数学序論問題解説 #14

河野

演習問題 5.23

(1) $f(x) = x^2 + x + 1$ とする。$(1, 3)$ における f のグラフの接線と法線の方程式を求めよ。
(2) 原点を通る直線が $y = f(x) = x^2 + x + 1$ に接している。このときこの直線の方程式を求めよ。
(3) $f(x) = x(x-1)(x-2)$ のグラフに接し，$y = 2x + 1$ と平行な直線の方程式を求めよ。
(4) 放物線 $y = ax^2 + bx + c$ 上に相異なる 2 点 $P(x_1, y_1)$, $Q(x_2, y_2)$ をとったとする。この放物線の接線で，線分 PQ に平行となるのは，どの点における接線か？ その点の x 座標の値を求めよ。

(1) $x = a$ における接線の方程式は

$$y = f'(a)(x-a) + f(a)$$

である。$f'(x) = 2x + 1$ なので $f'(1) = 3$ である。また $f(1) = 3$ なので接線の方程式は

$$y = f'(1)(x-1) + f(3) = 3(x-1) + 3 = 3x$$

である。また法線は接線と直交するので法線の傾きは $-\dfrac{1}{f'(1)} = -\dfrac{1}{3}$ である。よって法線の方程式は

$$\begin{aligned} y &= -\frac{1}{f'(1)}(x-1) + f(1) \\ &= -\frac{1}{3}(x-1) + 3 \\ &= -\frac{1}{3}x + \frac{10}{3} \end{aligned}$$

である。
(2) $x = a$ における接線の方程式は

$$y = f'(a)(x-a) + f(a)$$

である。今 $f'(x) = 2x + 1$ なので方程式は

$$y = (2a+1)(x-a) + a^2 + a + 1 = (2a+1)x - a^2 + 1$$

となる。この直線が原点を通るので $0 = -a^2 + 1$ より，$a = \pm 1$ となる。よって求める接線は $y = 3x$ および $y = -x$ である。
(3) $x = a$ における接線の方程式は

$$y = f'(a)(x-a) + f(a)$$

である。この接線が $y = 2x + 1$ と平行のとき $f'(a) = 2$ が成立している。$f'(x) = 3x^2 - 6x + 2$ なので $f'(a) = 3a^2 - 6a + 2 = 2$ となる。これを解いて $a = 0, 2$ を得る。$f(0) = 0$，$f(2) = 0$ なので $a = 0$ のとき接線の方程式は

$$y = 2x$$

$a = 2$ のときの接線の方程式は

$$y = 2x - 4$$

となる。

(4)　線分 PQ の傾きは

$$\begin{aligned}\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} &= \frac{ax_2^2 + bx_2 + c - (ax_1^2 + bx_1 + c)}{x_2 - x_1} = \frac{a(x_2 - x_1)(x_2 + x_1) + b(x_2 - x_1)}{x_2 - x_1} \\ &= a(x_2 + x_1) + b\end{aligned}$$

となる。また

$$f'(x) = 2ax + b$$

なので接線が線分 PQ と平行となるような点の x 座標は $x = \dfrac{x_2 + x_1}{2}$ である。接点の座標は

$$\left(\frac{x_1 + x_2}{2}, a\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right)^2 + b\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) + c\right)$$

である。

演習問題 5.24　命題 5.18 を証明せよ。ただし (2) の証明には平均値の定理と呼ばれる次の定理を用いてよい。f が $(\, a, b\,)$ で微分可能であり，$[\, a, b\,]$ で連続のとき，

$$\frac{f(b) - f(a)}{b - a} = f'(c)$$

となる c $(a < c < b)$ が存在する。

(1)　c が関数 $y = f(x)$ の極大点とする。ある正数 δ が存在して $0 < |x - c| < \delta$ を満たす任意の x に対し $f(x) < f(c)$ が成立する。c に十分近い x に対しては $f(x) - f(c) < 0$ が成立している。絶対値の十分小さい $h > 0$ に対しては

$$\frac{f(c + h) - f(c)}{h} < 0$$

が成立しているので

$$f'_+(c) = \lim_{h \to +0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h} \leqq 0$$

が成立する。絶対値の十分小さい $h < 0$ に対しては

$$\frac{f(c + h) - f(c)}{h} > 0$$

が成立しているので

$$f'_-(c) = \lim_{h \to -0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h} \geqq 0$$

が成立する。$f'(c) = \displaystyle\lim_{h \to 0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h}$ が存在する必要十分条件は $f'_+(c) = \displaystyle\lim_{h \to +0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h}$ および $f'_-(c) = \displaystyle\lim_{h \to -0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h}$ が存在して，$f'_+(c) = f'_-(c)$ が成立することである。よって

$$0 \leqq f'(c) = \lim_{h \to 0} \frac{f(c + h) - f(c)}{h} \leqq 0$$

より

$$f'(c) = \lim_{h \to 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} = 0$$

となる。よって c は臨界点である。

c が関数 $y = f(x)$ の極小点とする。ある正数 δ が存在して $0 < |x - c| < \delta$ を満たす任意の x に対し $f(x) > f(c)$ が成立する。c に十分近い x に対しては $f(x) - f(c) > 0$ が成立している。絶対値の十分小さい $h > 0$ に対しては

$$\frac{f(c+h) - f(c)}{h} > 0$$

が成立しているので

$$f'_+(c) = \lim_{h \to +0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} \geqq 0$$

が成立する。絶対値の十分小さい $h < 0$ に対しては

$$\frac{f(c+h) - f(c)}{h} < 0$$

が成立しているので

$$f'_-(c) = \lim_{h \to -0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} \leqq 0$$

が成立する。$f'(c) = \lim_{h \to 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h}$ が存在する必要十分条件は $f'_+(c) = \lim_{h \to +0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h}$ および $f'_-(c) = \lim_{h \to -0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h}$ が存在して，$f'_+(c) = f'_-(c)$ が成立することである。よって

$$0 \leqq f'(c) = \lim_{h \to 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} \leqq 0$$

より

$$f'(c) = \lim_{h \to 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h} = 0$$

となる。よって c は臨界点である。

(2) $(\,a,\,b\,)$ で $f'(x) > 0$ が成立しているとする。x_1, x_2 を $[\,a,\,b\,]$ の $x_1 < x_2$ を満たす任意の元とする。平均値の定理より

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(c) \qquad (x_1 < c < x_2)$$

を満たす c が存在する。このとき $f'(c) > 0$ であり $x_1 < x_2$ なので $f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) > 0$ となる。よって f は増加の状態にある。

$(\,a,\,b\,)$ で $f'(x) < 0$ が成立しているとする。x_1, x_2 を $[\,a,\,b\,]$ の $x_1 < x_2$ を満たす任意の元とする。平均値の定理より

$$\frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} = f'(c) \qquad (x_1 < c < x_2)$$

を満たす c が存在する。このとき $f'(c) < 0$ であり $x_1 < x_2$ なので $f(x_2) - f(x_1) = f'(c)(x_2 - x_1) < 0$ となる。よって f は減少の状態にある。

演習問題 5.25　以下の関数のグラフの概形を描け。

(1) $f(x) = 2x^2 - x^4$　(2) $f(x) = xe^{-x}$　(3) $f(x) = x^2 \log x$

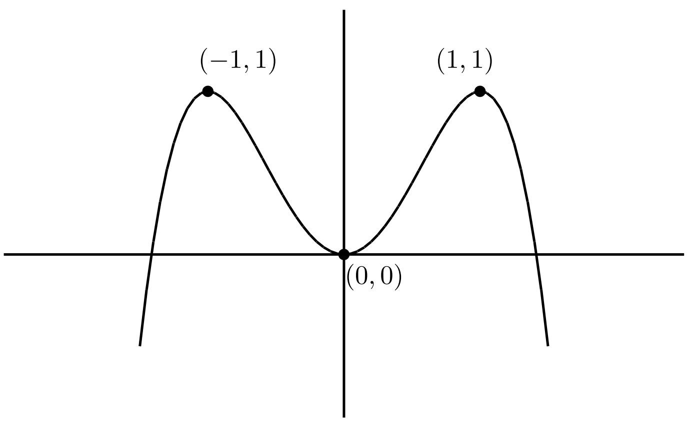
(4) $f(x) = 3\sin x + \sin 3x$　(5) $f(x) = x - \sqrt{1+x}$　(6) $f(x) = \left(1 - \dfrac{1}{x}\right)^{\frac{2}{3}}$

(7) $f(x) = x + 2\cos x$　(8) $f(x) = \sin x(1 + \cos x)$　(9) $f(x) = x^{-x^2}$

(1)　$f'(x) = 4x - 4x^3 = 4x(1-x^2) = 4x(1-x)(1+x)$ なので $f'(x) = 0$ となるのは $x = -1, 0, 1$ である。増減表は次のようになる。

x		-1		0		1	
$f'(x)$	$+$	0	$-$	0	$+$	0	$-$
$f(x)$	$\nearrow$	1	$\searrow$	0	$\nearrow$	1	$\searrow$

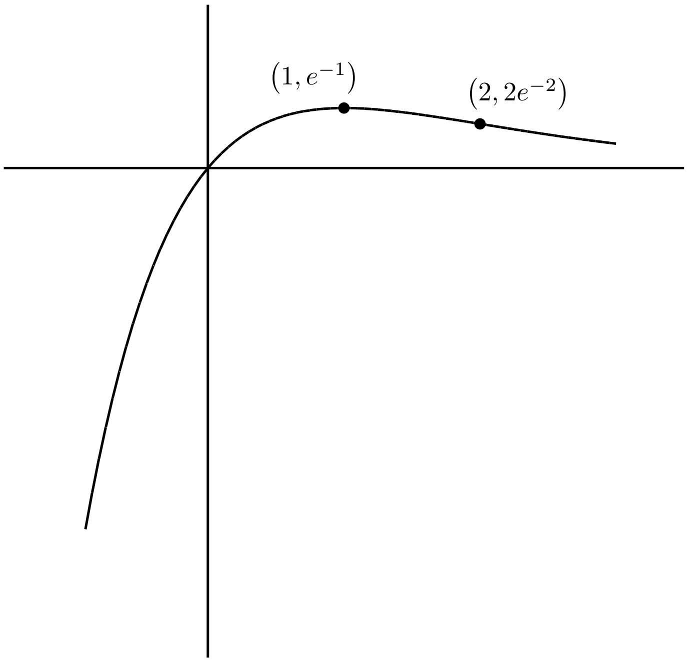
$f(x) = 2x^2 - x^4 = 0$ を解くと $x = 0, \pm\sqrt{2}$ となる。よって曲線は x 軸と 3 点で交わっている。($x = 0$ は重解なので接している。) このことに注意して概形を描くと次図のようになる。



(2)　$f'(x) = e^{-x} - xe^{-x} = (1-x)e^{-x}$ なので $f'(x) = 0$ となるのは $x = 1$ のときのみである。増減表は次のようになる。

x		1	
$f'(x)$	$+$	0	$-$
$f(x)$	$\nearrow$	e^{-1}	$\searrow$

$\displaystyle\lim_{x\to\infty} f(x) = 0$ および $\displaystyle\lim_{x\to-\infty} f(x) = -\infty$ ということに注意してグラフを描くと次図のようになる。



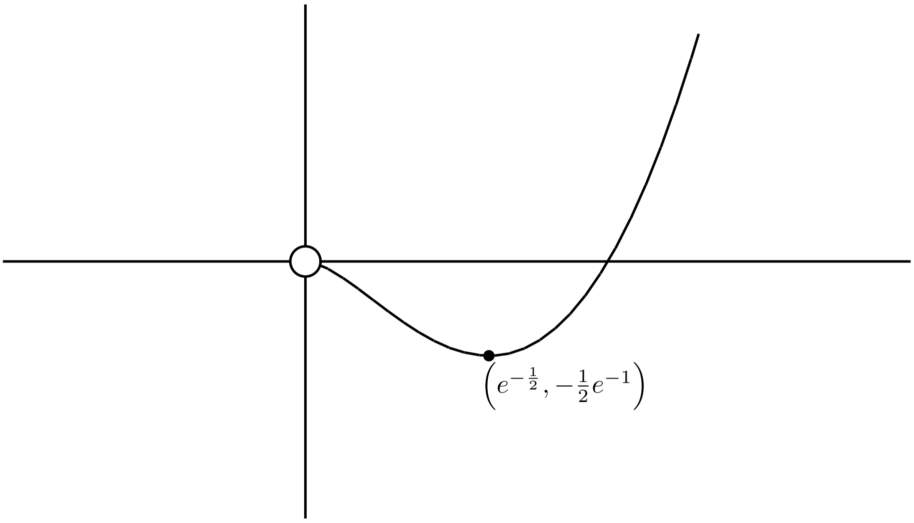
(3) $\log x$ が定義されるのは $x > 0$ なので $f(x)$ の定義域も $x > 0$ である。$f'(x) = 2x\log x + x^2\dfrac{1}{x} = x\,(2\log x + 1) = 0$ を解いて，$x = \sqrt{\dfrac{1}{e}}$ を得る。よって増減表は次の様になる。

x		$\sqrt{\dfrac{1}{e}}$	
$f'(x)$	$-$	0	$+$
$f(x)$	$\searrow$	$-\dfrac{1}{2e}$	$\nearrow$

$x \to +0$ としたときの関数の挙動を調べる。ここでは後で学ぶロピタルの定理を用いる。

$$\begin{aligned}\lim_{x\to+0} x^2\log x &= \lim_{x\to+0}\frac{\log x}{\dfrac{1}{x^2}} = \lim_{x\to+0}\frac{\left(\log x\right)'}{\left(\dfrac{1}{x^2}\right)'}\\ &= \lim_{x\to+0}\frac{\dfrac{1}{x}}{-\dfrac{2}{x^3}}\\ &= -\frac{1}{2}\lim_{x\to+0} x^2 = 0\end{aligned}$$

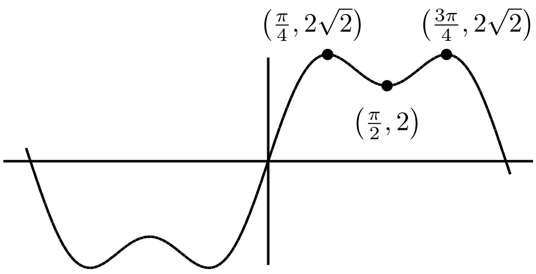
$\displaystyle\lim_{x\to\infty} f(x) = \infty$ であり，また $f(x) = 0$ となるのは $x = 1$ のときのみである。このことに注意してグラフを描くと次図の様になる。



(4) $\sin x$ は周期 2π の周期関数であり，$\sin 3x$ は周期 $\dfrac{2\pi}{3}$ の周期関数である。これより $f(x)$ は周期 2π の周期関数になる。よって $-\pi \leqq x \leqq \pi$ の範囲でグラフを描き，それを x 軸の方向へ $2n\pi$(n は整数) 平行移動したグラフが求めるグラフとなる。よって $-\pi \leqq x \leqq \pi$ の範囲で調べる。

$f'(x) = 3\cos x + 3\cos 3x = 3\cos x + 3(4\cos^3 x - 3\cos x) = 6\cos x\left(2\cos^2 x - 1\right) = 0$ となるのは $\cos x = 0$ または $\cos^2 x = \dfrac{1}{2}$ なので，$-\pi \leqq x \leqq \pi$ の範囲では $x = -\dfrac{3}{4}\pi, -\dfrac{1}{2}\pi, -\dfrac{1}{4}\pi, \dfrac{1}{4}\pi, \dfrac{1}{2}\pi, \dfrac{3}{4}\pi$ である。よって増減表は次のようになり，グラフは次図のようになる。

x		$-\frac{3}{4}\pi$		$-\frac{1}{2}\pi$		$-\frac{1}{4}\pi$		$\frac{1}{4}\pi$		$\frac{1}{2}\pi$		$\frac{3}{4}\pi$	
$f'(x)$	$-$	0	$+$	0	$-$	0	$+$	0	$-$	0	$+$	0	$-$
$f(x)$	$\searrow$	$-\frac{4}{\sqrt{2}}$	$\nearrow$	-2	$\searrow$	$-\frac{4}{\sqrt{2}}$	$\nearrow$	$\frac{4}{\sqrt{2}}$	$\searrow$	2	$\nearrow$	$\frac{4}{\sqrt{2}}$	$\searrow$



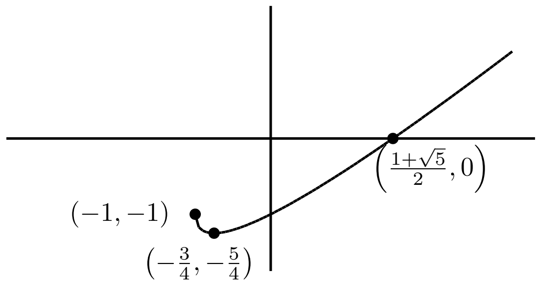
(5) $f(x) = x - \sqrt{1+x}$ は $1 + x \geqq 0$ で定義されている。$f'(x) = 1 - \dfrac{1}{2}\dfrac{1}{\sqrt{1+x}}$ なので $f'(x) = 0$ より $x = -\dfrac{3}{4}$ となる。

x		$-\frac{3}{4}$	
$f'(x)$	$-$	0	$+$
$f(x)$	$\searrow$		$\nearrow$

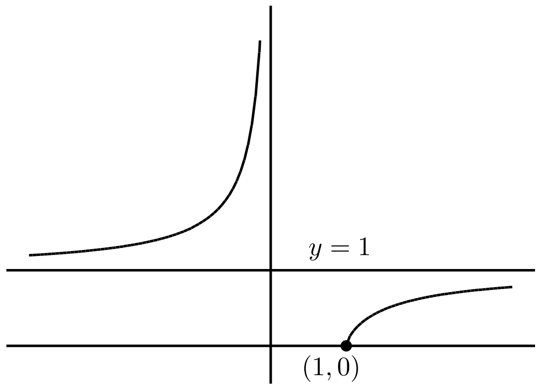
$f(x)=0$ とすると $x-\sqrt{1+x}=0$ より $x=\sqrt{1+x}$ となる。両辺を 2 乗して

$$x^2=1+x$$

を得る。この 2 次方程式の解は $x=\dfrac{1\pm\sqrt{5}}{2}$ である。しかし $x=\sqrt{1+x}\geqq 0$ より $x=\dfrac{1-\sqrt{5}}{2}$ は不適である。また $f(0)=0-\sqrt{1+0}=-1$ である。以上のことに注意してグラフを描くと次図のようになる。



(6) $f(x)=\left(1-\dfrac{1}{x}\right)^{\frac{2}{3}}$ なので $1-\dfrac{1}{x}\geqq 0$ が必要である。$x\geqq 0$ のときは $1\geqq\dfrac{1}{x}$ より $x\geqq 1$ である。$x<0$ のときは常に $1-\dfrac{1}{x}\geqq 0$ である。$f'(x)=\dfrac{2}{3}\left(1-\dfrac{1}{x}\right)^{-\frac{1}{3}}\dfrac{1}{x^2}$ は $x=1$ においては微分可能ではない。それ以外では $f'(x)>0$ である。$\lim\limits_{x\to\infty}f(x)=1$，$\lim\limits_{x\to-\infty}f(x)=1$ $\lim\limits_{x\to-0}f(x)=\infty$ ということに注意してグラフを描くと次図のようになる。

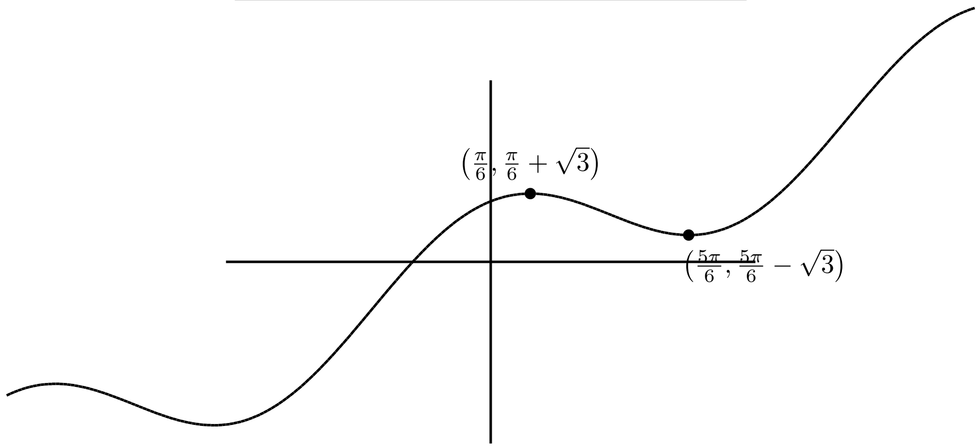


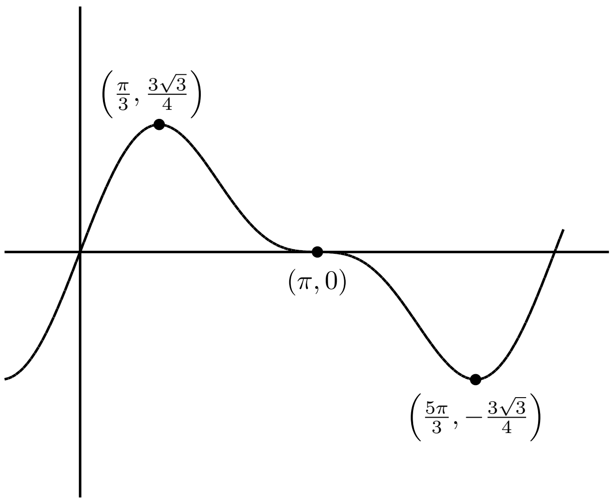
(7) $f(x)=x+2\cos x$ なので $f(x+2\pi)=f(x)+2\pi$ が成立する。$0\leqq x\leqq 2\pi$ でグラフを描いて，そのグラフを x 軸方向に $2n\pi$，y 軸方向に $2n\pi$ 移動したもの全体が関数のグラフになる (ここで n は整数)。

$f(x)=x+2\cos x$ なので $f'(x)=1-2\sin x$ である。$f'(x)=0$ となるのは $\dfrac{\pi}{6},\dfrac{5\pi}{6}$ である。増

減表とグラフは次のようになる。

x		$\frac{\pi}{6}$		$\frac{5\pi}{6}$	
$f'(x)$	$+$	0	$-$	0	$+$
$f(x)$	$\nearrow$	$\frac{\pi}{6}+\sqrt{3}$	$\searrow$	$\frac{5\pi}{6}-\sqrt{3}$	





(8)　$f(x)$ は周期 2π の周期関数なので $-\pi \leqq x \leqq \pi$ の範囲で考える。$f'(x) = \cos x(1+\cos x) - \sin^2 x = \cos x + \cos^2 x - (1-\cos^2 x) = 2\cos^2 x + \cos x - 1 = (2\cos x - 1)(\cos x + 1) = 0$ とすると，$\cos x + 1 = 0$ または $2\cos x - 1 = 0$ である。$\cos x + 1 = 0$ のとき $x = -\pi, \pi$ である。$2\cos x - 1 = 0$ のとき $x = -\dfrac{\pi}{3}, \dfrac{\pi}{3}$ である。増減表は次のようになるので，グラフは前図の様になる。

x	$-\pi$		$-\frac{\pi}{3}$		$\frac{\pi}{3}$		π
$f'(x)$	0	$-$	0	$+$	0	$-$	0
$f(x)$	0	$\searrow$	$-\frac{3\sqrt{3}}{4}$	$\nearrow$	$\frac{3\sqrt{3}}{4}$	$\searrow$	0

(9)　$f(x) = x^{-x^2}$ なので定義域は $x > 0$ である。導関数を求めるのに対数微分法を用いる。$y = x^{-x^2}$ とすると $\log y = -x^2 \log x$ である。両辺を x で微分すると $\dfrac{1}{y}y' = -2x\log x - x^2\dfrac{1}{x} = -2x\log x - x$

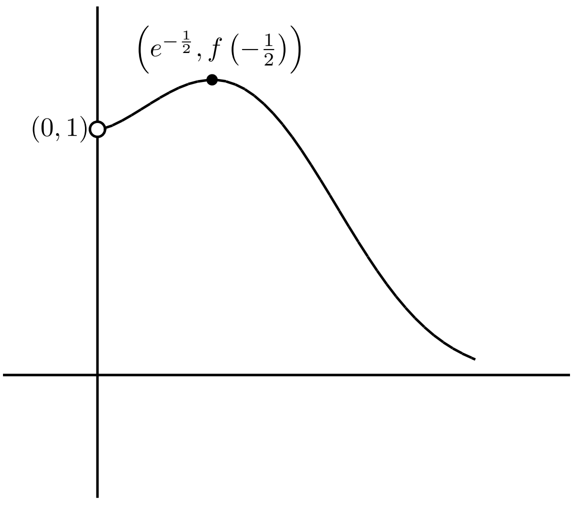
なので $y' = -x \cdot x^{-x^2}\big(2\log x + 1\big)$ となる。$f'(x) = 0$ とすると，$2\log x + 1 = 0$ なので $x = e^{-\frac{1}{2}}$ となる。増減表は

x		$e^{-\frac{1}{2}}$	
$f'(x)$	$+$	0	$-$
$f(x)$	$\nearrow$	$f(e^{-\frac{1}{2}})$	$\searrow$

となる。$\displaystyle\lim_{x\to\infty} f(x) = 0$ である。また $\displaystyle\lim_{x\to+0} f(x)$ を求める。$\log y = -x^2 \log x$ の極限を求める。

$$
\begin{aligned}
\lim_{x\to+0} \log f(x) &= \lim_{x\to+0}\big(-x^2\log x\big) = -\lim_{x\to+0}\frac{\log x}{\dfrac{1}{x^2}} \\
&= -\lim_{x\to+0}\frac{\big(\log x\big)'}{\left(\dfrac{1}{x^2}\right)'} = -\lim_{x\to+0}\frac{\dfrac{1}{x}}{-2\dfrac{1}{x^3}} \\
&= \frac{1}{2}\lim_{x\to+0} x^2 = 0
\end{aligned}
$$

なので，$0 = \displaystyle\lim_{x\to+0}\log f(x) = \log\left(\lim_{x\to+0} f(x)\right)$ となる。よって $\displaystyle\lim_{x\to+0} f(x) = 1$ となる。以上を考慮してグラフを書くと次図のようになる。



演習問題 *5.26　$x_1, x_2 \in [\,a,\, b\,]$ に対し $F(x) = \dfrac{f(x_2)-f(x_1)}{x_2-x_1}(x-x_1) + f(x_1) - f(x)$ とおき，$F(x)$ の正負を調べることにより命題 5.19 を証明せよ。

$f''(x) < 0$ の場合も同様にできるので，$f''(x) > 0$ の場合のみ証明する。$x_1 < x_2$ としても一般

性を失わないので，この場合を考える。

$$
\begin{aligned}
F(x_1) &= \frac{f(x_2)-f(x_1)}{x_2-x_1}(x_1-x_1)+f(x_1)-f(x_1) \\
&= f(x_1)-f(x_1)=0 \\
F(x_2) &= \frac{f(x_2)-f(x_1)}{x_2-x_1}(x_2-x_1)+f(x_1)-f(x_2) \\
&= f(x_2)-f(x_1)+f(x_1)-f(x_2)=0
\end{aligned}
$$

が成立しているので，$F(x)$ の $[\,x_1,\,x_2\,]$ における最大値，または最小値を与える x_3 で $x_1<x_3<x_2$ となるものが存在する。このとき $x=x_3$ で $F'(x_3)=0$ が成立している。$F''(x)=-f''(x)<0$ なので $F'(x)$ は $[\,x_1,\,x_2\,]$ で単調減少である。よって $F'(x)$ の $[\,x_1,\,x_2\,]$ における増減表は次のようになっている。

x	x_1		x_3		x_2
$F''(x)$		$-$		$-$	
$F'(x)$		$\searrow$	0	$\searrow$	

よって $(\,x_1,\,x_3\,)$ において $F'(x)>0$，$(\,x_3,\,x_2\,)$ において $F'(x)<0$ である。よって $F(x)$ の増減表は次のようになっている。

x	x_1		x_3		x_2
$F'(x)$		$+$	0	$-$	
$F(x)$	0	$\nearrow$		$\searrow$	0

よって $(\,x_1,\,x_2\,)$ において $F(x)>0$ となるので

$$\frac{f(x_2)-f(x_1)}{x_2-x_1}(x-x_1)+f(x_1)>f(x)$$

が成立し，上に凸であることが示された。

演習問題 5.27　$f''(c)=0$ であって $f'''(c)\neq 0$ ならば，変曲点であることを証明せよ。

$f'''(c)\neq 0$ なので $f'''(c)>0$ の場合と $f'''(c)<0$ の場合に分ける。
(1)　$f'''(c)>0$ の場合：　c を含む小区間 $[\,a,\,b\,]$ で $f'''(x)>0$ としてよい。$f''(x)$ は $[\,a,\,b\,]$ で単調増加なので，$a\leqq x<c$ において $f''(x)<0$ であり，$c<x\leqq b$ で $f''(x)>0$ である。命題 5.20 より $[\,a,\,c\,)$ において上に凸であり，$(\,c,\,b\,]$ において下に凸である。よって c は変曲点である。
(2)　$f'''(c)<0$ の場合：　c を含む小区間 $[\,a,\,b\,]$ で $f'''(x)<0$ としてよい。$f''(x)$ は $[\,a,\,b\,]$ で単調減少なので，$a\leqq x<c$ において $f''(x)>0$ であり，$c<x\leqq b$ で $f''(x)<0$ である。命題 5.20 より $[\,a,\,c\,)$ において下に凸であり，$(\,c,\,b\,]$ において上に凸である。よって c は変曲点である。

演習問題 5.28　次の関数のグラフの凹凸を調べ概形を描け。

(1) $y=(x-5)^4(x+1)^3$　　(2) $y=\dfrac{x^2+1}{x}$

(3) $y=e^{-x^2}$　　(4) $y=x\log x$

(1)

$$\begin{aligned} y' &= 4(x-5)^3(x+1)^3+3(x-5)^4(x+1)^2 \\ &= (x-5)^3(x+1)^2\{4(x+1)+3(x-5)\} \\ &= (x-5)^3(x+1)^2(7x-11) \end{aligned}$$

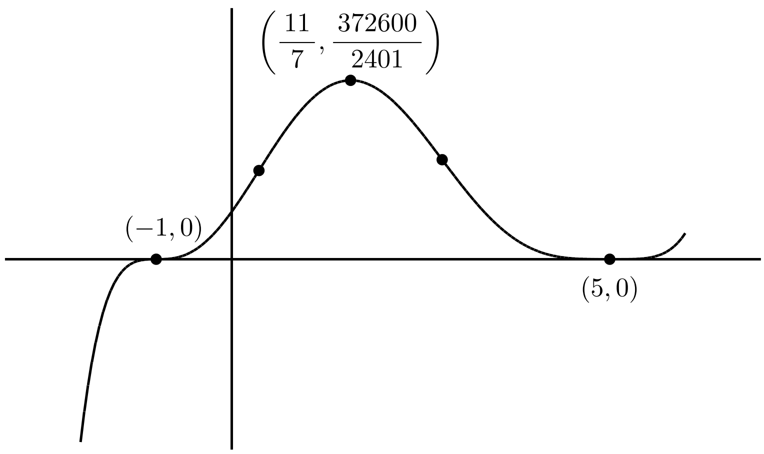
なので $y'=0$ を解いて $x=-1,\ 5,\ \dfrac{11}{7}$ を得る。

$$y'' = 6(x-5)^2(x+1)(7x^2-22x+7)$$

なので $y''=0$ を解いて $x=-1,\ 5,\ \dfrac{11+6\sqrt{2}}{7},\ \dfrac{11-6\sqrt{2}}{7}$ を得る。よって増減表は次の様になる。

x		-1		$\frac{11-6\sqrt{2}}{7}$		$\frac{11}{7}$		$\frac{11+6\sqrt{2}}{7}$		5	
y'	$+$	0	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$	0	$+$
y''	$-$	0	$+$	0	$-$	$-$	$-$	0	$+$	0	$+$
y	↗		↗		↗		↘		↘		↗

x 軸との交点は $y=0$ を解いて $x=-1, 5$ である。y 軸との交点は y に $x=0$ を代入して $(-5)^4=5^4$ である。以上を考慮してグラフの概形を描くと次のようになっている。



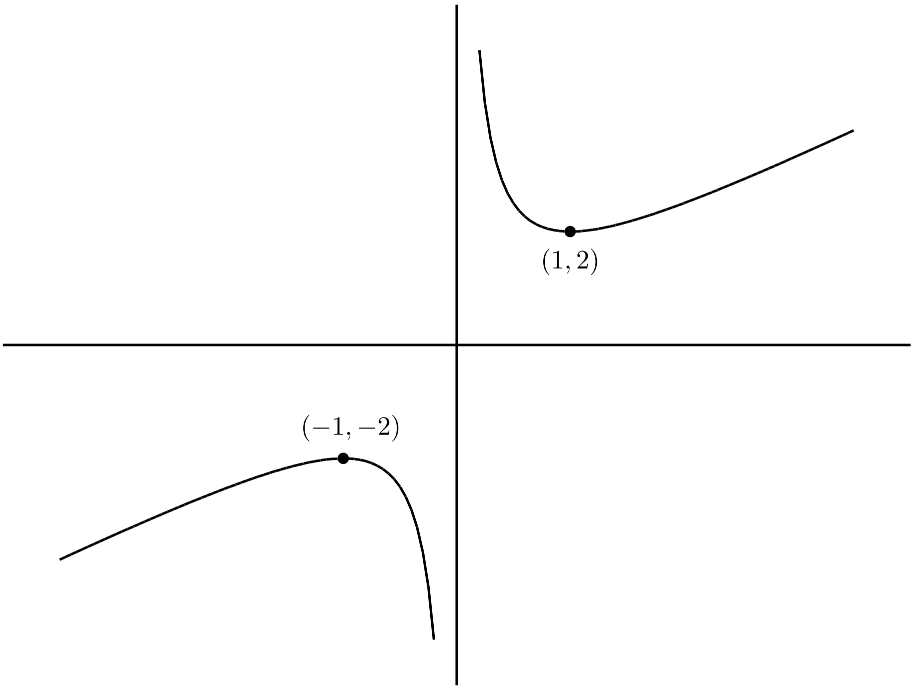
(2) $y'=1-\dfrac{1}{x^2}$ なので $y'=0$ を解いて $x=-1,\ 1$ を得る。$y''=\dfrac{2}{x^3}$ なので増減表は次の様になる。

x		-1		0		1	
y'	$+$	0	$-$	$\times$	$-$	0	$+$
y''	$-$	$-$	$-$	$\times$	$+$	$+$	$+$
y	↗		↘	$\times$	↘		↗

グラフは x 軸とも y 軸とも交わらない。

$$\lim_{x\to+0} y=\infty, \quad \lim_{x\to-0} y=-\infty, \quad \lim_{x\to\infty} y=\infty, \quad \lim_{x\to-\infty} y=-\infty$$

なのでグラフの概形は次図のようになる。



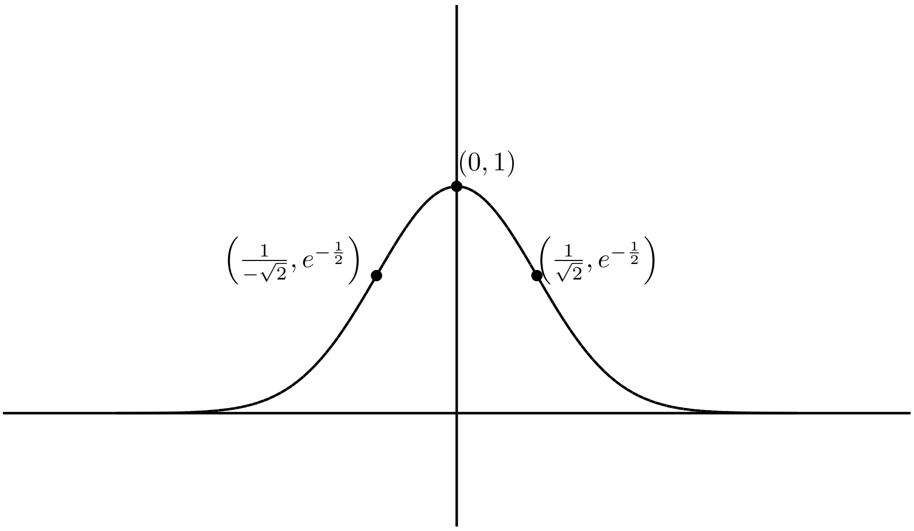
(3) $y' = -2xe^{-x^2}$ なので $y' = 0$ を解いて $x = 0$ を得る。$y'' = -2e^{-x^2} + 4x^2e^{-x^2}$ なので $y'' = 0$ を解いて $x = -\dfrac{1}{\sqrt{2}}$，$\dfrac{1}{\sqrt{2}}$ を得る。よって増減表は次の様になる。

x		$-\dfrac{1}{\sqrt{2}}$		0		$\dfrac{1}{\sqrt{2}}$	
y'	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$
y''	$+$	0	$-$	$-$	$-$	0	$+$
y	↗		↗		↘		↘

グラフは x 軸とは交わらない。y 軸との交点は $y = 1$ である。また

$$\lim_{x\to\infty} y = 0, \quad \lim_{x\to-\infty} y = 0$$

なのでグラフの概形は次図のようになる。



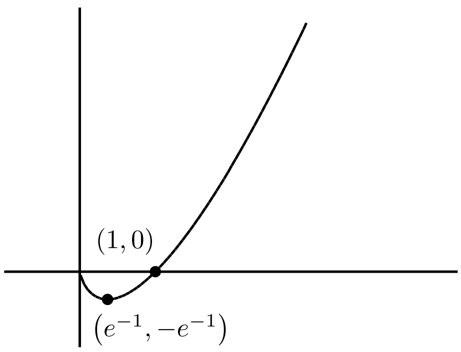
(4) $y' = \log x + 1$ なので $y' = 0$ を解いて $x = \dfrac{1}{e}$ を得る。$y'' = \dfrac{1}{x}$ なので $y'' = 0$ となる x は存在しない。よって増減表は次の様になる。

x	0		$\frac{1}{e}$	
y'	$\times$	$-$	0	$+$
y''	$\times$	$+$	$+$	$+$
y		↘		↗

x 軸との交点は $x = 1$ であり，y 軸とは交わらない。また $\displaystyle\lim_{x\to\infty} y = \infty$ である。この後学んだロピタルの定理を用いると

$$\begin{aligned}\lim_{x\to+0} x\log x &= \lim_{x\to+0} \frac{\log x}{\frac{1}{x}} = \lim_{x\to+0} \frac{\left(\log x\right)'}{\left(\frac{1}{x}\right)'} \\ &= \lim_{x\to+0} \frac{\frac{1}{x}}{-\frac{1}{x^2}} = -\lim_{x\to+0} x = 0\end{aligned}$$

が分かる。以上からグラフの概形は次のようになっている。



演習問題 5.29　次のようにパラメータ表示された曲線の概形を書け。

(1) $x = x(t) = t^4 - t^2, y = y(t) = t^3 - t$　　(2) $x = x(t) = t - t^3, y = y(t) = 1 - t^4$

(3) $x = x(t) = t^2 - t^3, y = y(t) = t - 2t^4$　　(4) $x = x(t) = t - t^3, y = y(t) = 1 - t^2 - t^4$

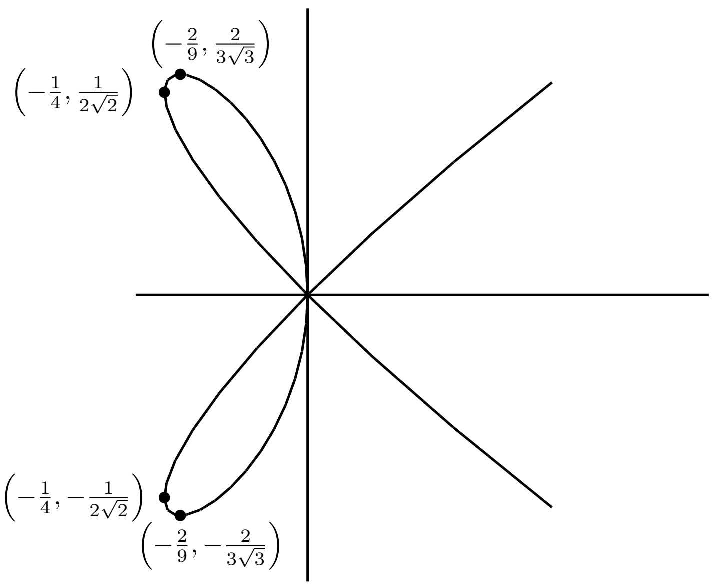
(1)　$x'(t) = 4t^3 - 2t$ なので $x'(t) = 0$ を解いて $t = 0, \mp\dfrac{1}{\sqrt{2}}$ を得る。$y'(t) = 3t^2 - 1$ なので $y'(t) = 0$ を解いて $t = \pm\dfrac{1}{\sqrt{3}}$ を得る。$x'(t), y'(t)$ の正負を調べるために，途中の値を代入して調べると増減表は以下の様になる。

t		$-\frac{1}{\sqrt{2}}$		$-\frac{1}{\sqrt{3}}$		0		$\frac{1}{\sqrt{3}}$		$\frac{1}{\sqrt{2}}$	
x'	$-$	0	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$	0	$+$
x	$\leftarrow$		$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		$\leftarrow$	$\leftarrow$	$\leftarrow$		$\rightarrow$
y'	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$	0	$+$	$+$	$+$
y	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$		$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
曲線	$\nwarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\searrow$	$\downarrow$	$\swarrow$	$\leftarrow$	$\nwarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$

$x'(t) = 0$ および $y'(t) = 0$ となる点は $\left(x\left(-\dfrac{1}{\sqrt{2}}\right), y\left(-\dfrac{1}{\sqrt{2}}\right)\right) = \left(-\dfrac{1}{4}, \dfrac{1}{2\sqrt{2}}\right)$, $\left(x\left(-\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right), y\left(-\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) = \left(-\dfrac{2}{9}, \dfrac{2}{3\sqrt{3}}\right)$，$(x(0), y(0)) = (0,0)$，$\left(x\left(\dfrac{1}{\sqrt{2}}\right), y\left(\dfrac{1}{\sqrt{2}}\right)\right) = \left(-\dfrac{1}{4}, -\dfrac{1}{2\sqrt{2}}\right)$，$\left(x\left(\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right), y\left(\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) = \left(-\dfrac{2}{9}, -\dfrac{2}{3\sqrt{3}}\right)$ である。

$x(t) = 0$ を解くと $t = 0, \pm 1$ を得る。$(x(0), y(0)) = (0,0)$，$(x(1), y(1)) = (0,0)$，$(x(-1), y(-1)) = (0,0)$ なので y 軸との交点は $(0,0)$ である。

$y(t) = 0$ を解くと $t = 0, \pm 1$ を得る。x 軸との交点は $(0,0)$ である。以上を考慮して曲線の概形を描くと次の様になる。



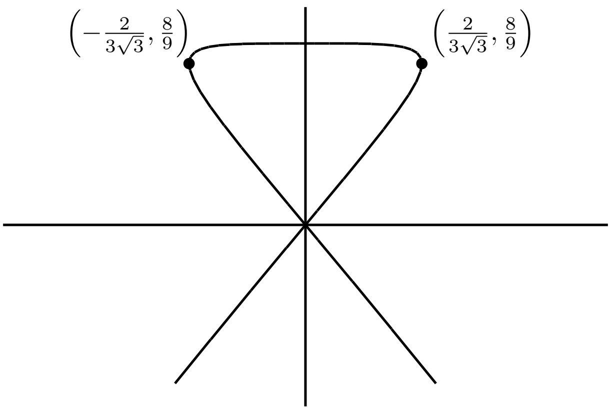
(2) $x'(t) = 1 - 3t^2$ なので $x'(t) = 0$ を解いて $t = \mp\dfrac{1}{\sqrt{3}}$ を得る。$y'(t) = -4t^3$ なので $y'(t) = 0$ を解いて $t = 0$ を得る。$x'(t), y'(t)$ の正負を調べるために，途中の値を代入して調べると増減表は以下の様になる。

t		$-\dfrac{1}{\sqrt{3}}$		0		$\dfrac{1}{\sqrt{3}}$	
x'	$-$	0	$+$	$+$	$+$	0	$-$
x	$\leftarrow$		$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		$\leftarrow$
y'	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$
y	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
曲線	$\nwarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\searrow$	$\downarrow$	$\swarrow$

$x'(t) = 0$ および $y'(t) = 0$ となる点は $\left(x\left(-\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right), y\left(-\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) = \left(-\dfrac{2}{3\sqrt{3}}, \dfrac{8}{9}\right)$，$(x(0), y(0)) = (0, 1)$，$\left(x\left(\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right), y\left(\dfrac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) = \left(\dfrac{2}{3\sqrt{3}}, \dfrac{8}{9}\right)$ である。

$x(t) = 0$ を解くと $t = 0, \pm 1$ を得る。$(x(0), y(0)) = (0, 1)$，$(x(1), y(1)) = (0, 0)$，$(x(-1), y(-1)) = (0, 0)$ なので y 軸との交点は $(0, 0), (0, 1)$ である。

$y(t) = 0$ を解くと $t = \pm 1$ を得る。x 軸との交点は $(0, 0)$ である。以上を考慮して曲線の概形を描くと次の様になる。



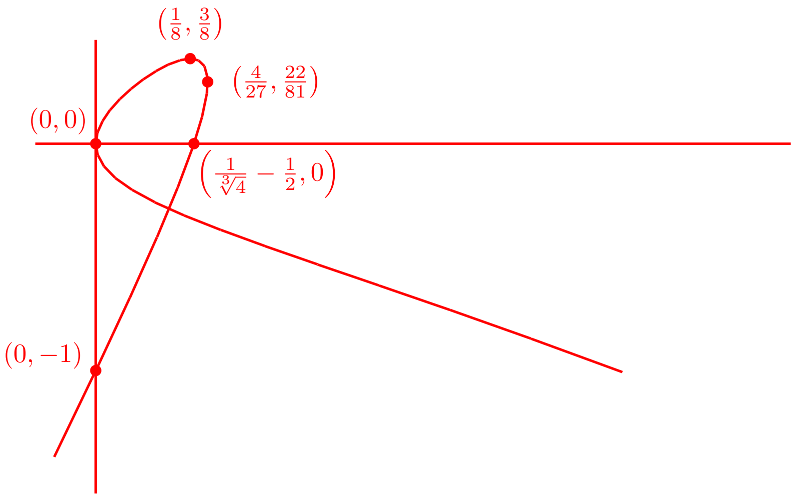
(3) $x'(t) = 2t - 3t^2$ なので $x'(t) = 0$ を解いて $t = 0.\dfrac{2}{3}$ を得る。$y'(t) = 1 - 8t^3$ なので $y'(t) = 0$ を解いて $t = \dfrac{1}{2}$ を得る。$x'(t), y'(t)$ の正負を調べるために，途中の値を代入して調べると増減表は以下の様になる。

t		0		$\dfrac{1}{2}$		$\dfrac{2}{3}$	
x'	$-$	0	$+$	$+$	$+$	0	$-$
x	$\leftarrow$		$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		$\leftarrow$
y'	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$
y	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
曲線	$\nwarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\searrow$	$\downarrow$	$\swarrow$

$x'(t)=0$ および $y'(t)=0$ となる点は $(x(0),y(0))=(0,0)$, $\left(x\left(\frac{1}{2}\right),y\left(\frac{1}{2}\right)\right)=\left(\frac{1}{8},\frac{3}{8}\right)$, $\left(x\left(\frac{2}{3}\right),y\left(\frac{2}{3}\right)\right)=\left(\frac{4}{27},\frac{22}{81}\right)$, である。

$x(t)=0$ を解くと $t=0,1$ を得る。$(x(0),y(0))=(0,0)$, $(x(1),y(1))=(0,-1)$ なので y 軸との交点は $(0,0),(0,-1)$ である。

$y(t)=0$ を解くと $t=0,\frac{1}{\sqrt[3]{2}}$ を得る。x 軸との交点は $(0,0)$, $\left(\frac{1}{\sqrt[3]{4}}-\frac{1}{2},0\right)$ である。以上を考慮して曲線の概形を描くと次の様になる。



(4) $x'(t)=1-3t^2$ なので $x'(t)=0$ を解いて $t=\mp\frac{1}{\sqrt{3}}$ を得る。$y'(t)=-2t-4t^3$ なので $y'(t)=0$ を解いて $t=0$ を得る。$x'(t),y'(t)$ の正負を調べるために，途中の値を代入して調べると増減表は以下の様になる。

t		$-\frac{1}{\sqrt{3}}$		0		$\frac{1}{\sqrt{3}}$	
x'	$-$	0	$+$	$+$	$+$	0	$-$
x	$\leftarrow$		$\rightarrow$	$\rightarrow$	$\rightarrow$		$\leftarrow$
y'	$+$	$+$	$+$	0	$-$	$-$	$-$
y	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$		$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
曲線	$\nwarrow$	$\uparrow$	$\nearrow$	$\rightarrow$	$\searrow$	$\downarrow$	$\swarrow$

$x'(t)=0$ および $y'(t)=0$ となる点は $\left(x\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right),y\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right)=\left(-\frac{2}{3\sqrt{3}},\frac{5}{9}\right)$, $(x(0),y(0))=(0,1)$, $\left(x\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right),y\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right)=\left(\frac{2}{3\sqrt{3}},\frac{5}{9}\right)$ である。

$x(t)=0$ を解くと $t=0,\pm1$ を得る。$(x(0),y(0))=(0,1)$, $(x(1),y(1))=(0,-1)$, $(x(-1),y(-1))=(0,-1)$ なので y 軸との交点は $(0,0),(0,-1)$ である。

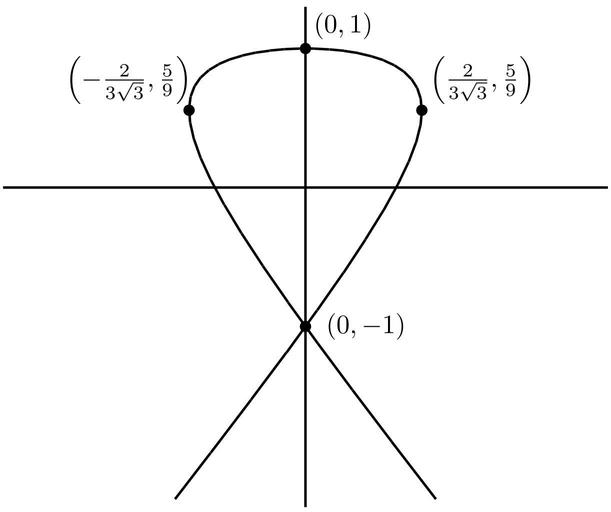
$y(t)=0$ を解くと $t=\pm\sqrt{\frac{-1+\sqrt{5}}{2}}$ を得る。x 軸との交点は $\left(\frac{3-\sqrt{5}}{2}\sqrt{\frac{-1+\sqrt{5}}{2}},0\right)$, $\left(-\frac{3-\sqrt{5}}{2}\sqrt{\frac{-1+\sqrt{5}}{2}},0\right)$ である。概形なので $\frac{3-\sqrt{5}}{2}\sqrt{\frac{-1+\sqrt{5}}{2}}$ の値もおおよそ分かればよ

い。$2 < \sqrt{5} < \dfrac{5}{2}$ から $1 < -1+\sqrt{5} < \dfrac{3}{2}$，$\dfrac{1}{2} < \dfrac{-1+\sqrt{5}}{2} < \dfrac{3}{4}$ と変形して $\dfrac{1}{\sqrt{2}} < \sqrt{\dfrac{-1+\sqrt{5}}{2}} < \dfrac{\sqrt{3}}{2}$ を得る。同様に $\dfrac{1}{4} < \dfrac{3-\sqrt{5}}{2} < \dfrac{1}{2}$ を得るので，

$$0.18 \fallingdotseq \frac{1}{4\sqrt{2}} < \frac{3-\sqrt{5}}{2}\sqrt{\frac{-1+\sqrt{5}}{2}} < \frac{\sqrt{3}}{4} \fallingdotseq 0.43$$

が分かる。$2.1 < \sqrt{5} < 2.3$ から始めると $0.2711 < \dfrac{3-\sqrt{5}}{2}\sqrt{\dfrac{-1+\sqrt{5}}{2}} < 0.322$ ともう少し正確な値の範囲が分かるが，概形なのでここまで近似を良くしなくてもいいかもしれない。

以上を考慮して曲線の概形を描くと次の様になる。



演習問題 5.30　以下の極限値を求めよ。

(1) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\frac{\sin x - x\cos x}{x^3}$　(2) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\frac{e^x - e^{-x}}{\log(1+x)}$　(3) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\frac{\log\cos(\alpha x)}{\log\cos(\beta x)}$

(4) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\frac{a^x - b^x}{x}$　$(a, b > 0)$　(5) $\displaystyle\lim_{x\to\infty}\frac{x^5}{e^x}$　(6) $\displaystyle\lim_{x\to\infty}\frac{\log(1+3^x)}{x}$

(7) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{x\tan x}\right)$　(8) $\displaystyle\lim_{x\to 0} x\log x$　(9) $\displaystyle\lim_{x\to\infty} x\sin\frac{1}{x}$

(10) $\displaystyle\lim_{x\to +0} x^x$　(11) $\displaystyle\lim_{x\to +0} x^{\frac{1}{x}}$　(12) $\displaystyle\lim_{x\to 0}\left(\frac{a^x + b^x}{2}\right)^{\frac{1}{x}}$

(1)

$$\begin{aligned}
\lim_{x\to 0}\frac{\sin x - x\cos x}{x^3} &= \lim_{x\to 0}\frac{\left(\sin x - x\cos x\right)'}{\left(x^3\right)'} \\
&= \lim_{x\to 0}\frac{\cos x - \cos x + x\sin x}{3x^2} \\
&= \frac{1}{3}\lim_{x\to 0}\frac{\sin x}{x} = \frac{1}{3}
\end{aligned}$$

(2)

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{e^x-e^{-x}}{\log(1+x)} &= \lim_{x\to 0}\frac{\left(e^x-e^{-x}\right)'}{\left(\log(1+x)\right)'}\\ &= \lim_{x\to 0}\frac{e^x+e^{-x}}{\dfrac{1}{1+x}}\\ &= \lim_{x\to 0}(1+x)(e^x+e^{-x}) = 2\end{aligned}$$

(3)

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\frac{\log\cos(\alpha x)}{\log\cos(\beta x)} &= \lim_{x\to 0}\frac{\left(\log\cos(\alpha x)\right)'}{\left(\log\cos(\beta x)\right)'}\\ &= \lim_{x\to 0}\frac{\dfrac{1}{\cos(\alpha x)}\cdot\left(-\sin(\alpha x)\right)\cdot\alpha}{\dfrac{1}{\cos(\beta x)}\cdot\left(-\sin(\beta x)\right)\cdot\beta}\\ &= \frac{\alpha}{\beta}\lim_{x\to 0}\frac{\cos(\beta x)}{\cos(\alpha x)}\cdot\frac{\sin(\alpha x)}{\sin(\beta x)}\\ &= \frac{\alpha}{\beta}\lim_{x\to 0}\frac{\cos(\beta x)}{\cos(\alpha x)}\cdot\frac{\sin(\alpha x)}{\alpha x}\frac{\beta x}{\sin(\beta x)}\frac{\alpha}{\beta}\\ &= \frac{\alpha^2}{\beta^2}\end{aligned}$$

(4)

$$\lim_{x\to 0}\frac{a^x-b^x}{x} = \lim_{x\to 0}\frac{\left(a^x-b^x\right)'}{x'} = \lim_{x\to 0}\left(\log a\cdot a^x-\log b\cdot b^x\right) = \log a-\log b$$

(5)

$$\begin{aligned}\lim_{x\to\infty}\frac{x^5}{e^x} &= \lim_{x\to\infty}\frac{\left(x^5\right)'}{\left(e^x\right)'} = \lim_{x\to\infty}\frac{5x^4}{e^x} = 5\lim_{x\to\infty}\frac{\left(x^4\right)'}{\left(e^x\right)'} = 5\lim_{x\to\infty}\frac{4x^3}{e^x}\\ &= 20\lim_{x\to\infty}\frac{\left(x^3\right)'}{\left(e^x\right)'} = 20\lim_{x\to\infty}\frac{3x^2}{e^x} = 60\lim_{x\to\infty}\frac{\left(x^2\right)'}{\left(e^x\right)'} = 60\lim_{x\to\infty}\frac{2x}{e^x}\\ &= 120\lim_{x\to\infty}\frac{\left(x\right)'}{\left(e^x\right)'} = 120\lim_{x\to\infty}\frac{1}{e^x} = 0\end{aligned}$$

(6)

$$\begin{aligned}\lim_{x\to\infty}\frac{\log(1+3^x)}{x} &= \lim_{x\to\infty}\frac{\left(\log(1+3^x)\right)'}{x'} = \lim_{x\to\infty}\frac{1}{1+3^x}\log 3\cdot 3^x\\ &= \log 3\lim_{x\to\infty}\frac{3^x}{1+3^x} = \log 3\lim_{x\to\infty}\frac{1}{\dfrac{1}{3^x}+1}\\ &= \log 3\end{aligned}$$

(7)

$$\frac{1}{x^2}-\frac{1}{x\tan x}=\frac{1}{x^2}-\frac{\cos x}{x\sin x}=\frac{\sin x-x\cos x}{x^2\sin x}=\frac{\sin x-x\cos x}{x^3}\cdot\frac{x}{\sin x}$$

となるので (1) の結果を用いる。

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\left(\frac{1}{x^2}-\frac{1}{x\tan x}\right)&=\lim_{x\to 0}\frac{\sin x-x\cos x}{x^3}\cdot\frac{x}{\sin x}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{\sin x-x\cos x}{x^3}\cdot\lim_{x\to 0}\frac{x}{\sin x}\\&=\frac{1}{3}\end{aligned}$$

(8)

$$\lim_{x\to +0}x\log x=\lim_{x\to +0}\frac{\log x}{\frac{1}{x}}=\lim_{x\to +0}\frac{\left(\log x\right)'}{\left(\frac{1}{x}\right)'}=\lim_{x\to +0}\frac{\frac{1}{x}}{-\frac{1}{x^2}}=-\lim_{x\to +0}x=0$$

(9) $t=\dfrac{1}{x}$ とおくと $x\to\infty$ のとき $t\to +0$ である。

$$\lim_{x\to\infty}x\sin\frac{1}{x}=\lim_{t\to +0}\frac{1}{t}\sin t=\lim_{t\to +0}\frac{\sin t}{t}=1$$

(10) $y=x^x$ に対し $\log y=x\log x$ である。

$$\lim_{x\to +0}\log y=\lim_{x\to +0}x\log x=0$$

が成立している。ここで (8) の結果を用いた。$\log x$ は単射であり，連続関数なので

$$\log 1=0=\lim_{x\to +0}\log y=\log\left(\lim_{x\to +0}y\right)$$

より $\displaystyle\lim_{x\to +0}y=1$ となる。

(11) $0<a<b$ かつ $X>0$ に対し $a^X<b^X$ が成立する。x が 0 に近づくとき $x<\dfrac{1}{2}$ としてよい。$0<x<\dfrac{1}{2}$ かつ $\dfrac{1}{x}>0$ なので $0<x^{\frac{1}{x}}<\left(\dfrac{1}{2}\right)^{\frac{1}{x}}$ となる。$x\to +0$ のとき $\dfrac{1}{x}\to\infty$ なので $0\leqq\displaystyle\lim_{x\to +0}x^{\frac{1}{x}}\leqq\lim_{x\to +0}\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{x}}=0$ なので $\displaystyle\lim_{x\to +0}x^{\frac{1}{x}}=0$ である。

(12) $y=\left(\dfrac{a^x+b^x}{2}\right)^{\frac{1}{x}}$ なので $\log y=\log\left(\dfrac{a^x+b^x}{2}\right)^{\frac{1}{x}}=\dfrac{1}{x}\log\left(\dfrac{a^x+b^x}{2}\right)$ となる。

$$\begin{aligned}\lim_{x\to 0}\log y&=\lim_{x\to 0}\frac{\log\left(\frac{a^x+b^x}{2}\right)}{x}=\lim_{x\to 0}\frac{\left(\log\left(\frac{a^x+b^x}{2}\right)\right)'}{x'}\\&=\lim_{x\to 0}\frac{1}{\frac{a^x+b^x}{2}}\left(\frac{a^x\log a+b^x\log b}{2}\right)=\lim_{x\to 0}\frac{a^x\log a+b^x\log b}{a^x+b^x}\\&=\frac{\log a+\log b}{2}=\frac{1}{2}\log ab=\log(ab)^{\frac{1}{2}}=\log\sqrt{ab}\end{aligned}$$

が成立する。log は連続なので $\log\left(\lim_{x\to 0} y\right) = \log\sqrt{ab}$ を得る。また log は単射なので $\lim_{x\to 0} y = \sqrt{ab}$ となる。

　即ち

$$\lim_{x\to 0}\left(\frac{a^x + b^x}{2}\right)^{\frac{1}{x}} = \sqrt{ab}$$

となる。