5. 摩擦力と抵抗

キーワード: 摩擦力

- 静止摩擦力
- 運動摩擦力
- 空気と水の抵抗力
  - ストークスの法則
  - 雨滴
  - スカイダイビング

摩擦力 (p.68)

摩擦力 = 床が物体との接触面で接触面に平行な向きに作用する力

静止摩擦力

互いに静止した面の間に働き合う摩擦力を静止摩擦力という.

運動摩擦力

運動している2つの物体の間に働く摩擦力を運動摩擦力という.

摩擦力の大きさ

垂直抗力 N：物体が面から受ける力を抗力といい，その垂直方向の分力を垂直抗力という．

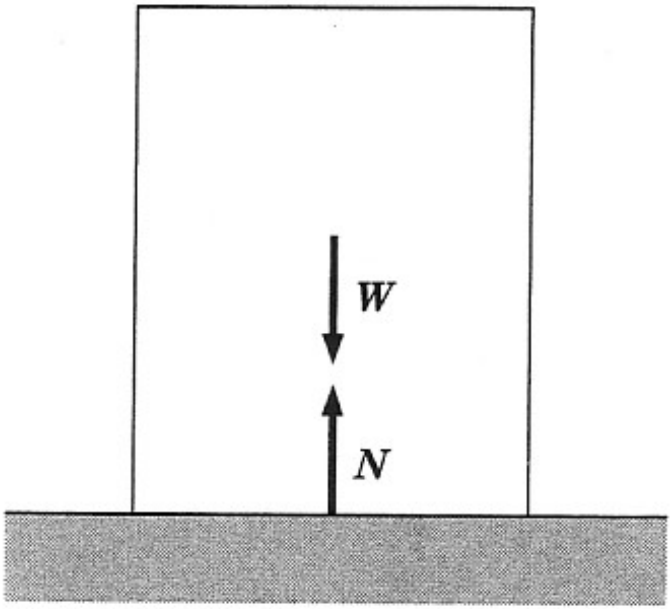


図 5.1　物体には地球の重力 W と床からの垂直抗力 N が働く．

摩擦力の大きさ

【重要】

摩擦力の大きさ **F** は，物体に垂直に作用する垂直抗力の大きさ **N** に比例する.

$$F \leqq \mu N \text{ (静止摩擦力)}$$

$$= \mu' N \text{ (運動摩擦力)}$$

μ: 静止摩擦係数，μ': 運動摩擦係数 (p.71 表5.1参照)

限度の静止摩擦力 = 最大摩擦力 F_{max}

$$F_{max} = \mu N$$

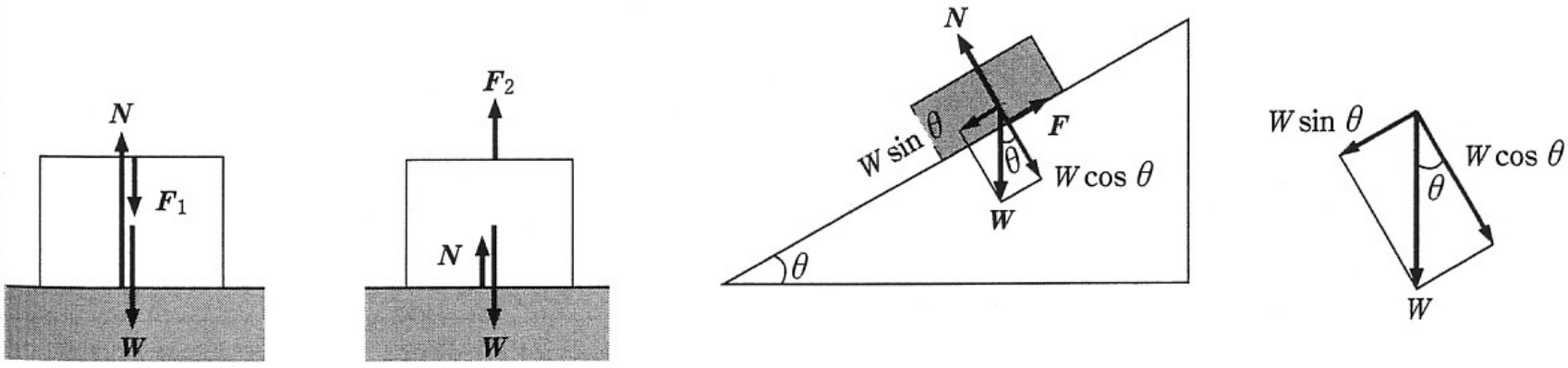
静止摩擦係数と運動摩擦係数

一般的には，静止摩擦係数 μ は運動摩擦係数 μ' よりも大きい (p.71, 表5.1).

$$\mu > \mu' > 0 \qquad (5.4)$$

斜面における垂直抗力 (p.69)

力のかかる向きと大きさに注目!!



(a) $N = W + F_1$　(b) $N = W - F_2$　(c) $N = W\cos\theta$．斜面上の物体が滑り落ちないための条件は $\tan\theta \leqq \mu$．

図 5.4　垂直抗力 N

$$W\sin\theta \leqq \mu W\cos\theta$$

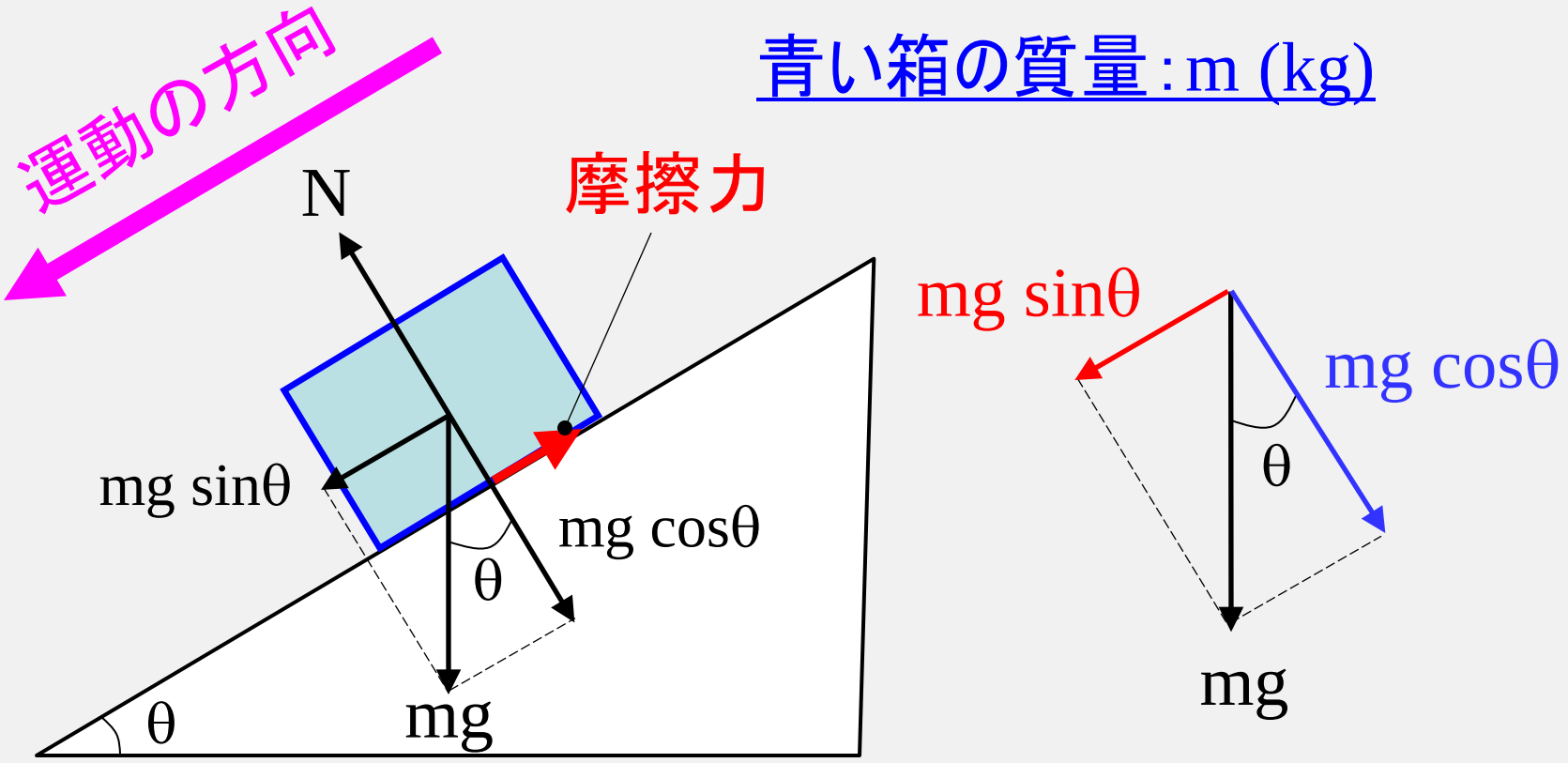
$$(\mu N)$$

$$\tan\theta \leqq \mu$$

図5.4の力関係はよ～く頭の中に入れておきましょう【重要】

5章のポイント①

青い箱の質量：m (kg)



垂直抗力の大きさ： $N = mg\cos\theta$

自動車と摩擦力 (p.72)

車や電車がカーブするためには，曲線の内側に働く外力(向心力)を受けなければならない

車が走路から飛び出さない条件

$$\frac{mv^2}{r} < \mu mg$$

向心力　最大摩擦力

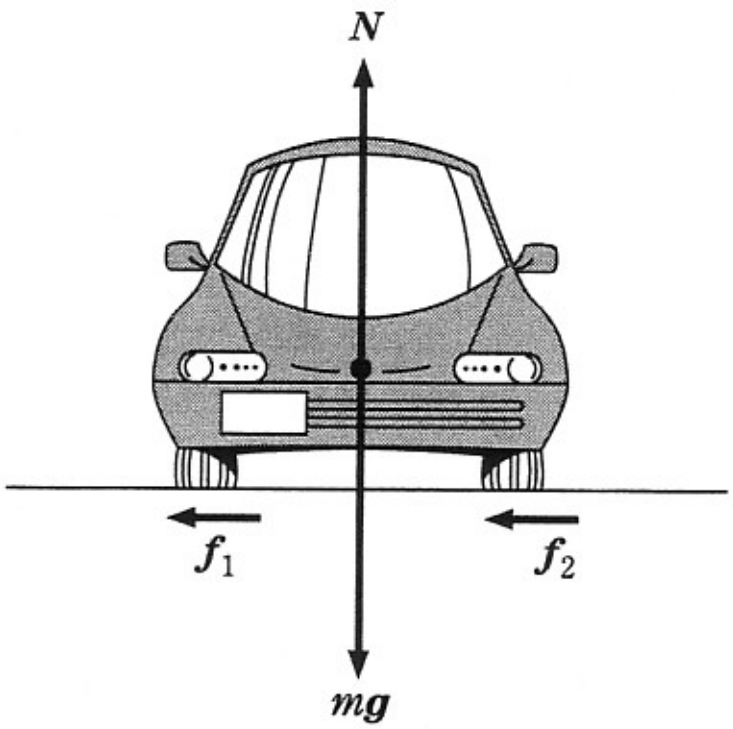


図 5.10　自動車が右に曲がるときには，路面が横向き（右向き）の摩擦力をタイヤに作用する．

自動車がカーブを曲がるときには，路面が作用する摩擦力が向心力である（図5.10）．

自動車と摩擦力 (p.72)

車や電車がカーブするためには，曲線の内側に働く外力(向心力)を受けなければならない

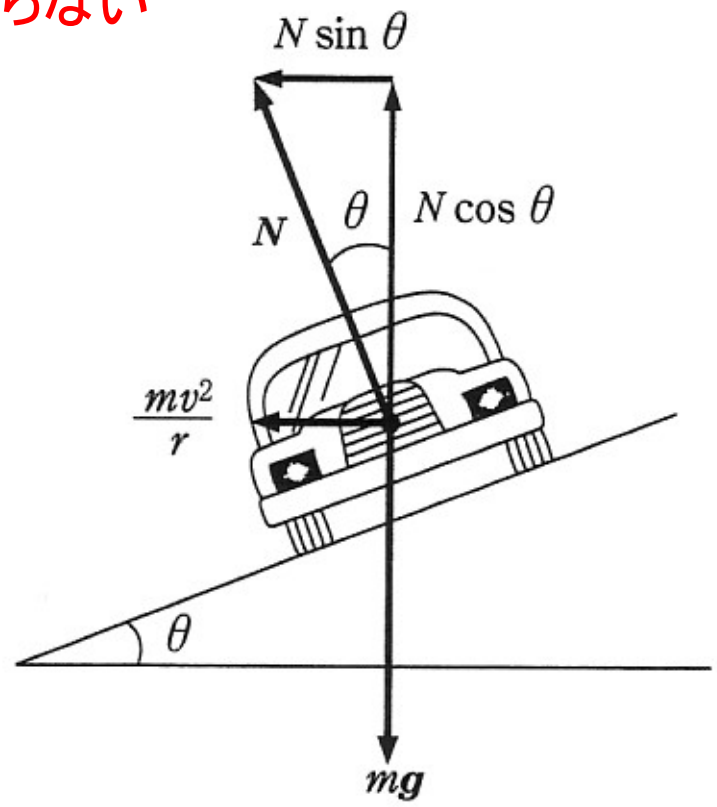


図 5.11　路面が横方向に傾斜しているときには，垂直抗力 N と重力 mg の合力が横向きの力になる．

レールの高低差
＝20 cm

車がカーブを曲がるとき

車や電車がカーブを曲がるとき，カーブに沿って円運動をすると考えることができる．この時，車や電車は円の中心に向く力(向心力)を受ける.

一方で，これ以外に受ける力は地球に引かれる力 mg と道路やレールから受ける垂直抗力 N がある

摩擦力を考えて，同じ方向における力の関係を考える．
これを元に，運動方程式をたてる.

車がカーブを曲がるとき

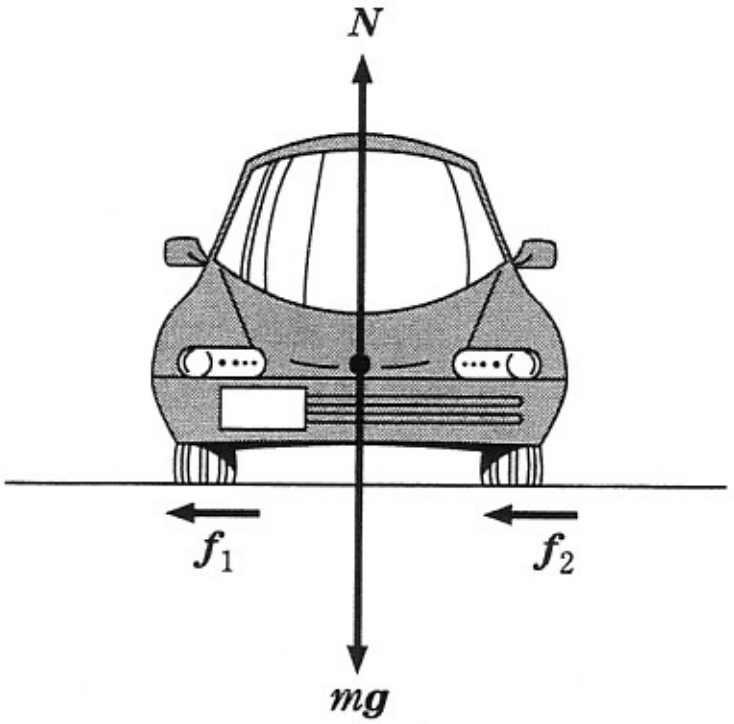


図 5.10　自動車が右に曲がるときには，路面が横向き（右向き）の摩擦力をタイヤに作用する．

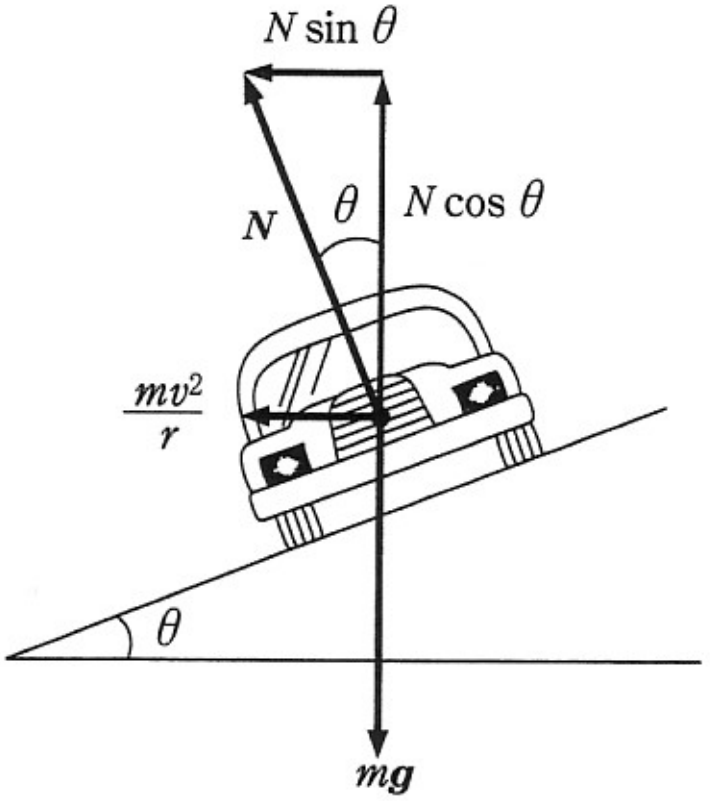


図 5.11　路面が横方向に傾斜しているときには，垂直抗力 N と重力 mg の合力が横向きの力になる．

[道路やレールが水平な場合]

[道路やレールが傾いている場合]

車がカーブを曲がるとき

自動車を前進させる力は，エンジンの働きによって誘起された道路による摩擦力である(教科書 p.72)

→ 自動車がカーブを曲がるとき

→ 「向心力」が必要(3章 等速円運動)

→ 路面が作用する「摩擦力」必要

→ 「向心力」に相当する「摩擦力」は「垂直抗力N」と関係する

車がカーブを曲がるとき

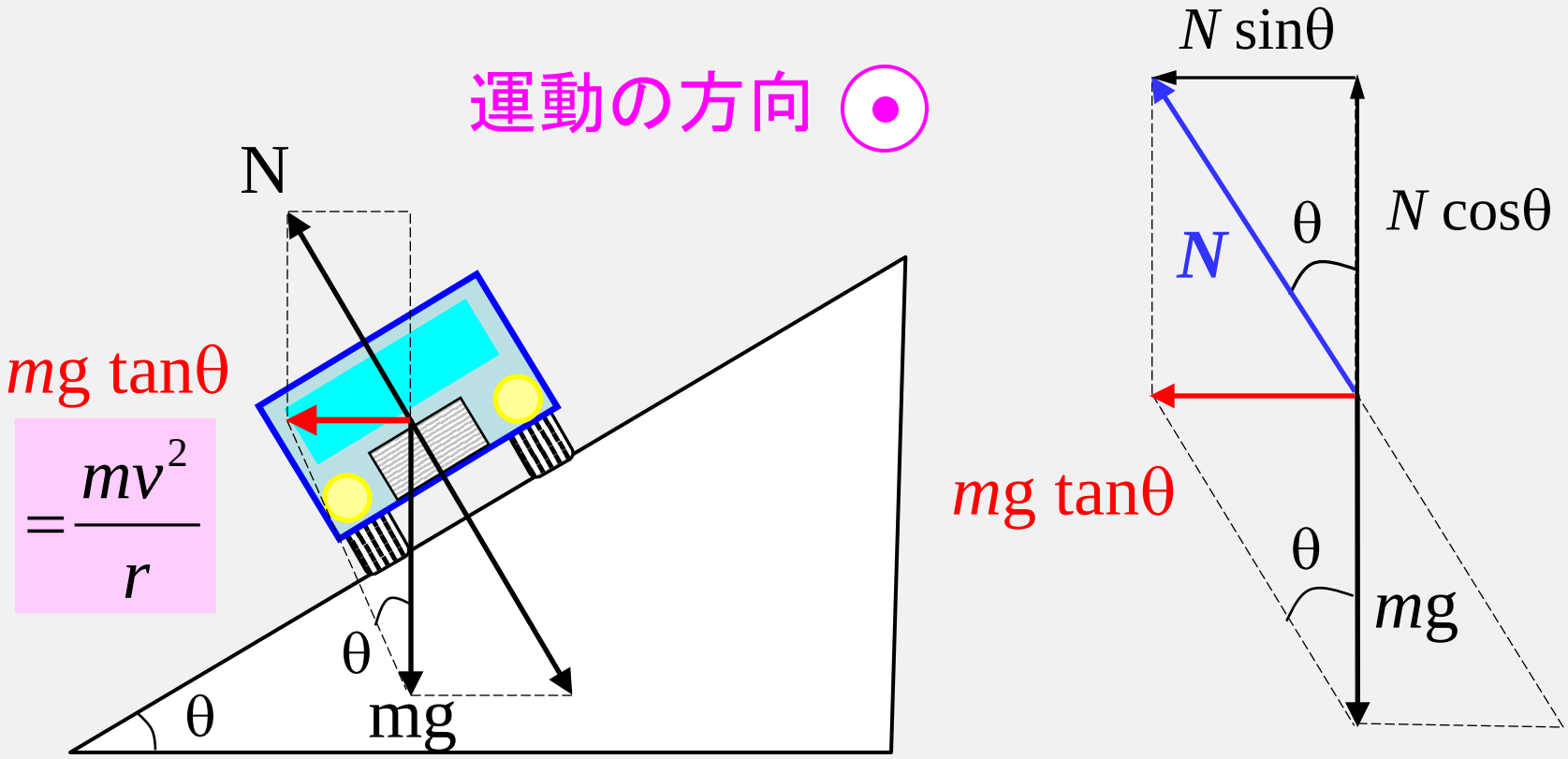
道路やレールが水平な場合，車が受ける力はともに鉛直方向で，水平方向の力はないから，車はまっすぐに進もうとしてカーブを曲がりきれなくなる.

一方で，道路やレールが傾いているときには，垂直抗力 N が鉛直でなくなり水平方向と鉛直方向に分解できる.

この時，車や電車に働く力を考えると，鉛直方向は mg とつり合い，水平方向は $mg\ \tan\theta$ の力が向心力となり円運動させることが可能となる.

※ Nの水平成分 $= N\sin\theta = mg\tan\theta$

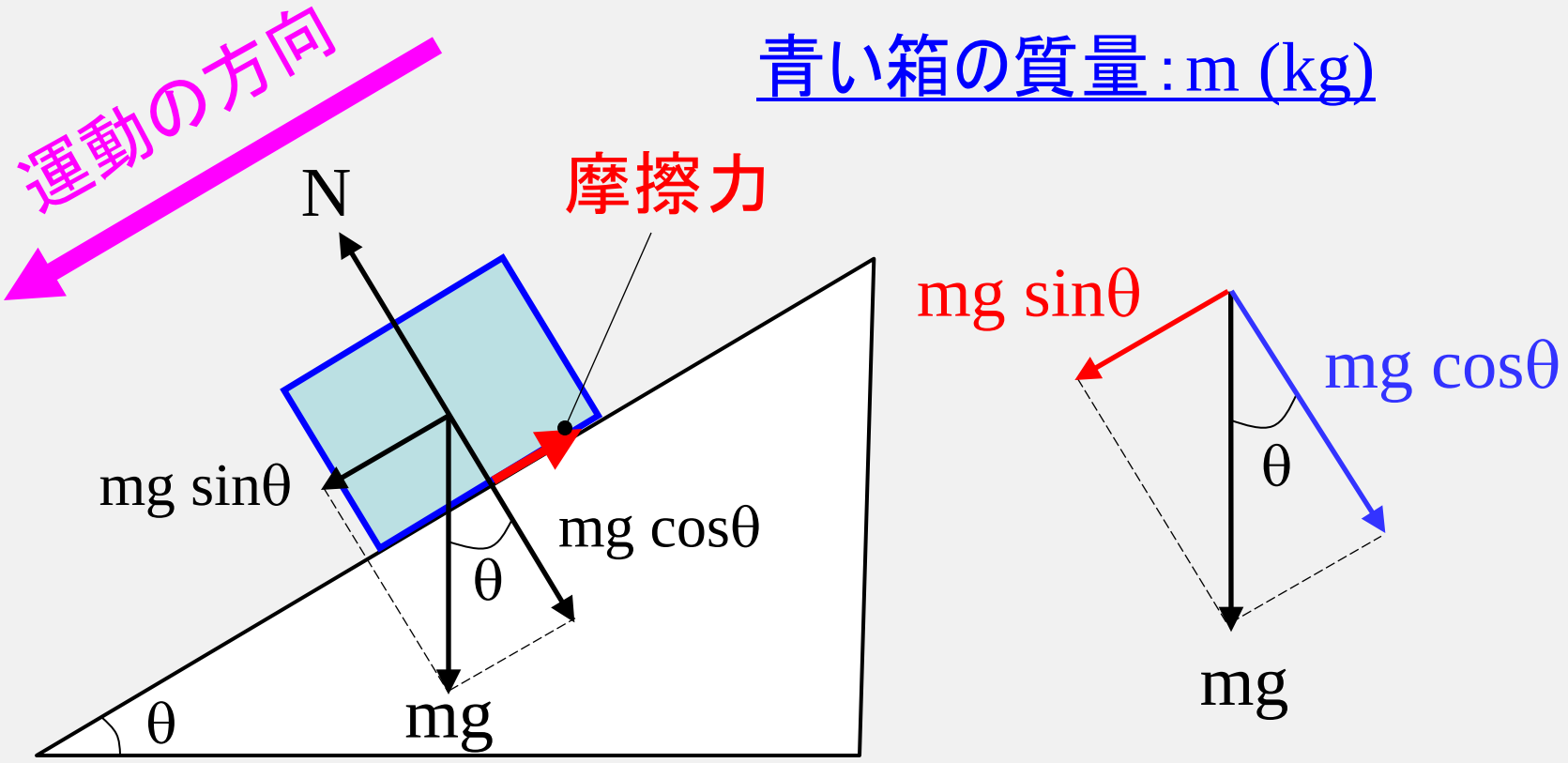
5章のポイント②



重力 mg と垂直抗力 N の合力である $mg\tan\theta$ が向心力となり，質量 m の車にカーブの中心に向く加速度を与え，円運動させる．

5章のポイント①

青い箱の質量：m (kg)



垂直抗力の大きさ： $N = mg\cos\theta$

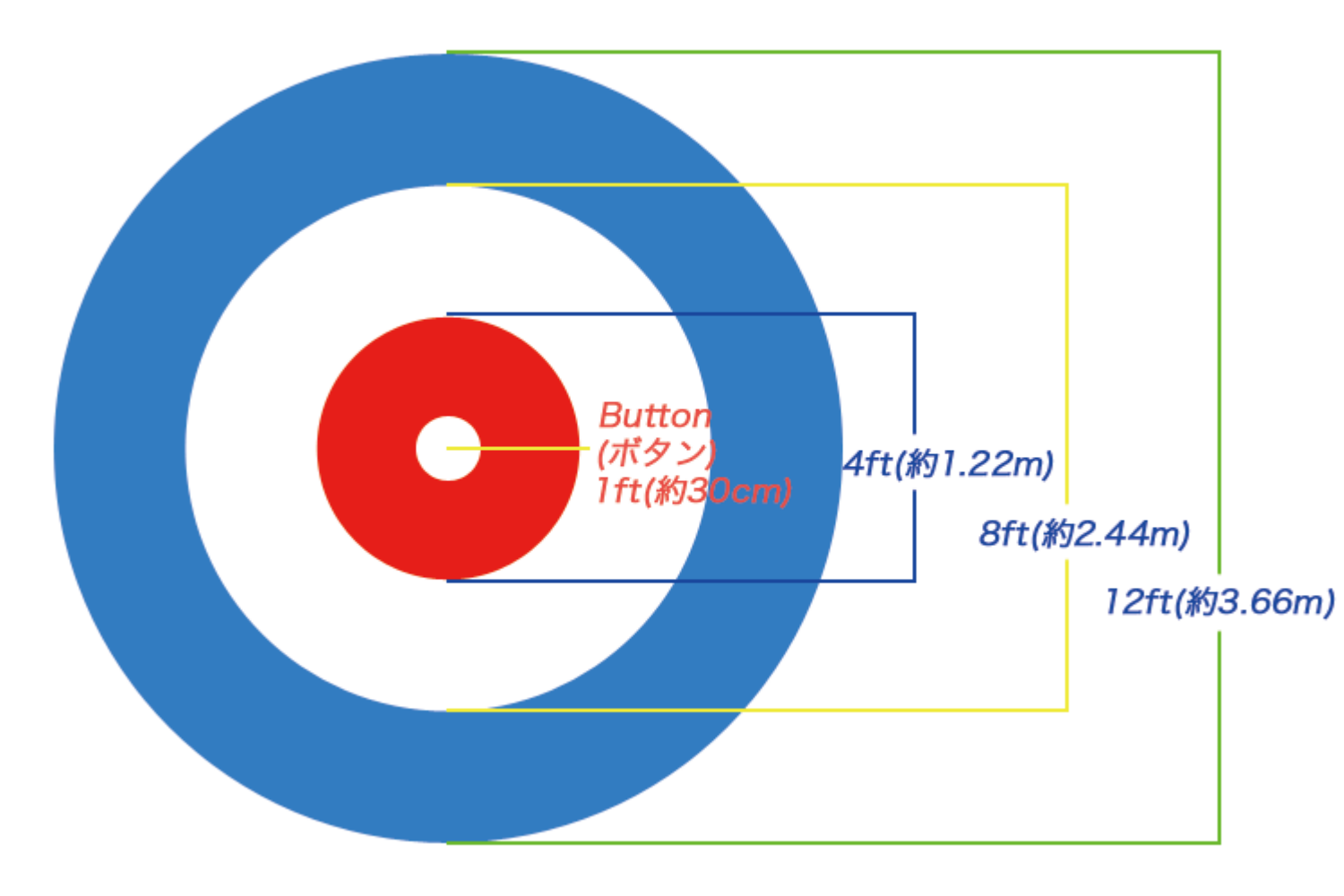
「摩擦」とカーリング

カーリング (Curling)

4人ずつ2チームで行われ，目標とする円をめがけて各チームが交互に8回ずつ石を氷上に滑らせる．石を円の中心により近づけたチームが得点を得る．これを10回繰り返し，総得点で勝敗を競う.

重いストーンが氷上を滑るのは当たり前のようだが，ツルツルに磨いたガラスや金属などの上では，ストーンはそれほど滑らない(普通の氷上でも同様)．ストーンの滑りには，リンクを覆う微細な氷粒(ペブル)が関係している.

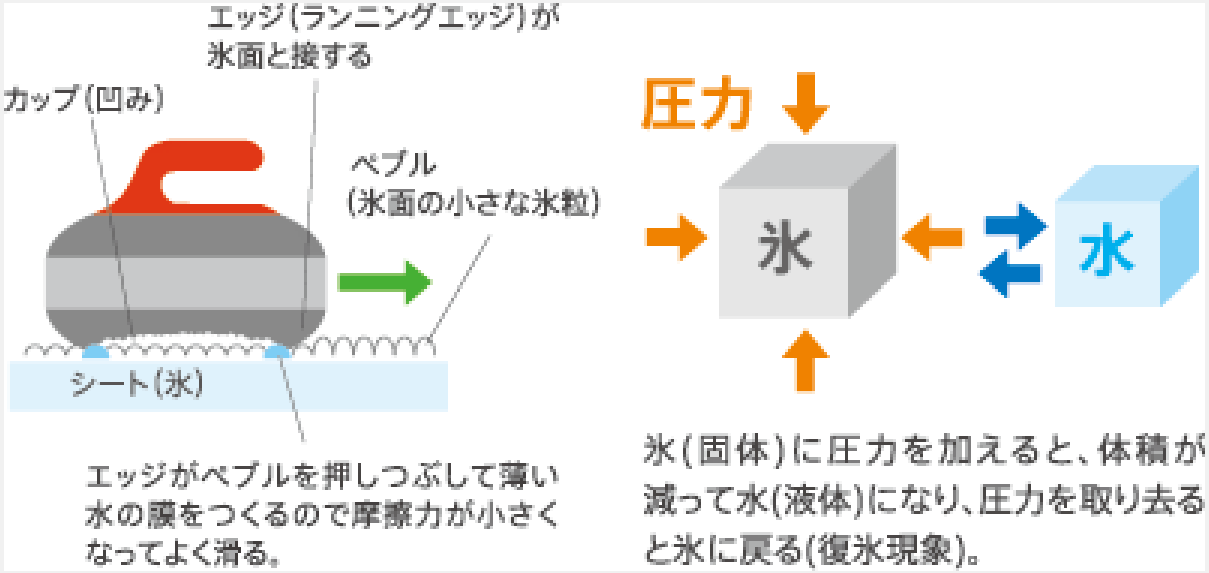
「摩擦」とカーリング



ストーンの移動距離は最長42m

「摩擦」とカーリング

ストーンが投げ出されると，このペブルが圧しつぶされて氷上に薄い水膜ができ，それが潤滑油のように作用する．アイススケートもまた，ブレード(刃)と氷面との間に水の膜ができるため，摩擦が小さくなってよく滑る．カーリングのストーンの底は平面ではなく，カップと呼ばれる凹みが設けてあり，周囲のエッジ部がスケートのブレードと同じ役目をしている．



「摩擦」とカーリング

1. 氷上は平坦でなく，ペブルが存在することでストーンのすべり面と氷の摩擦力を小さくしている．この時，ペブルは多すぎてもよくない．
2. ストーンがすべっている最中に，軌道の前をブラシでこするのは，氷上に薄い水膜を作り(それが潤滑油のように作用)，ストーンを滑りやすくさせるため．
3. 一度ストーンが通った軌道は，ペブルが少なくなることで次にストーンを滑らせる力加減などを変えなければいけない．毎回，氷上の様子が変化する中で，的の中央を狙うのは大変難しい．

空気と水の抵抗力 (p.73)

● 粘性抵抗

速さ v が十分に小さい場合に，液体や気体の中を運動する物体の受ける抵抗力

$$\boldsymbol{F} = -b\boldsymbol{v} \qquad (5.17)$$

● ストークスの法則

半径 R の球状の物体に対する粘性抵抗

$$\boldsymbol{F} = -6\pi\eta R\boldsymbol{v} \qquad (5.18)$$

η (粘度): 気体あるいは液体ごとに決まっている定数

η: エータ

雨滴の落下

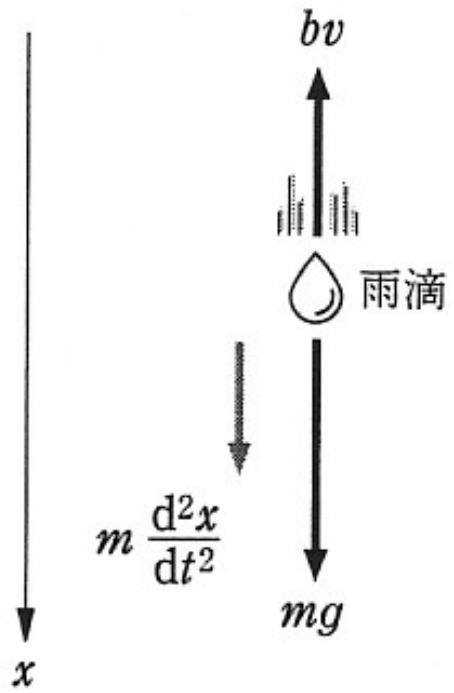


図 5.13　雨滴の落下

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - bv$$

雨滴の速さが増加するにつれて粘性抵抗が増加し，雨滴に働く下向きの力が減少し，加速度も減少する．

加速度がゼロになったとき，雨滴は等速落下運動するようになる．この時の速さを終端速度という．

慣性抵抗 (p.74)

粘性抵抗と異なり，速さ v が大きい場合に，液体や気体の中を運動する物体の受ける抵抗力

$$F = -\frac{1}{2} C_\rho A v^2 \qquad (5.19)$$

スカイダイビング (p.77)

スカイダイビングの時の慣性抵抗

$$\frac{1}{2}C\rho Av^2$$

スカイダイバーの運動方程式

$$m\frac{dv}{dt} = mg - \frac{1}{2}C_\rho Av^2$$

運動方程式の左辺=0の時の v が終端速度(5.39)式となる.

終端速度 (p.74)

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = mg - bv = 0 \qquad (5.20)$$

$$v = v_t = \frac{mg}{b} \qquad (5.21)$$

物体が粘性抵抗や慣性抵抗などの抵抗力を受けて運動する場合には，位置エネルギーは減少するが運動エネルギーはそれと同じだけは増加しないので，力学的エネルギーは減少し，保存しない．この力学的エネルギーの減少分は熱になる．

粘性抵抗が働く場合の放物運動

4章において取り上げた「放物運動」では，空気の抵抗を無視して考えた．この空気の抵抗(粘性抵抗)を考慮して放物運動を考えるとき，x ，y 方向の運動方程式は以下のようになる (図5.15).

$$\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{dv_x}{dt}=g-\beta v_x,\quad \frac{d^2y}{dt^2}=\frac{dv_y}{dt}=-\beta v_y \qquad (5.31)$$

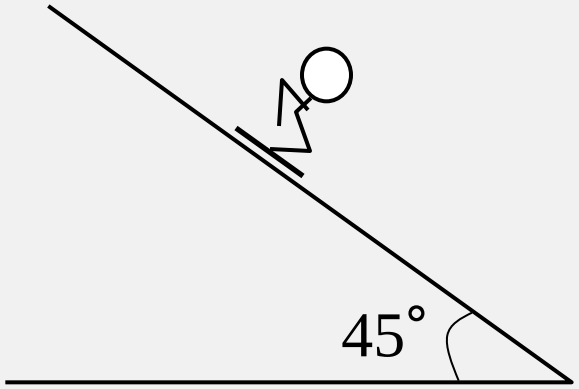
(鉛直方向)　　(水平方向)

5章まとめ

1. 静止，運動摩擦力
   - 垂直抗力 N
   - 斜面における垂直抗力
2. 空気と水の抵抗力
   - 粘性抵抗 (ストークスの法則，雨滴)
   - 慣性抵抗 (スカイダイビング)
   - 終端速度

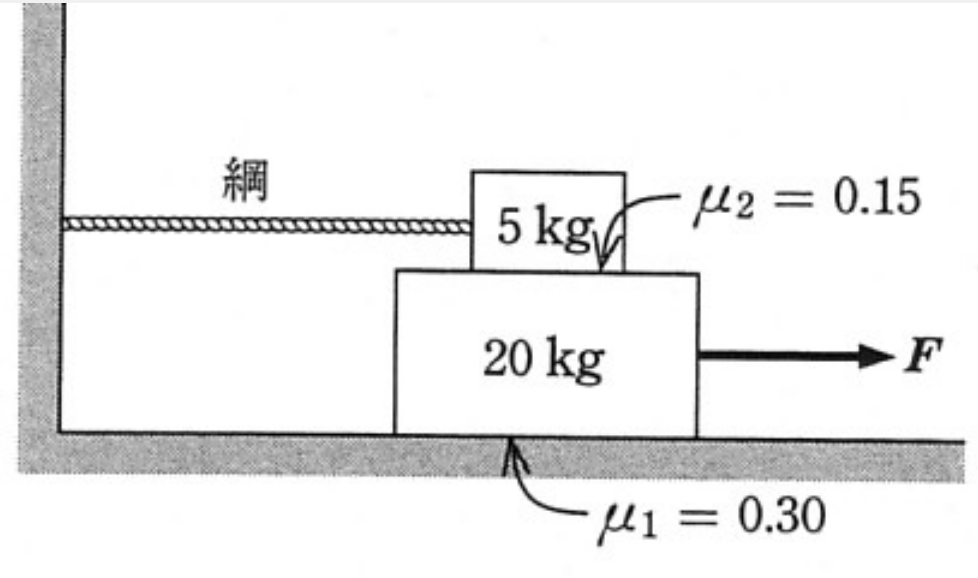
演習問題 5-A-2

摩擦力を考慮しながら運動方程式をたてる.



演習問題 5-A-3

動き出させるのに必要な力なので，この時かかっている力は「摩擦力(最大摩擦力)」のみと考えることができる.



演習問題 5-A-5

加速度一定: 等加速度直線運動

運動方程式: $ma = F - \mu N$

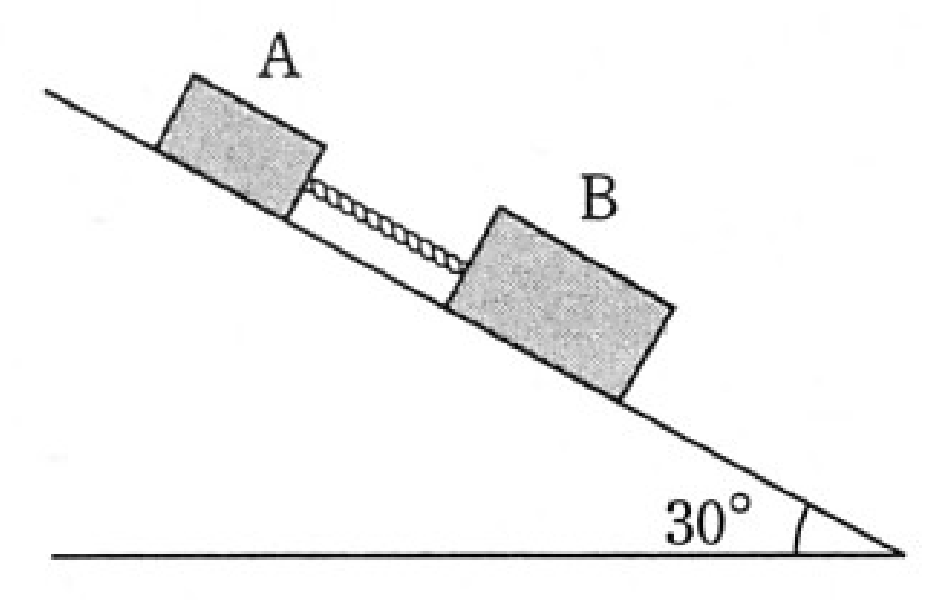
演習問題 5-A-6

摩擦力を考慮して運動方程式をたてる．ある一定の加速度で速度を減少させながら，速度がゼロになると最高点に達すると考える．

摩擦力 + 運動方程式 + 等加速度運動

演習問題 5-A-7

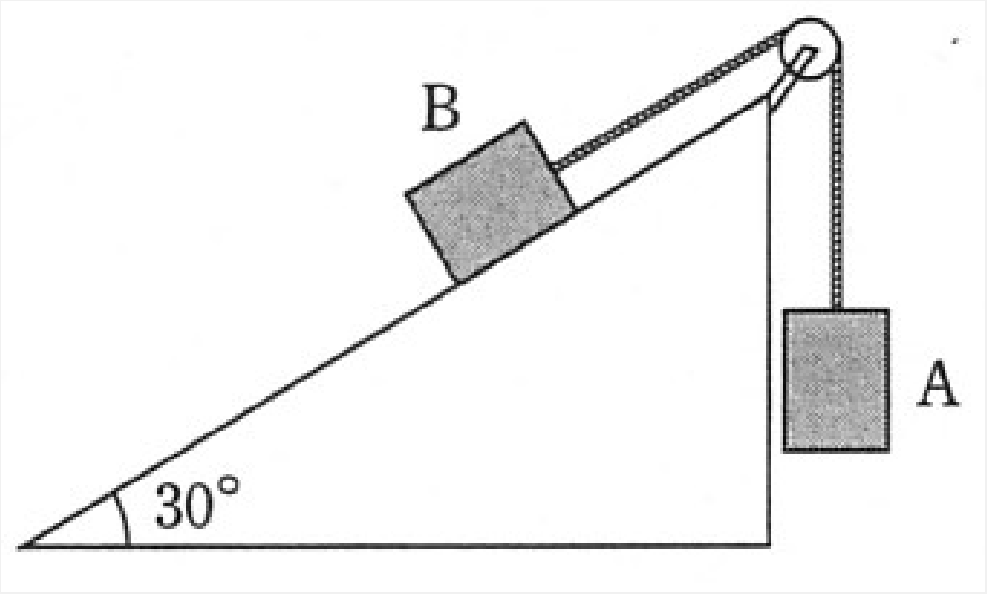
A, Bそれぞれについて運動方程式をたてる.



演習問題 5-A-8

ブロック A と B それぞれに関する運動方程式をたてる.

この時，張力とブロック B と斜面にかかる摩擦力を考慮することを忘れずに.



演習問題 5-B-2

教科書図5.11をよく眺めながら考えてみましょう.

垂直抗力 N：物体が面から受ける力の垂直方向の分力を垂直抗力という.

演習問題 5-B-4

終端速度: $mg = \frac{1}{2} \times 0.5\rho_2 \left(\pi r^2\right) v^2$

$$v = \sqrt{\frac{mg}{0.25\rho_2 \left(\pi r^2\right)}}$$

質量:密度×体積