

国立西洋美術館3作品の年輪年代調査

—ルカス・クラナハ(父)《ホロフェルネスの首を持つユディト》
《ゲッセマネの祈り》およびアドリアーン・イーゼンブラント(に帰属)
《玉座の聖母子》について

大山幹成、宮田将寛、鳥越俊行

1. 諸言

年輪年代法は、似通った気候条件下で生育する樹木が、共通の年輪変動を示すことを利用した科学的年代測定法であり、木材の年代を1年単位で特定することが可能である。年輪年代学は狭義ではこの年輪の年代を決定する年代測定法を指し、広義では、年輪に記録された過去の環境変動を解明する学問分野を指す^[1]。

年輪年代測定の基盤となるのは、標準的な年輪変動を記録した標準年輪曲線(tree-ring chronology)である。樹木の年輪変動は、類似した気候条件下でも、各樹種の遺伝的背景により異なるため、各地域、樹種ごとに標準年輪曲線を構築していく必要がある。

年輪年代法に基づく年代測定は、特にヨーロッパで盛んに行われており、時間的、空間的に密に構築された標準年輪曲線を利用して、遺跡由来の出土材、建造物、絵画、彫刻、楽器など様々な木質文化財や美術品の年代測定や産地推定が行われ、大きな成果を挙げてきた^[2]。この中でも絵画は、板材の年代測定結果を製作年代推定の手がかりとするだけでなく、年輪年代学の一つのテーマとして、木材産地推定が大きな関心事となったことから数多くの研究が行われてきた^[3,4,5]。

板絵の年代測定は、板材の横断面において実体顕微鏡などを用いて年輪幅を計測するか、最近では、高精度のデジタルカメラで横断面の年輪画像を撮影し、コンピューター上で計測するという方法で行われてきた^[6]。これらの方法は、横断面で年輪境界が可視化できる場合には年代測定に十分な精度(0.01mm単位)を確保できるが、現実的には表面の塗装や汚損、木材の欠損などで計測が困難な場合がある。

原則として非破壊調査が求められる美術品や木質文化財では、木材の内部構造を可視化するX線断層撮影装置(CT)は、年輪調査の有力な手段と見做されてきた。我が国においては世界的に見ても先駆的な取り組みとして、奈良文化財研究所が年輪画像撮像を目的としてマイクロフォーカスX線CT装置を導入し、年輪年代測定に十分な画像解像度で撮像できることを示したが^[7]、撮像対象物のサイズの制約や撮像範囲が小さく手間がかかることから、その後の応用事例は限定的であった。しかし、近年、大型X線CT装置の性能が向上し、文化財の分析用としてこれらが国内各機関に導入されたことから、大型木質文化財の3次元X線画像の撮像が普及しつつある^[8]。また海外においてもX線CTで撮像した木彫像の年輪年代測定事例が報告されるなど^[6]、導入が進みつつある。

以上のような背景から、本稿においては、国立西洋美術館が所蔵する3作品について、大型X線CT装置で得られた画像を元に、樹種の推定およ

び年輪年代測定を実施した結果について報告する。

2. 対象作品

調査の対象とした作品は以下の3作品である。

- (1) 《ホロフェルネスの首を持つユディット》(西美所蔵番号:P.2018-0001)^[9]

作者はルカス・クラナハ(父)。以下、ユディットと記述

- (2) 《ゲッセマネの祈り》(西美所蔵番号:P.1968-0001)^[10]

作者はルカス・クラナハ(父)。以下、ゲッセマネと記述

- (3) 《玉座の聖母子》(西美所蔵番号:P.2005-0008)^[9]

作者はアドリアーン・イーゼンブラント(に帰属)。以下、聖母子と記述

ルカス・クラナハ(父)(1472-1553)は、ドイツ・ルネサンスを代表する画家の一人である。神聖ローマ帝国内のヴィッテンベルクにおいて、1505年以降、およそ半世紀にわたってザクセン選帝侯に宮廷画家として仕える傍ら、自らの工房で絵画の大量生産をいち早く実現した美術家である^[10]。

アドリアーン・イーゼンブラントは、南ネーデルランドのブリュージュにおいて、1510年-1550年にかけて活動したことが確認されている画家である^[9]。

3. 調査方法

3-1. X線CT

本調査においては、当初、ルーペと高精度デジタルカメラを用いたマクロ撮影で得られた画像から樹種の推定と年輪年代測定を試行したが、木材表面の塗膜や劣化のため成果が得られなかった。そのため、東京国立博物館が所有するコメットエクスクロン社製大型X線CT装置を用いて板絵の3次元X線画像を撮像し、その画像から樹種の推定および年輪幅計測を行った。画像の撮像条件は以下の通りである。

- (1) ユディット

装置: エクスロン社製大型CT

X線管: Y.TU600-D02

電圧: 450[kV]、電流: 1.55[mA]、インテグレーションタイム: 500[ms]、フレームビニング: 1

プロジェクション数: 2070、撮影対象～X線管球間距離: 約1617[mm]、

受光部～X線管球間距離: 約2360[mm]、画像再構成解像度: 約0.068[mm]

- (2) ゲッセマネ

装置: エクスロン社製大型CT

X線管: Y.TU600-D02

電圧: 450[kV]、電流: 1.55[mA]、インテグレーションタイム: 500[ms]、フレームビニング: 1

プロジェクション数: 2070、撮影対象～X線管球間距離: 約1617[mm]、

受光部～X線管球間距離: 約2360[mm] 画像再構成解像度: 約0.137[mm]

- (3) 聖母子

装置: エクスロン社製大型CT

X線管: Y.TU600-D02

電圧:450[kV]、電流:1.55[mA]、インテグレーションタイム:500[ms]、フレームビニング:1

プロジェクション数:2070、撮影対象～X線管球間距離:約1117[mm]、
受光部～X線管球間距離:約1860[mm]、画像再構成解像度:約0.120[mm]

この条件下において、撮像し、画像処理を実施した場合、画像の解像度は、
0.067mm/pixelであった。

3-2. 樹種同定

樹木の木部(木材)は、各樹種の進化を反映した独自の組織構造を有しており、これらの特徴に基づいて樹種同定が可能である。樹種の同定は、生物顕微鏡などを用いて木材組織構造を3断面(横断面、接線断面、放射断面)で、巨視的、微視的に観察することで行われ^[11]、各樹種の木材組織学的記載が世界中で進められてきた^[12, 13]。

本調査においては、非破壊分析が原則であり、3断面観察用の切片採取が不可能だったため、生物顕微鏡を用いた木材組織学に基づく伝統的な樹種同定は実施できなかった。そのため、板材横断面の巨視的な観察およびX線CTより得られた3断面画像に基づいて使用樹種を判断した。この方法では得られる木材組織の情報に大きな制約があるものの、ヨーロッパの絵画に使用される樹種が極めて限られていること、および後述の年輪年代測定結果を考え併せると確度は十分高いと判断した。

3-3. 年輪年代測定

年輪年代測定は、年輪幅の時系列データの変動を、複数のデータ間で相互に比較照合し、年輪の形成された年代を正確に特定することで行われる。この変動が一致する年代を見つけ、特定する手順をクロスデーティングと呼ぶ^[14]。

3-1.に記したように、本調査では当初、板材横断面の画像を高解像度デジタルカメラ(Nikon D850)で撮影し、画像上で年輪幅計測を実施したが、表面の塗膜や劣化などのため、年輪境界の判別が困難な箇所が多数あったため、年代測定に成功しなかった。

そこでX線CTで撮影した3次元画像の横断面、放射断面を観察し、最も外側(樹皮側)の年輪が含まれる部分の横断面画像を保存して年輪幅測定に供試した。年輪幅の計測は、年輪計測用ソフトウェアCooRecorder(ver.9.3、Cybis社)を用いた。ヨーロッパの標準年輪曲線は公開されていないものが多いため、ヨーロッパの年輪年代研究者に年代測定を依頼する必要がある。なお、標準年輪曲線とは、樹種、地域ごとに構築される標準的な年輪変動を記録した基準となるデータであり、多くの個体データが平均化された時系列データである。測定した年輪幅データのうち、ユデイトおよびゲッセマネのデータを、クラナハ作品の年輪年代測定で実績のあるPeter Kleinに送付して、測定を依頼した。聖母子の年輪幅データは、Marta Domínguez-Delmás(University of Amsterdam)に送付し、ヨーロッパ各地の標準年輪曲線に基づく年代測定を依頼した。Peter Kleinによる測定後、南ドイツのヨーロッパパプナの標準年輪曲線と複数のクラナハ作品の年輪データが提供された。Marta Domínguez-Delmásからは、公開されているヨーロッパのコンラウ属

(*Quercus* sp.) の標準年輪曲線^[15]により年代測定可能との助言を得た。これらに基づき、著者自らも年代測定を実施した。

年輪年代の測定は、ヨーロッパで行われている年輪考古学の常法（移動相関法および目視確認）に従った^[16, 17]。この方法では標準化した2つの年輪幅時系列データを1年ずつずらしながら相関係数を算出して t 検定を行う。 $t > 3.5$ （重複年数 > 100 ）を目安に候補年代を拾い上げ、グラフ上での目視クロスデーティングを行い年輪年代を決定する。なお、年輪年代に成功する場合は、 t 値は通常3.5を大幅に超える値を示すので、実際には $t > 5$ （重複年数 > 100 ）を目安として用いている^[17]。

4. 結果と考察

4-1. 樹種同定

ユデイトの板材の横断面 (Fig.1a) およびX線CTで撮像した横断面 (Fig.1b) と接線断面を示す (Fig.1d)。板材の横断面においては、明瞭な広放射組織が認められ、やや不明瞭ながらも道管が年輪内に散在し、散孔材であることがわかる (Fig.1a)。CTで撮像した画像からはさらに多くの木材組織の情報が得られた。横断面では、年輪内で道管と推測される部分（低密度・暗色）と木繊維と推測される部分（高密度・白色）が入り混じっており、道管が散在する散孔材であることがわかる。また、年輪の終端に向けて密度が高くなることから、道管の占める割合が低くなる、つまり道管の径と数が少なくな

Fig.1
ユデイトの樹種同定根拠。a: ユデイトの横断面画像, b: ユデイトのX線CT横断面画像, c: プナ (*Fagus crenata*) 顕微鏡横断面画像 (画像: 森林総合研究所木材データベース), d: ユデイトのX線CT接線断面画像, e: プナ (*Fagus crenata*) 顕微鏡接線断面画像 (画像: 森林総合研究所木材データベース) 矢頭: 広放射組織, 矢印: 道管

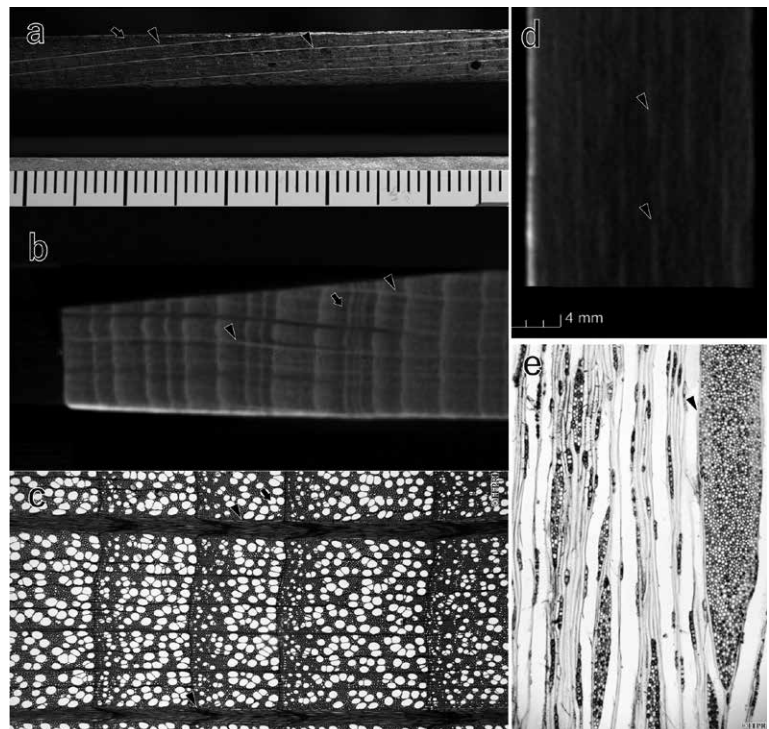
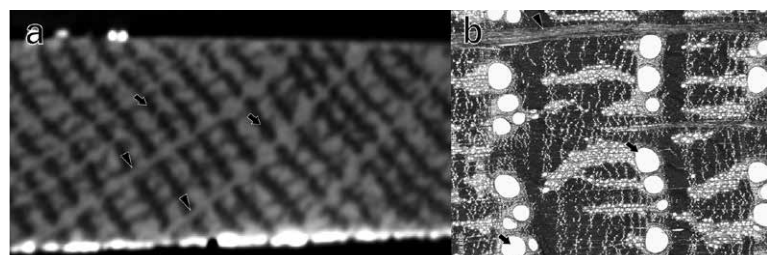


Fig.2
聖母子の樹種同定根拠。a: 聖母子のX線CT横断面画像, b: コナラ (*Quercus serrata*) 顕微鏡横断面画像 (画像: 森林総合研究所木材データベース TWTwNo. 23681), 矢頭: 広放射組織, 矢印: 道管



る、ことが推定される。さらに、広放射組織も確認できた。Fig.1cは現生日本産ブナ (*Fagus crenata*) の横断面顕微鏡写真であるが、上記の組織学的特徴はこの写真で観察されるようなブナ属の組織学的特徴^[12]と一致する。接線断面においても、数多くの広放射組織が認めれ、現生日本産ブナ (*Fagus crenata*) の接線断面の顕微鏡写真 (Fig.1e) と比較するとよく似通っていることがわかる。この多数の広放射組織はブナ材の接線断面で斑点として目視できるものである。以上のような特徴はゲッセマネの材でも同様に観察され、後述の年輪年代測定の結果と併せて、共にブナ属 (*Fagus* sp.) の材であると判断した。

次に聖母子の板材をX線CTで撮影した横断面を示す (Fig.2a)。板材の横断面では、広放射組織が認められ、年輪境界の孔圏部に大径の道管が並ぶ環孔材であることが確認できる。これは日本産コナラ属 (コナラ *Quercus serrata*) の顕微鏡写真 (Fig.2b) で見られる組織学的特徴と一致している。このことからコナラ属 (*Quercus* sp.) の材であると判断した。

上記の巨視的観察およびCT画像から得られた木材組織学的情報は、顕微鏡観察から得られる情報より遥かに貧弱であるため、類似した特徴を持つ材を誤認する可能性がある。しかしながら、ナラ類 (コナラ属) やブナ属は、各樹種固有の巨視的で特徴的な木材組織を有しているため、かなり信頼できる同定が可能であること、板絵に使用される樹種は限定され、コナラ属やブナ属と同様の組織学的特徴を持つ樹種はないことから^[18]、ブナ属 (*Fagus* sp.)、コナラ属 (*Quercus* sp.) という判断は確実であると考えている。

4-2. 年輪年代測定

4-2-1. ユディト

CT画像を観察したところ、木目の通直な柁目板が使用されており (Fig.3a)、板の上端と下端で含まれている年輪はほぼ同数であった。特に、樹皮側の最外年輪は上端から下端まで同一の年輪であることが確認できた。最も多くの年輪が含まれていた下部から横断面画像を保存し、年輪幅計測を行った (Fig.3b)。計測にあたっては、多数の微細な年輪が観察されたため (Fig.3b 矢印)、放射断面の画像も参照しながら年輪、偽年輪、不連続年輪の判断を行った。

計測の結果、119年輪が確認され、年輪幅の平均値は1.88mmであった。得られた年輪データをPeter Kleinに送付し、年代測定結果を得た (Supplementary Material)。その後、Peter Kleinよりブナ属の標準年輪曲線と複数のクラナハ作品の年輪データが提供され、著者も追試して、同一の結果を得たため、以下ではその結果を記述する。

Fig.4aに南ドイツのブナ属の標準年輪曲線およびユディトの年輪幅グラフを示す。クロスデーティングの結果、年輪年代は1403年-1521年 ($t=6.36$ 、重複年数119年)を示した。3-3.で記述したように、年輪年代学では、 $t>5$ (重複年数>100年)とグラフの目視評価で照合の判断を行うが、グラフのマッチングも良好で、両方の条件を満たしている。また他の3作品の年輪幅データ (100109A: Kardinal Albrecht von Brandenburg -Berlin 589, I, 100111C: Apollo and Diana - Berlin 564 III, 1001412D: St.. Martinus - München

Fig.3
ユデイトのX線CT画像. a: 放射断面画像, b: 横断面画像, 矢印: 微細な年輪

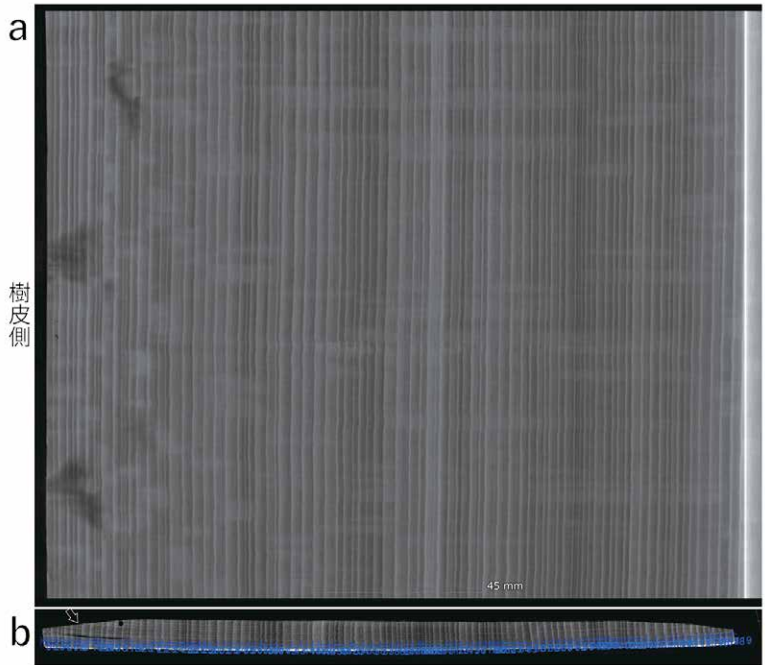
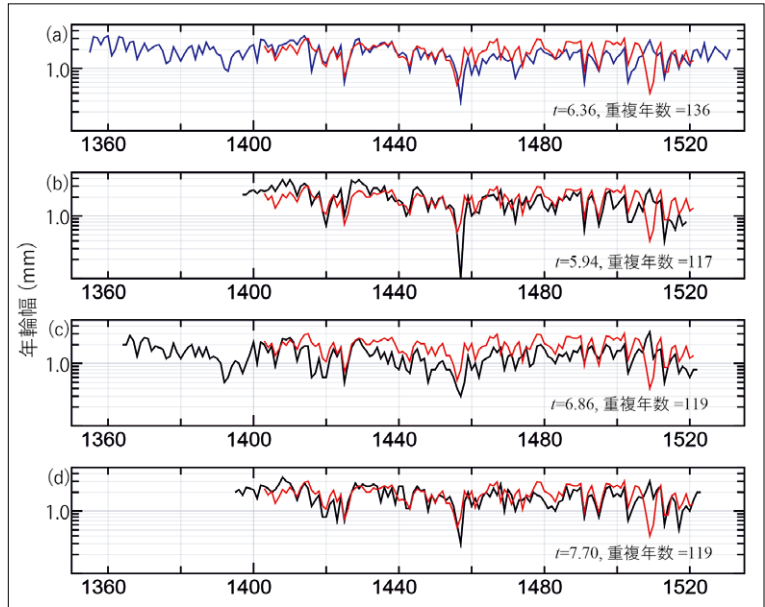


Fig. 4
ユデイトの年輪年代測定結果. a: ユデイト (赤線) と南ドイツ・ブナ属の標準年輪曲線 (青線) の年輪幅グラフ, b: ユデイト (赤線) と 100109A: Kardinal Albrecht von Brandenburg -Berlin 589, I (黒線), c: ユデイト (赤線) と 100111C: Apollo and Diana - Berlin 564 III (黒線), d: ユデイト (赤線) と 1001412D: St. Martinus -München 6264 IV (黒線)



6264 IV)との年代測定結果も同様に最外年輪は1521年を示した。得られた t 値はそれぞれ5.94 (重複年数=117) (Fig.4b)、6.86 (重複年数=119) (Fig.4c)、7.70 (重複年数=119) (Fig.4d)である。このように複数の年輪幅データとの反複的な照合で同一の測定結果が得られたことは、測定結果の確度を評価する上で極めて重要である。

年輪年代法で得られる年代は調査対象となる木材の年輪の年代であり、それが直ちに樹木の伐採年代や作品の制作年代と結びつくものではない。伐採年代や制作年代の推定には木材の残存状況や伐採後の木材の乾燥期間なども考慮し、慎重に検討する必要がある。木材の残存状況については、3つのケースが想定される^[2]。1つ目は、樹皮直下の年輪が残存しているケースで、この場合、得られる最外年輪の年代が伐採年代となる。2つ目は、辺材と呼ばれる樹皮直下の木材 (通常数 cm 程度) が残存しているケースで、この場合、最外年輪の年代が伐採年代にかなり近いと見なされる。3つ目は、辺材が除去され心材のみが残存しているケースで、この場合、最外年輪の

年代はこれ以降に伐採されたということのみを示す。なお、辺材部では生育時に一部の細胞が生存しているため、心材に比べて耐久性や耐虫害性が低く、製材時に除去されることも多い。樹木の伐採後は、森林からの移送、製材、乾燥の期間が想定されるが、これはケースバイケースであり、他の情報（文献、署名など）から制作年代などの情報を得て、推定していく必要がある。

Peter Klein の論文^[19]およびコメント (Supplementary Material) によると、クラナハの工房においては、ブナ材は、コナラ材とは異なり、樹皮を剥がしただけの板材全体を使用することが多いことが明らかになっている。そのため、測定された最外年輪年代（伐採年代）と、署名によって年代が判明している絵画の制作年代は、数年しか変わらないことが多い。これまでに得られたデータではクラナハ作品の制作までの木材の保存期間は1～7年であることが明らかになっている^[19]。なお、コメントによると、今回のケースでは、木材の保存期間は最低2年を想定している (Supplementary Material)。ユデイトの板材は、CT画像で示されているように樹皮側の最外年輪が上端から下端まで残存しており、木材が加工された形跡がないことから、先行研究の通り、樹皮を剥がしただけの材を使用した可能性が極めて高い。そのため、最外年輪の年代は伐採年と見做せることから、上記木材の保存期間を考慮しても本作品は1523年以降の1520年代に制作されたと推定される。

4-2-2. ゲッセマネ

CT画像を観察したところ、ユデイトと同様に木目の通直な柁目板が使用されていることが確認された (Fig.5a)。しかしながら、ゲッセマネでは、板の上端と下端を観察すると、最外年輪、最内年輪双方で年輪が除去された部分があり、板材が加工されていることが確認できた。板材の上端近くと下端近くから横断面画像を保存し、年輪幅計測を行った (Fig.5b, c)。計測にあたっては、放射断面の画像も参照しながら年輪、偽年輪、不連続年輪の判断を行った。

年輪数は、上端側が160層、下端側が162層であった。両者をクロスデーティングして平均し、162層の年輪幅時系列データを得た。平均年輪幅は3.12mmであった。得られた年輪データをPeter Kleinに送付し、年代測定結果を得た (Supplementary Material)。その後、著者も追試を行い、同一の結果を得たため、ユデイトの場合と同様に以下ではその結果を記述する。

Fig.6aに南ドイツのブナ属の標準年輪曲線およびゲッセマネの年輪幅グラフを示す。クロスデーティングの結果、年輪年代は1355年–1508年 ($t = 12.6$ 、重複年数154年)を示した。グラフのマッチングも極めて良好であった。また、Peter Kleinより、クラナハの多くの作品と同一の木材から制作されているとのコメントがあった (Supplementary Material)。これらの作品のうち、3つの作品 (100109A: Kardinal Albrecht von Brandenburg -Berlin 589, I, 100111C: Apollo and Diana – Berlin 564 III, 1001412D: St.. Martinus – München 6264 IV) についてはデータが送付されてきたため、年代測定を行った。その結果、いずれも最外年輪は1508年との年代測定結果が得られ、 t 値はそれぞれ10.4 (重複年数=112) (Fig.6b)、13.2 (重複年数=145) (Fig.6c)、11.3 (重複年数=114) (Fig.6d)であった。同一材を区別する明確な基準は存在しないが、年輪年代学の研究者の間では、 t 値が10以上で

Fig.5
ゲッセマネのX線CT画像. a: 放射断面, b: 上部横断面画像 (bの線), c: 下部横断面画像 (cの線)

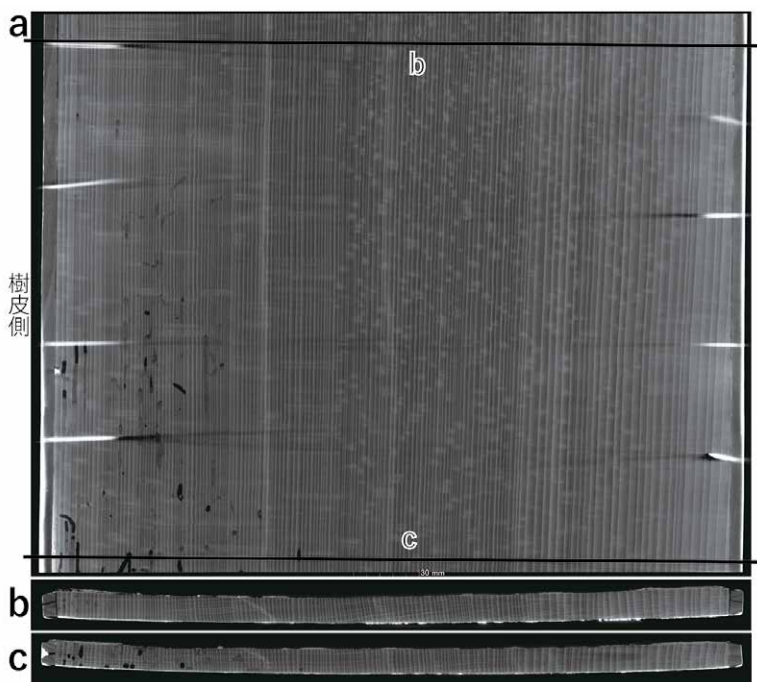


Fig.6
ゲッセマネの年輪年代測定結果. a: ゲッセマネ (赤線) と南ドイツ・ブナ属の標準年輪曲線 (青線) の年輪幅グラフ, b: ゲッセマネ (赤線) と 100109A: Kardinal Albrecht von Brandenburg-Berlin 589, I (黒線), c: ゲッセマネ (赤線) と 100111C: Apollo and Diana - Berlin 564 III (黒線), d: ゲッセマネ (赤線) と 1001412D: St.. Martinus - München 6264 IV (黒線)

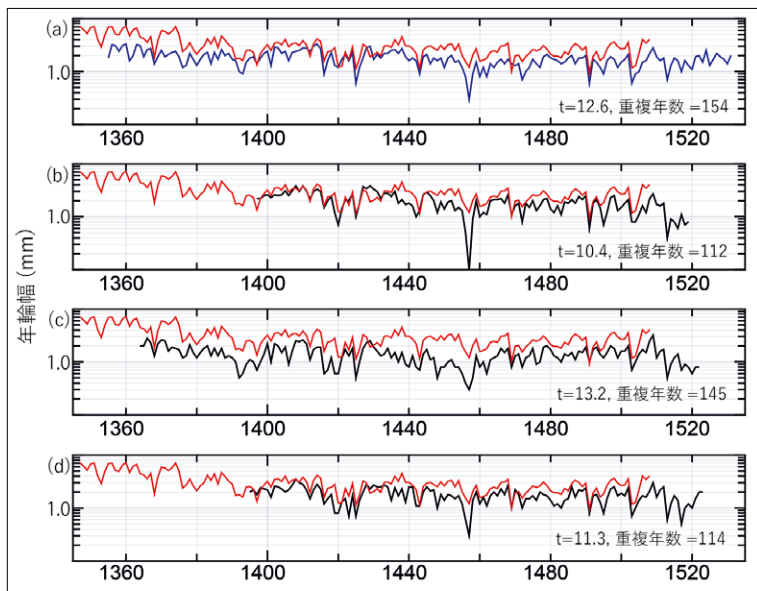


Fig.7
聖母子のX線CT横断面画像

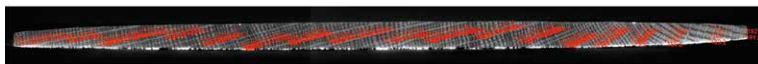
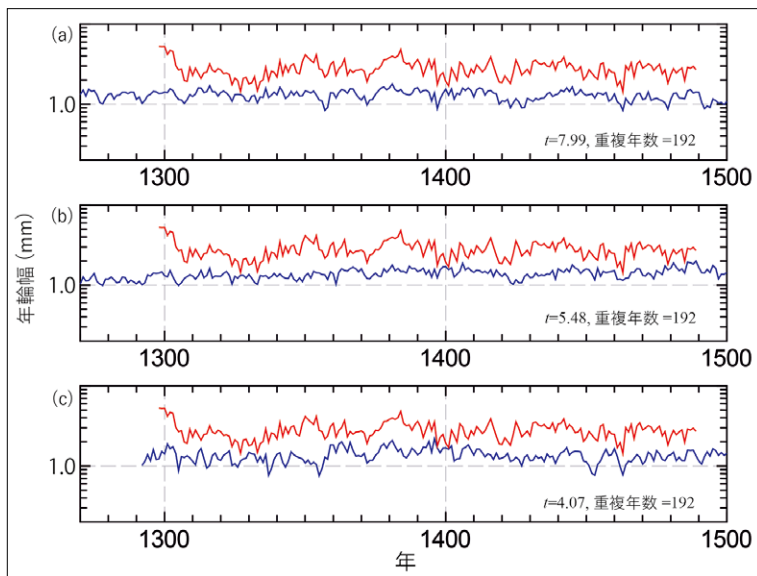


Fig.8
聖母子の年輪年代測定結果 (CE1298-1489). a: 聖母子 (赤線) とナラ類の標準年輪曲線 (BLT1), b: 聖母子 (赤線) とナラ類の標準年輪曲線 (BLT2), c: 聖母子 (赤線) とナラ類の標準年輪曲線 (BLT3)



同材とみなすということが目安として受け入れられている^[20]。今回のケースでは、いずれも t 値が10を超えており、かつグラフのマッチングも極めてよいことから、同一材と判断して差し支えないと考えられる。

CT画像の観察から、ゲッセマネの材では明らかに年輪が除去され、加工された痕跡があった。今回、同一材としてリストに挙げられた板材のうち (Supplementary Material)、最も外側の年輪が残存しているのはMartin Luther- Darmstadt GK 73b の1524年である。そのため、ゲッセマネの材の伐採年代も1524年と推定され、最低2年の木材の保存期間を想定すると、絵画の制作は1526年以降で、1530年代初めまでと推定される。

4-2-3. 聖母子

CT画像から、板材の最下端に最外年輪および最も多くの年輪が含まれていたため、ここから横断面画像を保存し、年輪幅計測を行った (Fig.7)。環孔材であるため年輪境界が視認しやすく、年輪計測は容易であった。

計測の結果、192年輪が確認され、年輪幅の平均値は2.80mmであった。Marta Domínguez-Delmás (University of Amsterdam) によるヨーロッパの標準年輪曲線との網羅的なクロスデーティングの結果、聖母子のデータはバルト海沿岸地域のコナラ属の標準年輪曲線を用いて年代測定が可能であるとの助言を得た。Fig.8に聖母子の年輪幅データとバルト海沿岸地域の3つの標準年輪曲線 (BLT1, BLT2, BLT3)を示した^[15]。年代測定の結果、聖母子の年輪年代は、BLT1に対してCE1298-1489年 ($t=7.99$ 、重複年数192年)を示した。またBLT2、BLT3に対しても、同じ年代でそれぞれ $t=5.48$ 、 $t=4.07$ を示した。BLT1とBLT2ではグラフのマッチングも良好である。BLT3では t 値がやや低くグラフのマッチングもよくないが、同じ年代を示した。

BLT1は、リトアニア沿岸部、BLT2はポーランドの沿岸から内陸部、BLT3はリトアニアの内陸部を産地とする木材と高い t 値を示すことが明らかになっている^[15]。聖母子のデータは、BLTの3つの標準年輪曲線のうち、BLT1と最も高い t 値を示すことから、聖母子の用材はリトアニア沿岸部から移送された材と推定される。

ヨーロッパのナラ材では、辺材部の年輪数が、ヨーロッパ東部に行くほど少なる傾向が認められている^[2]。それによると、エストニア、ラトビア、リトアニアの地域における辺材年輪数は、6.18-18.71年 (95%信頼区間、試料数562点)と報告されている^[21]。仮に聖母子の材の辺材部がすべて除去されている場合、上記最外年輪1489年にこの最外年輪数を加算すれば伐採年を1495-1506年と推定することが可能である。しかしながら、今回のX線CT画像では、辺材部と心材部の含水率に起因する密度の差異や、心材の道管に存在するチロースが確認できないため、辺材の残存状況など除去された部分を確認することができなかった。そのため、伐採年代については、1489年以降とするにとどめたい。

5. まとめ

本調査では、東京国立博物館が所有する文化財用大型X線CT装置を用いて、板絵の板材の3次元画像を撮像し、この画像を元に樹種の推定と年

輪年代測定を行なった。管見の限り、我が国で板絵の年輪年代測定に大型 X 線 CT 装置を応用した初めての事例となった。本稿で示されたように、この一連の調査手法は、使用木材の樹種や年代を決定し、作品の美術史的検討を行う上での基礎的情報を提供することが可能な、極めて有効な手法である。精度の高い年輪幅の測定には高解像度の画像が必要であるため、これまで美術品や文化財などの年輪年代調査に X 線 CT の導入はあまり進んでいなかったが、近年の装置の性能向上により、高解像度画像の撮像が可能になり応用に向けた環境が整いつつある。近年ヨーロッパにおいても美術作品の X 線 CT 調査に用いた年輪年代調査が増加しつつあり、今後、わが国においても関係諸機関の連携のもと、積極的に導入が進められることが望ましい。

なお本稿で取り扱った作品については、今後美術史的調査や他の科学的分析が予定されており、それらの結果も踏まえた論考が予定されている。そのため、本稿では年輪年代調査の結果のみを報告した。

謝辞

本調査の遂行と本稿の執筆にあたり、塚田全彦教授（東京藝術大学）、眞鍋千絵氏（絵画保存修復）、高嶋美穂氏、新藤淳氏、邊牟木尚美氏（国立西洋美術館）、に有益なご助言、ご助力をいただいた。Peter Klein 博士、Marta Domínguez-Delmás 博士（University of Amsterdam）には年輪年代測定にあたって有益な助言とデータの提供をいただいた。ここに深謝の意を表します。

[1] Schweingruber, F.H., 1988. Tree Rings: basics and applications of dendrochronology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.276.

[2] Haneca, K., Čufar, K., Beeckman, H., 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.07.005>

[3] Klein, P., Wazny, T., 1991. Dendrochronological analyses of painting of Gdansk painters of the 15th to the 17th century. *Dendrochronologia* 9, 181–191.

[4] Fraiture, P., 2002. Contribution of scientific methods to the understanding of the work of the 16th century painter, Henri Bles. *Dendrochronologia* 20, 285–299. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00022>

[5] Haneca, K., Wazny, T., Van Acker, J., Beeckman, H., 2005. Provenancing Baltic timber from art historical objects: success and limitations. *Journal of Archaeological Science* 32, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.09.005>

[6] Domínguez-Delmás, M., 2020. Seeing the forest for the trees: New approaches and challenges for dendroarchaeology in the 21st century. *Dendrochronologia* 62: 125731. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125731>

[7] Okochi, T., Hoshino, Y., Fujii, H., and Mitsutani, T., 2007. Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography. *Dendrochronologia* 24: 155–164.

[8] 奈良国立博物館編, 2023. 仏師快慶の研究, 思文閣.

[9] 国立西洋美術館編, 2020. 国立西洋美術館報, No.53, 国立西洋美術館.

[10] 国立西洋美術館・新藤淳・中田明日佳・渡辺晋輔編, 2022. 国立美術館名作選, 西洋美術振興財団.

[11] 伊東隆夫・山田昌久, 2012. “木の考古学 出土木製品用材データベース”, 海青社.

[12] 島地謙・伊東隆夫, 1982. “図説木材組織”, 地球社.

[13] Schweingruber, F.H., 1990. Anatomy of European Woods: An Atlas for the Identification of European Trees, Shrubs and Dwarf Shrubs. Paul Haupt.

[14] Kaennel, M., and Schweingruber, F. H., 1990. Multilingual Glossary of Dendrochronology. Paul Haupt Publisher, Berne.

[15] Daly, A., Tyers, I., 2022. The sources of Baltic oak. *Journal of Archaeological Science* 139: 105550. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2022.105550>

[16] Baillie, M.G.L., 1982. Tree-ring dating and archaeology, The University of Chicago Press, Chicago.

[17] 米延仁志・大山幹成・星野安治・光谷拓実・Dieter Eckstein, 2010. 年輪年代学におけるクロスデーティングのガイドライン——日本産材を用いた方法論の分析とモンテカルロシミュレーションによる統計的クロスデーティングの再検討——, 考古学と自然科学 60, 1-12.

- [18] Hoadley, R.B., 1998. Identification of Wood in Painting Panels, 21-38, "Structural Conservation of Panel Paintings Proceedings, The structural conservation of panel paintings : proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum".
- [19] Klein, P., 1994. Lucas Cranach und seine Werkstatt. Holzarten und dendrochronologische analyse, 194-200, "Lucas Cranach Ein Maler-Unternehmer aus Franken", Verlag Friedrich Pustet, Regensburg.
- [20] English Heritage 1998 "Dendrochronology: guidelines on producing and interpreting dendrochronological dates" (<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/dendrochronology-guidelines/>)
- [21] Sohar, K., Vitas, A., Läänelaid, A., 2012. Sapwood estimates of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in eastern Baltic. *Dendrochronologia* 30: 49–56.

Supplementary Material



Universität Hamburg

Fakultät für
Mathematik, Informatik
und Naturwissenschaften
Zentrum Holzwirtschaft



PROF. DR. PETER KLEIN • UHH • ZENTRUM HOLZWIRTSCHAFT
LEUSCHNERSTR. 91 • D-21031 HAMBURG

Botanical Gardens, Tohoku University
12-2 Kawauchi Aoba-ku,
Sendai 980-0862
Japan

Abteilung Holzbiologie
Prof. Dr. habil. Peter Klein

Tel.: 0049 41054341
E-Mail: peterkleindr@posteo.de
Datum: 23.06.2022
Unser Zeichen: KI

Report of the dendrochronological analysis of the painting „Judith and Holoferners“



The evaluation of this painting was based on the measurement of Mr. Motonari Ohyama. The 119 growth rings could be dated between 1521 and 1403 with a beech chronology of Western Germany

The youngest growth-ring of this panel was formed out in the year 1521

For the manufacturing of beechwood panels normally only the bark was removed and the entire tree was used. Therefore, an earliest felling date can be derived with the year 1521.

Under the assumption of 2 years for seasoning at least a creation is plausible from 1523 upwards.

Prof. Dr. Peter Klein

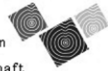
Universität Hamburg • Tor zur Welt der Wissenschaft

Leuschnerstr. 91 • D-21031 Hamburg • www.holzwirtschaft.org



Universität Hamburg

Fakultät für
Mathematik, Informatik
und Naturwissenschaften
Zentrum Holzwirtschaft



PROF. DR. PETER KLEIN • UHH • ZENTRUM HOLZWIRTSCHAFT
LEUSCHNERSTR. 91 • D-21031 HAMBURG

Botanical Gardens, Tohoku University
12-2 Kawauchi Aoba-ku,
Sendai 980-0862
Japan

Abteilung Holzbiologie
Prof. Dr. habil. Peter Klein

Tel.: 0049 41054341
E-Mail: peterklein@posteo.de
Datum: 23.06.2022
Unser Zeichen: KI

Report of the painting „Agony in the Garden of Gethsemani“



The evaluation of this painting was based on the measurement of Mr. Motonari Ohyama. The 162 growth rings could be dated between 1508 and 1342 with a beech chronology of Western Germany.

The board is made from the same tree as the following paintings.

- Martin Luther- Darmstadt GK 73b – youngest growth ring: 1524
- Lot and his Daughters- München WAF 167 I,II,III
- Lot and his Daughters- Coburg M416 III
- Johann Friedrich of Saxony – CoburgM021

Universität Hamburg • Tor zur Welt der Wissenschaft

Leuschnerstr. 91 • D-21031 Hamburg • www.holzwirtschaft.org

- The Judgment of Paris – Karlsruhe 109
- Katharina von Bora- Bremen Roseliushaus 60 youngest growth ring:1524
- St.. Martinus – München 6264 II,IV
- Martin Luther- Oldenburg 15.572 I,III
- Kardinal Albrecht von Brandenburg -Berlin 589, I,II,III
- Apollo and Diana – Berlin 564 I,II,III
- Lucretia- Helsinki 1994-224 I
- Katharina von Bora – Gotha 58/17
- Martin Luther- Private, I,II,III
- Venus- Paris 1180
- John the Steadfast- Weimar G6, I ,III
- Magdalena of Saxony Chicago 1.938.310 III
- Martin Luther- Bremen Roseliushaus 59
- A Faun with his Family- Donaueschingen 97
- St. Stephanus München 6262, II,IV
- Kasimir – Wien 883
- Cardinal Albrecht of Brandenburg Berlin 859,I,II,III
- Portrait of George the Pious – Philadelphia 739, II
- Sybille of Cleve Weimar G12 II
- Johann Friedrich the Magnanimous Weimar G11,II
- Crucifixion Indianapolis, Inv.-No. 100 30,

Therefore, the youngest growth-ring of this panel is from 1524, too.

For the manufacturing of beechwood panels normally only the bark was removed and the entire tree was used. Therefore, an earliest felling date can be derived with the year 1524.

Under the assumption of 2 years for seasoning at least a creation is plausible from 1526 upwards.

Prof. Dr. Peter Klein

Universität Hamburg • Tor zur Welt der Wissenschaft

Leuschnerstr. 91 • D-21031 Hamburg • www.holzwirtschaft.org

We used X-ray computed tomography (CT) to confirm the wood species used and conduct a dendrochronological study of three works in the National Museum of Western Art collection. The three works in this study were Lucas Cranach, the Elder's *Judith with the Head of Holofernes* ("*Judith*") and *The Garden of Gethsemane* ("*Gethsemane*"), and *The Madonna and Child Enthroned* ("*Madonna*") which is attributed to Adrian Isenbrandt.

The wood anatomical features seen in the CT images suggested beech wood was used for the *Judith* and *Gethsemane* panels. The tree-ring series from the cross-section images of the two panels were crossdated with a beech ring-width tree-ring chronology from southern Germany. This resulted in a date range of 1403–1521 (t -value = 6.36, overlap = 119 years) for *Judith*, and 1355–1508 (t -value = 12.6, overlap = 154 years) for *Gethsemane*. The results of the dendrochronological survey also suggested that *Gethsemane*'s panel was taken from the same tree that Cranach used for several works. We surmised that the results of this study, combined with previous research, indicated that *Judith* was painted sometime after 1523 but during the 1520s; *Gethsemane* was painted sometime after 1526 and before the middle of the 1530s.

However, the wood anatomical features seen in the CT images indicated *Madonna* was made using oak. We used Baltic oak ring-width chronologies (2021BLT1–3) to crossdate *Madonna*'s tree-ring series, with BLT1 resulting in 1298–1489 (t -value = 7.99, overlap = 192 years). These results strongly suggested that the wood panel was sourced in coastal Lithuania. This CT survey did not allow us to confirm the presence or absence of sapwood, but we surmised that the felling date was sometime after 1489.