

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成23年 5月20日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22654065

研究課題名（和文） ローカルトモグラフィーを用いた太陽系創世記の水（流体包有物）の  
探査研究課題名（英文） Exploration of water (fluid inclusion) in the early solar system  
using local tomography.

研究代表者

土山 明 (TSUCHIYAMA AKIRA)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90180017

研究成果の概要（和文）：ローカルトモグラフィーを用いて、炭素質コンドライト中に含まれる流体包有物を効率よく非破壊で探し出す手法の開発をおこなった。模擬サンプルによりローカルトモグラフィーの有効性は確認できたが、実際の隕石では流体包有物を見出すことはできなかった。一方、今回の手法を支援するために、分析試料加工手法の開発や、CTのみによる鉱物相の同定法の開発、シミュレーションによるCT像の空間分解能の研究をおこなった。

研究成果の概要（英文）：Development of method for searching fluid inclusions in carbonaceous chondrites has been made by using local tomography. Although the potential of this method has been checked in simulant samples, we cannot find any fluid inclusions in chondrite samples. In order to support the present method, techniques of sample preparation processes for later sample analysis and technique for discriminating mineral phases by tomography alone have been developed. Research for the spatial resolution of CT images has been also studied using simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	0	1,400,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	420,000	3,220,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星や彗星といった太陽系小天体は太陽系形成初期の情報を残している。彗星には始原的な氷が含まれているが、この氷を彗星から採取して分析することは、今のところ不可能である。一方、小惑星を起源とする炭素質コンドライト隕石の分析により、その母天体（小惑星）中では、氷が融けて水となり、10-200℃の低温で無水鉱物と反応して、含水

鉱物や炭酸塩などの鉱物を作るという水質変成作用がおこったと考えられている。このような水（流体）がどのようなものであったか（化学組成、同位体組成）を知ることは、地球の水の起源を知る上でも重要である。

炭素質コンドライトに存在する炭酸塩鉱物粒子中には、流体包有物が発見されている。また、普通コンドライト中に稀に含まれる岩塩粒子にも、流体包有物が含まれている。こ

これらの流体包有物は  $10\ \mu\text{m}$  以下の大きさを持ち、太陽系創世期の水の化石であるといえる。

X線CT（トモグラフィー）は非破壊で物体の内部構造を撮影する手法であり、連続したスライス像からその3次元構造を得ることができる。しかしながら、通常のX線CT撮影では、空間分解能は検出器の画素数によって決まるので、高空間分解能を得るためには試料を小さくしないとけない。ローカルトモグラフィーと呼ばれる手法では、大きな試料全体を撮影視野に入れてCT撮影した後、観察したい局所的な領域（関心領域）のみを撮影視野としてCT撮影し、先に得た全体の構造の情報（先見的知識）を加えて再構成することにより、試料を小さく切断することなく関心領域の高空間分解能でのCT像を得ることが可能である。この手法を用いて流体包有物を効率的に探索することができ、太陽系の始原的な水の分析が可能となると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。(1) ローカルトモグラフィーを用いて、コンドライト隕石中に含まれる流体包有物を効率よく非破壊で探し出す手法の開発をおこなう。(2) 流体包有物の分析（主要・微量成分や同位体組成）がおこなえるように、試料を加工する方法を開発する。(3) 可能であれば、実際に分析をおこなうことにより、太陽系創世期の水の性質や起源、水質変成作用過程を議論する。(4) 以上により、2020年にはやぶさ2計画により地球帰還予定である小惑星から採取された炭素質コンドライト類似物質サンプルの分析のための準備をおこなう。

## 3. 研究の方法

以下のような方法により研究をすすめた。

### (1) 炭素質コンドライト模擬試料の作成

#### (2) X線トモグラフィー法の改良

- ① ローカルトモグラフィー法の試行と改良
- ② Analytical dual-energy microtomography 法の開発

### (3) 炭素質コンドライト隕石への適用

- ① 炭素質コンドライト試料での流体包有物の探査

- ② 有機物ナノグロブユールを用いた、X線トモグラフィーによる流体検出可能性の追求

### (4) 分析試料加工手法の開発

- ① ダイシングソーおよびレーザー加工を用いた手法の開発

- ② FIBを用いた手法の開発

## 4. 研究成果

### (1) 炭素質コンドライト模擬試料の作成

ローカルトモグラフィーにおいて、流体包有物を認識できるかのテスト実験をおこなうため、炭素質コンドライトを模擬した試料

を作成した。具体的には、流体包有物（数  $10\ \mu\text{m}$ ）を含む方解石あるいは石英粒子（数  $100\text{--}500\ \mu\text{m}$ ）とカンラン石粒子（流体包有物を含まない結晶粒子を模擬）をタルク粉末（マトリクスを模擬）に埋めてアロンアルファで固めたもの（径  $10\ \text{mm}$ 、高さ  $10\ \text{mm}$  の円筒状）を作成した。この模擬サンプルは、SPring-8のBL20B2において、投影型CT装置で2つの異なる倍率により撮影した。これにより、流体包有物を確認した。

### (2) X線トモグラフィー法の改良

#### ① ローカルトモグラフィー法の試行と改良

(1) で撮影した模擬物質について、まず1回の撮影データにおいて包有物を含む結晶粒子を囲む関心領域を小さく設定した撮影データを人為的に作り、関心領域を小さくしたときにでも流体包有物が認識できることを確認した。

次に Iterative Reconstruction Algorithm を用いたローカルトモグラフィー用のソフトウェアを開発した。これを、シミュレーション結果および炭素質コンドライト模擬試料の撮像データに適応したところ、CT撮影の際に関心領域以外の領域を透過したX線ビームに起因する偽像が大きく減少することがわかった（論文[4]）。これにより、ローカルトモグラフィーを実際におこなうことの目処がついた（図1）。

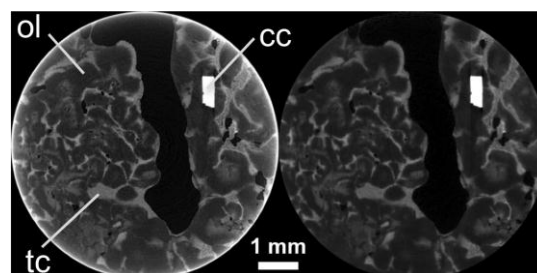


図1 炭素質コンドライト模擬物質を用いたローカルトモグラフィー。左：局所領域の情報のみから再構成したCT像。右：より大きな領域により Iterative Reconstruction Algorithmを用いて得られたCT像。cc：方解石、ol：カンラン石、tc：タルク。このCT像には、流体包有物は撮影されていない。

#### ② Analytical dual-energy microtomography 法の開発

トモグラフィーのみにより鉱物相の同定をおこなうことは、流体包有物探査にとって重要である。放射光を用いたトモグラフィーでは、強度の大きい単色X線を用いて、再構成されたCT像の輝度から物体のX線吸収係数を定量的に求めることができる。これを利用して、特定の元素（Fe）の吸収端のエネルギーを挟む2つの異なるX線エネルギーでCT撮影をおこなうことにより、様々な相

を同定する手法 (Analytical dual-energy tomography) を開発した (論文[1])。この手法を、JAXA のはやぶさ探査機が小惑星イトカワから持ち帰ったサンプル粒子への適応し、初期分析で大きな成果を上げた (論文[3])。この手法は (3) ①の炭素質コンドライトのローカルトモグラフィーにも適用した。

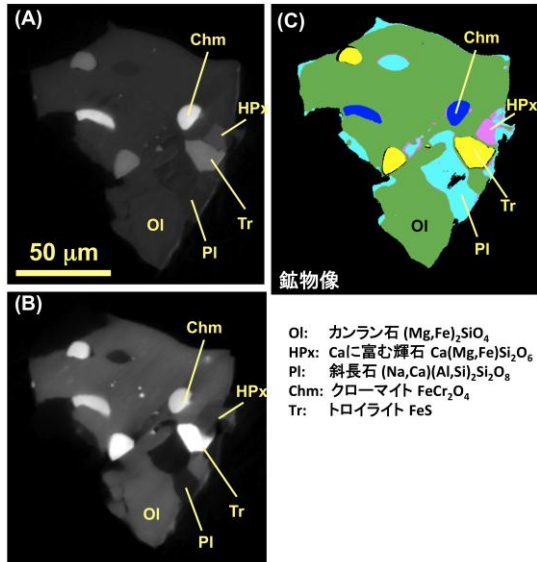


図2 Analytical dual-energy tomography 法により得られた鉱物の分布図。(A) 7 keV の CT 像。(B) 8 keV の CT 像。(C) (A) (B) より得られた鉱物の分布像。サンプルは、はやぶさ探査機により持ち帰られた小惑星イトカワのレゴリス粒子 (RA-QD02-0031)

(3) 炭素質コンドライト隕石への適用  
① 炭素質コンドライト試料での流体包有物の探査

炭素質コンドライトの中でとくに水質変成を大きく受けている CI, CM, CR や Tagish Lake 隕石中の炭酸塩鉱物などには、流体包有物が存在することが期待される。そこで、これらの隕石試料 (Ivuna 隕石 (CI)、Bells 隕石 (CM)、Murchison 隕石 (CM)、NWA801 隕石 (CR)、Tagish Lake 隕石) について、SPring-8 のビームライン BL47XU において、結像型 CT システムを用いて、拡大倍率を変えてトモグラフィー撮影をおこなった。しかしながら、残念ながら、本研究期間の範囲内では、流体包有物を含むと考えられる試料を撮影することはできなかった。

② 有機物ナノグロビュールを用いた、X線トモグラフィーによる流体検出可能性の追求

炭素質コンドライト隕石に含まれる流体包有物のサイズは数 $\mu\text{m}$ 程度であると考えられるので、撮影には 200 nm の分解能をもつ結像型 CT システムを用いなければならない。この場合、物質界面における X 線の屈折が CT

像に影響を与えることが知られている。

炭素質コンドライトには、鉱物中の流体包有物だけでなく、有機物ナノグロビュールと呼ばれる 1  $\mu\text{m}$  サイズの中空の有機物球状物質が含まれており、中空領域には始原的な流体が存在している可能性も指摘されている。この流体の有無を判別するために、以前に有機物ナノグロビュールを含む隕石の CT 撮影をおこなった (図3)。この球状物質が屈折によりどのように CT 像として再構成されるかをコンピュータシミュレーションし、界面のごく狭い領域からの屈折が CT 像に大きな影響を与えることを明らかにした。シミュレーションの結果から、残念ながら撮影したサンプルの有機物ナノグロビュールには流体は存在していない可能性が高いことがわかった (図4)。

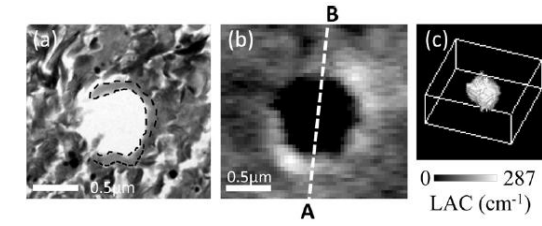


図3 炭素質コンドライト (Tagish Lake 隕石) 中の有機物ナノグロビュール。(a) TEM 像。(b) CT 像。(c) CT 像から求めた 3 次元外形。

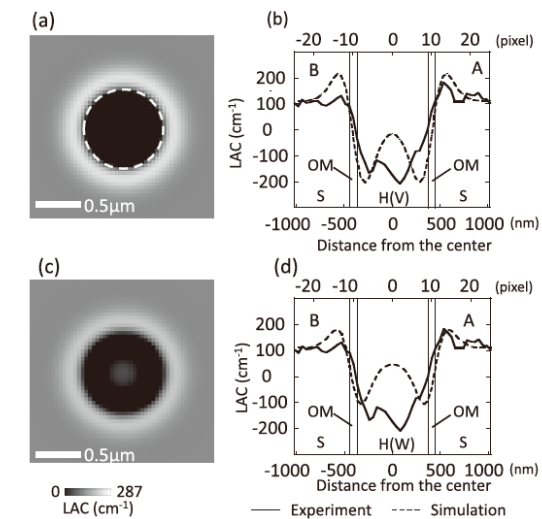


図4 有機物ナノグロビュール (図3) についての CT シミュレーション。(a) 内部が空隙の場合の CT シミュレーション像。(b) (a) の像の中心を通るコントラスト分布 (実線は CT による実測データ)。(c) 内部が水の場合の CT シミュレーション像。(d) (c) の像のコントラスト分布 (実線は CT による実測データ)。

(4) 分析試料加工手法の開発  
① ダイシングソーおよびレーザー加工を用

#### いた手法の開発

流体包有物が存在していた場合、CT撮影により得られた流体包有物の定量的な3次元位置の情報をもとにして、分析のための試料の加工をおこなう必要がある。また今回は流体包有物を含む試料を見出すことはできなかったが、はやぶさ2計画（日本：2020年地球帰還予定）やオサイリスレックス計画（アメリカ：2023年地球帰還予定）により小惑星から持ち帰られることが予想されている炭素質コンドライト類似サンプルの分析に備えて、これらのサンプルに含まれているであろう流体包有物の分析手法を開発しておく必要がある。

このために、ダイシングソーやおよびレーザービームを用いた加工法の開発をおこなった。このとき重要なのは、水などのルブリカントを使わないで、かつサンプルを失わないように、サンプルの目的の位置を切断することである。水を使わないドライで安全な切断手法はある程度確立できたが、CTによる高分解能の3次元位置データを活かした切断法の開発までは至らなかった。

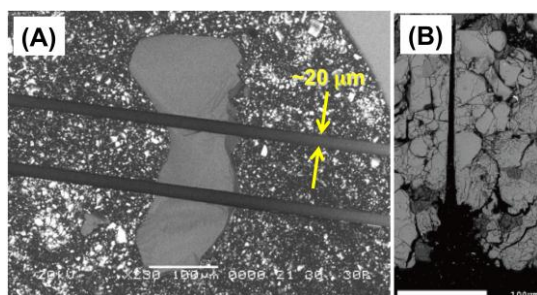


図5 模擬サンプルを用いたサンプル加工。(A) カンラン石粒子のダイシングソーによる切断。(B) Kilabo 隕石のレーザーによる切断。

#### ② FIBを用いた手法の開発

収束イオンビーム (FIB) 法を用いて特定の部位を切り出すことにより、CTによる高分解能の3次元位置データを活用することが可能である。この手法を開発するために、コンドライト隕石や包有物を含む地球試料について、FIB法を用いて特定の部位を切り出し、必要な部分が切り出されているかを再度高分解能トモグラフィーで確認するという作業をおこなった。これにより、今後の加工手法として極めて有効であることを確認した。今後の予定として、Sutter's mill 隕石という2012年5月に落下した流体包有物を豊富に含むCM隕石について、この手法を適用し、流体の分析までおこなうことを予定している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

[1] A. Tsuchiyama, T. Nakano, K. Uesugi, M. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, T. Nakamura, T. Ogami, T. Noguchi, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura (2012) Analytical dual-energy microtomography: A new method for obtaining three-dimensional mineral phase images and its application to Hayabusa samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.11.036>.

[2] T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, K. Nakamura-Messenger, T. Nakano, K. Uesugi, A. Takeuchi, and M. E. Zolensky (2012) Three-dimensional observation and morphological analysis of organic nanoglobules in a carbonaceous chondrite using X-ray micro-tomography. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.007>.

[3] A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa, J. Kawaguchi (2011) Three-Dimensional Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution of Itokawa Regolith. *Science*, **333**, 1125-1128.

[DOI:10.1126/science.1207807]

[4] E.A. Rashed, H. Toda, T. Sera, A. Tsuchiyama, K. Uesugi, and H. Kudo (2011) Towards a high-resolution local tomography using statistical iterative reconstruction. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), *IEEE*, 4253-4256.

[学会発表] (計14件)

[1] 上梶真之, 上杉健太朗, 竹内晃久, 鈴木芳夫, 土山明. X線CTによる炭素質コンドライトの三次元構造と化学組成の分析. 日本惑星科学会2012年度秋季講演会. 2012年10月25日. 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール, 神戸市

[2] 土山明, 松本徹, 永野宗, 松野淳也. 小惑星イトカワ粒子中の空隙の微細構造. 日本惑星科学会 2012 年度秋季講演会, 2012 年 10 月 24 日, 神戸大学統合研究拠点コンベンションホール, 神戸市

[3] 土山明, 中野司, 上杉健太郎, 上相真之, 竹内晃久, 鈴木芳生, 野口遼, 松本徹, 松野淳也, 永野宗, 今井悠太. Analytical dual-energy micro-tomography の開発とイトカワ粒子への応用. 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012 年 9 月 21 日, 京都大学

[4] 三宅亮, 池田都, 吉田健太, 土山明, 瀬戸雄介, 藤昇一. 鉱物中に含まれる包有物の相分析. 日本鉱物科学会 2012 年年会, 2012 年 9 月 21 日, 京都大学

[5] 土山明 マイクロ・ナノトモグラフィの利用. Spring-8 研究会 2012, 2012 年 8 月 26 日, 大阪大学コンベンションセンター

[6] A. Tsuchiyama, T. Matsumoto, T. Nagano and J. Matsuno, MICROSTRUCTURES OF VOIDS IN IOKAWA PARTICLES COLLECTED BY HAYABUSA. 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, August 16, 2012, Cairns, Australia. 5178. pdf.

[7] M. Uesugi, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, A. Tsuchiyama, S. Harada, k. Yokoyama, Y. Yodo, N. Takeda, T. Yada, Y. Ishibashi, Y. Karoji, S. Yakame, T. Okada, M. Abe, and A. Fujimura. Evaluation of cutting methods of small particles for the future allocation of the Hayabusa samples. 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, August 12-17, 2012, Cairns, Australia. 5155. pdf.

[8] M. Uesugi, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, M. Hoshino, and A. Tsuchiyama DEVELOPMENT OF A NEW X-RAY CT FOR THE OBSERVATION OF METEORITES AND RETURNED SAMPLES OF FUTURE MISSIONS. Asteroids, Comets, Meteors (ACM) 2012, May 17, 2012, TOKI Messe, Niigata.

[9] 土山明 「はやぶさ」微粒子について行われた究極の 3 次元分析. 応用物理学会結晶工学分科会主催 2011 年・年末講演会 (招待講演) 2011 年 12 月 15 日, 東京都、学習院大学

[10] 土山明, 上相真之, 松島亘志, 道上達弘, 門野敏彦, 中村智樹, 上杉健太郎, 中野司, Scott Sandford, 野口遼, 松本徹, 松野淳也, 永野宗, 今井悠太, 竹内晃久, 鈴木芳生, 大神稔皓, 片桐淳, 海老原充, Trevor R. Ireland, 北島富美雄, 長尾敬介, 奈良岡浩, 野口高明, 岡崎隆司, 坂本尚義, Michael E. Zolensky, 向井利典, 安部正真, 矢田達, 藤村彰夫, 吉川真, 川口淳一郎. 小惑星探査機はやぶさが回収したイトカワレゴリス粒子の 3 次元構造と初期分析における X 線マイ

クロ CT の役割. 日本地質学会第 118 年学術大会・日本鉱物科学会 2011 年年会合同学術大会 (招待講演) 2011 年 9 月 10 日, 水戸市、茨城大学

[11] A. Tsuchiyama, M. Uesugi, T. Matsushima, T. Michikami, T. Kadono, T. Nakamura, K. Uesugi, T. Nakano, S. A. Sandford, R. Noguchi, T. Matsumoto, J. Matsuno, T. Nagano, Y. Imai, A. Takeuchi, Y. Suzuki, T. Ogami, J. Katagiri, M. Ebihara, T. R. Ireland, F. Kitajima, K. Nagao, H. Naraoka, T. Noguchi, R. Okazaki, H. Yurimoto, M. E. Zolensky, T. Mukai, M. Abe, T. Yada, A. Fujimura, M. Yoshikawa, and J. Kawaguchi. ORIGIN AND EVOLUTION OF ITOKAWA REGOLITH PARTICLES BASED ON THREE-DIMENSIONAL SHAPES AND SIZES OF HAYABUSA SAMPLES. 74th Annual Meteoritical Society Meeting. 2011 年 8 月 8 日 University of Greenwich, London (UK)

[12] 松本徹, 土山明, 中村-メッセンジャー圭子, Michael E. Zolensky, 中野司, 上杉健太郎. X線マイクロCTによる炭素質コンドライト中の有機物ナノグローバルの 3 次元観察と画像シミュレーションによる CT 像の評価. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会. 2011 年 5 月 23 日. 千葉市 (幕張メッセ)

[13] 土山明, 上相真之, 上杉健太郎, 中野司, 中村智樹, 野口高明, 野口遼, 松本徹, 松野淳也, 永野宗, 竹内晃久, 鈴木芳生, 海老原充, 今井悠太, トレバーアイルランド, 北島富美雄, 松島亘志, 道上達弘, 長尾敬介, 奈良岡浩, 岡崎隆司, スコットサンドフォード, 坂本尚義, マイケルズレンスキー, 藤村彰夫, 安部正真, 矢田達, 向井利典, 岡田達明, 石橋之宏, 白井慶, 上野宗孝, 川口淳一郎, 吉川真. はやぶさ回収試料の初期分析: イトカワレゴリス粒子の 3 次元構造と初期分析における X 線マイクロトモグラフィの役割. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会 (招待講演) 2011 年 5 月 26 日. 千葉市 (幕張メッセ)

[14] 土山明. 小惑星探査機「はやぶさ」のサンプル初期分析と X 線マイクロ CT の役割. センシング技術応用研究会 (招待講演) 2011 年 4 月 25 日. 大阪市 (中之島公会堂)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-min/index.php?content=index>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

土山 明 (TSUCHIYAMA AKIRA)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：90180017

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

上杉健太郎 (UESUGI KENTARO)  
(財) 高輝度光科学研究センター・  
利用研究促進部門・研究員  
研究者番号：80344399

野口高明 (TAKAAKI NOGUCHI)  
茨城大学・理学部・教授  
研究者番号：40222195

工藤博幸 (KUDO HIROYUKI)  
筑波大学・システム情報工学研究科・  
教授  
研究者番号：60221933

### (4) 研究協力者

Michael E. Zolensky (マイケル・E・  
ゾレンスキー)  
アメリカ宇宙航空局・ジョンソン宇宙  
センター・キュレーター