

歯のエックス線所見

— 放射線物理と画像解剖の狭間 —

2024年度
2025.01.23

顎顔面放射線学分野
西山秀昌

プレゼン中、スライド右上隅にのマークが表示されるものは、配布資料には無いものです。

エックス線像の問題点・限界

生体組織や解剖構造との差異について

- エックス線を使った投影像（形態・位置関係）
 - 理想的な投影像ではない。
 - 撮影系独自の重積・歪を認識しておく必要がある。

4年生で詳しく学習します。

- エックス線を使った透視像（組成・密度）

- エックス線撮影時

- 透過性は平均的な原子番号、密度、厚さに依存
- エックス線受光系の濃度分解能・空間分解能

- 画像読影時・閲覧時

- エックス線表示系の濃度分解能・空間分解能
- 錯視の影響の有無

- 生体の組成・構造毎の特徴把握

今回は、こちらを中心に学習します。

対象物

観察者

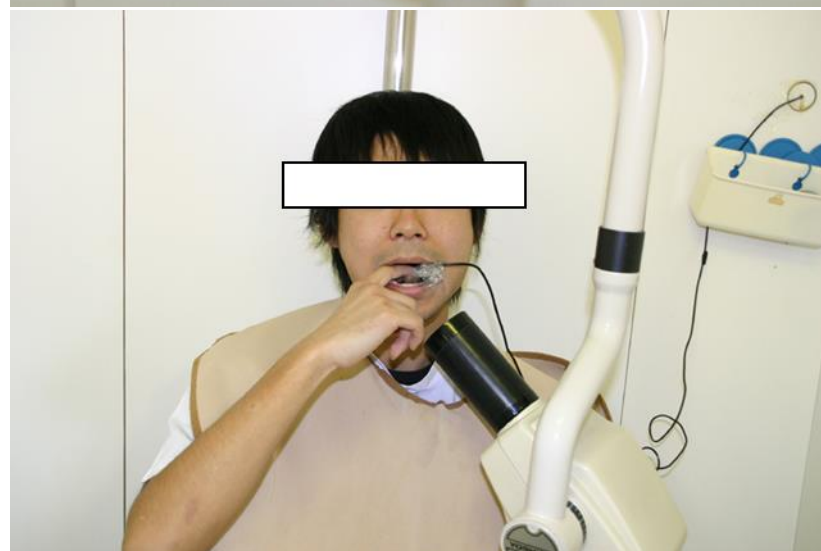
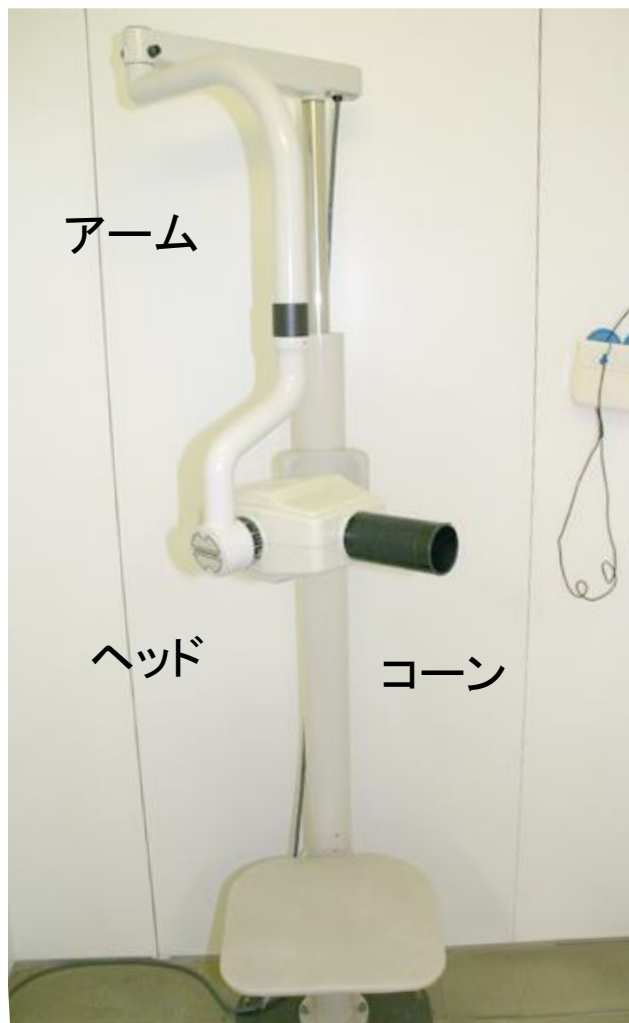
※ここでのポイント（詳しいことは4年生時に学習）

画像上での長さと比率を鵜呑みにしてはならない。（少なくとも撮影法を勉強する必要あり）
異なる組織であっても、同じ濃度に見えて、区別不可能な場合がある。（逆もあり）

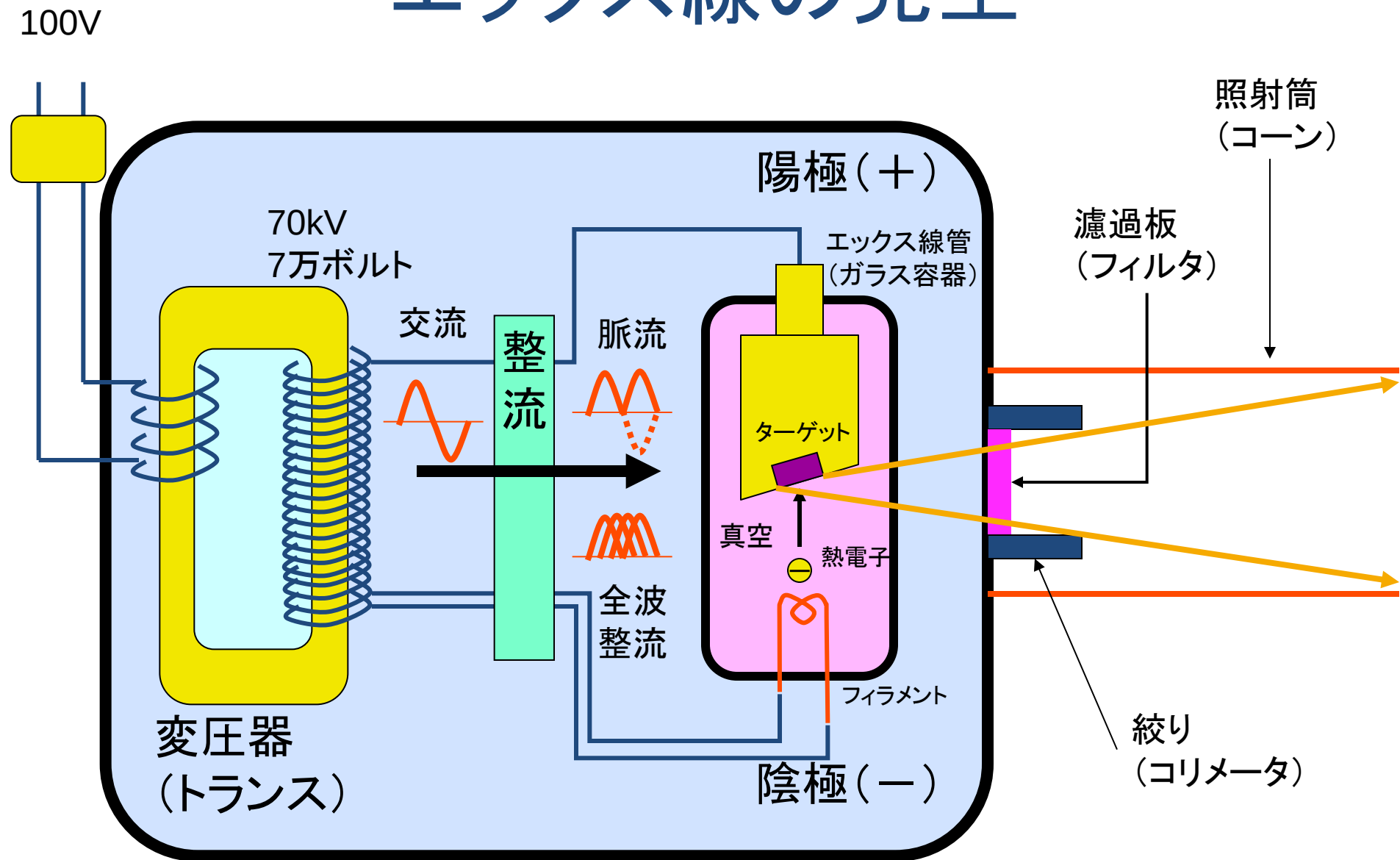
エックス線撮影装置について

2年生の講義の復習

口内法エックス線撮影装置



エックス線の発生





金属：エックス線
透過性が低い

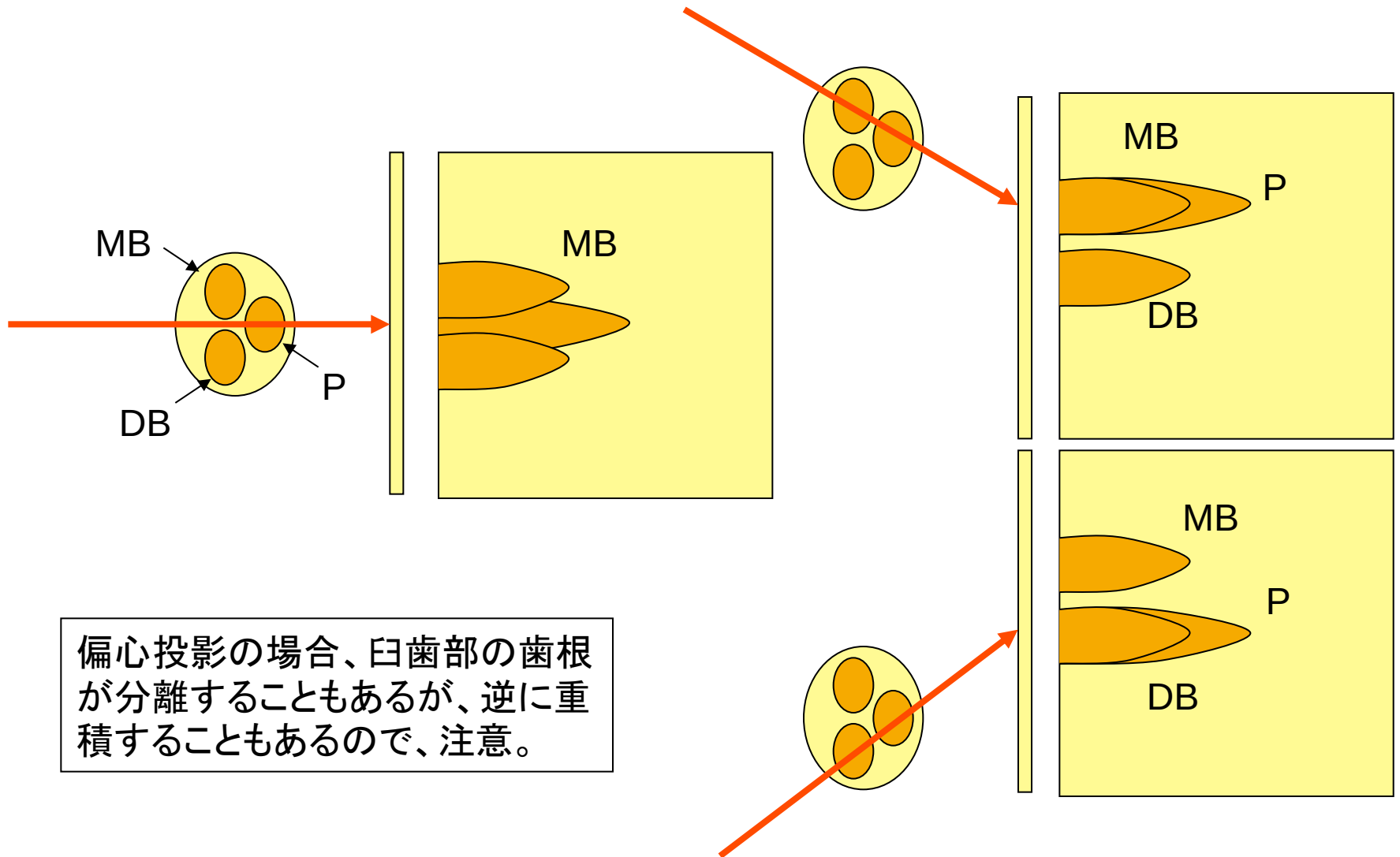


空気・軟組織：エックス線透過性が高い

エックス線の投影方向について

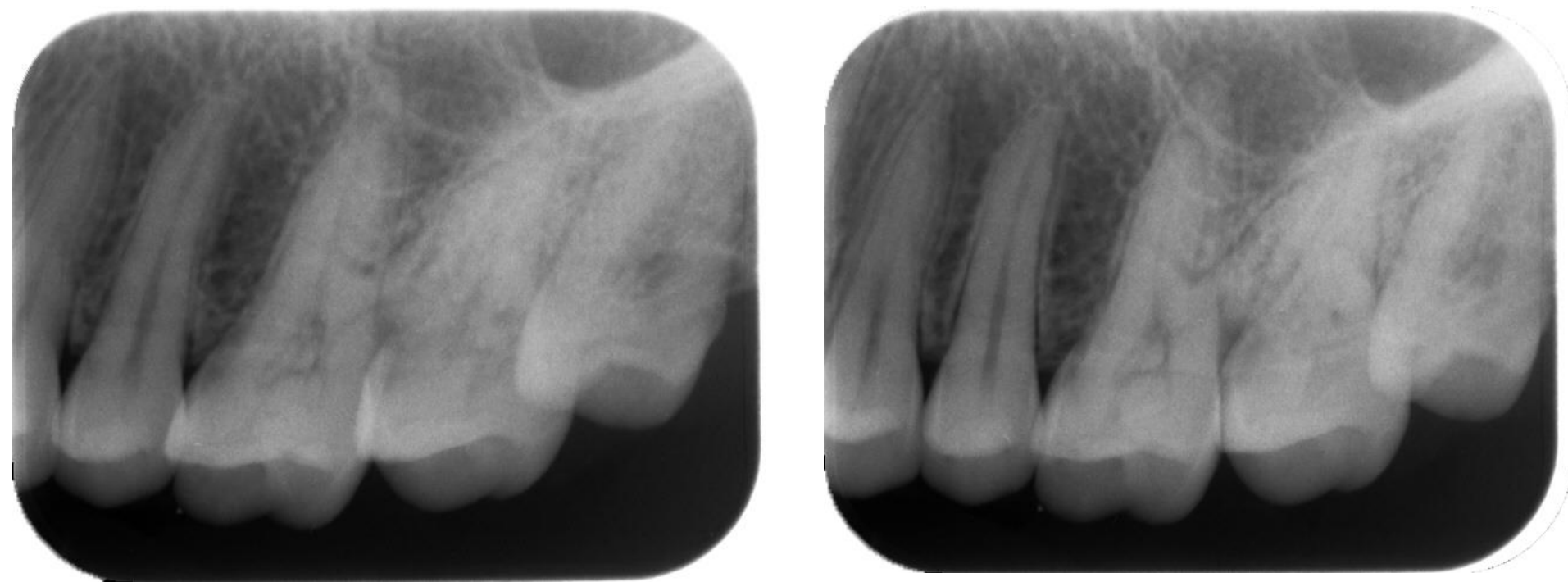
- 4年生では更に専門的な内容を教えます。
- 今回はとりあえず、最も簡単な「方向」のみの話に限定します。

水平方向の角度差 正放線投影と偏心投影



水平的な投影角度の差(立体視可能) 上顎第一大臼歯は1根？2根？3根？...

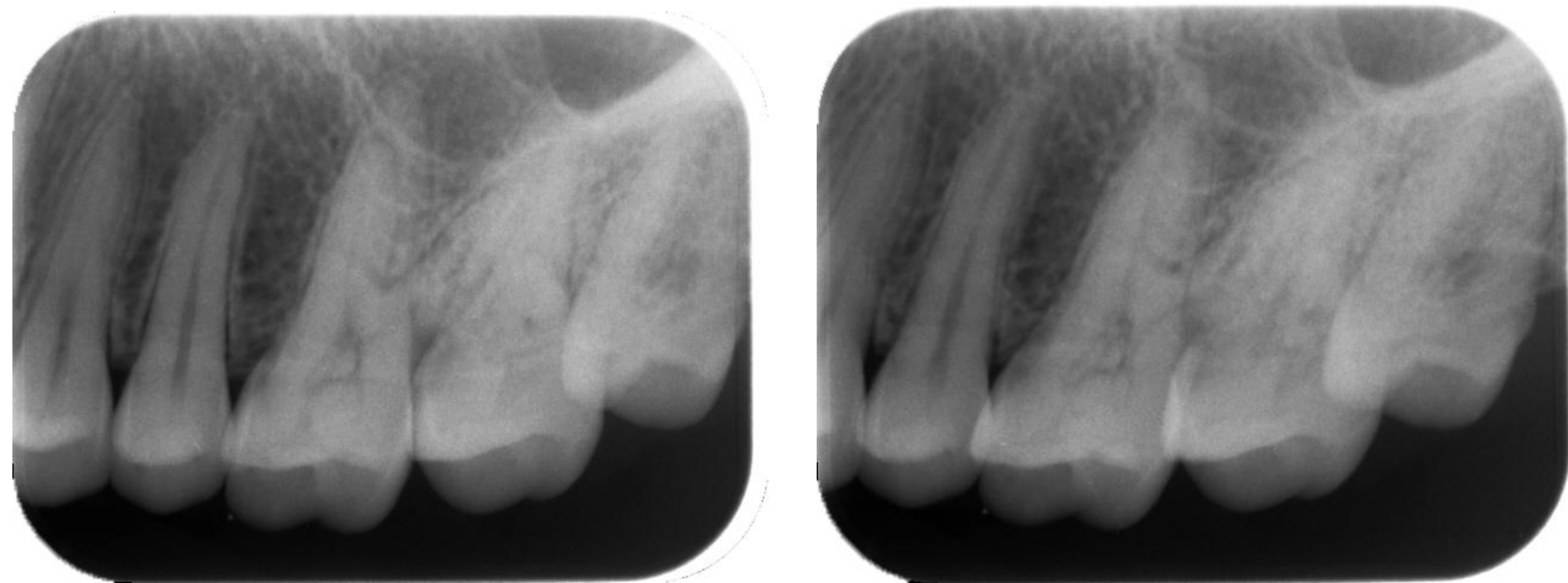
交差法で頬側が奥、口蓋側が手前



歯冠の重なり、歯根の重なりに注意。

水平的な投影角度の差(立体視可能) 上顎第一大臼歯は1根？2根？3根？...

交差法で口蓋側が奥、頬側が手前



歯冠の重なり、歯根の重なりに注意。

垂直方向の角度差



上顎洞・頬骨突起と根尖の位置関係、歯根の長さの変化に注意
※近遠心的にも少し角度差があります。

エックス線透過性と構造

2年生の講義の復習と応用

物質との相互作用

- 【光電】効果（相対的に管電圧が低い側）
 - 診断用エックス線。主に硬組織で発生。
 - 光電子放出、特性エックス線、吸収端
 - オージェ電子（特性エックス線によってたたき出された電子）
- 【コンプトン】効果（相対的に管電圧が高い側）
 - コンプトン散乱・非干渉性散乱
 - 診断用エックス線。主に軟組織で発生。
 - エネルギーの吸収を伴う散乱。

エックス線との相互作用に関する実効原子番号

実効原子番号	密度	物質	実効原子番号	密度[g/cm ³]	主たる成分	その他成分
7 程度	1 程度	空気	7.64	0.00129	N,O,C	
		脂肪	5.9~6.5	0.91	C,H,O	N,S
		水	7.42	1	H,O	
		筋肉	7.4~7.6	1	H,O,C	N,S,K,P,Na,Mg,Ca
14 程度	2~3 程度	骨	12.3~13.8	1.85	O,C,Ca	H,P,N,S,Mg
		象牙質	13.5	2.4	O,C,Ca	H,P,N,S,Mg
		エナメル質	15.5	2.9	O,C,Ca	H,P,N,S,Mg
		アルミニウム	13	2.7	Al	
		チタン	22	4.5	Ti	
		鉛	82	11.34	Pb	

元素記号	原子番号
H	1
He	2
Li	3
Be	4
B	5
C	6
N	7
O	8
F	9
Ne	10
Na	11
Mg	12
Al	13
Si	14
P	15
S	16
Cl	17
Ar	18
K	19
Ca	20

※成分の順は重量比の順

生体を構成する主たる元素: C,H,O,N,Mg,Ca,K,S,P,Fe

実効原子番号 (Z_{eff}) は次式で求められる

$$Z_{eff} = \sqrt[2.94]{\sum_i f_i \times (Z_i)^{2.94}}$$

f_i : 電子数の比率、総和=1

Z_i : 構成原子番号

水の場合

$$Z_{eff} = \sqrt[2.94]{0.2 \times 1^{2.94} + 0.8 \times 8^{2.94}} = 7.42$$

以降、簡略的な計算で用いる値だが、概数的に把握する程度であれば、覚えておくともいいかもしれない。

上記は主として光電効果が成立する場合のMayeredの式であるが、最近では2.94の代わりに3.45が用いられているとのこと。

尾内能夫・坂本澄彦:「新訂・放射線基礎医学」、日本出版サービス、(2007/02)

減弱係数について

μ : 線減弱係数 (linear attenuation coefficient)

μ/ρ : 質量減弱係数 (mass attenuation coefficient)

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{coh}}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_c}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}$$

ρ : 物質の密度

σ_{coh} : 干渉性散乱 (coherent scattering)、古典散乱 (トムソン散乱、レイリー散乱)
診断用の低エネルギー部分で発生しうる。(15~30keV)

$$\sigma_{coh}/\rho \propto Z^2/h\nu$$

診断用のエックス線で主として生じる

τ : 光電効果 (photoelectric effect)

K吸収端よりも光子エネルギーが大きく、生体の原子・分子が対象のとき

$$\frac{\tau}{\rho} \propto \frac{Z^{3\sim 4}}{(h\nu)^3}$$

光電効果でのZの指数部分について

「X線減弱係数の仕分けと医用画像 (岩元 新一郎)」

https://www.jstage.jst.go.jp/article/mii/32/3/32_54/_pdf/-char/ja

人体構成元素に対して光子エネルギー 40 keV~100 keV の範囲のフィッティングの結果3.62乗 (Rutherford ら) とありました。

σ_c : コンプトン効果 (Compton effect)

30keVから30MeVの光子エネルギー範囲 (水) で主体となる。

$$\frac{\sigma_c}{\rho} \propto \left(\frac{Z}{A}\right)/(h\nu) \cong \frac{0.5}{h\nu} \leftarrow \sigma_c \text{ は物質の電子密度に比例}$$

κ : 電子対生成 (pair production)

エックス線診断の範囲では生じない。

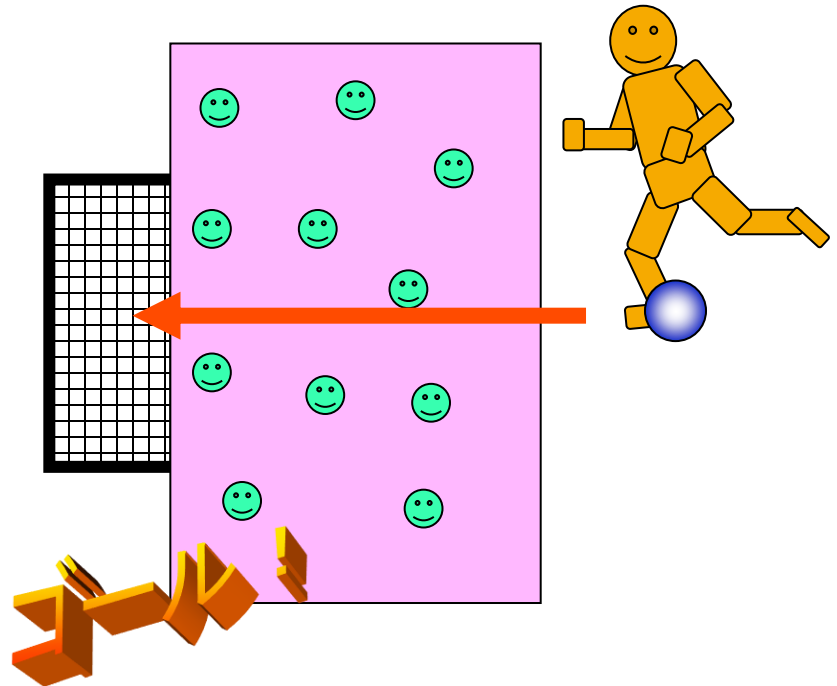
$$\frac{\kappa}{\rho} \propto (h\nu[\text{MeV}] - 1.02) \times Z$$

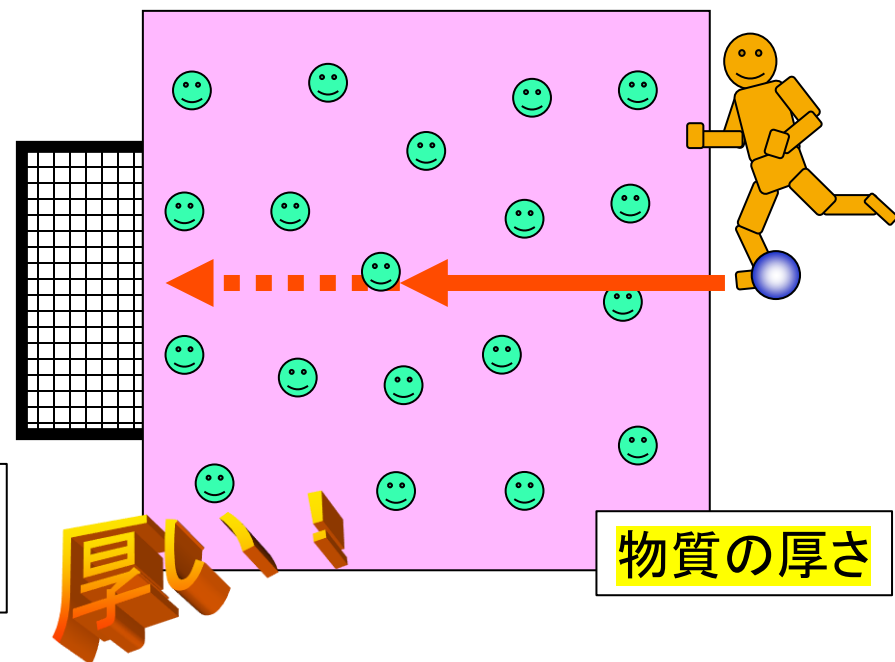
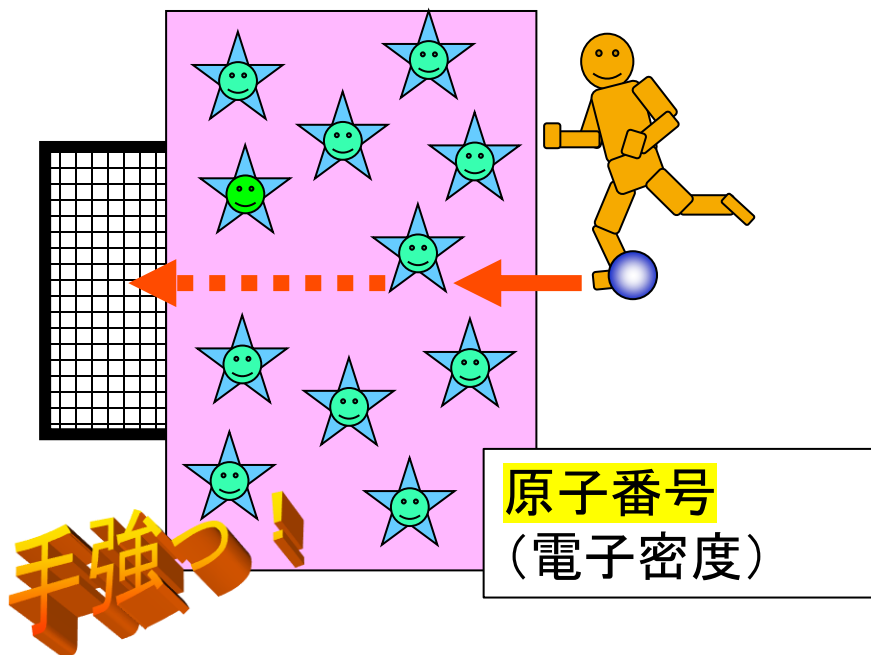
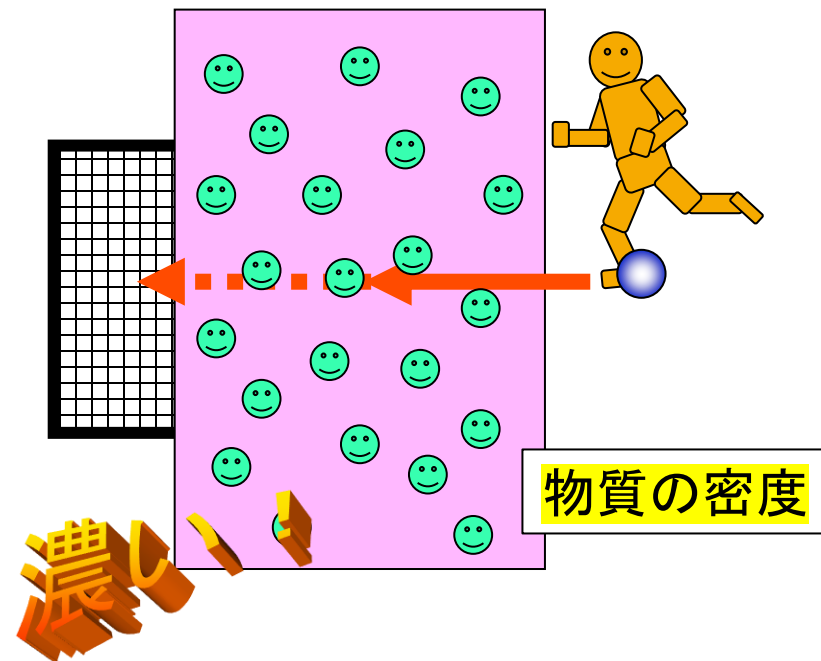
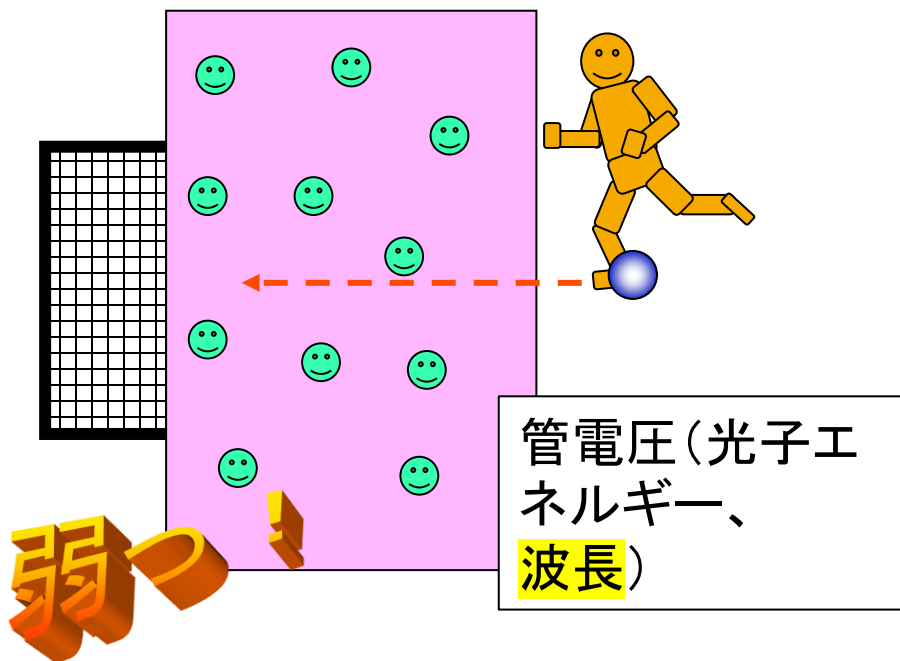
物質との相互作用による減弱

- 管電圧 (光子エネルギー、 λ : 波長)
- Z : 実効原子番号 (電子密度)
- ρ : 物質の密度
- d : 物質の厚さ

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$
$$\mu \propto Z^n \lambda^n \rho$$
$$n \approx 3$$

光電効果が主体の式





エックス線透過性

物質		エックス線透過性	画像上の濃淡
		高い：1	白い：1
		低い：5	黒い：5
金 属			
エナメル質			
象牙質			
セメント質			
骨※	歯槽硬線		
	海綿骨（骨梁）		
	皮質骨		
歯髄腔			
歯根膜腔			
軟組織			
空 気			



骨：厚みによって透過性、濃淡は異なる。

ここでは同じ厚みとして考える。

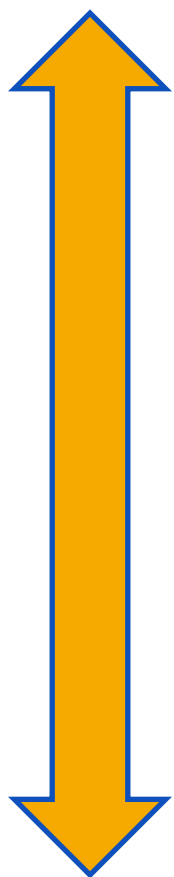
歯槽硬線≡固有歯槽骨

正常(ないし治療後の) エックス線検査で見えるもの

- 組織間のエックス線コントラストにて区分可能なら観察可能な点に注意。
- 軟組織同士は区分不可能。
- 軟組織は硬組織の間隙にあれば区分可能。しばしば「一腔」と呼ばれる。
 - 例：歯根膜腔、歯髓腔
 - エックス線画像上、透過像
- 解剖名称の対象物そのものを見ているわけではない。

正常組織

エックス線
不透過



透過

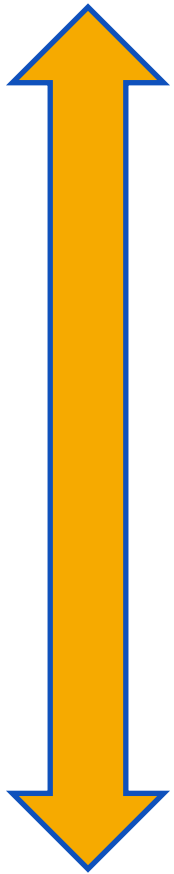
- エナメル質
- 象牙質、セメント質、歯槽硬線（白線、固有歯槽骨）、骨梁、皮質（骨）
 - これらは「厚さ」が同じなら、ほぼ同等の透過性となる。

=====

- 歯髄腔、歯根膜腔、骨髓腔
- 気体： 一般的には空気
 - ※少量の気体は軟組織と区別不可能

人工物

エックス線
不透過



透過

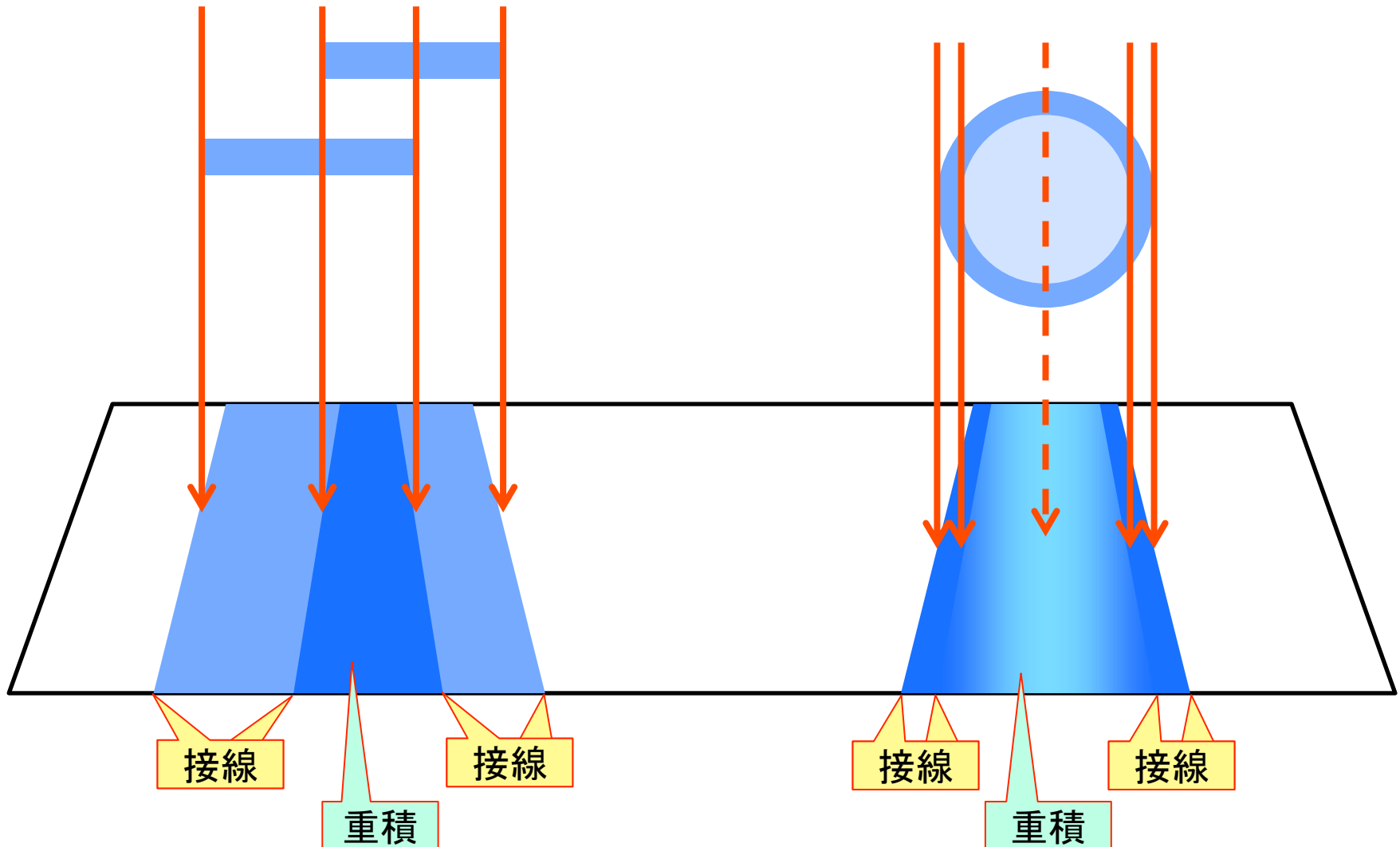
- 金属類（補綴物など）
- セメント類、不透過性を付与された根管充填剤、レジン

=====

- 綿栓等（液体・気体を含む）、不透過性を付与されていないレジン等

重積効果と接線効果

※2年次・「歯科エックス線撮影における機材と写真処理」を参照してください



錯視について

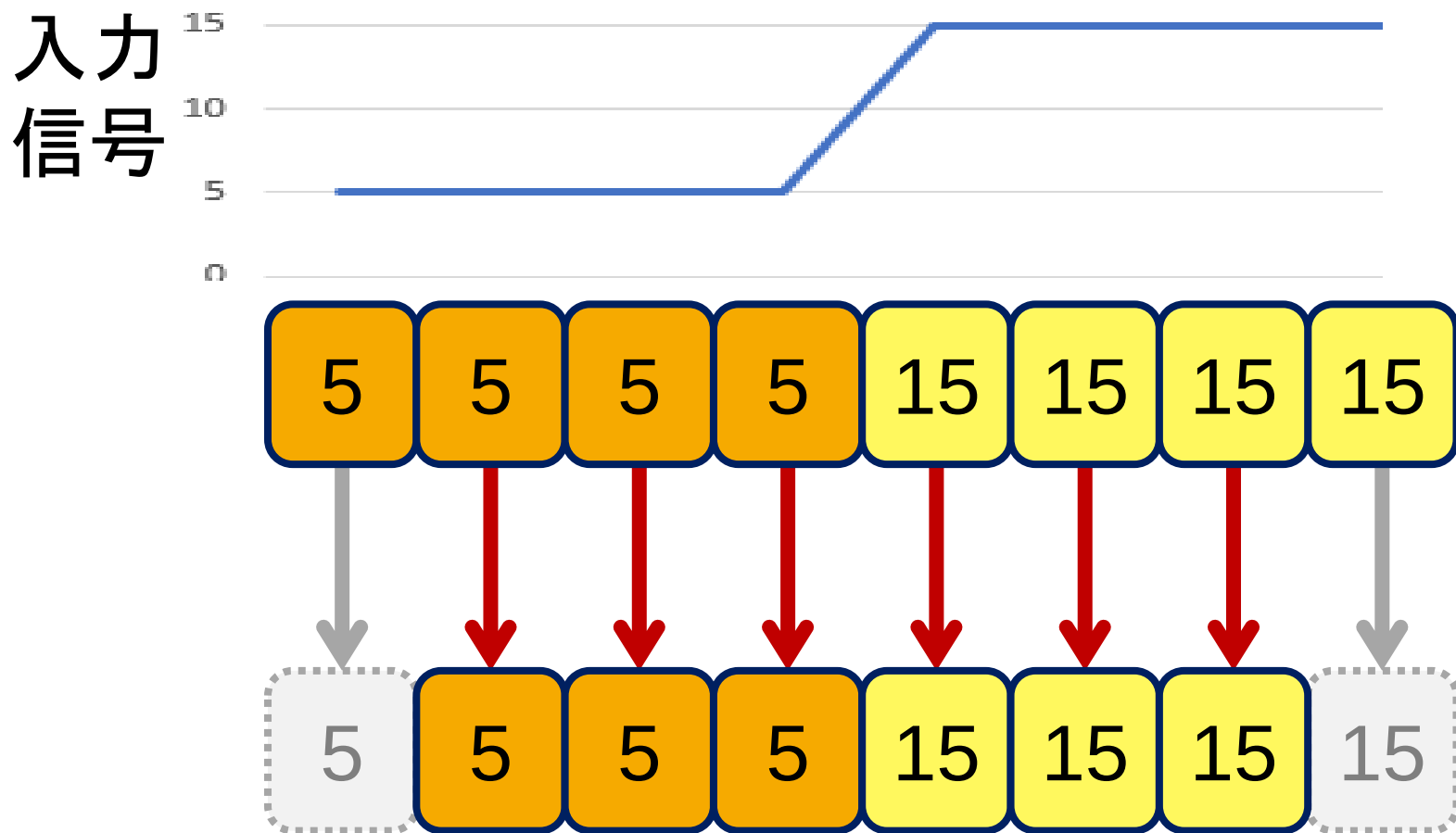
特に濃淡の変化における錯視

※その他、さまざまな錯視については

<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/illusion.pdf>

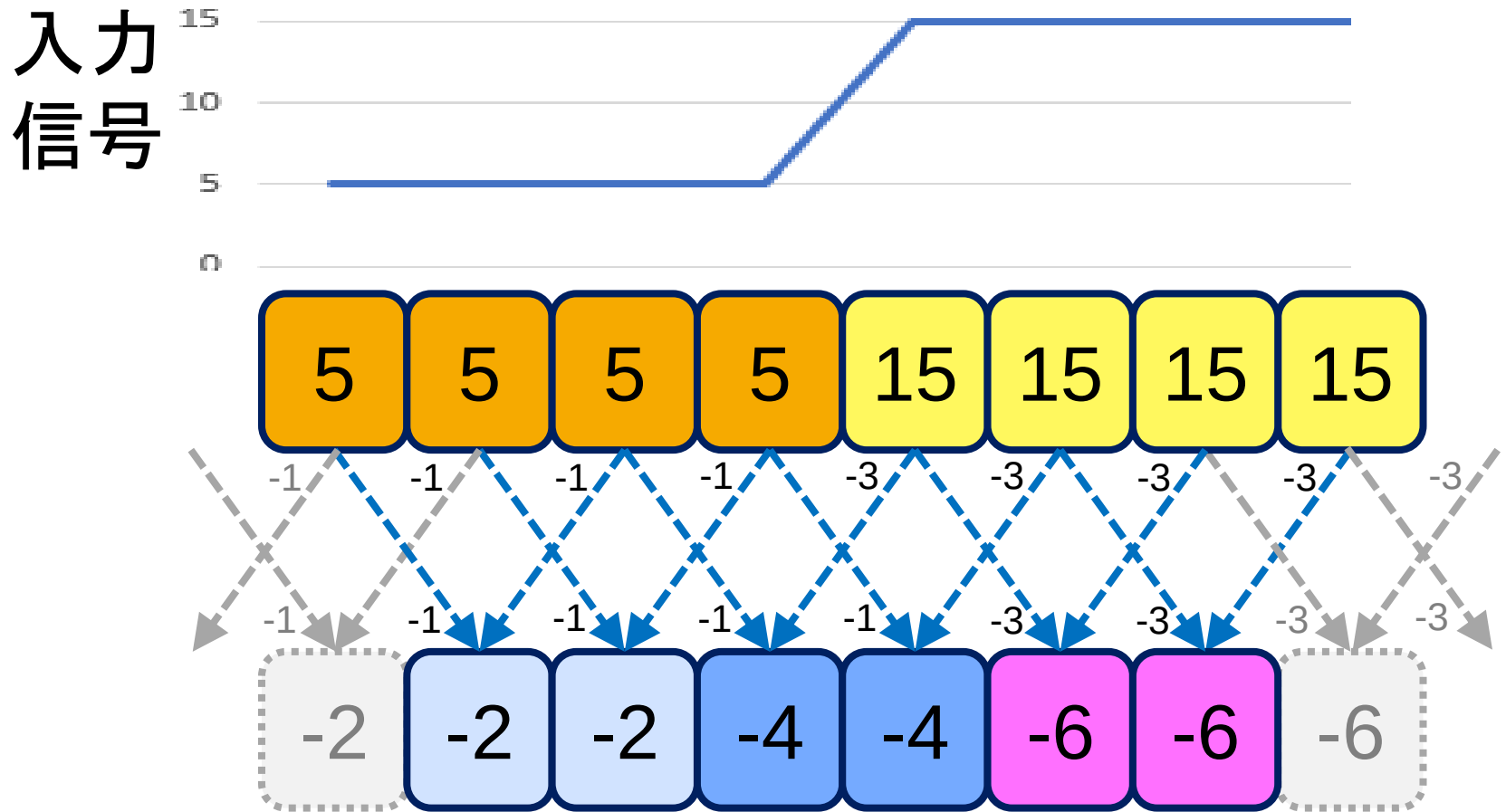


視覚における側抑制と輪郭強調



例えば、入力信号として「5」という値と「15」という値が隣接している場合

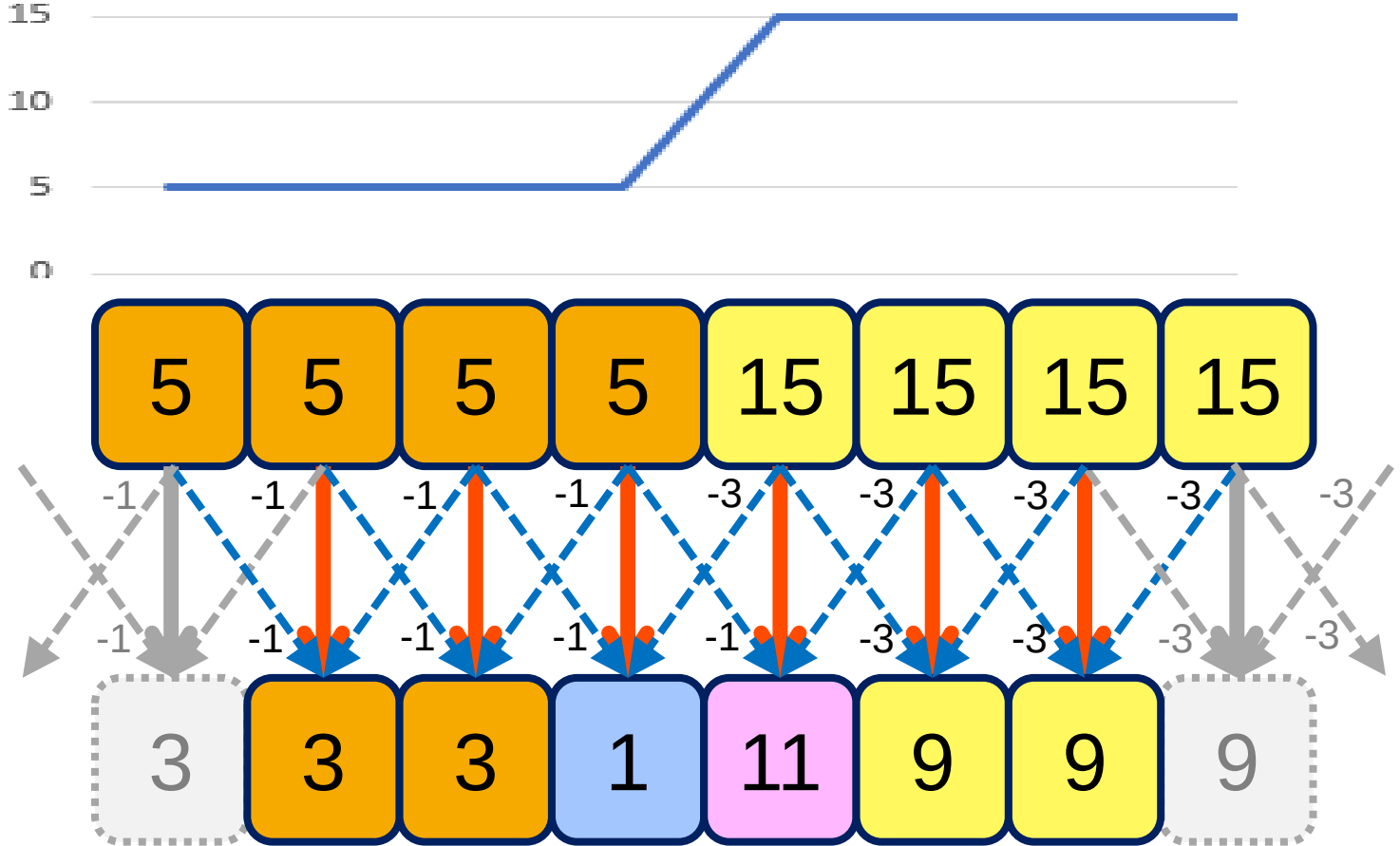
視覚における側抑制と輪郭強調



例えば、入力信号の20%で
側抑制した場合の抑制値

視覚における側抑制と輪郭強調

入力
信号



最終的な
出力信号

※入力信号の20%を側抑制
すると仮定したモデル

畳み込みフィルタ / Convolution filter

深層学習 (AIの一種) における画像認識で多用されている

演算

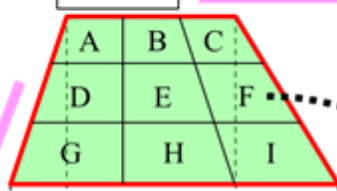
$$X = s \times \sum_{i,j=1}^n (P_{i,j} \times Q_{i,j}) + t$$

$P_{i,j}$: $n \times n$ 行列フィルタの i 行 j 列目の値

$Q_{i,j}$: 画像データでフィルタを適応する $n \times n$ 行列部分の i 行 j 列目の値

通常は、 $s \times \sum_{i,j=1}^n P_{i,j} = 1, t = 0$ となっている。

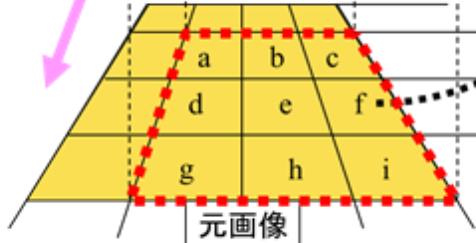
フィルタ



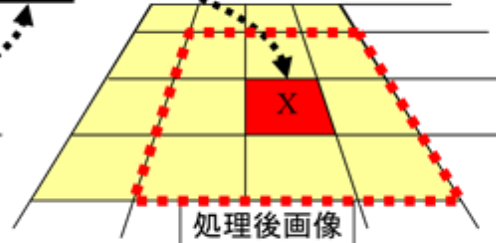
元画像に対し、フィルタを縦方向に1ピクセルずつ移動させて処理を繰り返す。

元画像に対し、フィルタを横方向に1ピクセルずつ移動させて処理を繰り返す。

演算



元画像



処理後画像

$$X = s \times (A \times a + B \times b + C \times c + D \times d + E \times e + F \times f + G \times g + H \times h + I \times i) + t$$

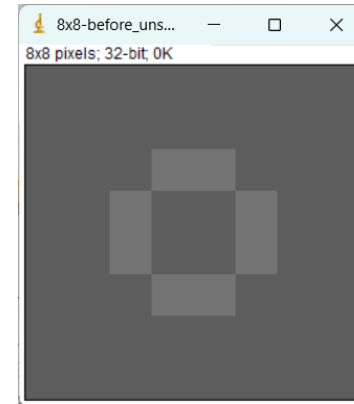


図2. フィルタ適応前の元画像
右の数値表から作った画像

元画像データ

1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	2	1	1	1
1	1	2	1	1	2	1	1
1	1	2	1	1	2	1	1
1	1	1	2	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

左の画像のピクセル値を現した表

フィルタ

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

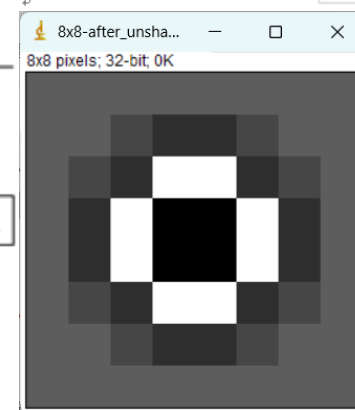


図3. フィルタ適応後の処理後画像、右はピクセル値

処理後画像データ

1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	-1	-1	0	1	1
1	0	-1	8	8	-1	0	1
1	-1	8	-3	-3	8	-1	1
1	-1	8	-3	-3	8	-1	1
1	0	-1	8	8	-1	0	1
1	1	0	-1	-1	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

さまざまな効果（錯視を含む）

- 接線効果

- 輪郭線としての描出
- 歯槽硬線としての描出
- etc.

- 重積効果

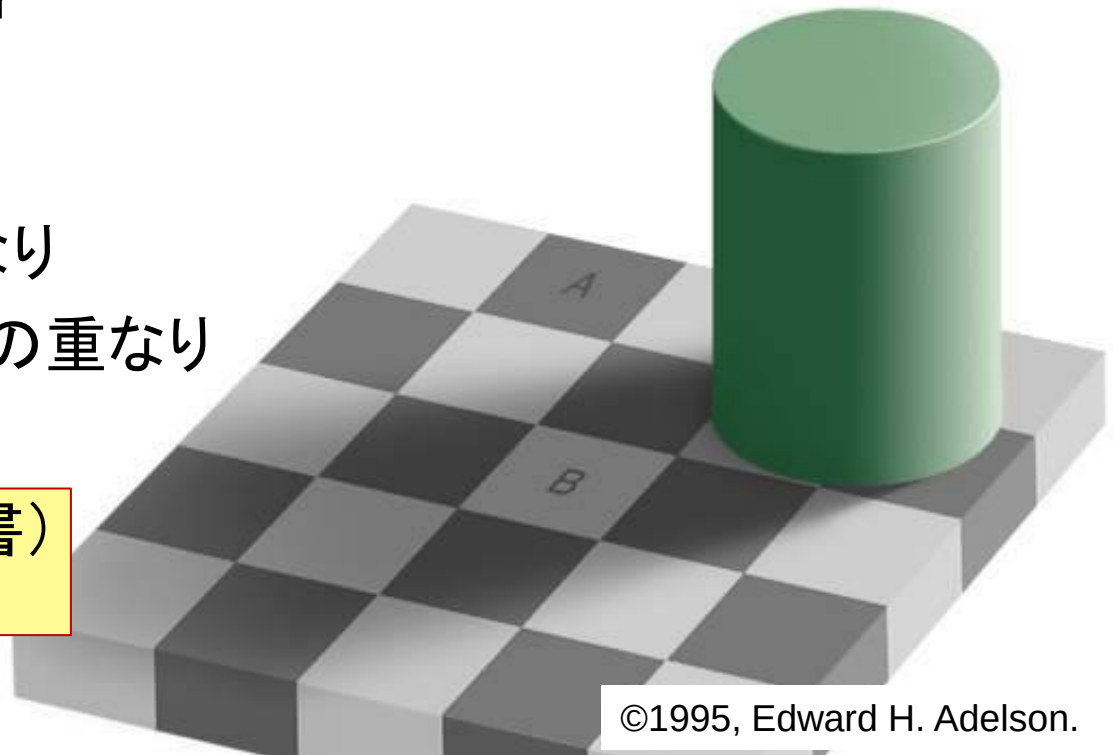
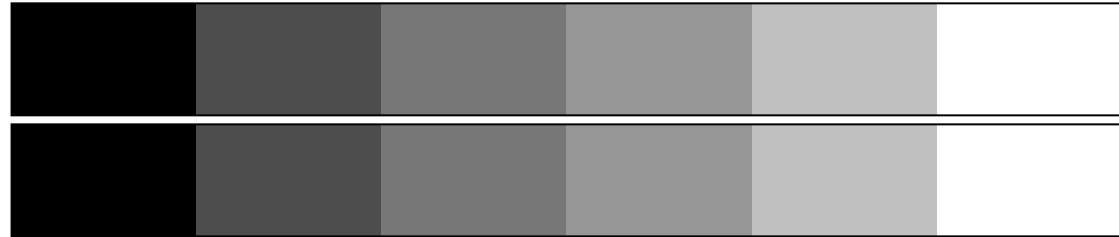
- 大臼歯の根の重なり
- 上顎洞、下顎管との重なり

- 錯視

- マッハ効果（教科書）
（本当はシェブルール効果）

- バーンアウト

- 周囲の濃度



©1995, Edward H. Adelson.

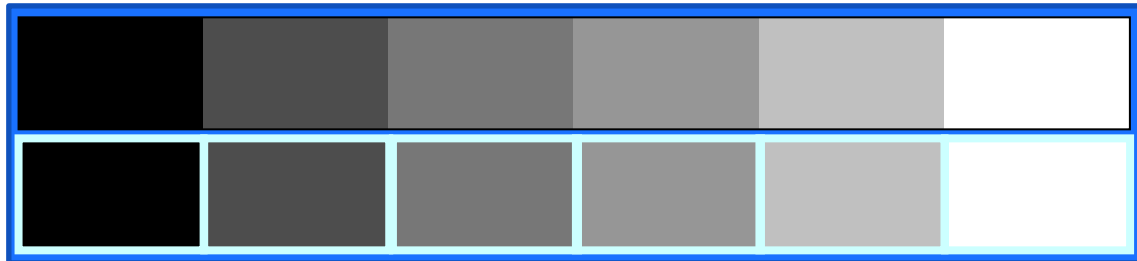
<http://persci.mit.edu/gallery/checkersshadow>

さまざまな効果（錯視を含む）

異なる濃淡の境界にて発生する錯視。

Mach(マッハ)効果(教科書)※、Cervical burnout(バーンアウト)効果など隣接する濃度に引きずられる。

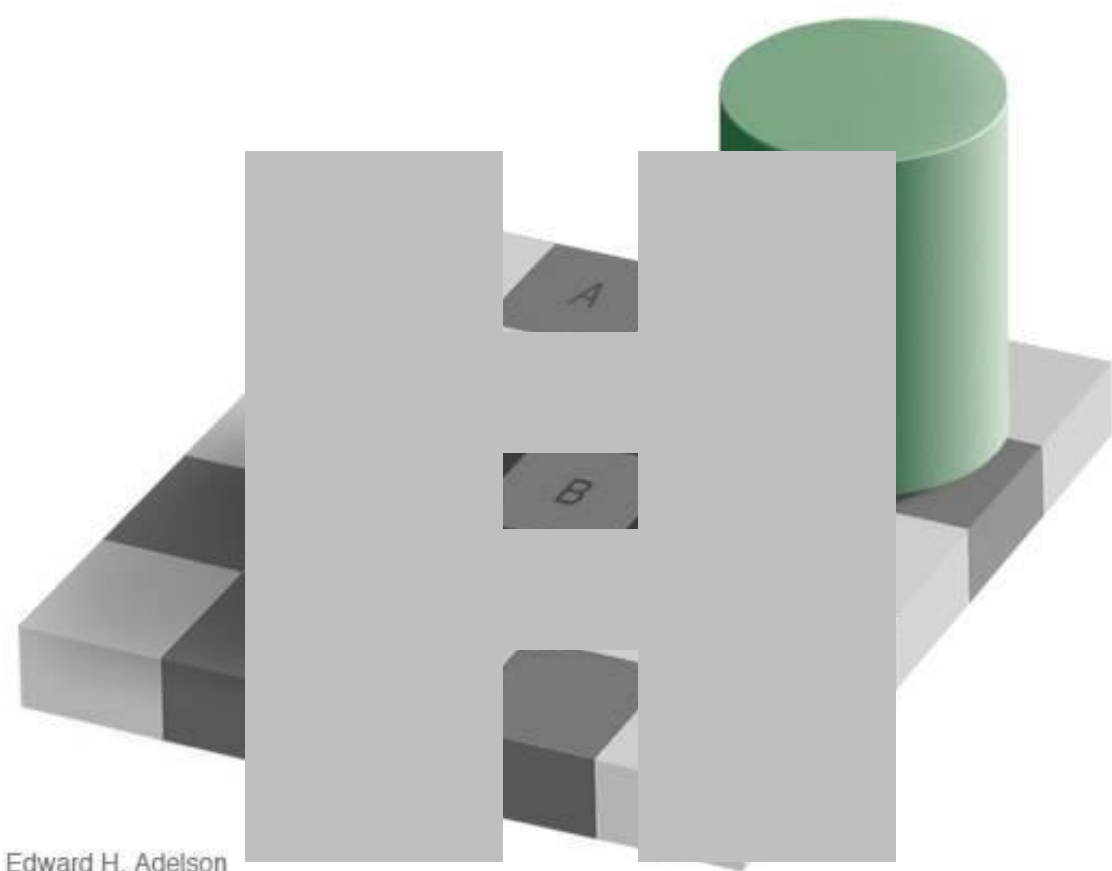
何らかの構造で区分されていると引きずられる影響が小さい。



濃淡のパターンと影の影響を過剰に感じ取ってしまう錯視。

エックス線画像は様々な濃淡画像の重ね合わせで構成されているため、要注意。

※教科書のMach効果は錯視専門家によるとChevreul効果とのこと。



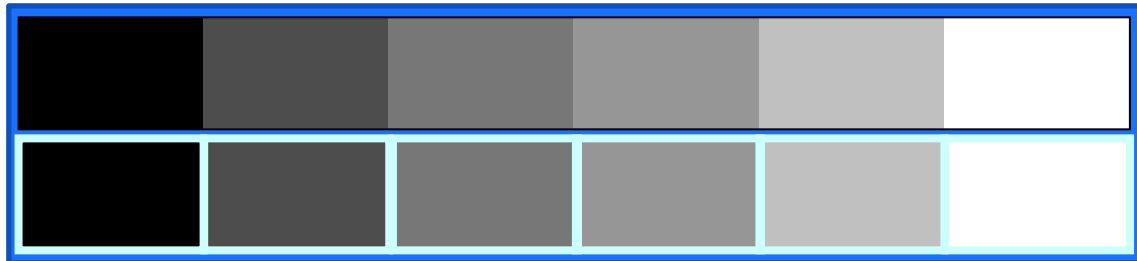
Edward H. Adelson

さまざまな効果（錯視を含む）

異なる濃淡の境界にて発生する錯視。

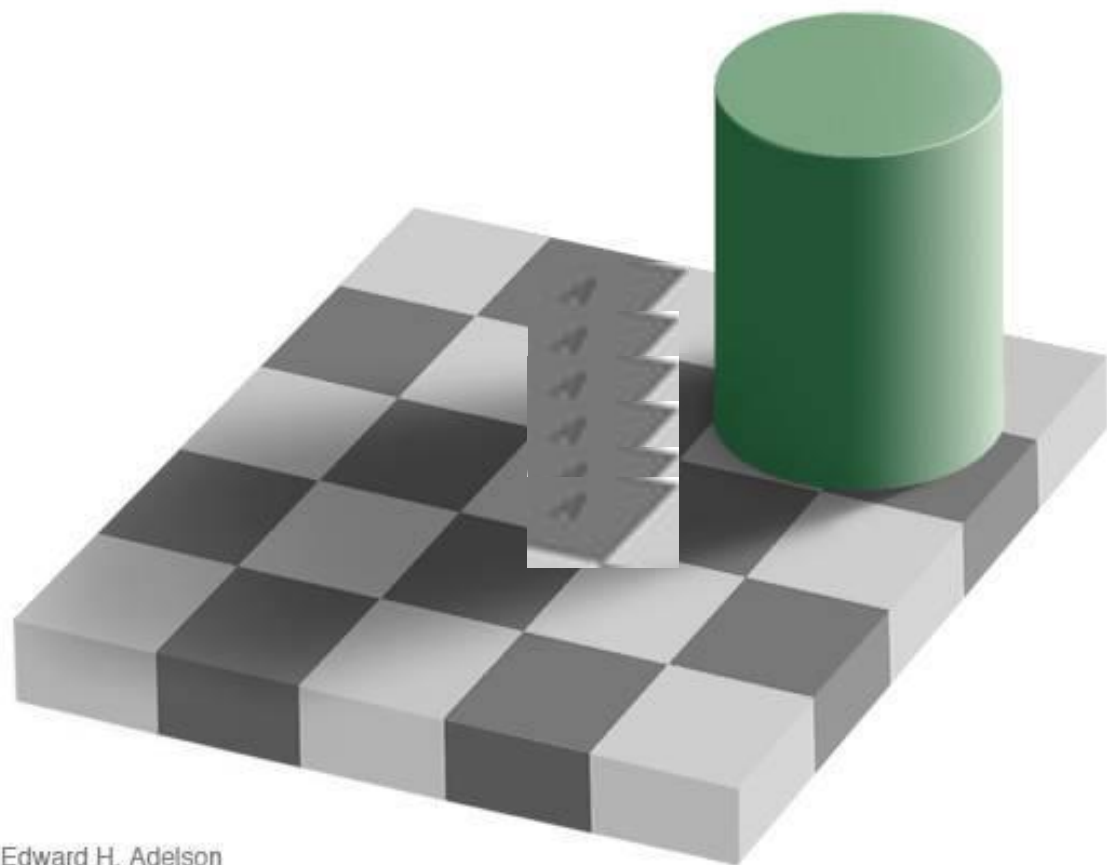
Mach(マッハ)効果(教科書)※、Cervical burnout(バーンアウト)効果など隣接する濃度に引きずられる。

何らかの構造で区分されていると引きずられる影響が小さい。



濃淡のパターンと影の影響を過剰に感じ取ってしまう錯視。

エックス線画像は様々な濃淡画像の重ね合わせで構成されているため、要注意。

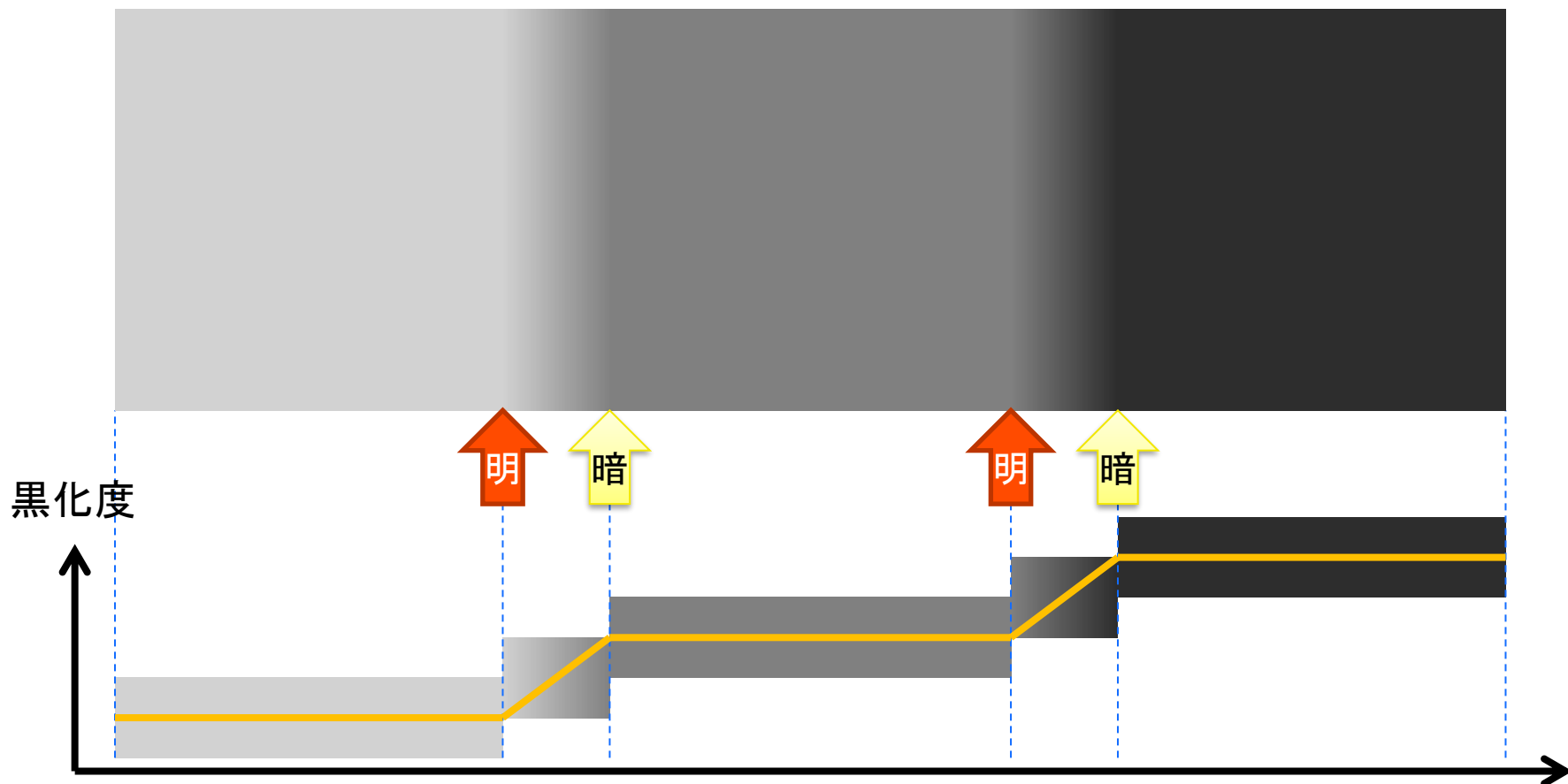


※教科書のMach効果は錯視専門家によるとChevreul効果とのこと。

補遺・錯視専門領域での Mach band(マッハバンド)

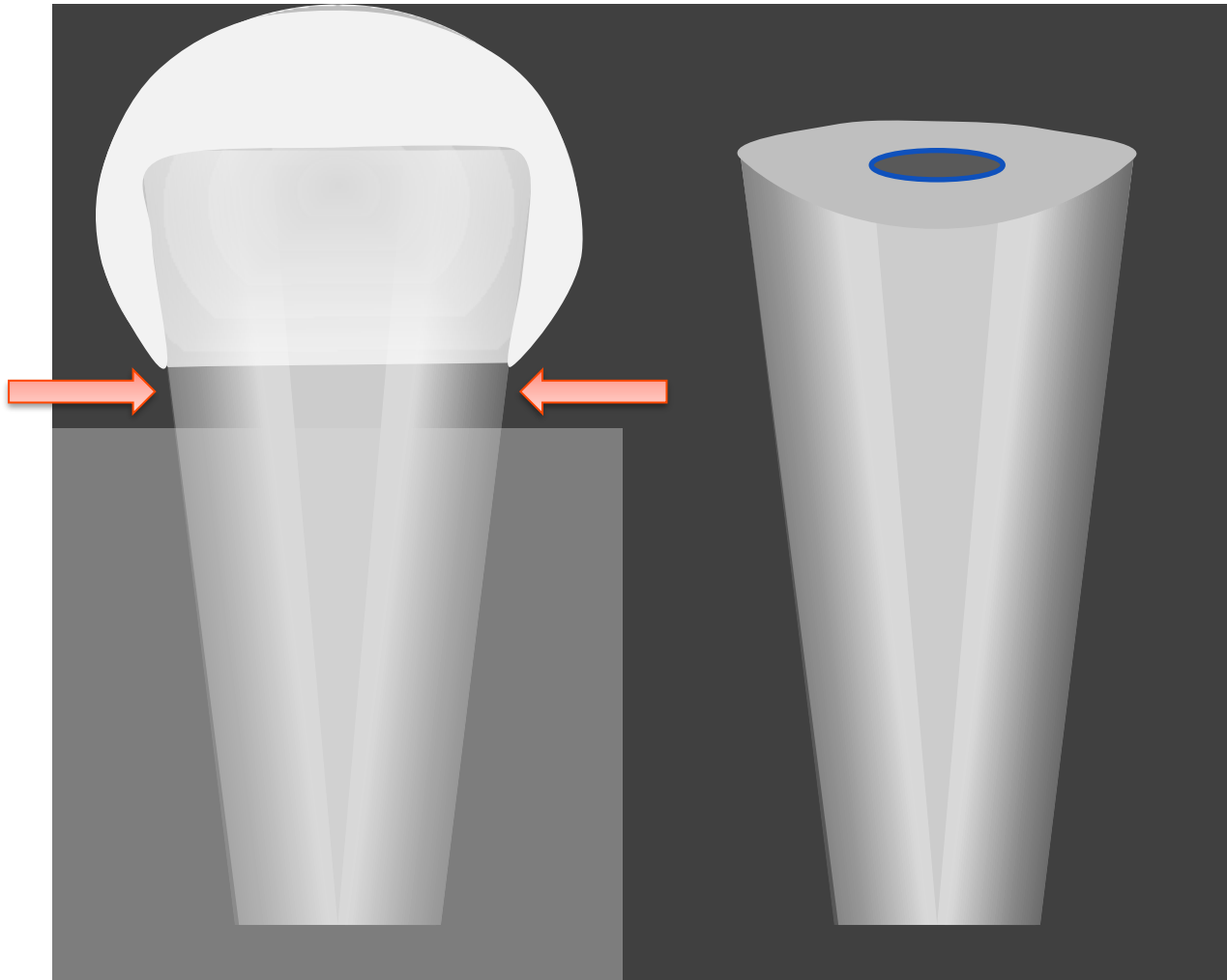
均一な濃度の間に一定の割合で変化する濃度勾配領域が介在するとき、境界部分に「存在しない濃度勾配」を知覚する。

※教科書のMach効果とは異なる定義なので注意

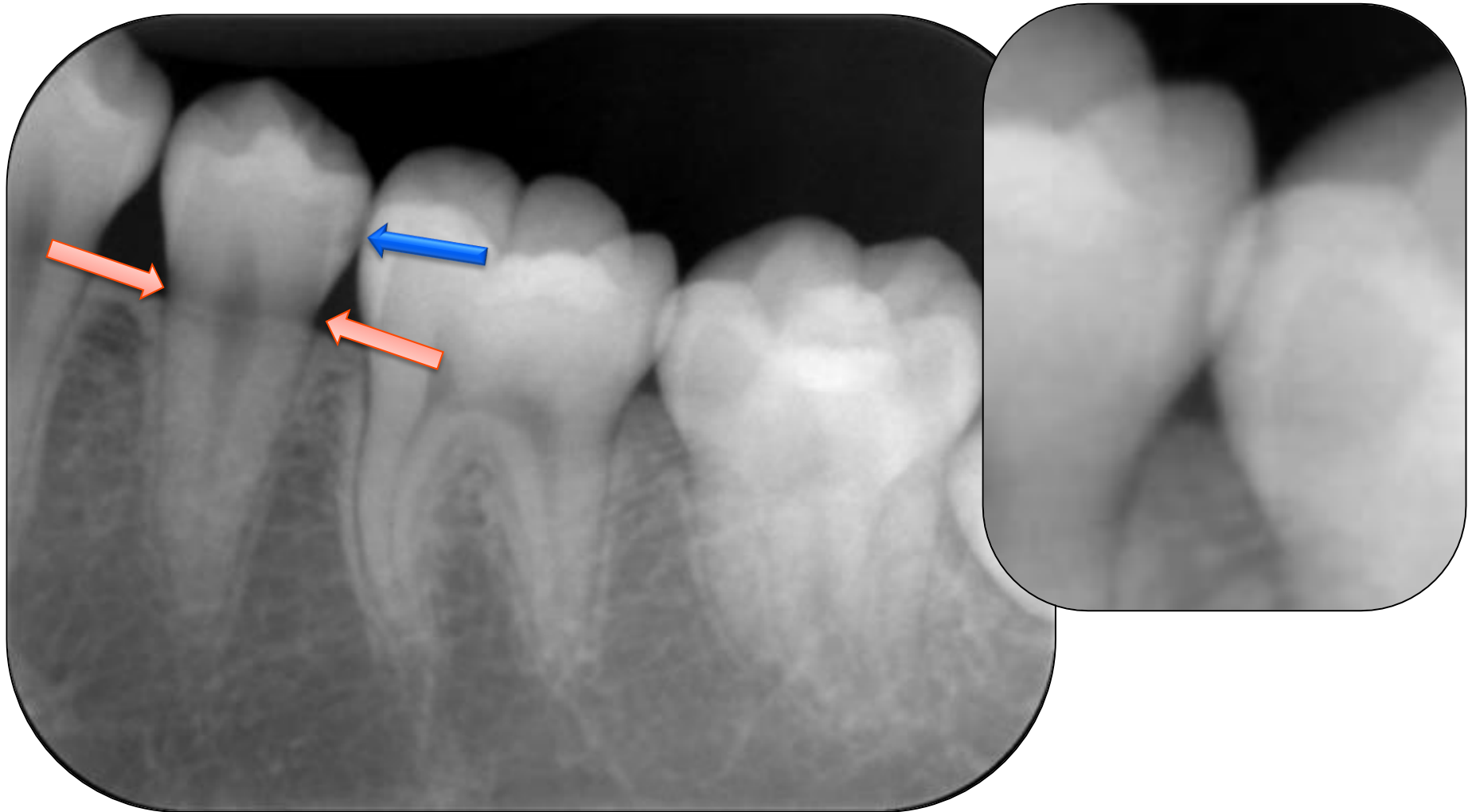


Cervical Burnout(バーンアウト)

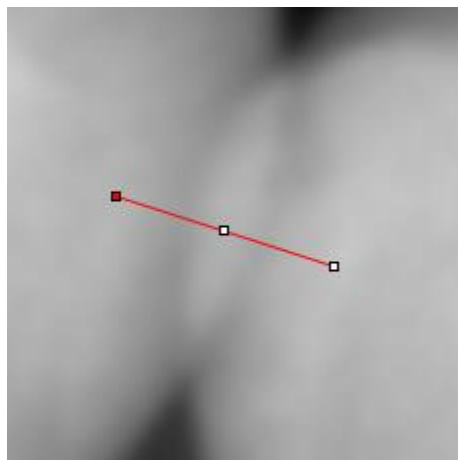
重積効果(エナメル質や歯槽骨の重積)にて薄い歯頸部象牙質辺縁の透過性が強調される。



「バーンアウト」(↑)と「う蝕」(↑)

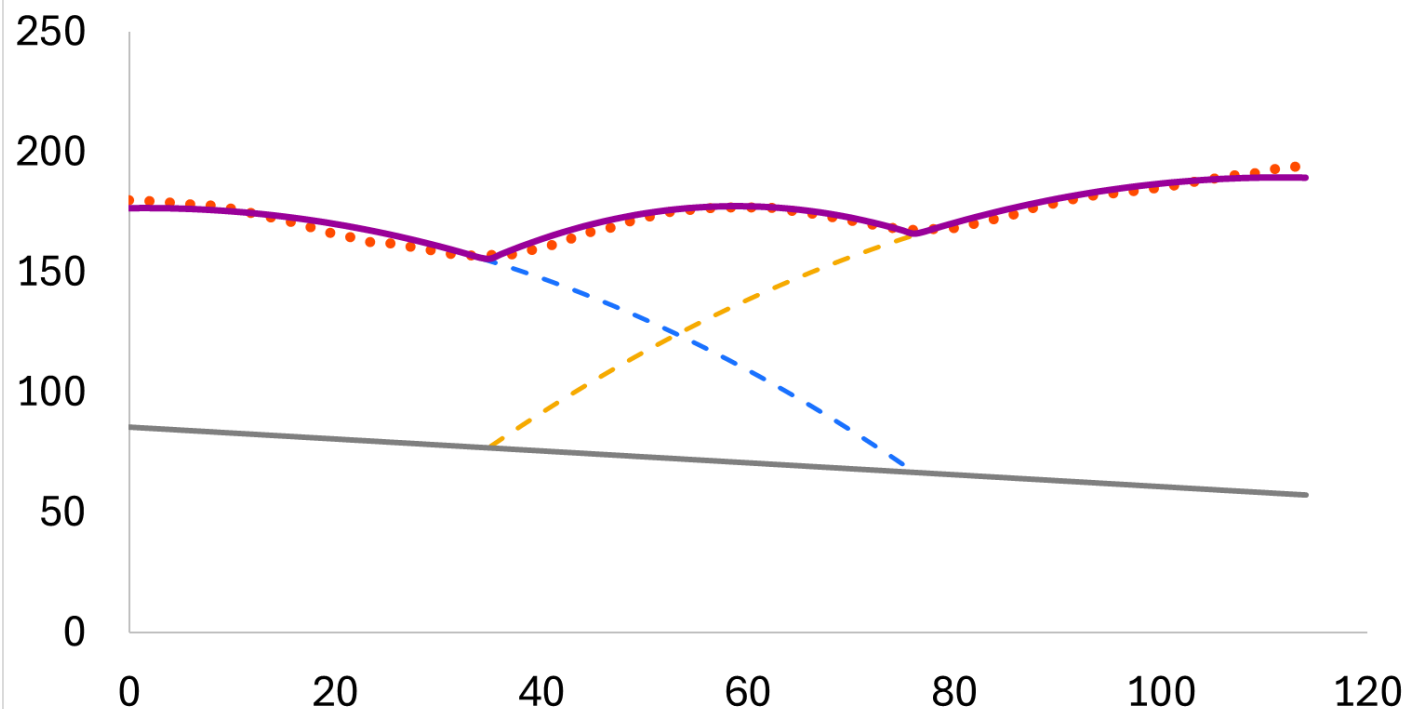


重積効果



重積効果のシミュレーションと実測値

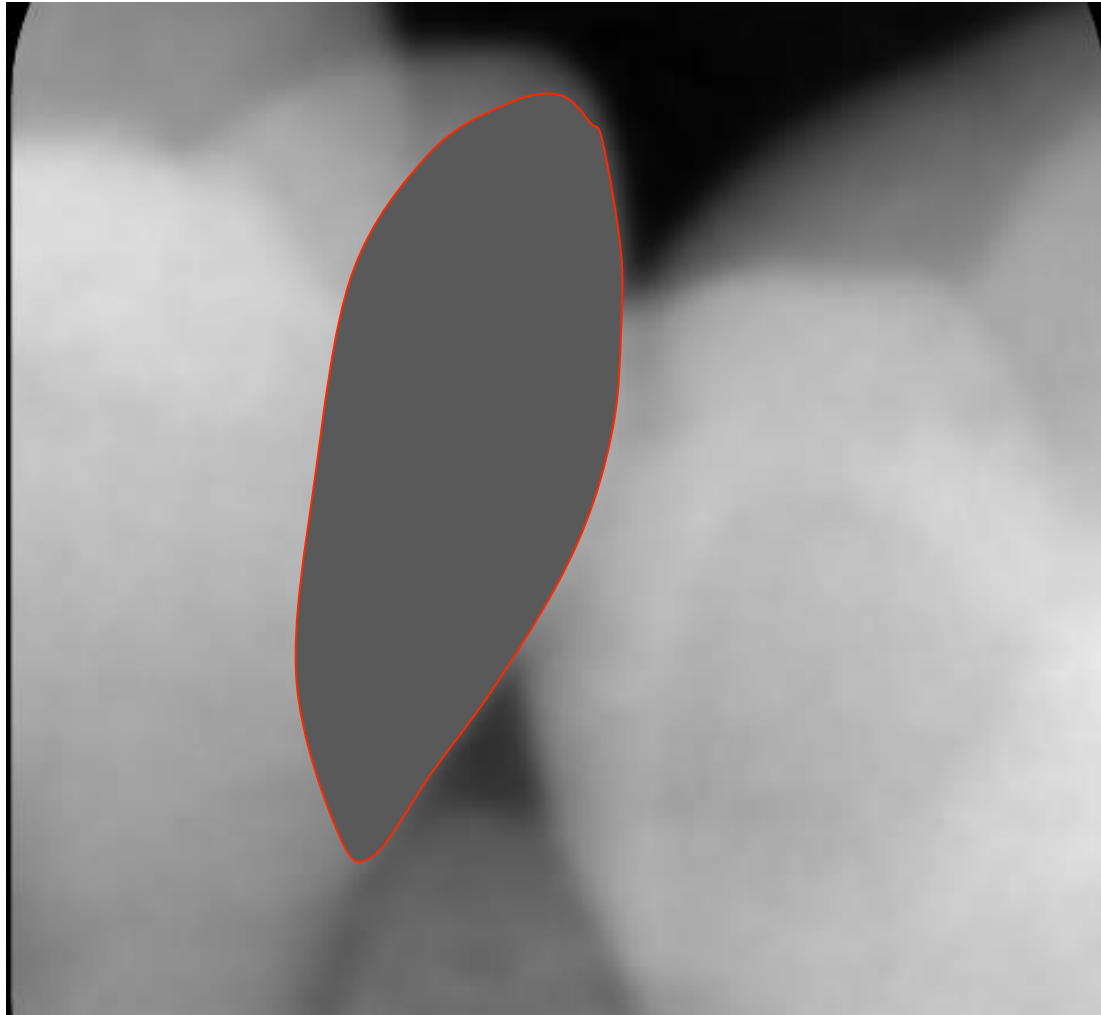
●●● original - - - Tooth-A - - - Tooth-B — overlap — base



重積部分でのシュブルール効果 教科書ではマツハ効果



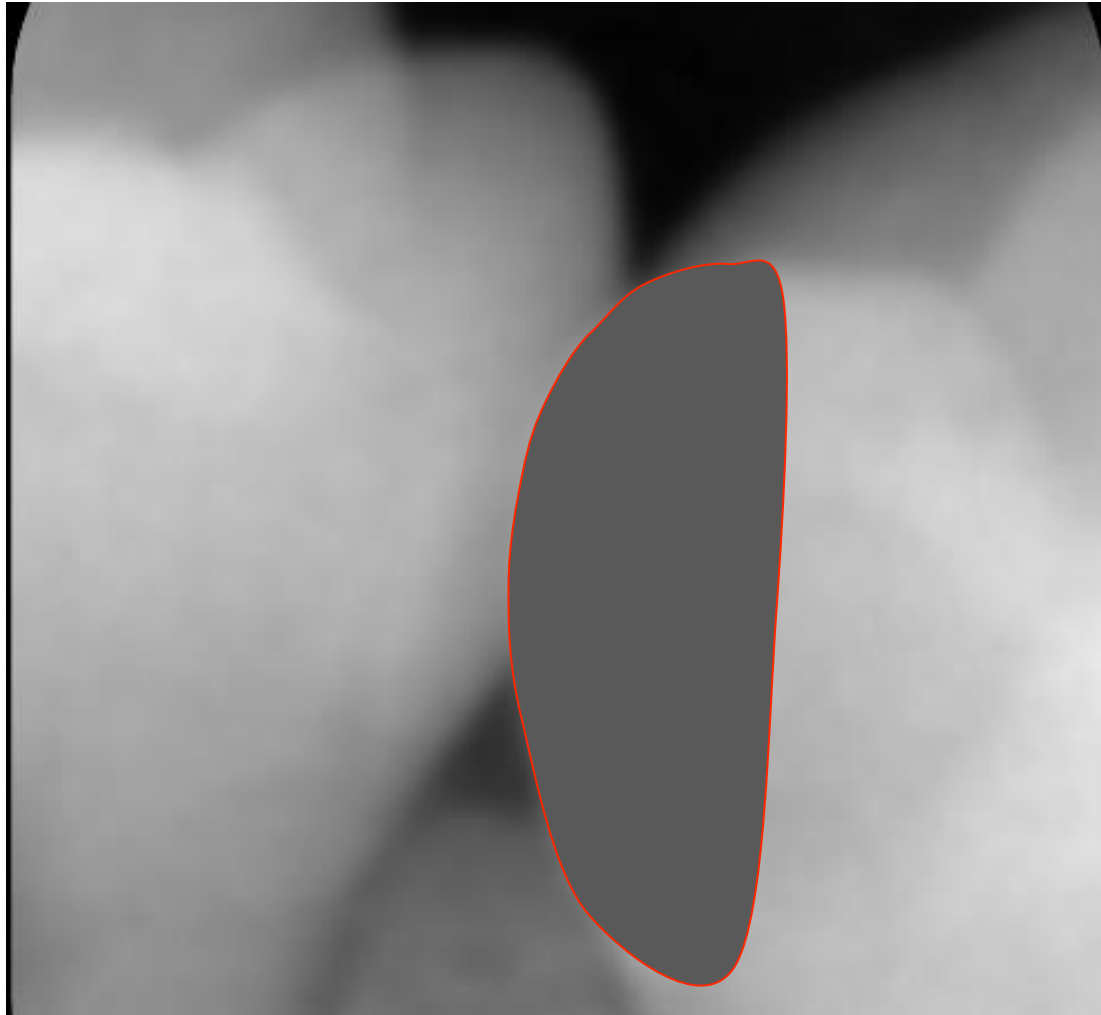
重積部分でのシュブルール効果 教科書ではマツハ効果



重積部分でのシュブルール効果 教科書ではマツハ効果



重積部分でのシュブルール効果 教科書ではマツハ効果



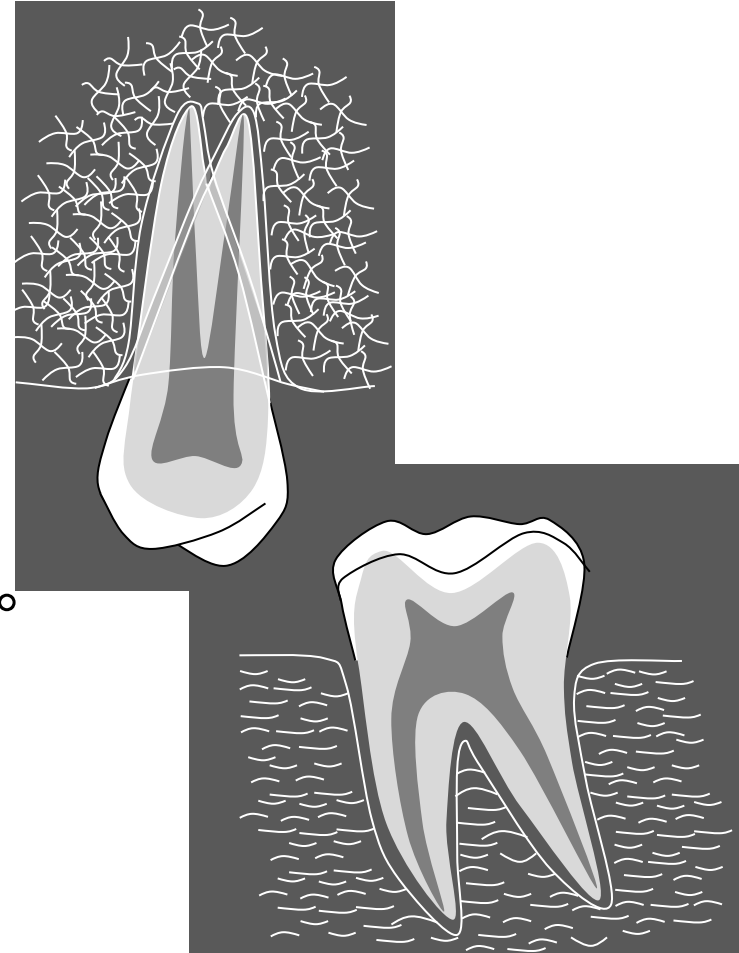
エックス線学的な解剖構造

歯と歯周組織のみに限定
4年生の講義を先取り

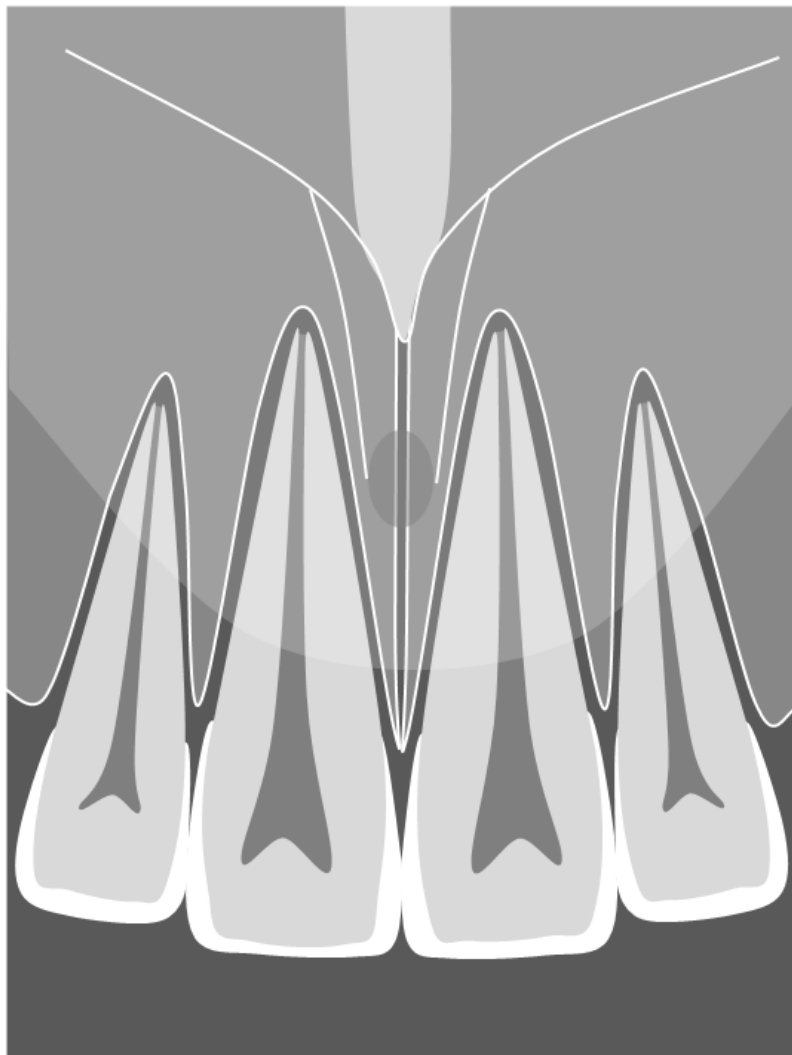
歯と歯周組織のエックス線像

エックス線透過性と濃淡と構造

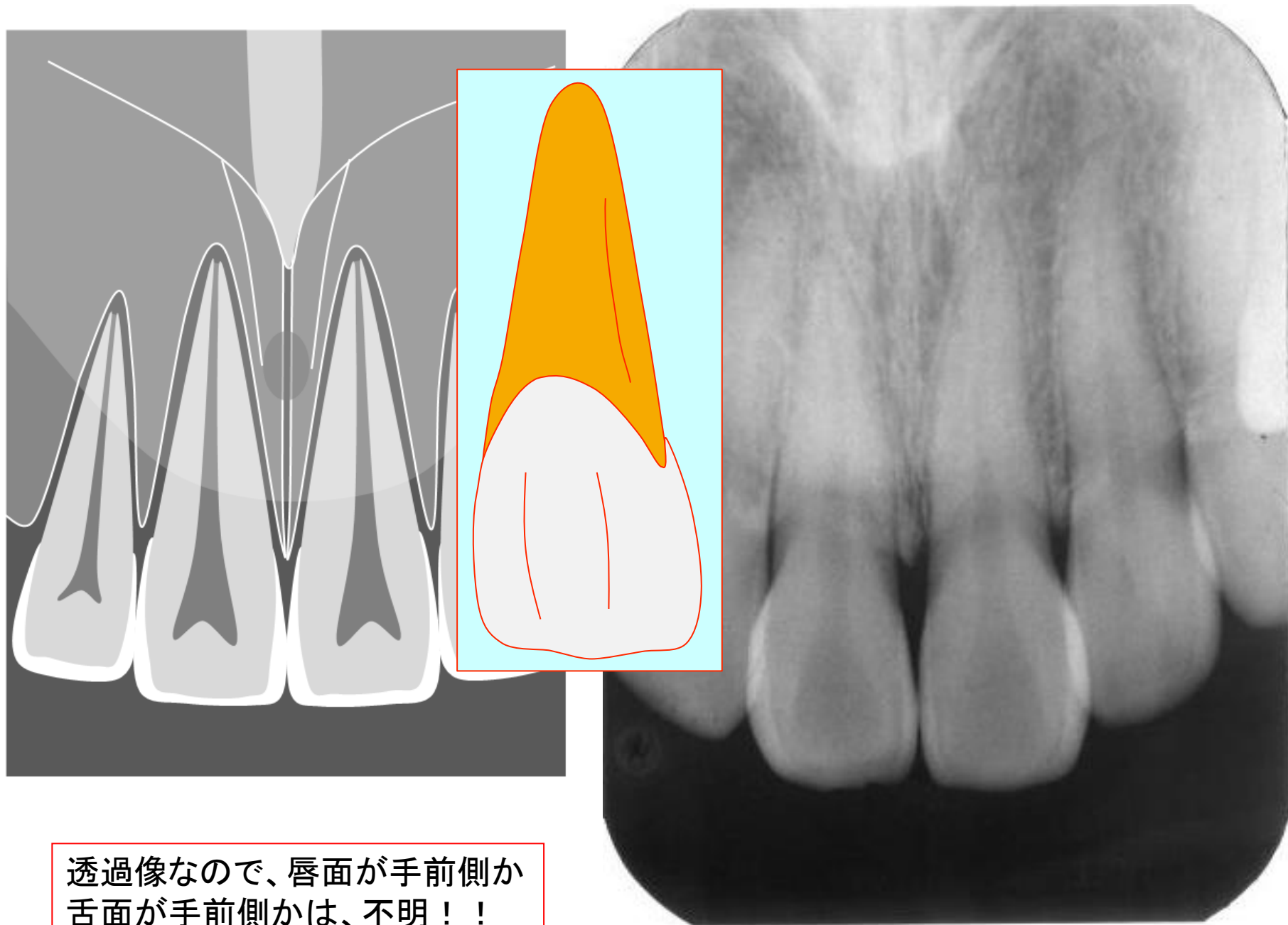
- エナメル質
- 象牙質・セメント質
- 歯髄腔
- 歯根膜腔
- 歯槽硬線（白線、固有歯槽骨）
 - 硬化しているわけではない。
 - 特に接線効果で白い線に見える。
- 骨梁
 - 上顎：網目状
 - 下顎：水平もしくは梯子状
- 栄養管
- その他、解剖構造については、4年次に学習



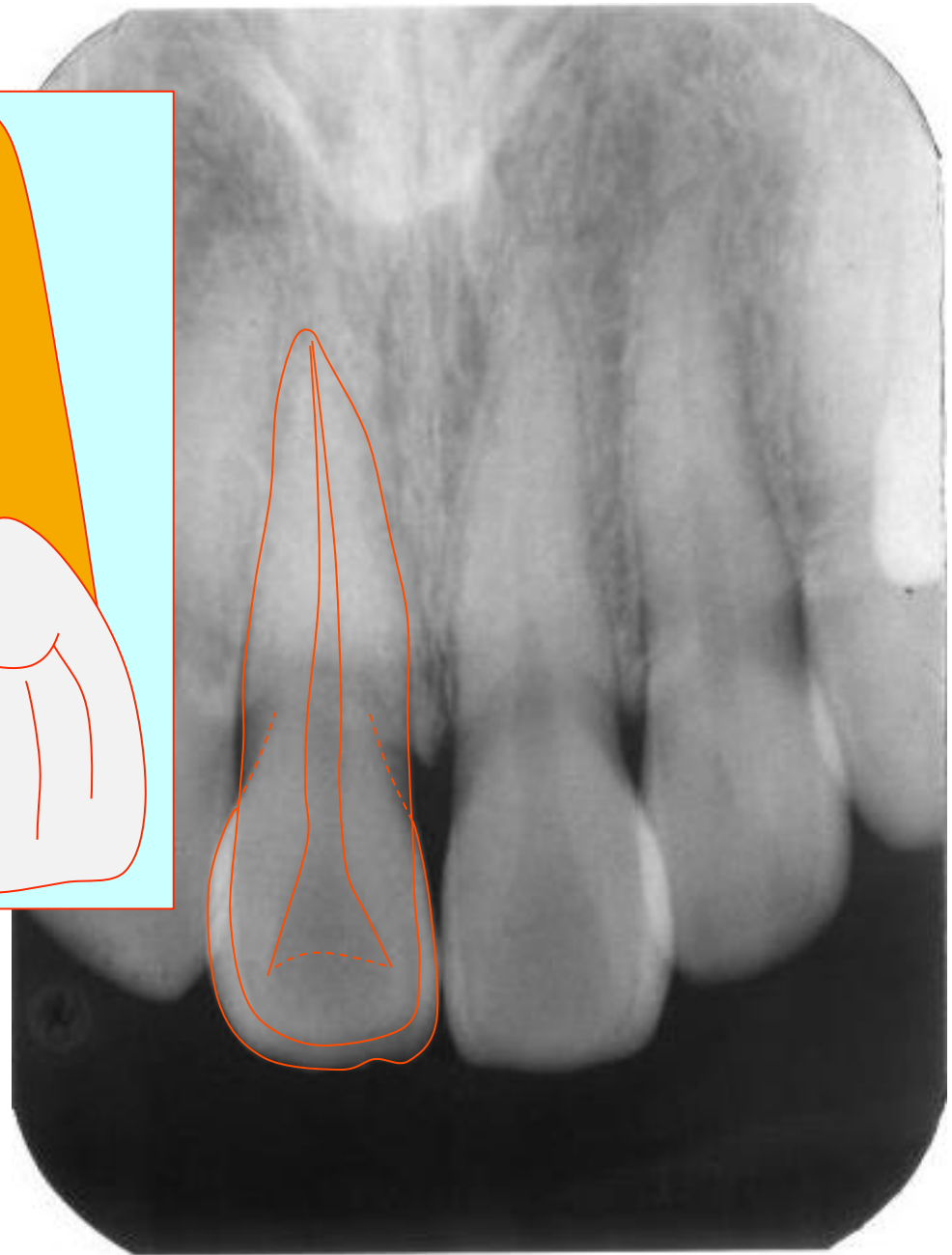
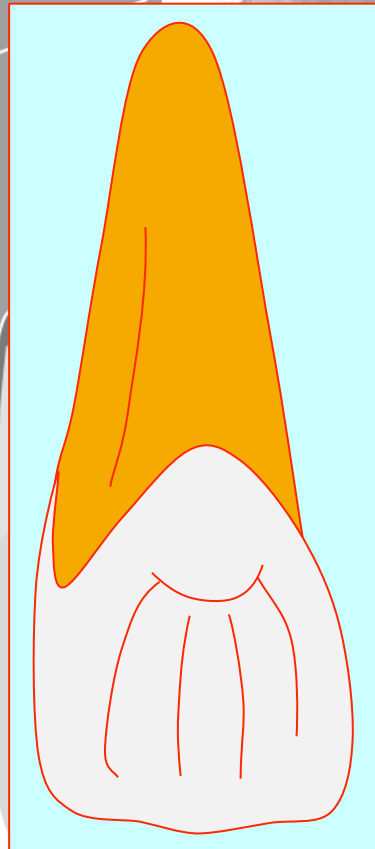
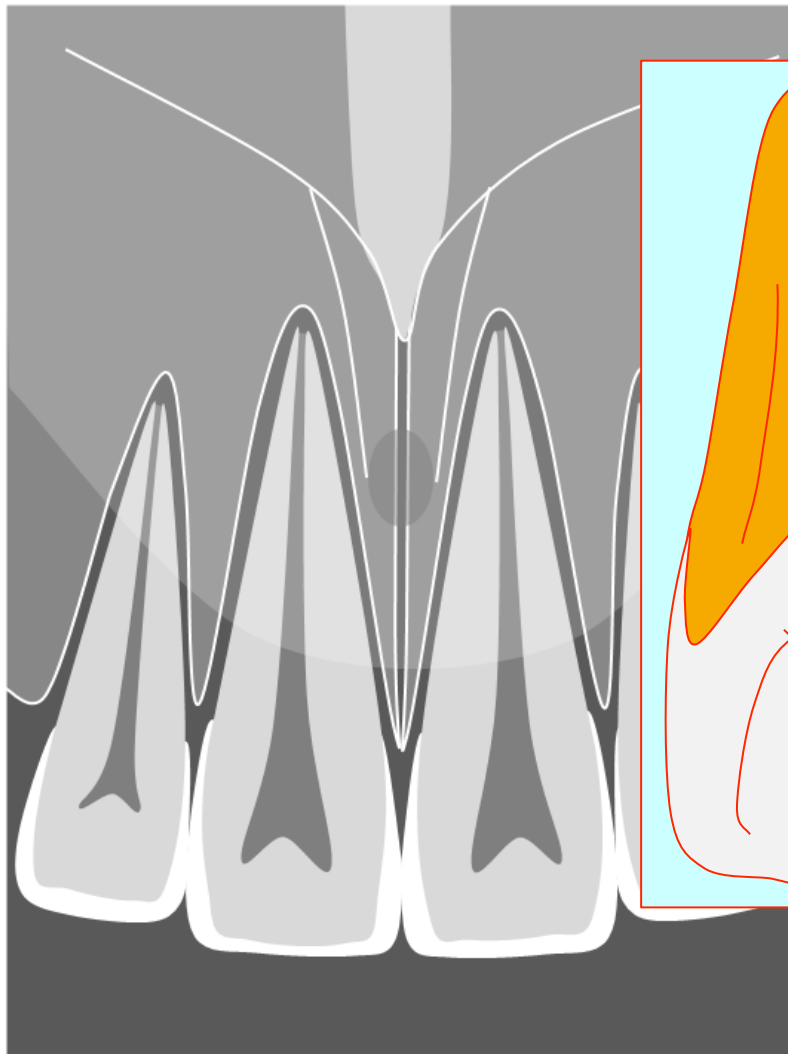




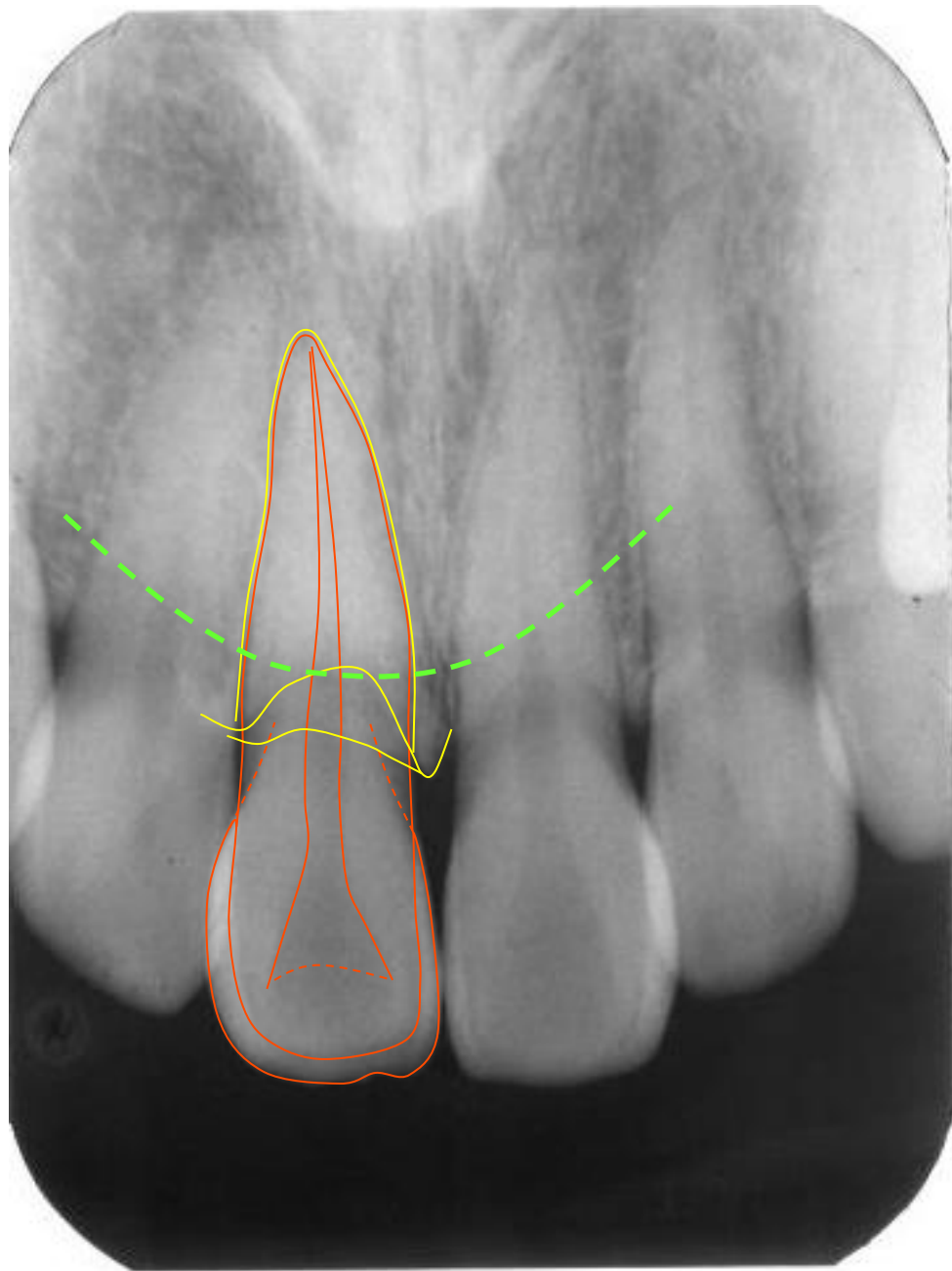
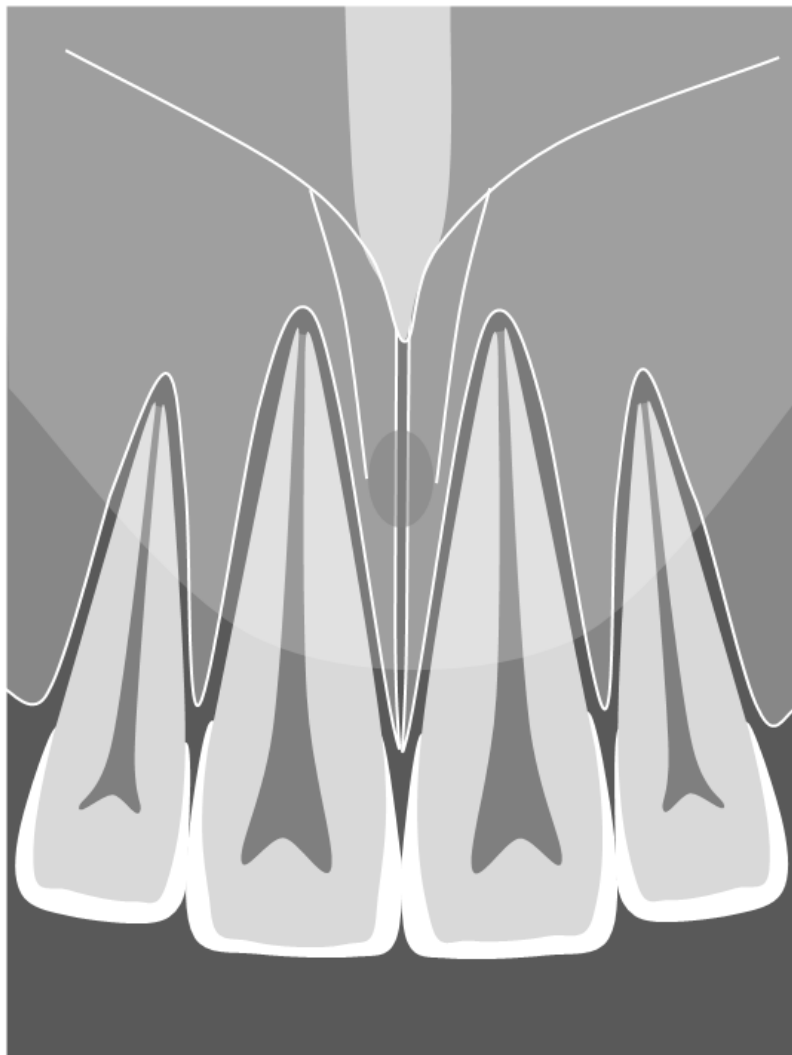
何と何が区別できて
何と何が区別できないのか？



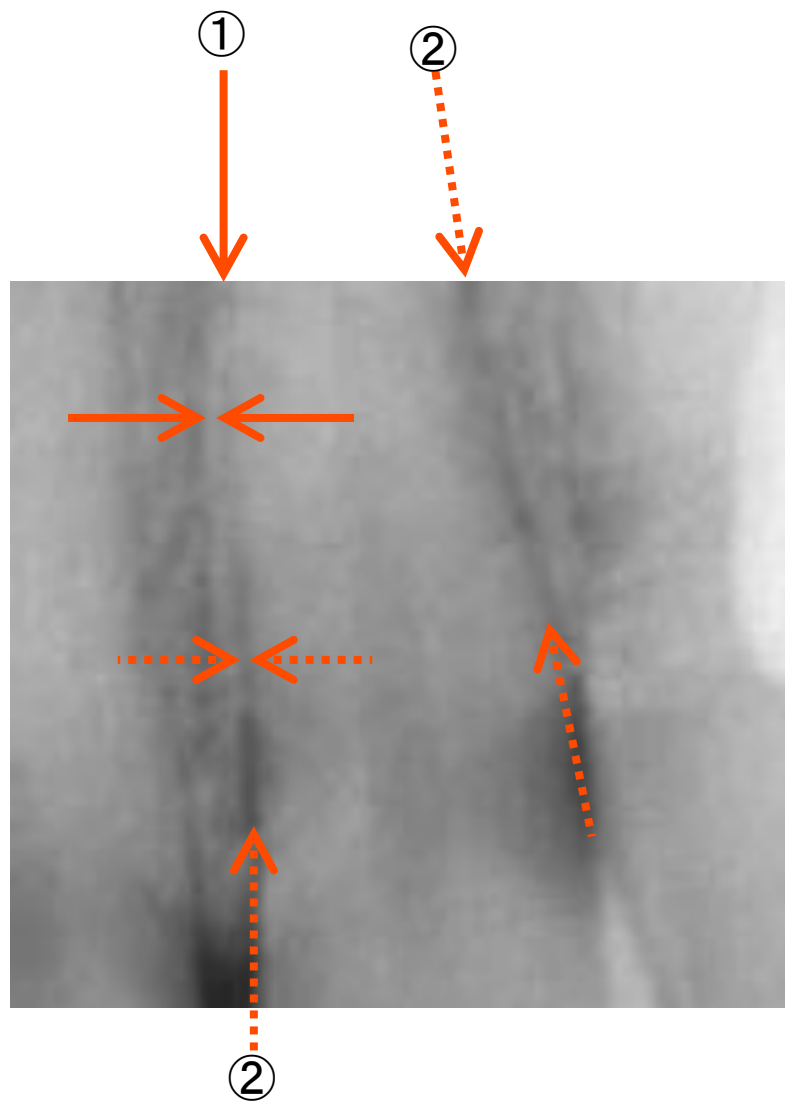
透過像なので、唇面が手前側か
舌面が手前側かは、不明！！



何と何が区別できて
何と何が区別できないのか？

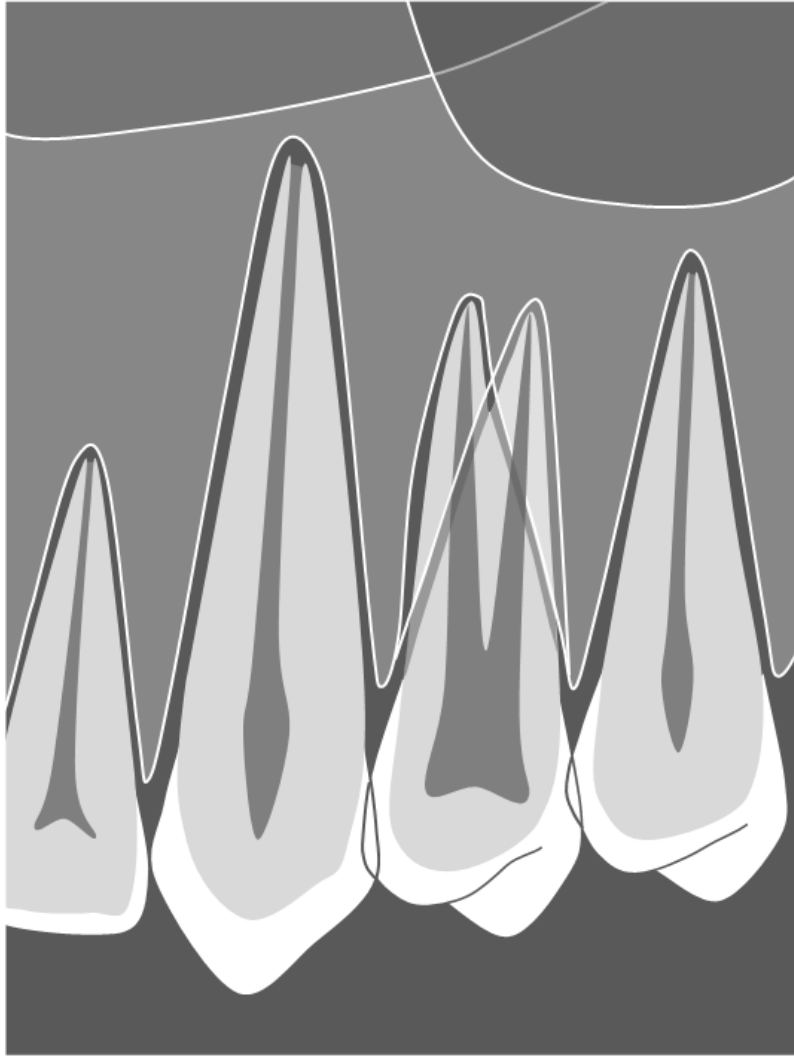


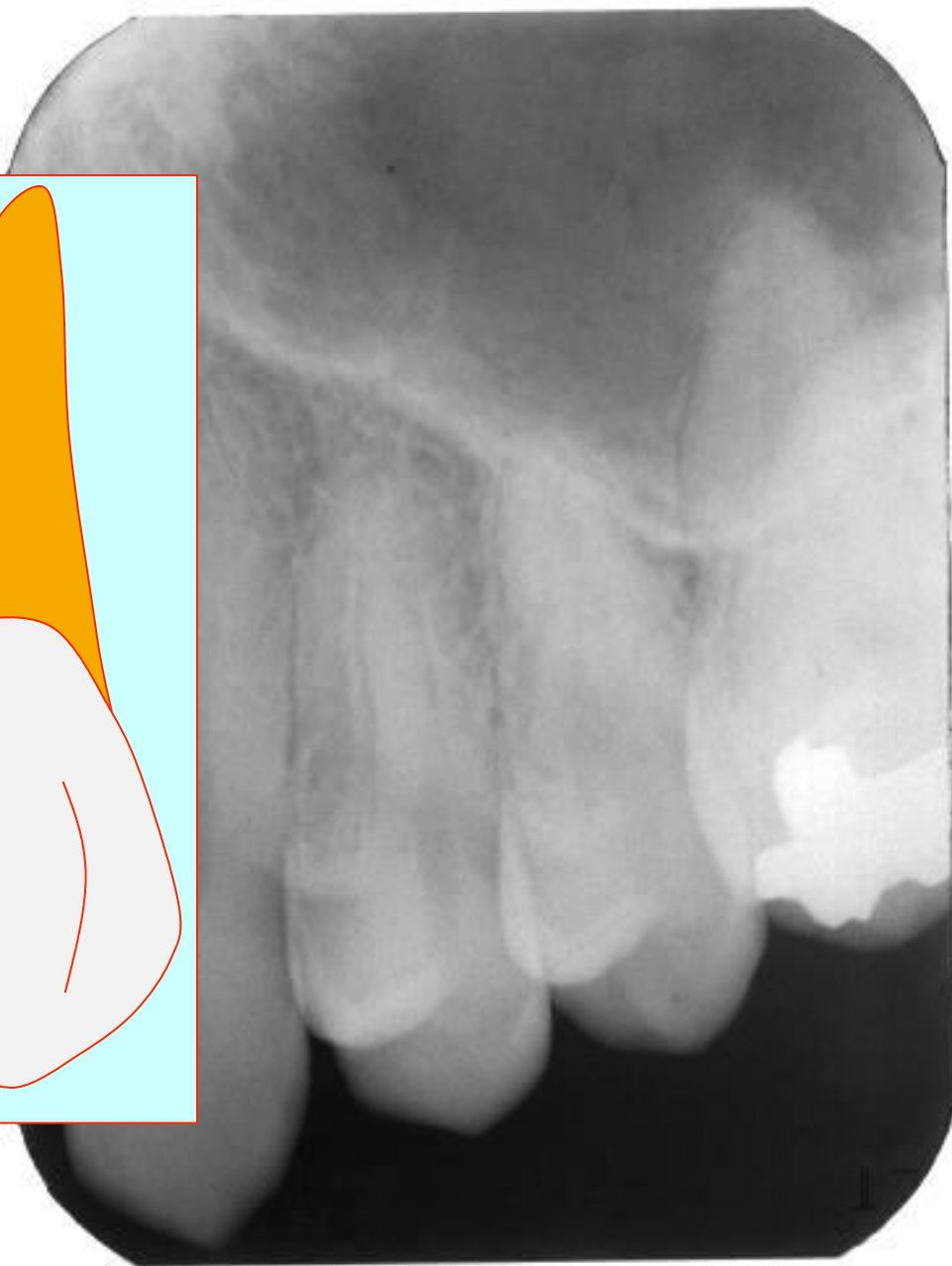
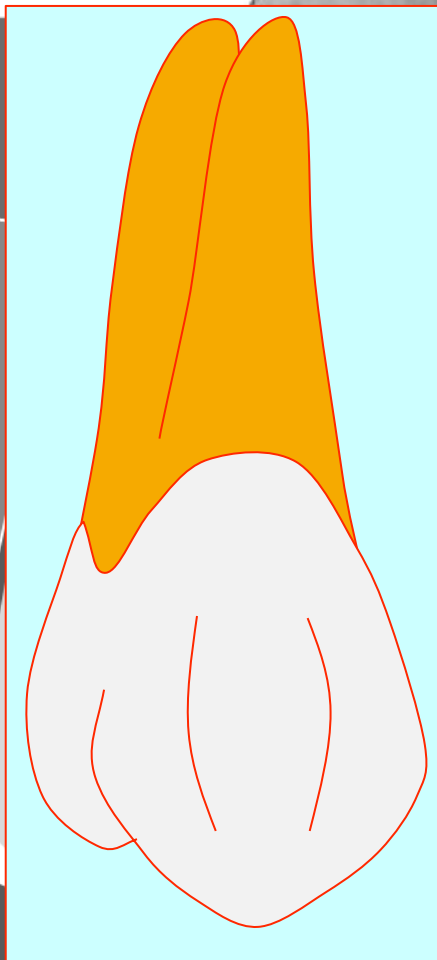
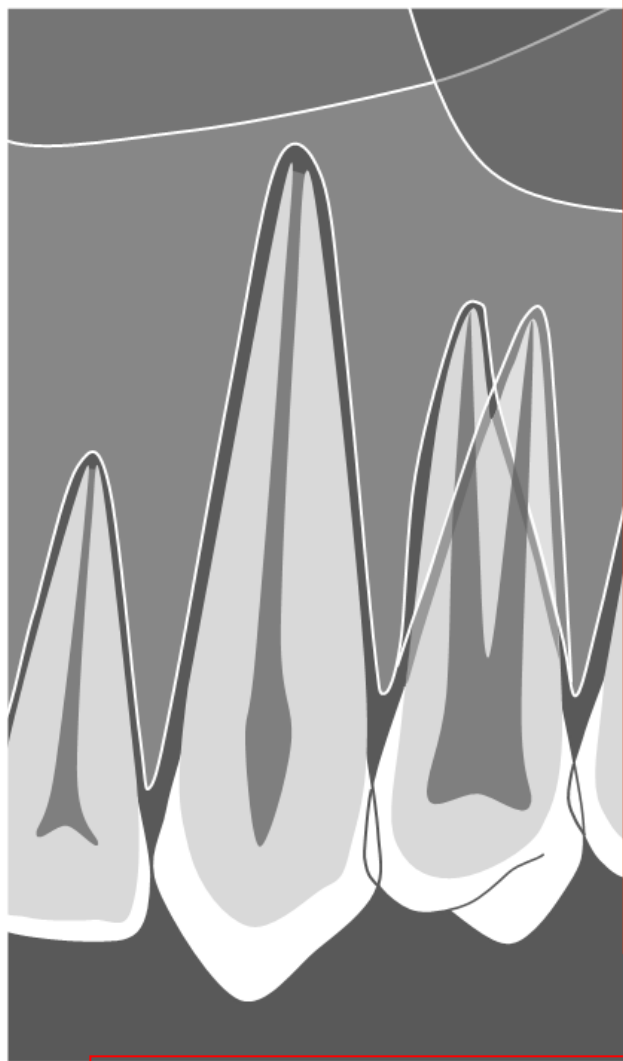
何と何が区別できて
何と何が区別できないのか？



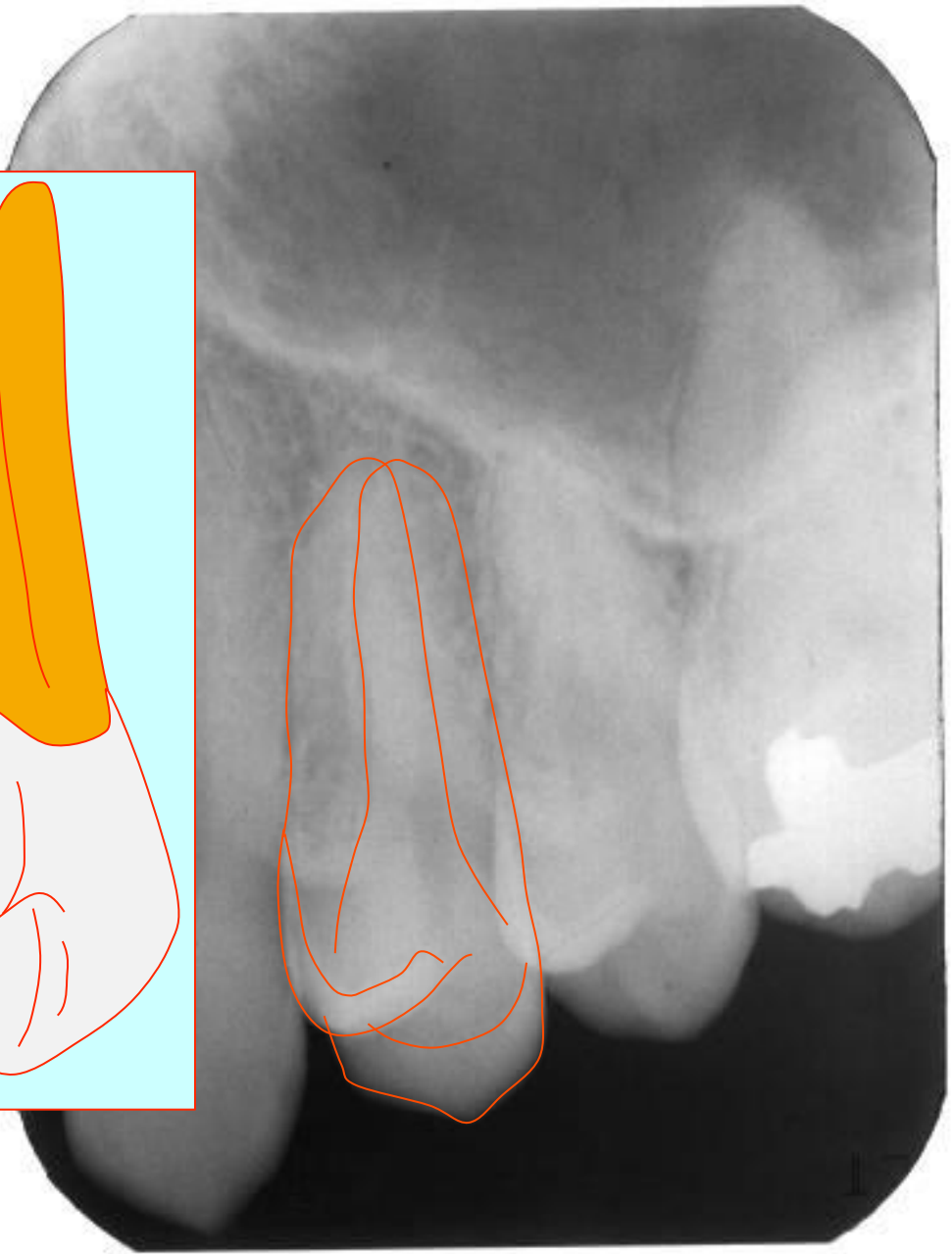
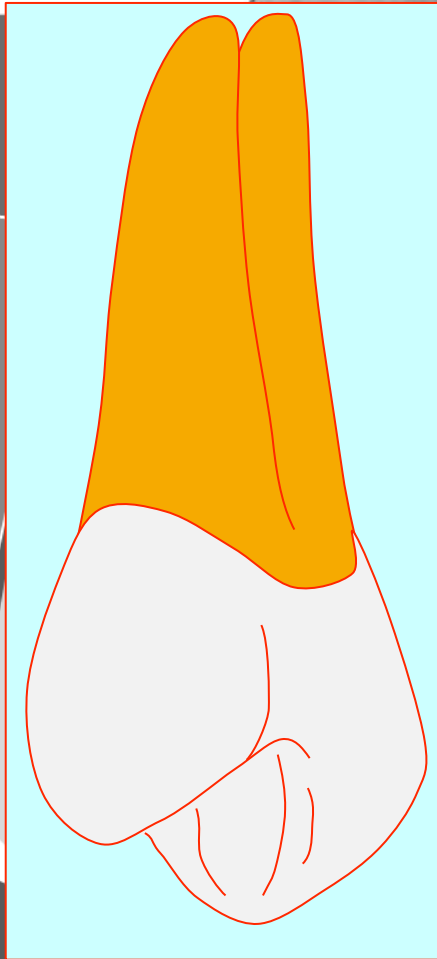
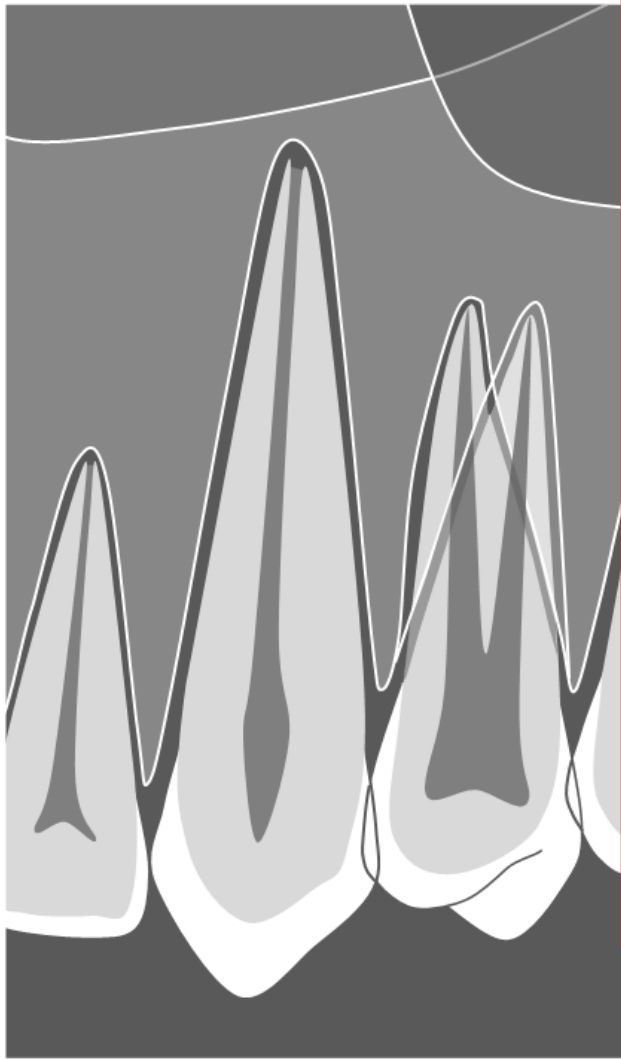
何と何が区別できて
何と何が区別できないのか？



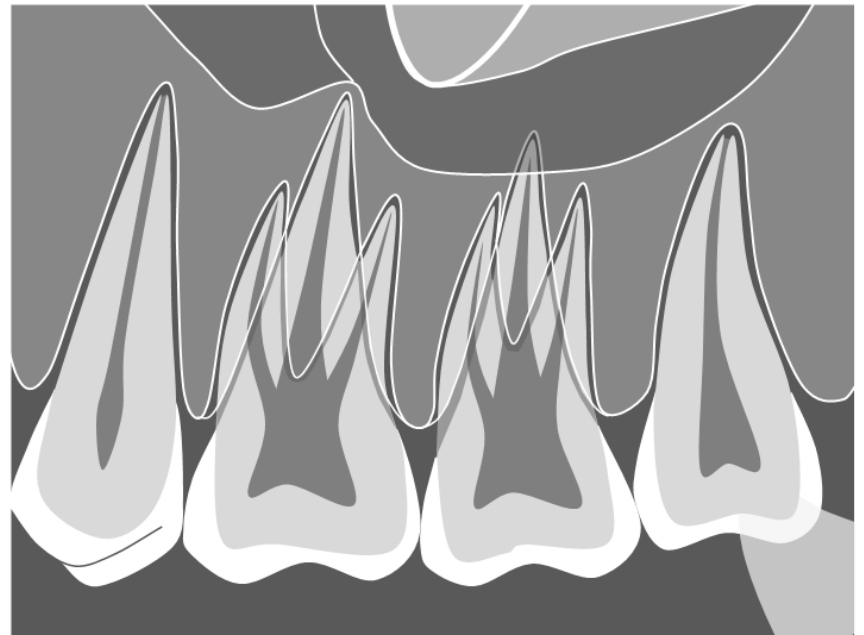
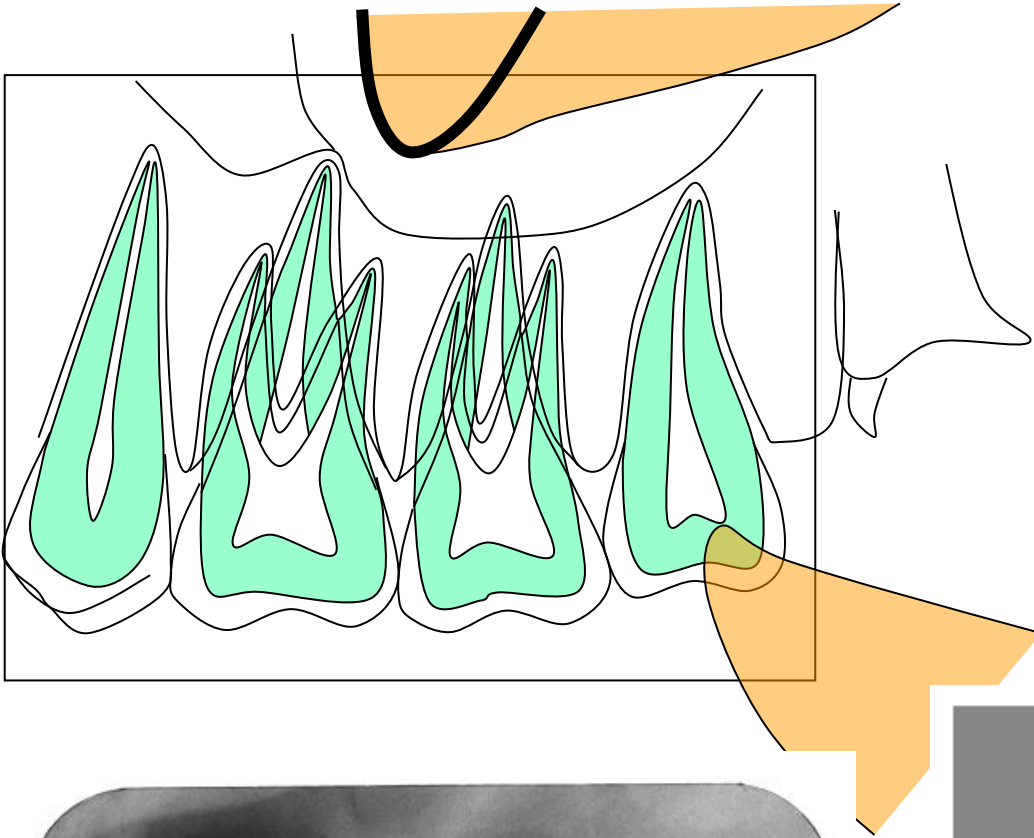




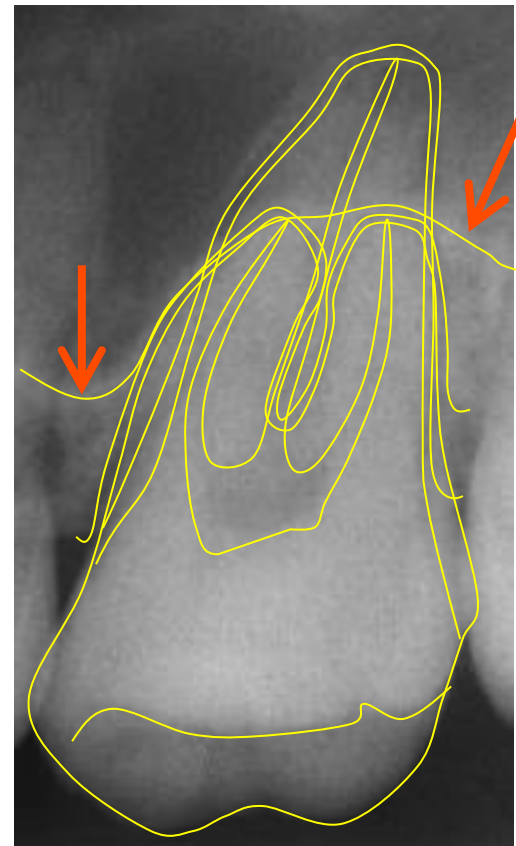
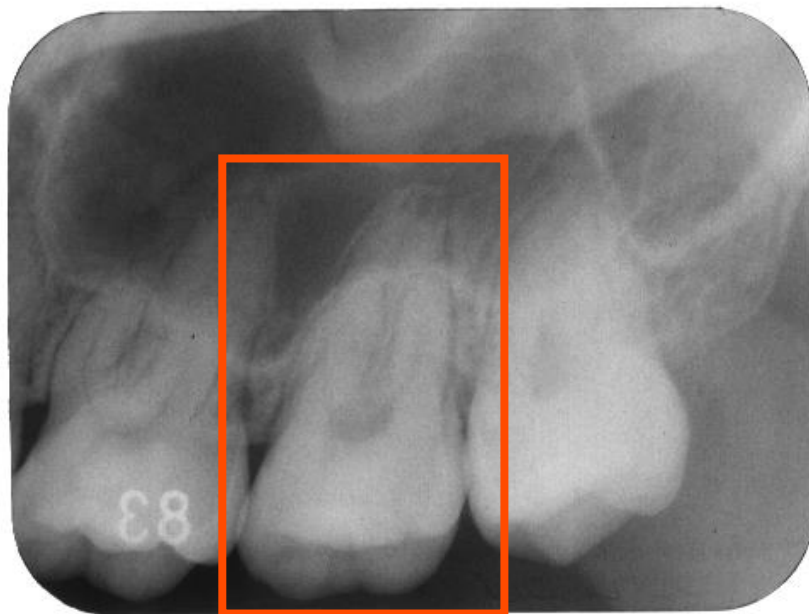
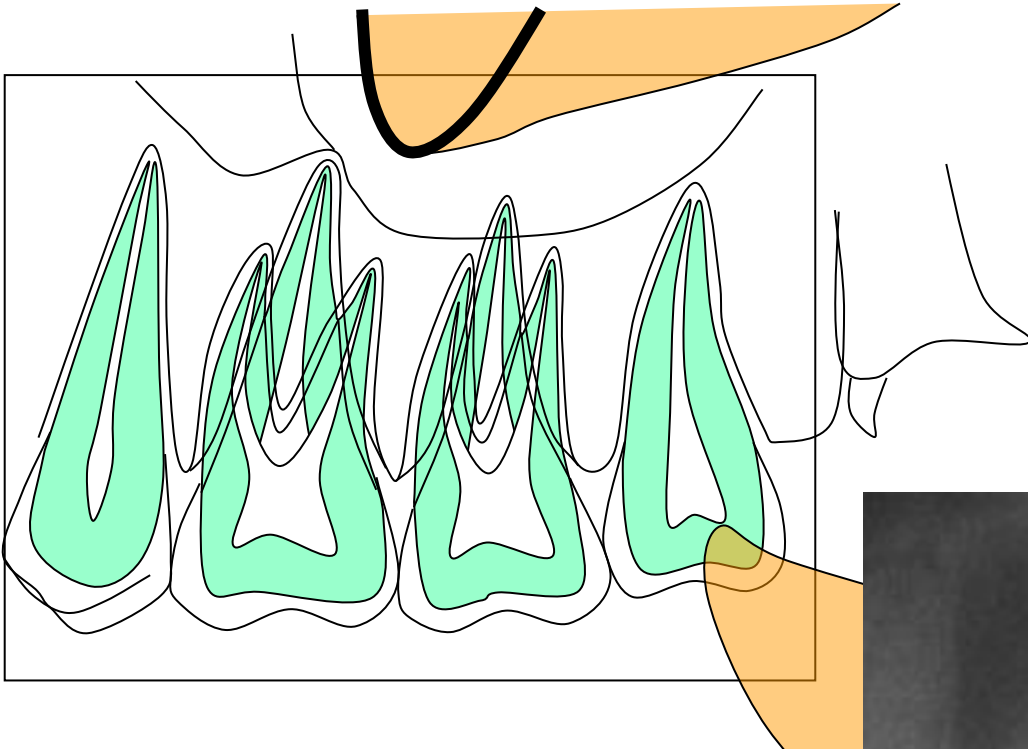
透過像なので、唇面が手前側か
舌面が手前側かは、不明！！



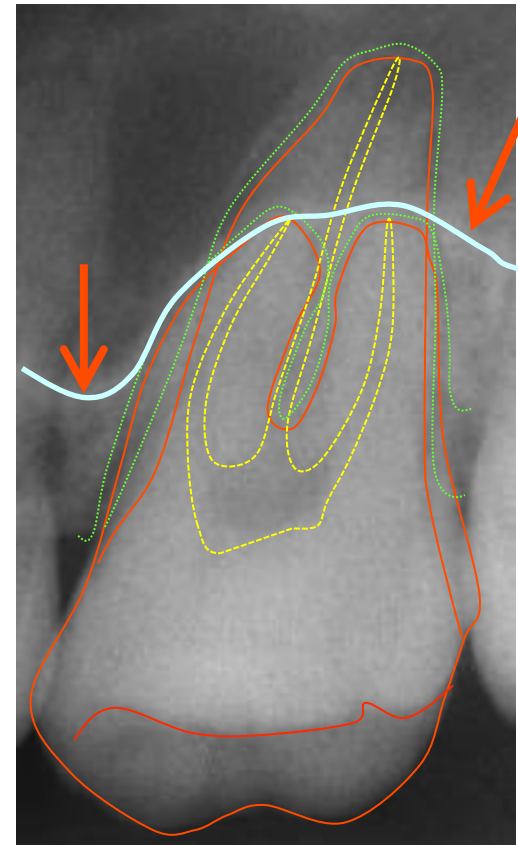
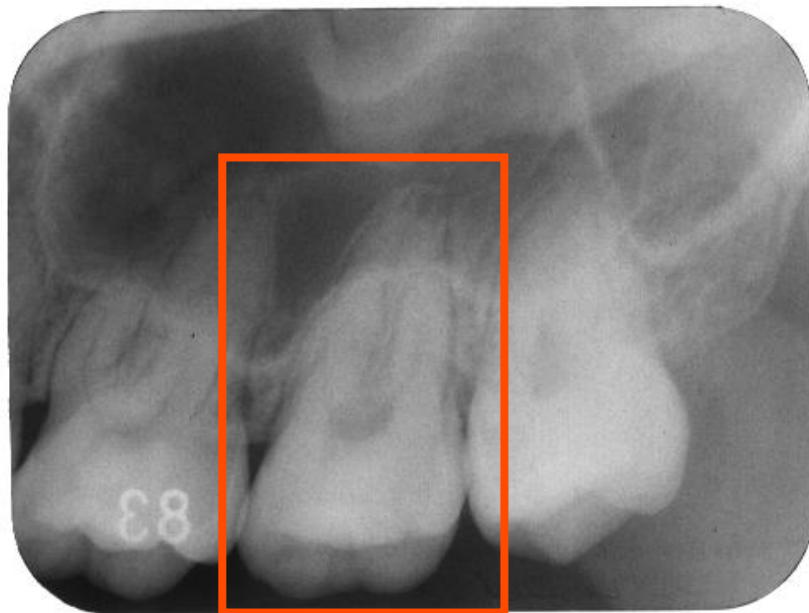
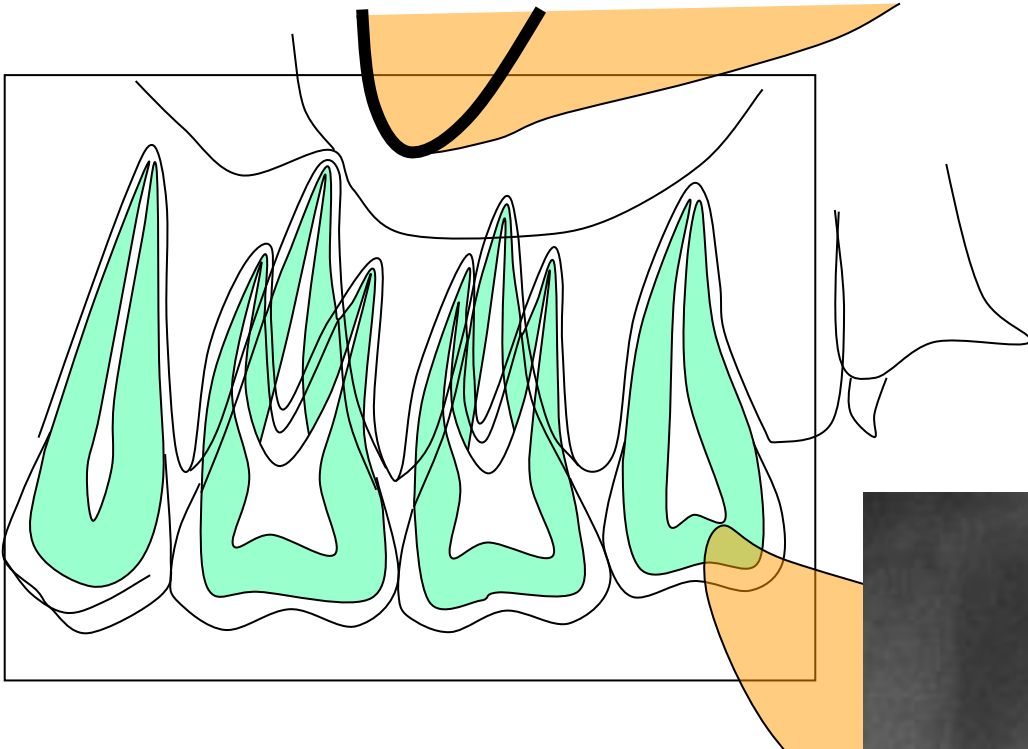
区別しにくい構造は
歯根膜腔と歯髓腔！
さらに周囲構造の重積
※ここでは上顎洞底線



区別しにくい構造は
歯根膜腔と歯髓腔！
さらに周囲構造の重積
※ここでは上顎洞底線



区別しにくい構造は
歯根膜腔と歯髓腔！
さらに周囲構造の重積
※ここでは上顎洞底線

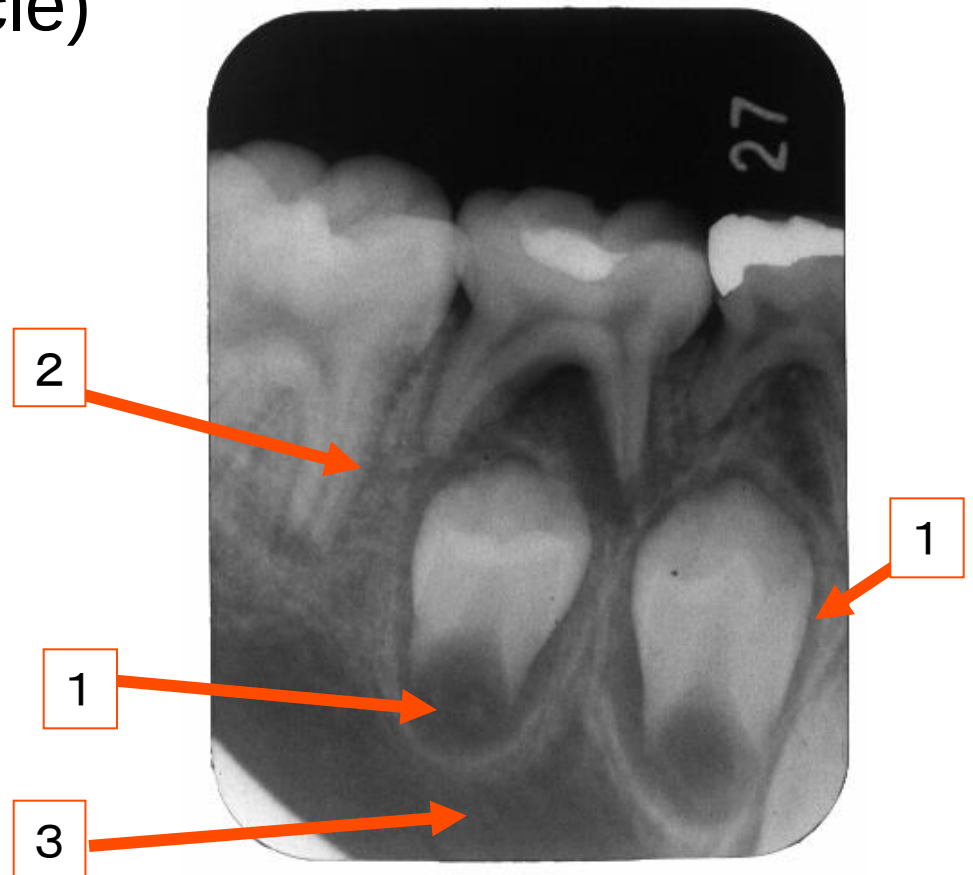


小児のデンタル

- 小児のデンタル(乳歯・永久歯胚)

- 歯小囊(dental follicle)
- 乳歯の歯根吸収

1. 骨の中の未完成の歯の周り
にあるエックス線透過性の高
い組織は何？
2. 萌出した歯と骨の間には何
がある？
3. 1および2は海面骨の間にあ
る組織とエックス線透過性は
異なる？



歯の異常像(1)

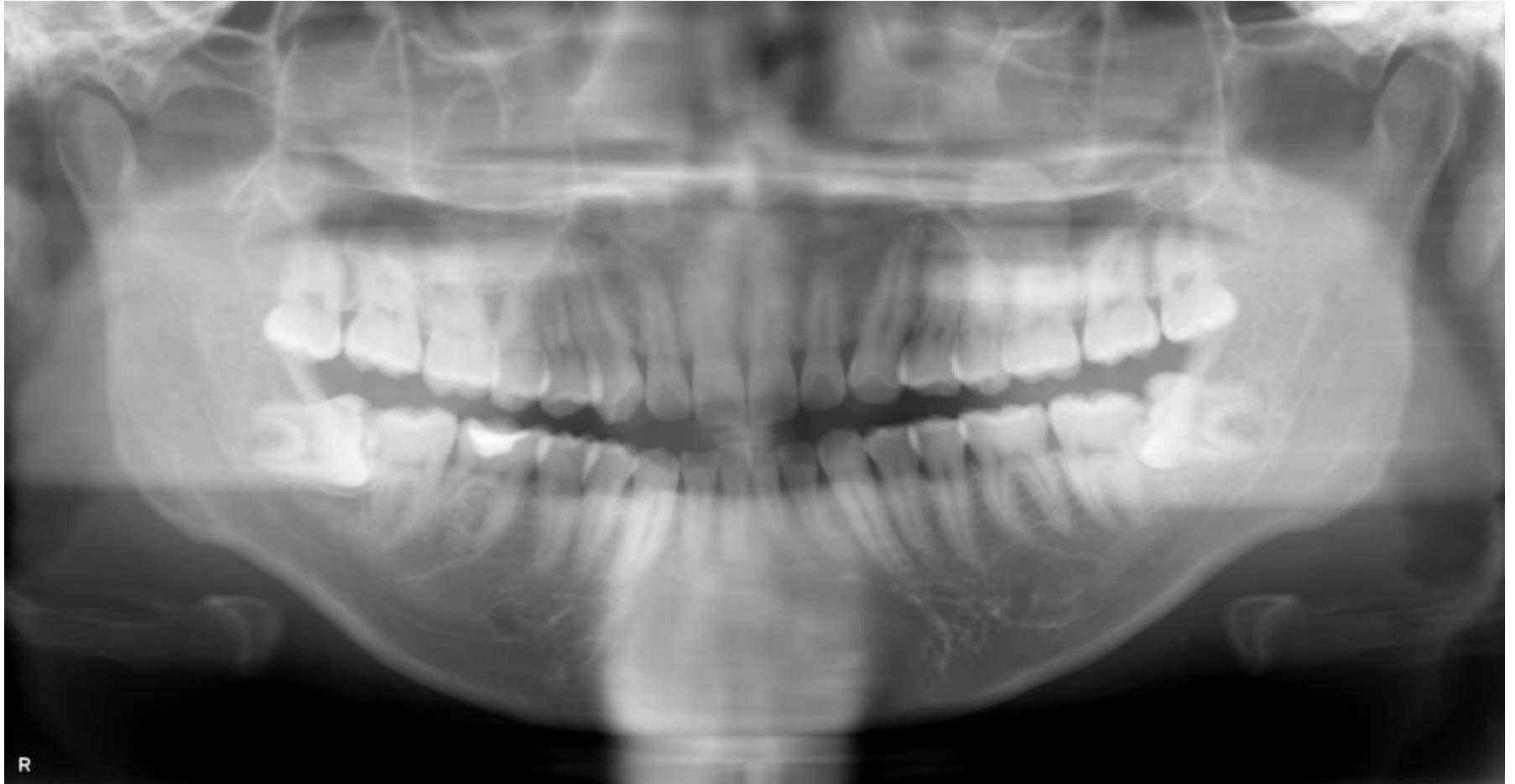
※は今回提示

- 歯数の異常
 - 部分無歯症、完全無歯症
 - 過剰歯(正中埋伏過剰歯、臼傍歯、臼後歯)
- 形・大きさの異常
 - 癒合歯、癒着歯、歯内歯(※)
 - 矮小歯、巨大歯、タウロドント(※)
 - 歯冠の異常(中心結節など)
 - 歯根の異常
 - 槌状根(※)、象牙質異形成症に伴う異常など

歯の異常像(2)

- 形成異常
 - エナメル質の形成異常
 - 減形成、形成不全
 - エナメル滴
 - 象牙質の形成異常
- 萌出の異常
 - 早期萌出 --- 全身疾患との関連
 - 萌出遅延 --- 局所ないし全身疾患との関連
- 歯の退行的変化
 - 咬耗症、摩耗症、侵蝕症(酸蝕症)など

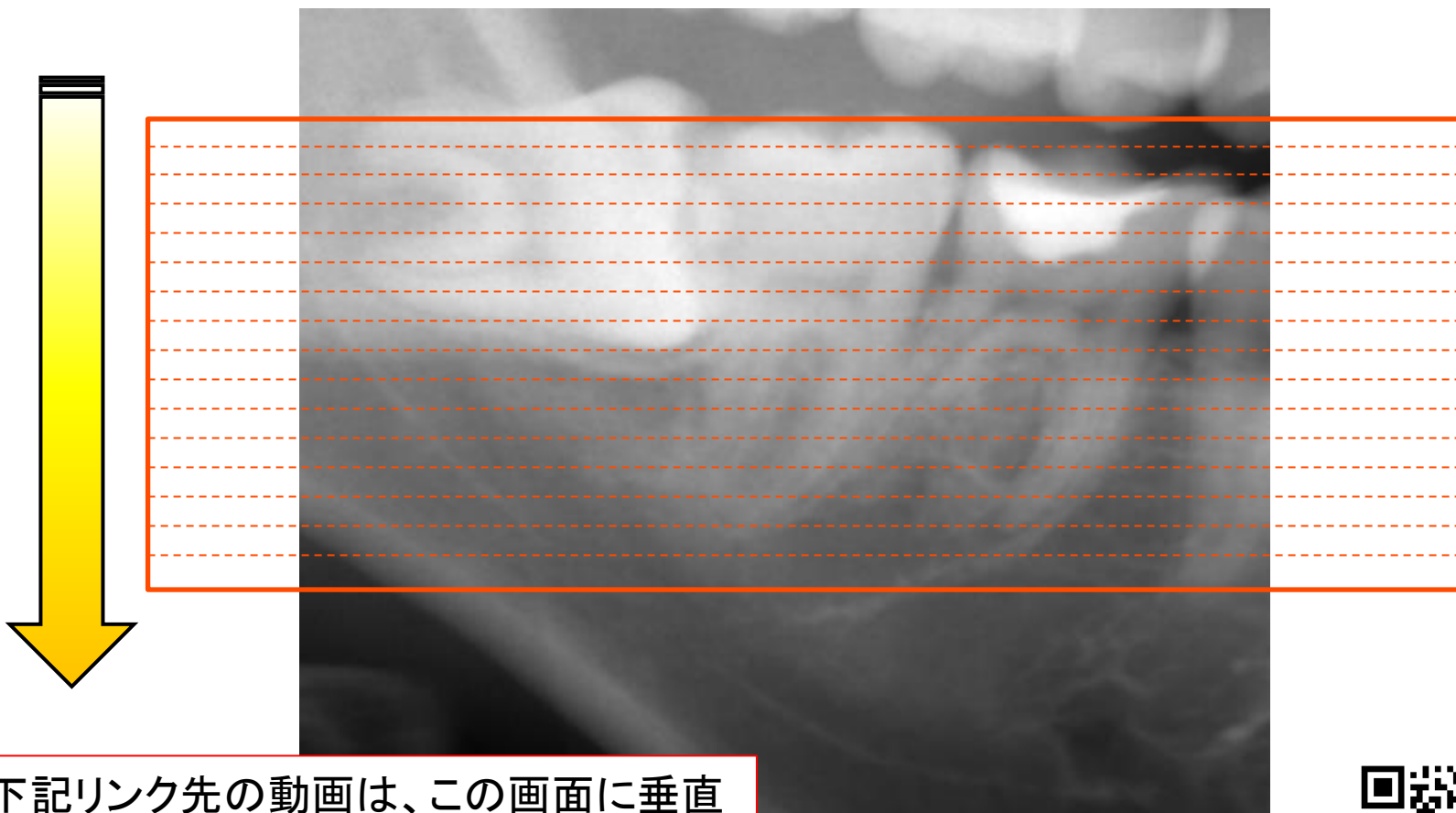
下顎なのに3根はどこ？
槌状根が隠れているが分かる？



パノラマの部分拡大です
この中に隠れています



パノラマの部分拡大です この中に隠れています

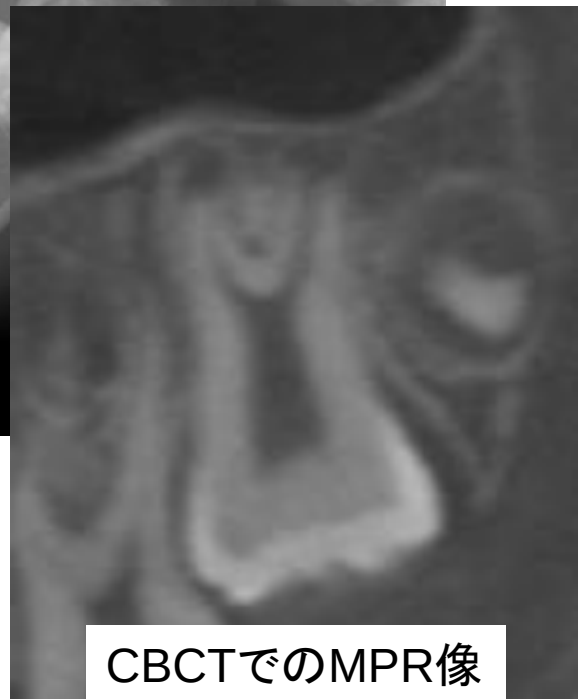
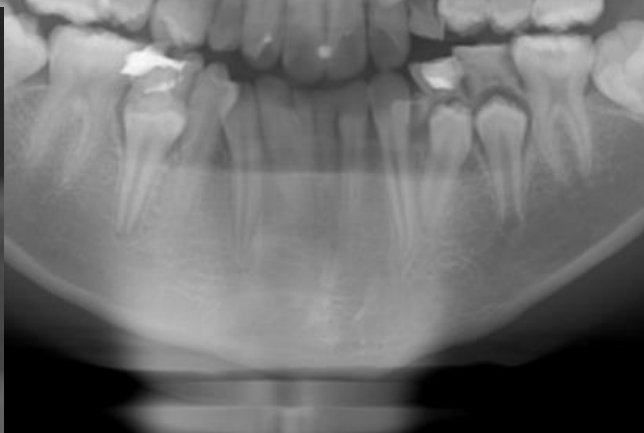
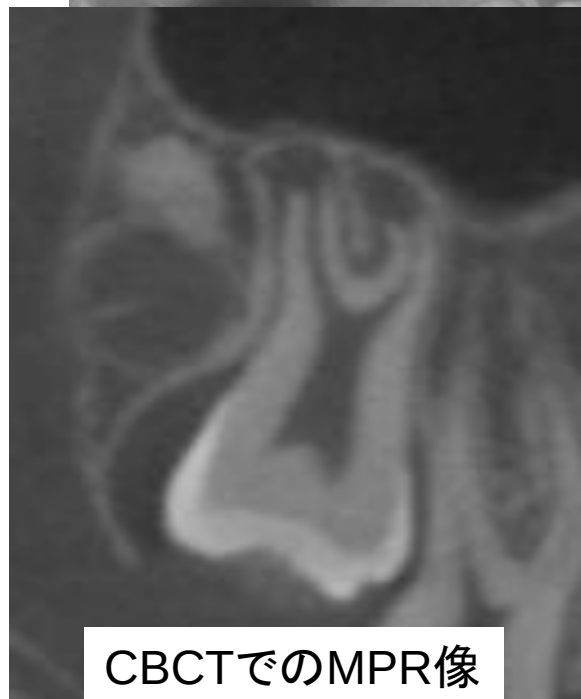
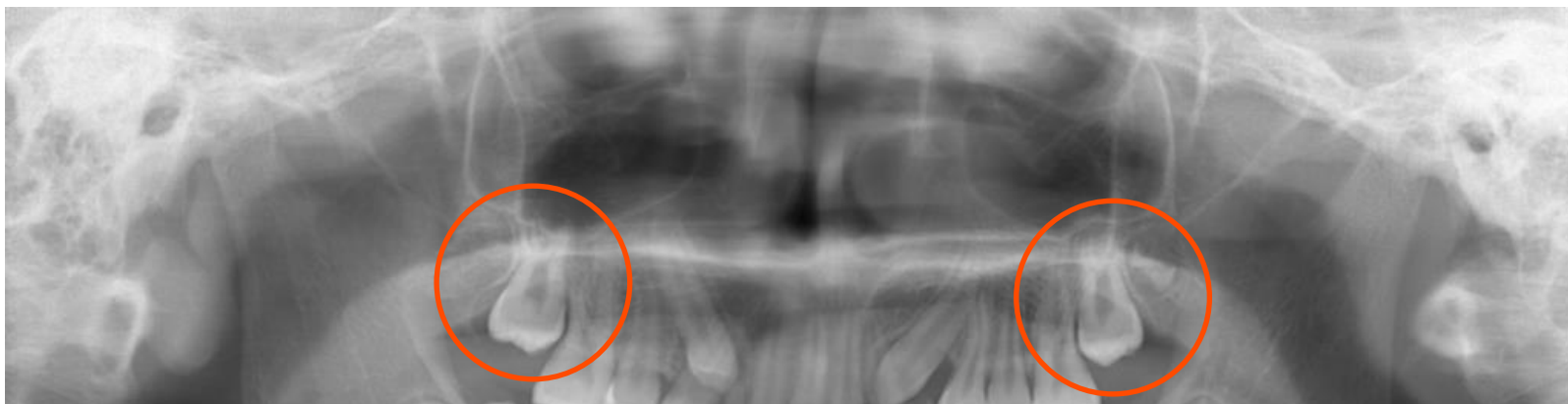


下記リンク先の動画は、この画面に垂直な断面(断層)を順に表示たものです。

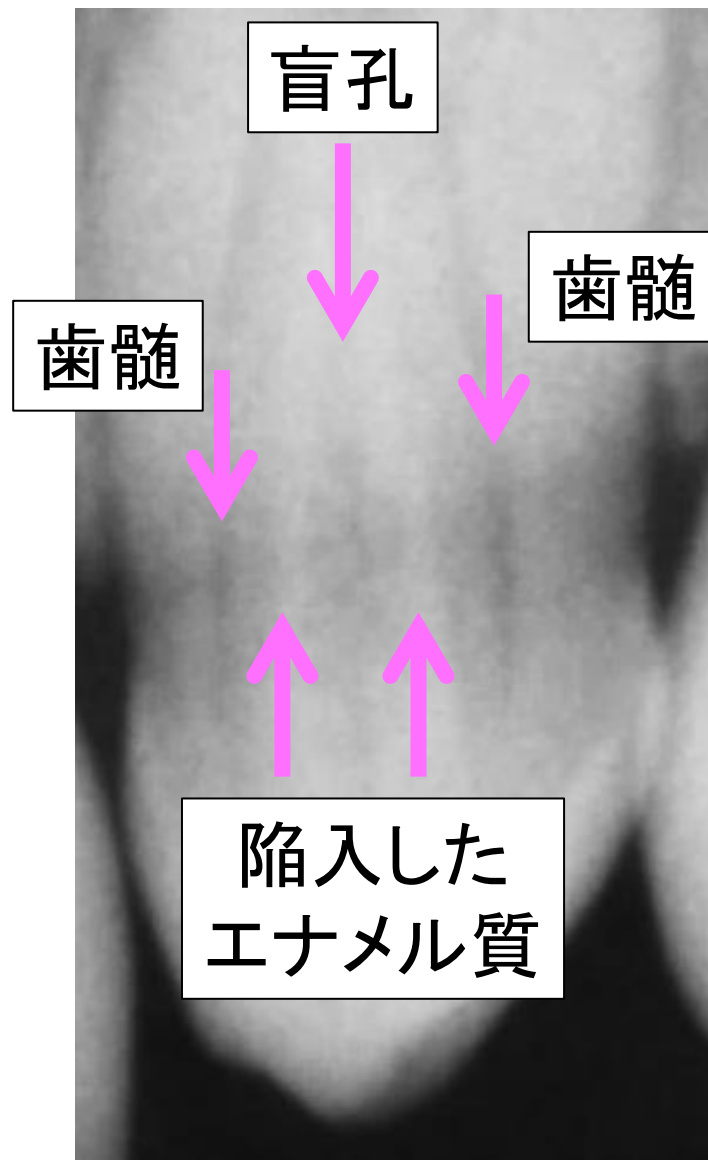
<https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/C-shaped-root.mp4>



タウロドント

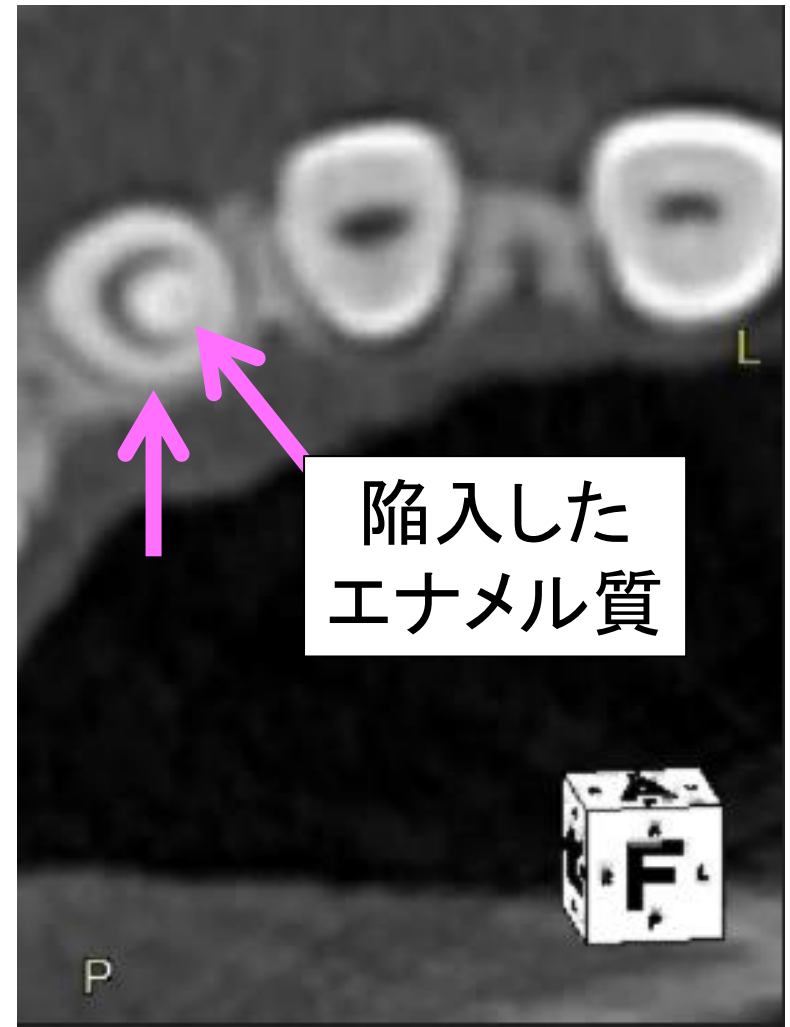


上顎側切歯の歯内歯



歯内歯 (Oehlers Type III)

MPR (軸位断)



CT画像

歯内歯 (Oehlers Type III)

- 軸位断画像

- https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CT_OehlersIII-ax.mp4



- 傍冠状断画像

- https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CT_OehlersIII-cor.mp4



- 傍矢状断画像

- https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CT_OehlersIII-sag.mp4



- 3D回転(外形)

- https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CT_OehlersIII-rot-shape.mp4



- 3D回転(透過像・エナメル質強調)

- https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CT_OehlersIII-rot-enamel-trans.mp4



CBCT画像での 投影像シミュレーション



- CBCT: 軟組織表示から硬組織表示へ
 - <https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CBCT-Face-Bone-Teeth.mp4>
- CBCT: 口内法撮影での水平的な角度変化のシミュレーション
 - <https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CBCT-Horizontal-Rot.mp4>
- CBCT: 口内法撮影での垂直的な角度変化のシミュレーション
 - <https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/CBCT-Vertical-Rot.mp4>



CBCT画像の3D表示

- 利点: エックス線透過性に該当する画素値に応じて透過性や配色を調整することで、立体的な位置関係を把握することができます。
- 欠点: 閾値を任意に設定できるので、存在しないものが存在するように見えたり、存在するものが存在しないように見えたりします。