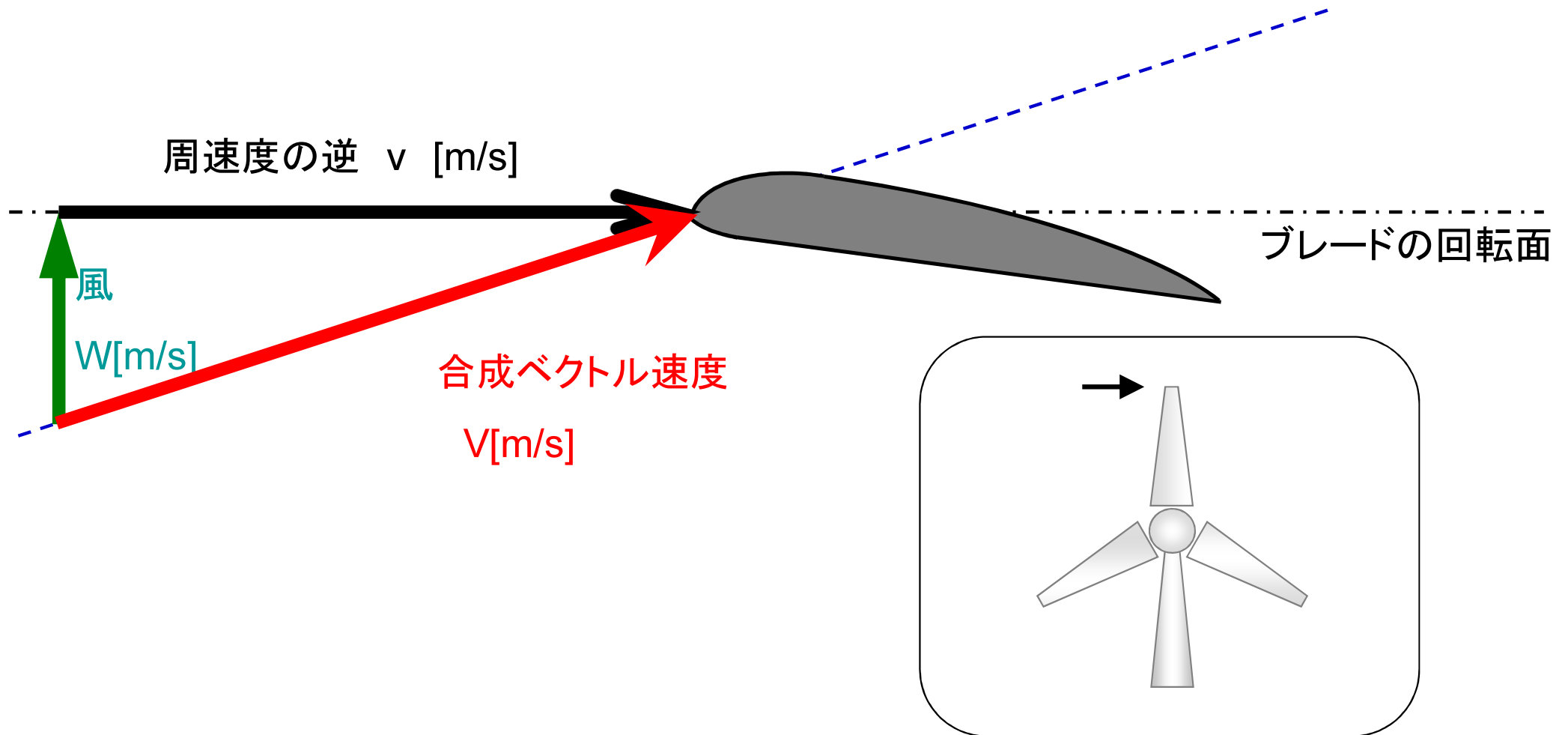
ブレードの位置によって

最適な迎角(α)ではなくなっている！！

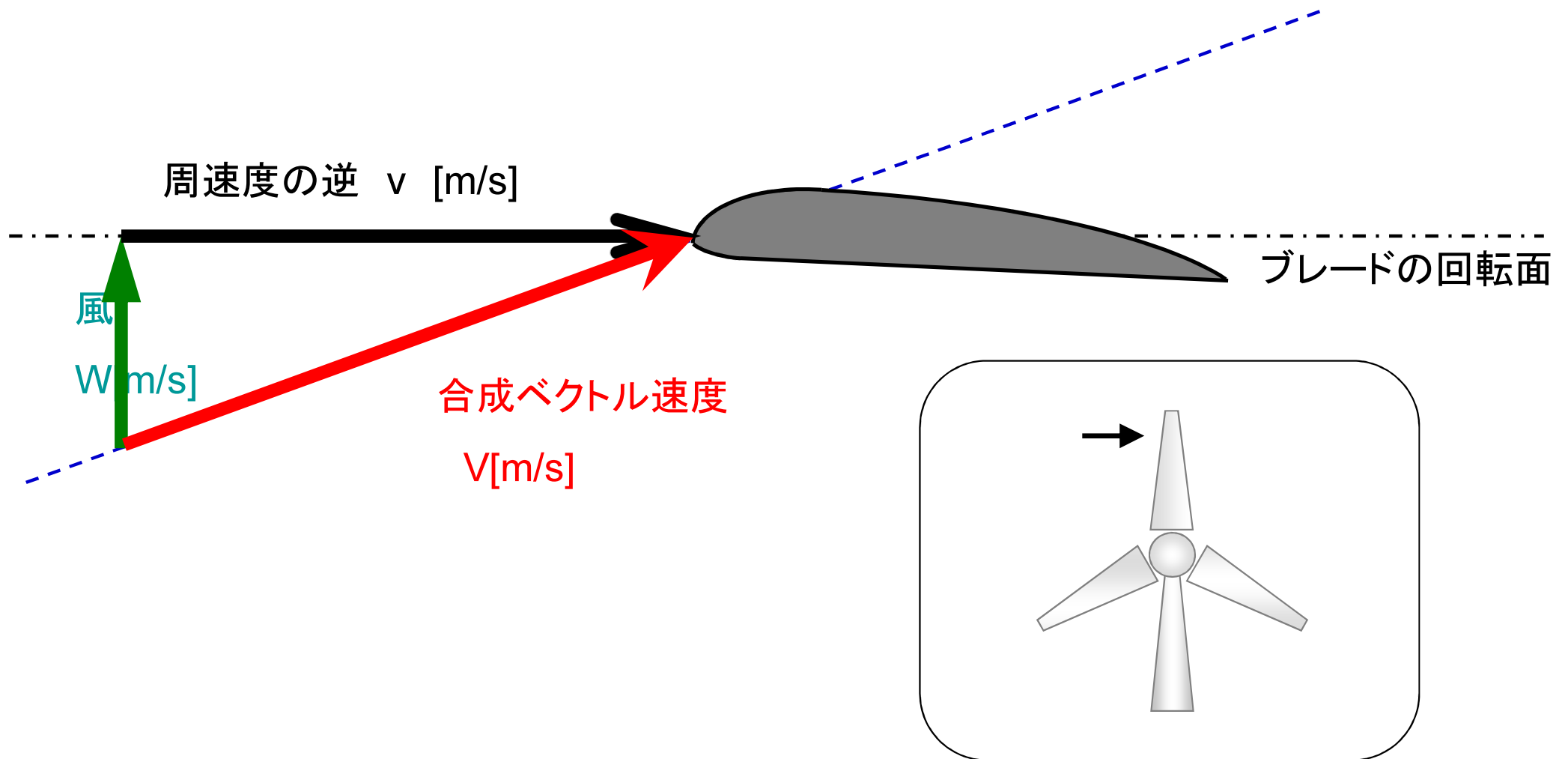
ブレードの位置によって最適な迎角(α)にすればよい



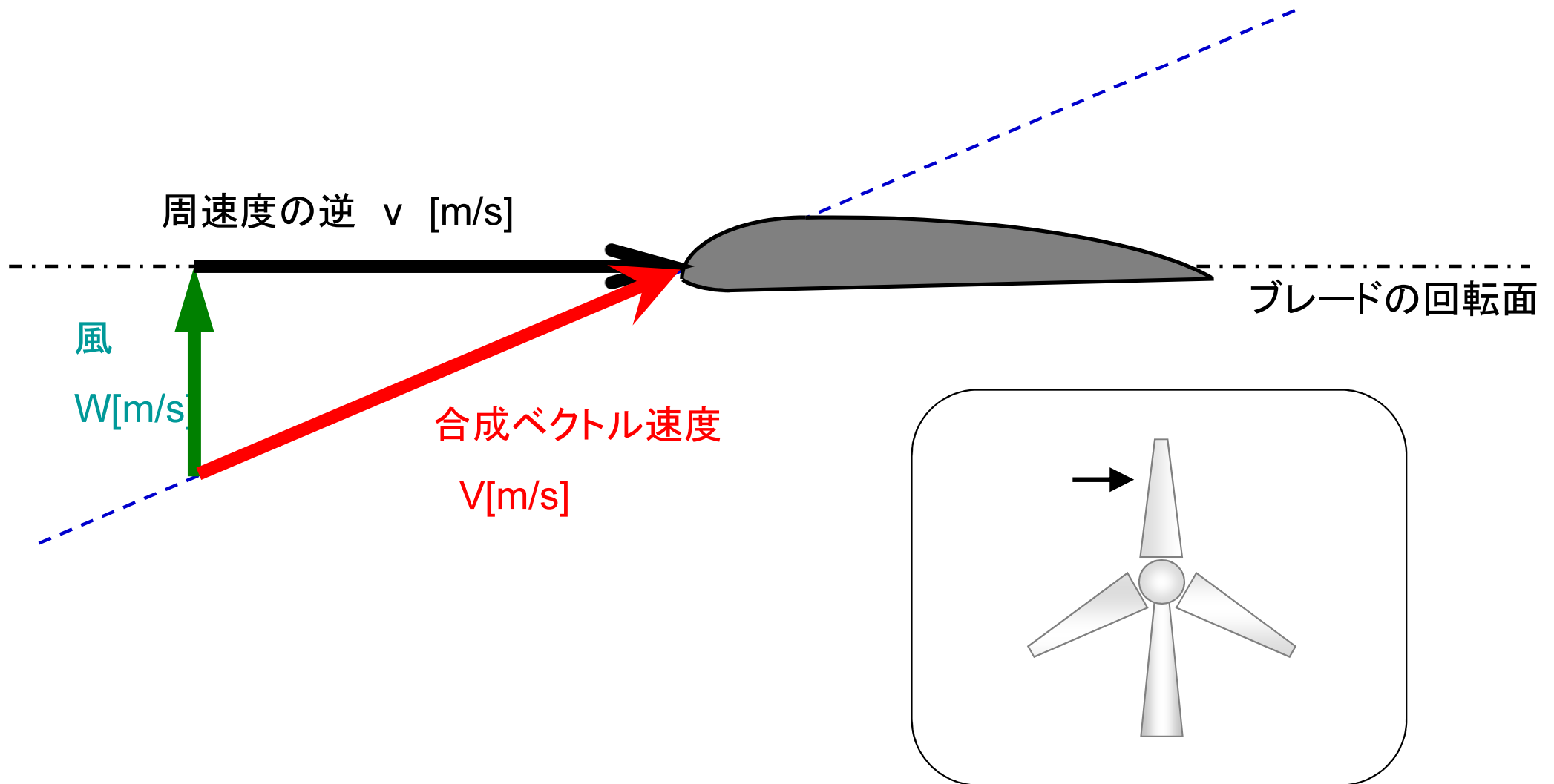
翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



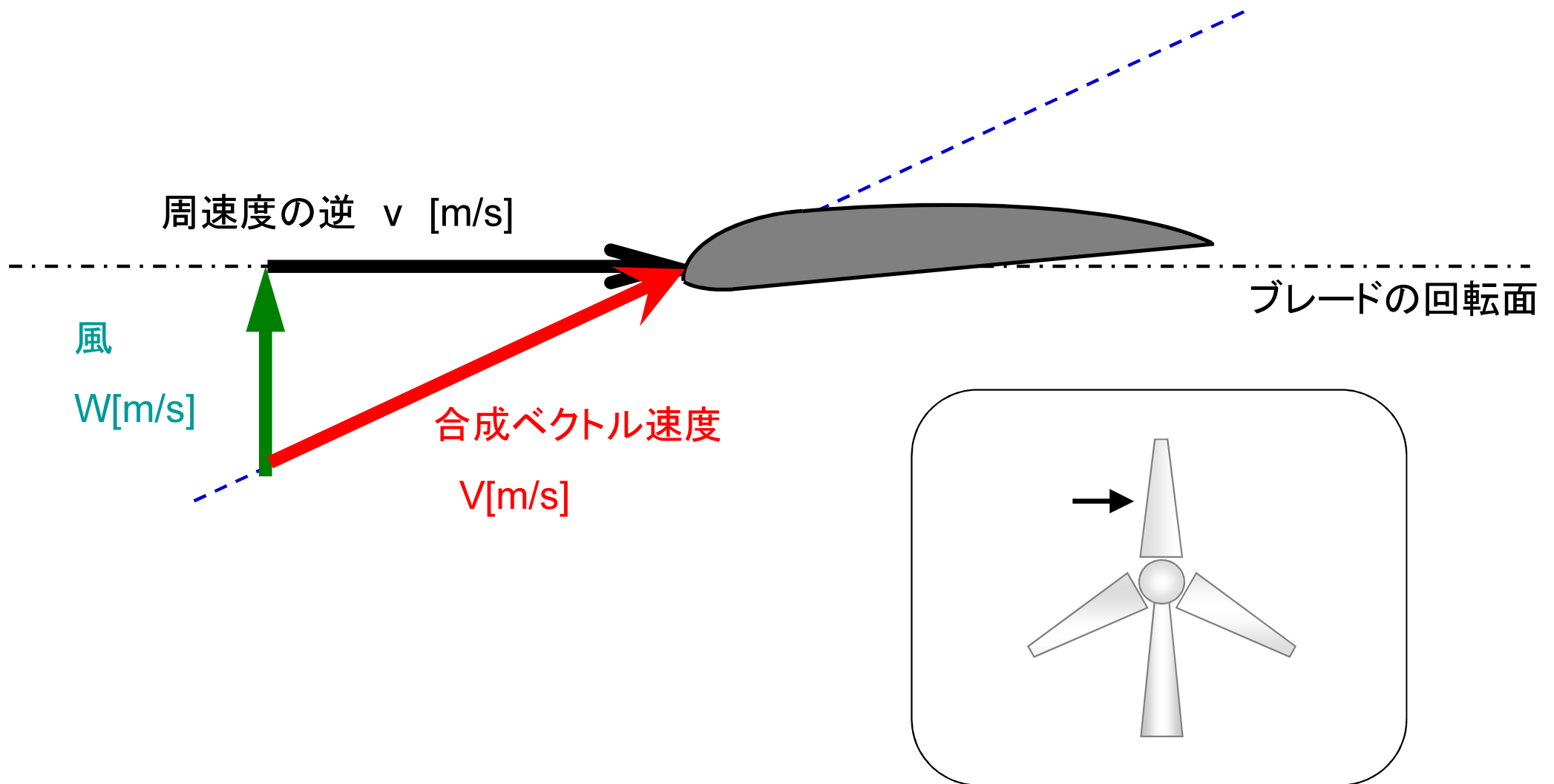
翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



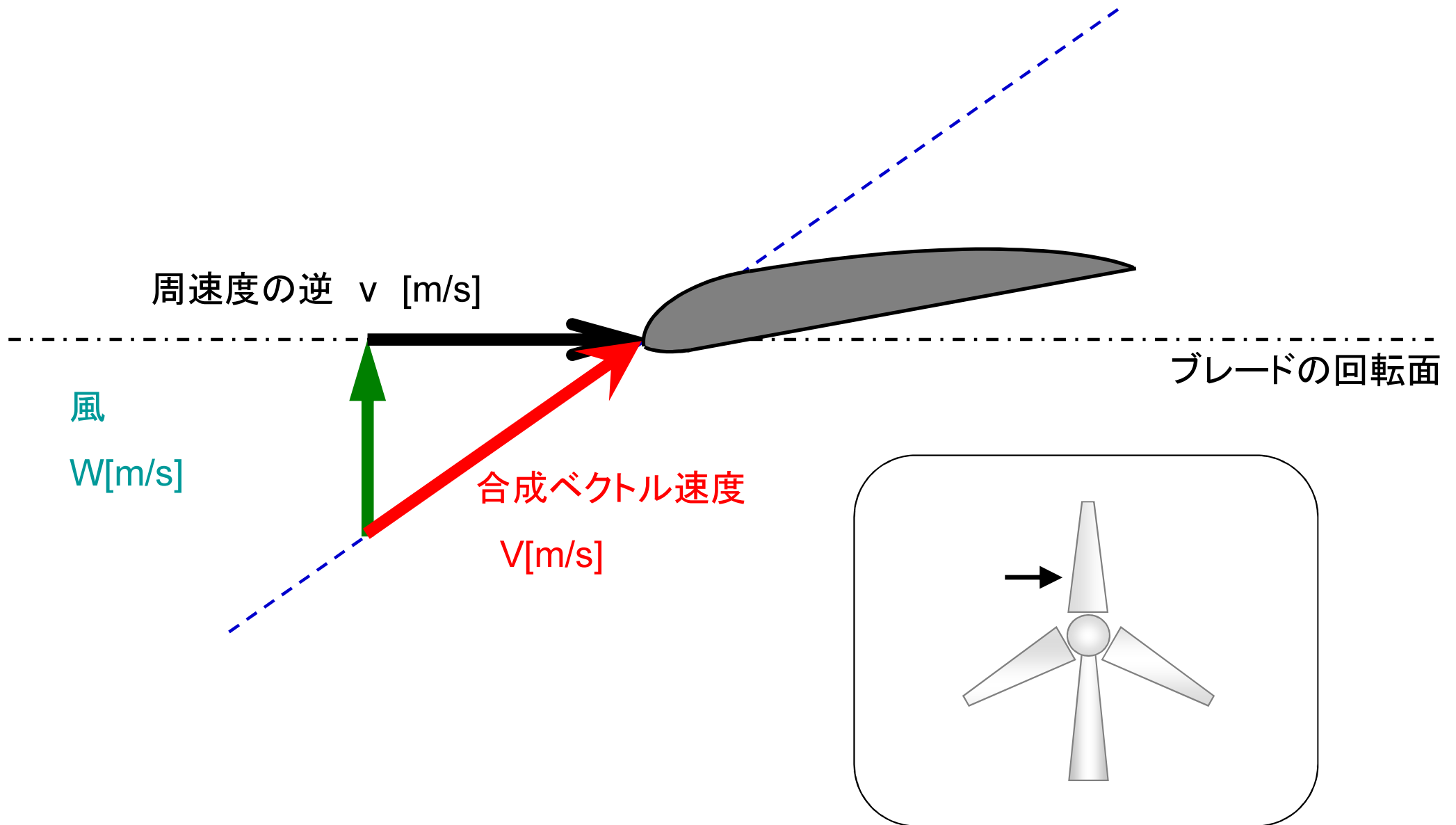
翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



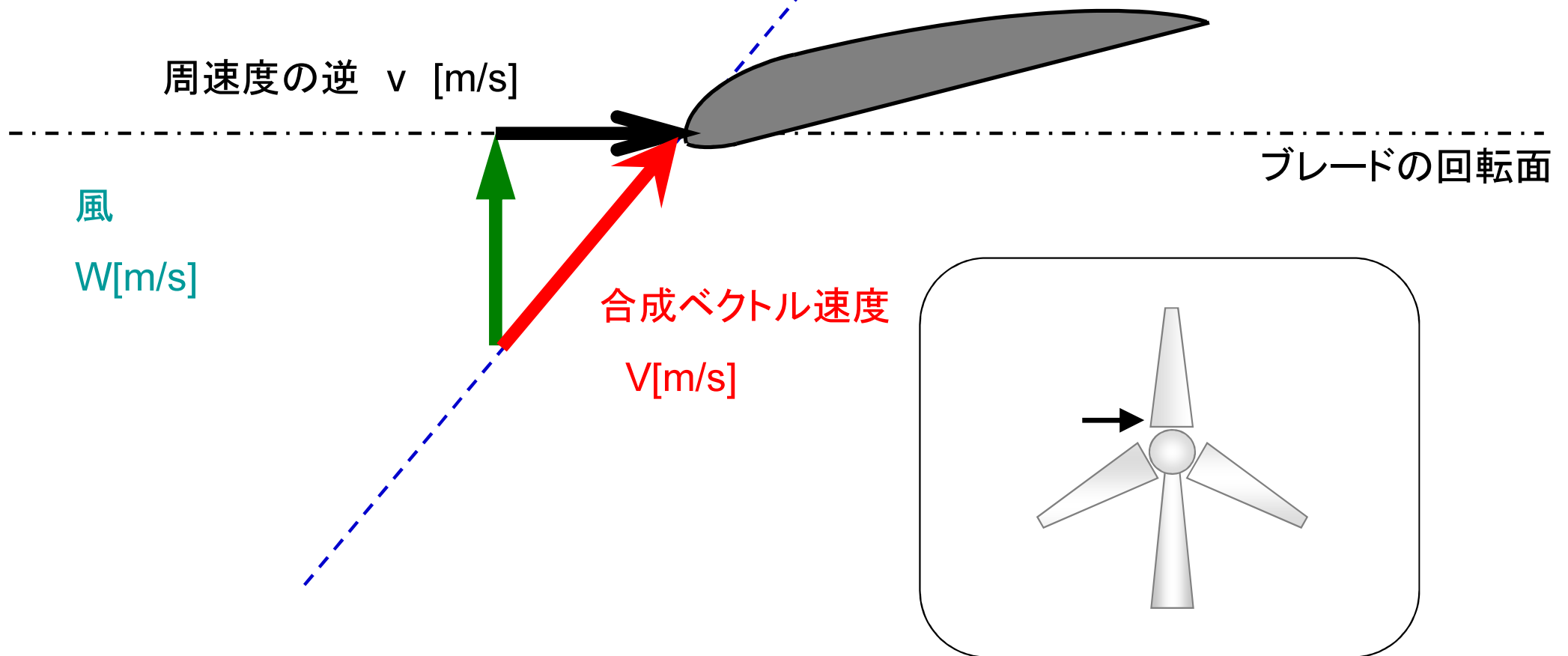
翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



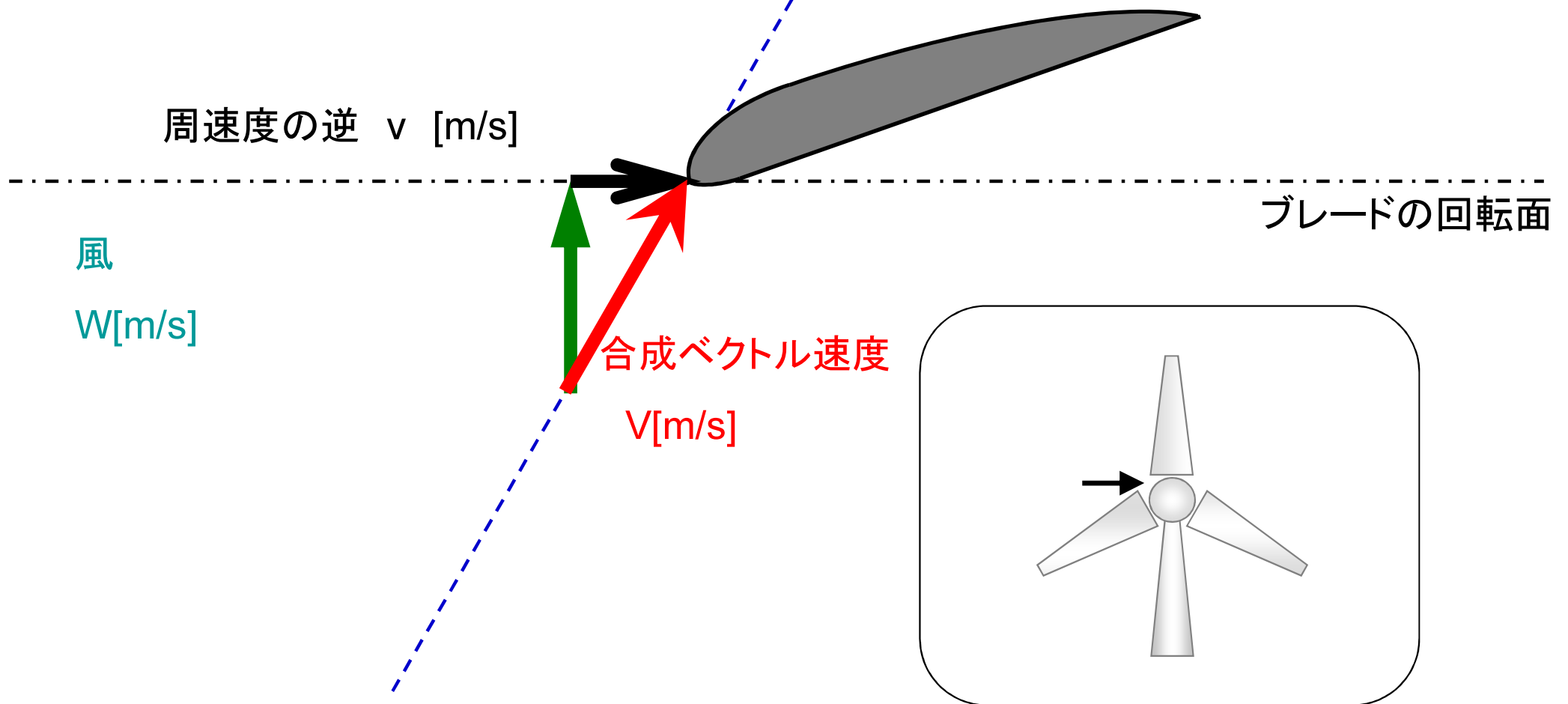
翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、

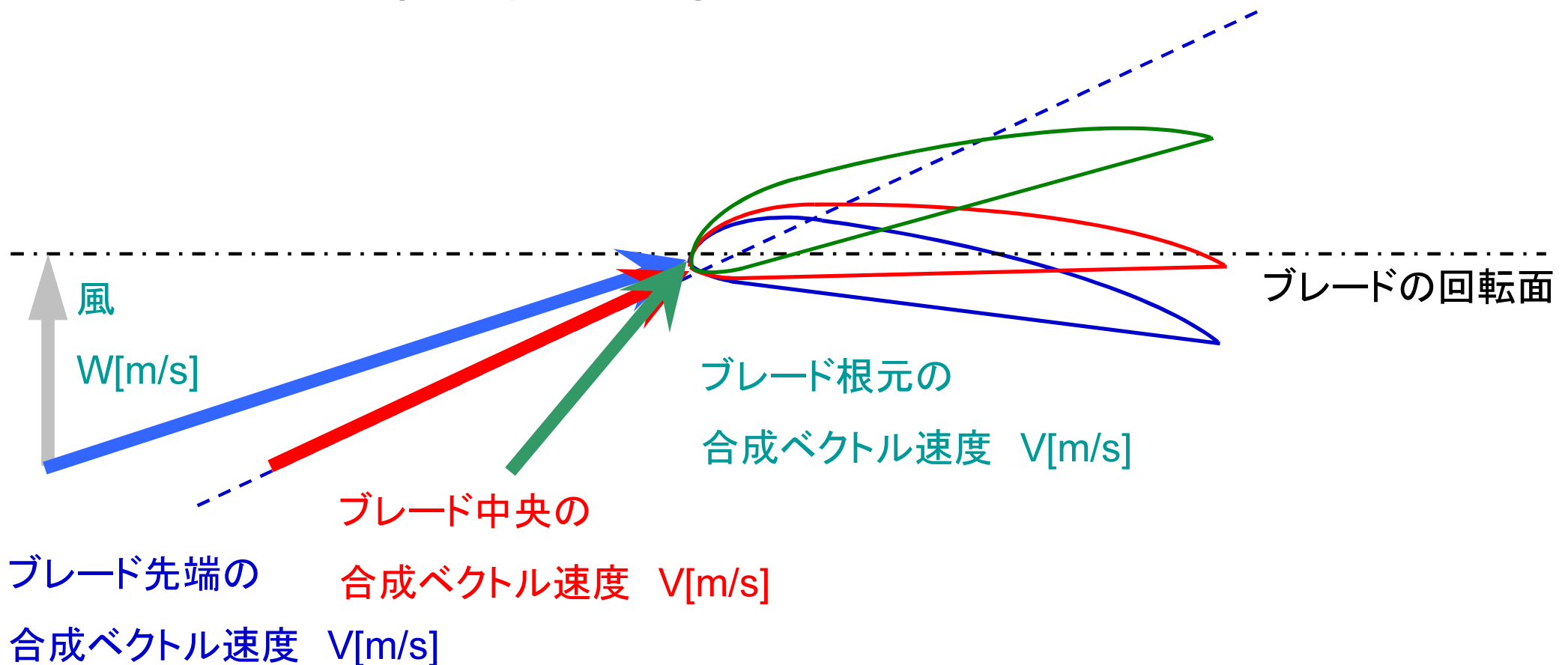


翼型の半径方向の位置の変化とともに、
翼型の角度(迎角)も最適な角度に変える、、、



翼型の半径方向の位置が変化したら、、、

ブレードの位置によって最適な迎角(α)に合わせておく
=ブレードがねじれている！！

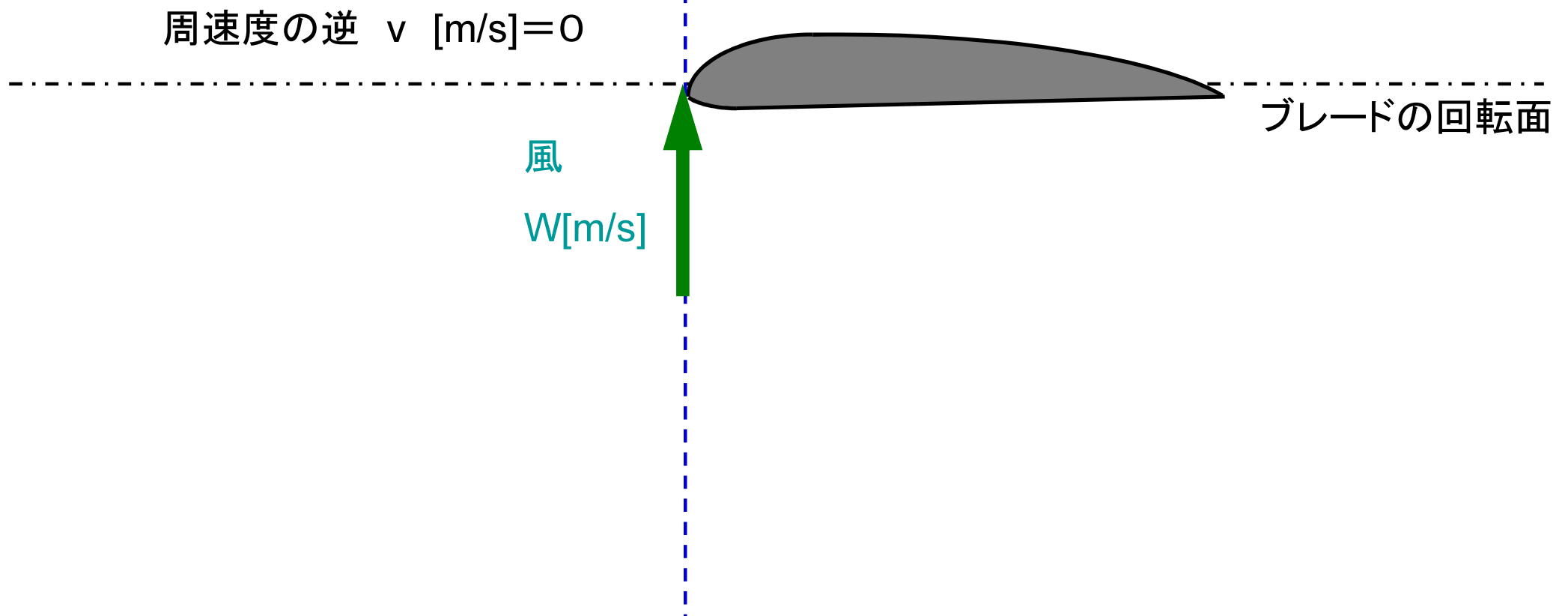


実際は合成ベクトル速度も違うので、翼型形状も違う！！

風車の回転が止まっていたら、、、

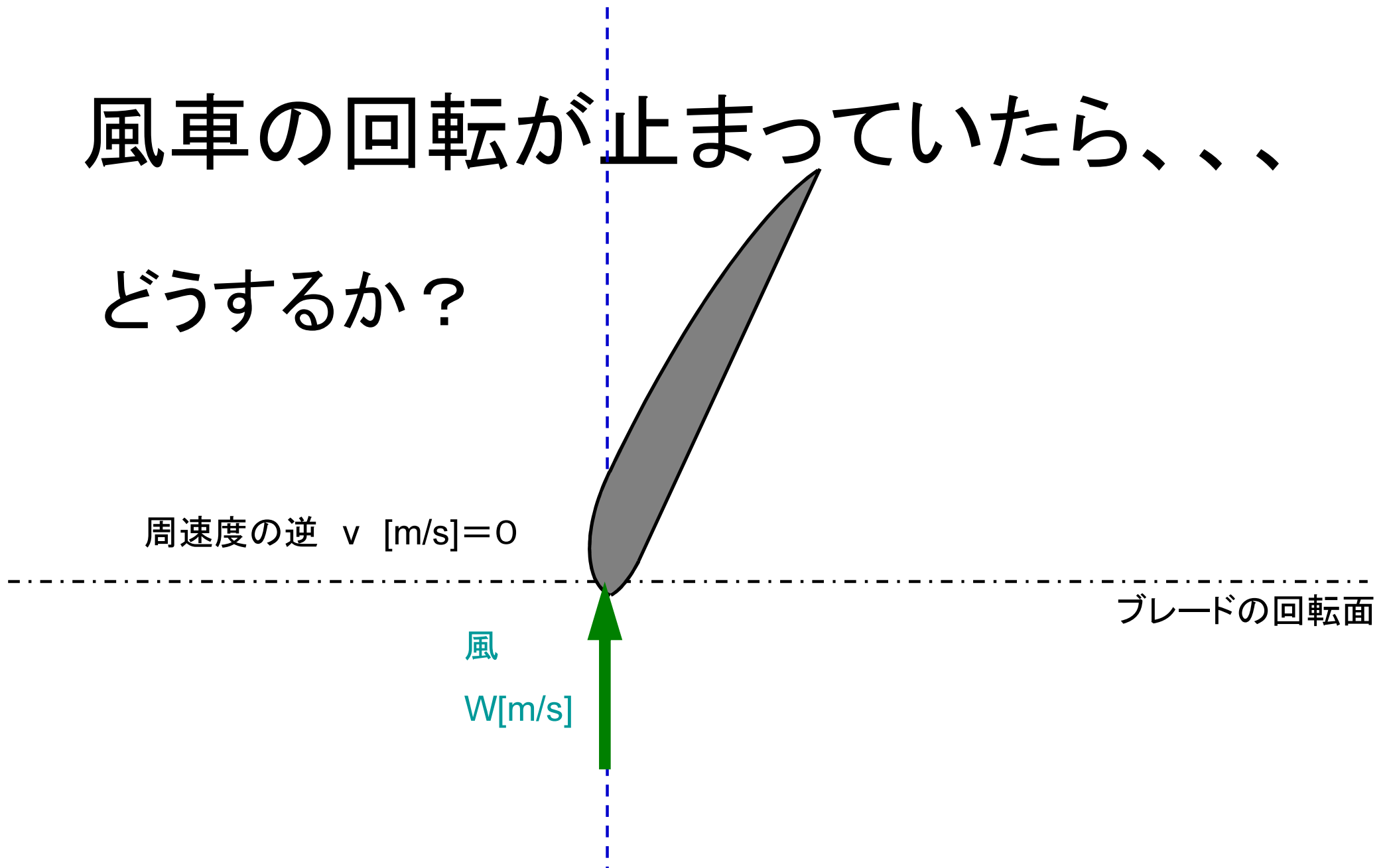
風車の回転が止まっていたら、、、

どうするか？



風車の回転が止まっていたら、、、

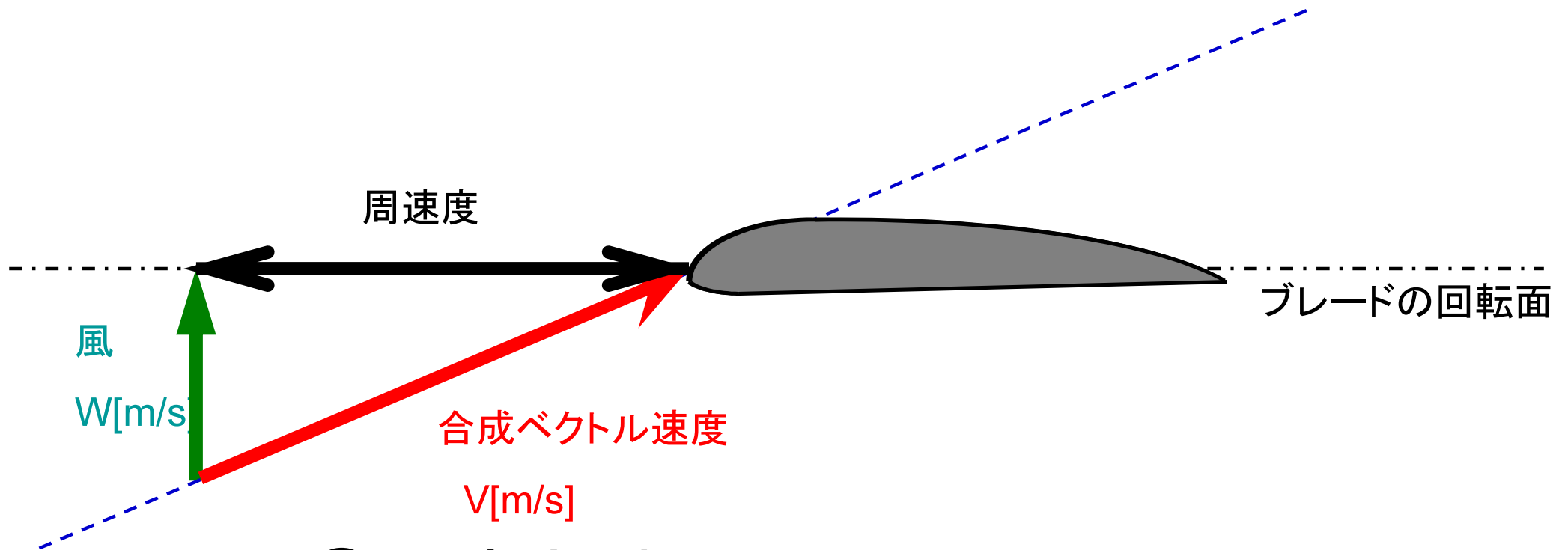
どうするか？



①角度(ピッチ角)を変える(最近はあまりやらない)

風車の回転が止まっていたら、、、

どうするか？



②周速度(起動トルク)を与える

風が吹いていないのに風車が回っている場合は、
このように待ち構えている！パワーポイントのアニメーション機能を使用

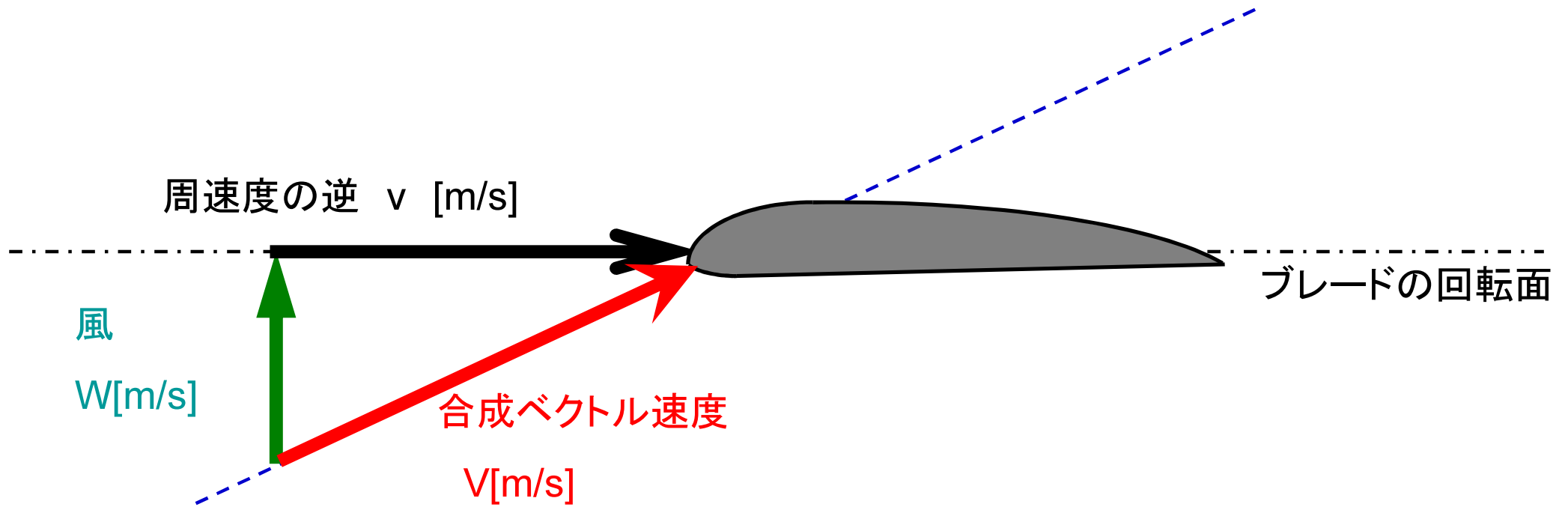
風が急に止んだり、急に突風が吹いたり

風の速度が変化した場合は？

風が急に止んだり、急に突風が吹いたり

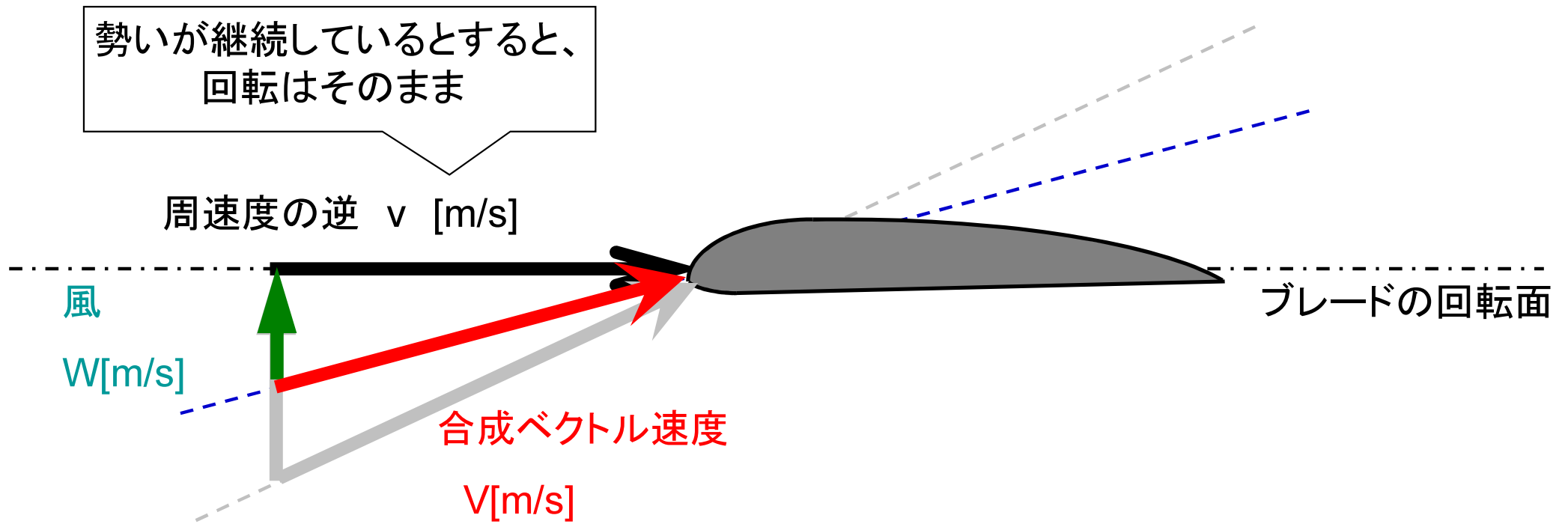
風速が変化したら、、、

風が急に止んだ場合



風速が変化したら、、、

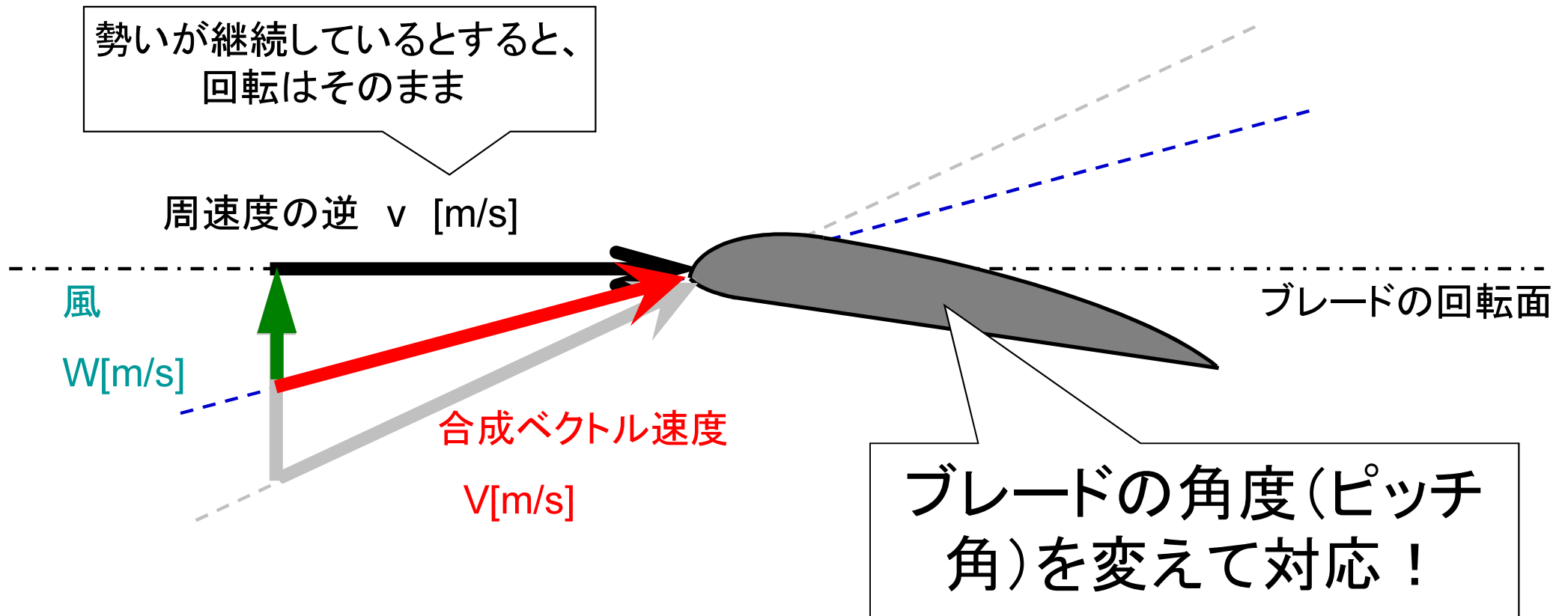
風が急に止んだ場合



迎角(α)が小さくなる→最適な角度よりは揚力が低下する

風速が変化したら、、、

風が急に止んだ場合

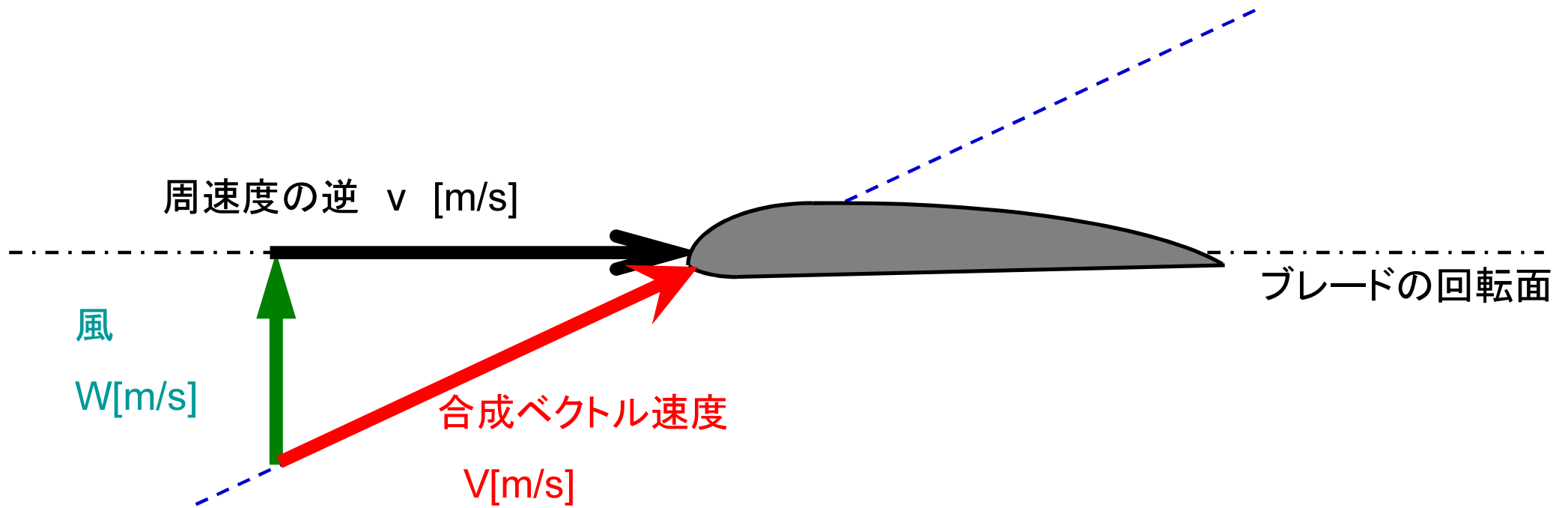


迎角(α)が小さくなる→最適な角度よりは揚力が低下する

風速が変化したら、、、

急に突風が吹いた場合

(風が強いとさらに回転しそうなイメージだが、、、)

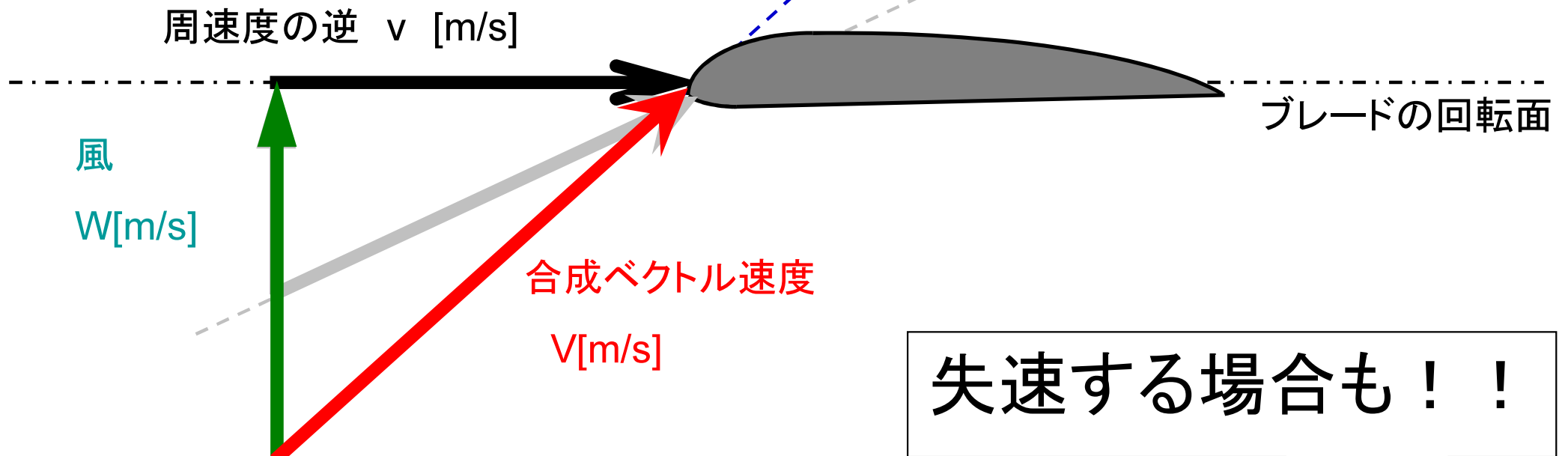


風速が変化したら、、、

急に突風が吹いた場合

(風が強いとさらに回転しそうなイメージだが、、、)

勢いが継続しているとすると、
回転はそのまま



失速する場合も!!

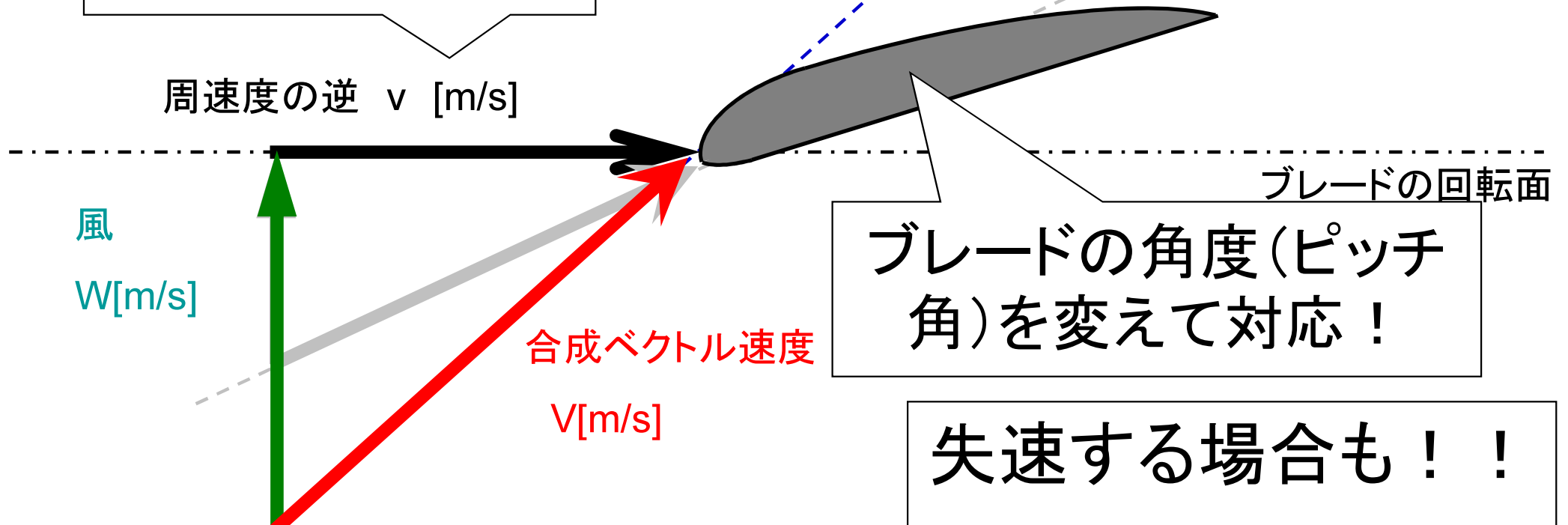
迎角(α)が大きくなる→最適な角度よりは揚力が低下する

風速が変化したら、、、

急に突風が吹いた場合

(風が強いとさらに回転しそうなイメージだが、、、)

勢いが継続しているとする、
回転はそのまま



ブレードの角度(ピッチ角)を変えて対応!

失速する場合も!!

迎角(α)が大きくなる→最適な角度よりは揚力が低下する

風の変化が変化した場合は？

ピッチ角を絶えず調整

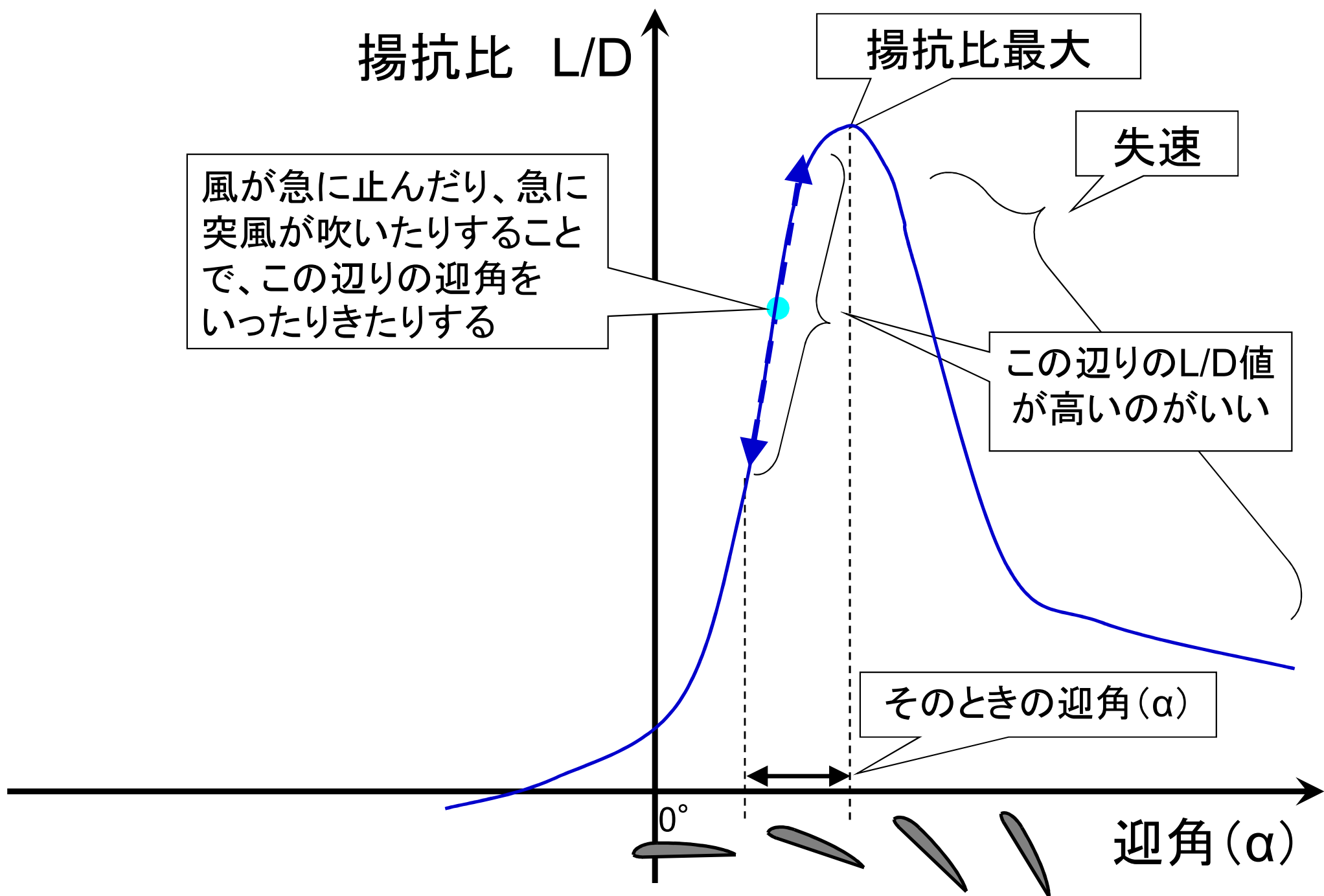
(アクティブピッチコントロール(ピッチ制御))して、
最適な角度を維持している。

しかしながら、飛行機のようにこまめにピッチコントロールできないし、角度調節が間に合わない

そこで、、、

風車用の翼型は迎角に対してほどほどに
「鈍感な」性能の方が都合がいい

つまり、、、



揚抗比 L/D

揚抗比最大

失速

風が急に止んだり、急に突風が吹いたりすることで、この辺りの迎角をいったりきたりする

この辺りのL/D値が高いのがいい

そのときの迎角 (α)

0°

迎角 (α)

揚抗比 L/D

最大揚抗比は高いが、狭い角度の中でしか性能がよくない(扇風機などで人工的に一定の風速の風を発生させる場合はこれでもよいが、)

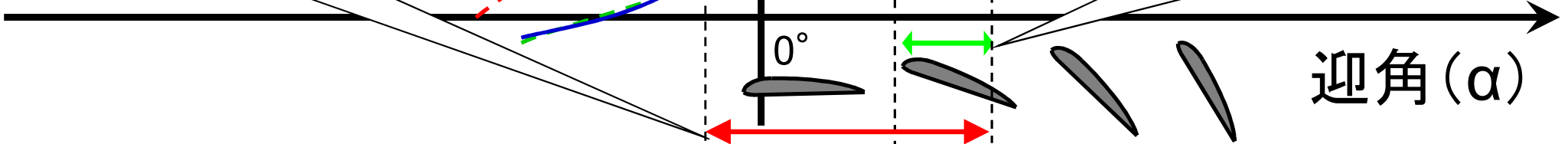
すぐに失速する可能性あり!

最大揚抗比は低いが、広い迎角の中で高い性能を発揮

風車としては、こちらの翼型の方がよい!
(風が急に止んだり、急に突風が吹いたりすることで、迎角が変化するから)

広い迎角(α)の幅

狭い迎角(α)の幅



迎角(α)

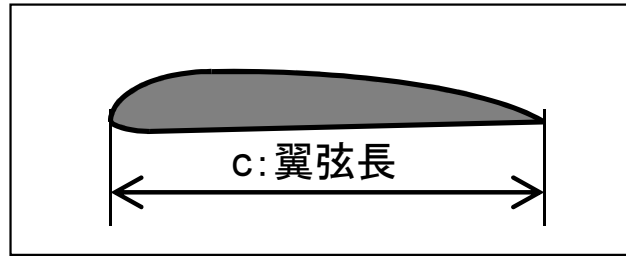
レイノルズ数 (Re) とは？

風車 (風力タービン) ブレード用の
翼型の場合

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

← 慣性力(流れの勢いが支配的)

← 粘性力(流れの粘り気が支配的)



V : (ブレードの回転による速度と風による風速の)合成速度 (国際単位系: m/s)

c: 翼弦長 (chord, コード) (m)

ν : 動粘性係数 ($\nu = \mu/\rho$ 一般に大気は 1.502×10^{-5}) (m^2/s)

(海水面の大気では $1.460 \times 10^{-5} m^2/s$) (m^2/s)

μ : 流体の粘性係数 (Pa·s、N·s/m²、kg/(m·s))

ρ : 流体の密度 (kg/m³) (一般に大気は $1.203 kg/m^3$)

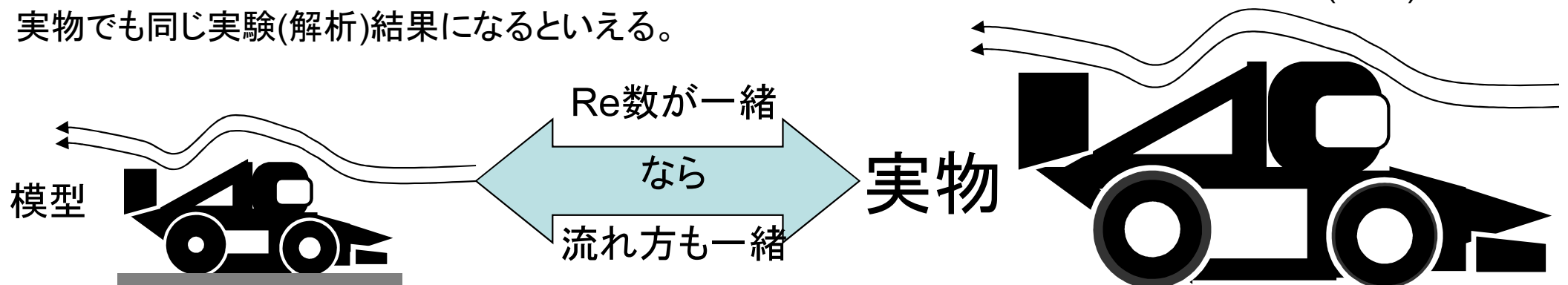
レイノルズ数とは、、、

・流体力学において慣性力(右辺分子)と粘性力(右辺分母)との比で定義される無次元数。流れの中でのこれら2つの力について、相対的にどちらが支配的かを表す。

つまり上式より、低いレイノルズ数(分子の値が小さく、分母の値が大きい)においては粘性力が支配的であり、高いレイノルズ数(分子の値が大きく、分母の値が小さい)においては慣性力が支配的であるということである。

・流体力学上の問題について力学的相似性を評価するのに利用できる。

つまり、「レイノルズ数が同じ値＝流体力学的に同じ状況」と言えるので、模型(や解析モデル)と実物でレイノルズ数を合わせておけば流体力学的に同じ状況となり、模型(解析モデル)による実験(解析)結果は実物でも同じ実験(解析)結果になるといえる。



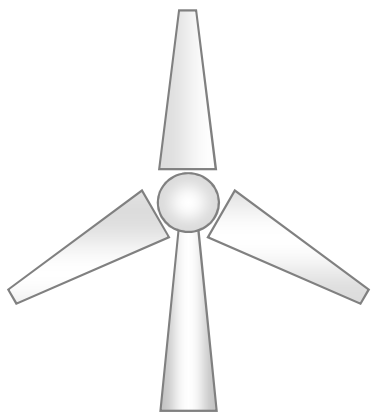
レイノルズ数を合わせるとは、..

模型

流れの速度を上げる、模型(翼弦長)が小さい

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

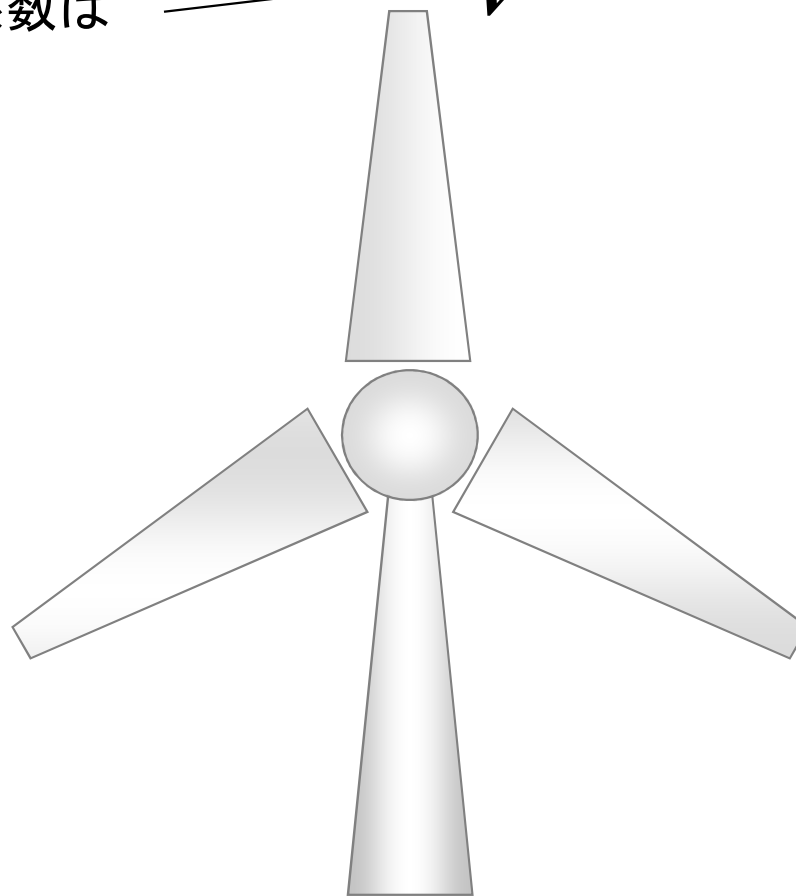
大気の動粘性係数は
そのまま



実物

流れの速度を下げる、模型(翼弦長)が大きい

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



さて、ペーパークラフト風車とQBladeによる解析を通して、翼型解析と風車用ブレードの開発を試してみよう！