～わかりやすい可視化で学ぶ～

3D Gaussian Splatting入門とエンターテインメントへの応用

CEDEC+KYUSHU 2026

株式会社ポリフォニー・デジタル・張 子楊


HONDA
CB750F
MOTUL
DUNLOP


HONDA



撮影した写真

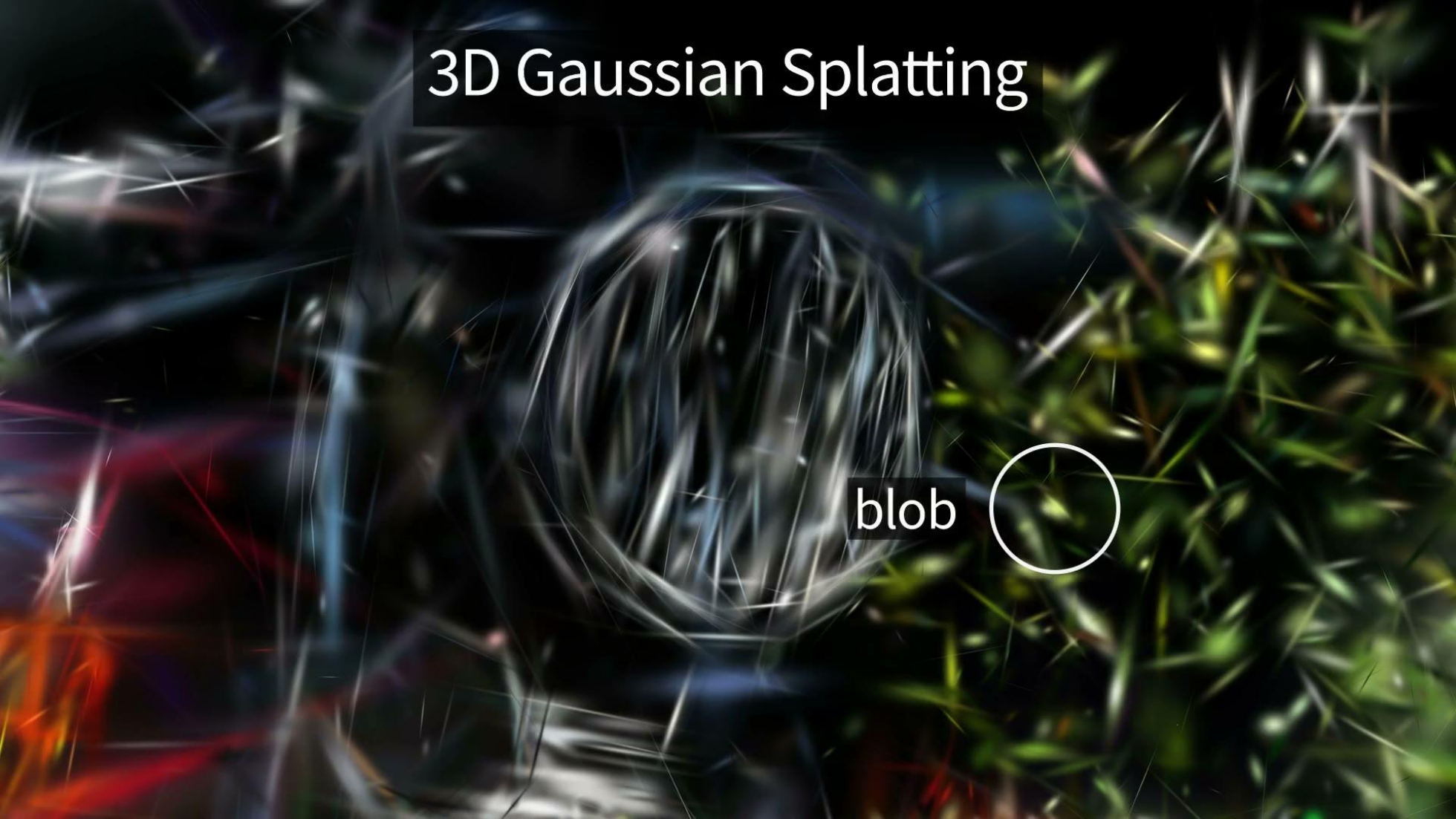


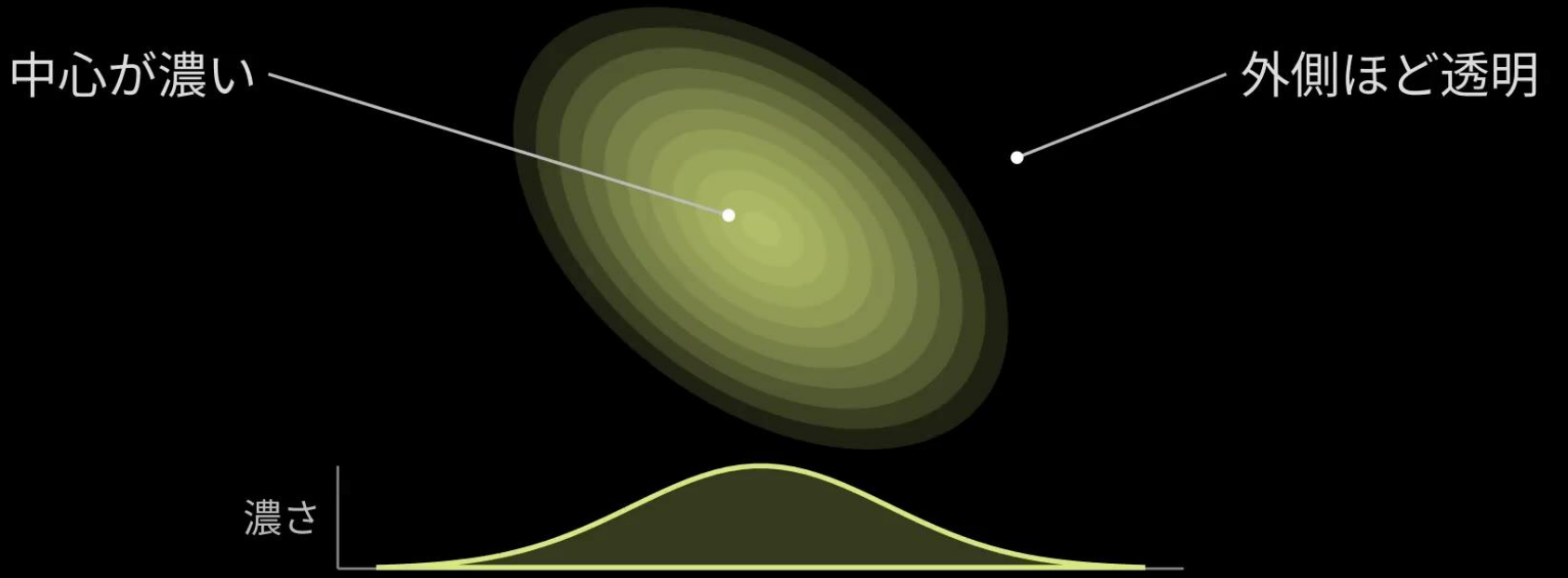









3D Gaussian Splatting
blob



はっきりした輪郭がない



blob の山がどのように画像になるのか



blob の山がどのように画像になるのか

その blob をどのように作るのか



blob の山がどのように画像になるのか

その blob をどのように作るのか

そしてどのように応用するのか

描画
Rendering

学習
Training

応用
Applications

①



blob の形
The shape of a blob

描画
Rendering

学習
Training

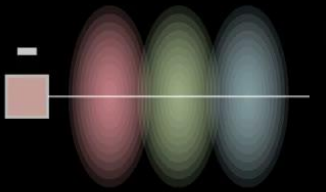
応用
Applications

① Σ



blob の形
The shape of a blob

② α, T



1ピクセルの色
The color of one pixel

描画
Rendering

学習
Training

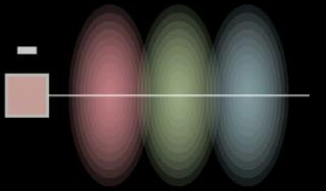
応用
Applications

① Σ



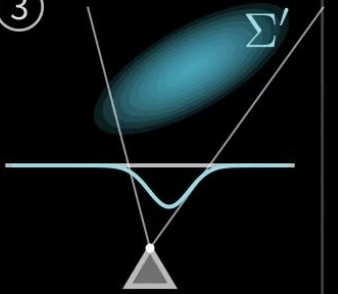
blob の形
The shape of a blob

② α, T



1ピクセルの色
The color of one pixel

③ Σ'



スクリーンへの投影
Projection onto the screen

描画
Rendering

学習
Training

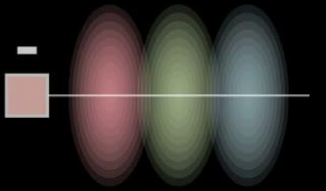
応用
Applications

① Σ



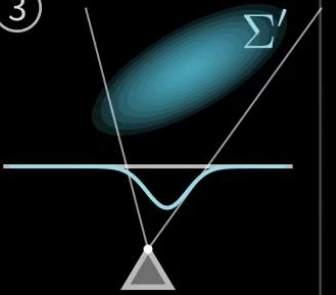
blob の形
The shape of a blob

② α, T



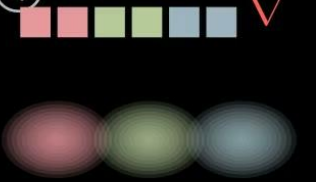
1ピクセルの色
The color of one pixel

③ Σ'

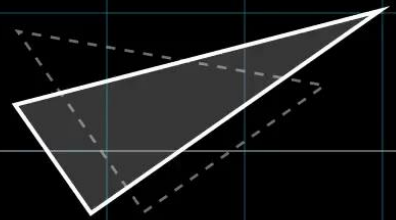


スクリーンへの投影
Projection onto the screen

④ ∇

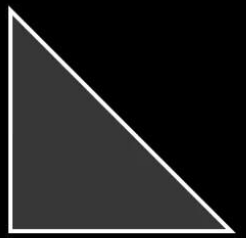


blob を学習する
Learning the blobs



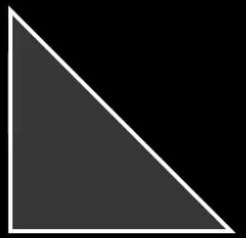
スケール

Scale



三角形



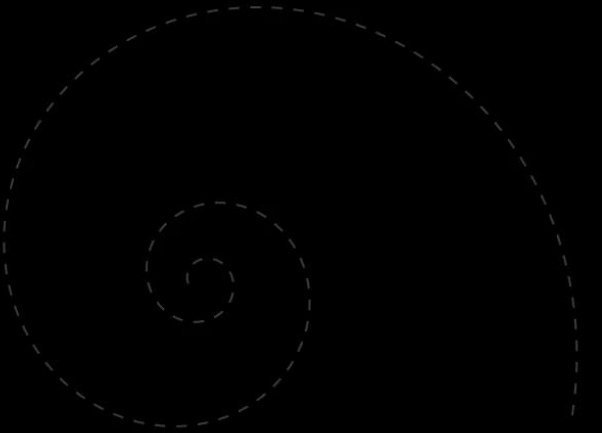


三角形





blob





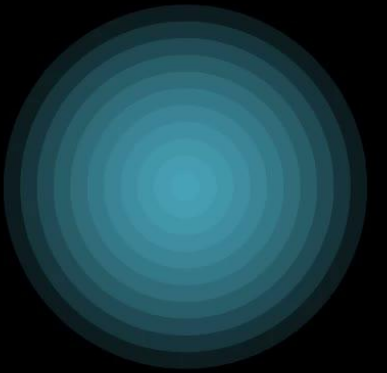
blob



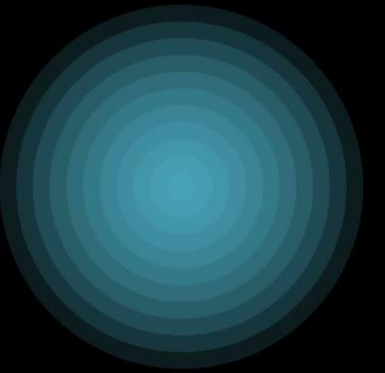


blob

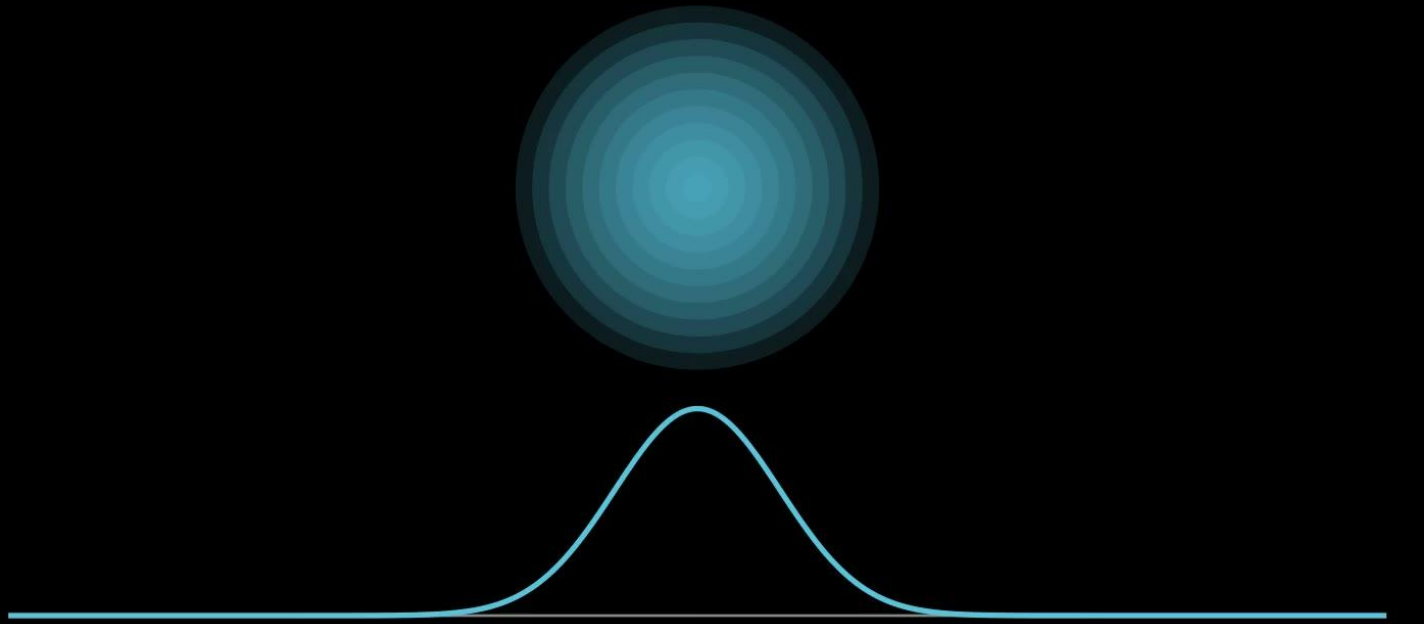




blob の正体：2D ガウス分布

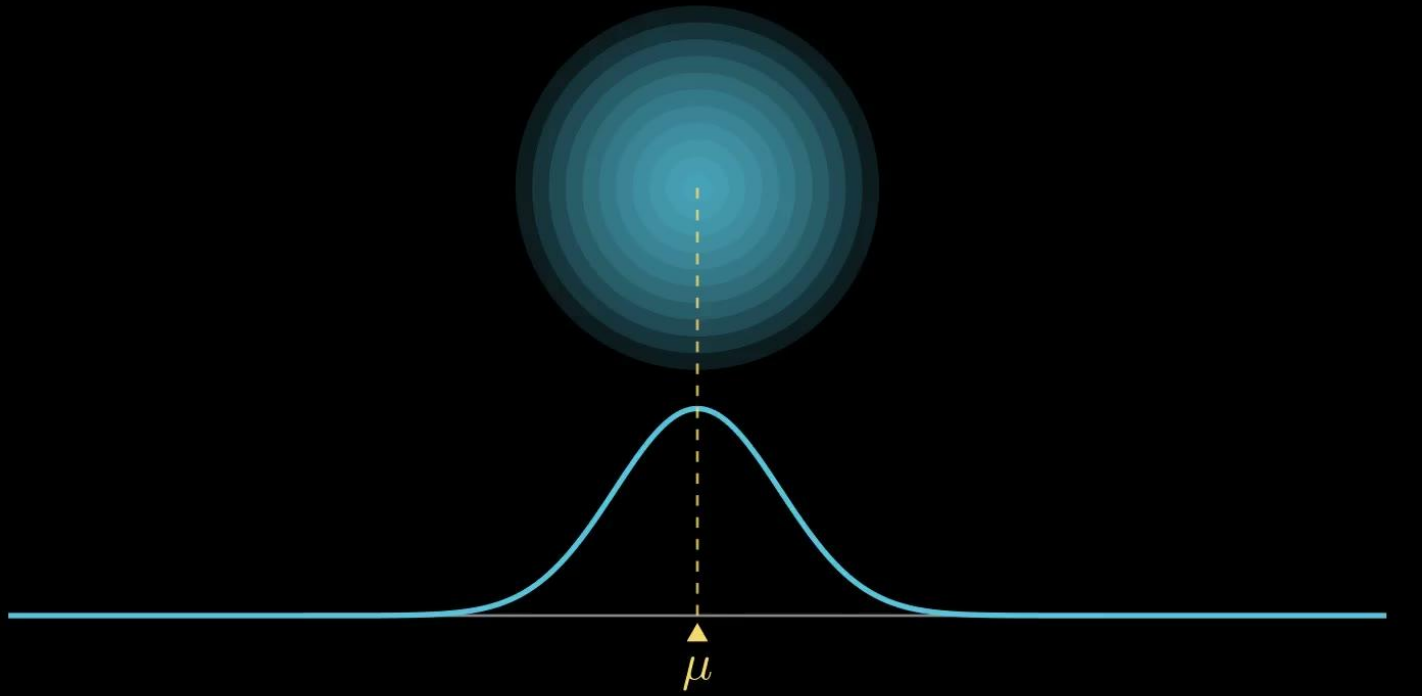


$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$



$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

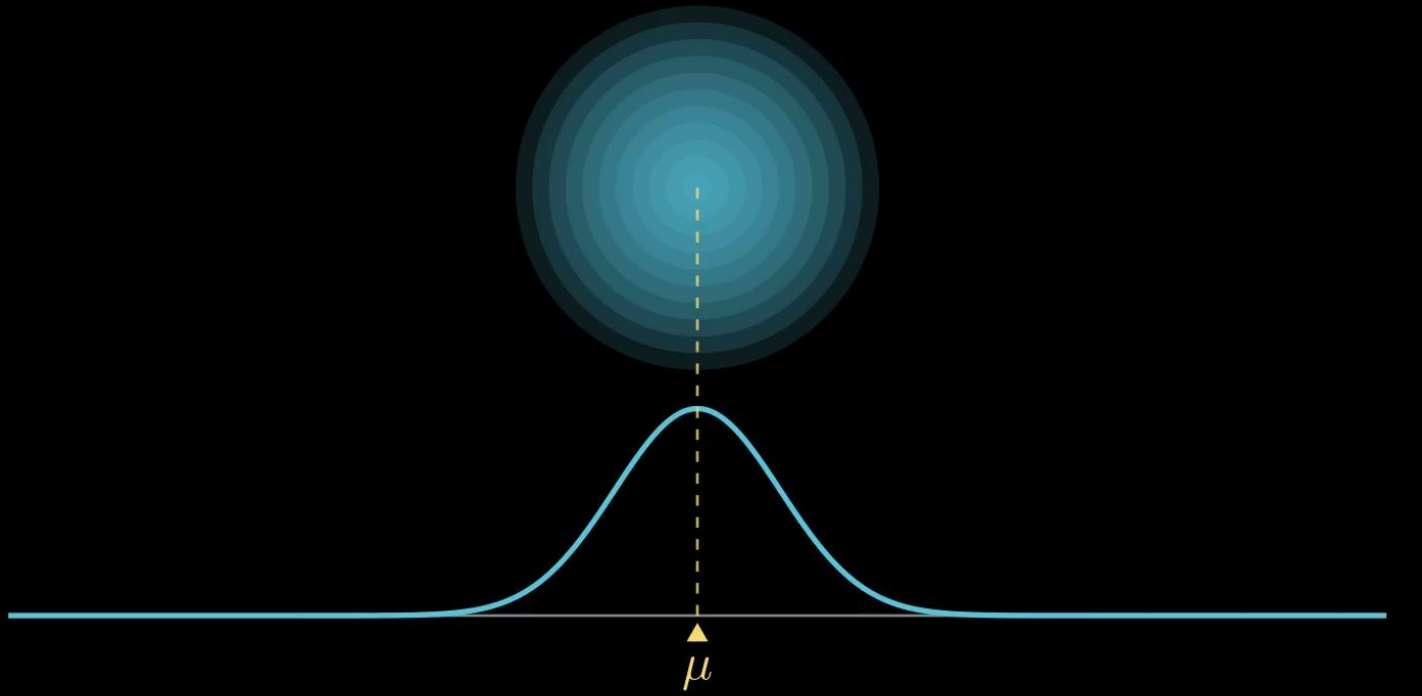
$\mu = +0.00$



μ（平均）が位置を決める

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$\mu = +0.00$

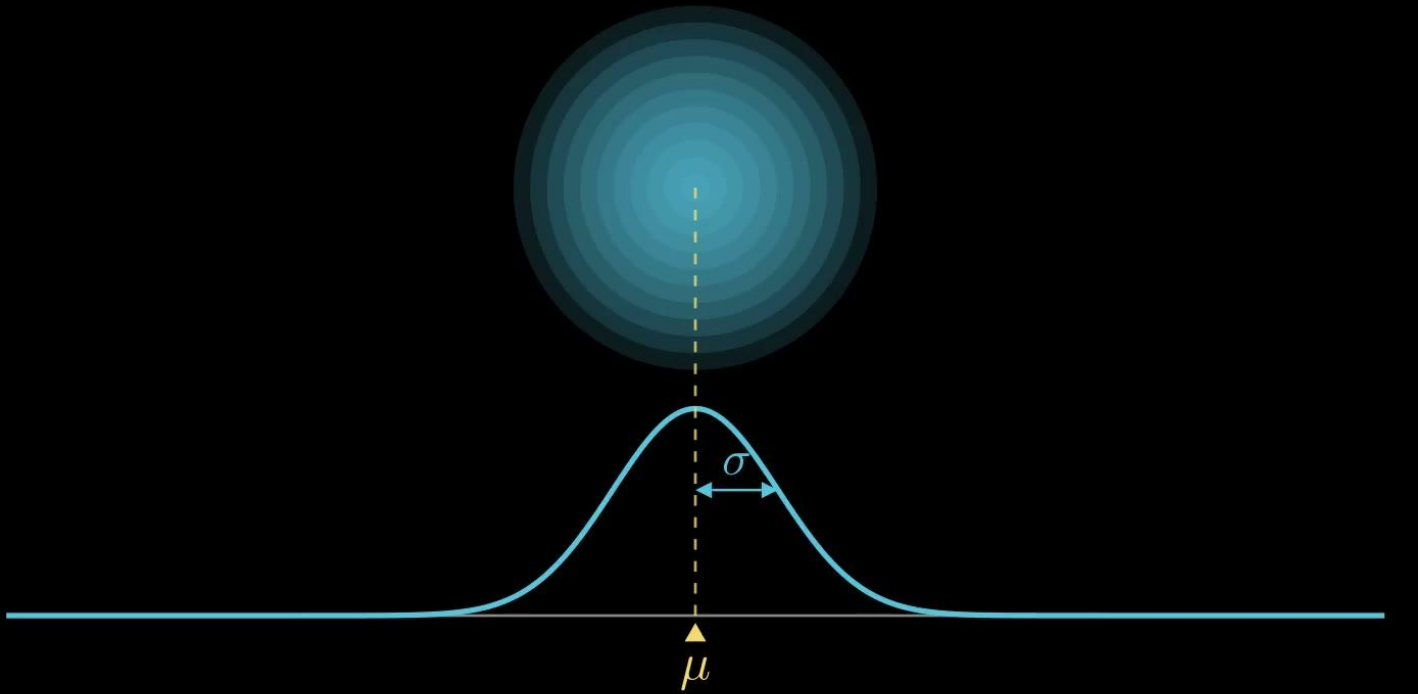


μ（平均）が位置を決める

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$\mu = +0.00$

$\sigma = 0.60$

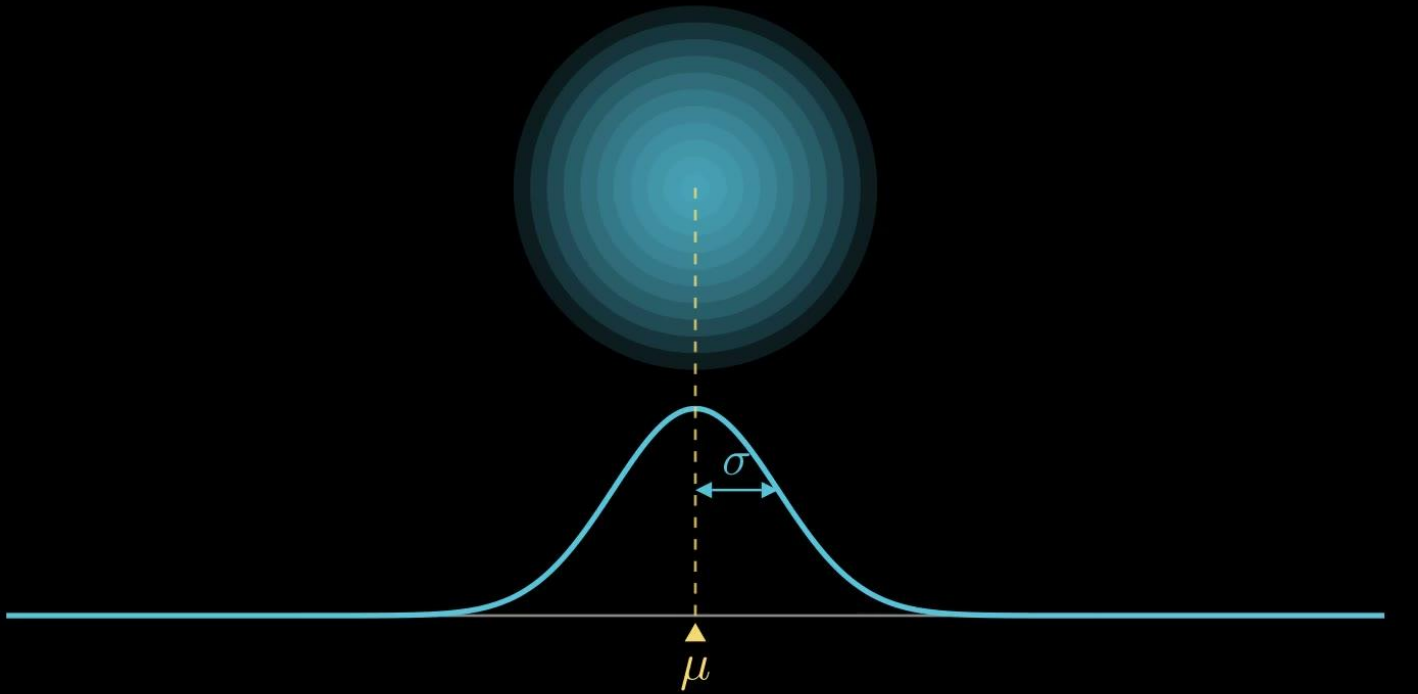


σ²（分散）が 広がりを決める

$$G(x) = \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$\mu = +0.00$

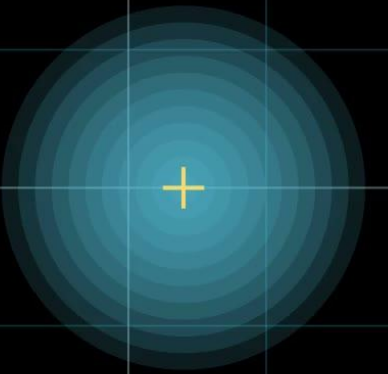
$\sigma = 0.60$



σ²（分散）が 広がりを決める

$$G(p) = \exp\left(-\frac{1}{2}(p-\mu)^\top \Sigma^{-1}(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$



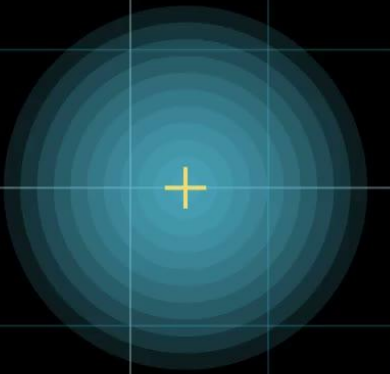
$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.36 & 0.00 \\ 0.00 & 0.36 \end{bmatrix}$$

2D では：μ はベクトル、Σ は 2×2 の行列

$$G(p) = \exp\left(-\tfrac{1}{2}\,(p-\mu)^{\top}\,\Sigma^{-1}\,(p-\mu)\right)$$

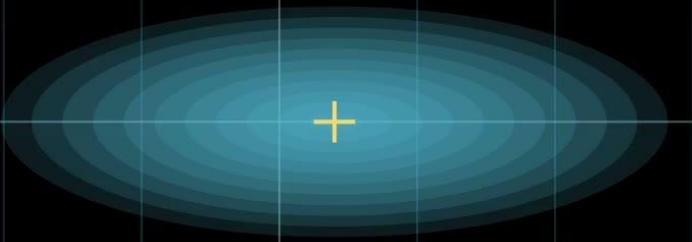
$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \boxed{0.36} & 0.00 \\ 0.00 & \boxed{0.36} \end{bmatrix}$$



$$G(p) = \exp\left(-\frac{1}{2}(p-\mu)^\top \Sigma^{-1}(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$



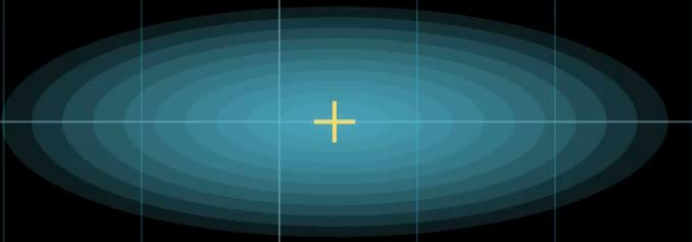
$$\Sigma = \begin{bmatrix} \boxed{1.21} & 0.00 \\ 0.00 & \boxed{0.14} \end{bmatrix}$$

対角成分：軸ごとの伸び縮み

$$G(p) = \exp\left(-\tfrac{1}{2}\,(p-\mu)^{\top}\,\Sigma^{-1}\,(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

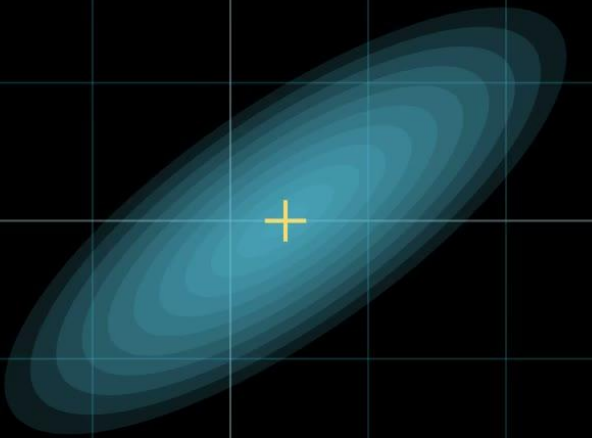
$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1.21 & 0.00 \\ 0.00 & 0.14 \end{bmatrix}$$



$$G(p) = \exp\left(-\frac{1}{2}(p-\mu)^\top \Sigma^{-1}(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.50 \\ 0.50 & 0.49 \end{bmatrix}$$

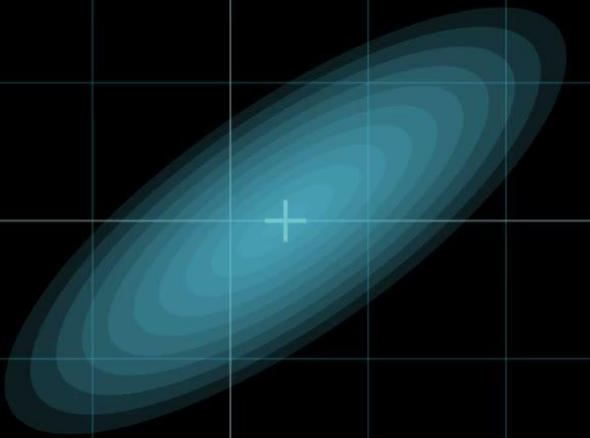


非対角成分は傾きに関わる

$$G(p) = \exp\left(-\frac{1}{2}(p-\mu)^\top \Sigma^{-1}(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

移動
Translate



$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.50 \\ 0.50 & 0.49 \end{bmatrix}$$

回転 Rotate + スケール Scale

blob = 位置 μ + 形 Σ

$$G(p) = \exp\left(-\frac{1}{2}(p-\mu)^\top \Sigma^{-1}(p-\mu)\right)$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.40 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.83 \\ 0.83 & 0.49 \end{bmatrix}$$



Σ に自由に値を入れると壊れる

$$S = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

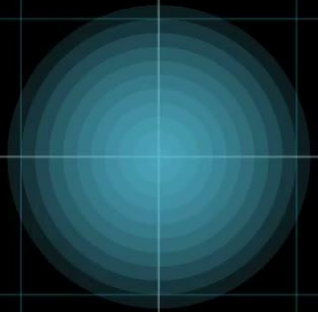
スケール
Scale

回転 $\theta = 0°$
Rotate

移動
Translate

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.00 \\ 0.00 & 0.25 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{bmatrix}$$



S・R・Tで位置と形を操作

$$S = \begin{bmatrix} 1.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

スケール
Scale

回転 $\theta = 0°$
Rotate

移動
Translate

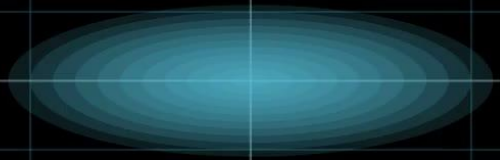
$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.64 & 0.00 \\ 0.00 & 0.06 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma \leftarrow S\Sigma S^{\top}$$

$$0.25 \times 1.6^2 = 0.64$$

$$0.25 \times 0.5^2 = 0.06$$



$$S = \begin{bmatrix} 1.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

スケール
Scale

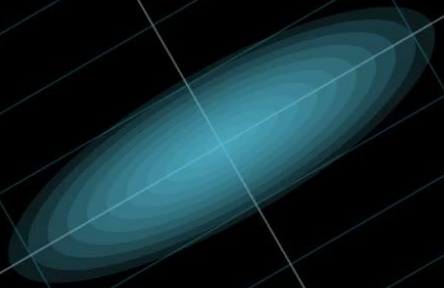
回転 $\theta = 30°$
Rotate

移動
Translate

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.25 \\ 0.25 & 0.21 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 1.00 \end{bmatrix}$$

$$\Sigma \leftarrow R\Sigma R^{\top}$$



$$S = \begin{bmatrix} 1.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 1.60 \\ 0.00 & 1.00 & 0.60 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

スケール
Scale

回転 $\theta = 30°$
Rotate

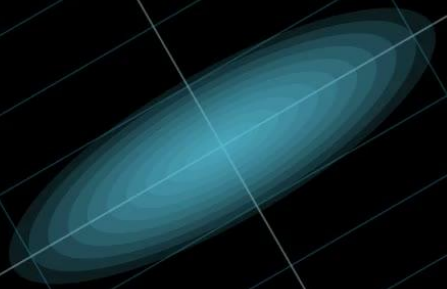
移動
Translate

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.25 \\ 0.25 & 0.21 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 1.60 \\ 0.60 \\ 1.00 \end{bmatrix}$$

$$\mu \leftarrow T\mu$$

Σ は変わらない



$$S = \begin{bmatrix} 1.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 1.60 \\ 0.00 & 1.00 & 0.60 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

スケール
Scale

回転 $\theta = 30°$
Rotate

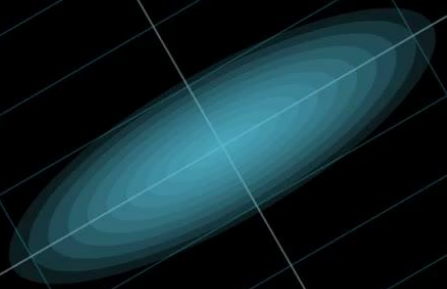
移動
Translate

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.25 \\ 0.25 & 0.21 \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 1.60 \\ 0.60 \\ 1.00 \end{bmatrix}$$

$$M = TRS$$

右から順に適用する



```
struct Gaussian {
    float3 position;   // μ 移動
    float3 scale;      // S スケール
    float4 rotation;   // R 回転（quaternion）
    ...                // 不透明度・色 → 次の章
};
```

Σ はそのまま保存しない：描画のたびに $\Sigma = RSS^\top R^\top$ で作る

$$S = \begin{bmatrix} 0.02 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.01 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix} \rightarrow R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow T = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.00 & 1.12 \\ 0.00 & 1.00 & 0.14 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

スケール
Scale

回転
Rotate

$\theta = -71°$

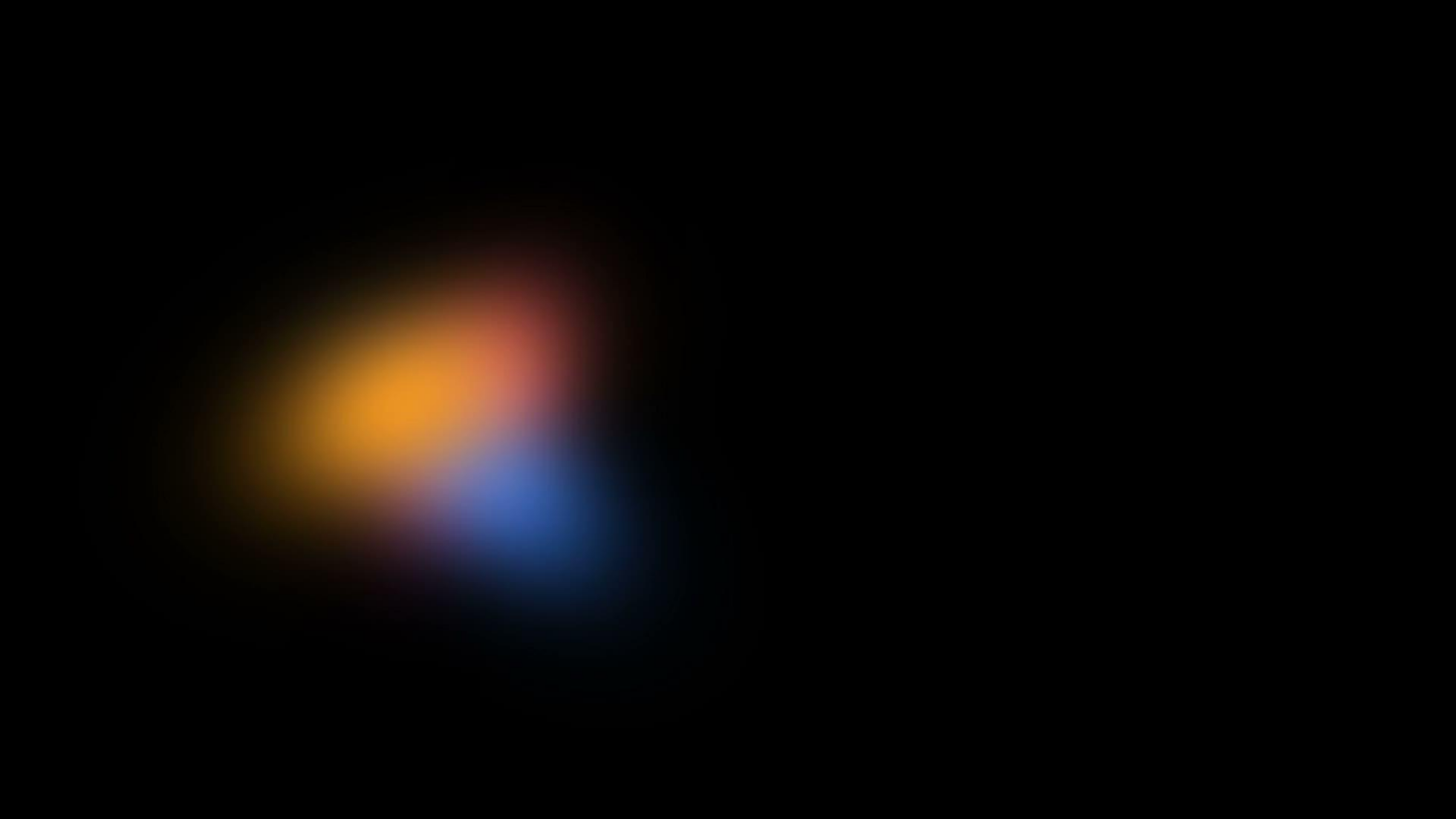
移動
Translate

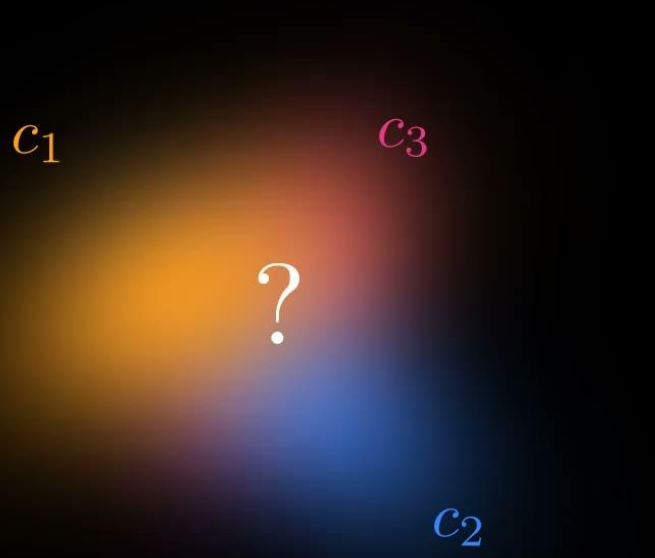


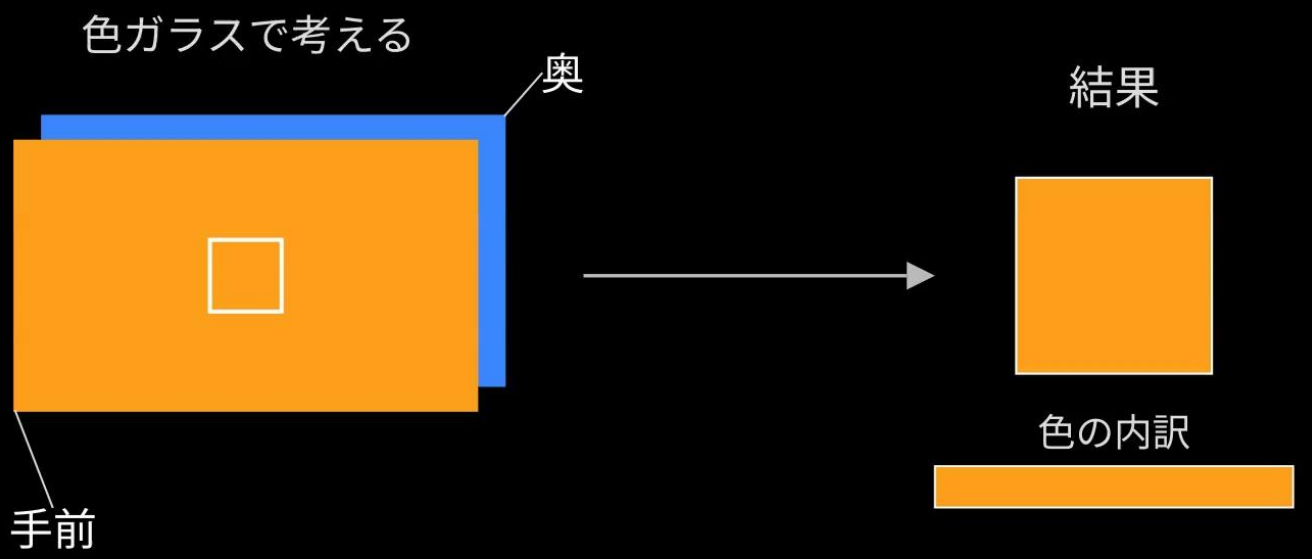
blob



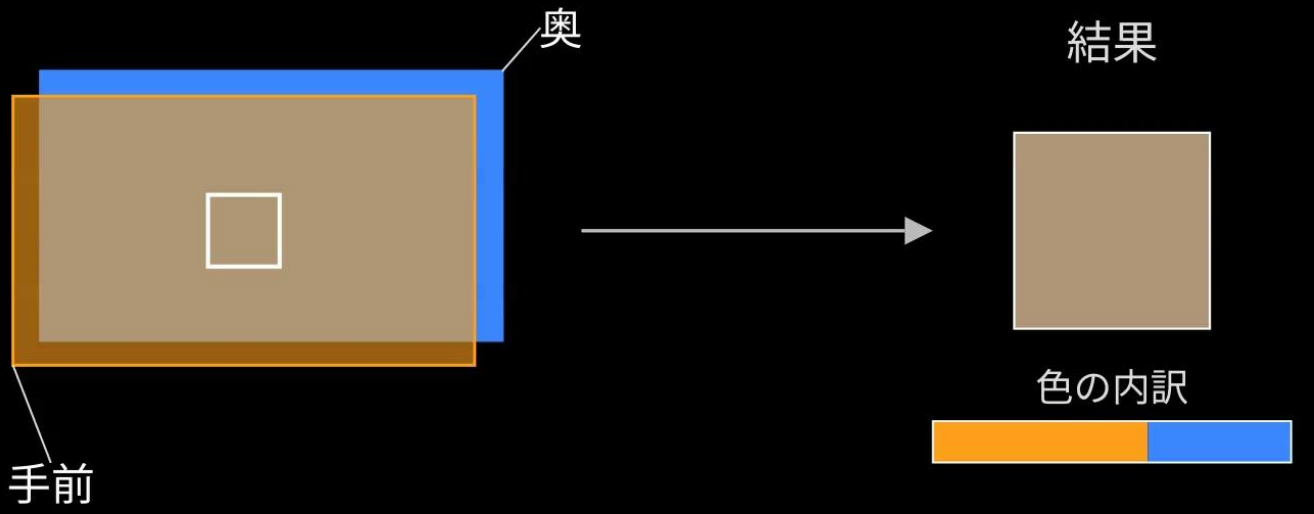




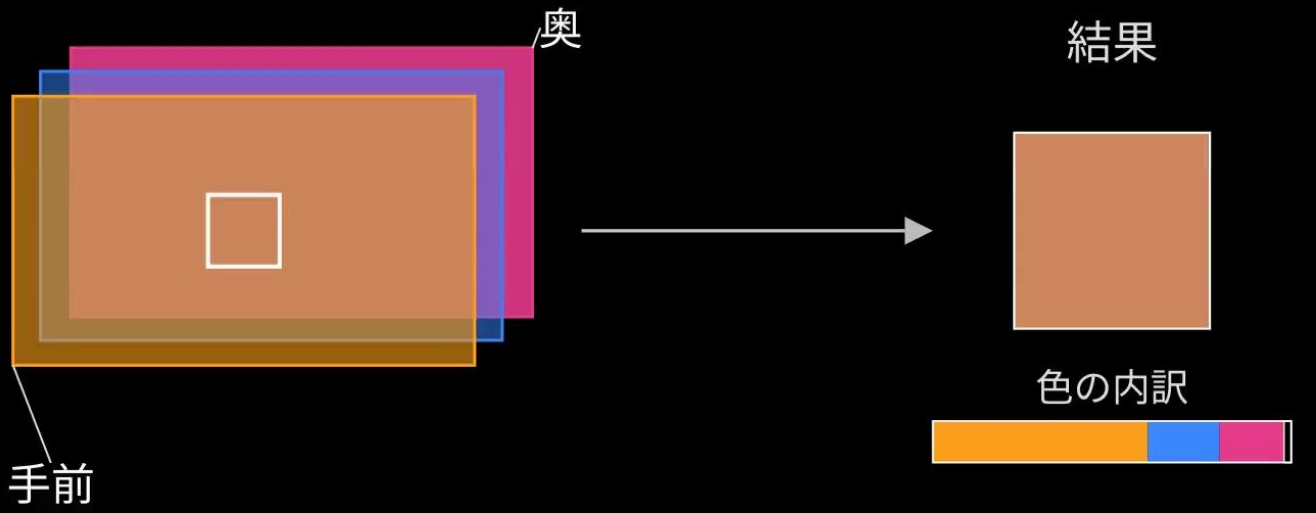

c_1
c_3
?
c_2


色ガラスで考える
奥
手前
結果
色の内訳

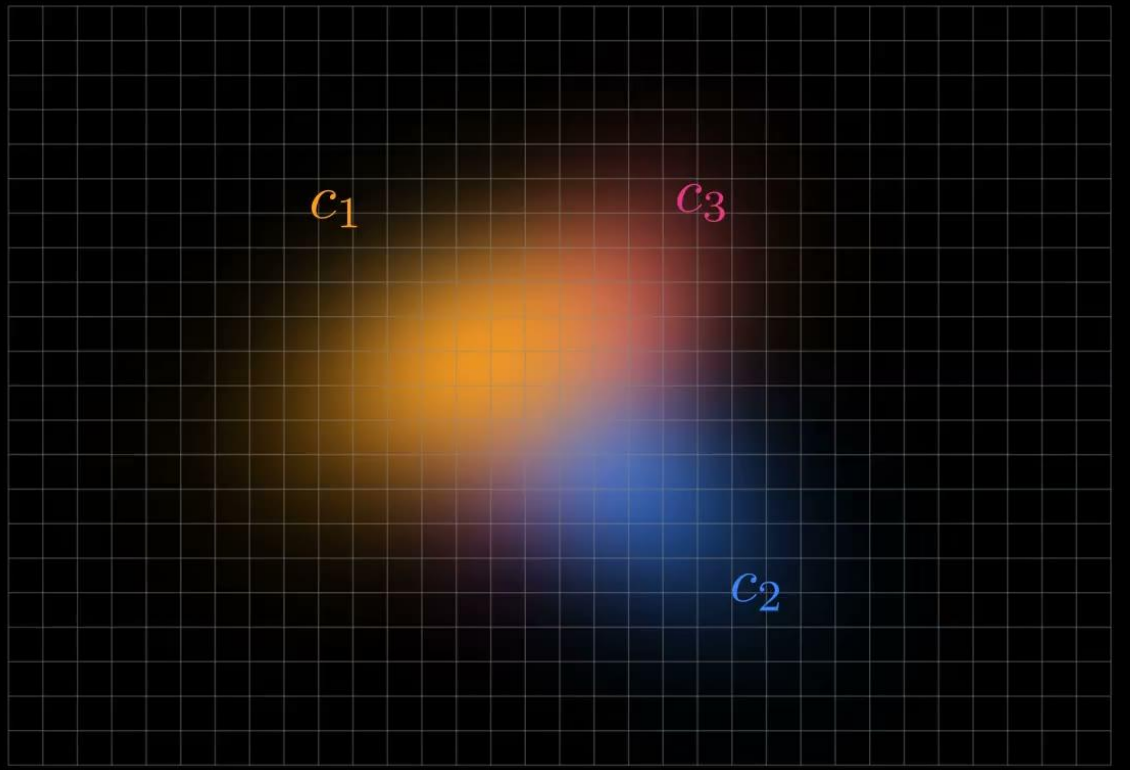
$\alpha \rightarrow$ 不透明度

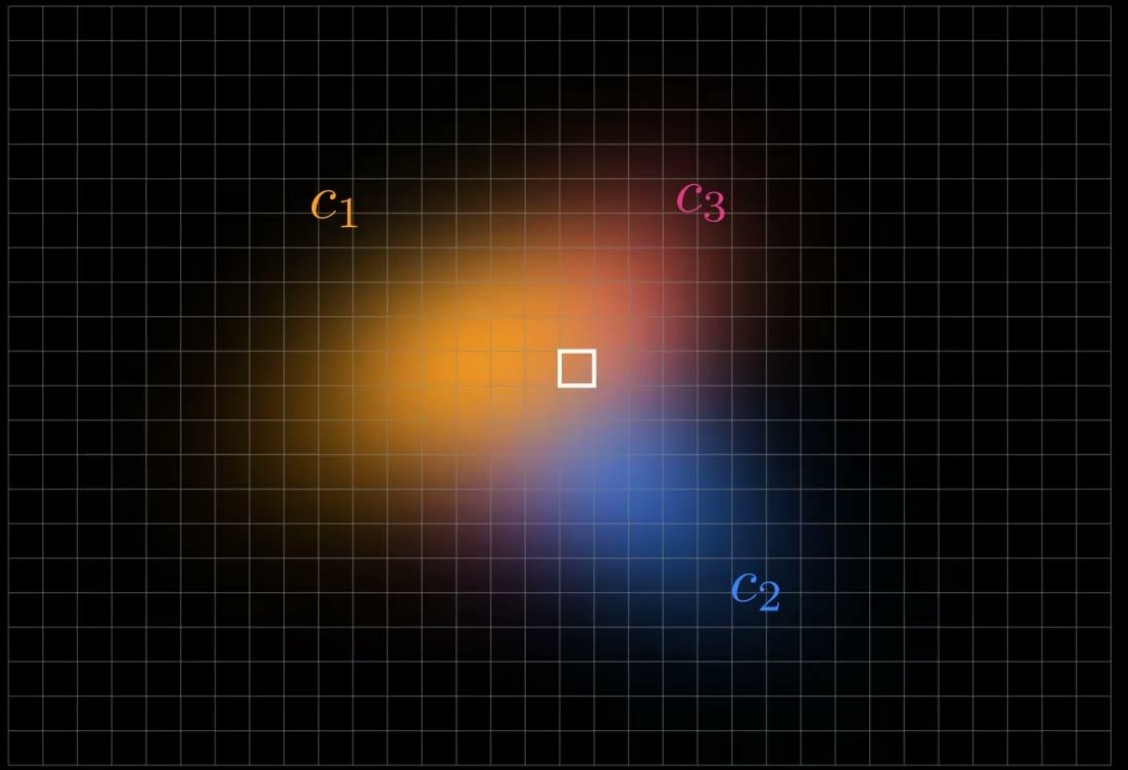


$\alpha \rightarrow$ 不透明度

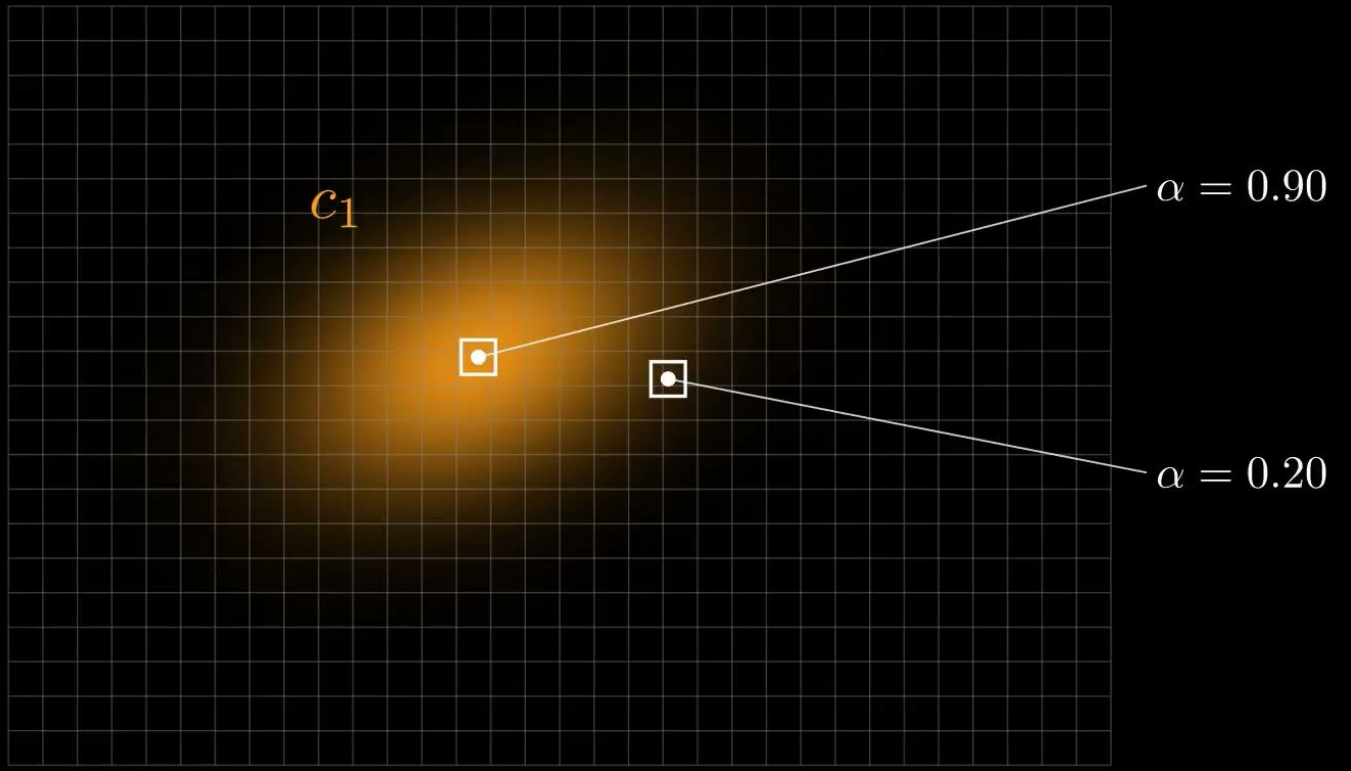


遮蔽されなかった分だけ、奥の色を合成

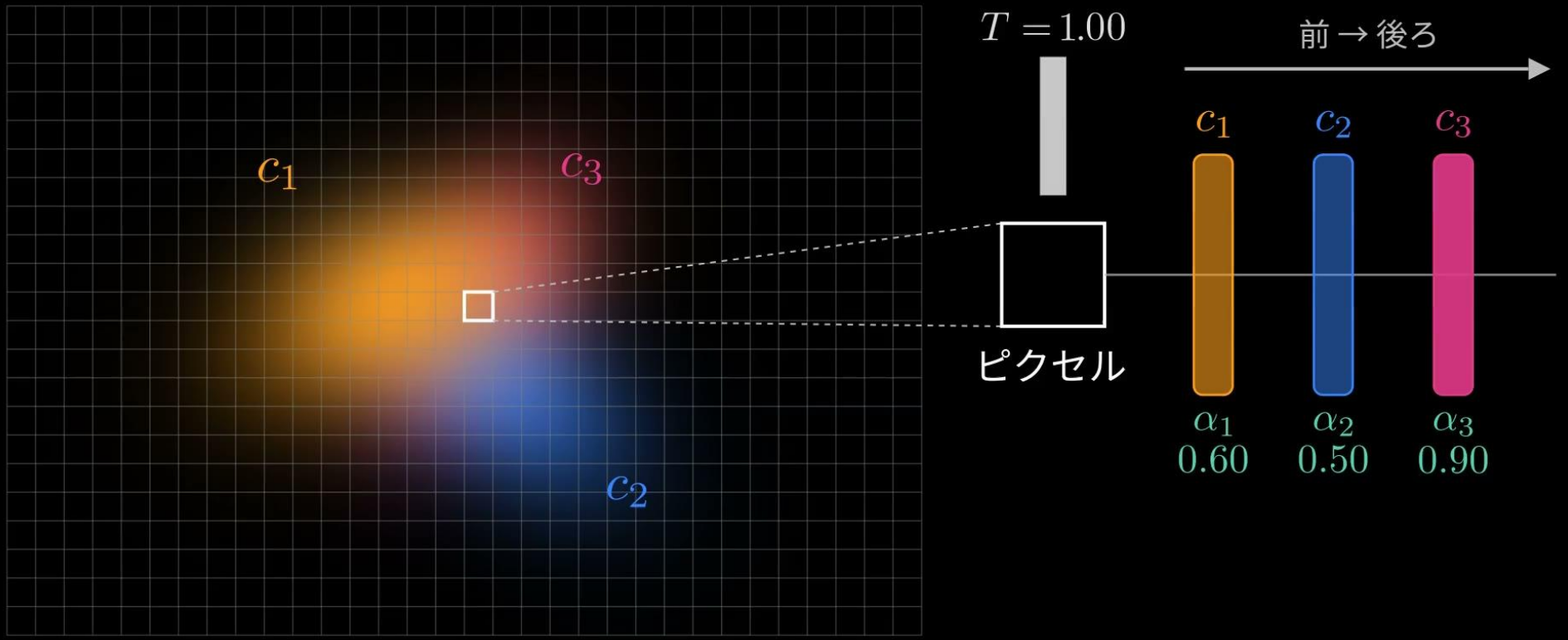

c_1
c_3
c_2



ピクセル

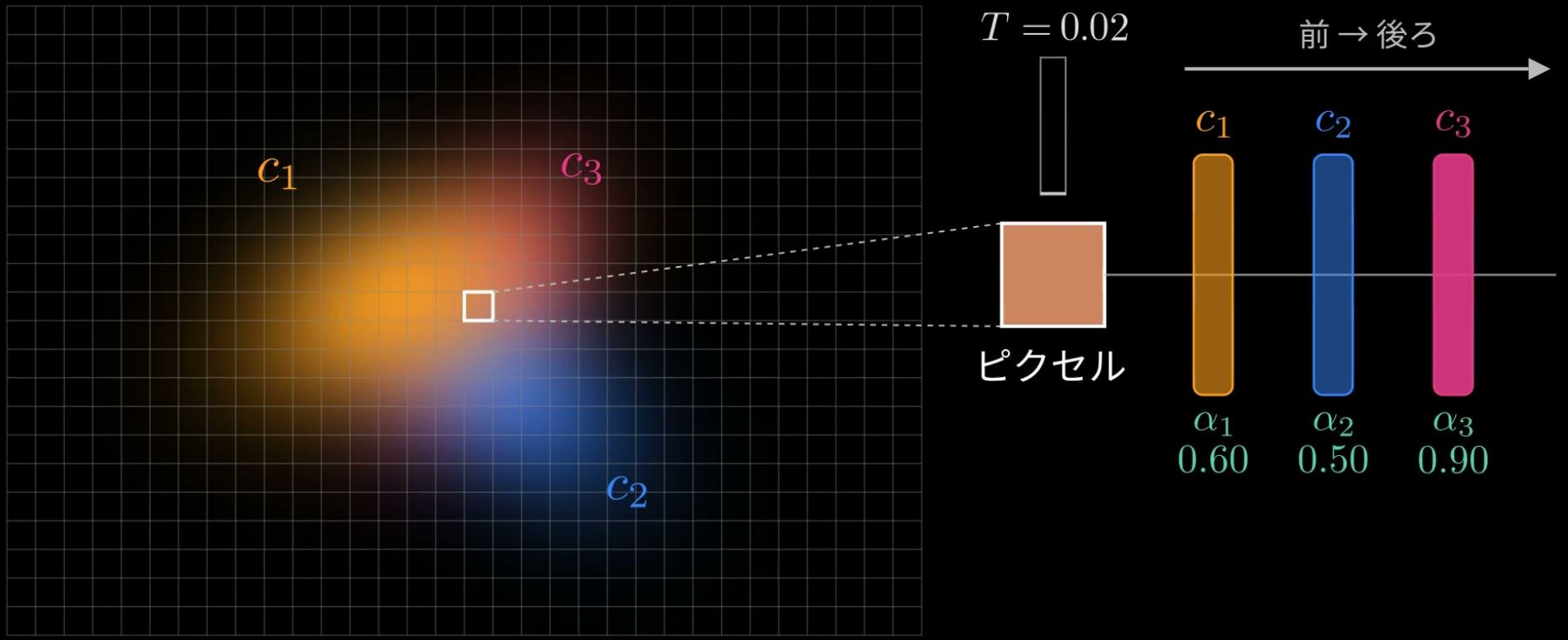


中心に近いほど α は大きく、外側ほど小さくなります



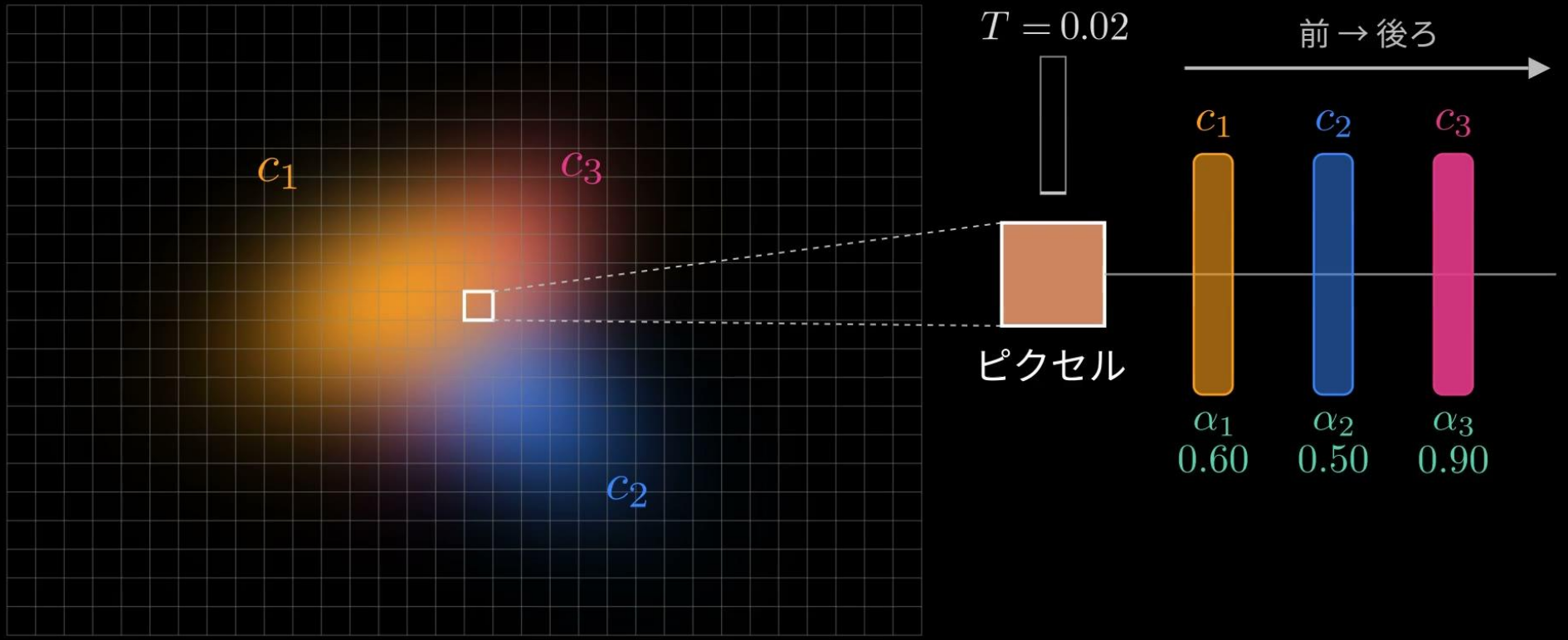
前から順に：残った光の分だけ、次の blob が色をつける

$$C = 0.60 \cdot \blacksquare + 0.40 \cdot 0.50 \cdot \blacksquare + 0.20 \cdot 0.90 \cdot \blacksquare$$

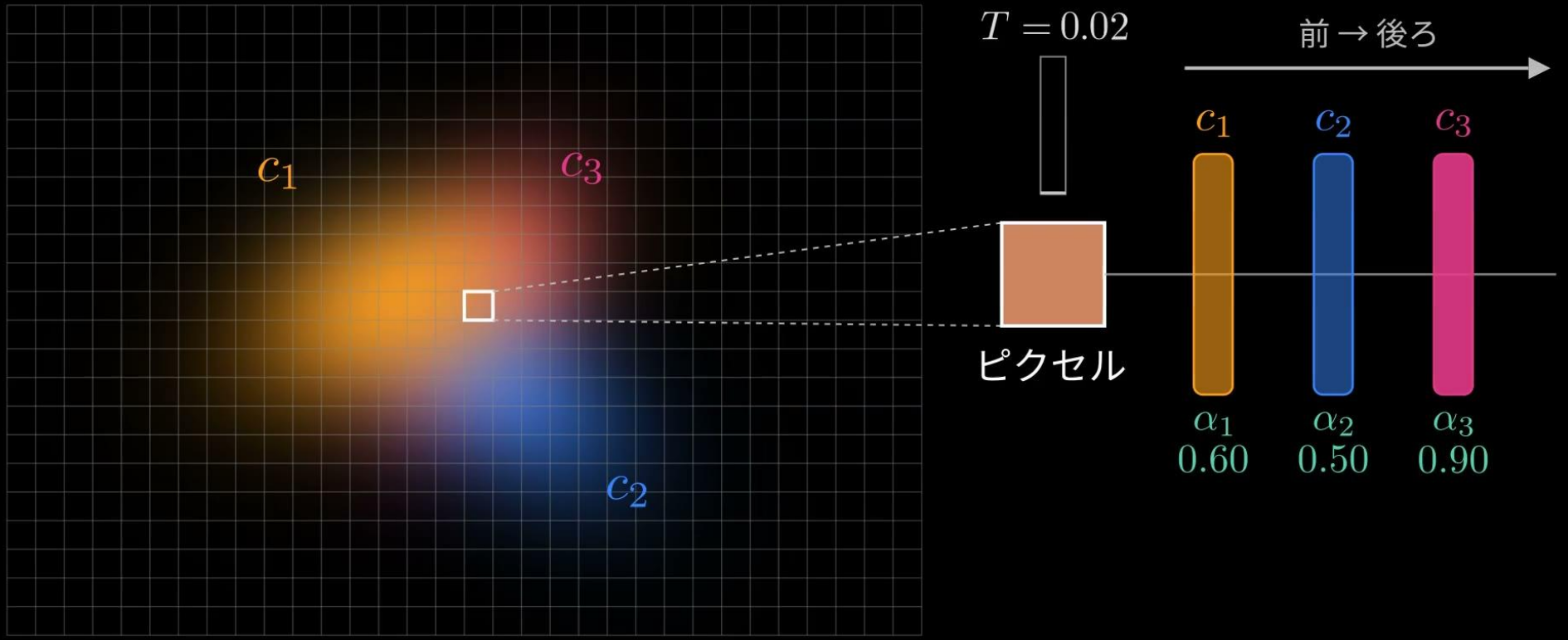


前から順に：残った光の分だけ、次の blob が色をつける

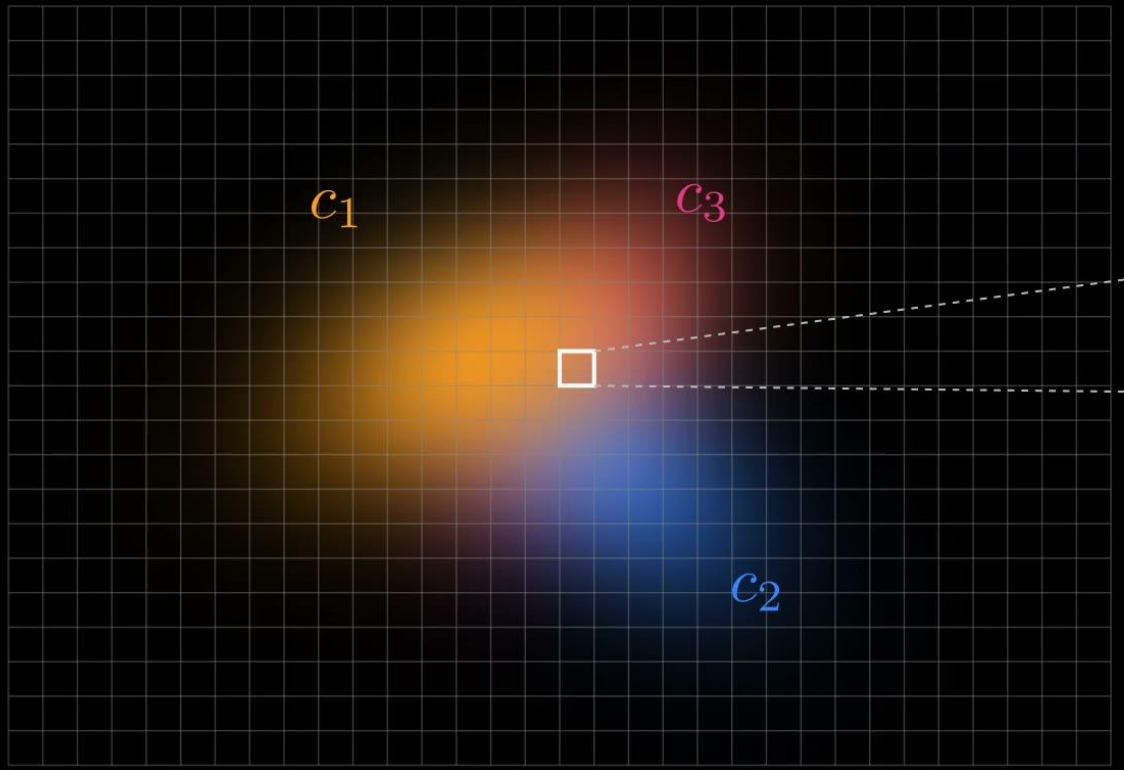
$$C = 0.60\,c_1 + 0.40 \cdot 0.50\,c_2 + 0.20 \cdot 0.90\,c_3$$

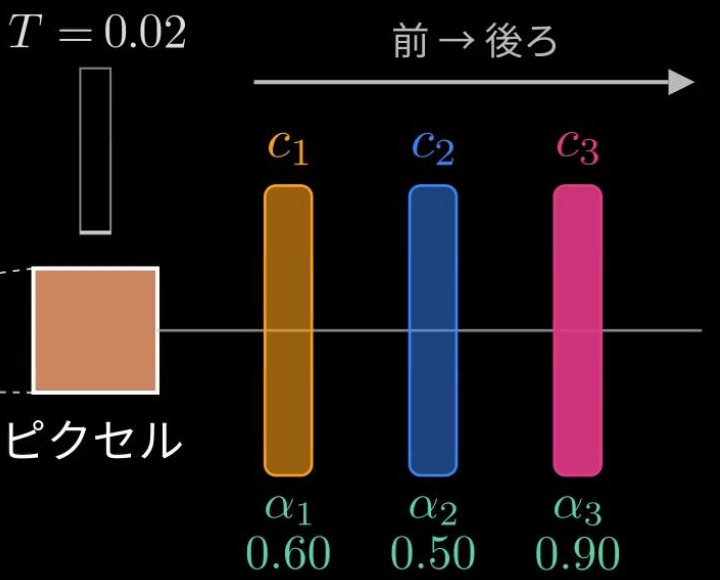


$$C = \alpha_1 c_1 + 0.40 \cdot \alpha_2 c_2 + 0.20 \cdot \alpha_3 c_3$$



$$C = T_1 \cdot \alpha_1 c_1 + T_2 \cdot \alpha_2 c_2 + T_3 \cdot \alpha_3 c_3$$





$T_1 = 1$ 最初

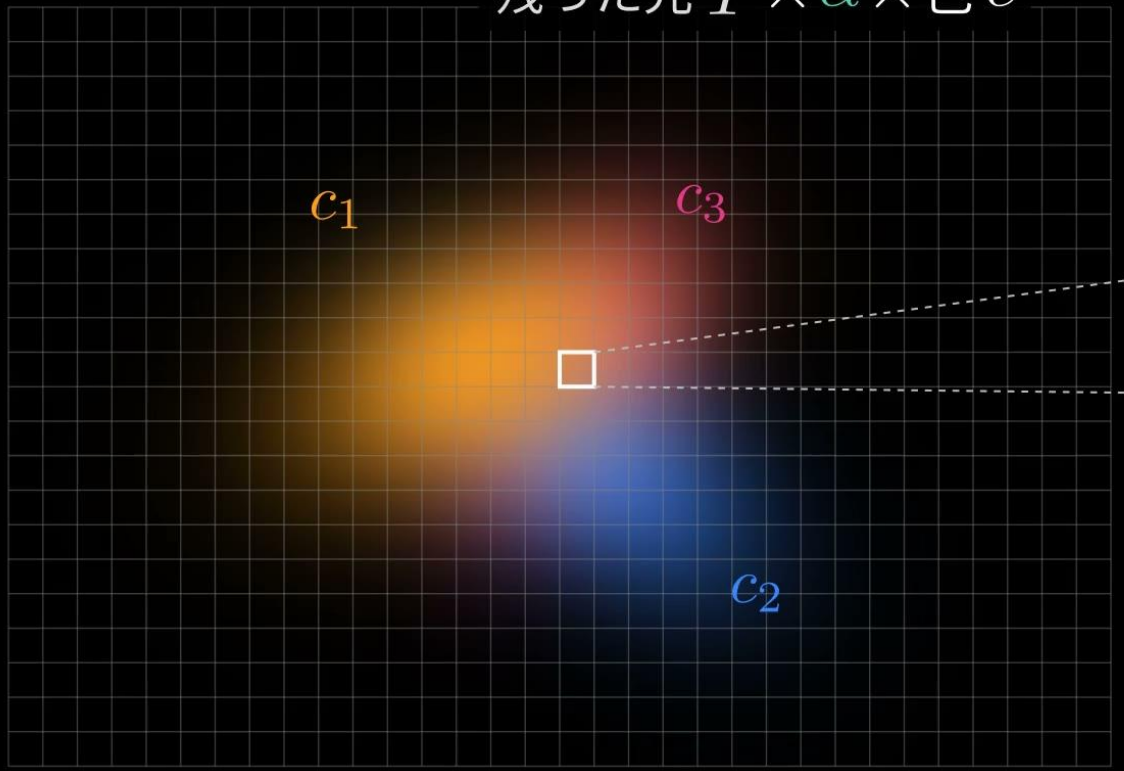
$T_2 = 1 - \alpha_1 = 0.40$ 1枚目の後

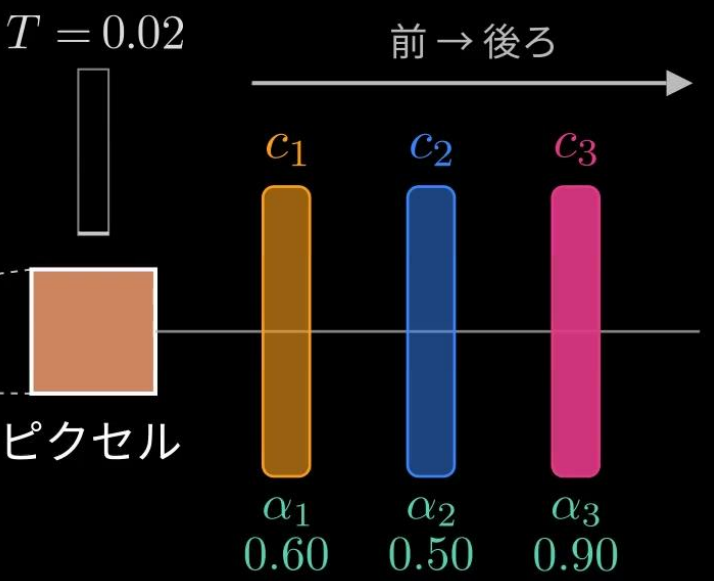
$T_3 = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) = 0.20$ 2枚目の後

T：手前を通して残った割合

$$C = \boxed{T_1 \cdot \alpha_1 c_1} + \boxed{T_2 \cdot \alpha_2 c_2} + \boxed{T_3 \cdot \alpha_3 c_3}$$

残った光 T × α × 色 c



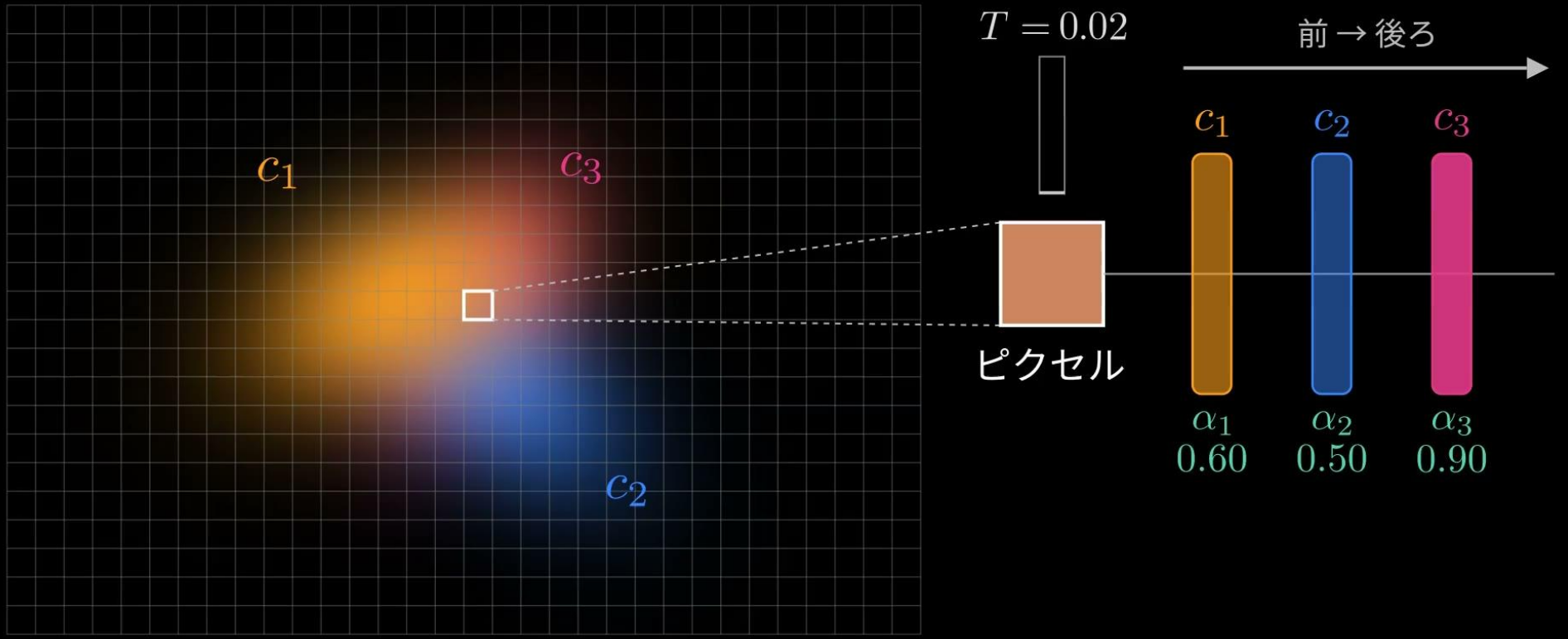


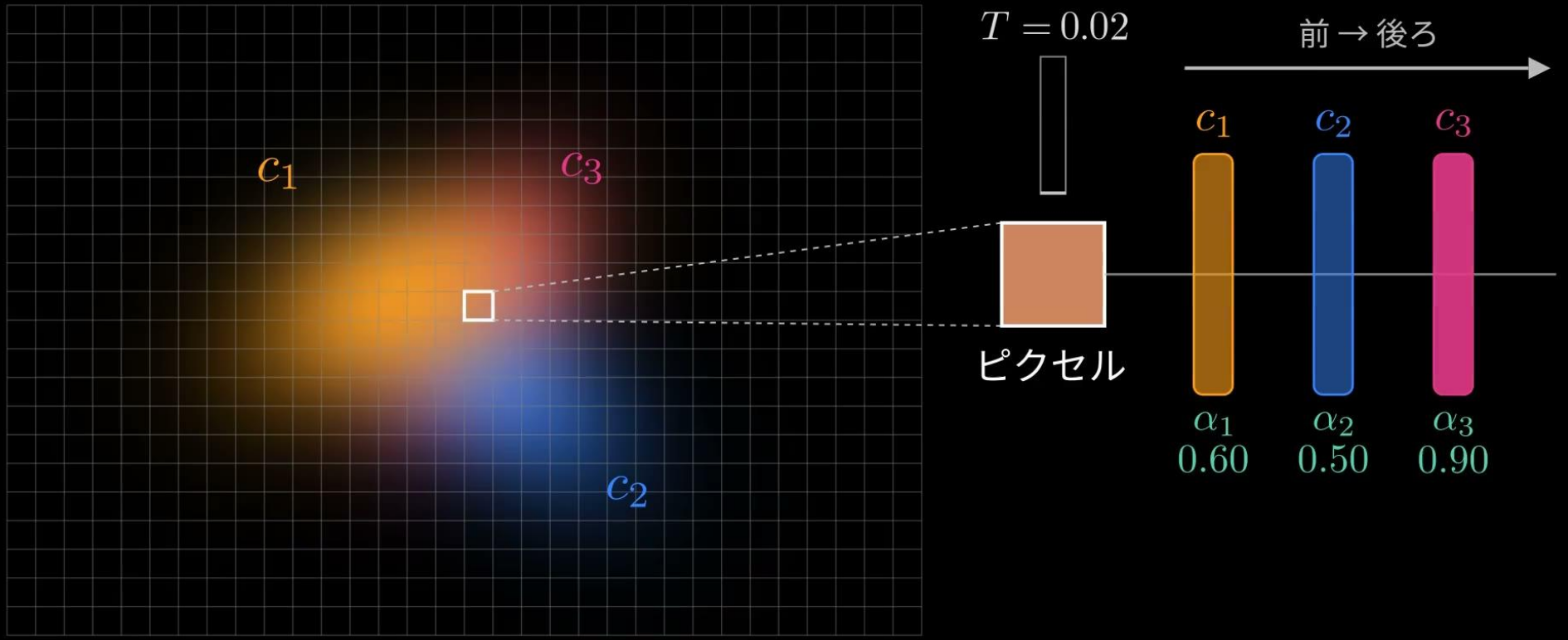
$T_1 = 1$ 最初

$T_2 = 1 - \alpha_1 = 0.40$ 1枚目の後

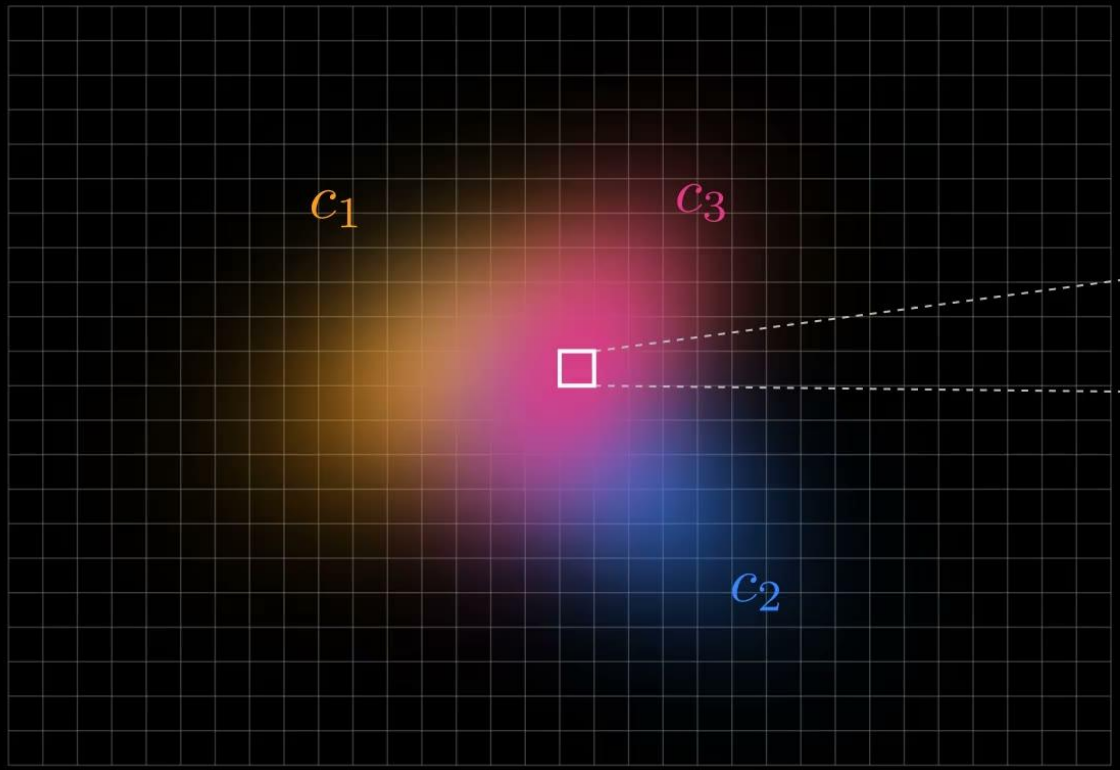
$T_3 = (1 - \alpha_1)(1 - \alpha_2) = 0.20$ 2枚目の後

alpha blending $C = \sum_i T_i \, \alpha_i \, c_i, \qquad T_i = \prod_{j<i} (1 - \alpha_j)$




$T = 0.02$
前 → 後ろ
c_1
c_3
c_2
ピクセル
c_1
c_2
c_3
α_1
0.60
α_2
0.50
α_3
0.90

$$C = 0.90 + 0.10 \cdot 0.50 + 0.05 \cdot 0.60$$



$T = 0.02$

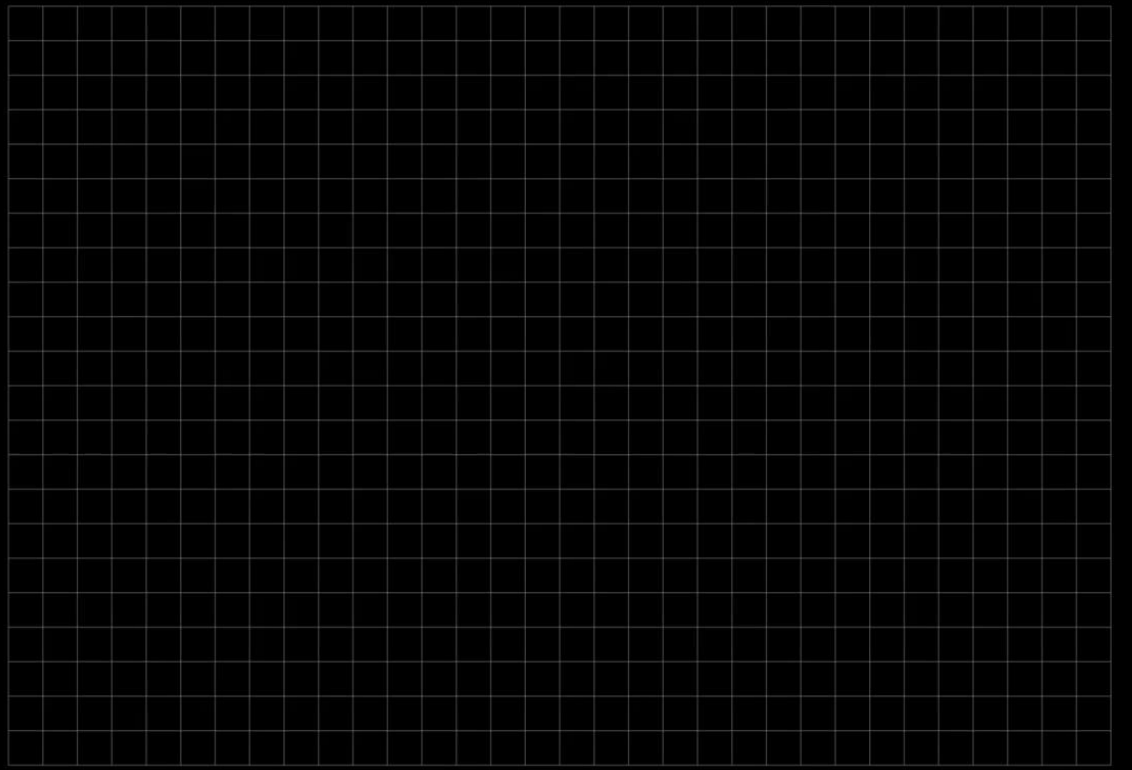
前 → 後ろ

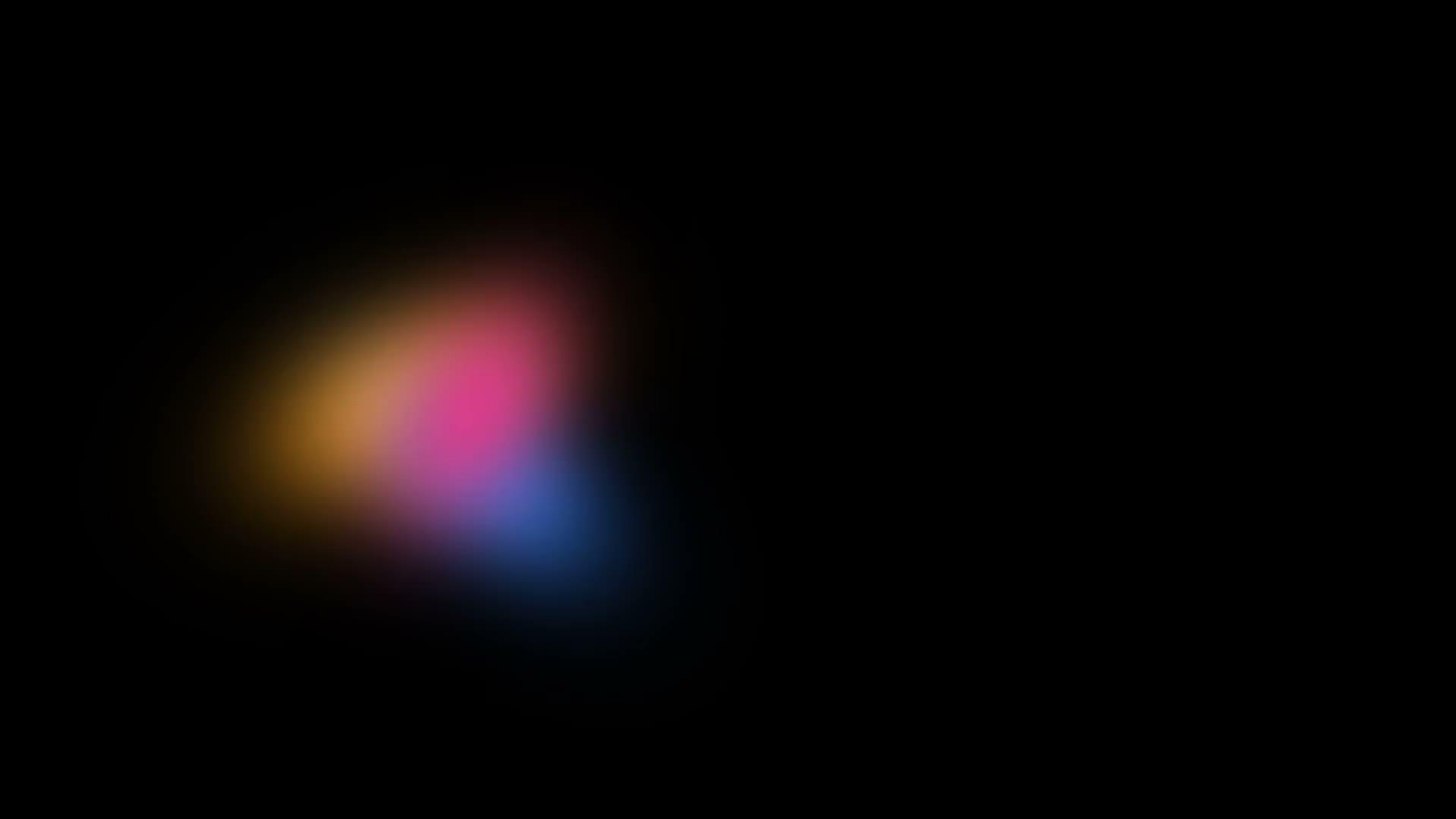
c_3 c_2 c_1

ピクセル

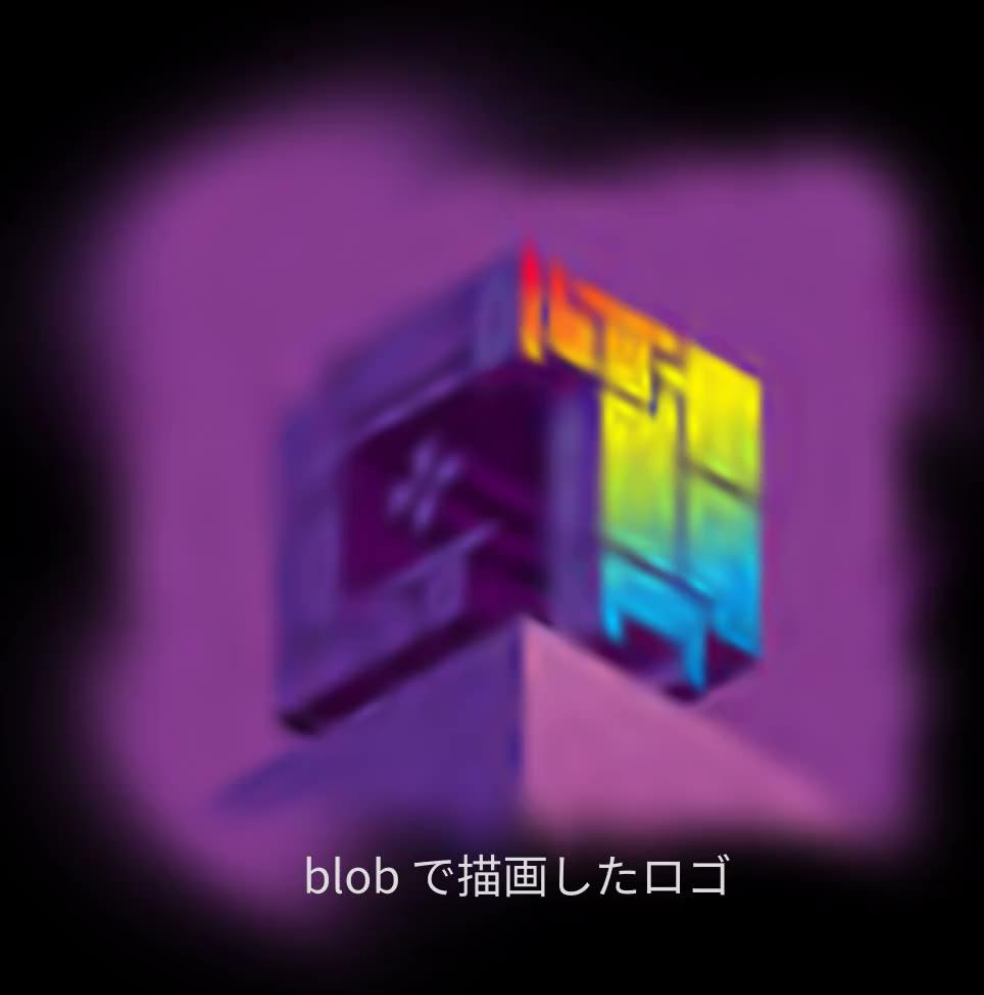
α_3 0.90 α_2 0.50 α_1 0.60

3D では、この順番 = 奥行き → 第③章

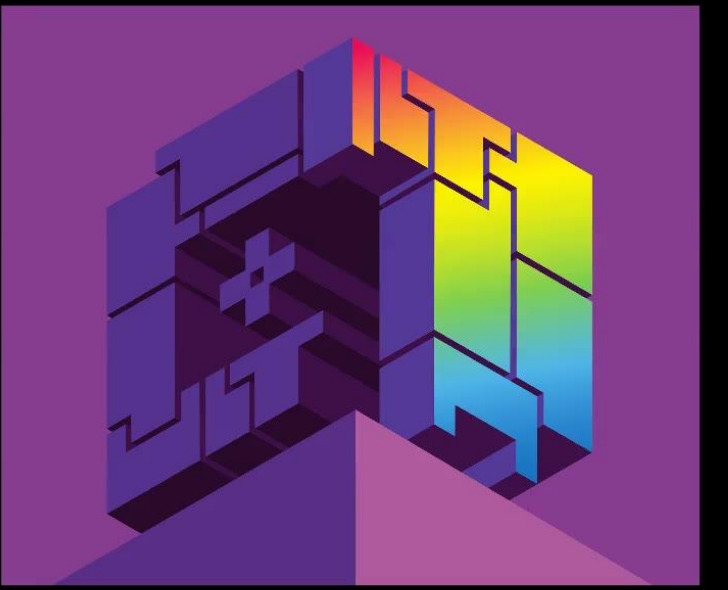




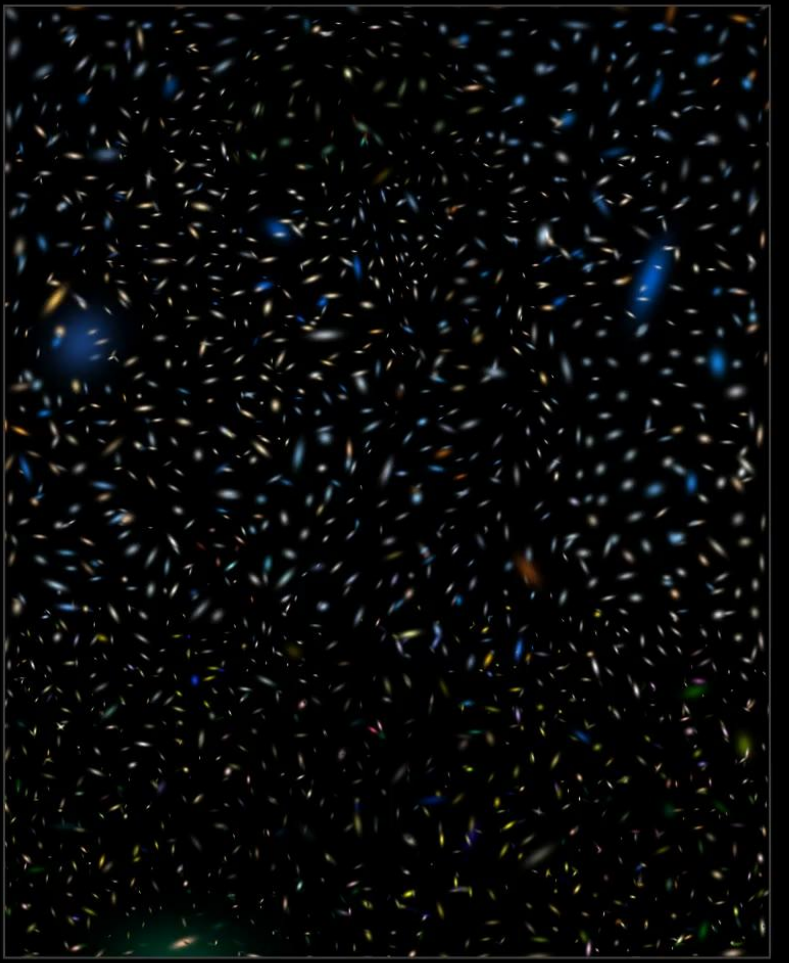




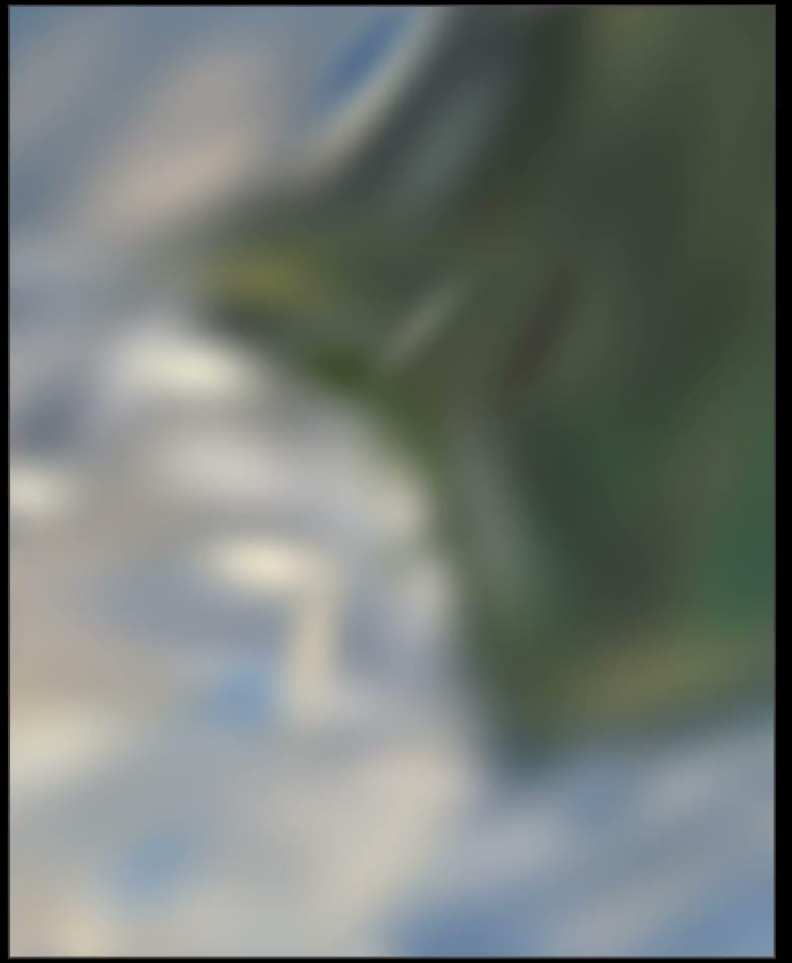
blob で描画したロゴ

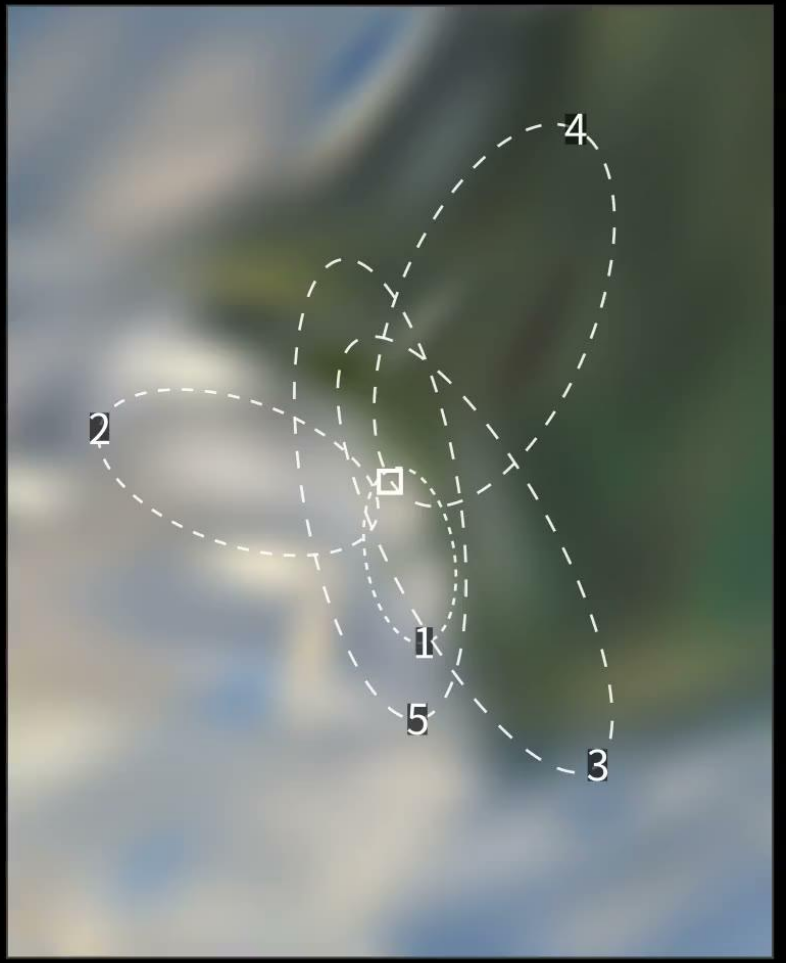


元のロゴ



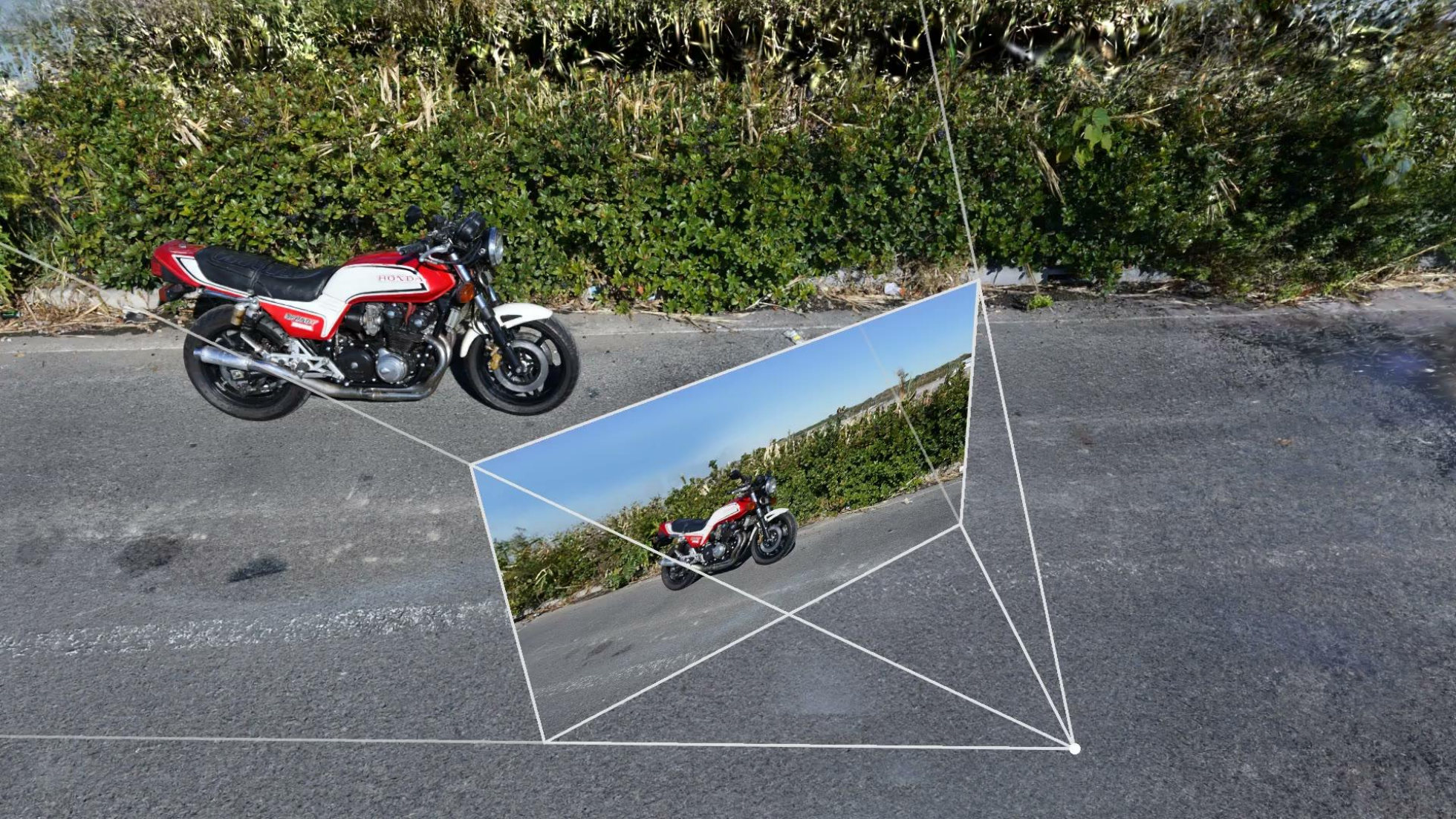


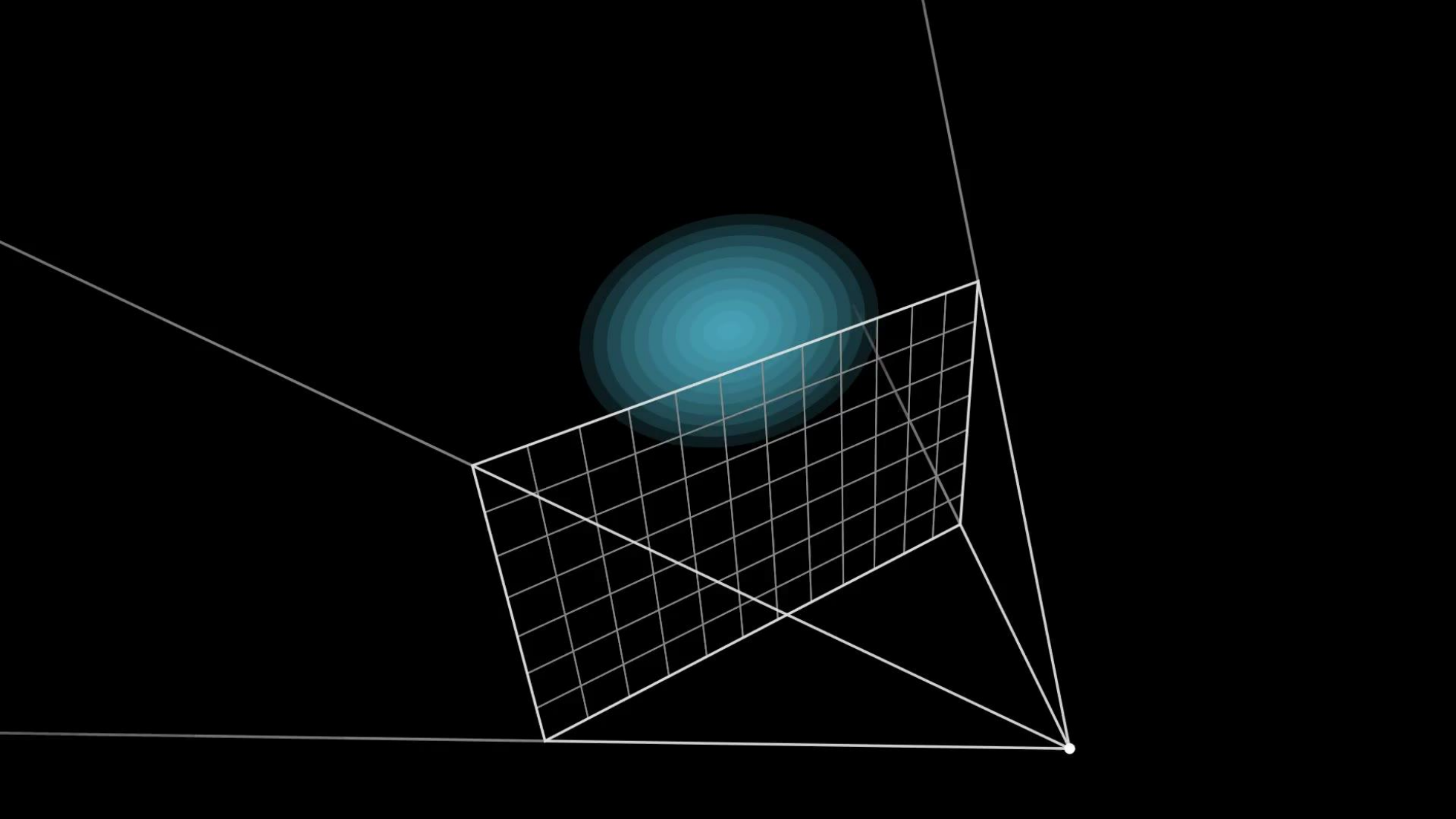


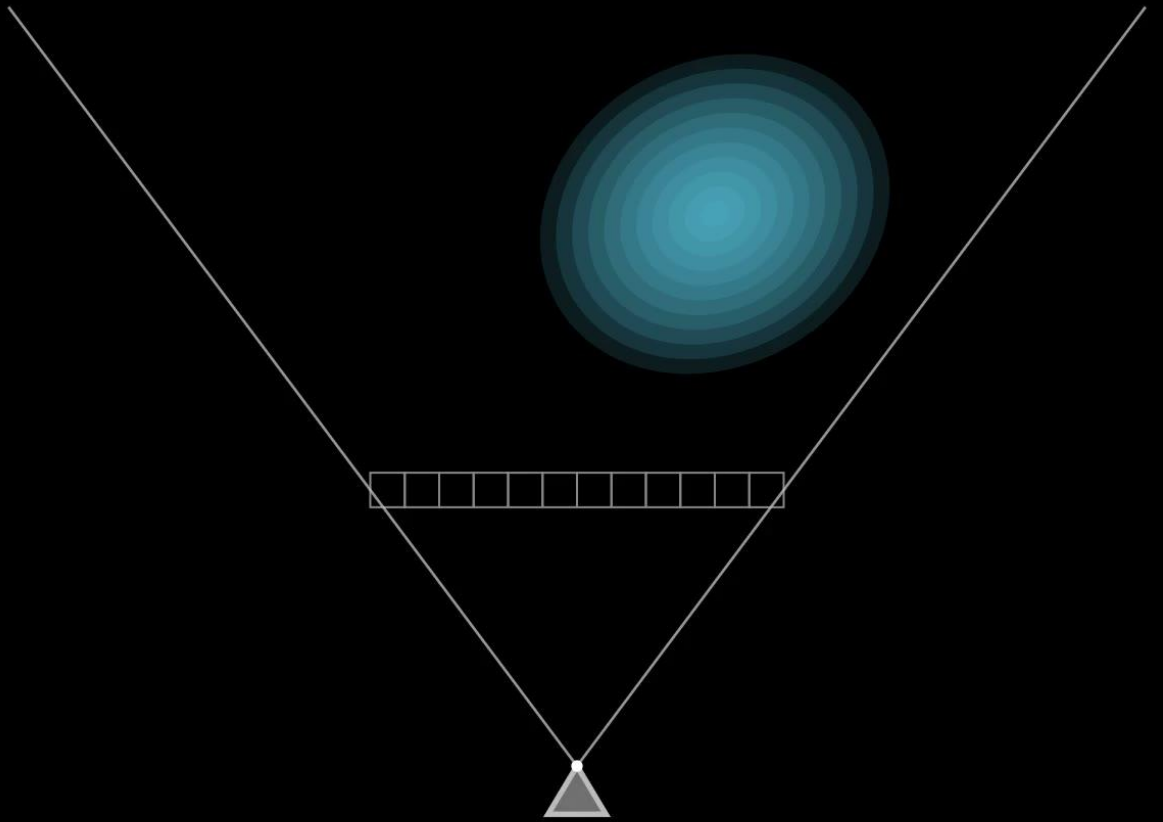


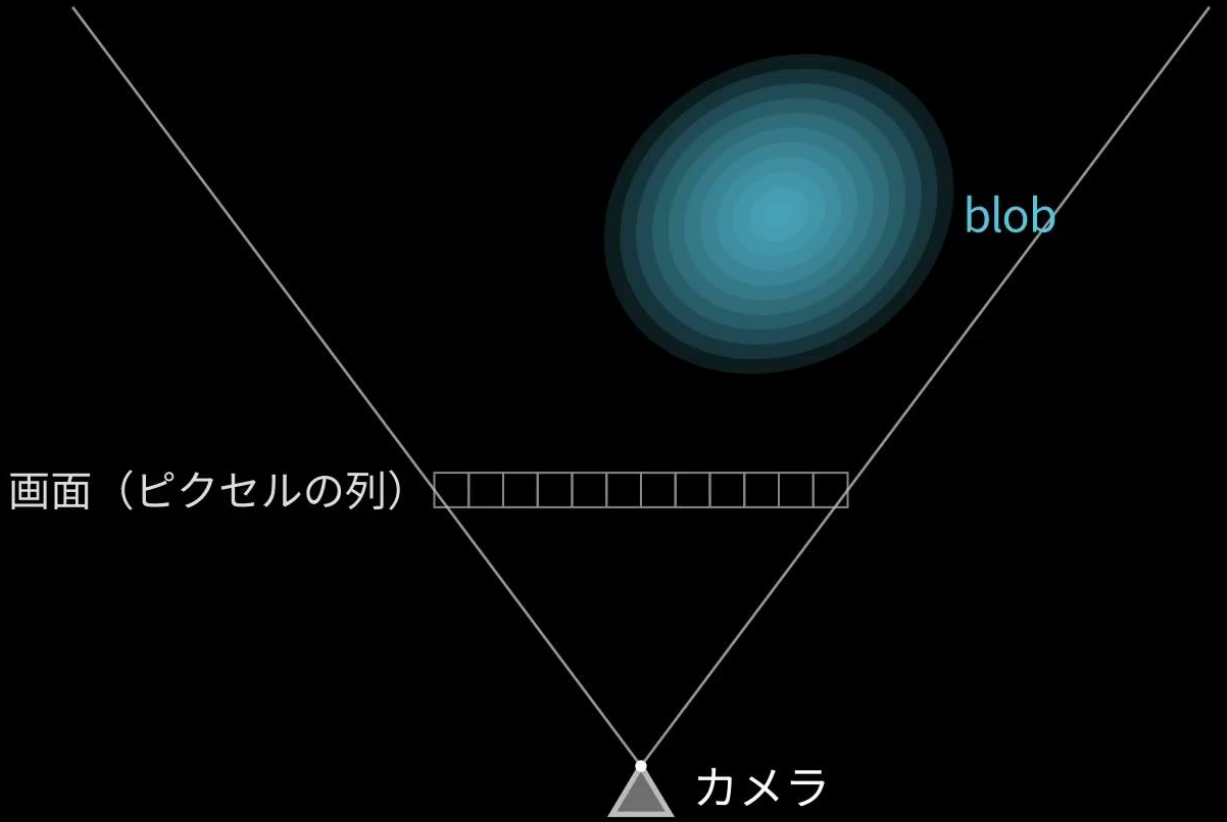
$$= 0.38 \times \text{1} + 0.09 \times \text{2} + 0.26 \times \text{3} + 0.05 \times \text{4} + 0.10 \times \text{5} + 0.11 \times \text{その他}$$

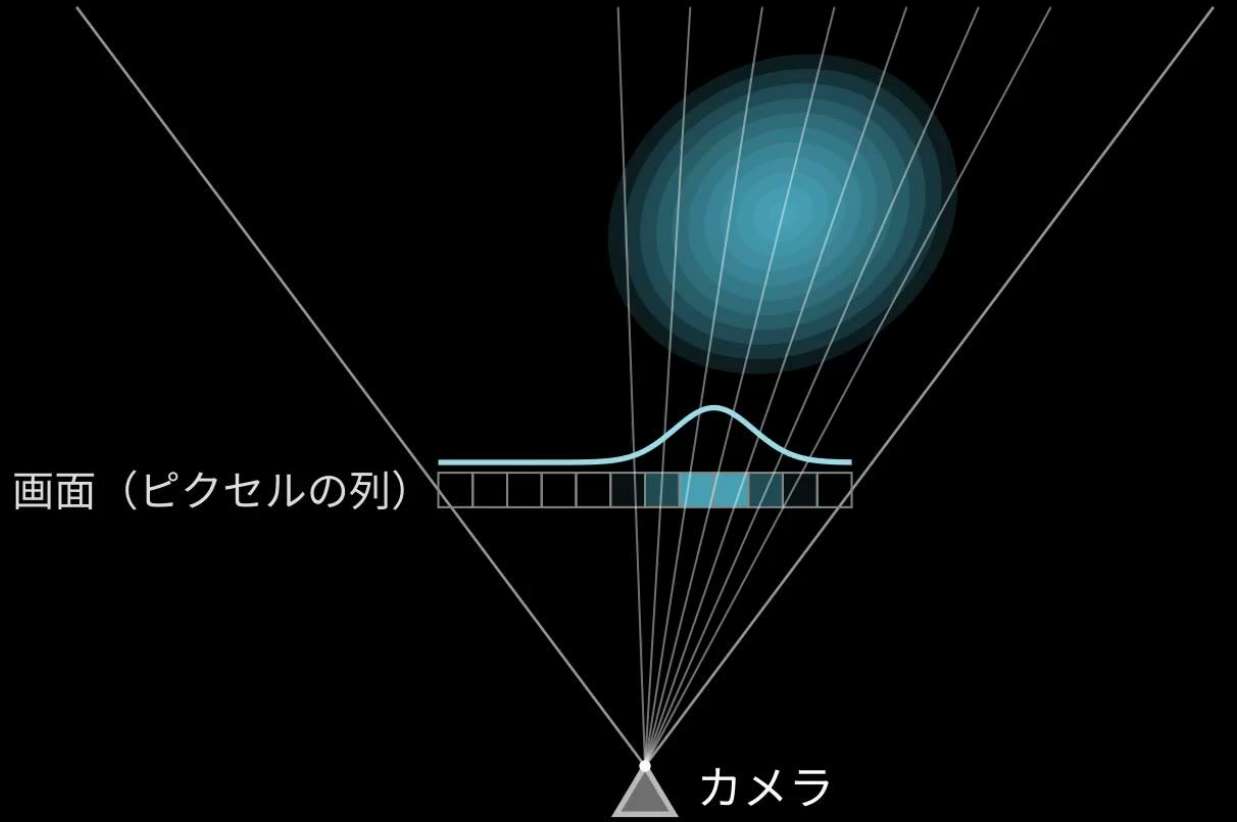
$$w_i = \alpha_i T_i$$

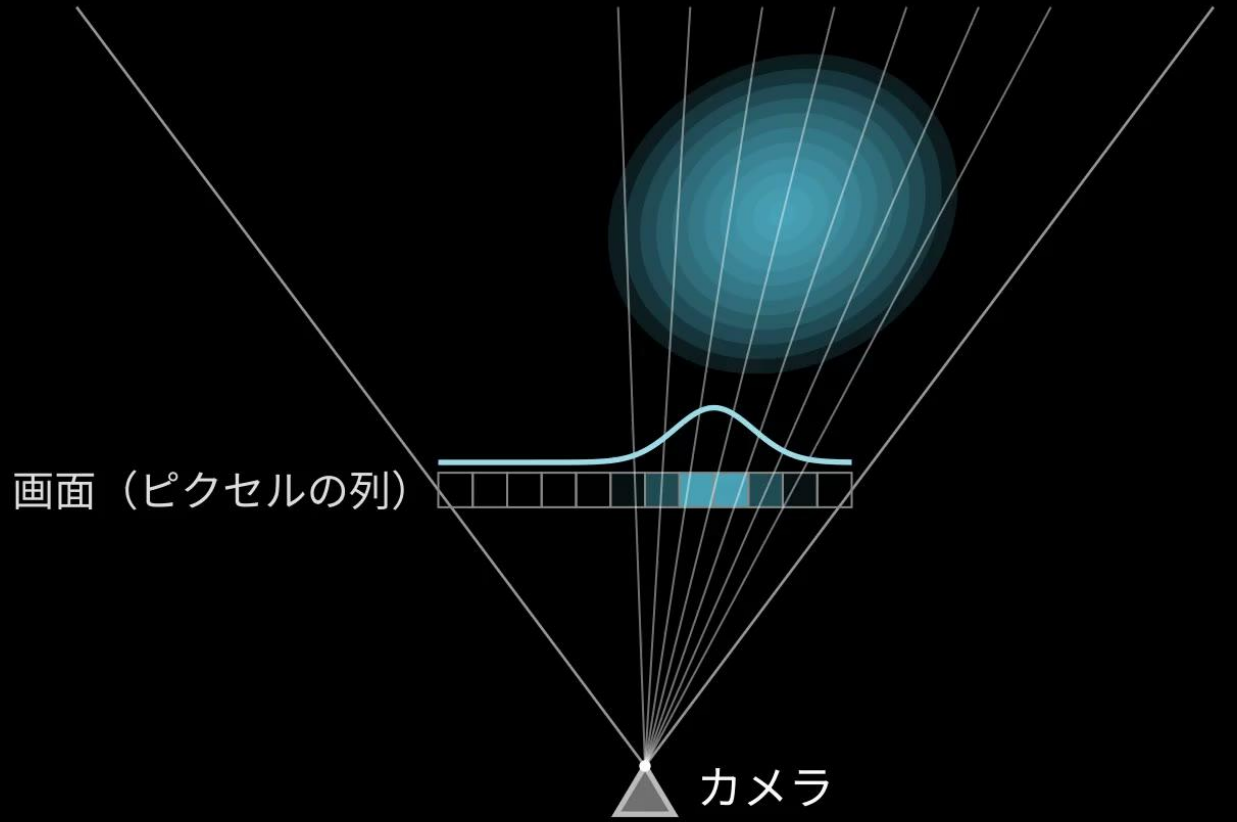

HONDA

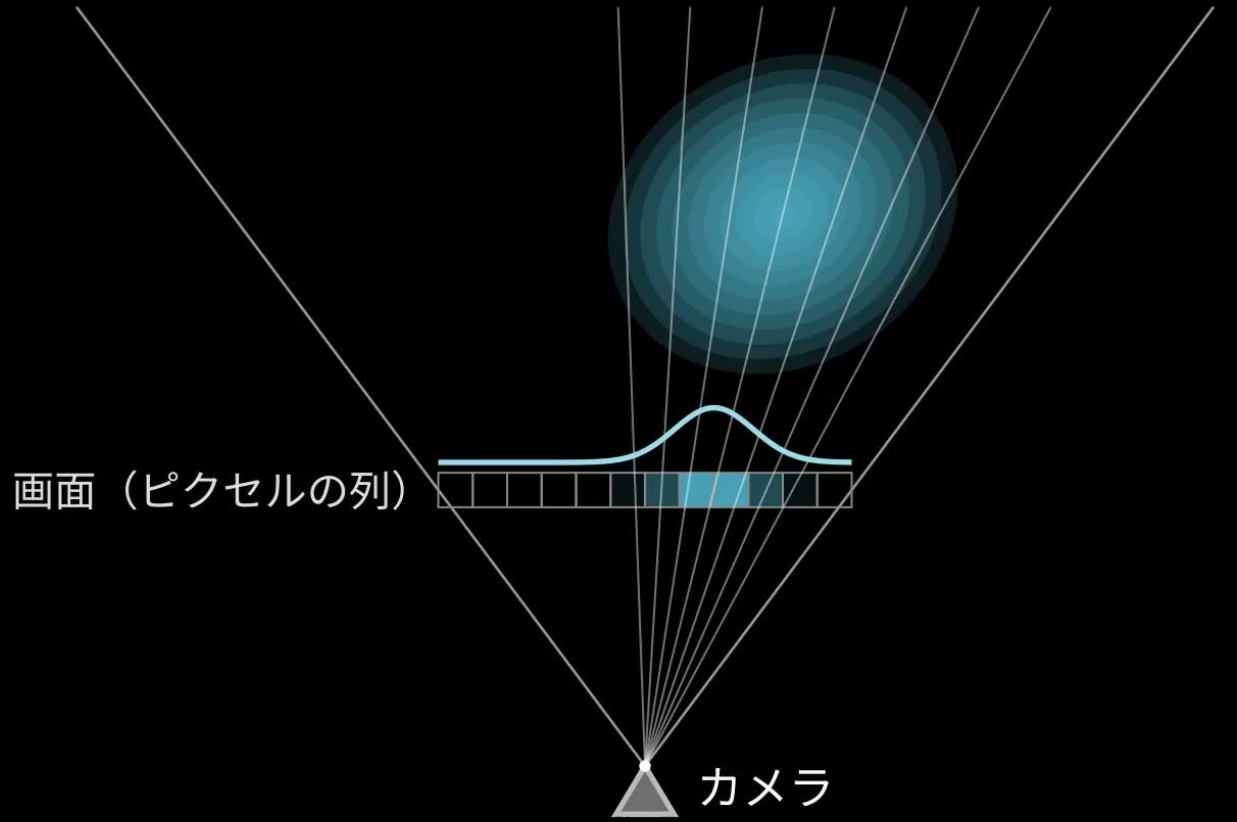


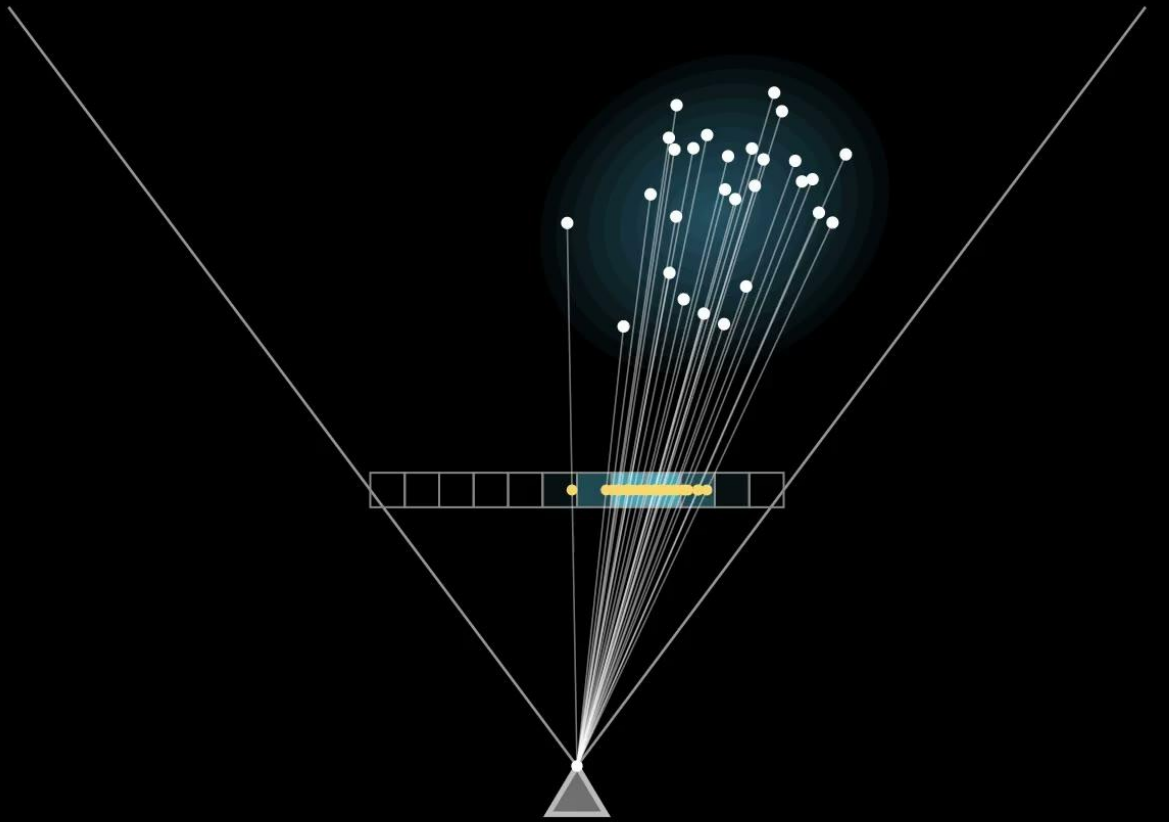


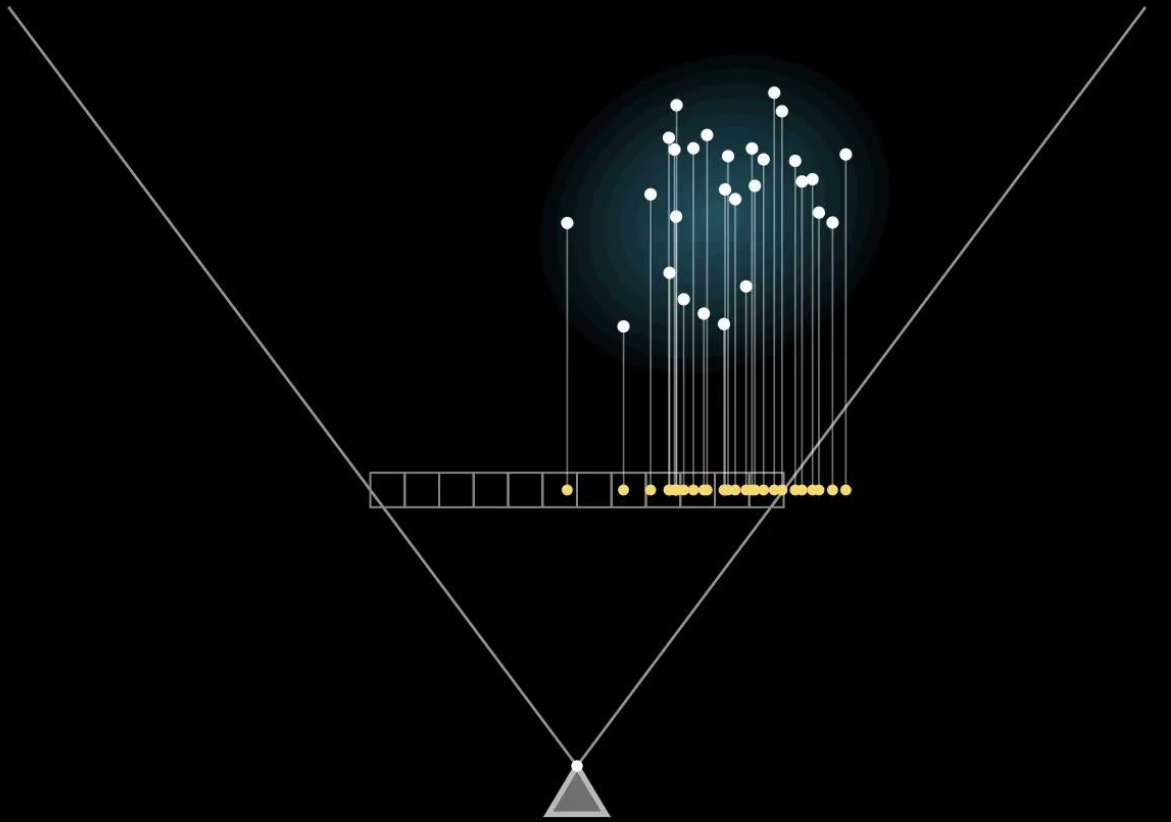

blob
画面（ピクセルの列）
カメラ

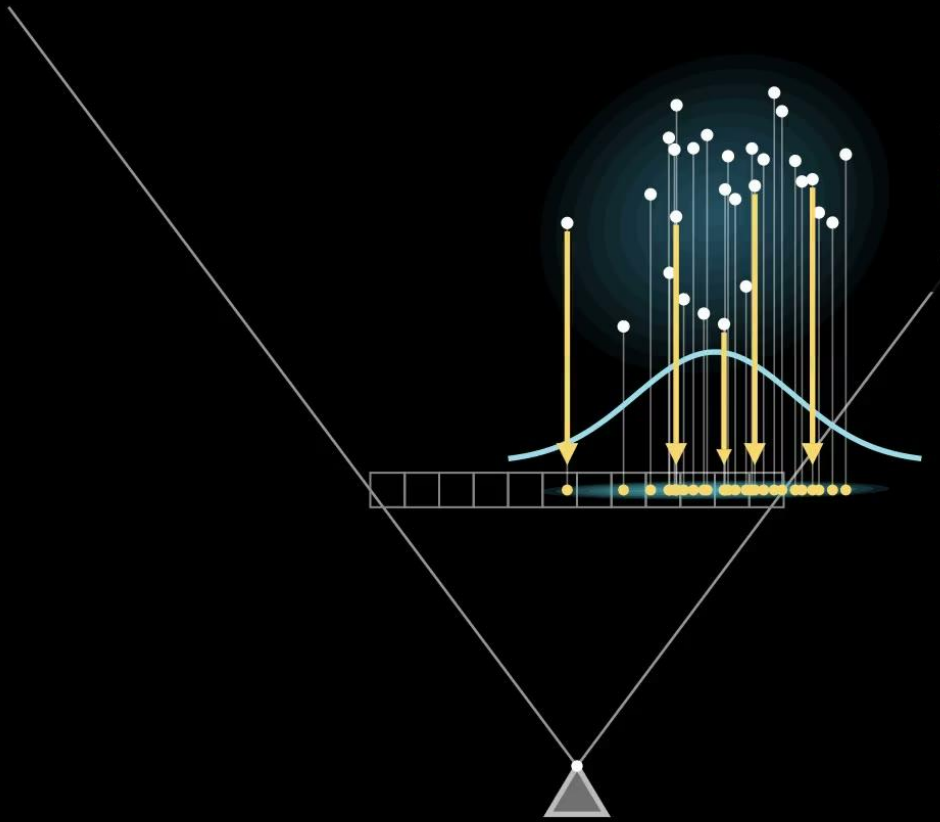

画面（ピクセルの列）
カメラ


画面（ピクセルの列）
カメラ


画面（ピクセルの列）
カメラ



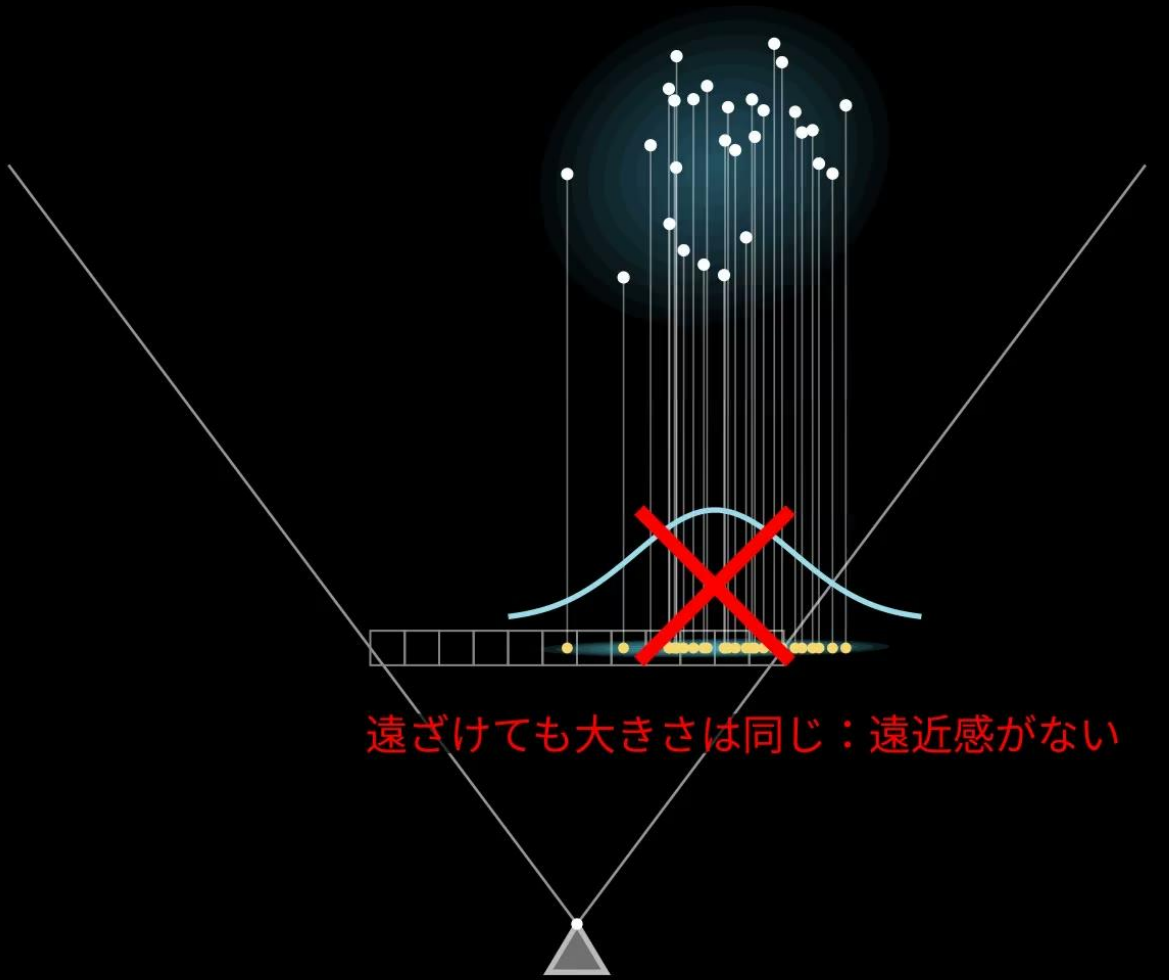


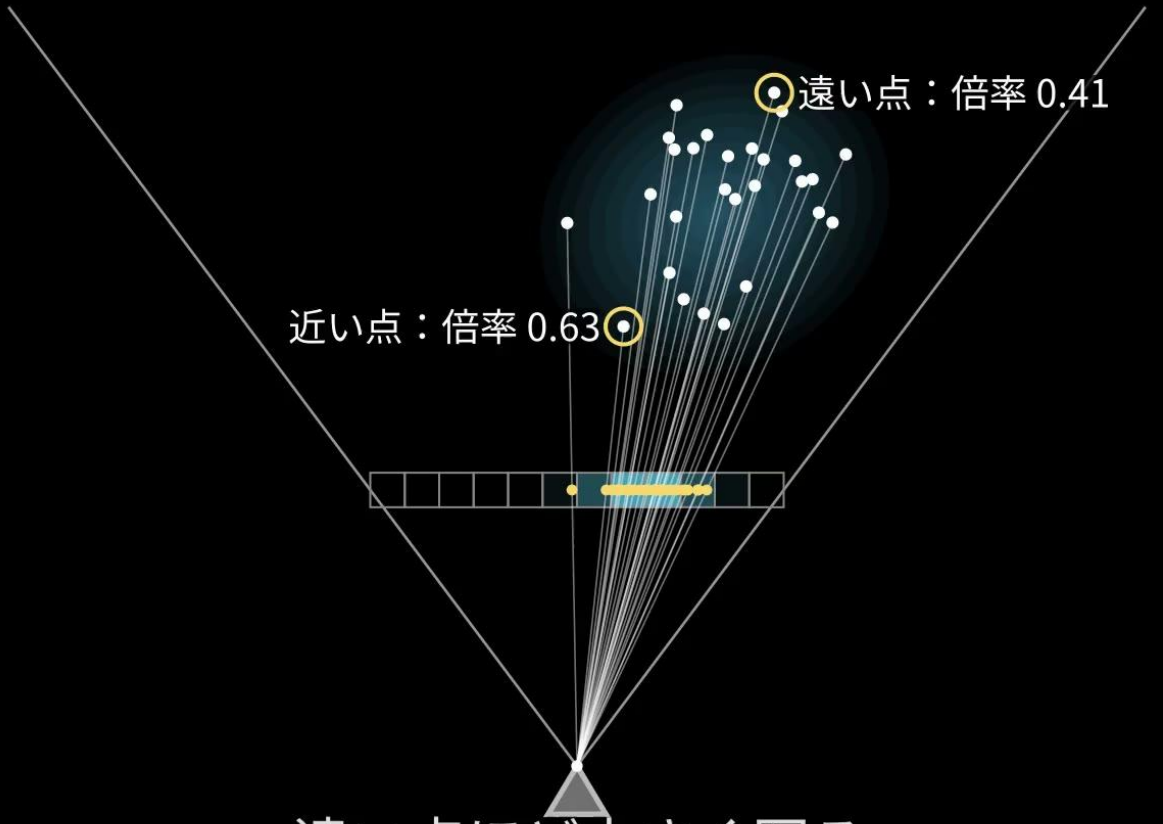


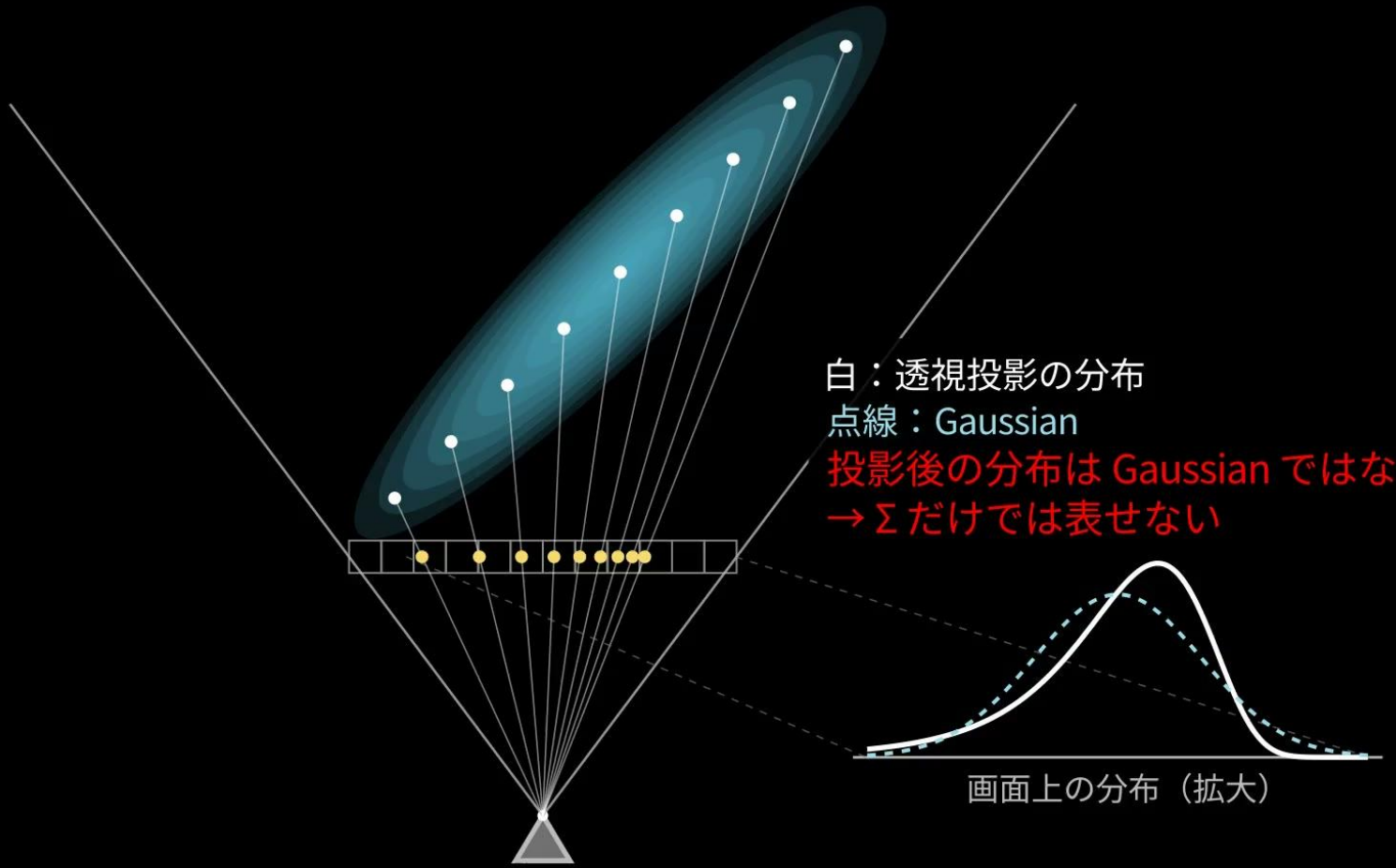
どの点も同じルール $u = x$

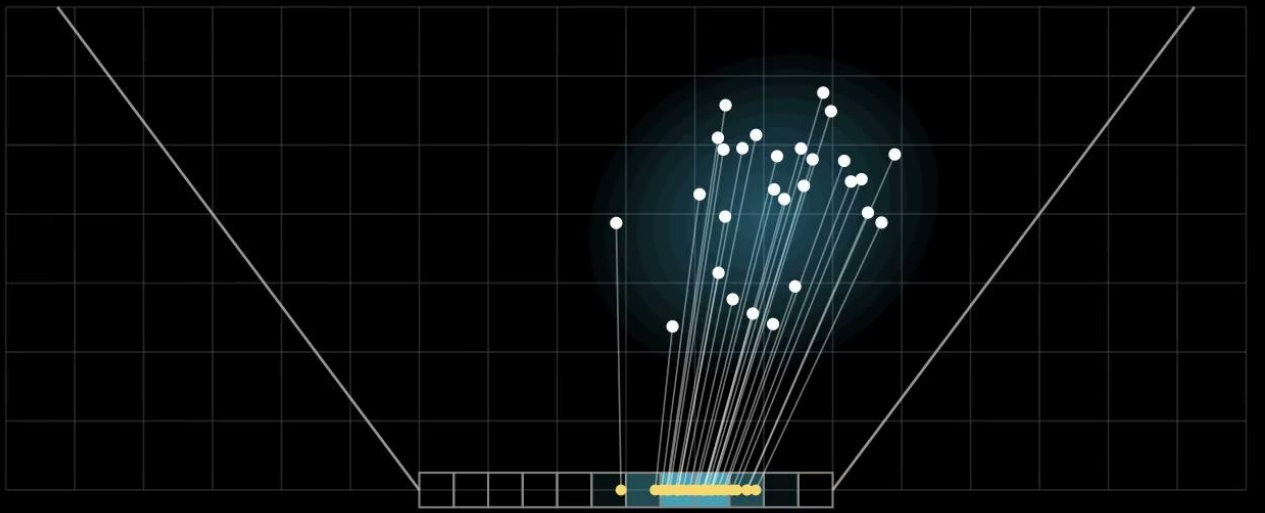
投影後の分布も Gaussian ✓

$\sigma'^2 = \Sigma_{xx}$

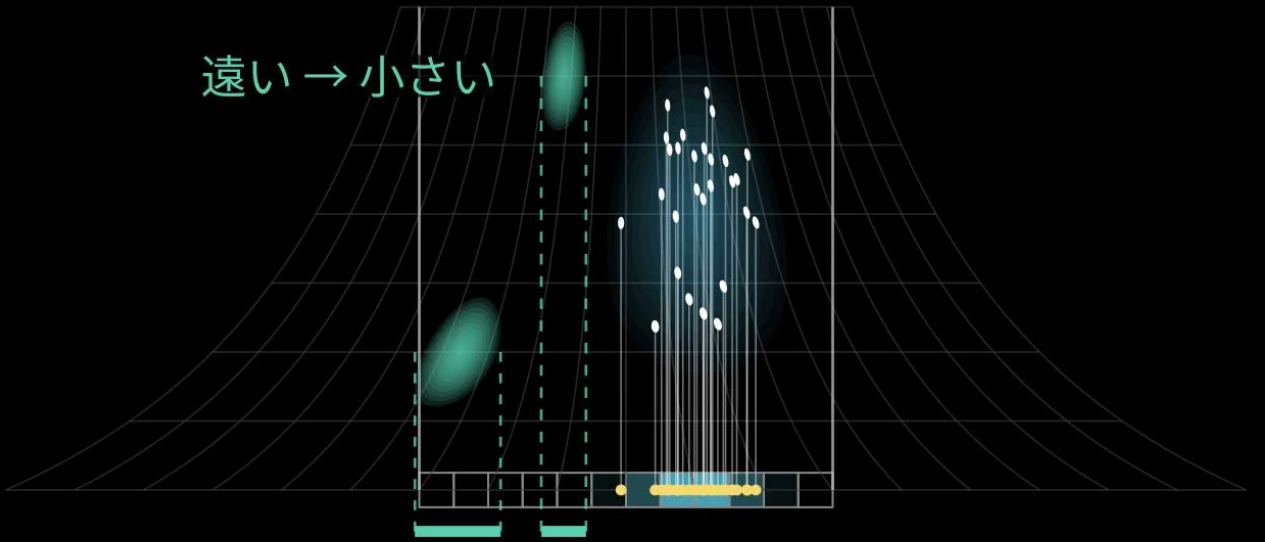

遠ざけても大きさは同じ：遠近感がない


遠い点：倍率 0.41
近い点：倍率 0.63
遠い点ほど小さく写る

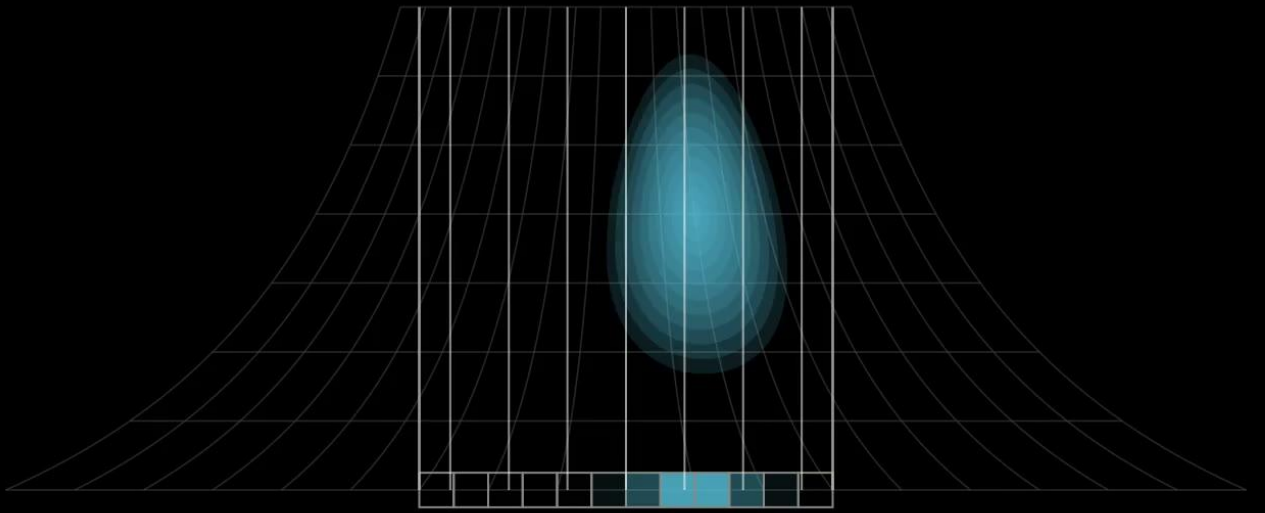

白：透視投影の分布
点線：Gaussian
投影後の分布は Gaussian ではない
→ Σ だけでは表せない
画面上の分布（拡大）

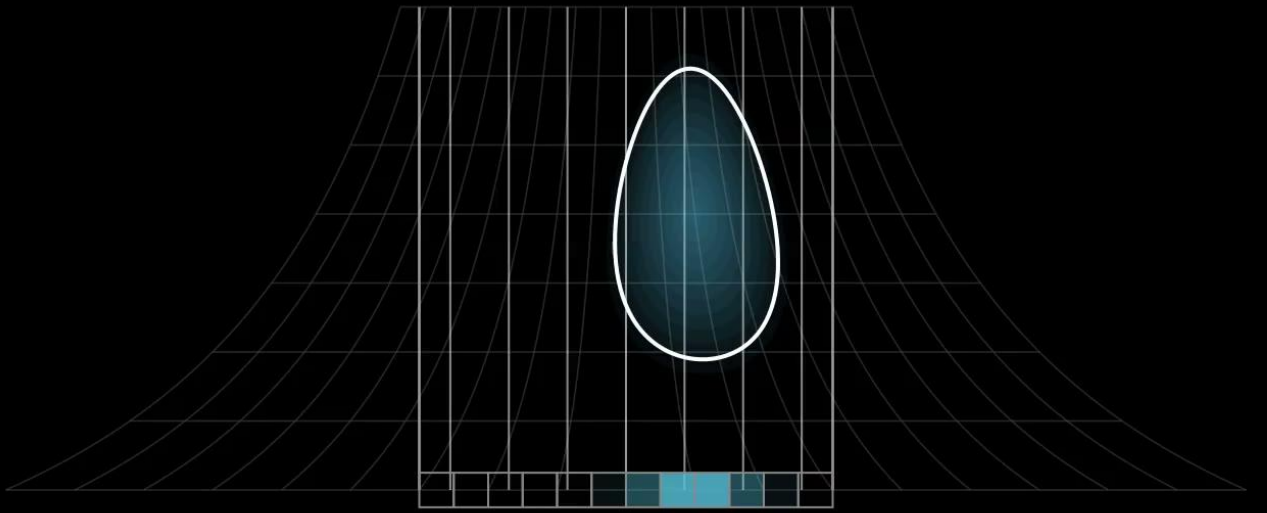


空間を変形して、投影の線を平行にする



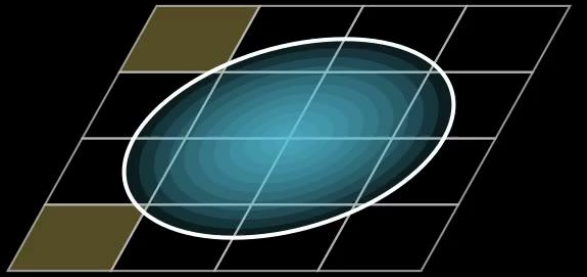
空間を変形して、投影の線を平行にする





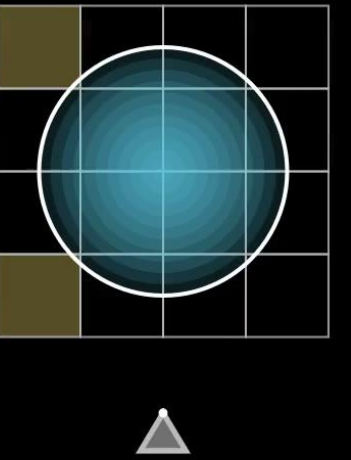
第①章：$\Sigma \leftarrow M\Sigma M^{\top}$（M は行列）

行列（第①章）



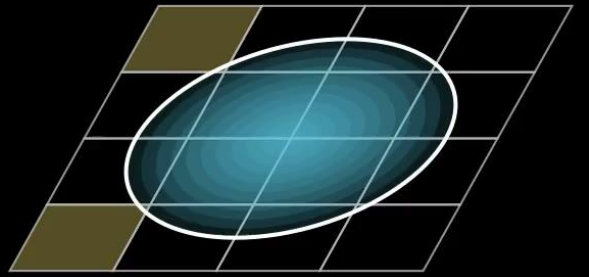
楕円 → Σ で書ける

透視の曲げ



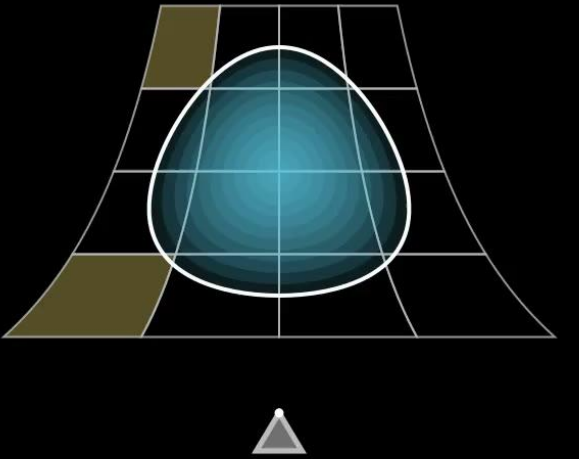
第①章：$\Sigma \leftarrow M\Sigma M^\top$（M は行列）

行列（第①章）



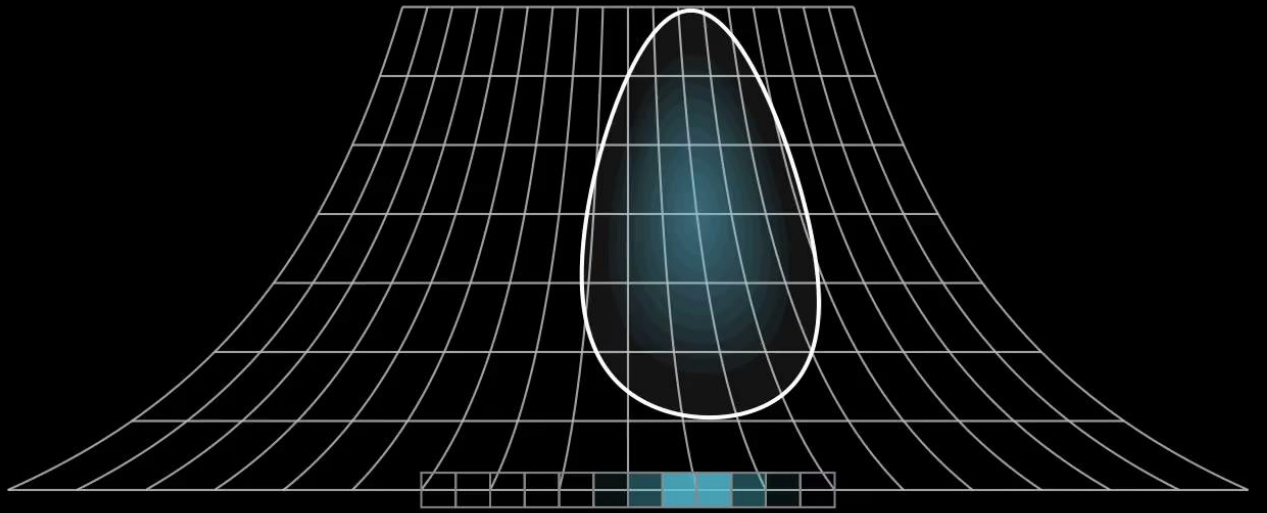
楕円 → Σ で書ける

透視の曲げ



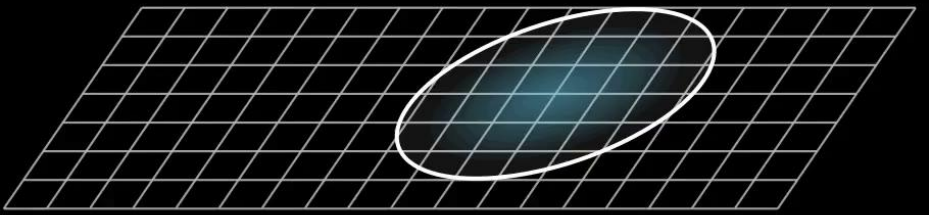
卵形は楕円ではない → Σ だけでは表せない

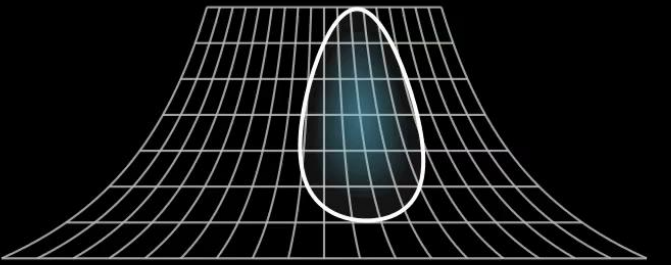
—— 透視の変換：曲がる格子



透視は、空間を変形する操作

どちらも、空間の操作





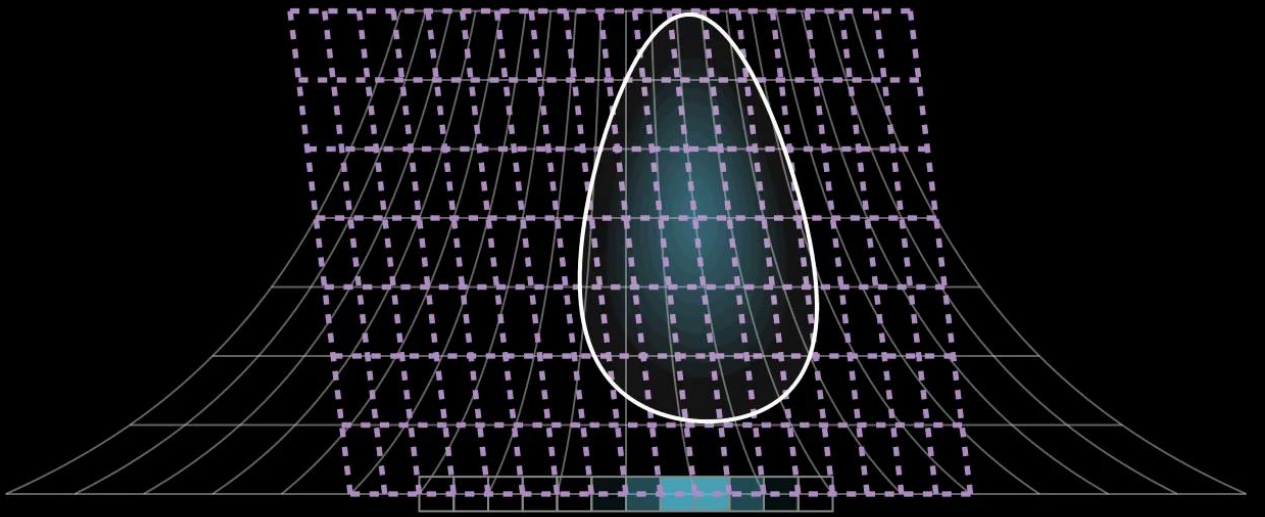
行列 M：まっすぐ・平行のまま

$$\Sigma \leftarrow M\Sigma M^\top$$

透視：曲がる

—— 透視の変換：曲がる格子

- - - - J：中心付近での近似

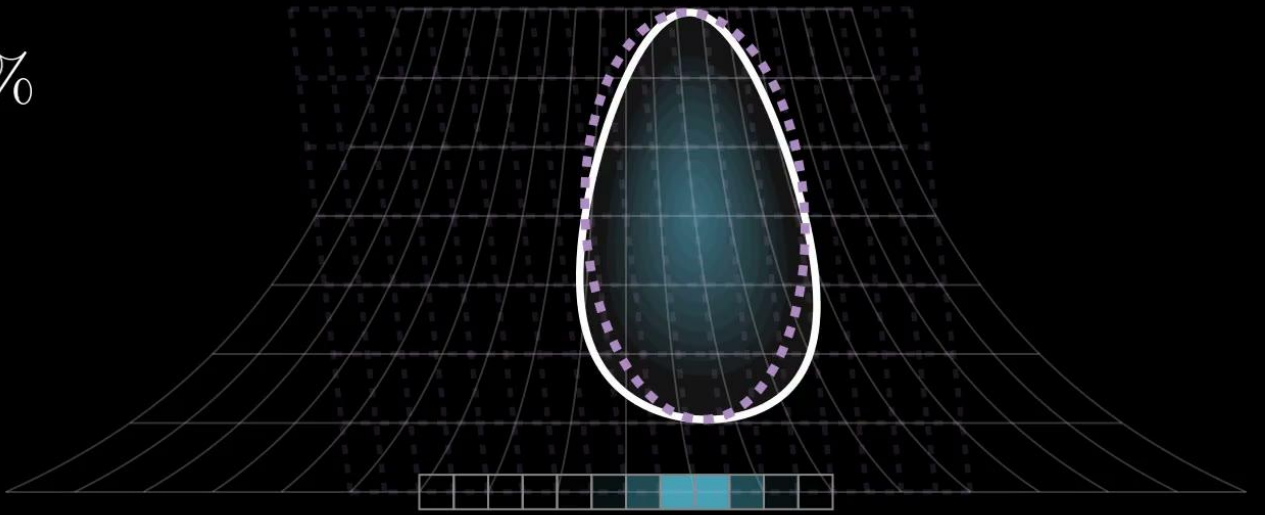


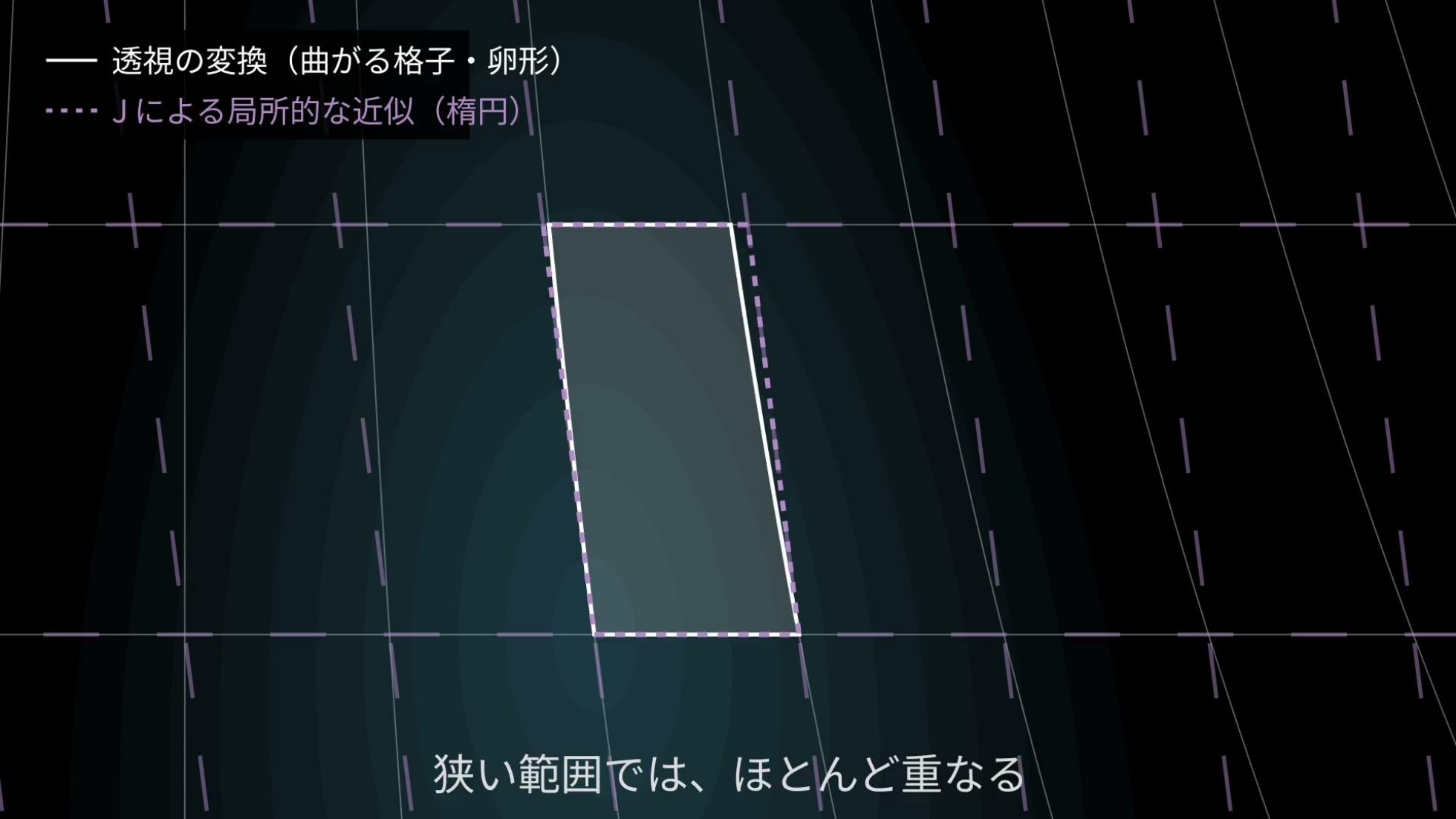
J：中心付近を、まっすぐな格子で近似する

—— 透視の変換（曲がる格子・卵形）

- - - - Ｊによる局所的な近似（楕円）

ずれ 15%

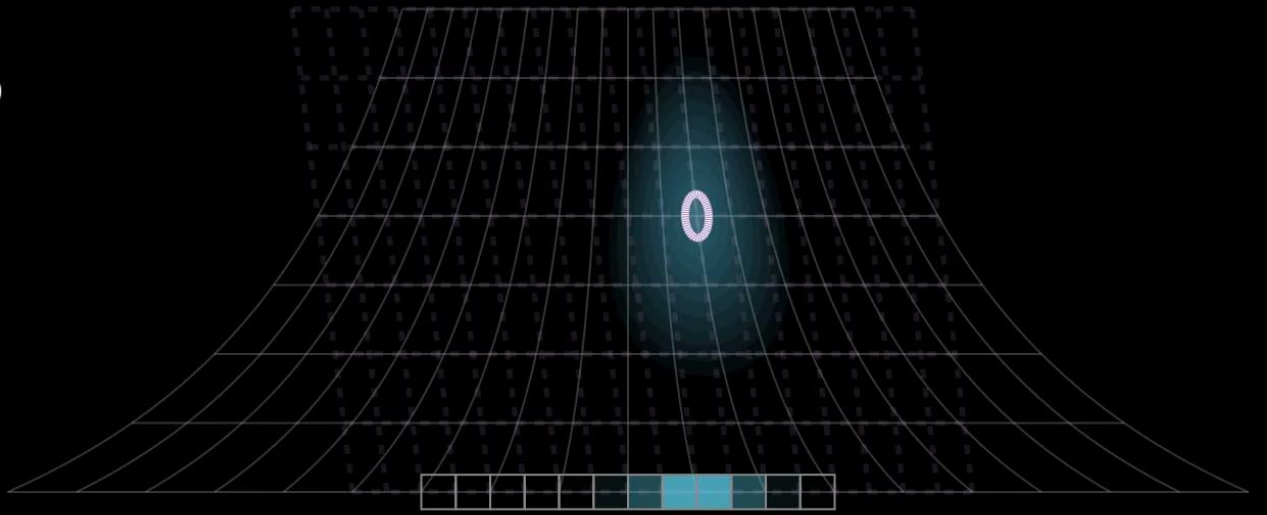



透視の変換（曲がる格子・卵形）
Jによる局所的な近似（楕円）
狭い範囲では、ほとんど重なる

── 透視の変換（曲がる格子・卵形）

- - - - Jによる局所的な近似（楕円）

ずれ 1%



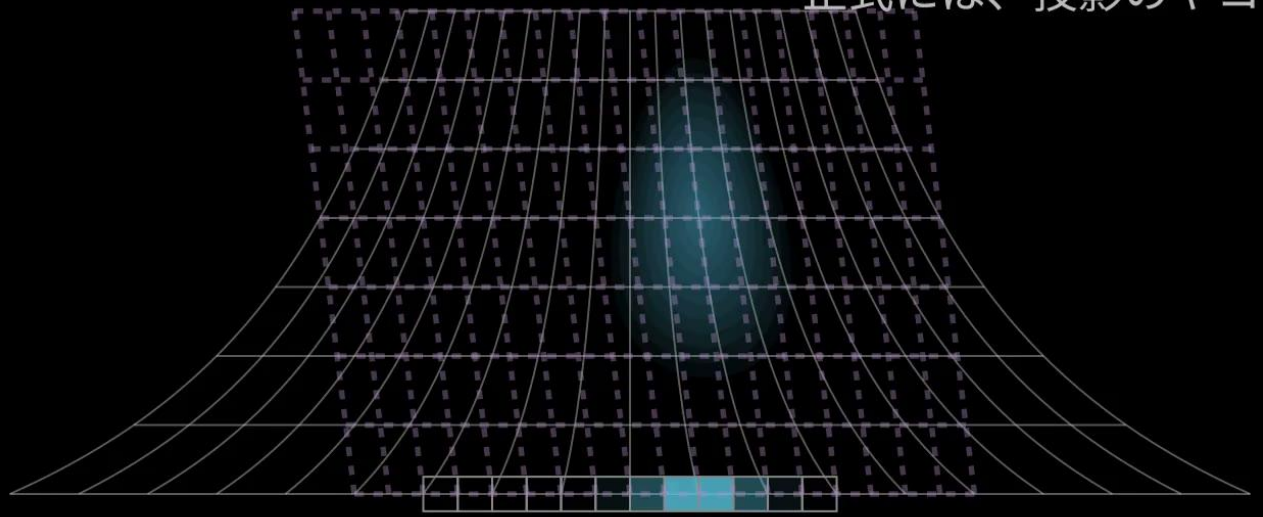
小さな blob は J で近似できる

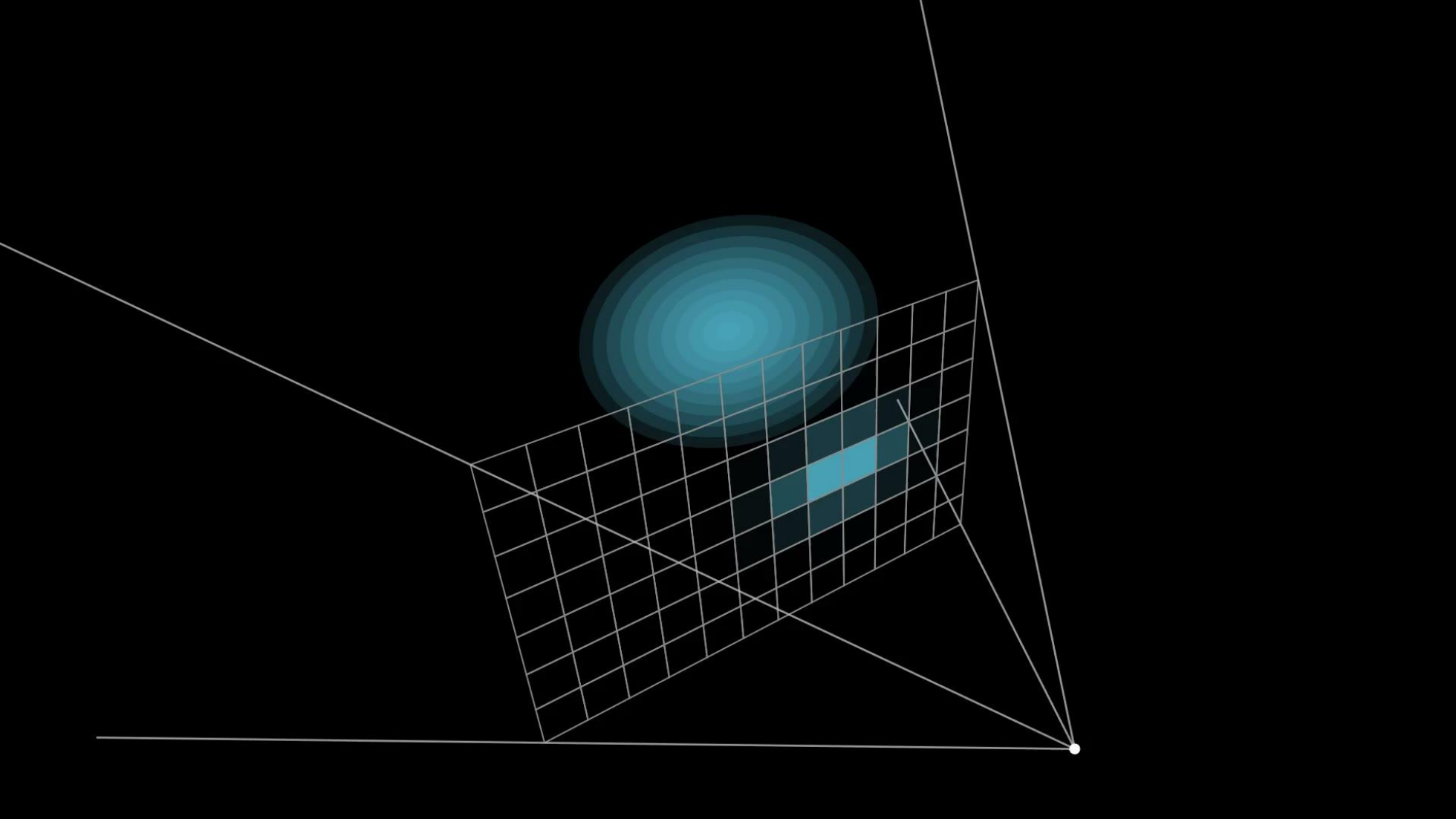
── 透視の変換（曲がる格子・卵形）

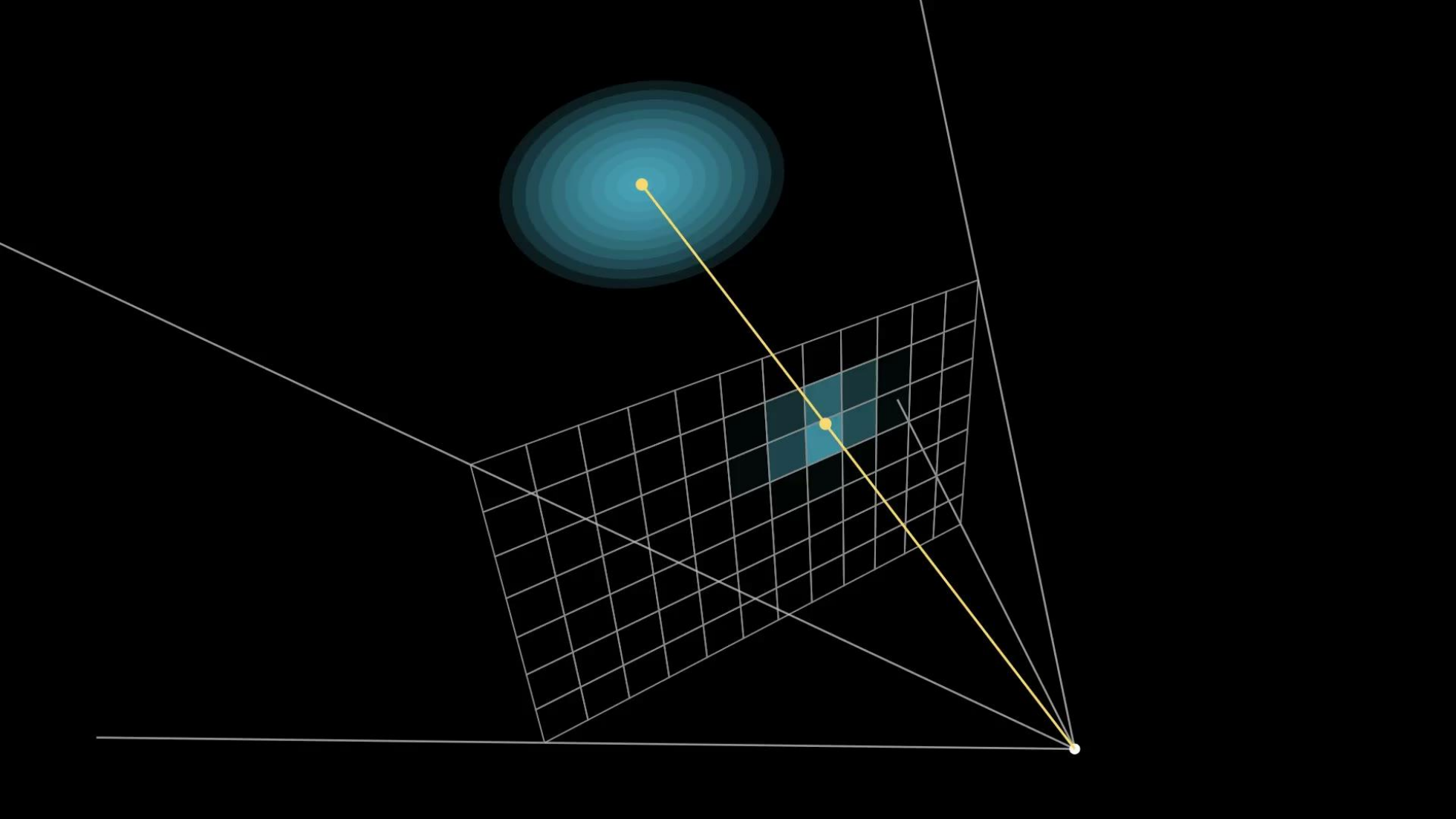
- - - - J による局所的な近似（楕円）

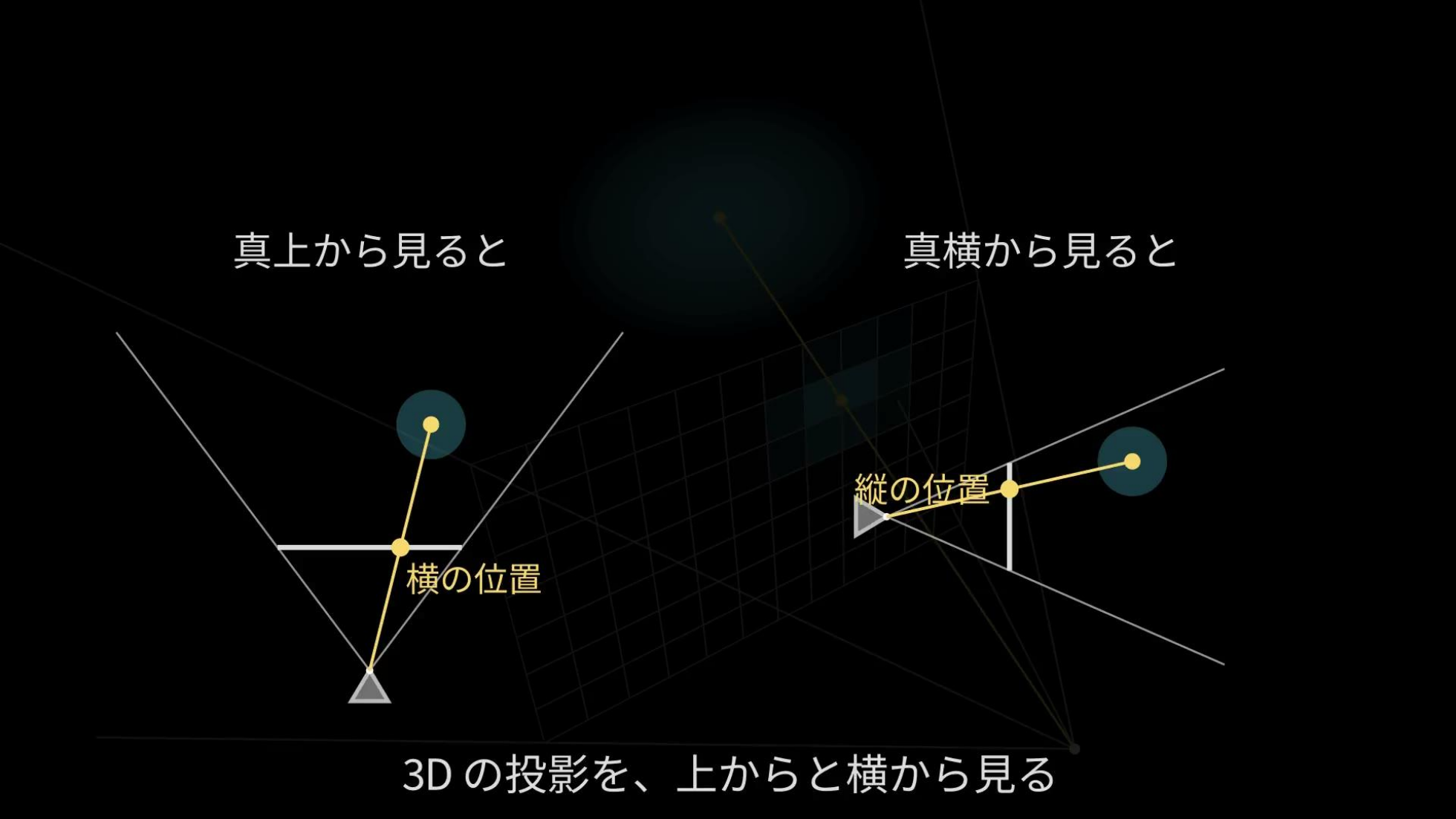
$$\Sigma' = J\Sigma J^{\top}$$

正式には、投影のヤコビ行列 $\frac{\partial(u, v)}{\partial(x, y, z)}$

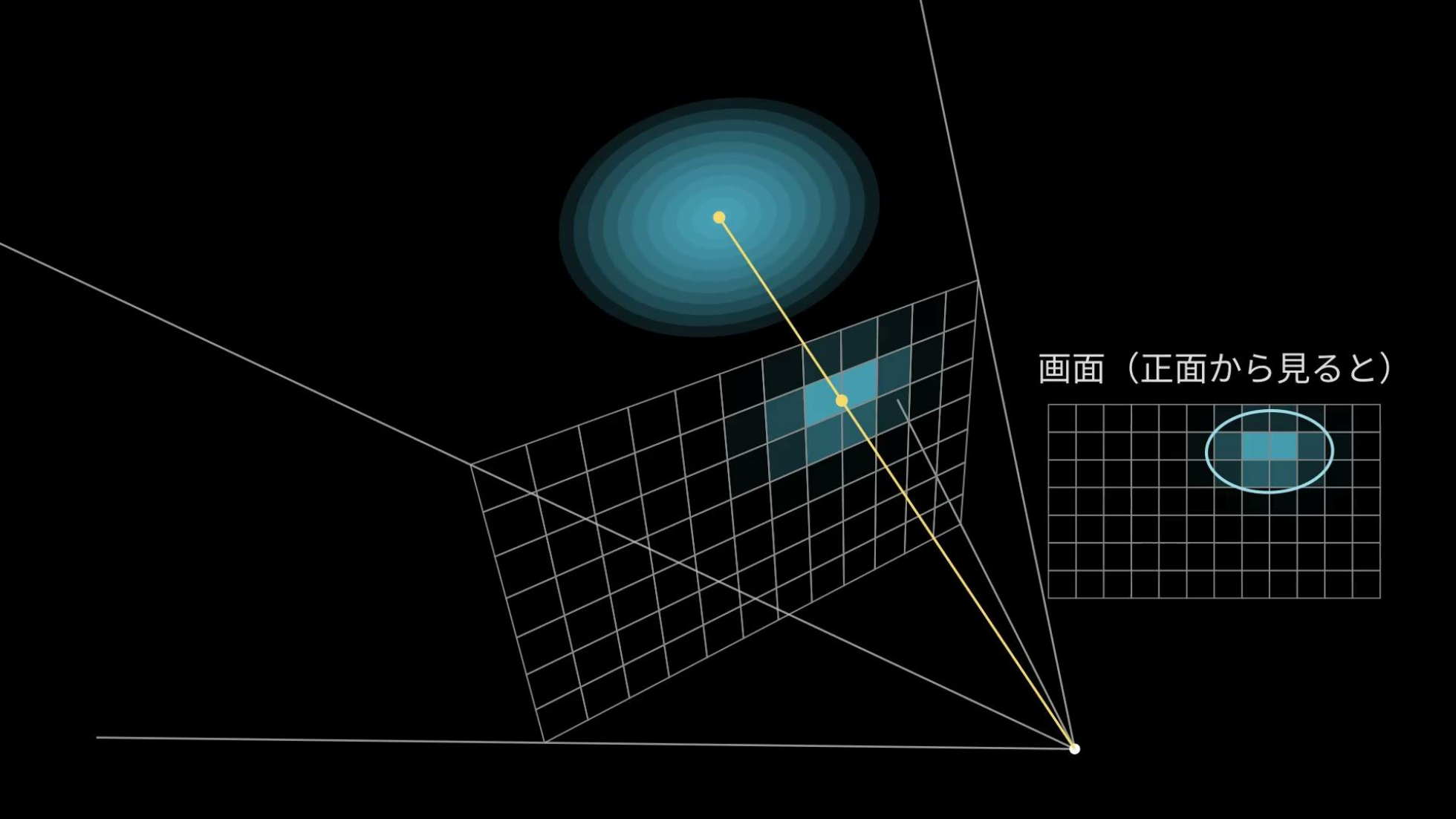


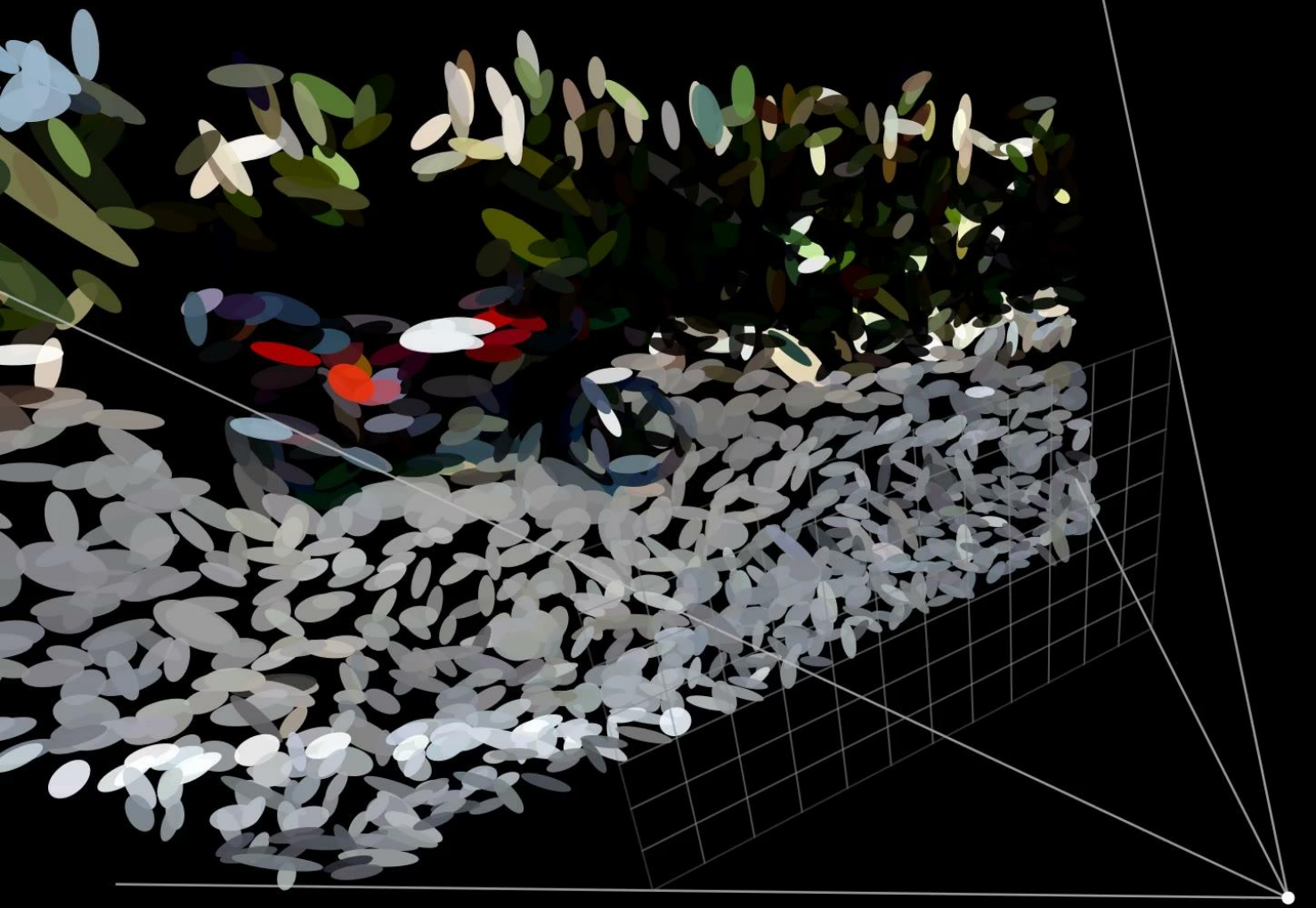


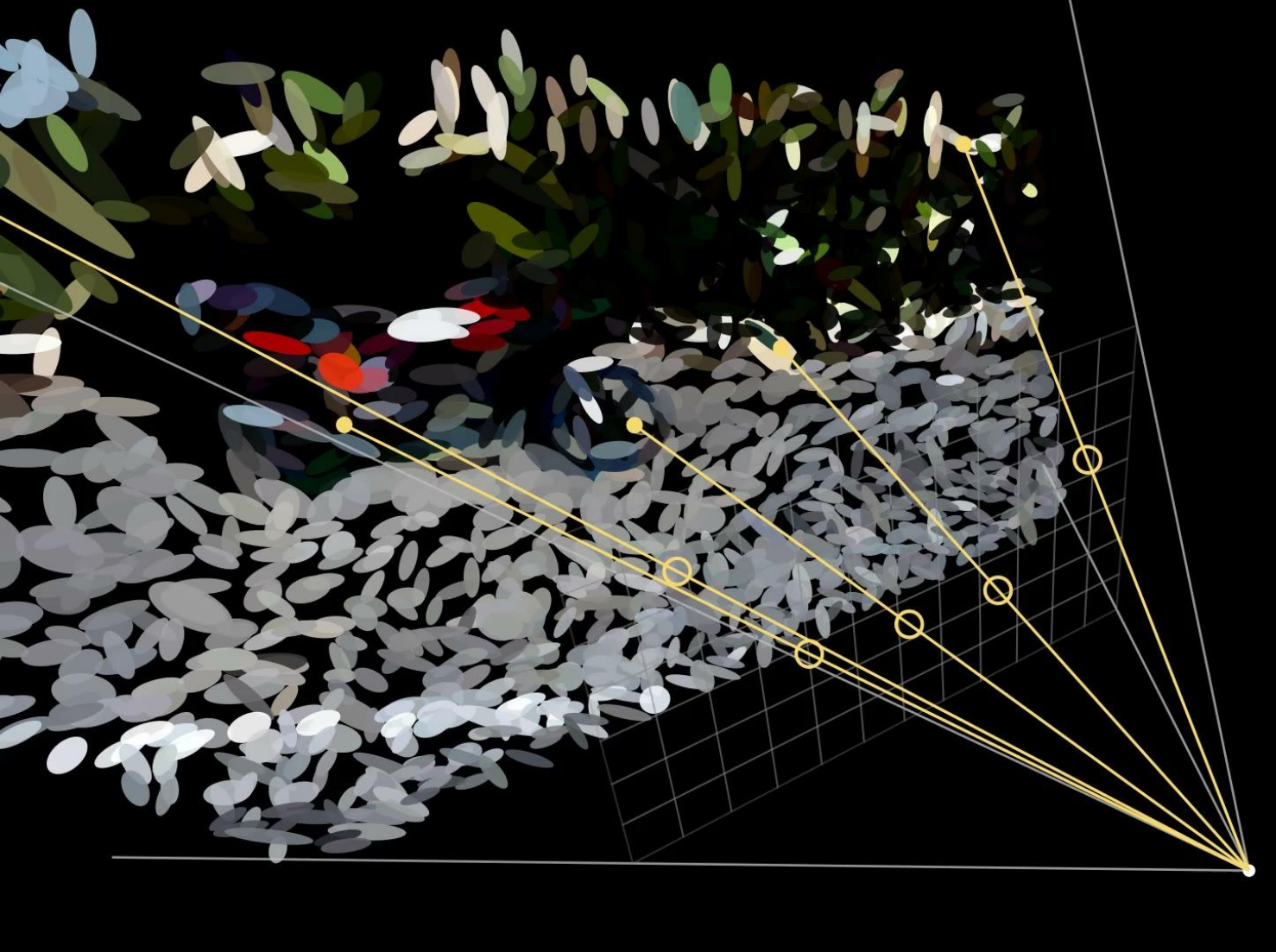


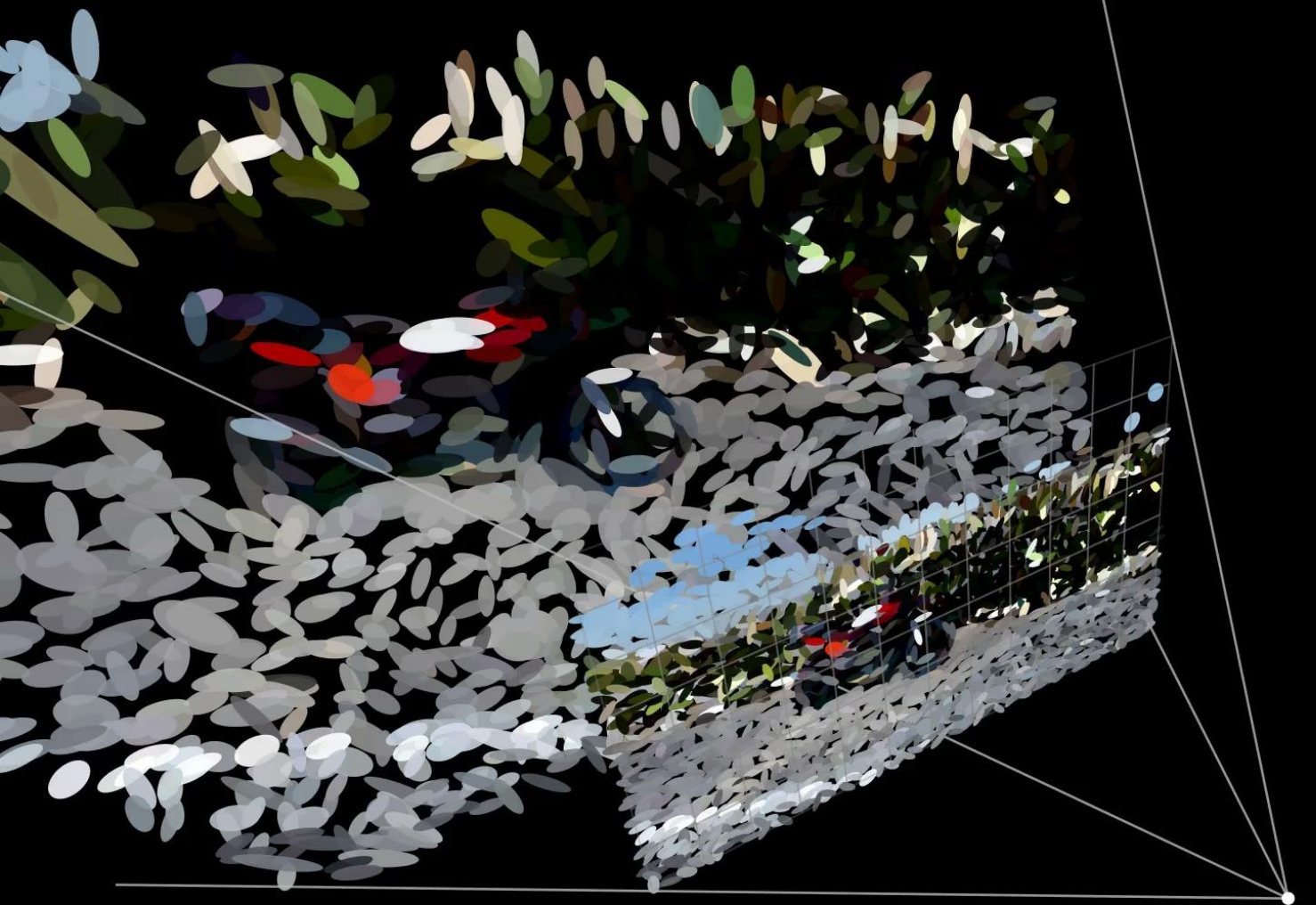


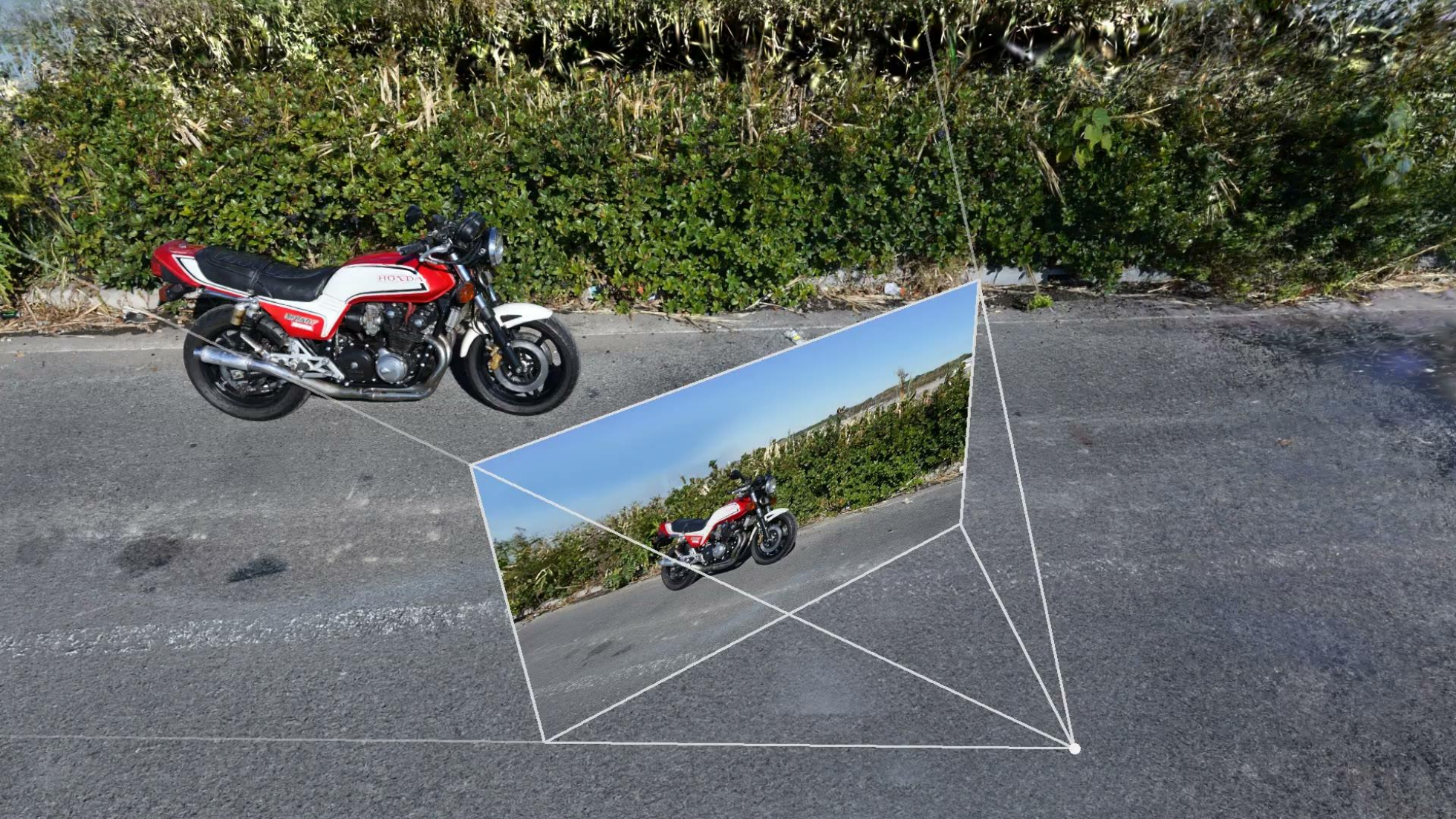
3D の投影を、上からと横から見る


画面（正面から見ると）








HONDA

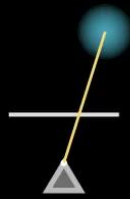
描画
Rendering



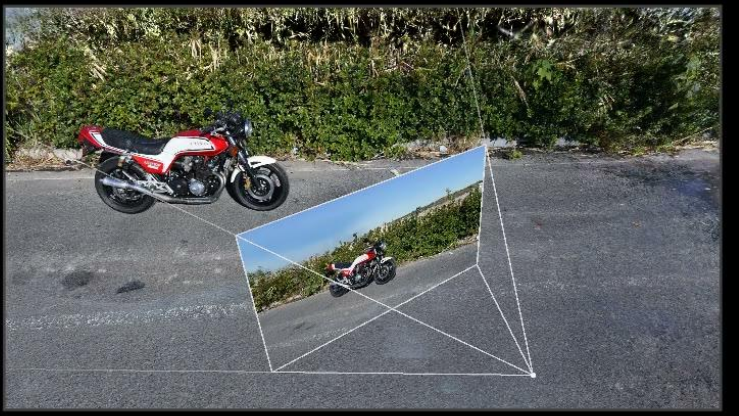
① blob の形
移動・回転・スケールで、形と位置を決める



② 1ピクセルの色
blob の色を合成する



③ スクリーンへの投影
3D の blob を、画面の上の楕円へ



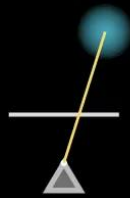
描画
Rendering



① blob の形
移動・回転・スケールで、形と位置を決める



② 1ピクセルの色
blob の色を合成する



③ スクリーンへの投影
3D の blob を、画面の上の楕円へ



3D のシーンを、画面に描ける


これだけの数の blob を、どうやって調整する？
このシーンの blob の数
9,996,282 個


これだけの数の blob を、どうやって調整する？
このシーンの blob の数
9,996,282 個

メッシュ（ポリゴン）



人が作った例

3DGS の blob



機械学習



メッシュ（ポリゴン）



人が作った例

3DGS の blob



写真から、機械学習で自動的に求まる

メッシュ（ポリゴン）



人が作った例

3DGS の blob



機械学習



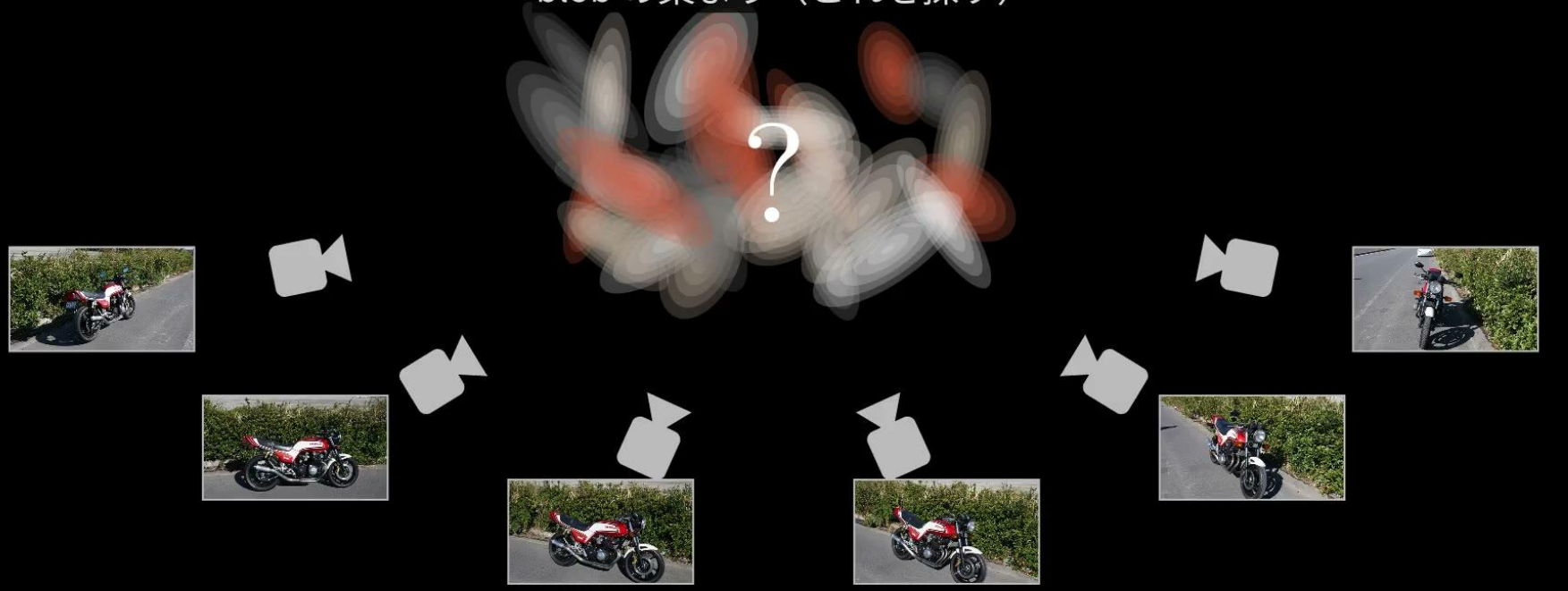
写真から、機械学習で自動的に求まる








blob の集まり（これを探す）



すべての写真を、同時に再現する

①  

3DGS　　写真（正解）

$$L = 0.026$$

ずれを測る

3DGS と写真の違い ＝ L

②

L を小さくする

③

blob を導く

L が小さいほど写真に近い

①



3DGS



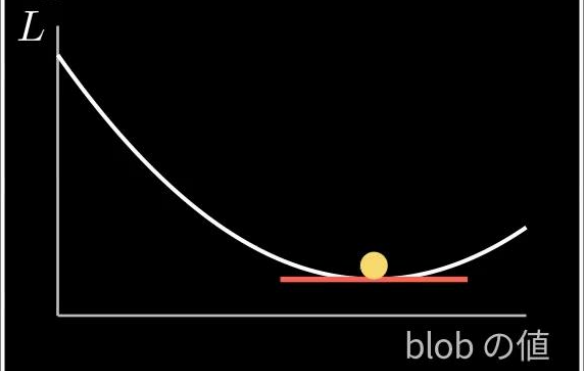
写真（正解）

$$L = 0.026$$

ずれを測る

3DGS と写真の違い ＝ L

②



L を小さくする

どちらへ動けば、L が減る？

③

blob を導く

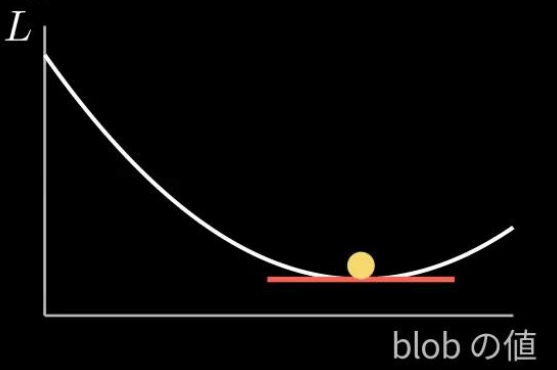
① 

3DGS　　写真（正解）

$$L = 0.026$$

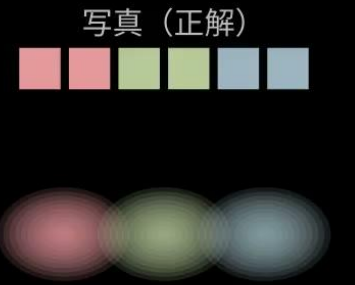
ずれを測る

3DGS と写真の違い ＝ L

② 

L を小さくする

どちらへ動けば、L が減る？

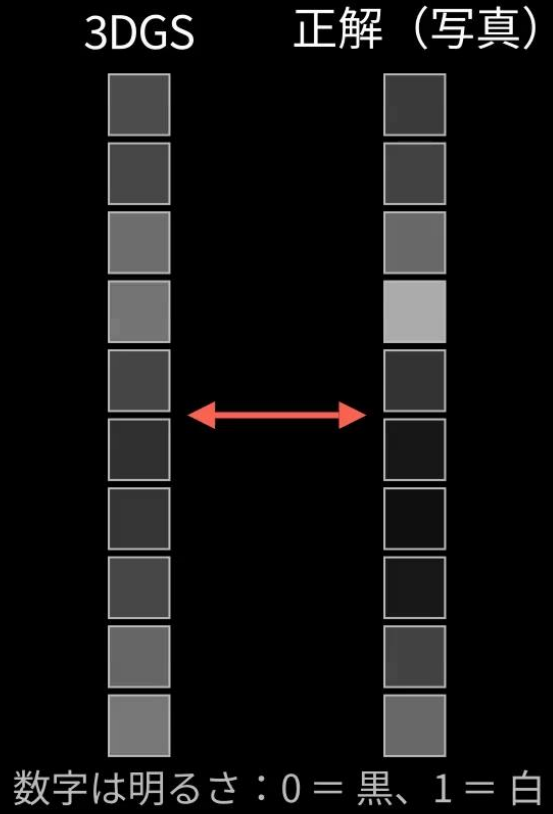
③ 

blob を導く

L が減る方へ、blob を動かす

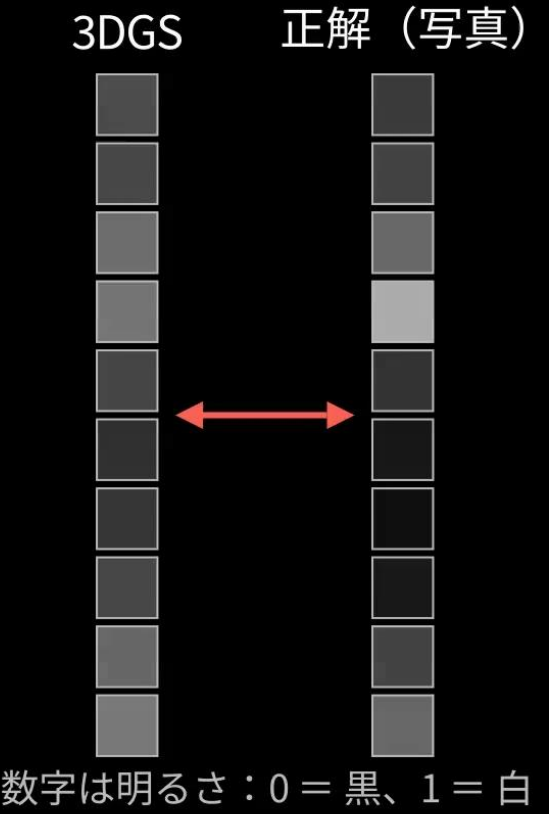
位置・形・色を同時に更新

① ずれを測る



① ずれを測る

$$
\begin{aligned}
&\text{合計} \\
&0.1428 \\
&\div 10 = 0.0143
\end{aligned}
\left\{
\begin{aligned}
0.0049 &\leftarrow (0.30 - 0.23)^2 \\
0.0004 &\leftarrow (0.28 - 0.26)^2 \\
0.0004 &\leftarrow (0.43 - 0.41)^2 \\
0.0441 &\leftarrow (0.46 - 0.67)^2 \\
0.0049 &\leftarrow (0.27 - 0.20)^2 \\
0.0100 &\leftarrow (0.19 - 0.09)^2 \\
0.0225 &\leftarrow (0.21 - 0.06)^2 \\
0.0324 &\leftarrow (0.28 - 0.10)^2 \\
0.0196 &\leftarrow (0.40 - 0.26)^2 \\
0.0036 &\leftarrow (0.47 - 0.41)^2
\end{aligned}
\right.
$$



① ずれを測る

$$
\begin{aligned}
&0.0049 \leftarrow (0.30-0.23)^2\\
&0.0004 \leftarrow (0.28-0.26)^2\\
&0.0004 \leftarrow (0.43-0.41)^2\\
&0.0441 \leftarrow (0.46-0.67)^2\\
&0.0049 \leftarrow (0.27-0.20)^2\\
&0.0100 \leftarrow (0.19-0.09)^2\\
&0.0225 \leftarrow (0.21-0.06)^2\\
&0.0324 \leftarrow (0.28-0.10)^2\\
&0.0196 \leftarrow (0.40-0.26)^2\\
&0.0036 \leftarrow (0.47-0.41)^2
\end{aligned}
$$

合計 0.1428

$\div 10 = 0.0143$

$$\mathrm{MSE}$$

$$\mathrm{Mean}\quad \mathrm{Squared}\quad \mathrm{Error}$$

平均二乗誤差（MSE）

① ずれを測る

$$
\begin{aligned}
&0.0049 \leftarrow (0.30-0.23)^2\\
&0.0004 \leftarrow (0.28-0.26)^2\\
&0.0004 \leftarrow (0.43-0.41)^2\\
&0.0441 \leftarrow (0.46-0.67)^2\\
&0.0049 \leftarrow (0.27-0.20)^2\\
&0.0100 \leftarrow (0.19-0.09)^2\\
&0.0225 \leftarrow (0.21-0.06)^2\\
&0.0324 \leftarrow (0.28-0.10)^2\\
&0.0196 \leftarrow (0.40-0.26)^2\\
&0.0036 \leftarrow (0.47-0.41)^2
\end{aligned}
$$

合計 0.1428

$\div 10 = 0.0143$

MSE

Mean Squared Error

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{N}\sum(\,\text{3DGS} - \text{正解}\,)^2$$

N：ピクセルの数

① ずれを測る



3DGS



写真（正解）



ずれ

この写真のＬ（各画素の二乗誤差の平均）＝ 0.026

① ずれを測る



$L_1 = 0.024$



$L_2 = 0.026$



$L_3 = 0.025$



$L_4 = 0.029$



$L_5 = 0.029$



$L_6 = 0.031$

L = 各写真の L の平均 = 0.027

① ずれを測る

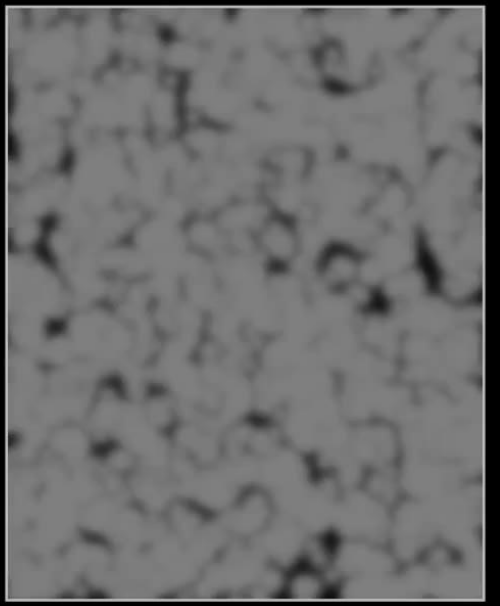
学習時間



$L = 0.045$　$L = 0.026$　$L = 0.012$　$L = 0.006$

L＝0なら、すべての写真とぴったり同じ

② L を小さくする



最初の blob

$$L = 0.034$$

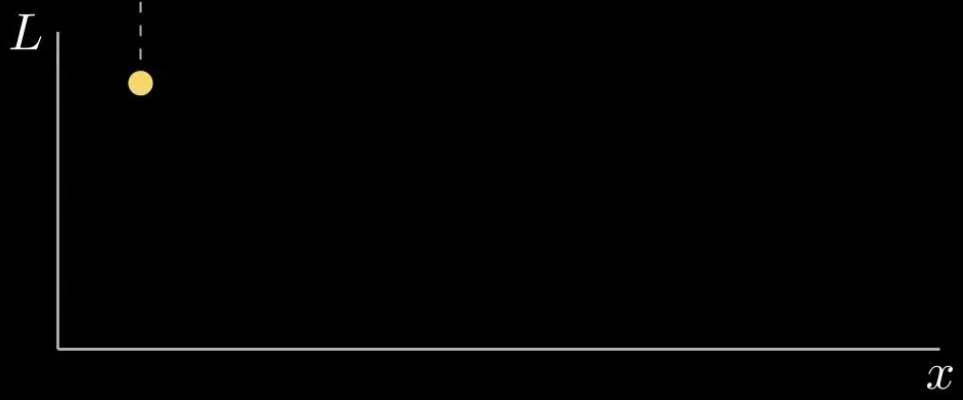


正解

② L を小さくする

3DGS



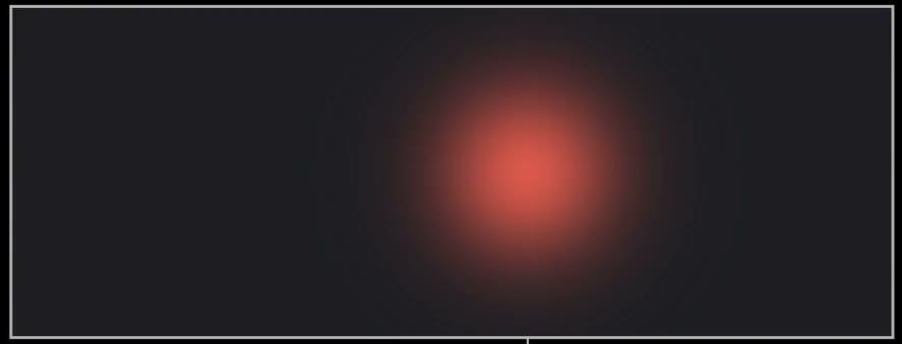


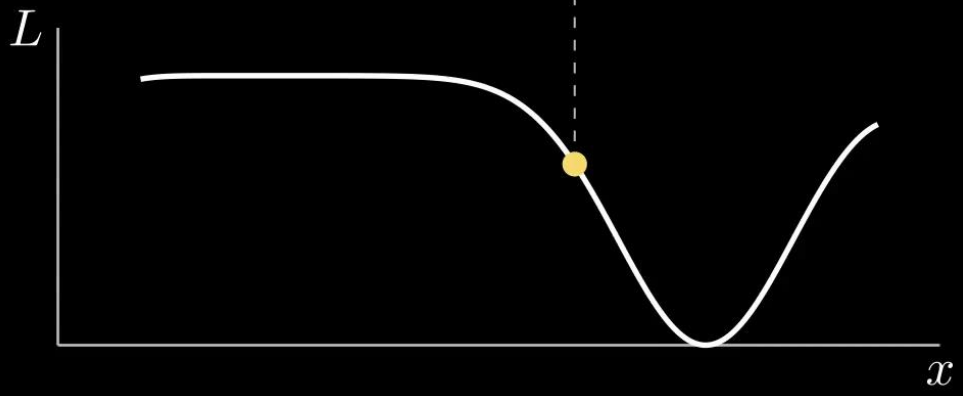
正解



② L を小さくする

3DGS



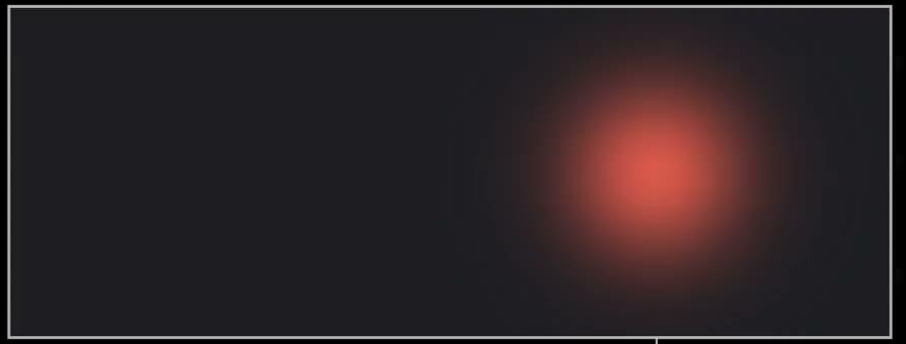


正解



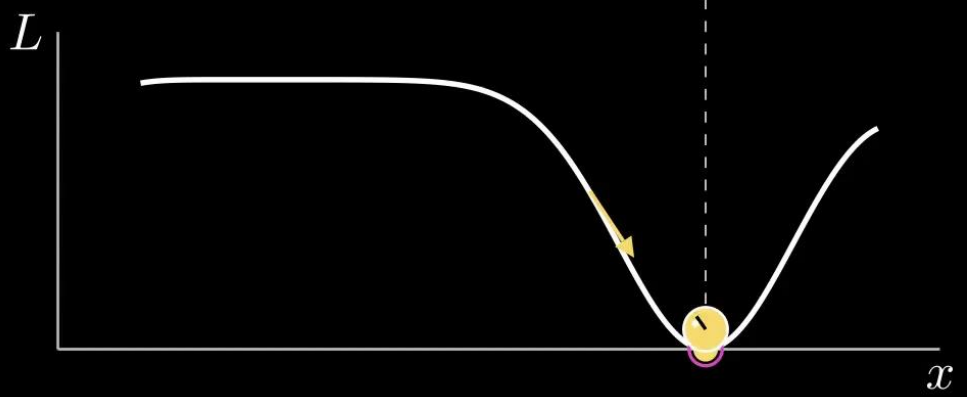
② Lを小さくする

3DGS



正解

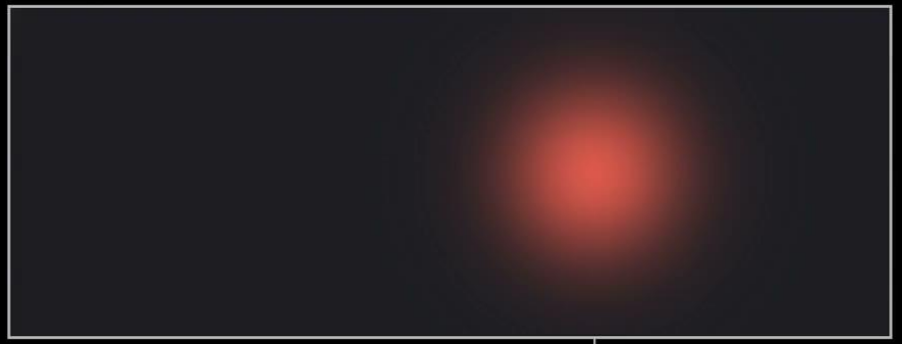




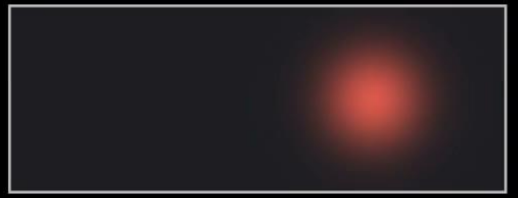
傾きを手がかりに、Lが下がる方向へ

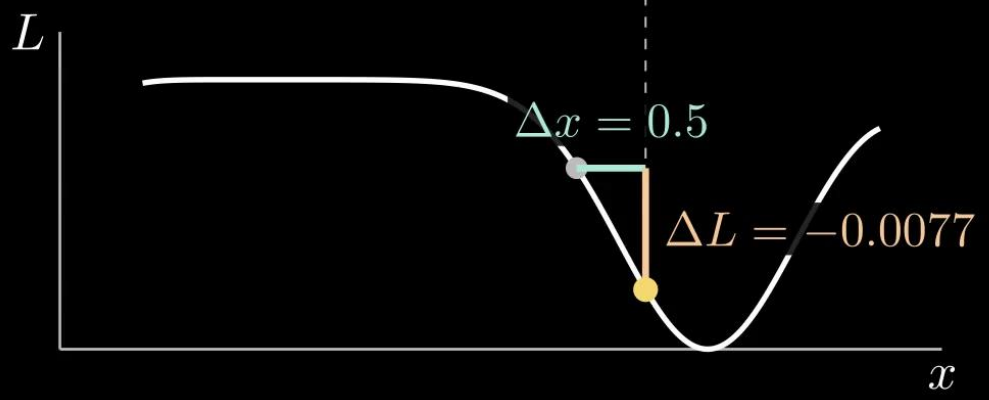
② Lを小さくする

3DGS



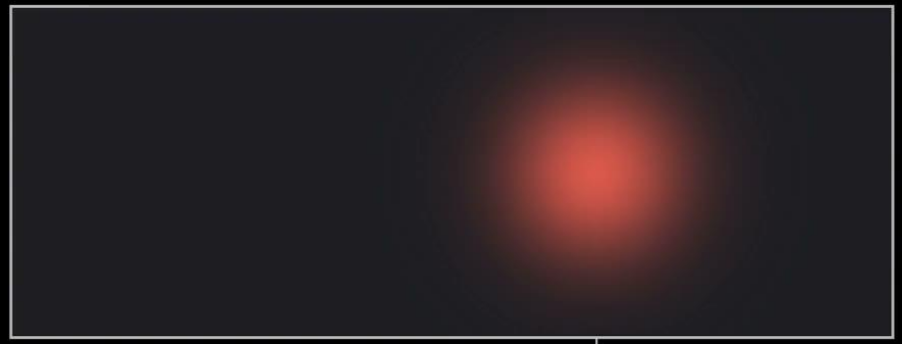
正解





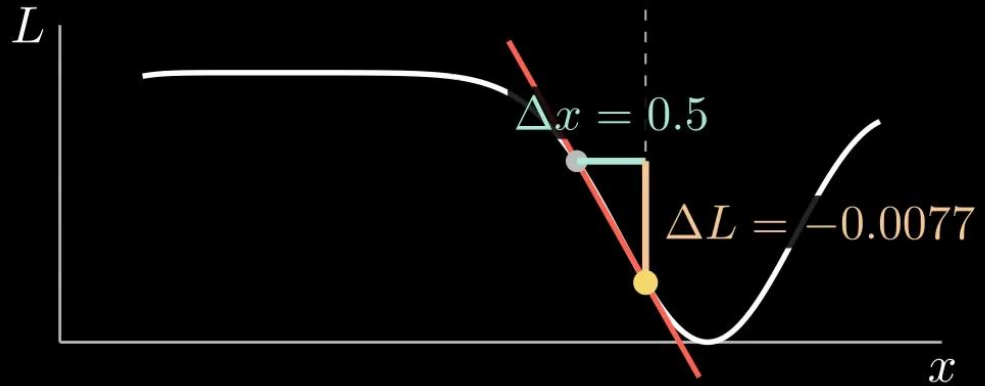
② L を小さくする

3DGS



正解





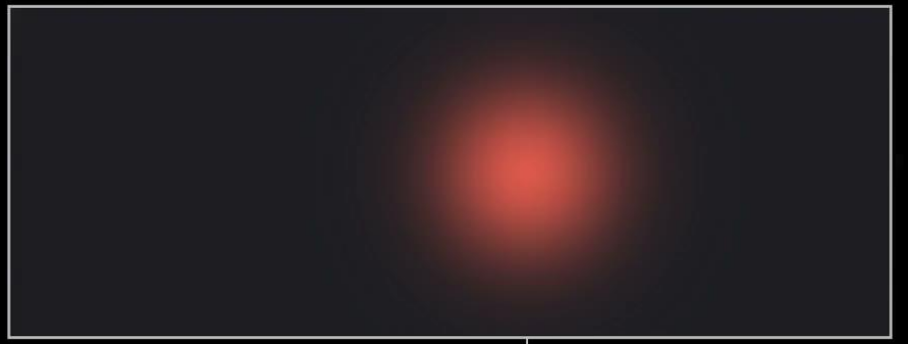
$$\frac{\Delta L}{\Delta x} = \frac{-0.0077}{0.5} = -0.0153$$

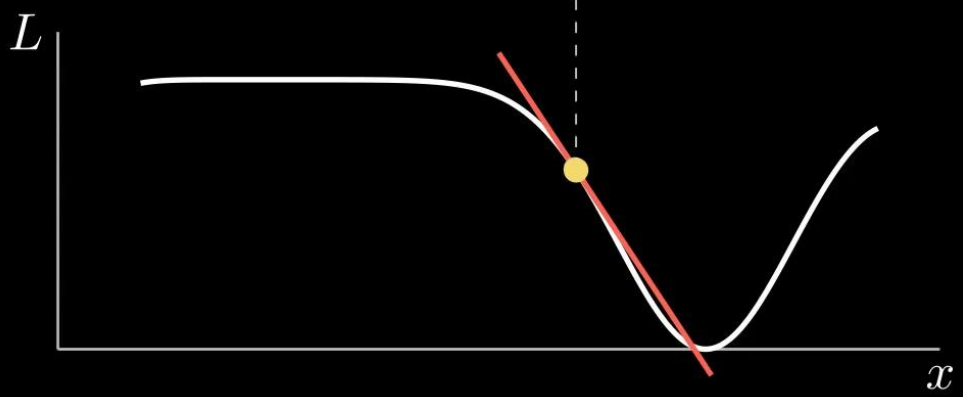
x を 1 動かすと、L がどれだけ変わるか

比 ΔL / Δx ＝ 1 あたりの変化 ＝ 傾き

② Lを小さくする

3DGS





正解

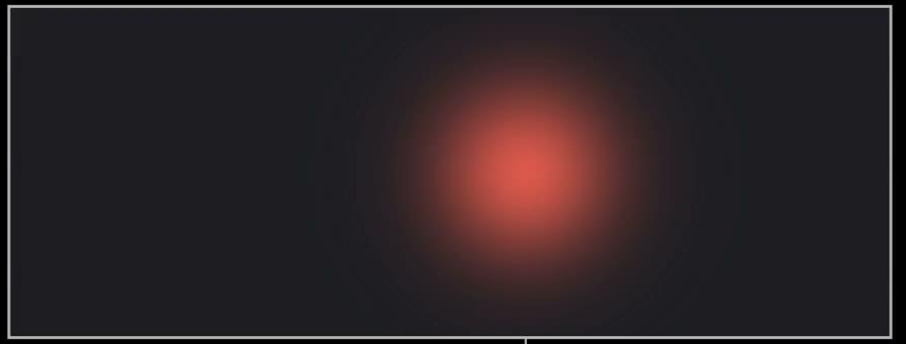


Δx	$\frac{\Delta L}{\Delta x}$
0.5	-0.0153
0.2	-0.0145
0.05	-0.0135
0.01	-0.0132
	$\rightarrow -0.0131$

比はある値に近づき、2点を通る線は接線になる

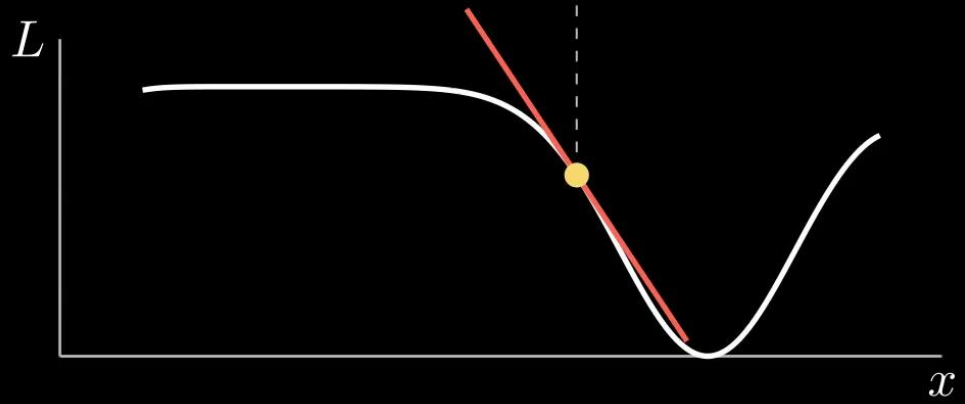
② Lを小さくする

3DGS



正解





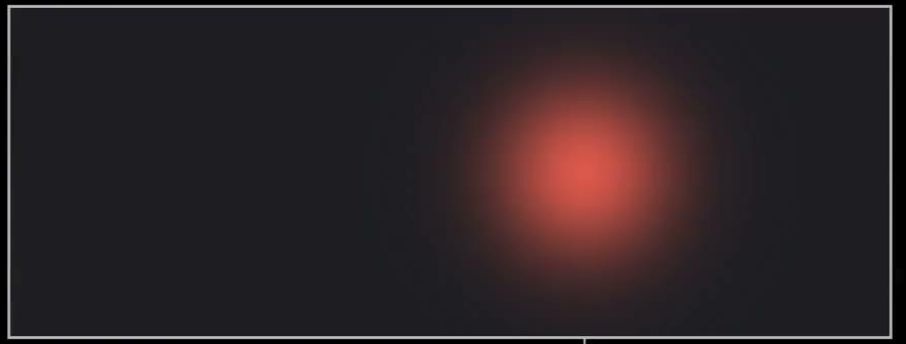
$$\frac{dL}{dx} = -0.0131$$

微分

その近づく値が微分：その場所での傾き

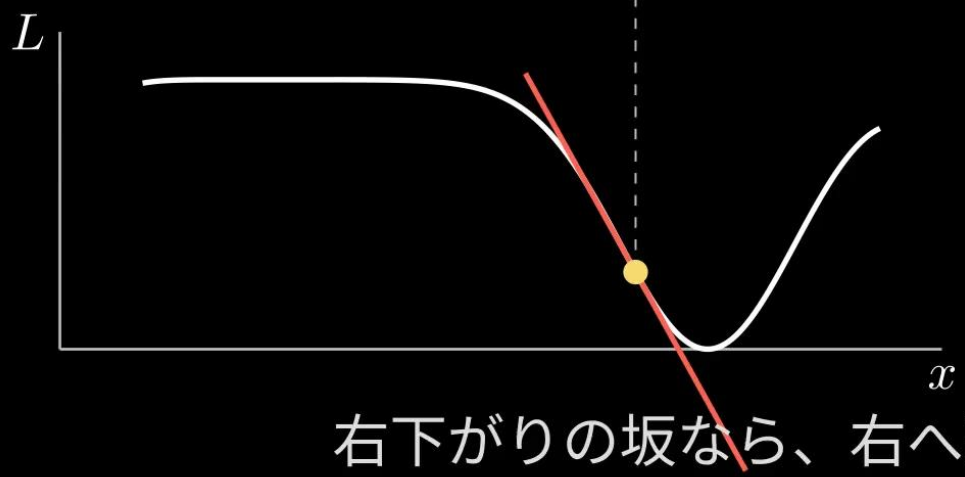
② Lを小さくする

3DGS



正解





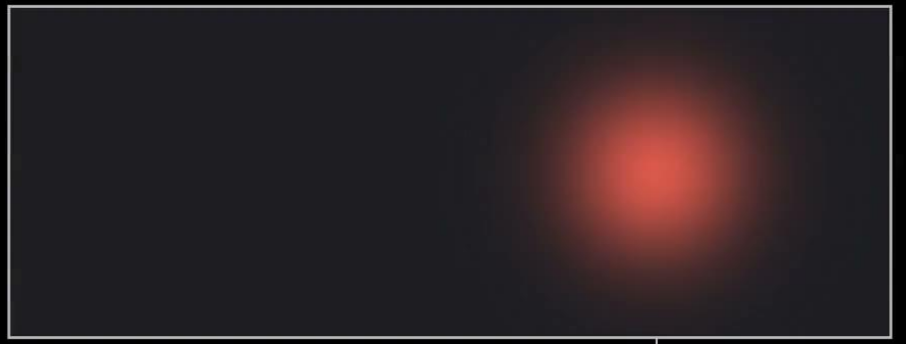
$$\frac{dL}{dx} = -0.0156$$

微分

右下がりの坂なら、右へ進むとLが下がる

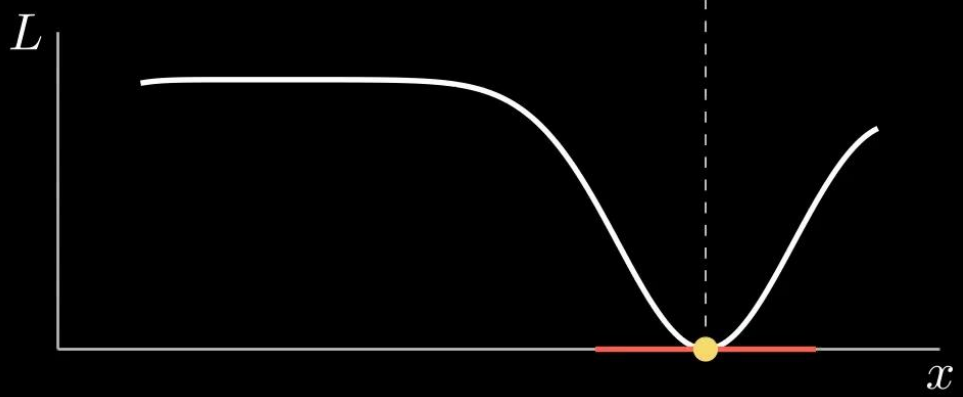
② Lを小さくする

3DGS



正解





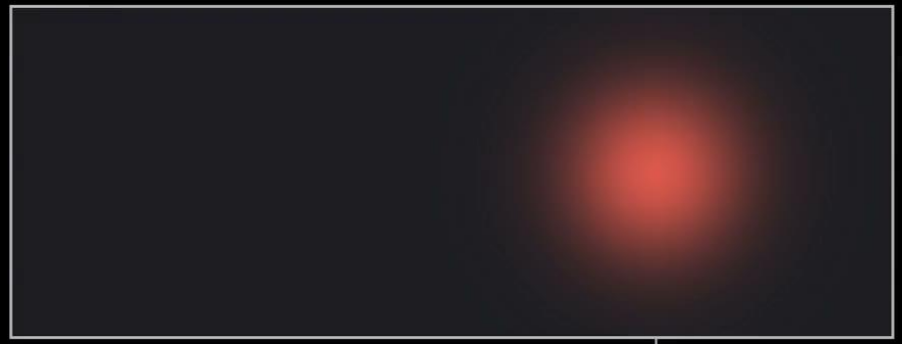
$$\frac{dL}{dx} = +0.0000$$

微分

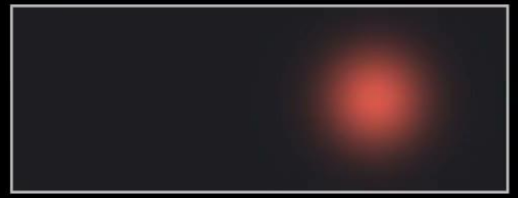
つまり：下り坂の方へ進めば、Lは下がる

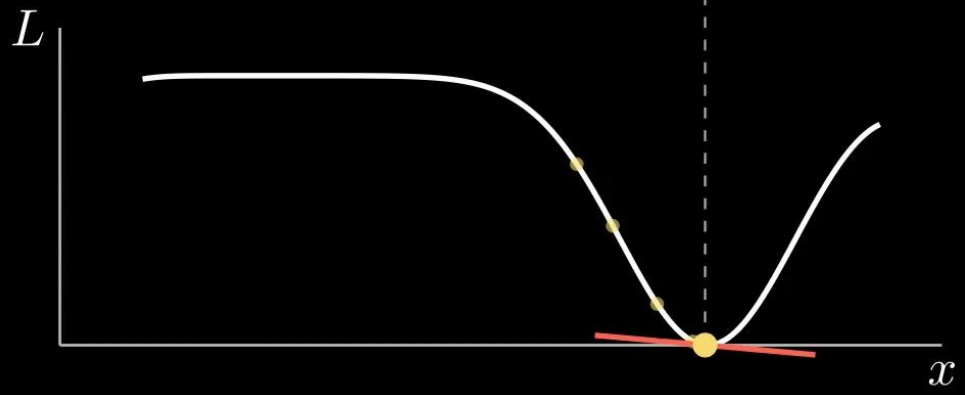
② L を小さくする

3DGS



正解

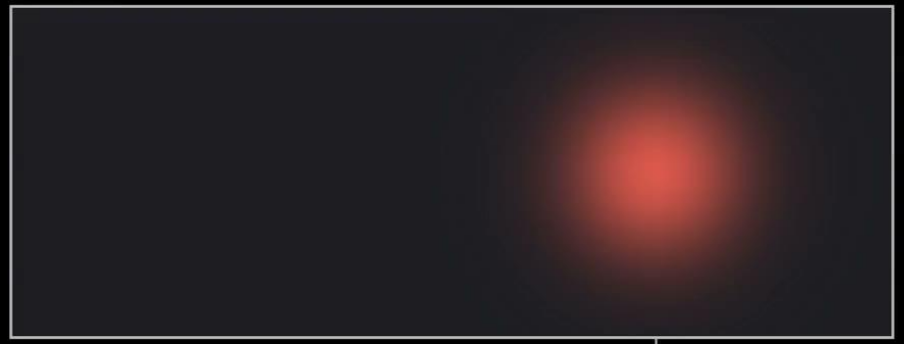




$$x \leftarrow x - \text{歩幅} \times \frac{dL}{dx}$$

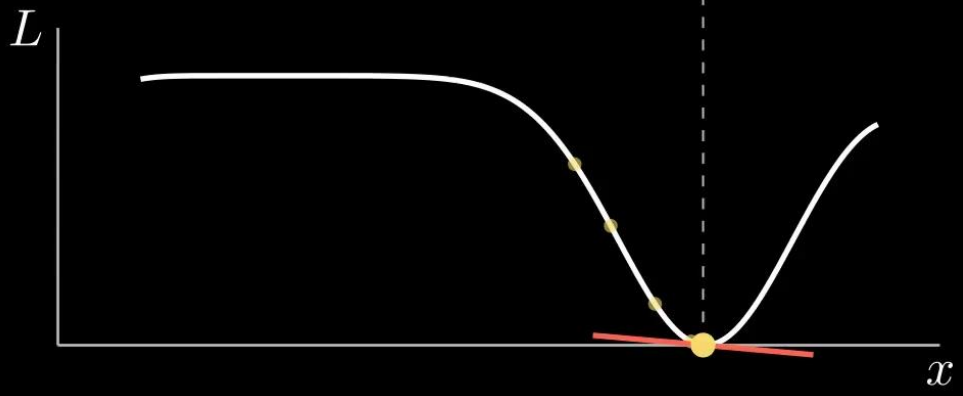
② L を小さくする

3DGS



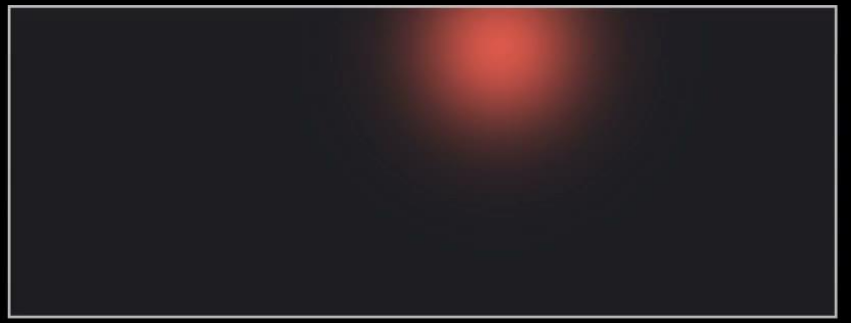
正解



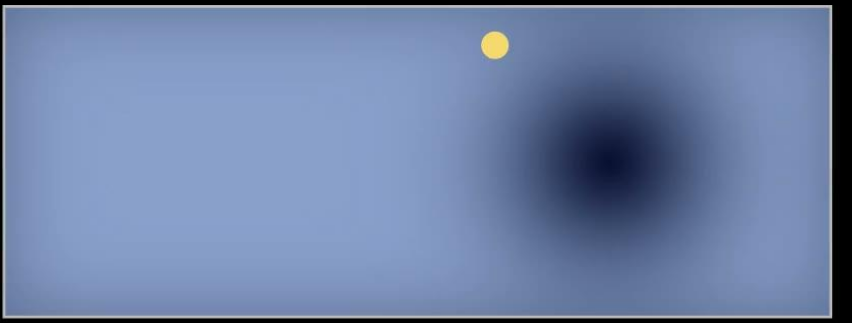


$$x \leftarrow x - \text{歩幅} \times \frac{dL}{dx}$$

② L を小さくする



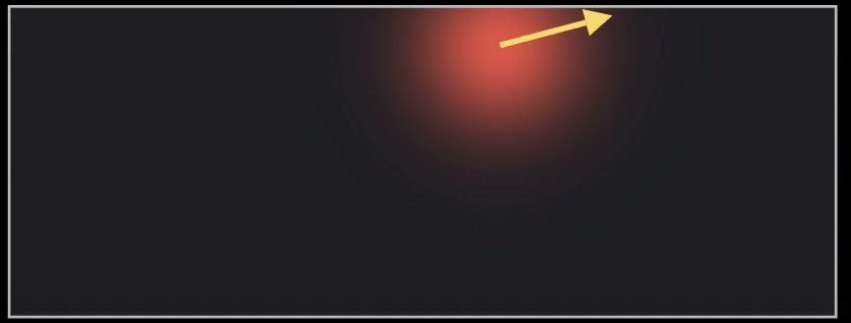
blob の位置 (x, y)



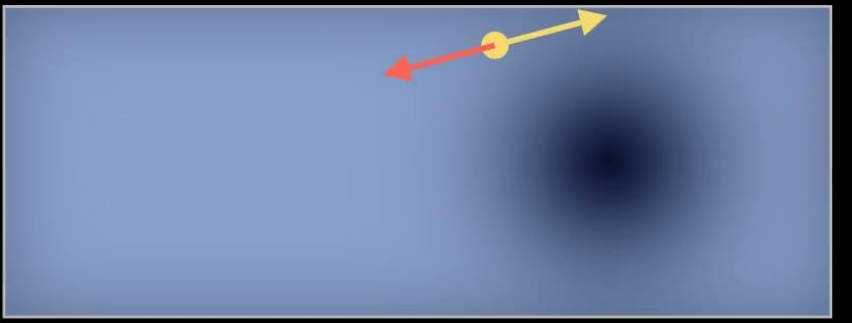
L

② L を小さくする

勾配 $\left(\frac{\partial L}{\partial x}, \frac{\partial L}{\partial y}\right)$



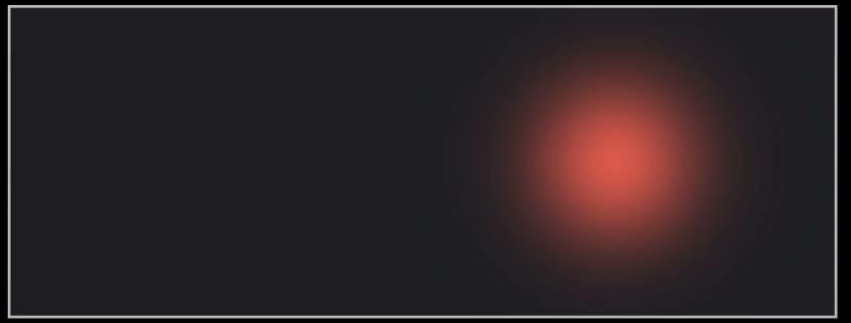
blob の位置 (x, y)



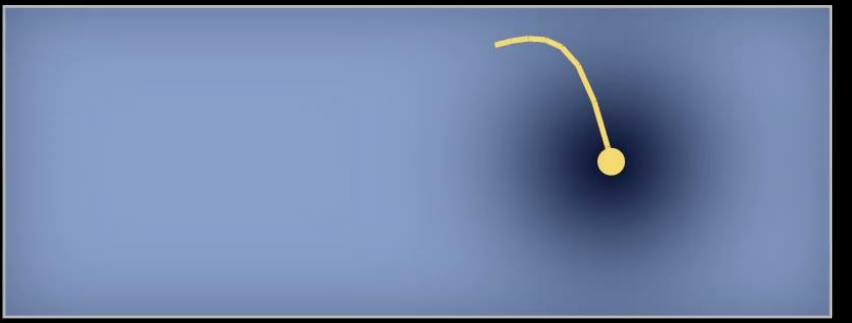
L

勾配の反対が、一番急な下り坂

② L を小さくする



blob の位置 (x, y)

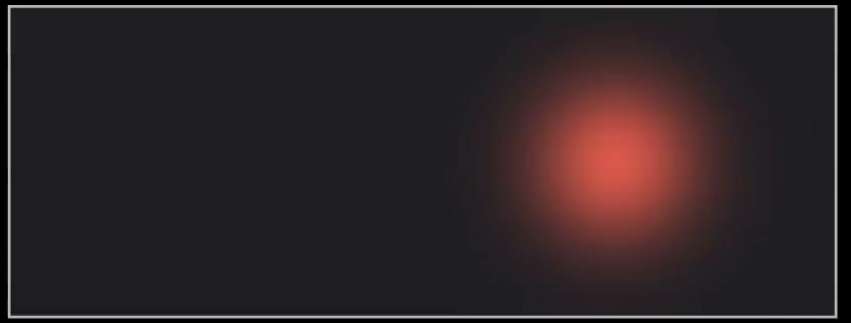


L

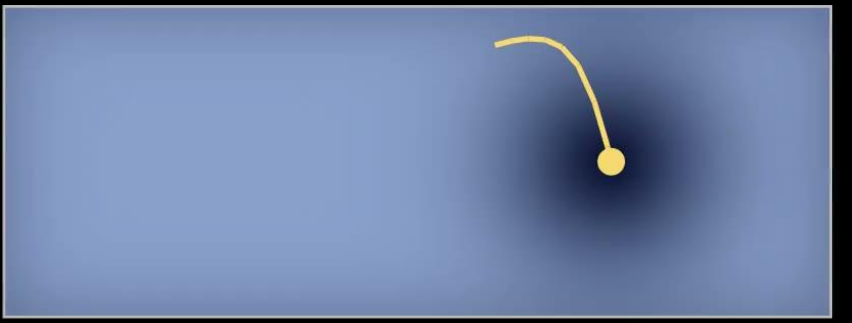
勾配降下法

① 勾配を計算する
② その反対（下り坂）へ少し進む
③ 反復

② L を小さくする



blob の位置 (x, y)

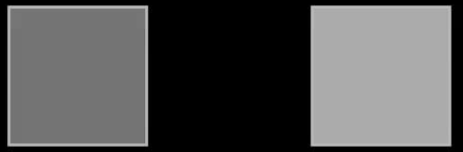


L

勾配降下法

① 勾配を計算する
② その反対（下り坂）へ少し進む
③ 反復

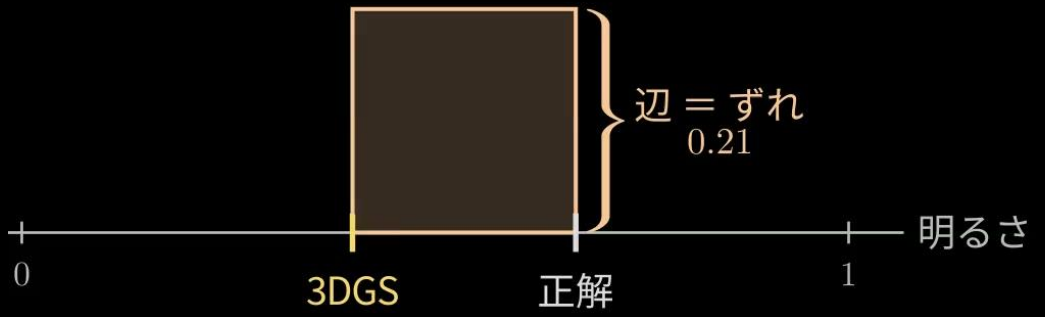
② L を小さくする



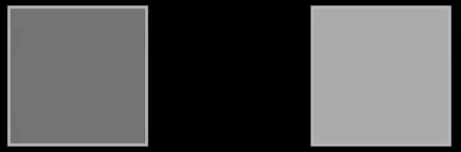
3DGS 0.46　　正解 0.67

$$(\text{3DGS} - \text{正解})^2 = \text{正方形の面積}$$

$$(0.46 - 0.67)^2 = 0.0441$$



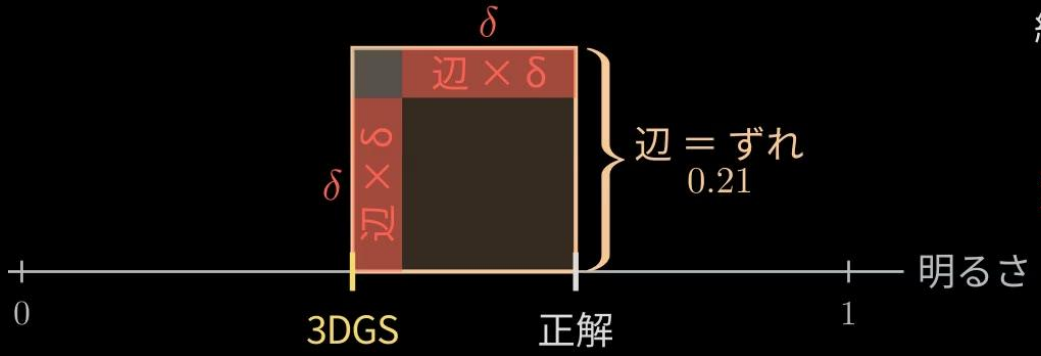
② L を小さくする



3DGS 0.46　　正解 0.67

$$(\text{3DGS} - \text{正解})^2 = \text{正方形の面積}$$

$$(0.46 - 0.67)^2 = 0.0441$$



増えた面積 $\approx 2 \times$ 辺 $\times \delta$

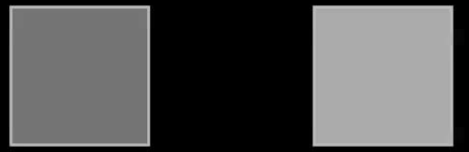
細い帯が２本（角の小さな正方形は無視できる）

$$\text{変化の割合} = 2(\text{3DGS} - \text{正解}) = -0.42$$

微分（微積分の公式と同じ）

細い帯が2本 → 傾きの大きさは辺の2倍

② L を小さくする

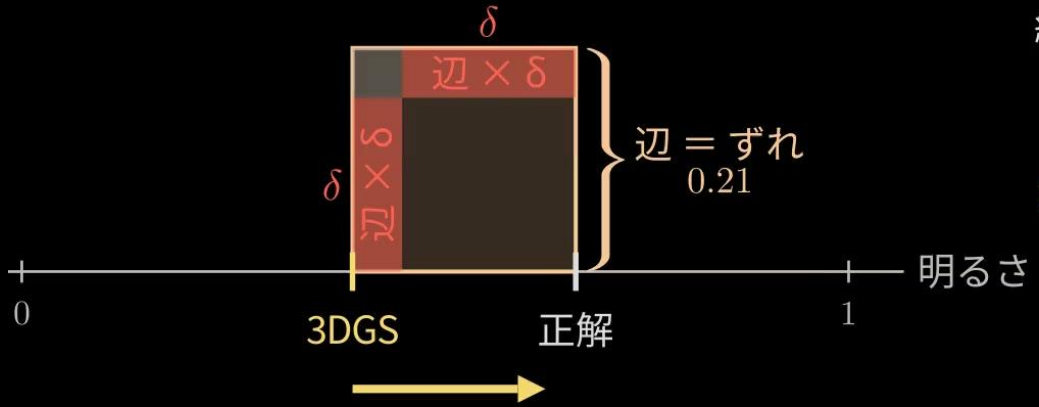


$$(\text{3DGS} - \text{正解})^2 = \text{正方形の面積}$$

$$(0.46 - 0.67)^2 = 0.0441$$

増えた面積 $\approx 2 \times$ 辺 $\times \delta$

細い帯が２本（角の小さな正方形は無視できる）

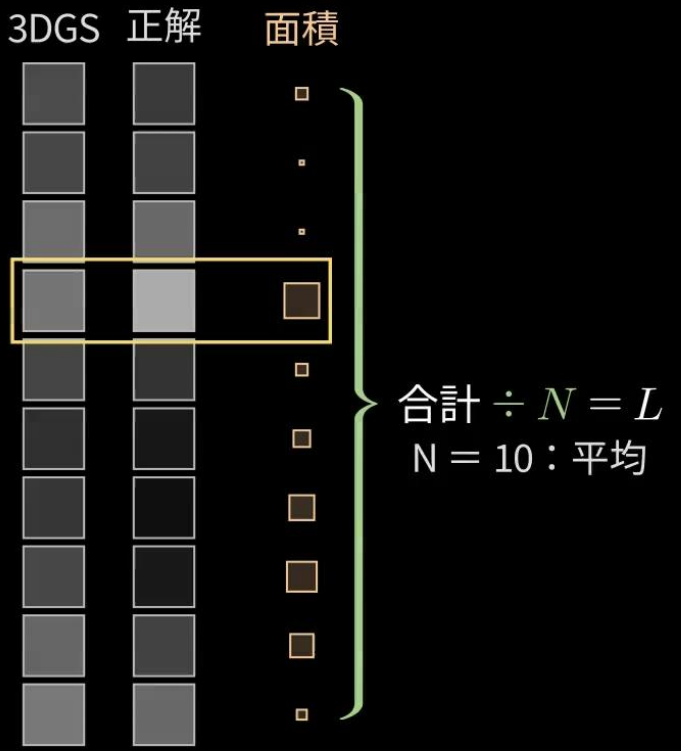


$$\text{変化の割合} = 2(\text{3DGS} - \text{正解}) = -0.42$$

微分（微積分の公式と同じ）

傾きがマイナス → 明るくすると L が下がる

② L を小さくする



2：帯が 2 本

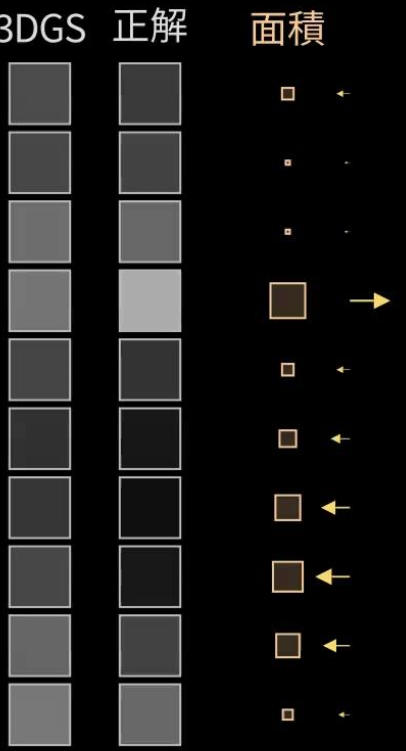
$$\frac{\partial L}{\partial 3\mathrm{DGS}_i} = \frac{2}{N}\left(3\mathrm{DGS}\,i - \text{正解}\,i\right)$$

N：平均で割った分

$$= \frac{2}{10} \times (0.46 - 0.67) = -0.042$$

1ピクセルの傾きも N で割る

② L を小さくする



2：帯が 2 本

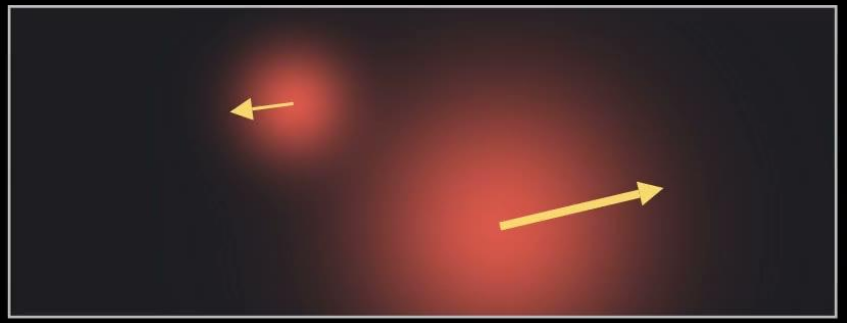
$$\frac{\partial L}{\partial 3\mathrm{DGS}_i} = \frac{2}{N}\left(3\mathrm{DGS}\,i - 正解\,i\right)$$

N：平均で割った分

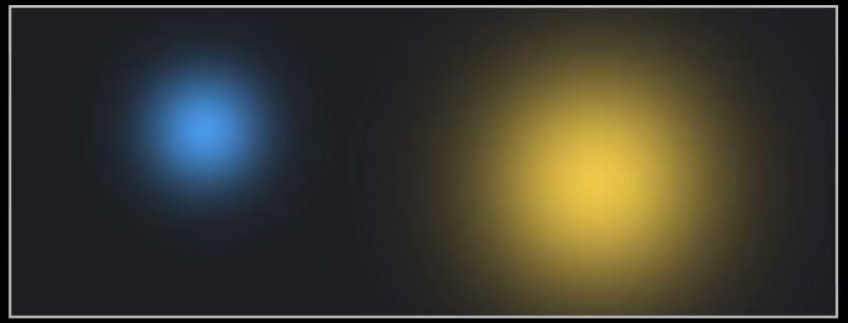
$$= \frac{2}{10} \times (0.46 - 0.67) = -0.042$$

どのピクセルも同じ式で、明るくするか暗くするか、その量もわかる

② L を小さくする



blob 2つ：位置・大きさ・色



正解

	x	y	大きさ	色
blob 1	-1.00	$+0.45$	0.30	
blob 2	$+0.60$	-0.50	0.75	

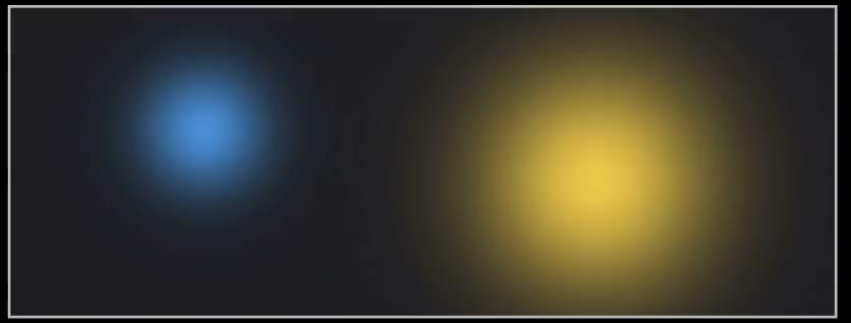
$L = 0.0268$

勾配降下法

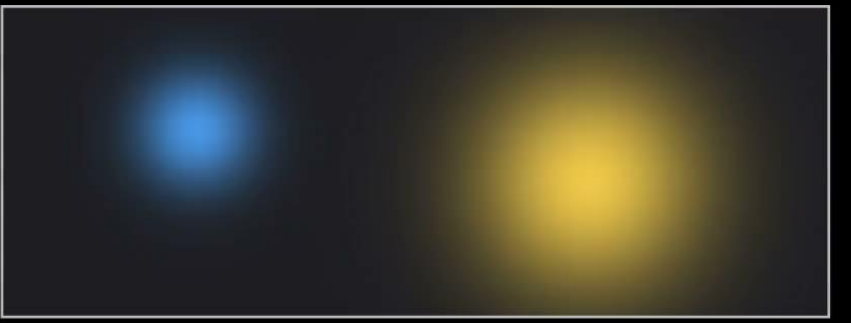
① 勾配を計算する
② その反対（下り坂）へ少し進む
③ 反復

位置・大きさ・色：12個の値の傾きを計算する

② L を小さくする



blob 2つ：位置・大きさ・色



正解

	x	y	大きさ	色
blob 1	-1.70	$+0.25$	0.34	
blob 2	$+1.35$	-0.15	0.62	

$L = 0.0000$

勾配降下法

① 勾配を計算する
② その反対（下り坂）へ少し進む
③ 反復

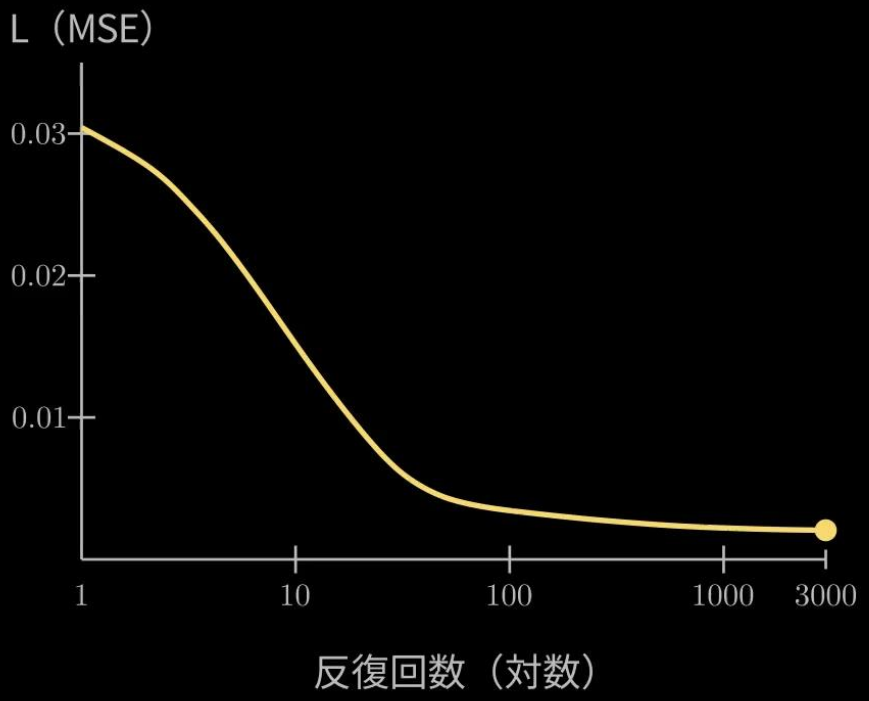
② L を小さくする



正解



回数 3,000　　$L = 0.0021$



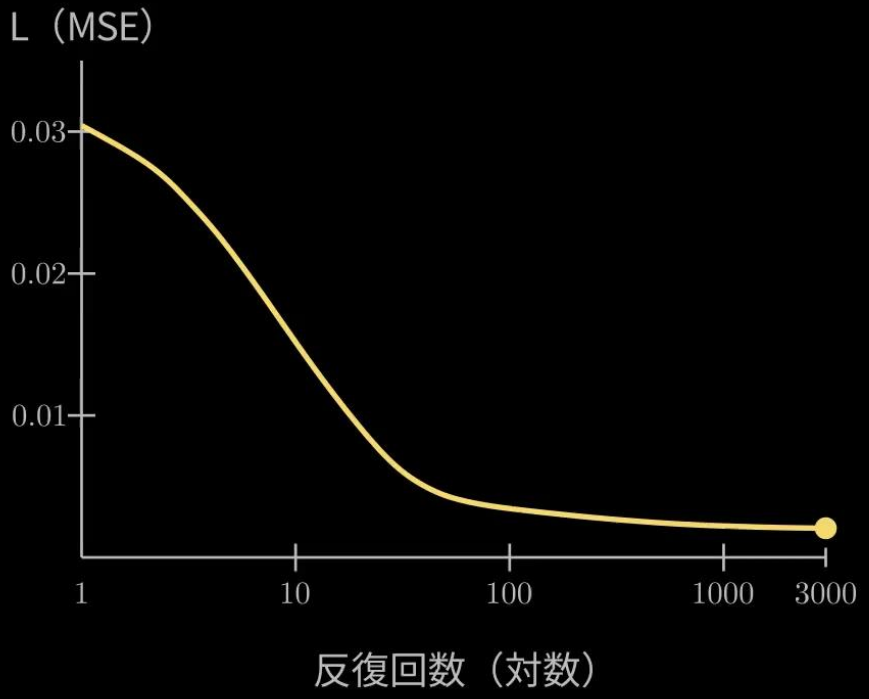
② L を小さくする



正解



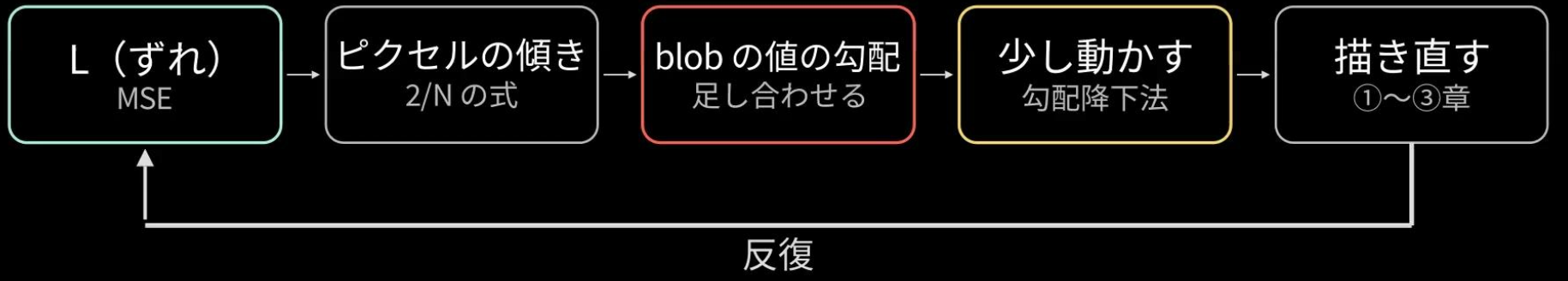
回数 3,000　　$L = 0.0021$



③ L で blob を導く

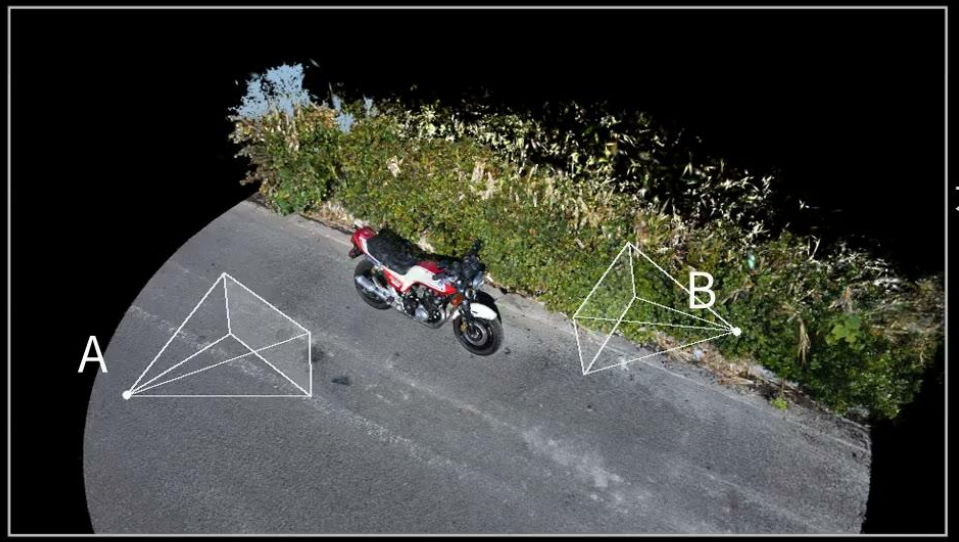

L（ずれ）
MSE
ピクセルの傾き
2/N の式
blob の値の勾配
足し合わせる
少し動かす
勾配降下法
描き直す
①〜③章
反復

③ L で blob を導く



微分を足し合わせるのは、アルゴリズムが自動でやる：自動微分

③ L で blob を導く



カメラ A

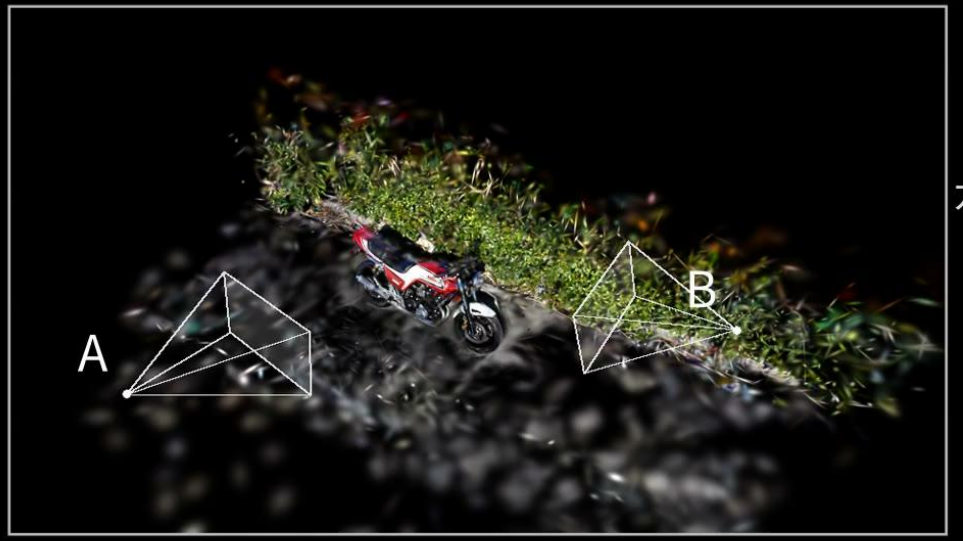
カメラ B

正解画像

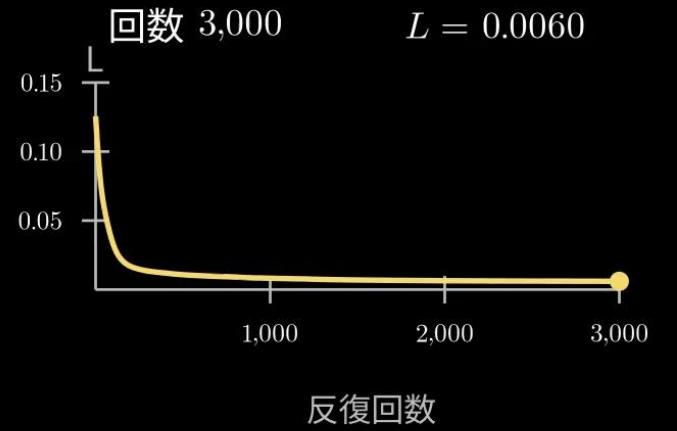




③ L で blob を導く


A
B

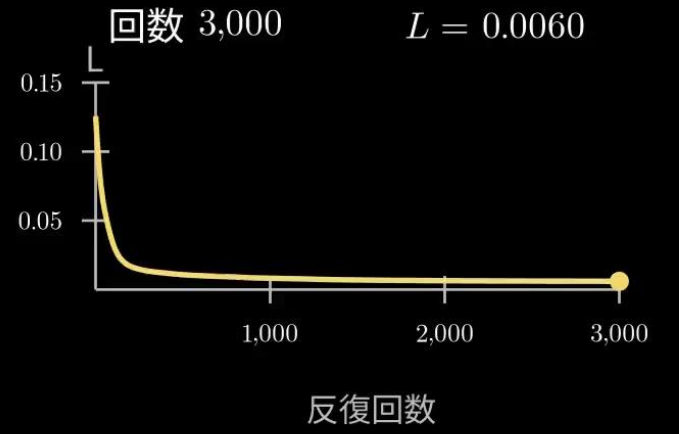

3DGS
正解画像
カメラ A
カメラ B


回数 3,000
$L = 0.0060$
L
0.15
0.10
0.05
1,000
2,000
3,000
反復回数

③ L で blob を導く


A
B


3DGS
正解画像
カメラ A
カメラ B


回数 3,000
$L = 0.0060$
L
0.15
0.10
0.05
1,000
2,000
3,000
反復回数

描画
Rendering

学習
Training

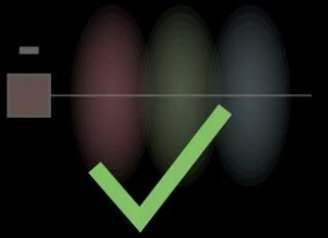
応用
Applications

① Σ



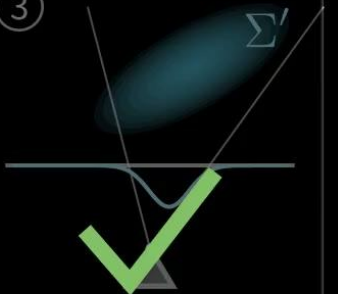
blob の形
The shape of a blob

② α, T



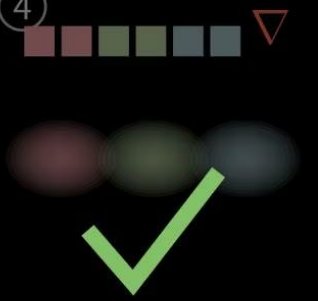
1ピクセルの色
The color of one pixel

③ Σ'



スクリーンへの投影
Projection onto the screen

④ ∇



blob を学習する
Learning the blobs

⑤



エンタメでの応用
Applications in entertainment

5



エンタメでの応用
Applications in entertainment

材質：見る向きで色が変わる

光：撮影した日のまま

動き：止まったまま

⑤



エンタメでの応用
Applications in entertainment

⑤-1 材質を表す
Spherical Harmonics

⑤-2 光を変える
Relighting

⑤-3 動きをつける
4DGS



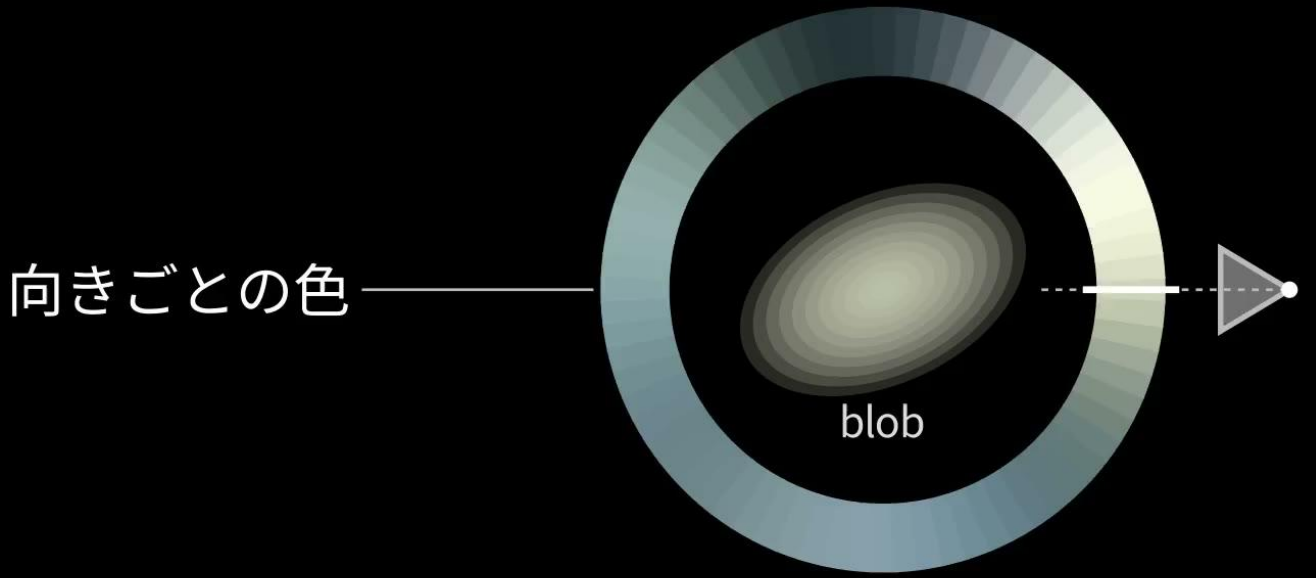


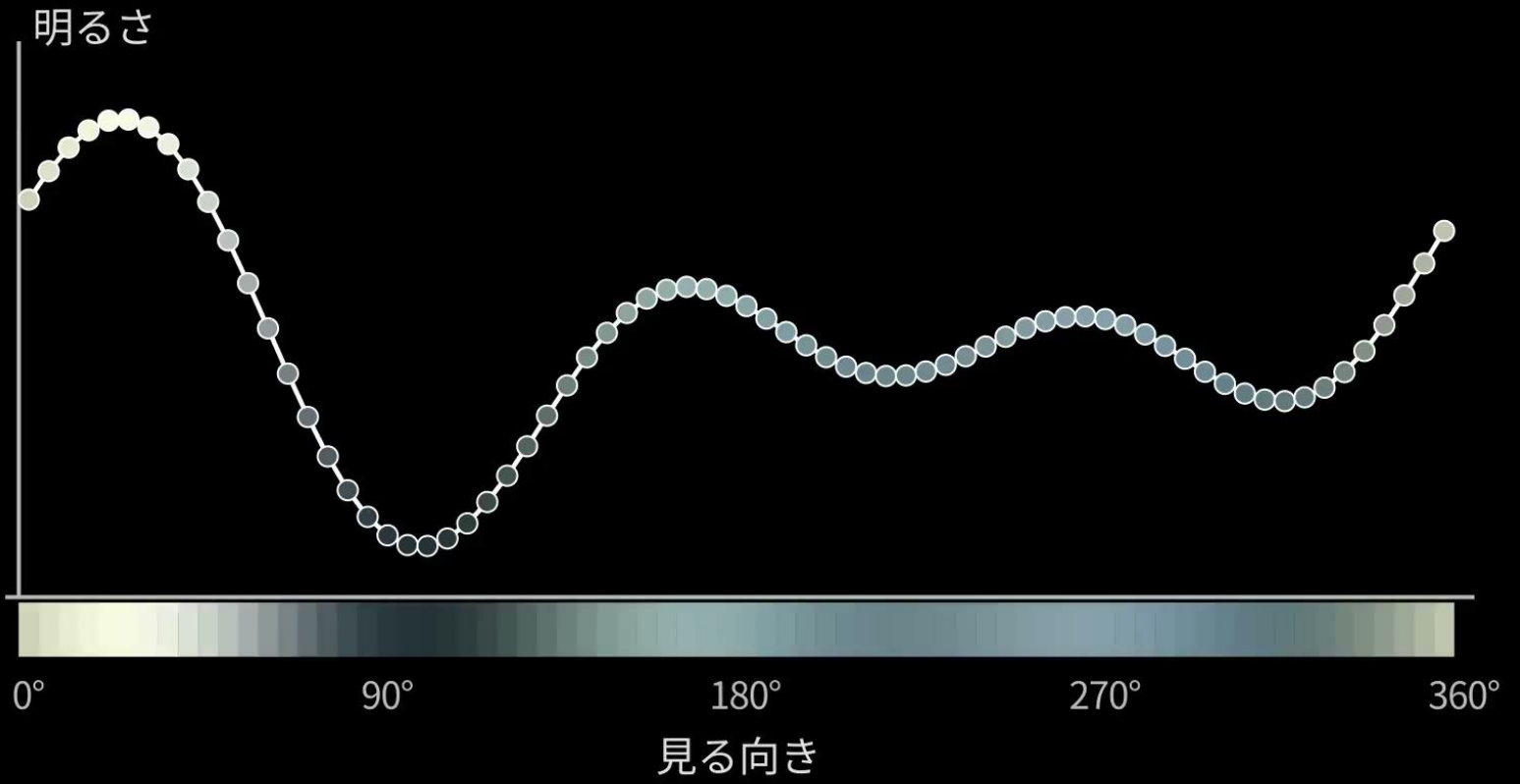


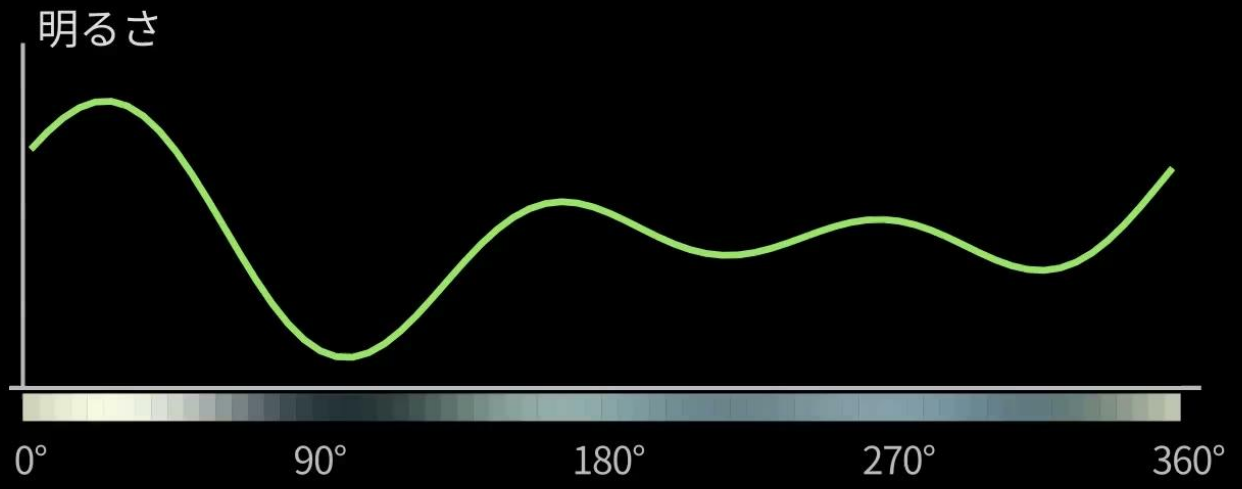




3DGS: Kerbl et al., SIGGRAPH 2023（公開モデル）
データ：Tanks and Temples（Knapitsch et al., 2017）


向きごとの色
blob


明るさ
0°
90°
180°
270°
360°
見る向き



実際の明るさ
波の和

ずれ　0.000

72 個の数
↓
7 個の重み

定数	$\cos\theta$	$\sin\theta$	$\cos 2\theta$	$\sin 2\theta$	$\cos 3\theta$	$\sin 3\theta$
× 0.57	× 0.10	× −0.04	× 0.16	× 0.10	× 0.00	× 0.16

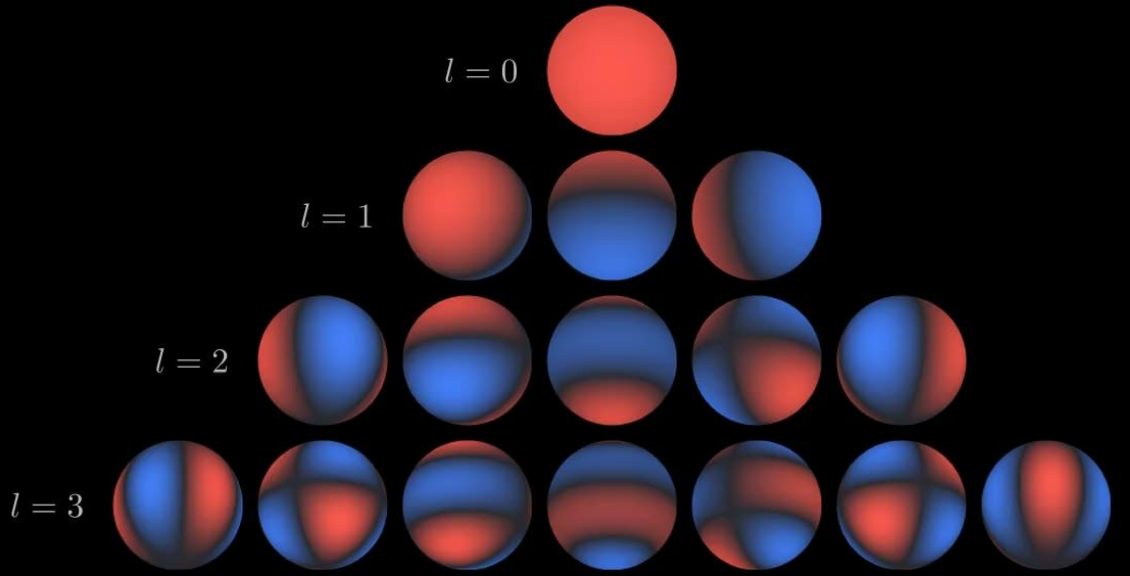
簡単な波を足し合わせて、近似する

球面調和関数（Spherical Harmonics, SH）



向きごとの色

≈



16 個の模様 × RGB ＝ 48 個の数

blob の 59 個の数のうち 48 個が色

3D では、球面の波 ＝ SH


色だけ
SH あり


色だけ
SH あり
SAN PEDRO
SQUARE
MARKET
SAN PEDRO
SQUARE
MARKET

⑤



エンタメでの応用
Applications in entertainment

⑤-1 材質を表す
Spherical Harmonics

⑤-2 光を変える
Relighting

⑤-3 動きをつける
4DGS

⑤

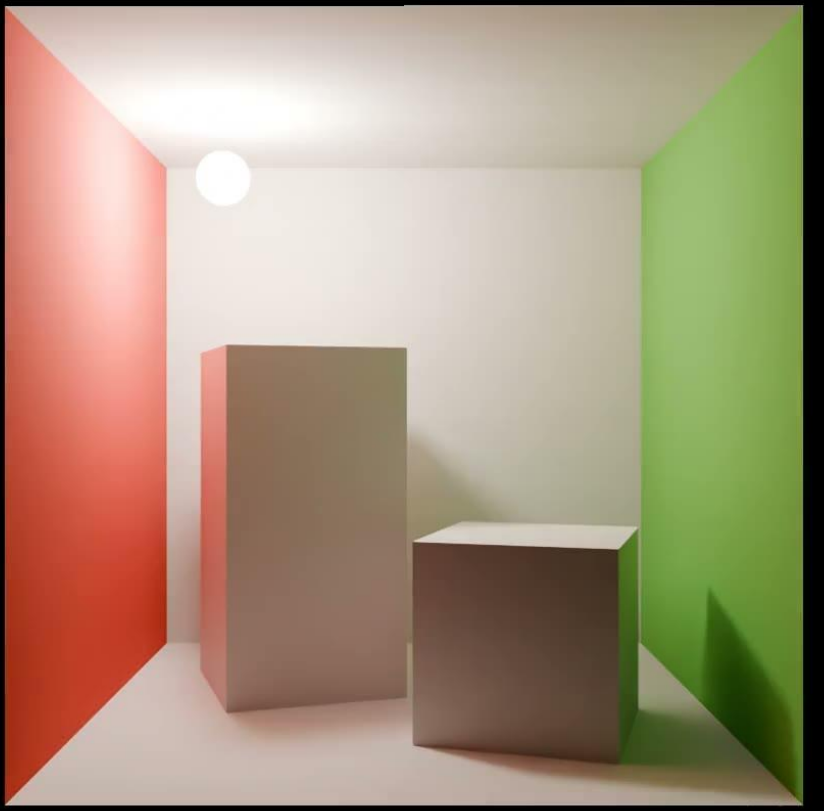


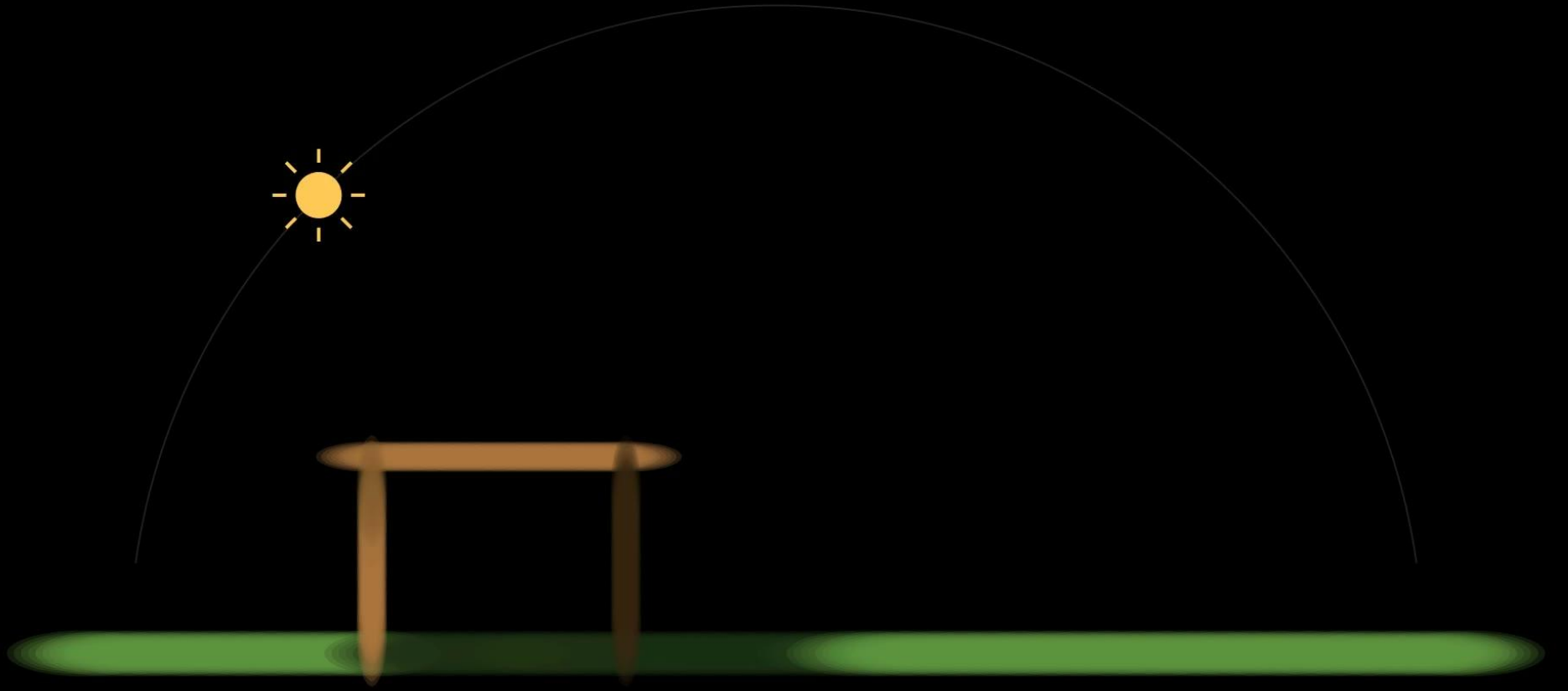
エンタメでの応用
Applications in entertainment

⑤-1 材質を表す
Spherical Harmonics

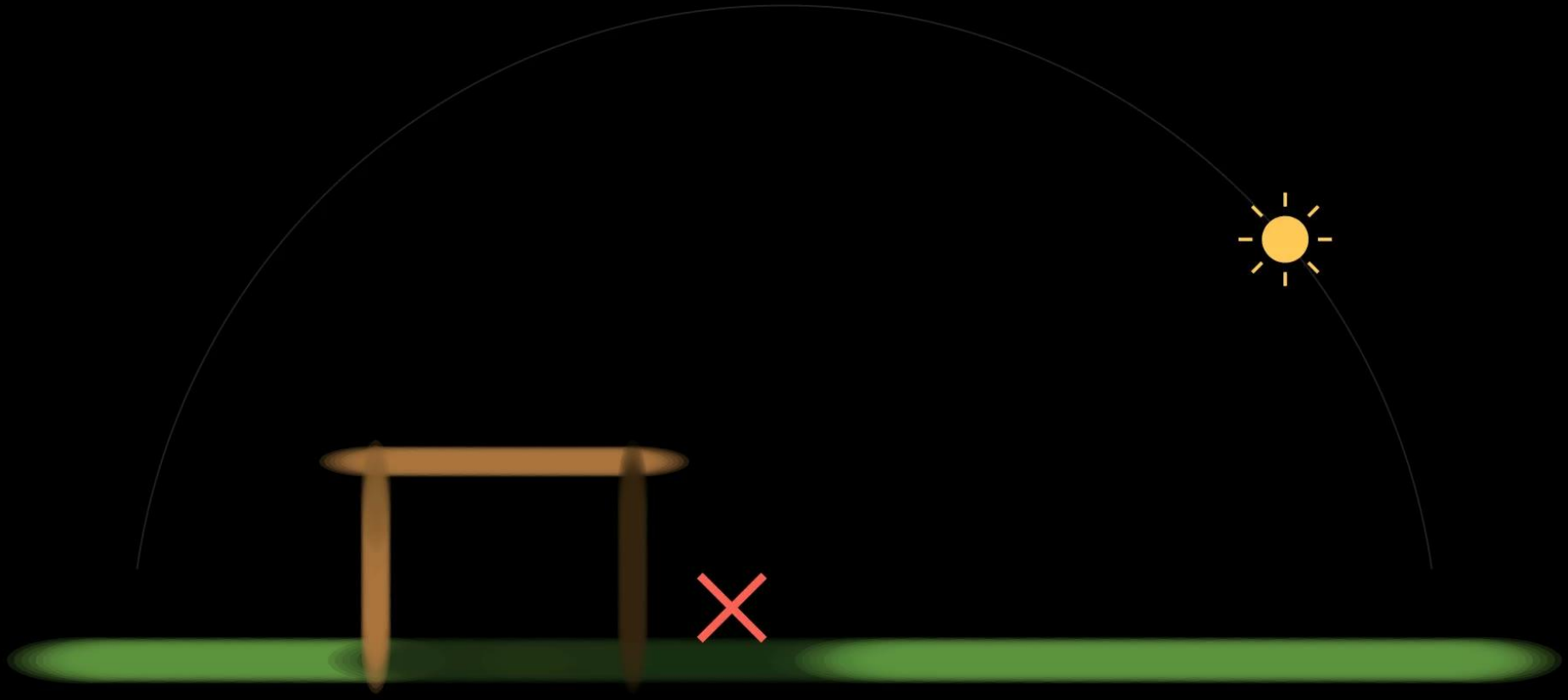
⑤-2 光を変える
Relighting

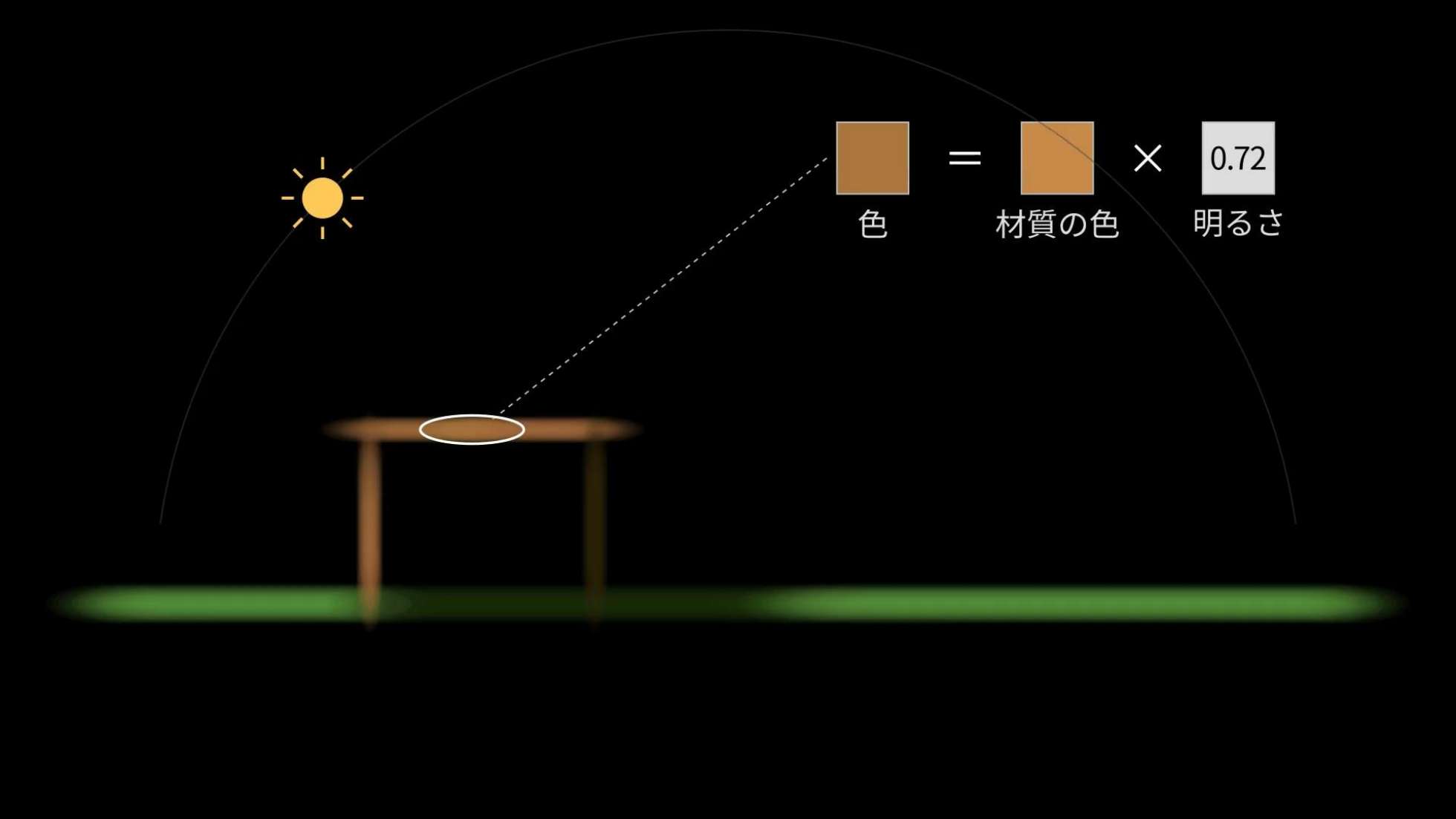
⑤-3 動きをつける
4DGS

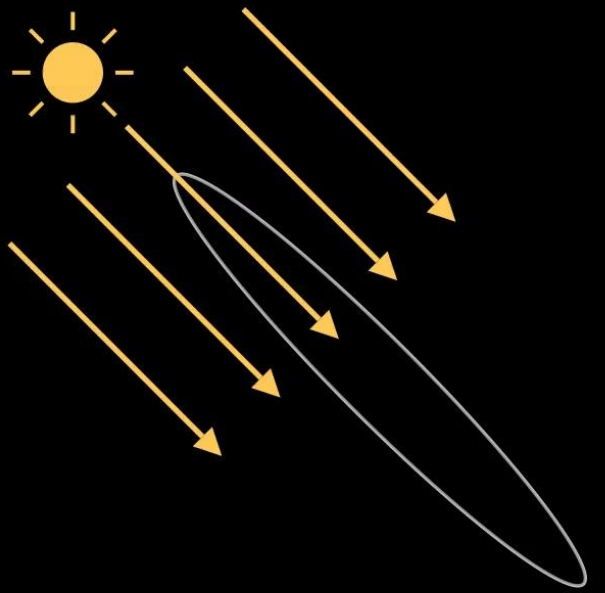




blob の色には、撮影した日の光と影が入っている



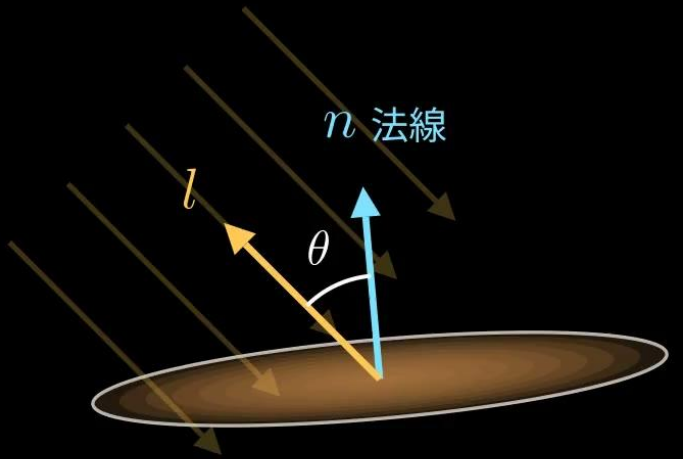

色
=
材質の色
×
0.72
明るさ



明るさ　0.00

色 ＝ 材質の色 × 明るさ

面が光を向くほど、明るくなる



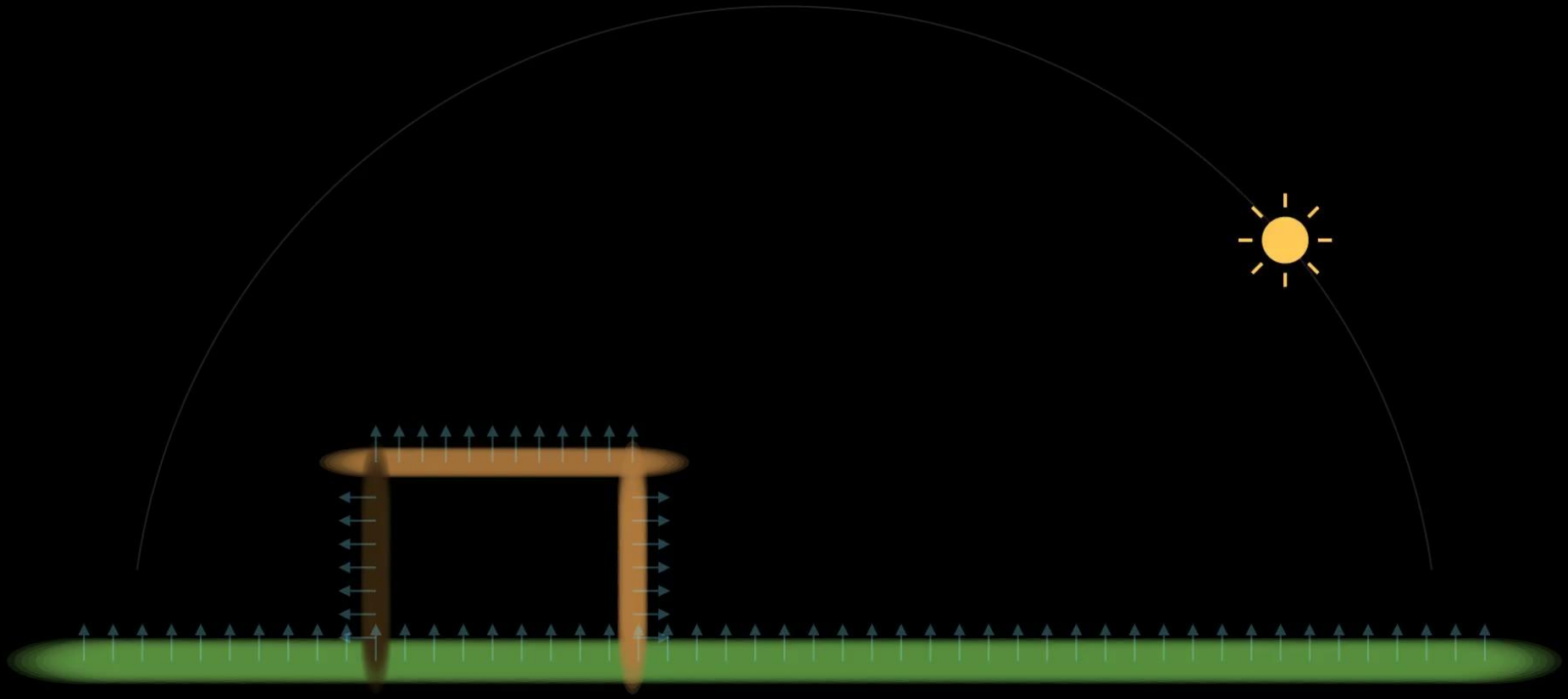
明るさ　0.77

$= n \cdot l = \cos\theta$



色 = 材質の色 × 明るさ

blob に新しく持たせる数：面の向き



向きによる明るさだけでは、影ができない

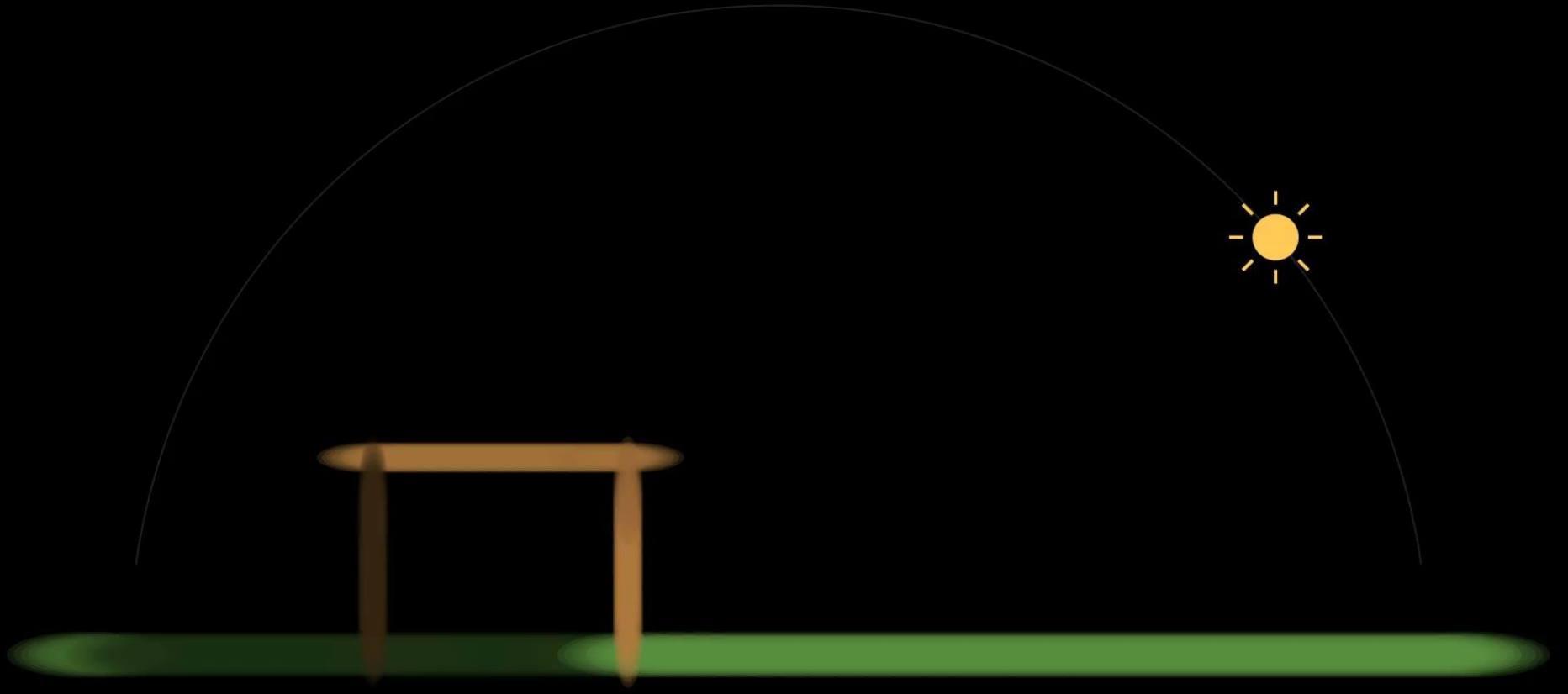
$$T = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)\cdots = 0.00$$

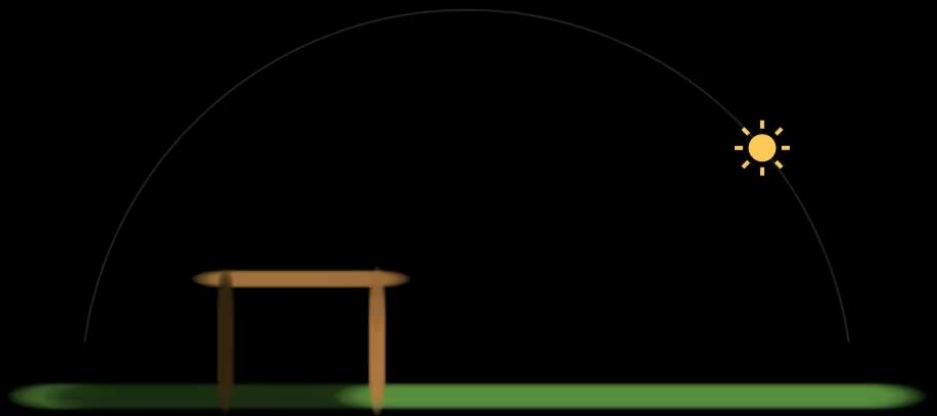
$$= (1-0.95)(1-0.86)\cdots$$

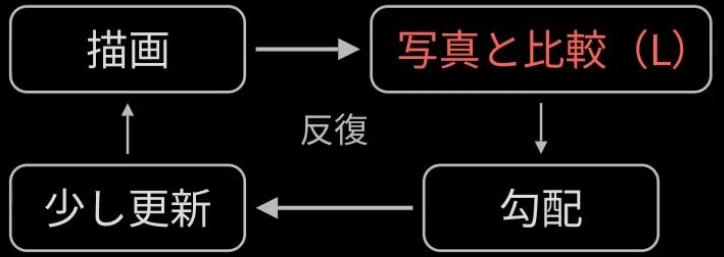
順番は関係ない



届く光の割合 T：blob ごとの透過率を掛け合わせる





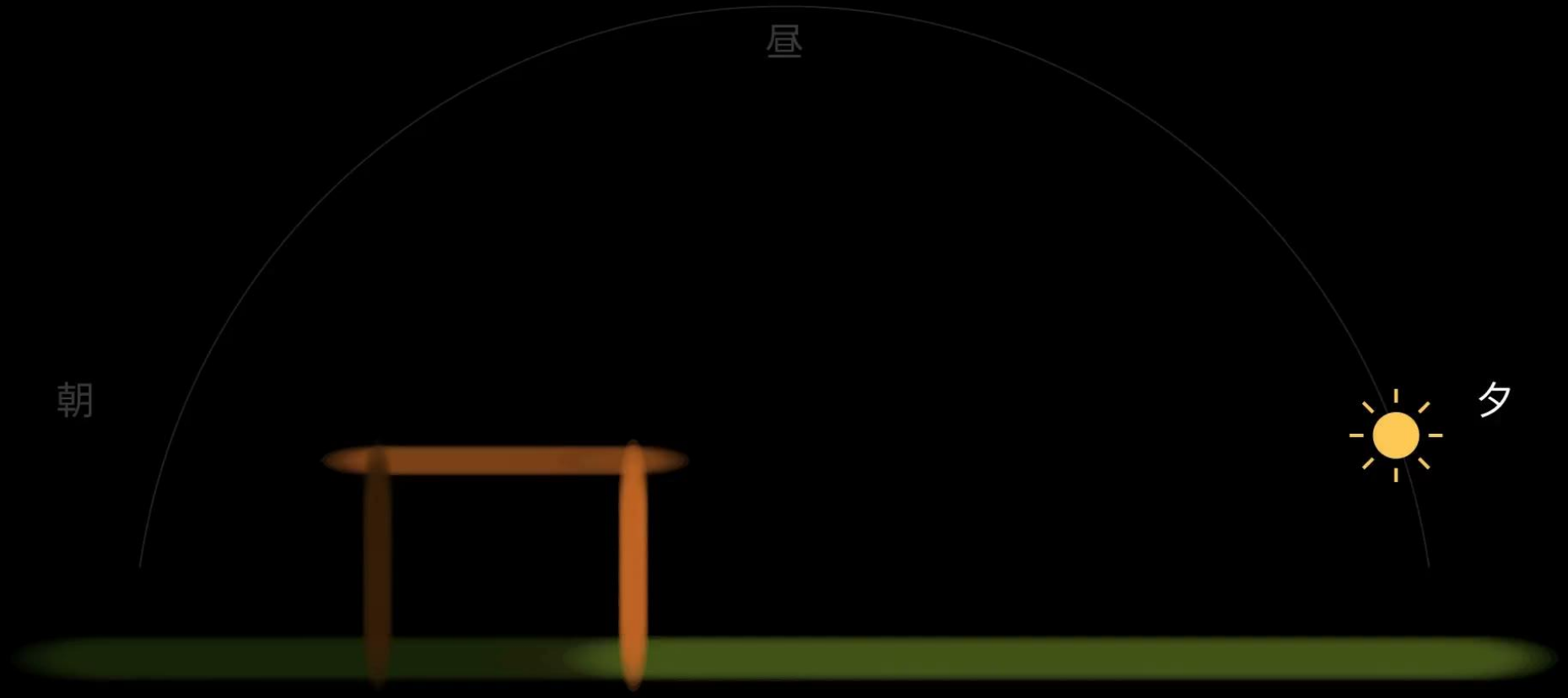


1段目：形と法線

- 位置 μ
- 形 Σ
- 不透明度 α
- 法線 n

2段目：形を固定

- 材質の色
- 粗さ
- 撮影時の光 l


昼
朝
夕



Gao et al., ECCV 2024（著者のデモ動画）

⑤

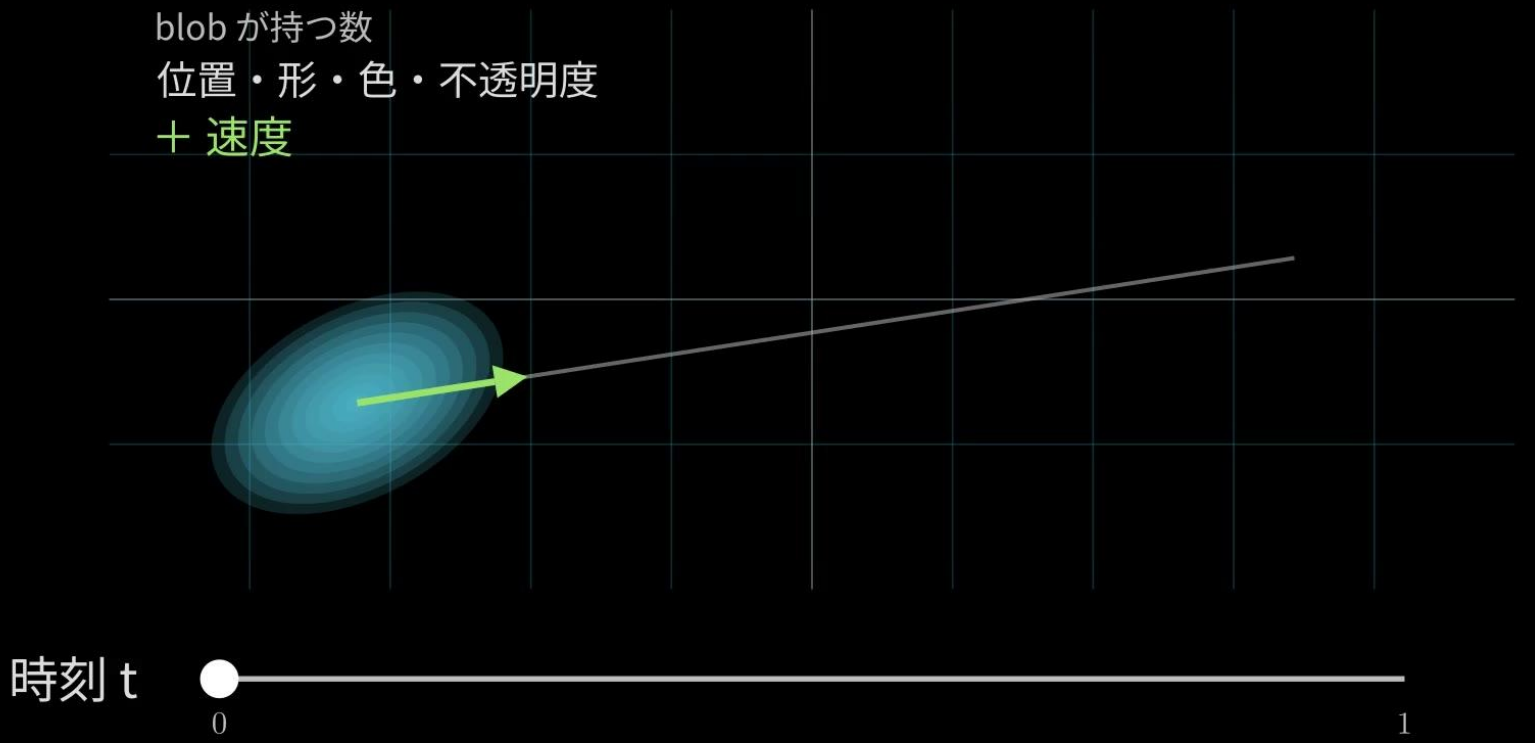


エンタメでの応用
Applications in entertainment

⑤-1 材質を表す
Spherical Harmonics

⑤-2 光を変える
Relighting

⑤-3 動きをつける
4DGS



blob に速度を持たせる

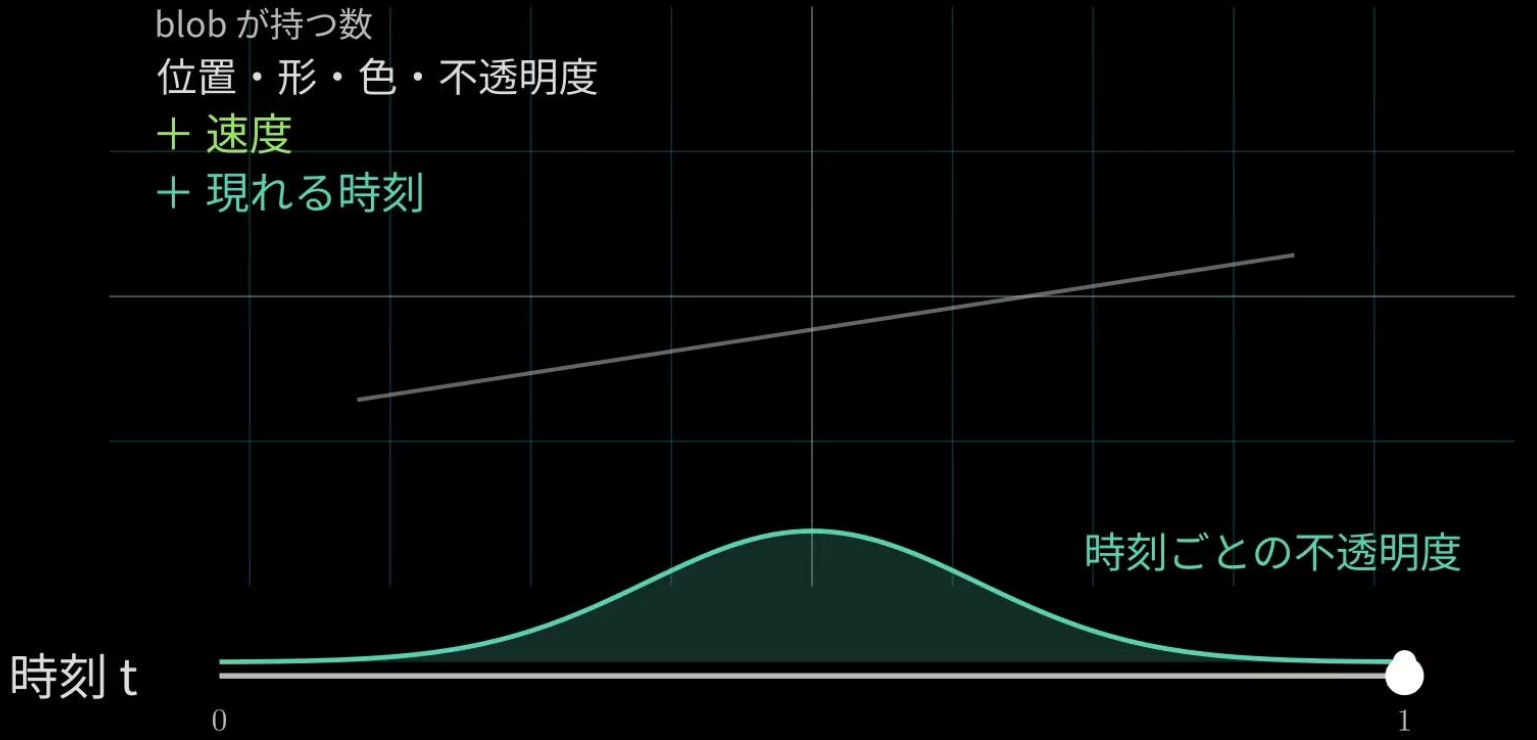
時間も含めた Gaussian が 4D Gaussian

blob が持つ数

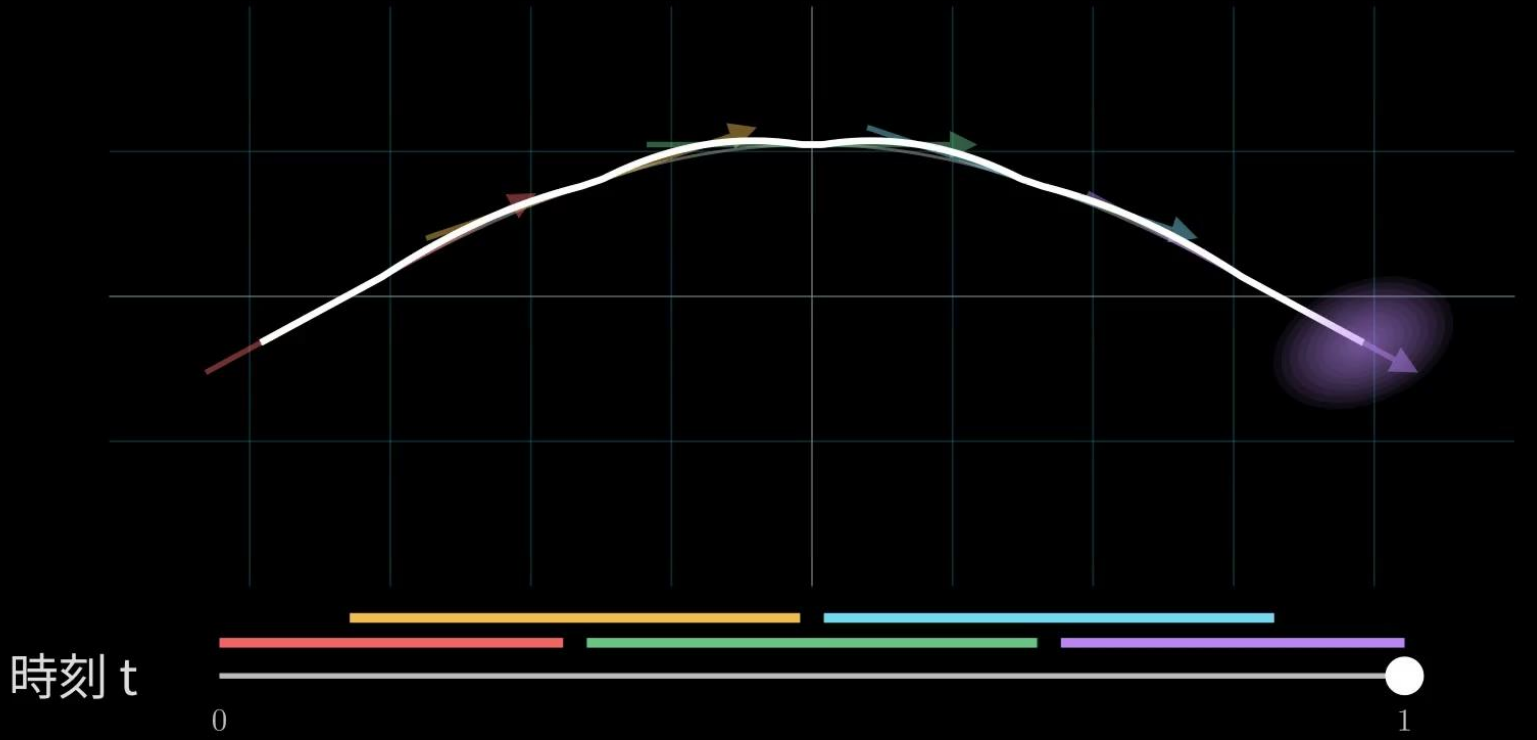
位置・形・色・不透明度

＋ 速度

＋ 現れる時刻



blob は、しばらくの間だけ現れる


時刻 t
0
1


時刻 t を選ぶ
t_1
t_2
t_3
blob を描く
写真に近づける
繰り返す

⑤



エンタメでの応用
Applications in entertainment

⑤-1 材質を表す
Spherical Harmonics

⑤-2 光を変える
Relighting

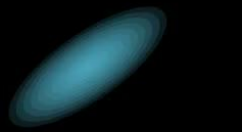
⑤-3 動きをつける
4DGS

描画
Rendering

学習
Training

応用
Applications

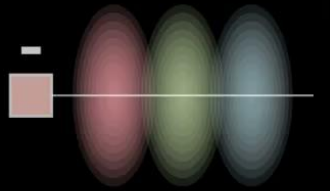
① Σ



blob の形
The shape of a blob

✓

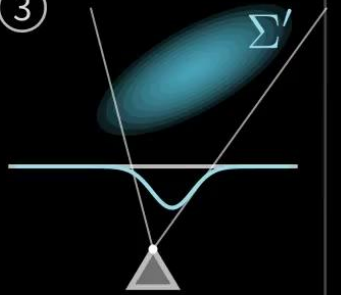
② α, T



1ピクセルの色
The color of one pixel

✓

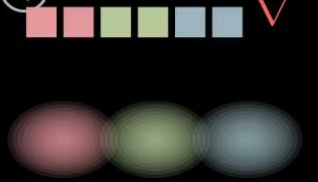
③ Σ'



スクリーンへの投影
Projection onto the screen

✓

④ ∇



blob を学習する
Learning the blobs

✓

⑤



エンタメでの応用
Applications in entertainment

✓

3DGS ＝ ぼんやりした楕円（blob）を
写真に合うように学習して、重ねて描く

Σ（形）　α・T（重ね）　J（投影）　L・勾配（学習）　SH・光・動き（応用）

Reference

- 論文
  - Kerbl, Bernhard, et al. "3d gaussian splatting for real-time radiance field rendering." ACM Trans. Graph. 42.4 (2023): 139-1.
  - Gao, Jian, et al. "Relightable 3d gaussians: Realistic point cloud relighting with brdf decomposition and ray tracing." European conference on computer vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.
  - Yang, Zeyu, et al. "Real-time photorealistic dynamic scene representation and rendering with 4d gaussian splatting." International Conference on Learning Representations. Vol. 2024. 2024.

- 例のデータセット (161, 166, 167)
  - Knapitsch, Arno, et al. "Tanks and temples: Benchmarking large-scale scene reconstruction." ACM Transactions on Graphics (ToG) 36.4 (2017): 1-13.

- ソフトウェア
  - LichtFeld Studio: https://github.com/MrNeRF/LichtFeld-Studio
  - Spirula Studio: https://github.com/harry7557558/spirula-studio

- 可視化ライブラリ
  - Manim CE: https://www.manim.community/