

ローマ時代の水工学：水利構造物から給水能力まで

ウベール・シャンソン¹

要約：古代ローマの技術者は、水工学における高度な技術を発展させた。その代表的な構造物には水道やダム貯水池そして灌漑・排水網が含まれる。古代ローマの技術者らは質量保存の法則を知らなかつたのではないかと言う学識者もいるが、彼らの水力施設の業績を見ると、彼らは水工学の高い専門知識を有していたことを示している。ローマ時代のこれらの大変に秀でた水利体系の設計、運用と維持保全は過去、現在いずれの基準からみても偉業といえるであろう。

キーワード： 水工学；ローマ時代；ローマ水道；水利構造物；技術的専門知識

1. 序論

ローマ時代の工学遺産は橋、道路、ダム、水道などの目を見張るような素晴らしい建造物など今も存在するものが多い（図1、2参照）。その中でも水道はローマ時代の水工学の好例ともいえるものであり、チュニジア、スペインやフランスで、まだ利用されている個所が少なくない。しかし驚くべきことに、ローマ時代の技術者の工学的設計、また水工学の知識についてはあまり知られていない（Hodge 1992, Fabre et al.2002）。ローマ時代の人々が流体力学の基本的原則を知らなかつたと推測する学者もいたが、（Garbrecht 1987, Hodge 1992, 2002）、しかし最近の研究でその見解は覆されている（Chanson 2000, 2002）。

本論文では、古代ローマのいくつかの水道の水工学的な設計を、現代水工学の知識を利用して再分析する。ローマ時代の水道体系の運用について議論されてきたが、水道には水流の制御やエネルギーを逸散させるための水利構造物が装備されていたことが明らかになった。これらの装置の設計は、開水路や管路の流れに関する彼らの水工学の専門知識をうかがわせる。つまり、ローマ時代の水工学技術者は高度な技術的専門知識を持っていましたということである。

¹ Professor in Hydraulic Engineering, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia - Email: h.chanson@uq.edu.au, URL: <http://www.uq.edu.au/~e2hchans/>

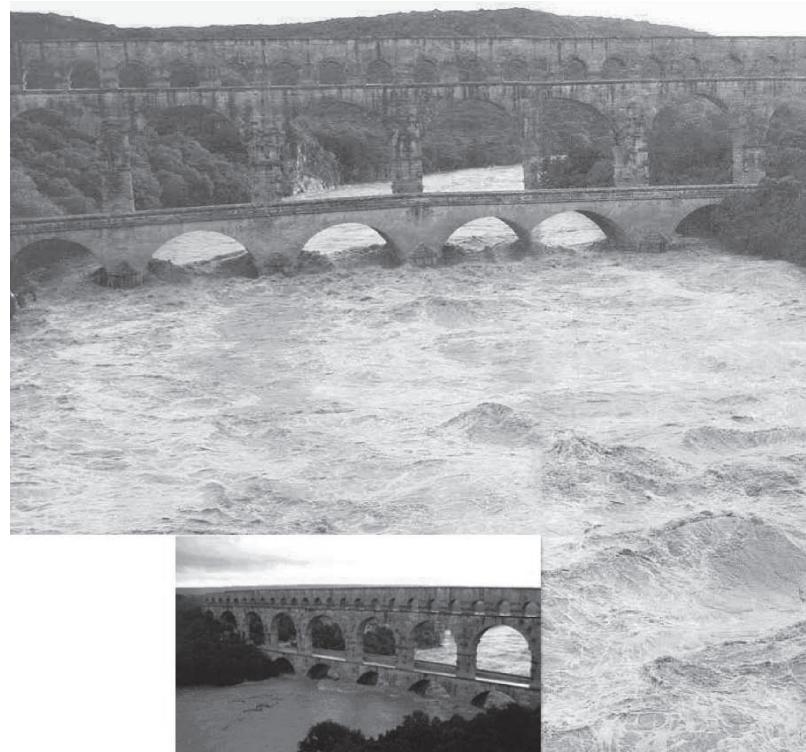


図1. ガール橋, ニーム水道(フランス) 2002年9月9日の大洪水時 (Bernard Wis 氏提供). 上流より撮影(下部挿入写真: 下流側より).



図2. フランス・メス市付近を流れるモゼル川に掛るゴルズ水道橋 2008年5月6日(写真提供: Guy Bergé).

2. 古代ローマの水道：その設計と施工

水道は地形に沿った地下水路であった。図3はジェール水路橋(リヨン・フランス)に沿った典型的な地下水路の交差部分を示している。水路の大部分は地表に沿って、あるいはその直下に建設された。水路の底面や側面は底面より0.5mから1mの高さまでモルタルで覆工されている(2000年ファーブル、2002年バーディ)。運用時には、水は開水路流れの状態で流れている。

り、水深は典型的なもので0.05mから1m以下であった(Chanson 2002)。汚泥や不純物による流水の汚染を食い止めるため、水路は蓋で覆われており、定期的に維持保全ができるよう概ね水路の内側の高さは1.1mから2.1mであった。修理および維持保存の担当者らは水道体系の運用および水質保存の面でとても重要な役割を果たしていた。

水道の建設は、しばしば軍の技術者の指揮を必要とする大規模工事であった。水道建設は公共事業であり、皇帝、地域共同体、一般の市民あるいはそれらの組合せで行われた。例として、ニームの水道(図1)は皇帝と市の出資によるものであったが、図4は個人の別荘への水路である。ローマの水道の建設費はそれほど大きくない流量を考えると非常に高額で、1キロあたり200—250万セスティリティウムを要したが、流水量は1秒あたり0.4立方メートル未満であった(Février, Leveau 1991, 2006)。アウグストゥス帝時代のセスティリティウムの銀濃度によれば、今日の銀の値段で1グラム61セントを基準にすると1kmあたり160-210万米ドルになる。比較のために、1994年オーストラリアにあるタロン管水路の建設費は1キロあたり10万米ドルで、管路の流量は1秒あたり0.9立方メートルである。

水道の建設は巨大プロジェクトで、設計には水文学、測量学、土木や水理学また建設マネジメントなどの様々な知識が必要であった。工事現場には何百人の作業員があり、水道の完成までには何年もの年月を要した。例えば、ローマにあるアニオ・ヴェチュースの建設は3年、ニームの水道の建設には15年を要した。完成にもっと時間がかかった水道もあるはずである。技術者は開水路、鉛管、陶管という三種類の導管を採用した(Leveau 2006)。水路は石造りで、しばしば岩を削ってつくられ、流れは重力に従って自然流下していた。鉛管は逆サイフォンのような加圧の区間で利用されていた(例えば、Aspendos, Lyon)。



図3. フランス・リヨン近郊のモルナンのジェール水道(1998年6月)



図4. モントカレ荘へ温水を供給する水路(フランス) (写真提供: Mr and Mrs J. Chanson). ローマの私的別荘は暖房系統(hypocaust)、水泳用プール(natatio)、そして温湯が使える浴槽(thermae)を備えていた。

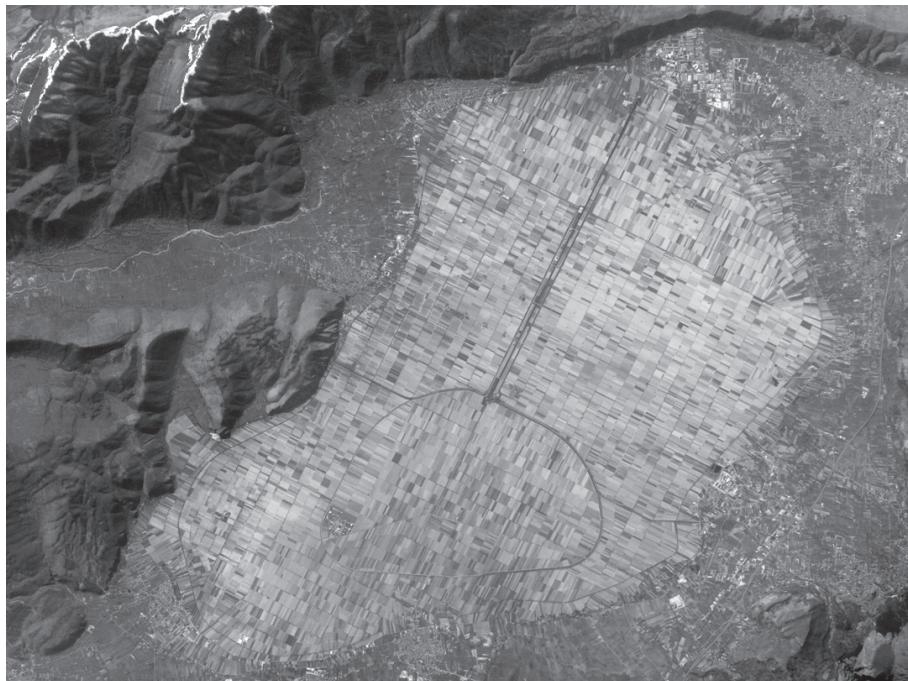


図5. フッチーネ湖(イタリア) 2008年2月26日(NASA Earth Observatory 提供). ローマ時代の流域の排水口はアヴェザロ(上右)の町に近いトンネルであった。

ローマ時代の水道は公衆衛生および清潔さを求める都市の要望に応える形で建設されていた。これらのニーズには、噴水、銭湯や便所も含まれている(Hodge 1992, Fabre et al. 2000) (図4)。水道は都市の設立された後建設され、元来は飲料水の供給目的ではなかった。水路による水供給は下水や消防ためであった(例;ローマ)。感慨や工業用水を供給するために建設された水路もあった(例;鉱山、製粉所)。イタリアにあるフッチーネ湖のように、沼地の排水に利用される水路も多かった。いずれの場合も水路はローマ文明の権力と繁栄の象徴であったことは間違いない(Fevrier 1979, Leveau 1979)。

3. ローマ時代の水道：水工学と運用

多くの水道には天然水が供給されていた。中には、ゴルズ、モンス、ニームの水道など現在も使用されているものも存在しているが (Chanson 2002, 2008) 、それらの運用から興味深い資料が得られている。近代水文学の記録では、供水設備は年にせいぜい 2 ヶ月ほどしか大きな流量で稼動することができないと考えられている。乾季には水路への流出は泉の湧水量に左右されていた。最近の水文資料によると日流量の最大値と最小値との比率は 10 から 1000 以上に達している (Chanson 2008) 。例えば、モンスにあるラ・シニアニヨルの泉は 1981 年から 1993 年において毎秒 $0\sim17.9 \text{ m}^3$ であった。主に夏の間であった調査期間の 4 分の 1 の期間では、流量は毎秒 0.07 m^3 以下であった。与えられた 1 ヶ月間における日流量の比は 1 から 1000 の間で変化していた (Valenti 1985) 。古代の流量率は不明ではあるものの、ローマ時代の流量変動はこれに似ていたと考えられる。

流量の変動に対応して、ローマの技術者は多くの改善策を講じた。その中には、下流の端に建設された貯水池や貯水槽も含まれる。例として、クイクル (アルジェリア)、オータン (フランス)、ローマとカルタゴ (図 6) などが挙げられる。また別の方法として、水道そのもので流量調節が行われた。ウィトリウスは調節装置の設置を推奨した (Hodge 1992) 。そして数多くの最近の研究ではいくつかの水路の中での調節体系が発表されている (Fabre et al. 2000, Bossy et al. 2000, Chanson 2002) 。水道の調節は、雨季には溢水を防ぐため、過大な流量を水路外に排出するため、乾季には最小限のエネルギー損失と最大限の流量で最適な運用を行うため、水の流出を調節するため、また維持保全のために基本的に必要な性質であった。状況に応じた調節により、昼間は街の需要に応じて給水が調整され、夜間は水路の様々な区間での貯水が可能となった (Bossy et al. 2000, Chanson 2002, 2008) 。比較的大きな水道 (例: ゴンズ、ニーム) だと、人口や水量規制に応じて 1 週間から 3 週間分の供給に合わせて $20,000 \text{ m}^3\sim50,000 \text{ m}^3$ もの水を水道管内に貯水することが可能であった。

また、水道をうまく運用させるためには開水路の水理学と水利構造物に関する確固たる専門知識が要求された。例えば、洪水から水路を守るために、多数に細分化された排水溝や橋を含めた高度な雨水排水体系が設計、建設された (Chanson 2002b, 2008) 。図 1 はガール橋の下を流れるガルドン川の最近の洪水を示している。この川は《ガルドナード》と地元で呼ばれる洪水時の凄まじさを特徴とする非常に流れが激しい川である。ここでは 1463 年から 2003 年にかけて 123 もの大きな洪水が起っている。これは 4~5 年に一度起きる規模のものであり、20 年に一度の洪水の最大瞬間流量はおよそ毎秒 $3,100 \text{ m}^3$ にも達する。



図6. カルタゴにあるラ・マルガ貯水池（チュニジア）
2010年(Dr Michel Royon 提供).

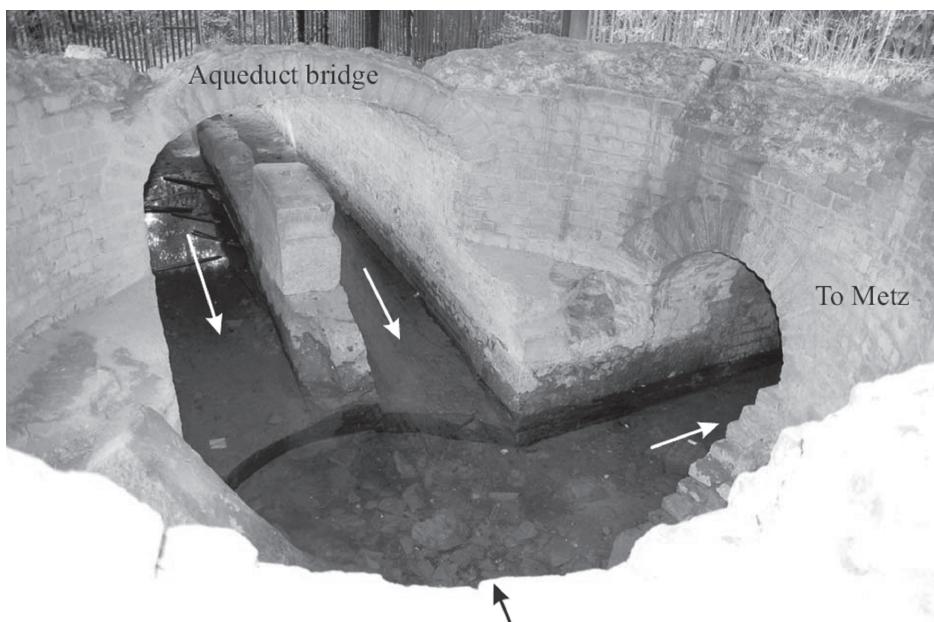


図7. ジュイ - オ - アルシュの貯水槽, ゴルズ水道橋の下流側 (フランス)
2008年5月6日(Guy Bergé 提供).

水道に沿って、流量調整水門と越流装置を含む調節用施設貯水池が設置されていた。図7はモゼール水道橋の下流端にある調節用施設を示している。水量管理水門は下部から流出する水門であり、一方、越流は上部から排水する水門で制御されていた。ゴルズやニームの水路では鉛直型水門が運用されていたことが推定されている(Chanson 2002)。これらの水門が正常に作用するためには、ゴルズでは少なくとも0.07mから0.1m、ニームでは少なくとも0.1mから0.12mの開度を持つ水門が必要であったと思われる。その他の水利体系では流れを調節するために越流堰が設けられていた。例として、図8は水路の下流端にある広頂堰を示している。これらの流水制御システムが正常に作用するためには、水道の水路方向に沿って、自由水面の形状を正しく予測する必要がある。；すなわち最も適した場所に、最も適した性質の制御装置が配置されていることを確かめるためである。ローマの技術者らは、小さい寸法の（実験室用の）模型でも使用していたのだろうか？今日ならばこのような水利システムは、設計の段階で物理的に、あるいは数値的に模型がつくられ、確認されるはずである。

水道にはいくつかの急な区間があり、そのような個所では、減勢装置の導入が必要である。運動エネルギーの逸散は、水路床の洗堀と水道自体の損害を避けて、水道の下流側の正常な機能を守るために極めて重要であった。最近の研究によれば、少なくともこの目的のために、3つの様式の設計が用いられた。急な平滑面の下流での跳水、階段状の滝あるいは立杭である(chanson 2000—2002)。図9は跳水を引起すための小型の貯水槽を示している。主要な様式の減勢装置がスペイン・コルドバのヴァルドプエンテ水道にみられる。この水路には合計の落差が350m以上にも及ぶ3つもの立坑型の滝が存在する。現代の標準から考えても、この減勢装置の操作は複雑で、水理学の高度な知識が必要であった。



図8.ペルジュ水道（トルコ）の滝の列、2002年9月（デニス・マーフィー提供）
右: 上流側部分。急降下する斜面を伴った広頂堰の詳細を示している。
(流れの方向は右から左)

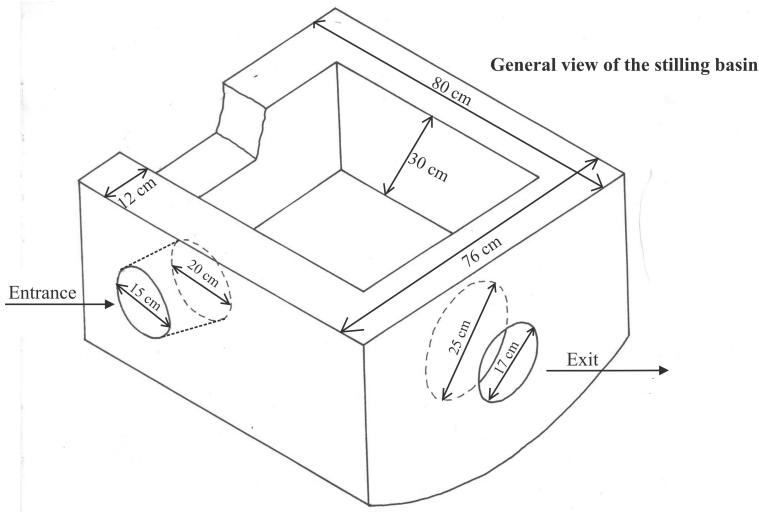


図9. ポタイサ チュルダ（ルーマニア）のローマ駐屯地に水を供給する水路上にある小型の貯水槽（フォドレアン・フロラン博士 提供）。

4. 結論

古代ローマの水道は何世紀にもわたり運用され、現在の規格から見ても、そのデザインは完成度の高い重要な遺産である。しかしながら、水道は地形に沿った長い地下路で、調節装置、雨水排水体系、減勢装置などの様々な水利構造物が設置されている。この施設の完成度の高い設計とその正常な操作には流体力学と水工学の高度な知識が要求される。実際、基礎流体力学の複雑さは基本方程式の非線形性と関連している。ローマ時代の水道は、水文学、水理学、構造工学、測量学、そしてプロジェクトマネジメントを含む、成功した土木事業の優れた例を示している。

本論文から様々な疑問が生まれる。ローマ時代の技術者はどのような人達であったのか？どのようにして水道の体系を設計したのか？技術者らは自由水面形状を予測し、流量調節装置と減勢装置の必要性を確信したのだろうか？著者は古代ローマでは、高い技術的専門知識を有していた技術者は数にするとわずかしかいなかつたもの信じている。彼らはフランスの土木大学技術者集団、英国ロイヤル技術者集団、アメリカの陸軍工兵隊の先駆者だったのだろうか？

参考文献

- Bossy, G., Fabre, G., Glard, Y., and Joseph, C. (2000). "Sur le Fonctionnement d'un Ouvrage de Grande Hydraulique Antique, l'Aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard (Languedoc, France)." ('On the Operation of a Major Water Supply System in the Antiquity: the Nîmes Aqueduct and Pont du Gard (Languedoc, France).') *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, Vol. 330, pp. 769-775.
- Burdy, J. (2002). "Les Aqueducs Romains de Lyon." ('The Roman Aqueducts of Lyon.') *Presses Universitaires de Lyon*, Lyon, France, 204 pages.
- Chanson, H. (2000). "Hydraulics of Roman Aqueducts: Steep Chutes, Cascades and Dropshafts." *American Jl of Archaeology*, Vol. 104, No. 1, Jan., pp. 47-72.
- Chanson, H. (2002). "Certains Aspects de la Conception hydrauliques des Aqueducs Romains." ('Some Aspect on the Hydraulic Design of Roman Aqueducts.') *Jl La Houille Blanche*, No. 6/7, pp. 43-57.
- Chanson, H. (2002b). "Hydraulics of a Large Culvert beneath the Roman Aqueduct of Nîmes." *Jl of Irrigation and Drainage Engrg.*, ASCE, Vol. 128, No. 5, pp. 326-330.

- Chanson, H. (2008). "The Hydraulics of Roman Aqueducts: What do we know? Why should we learn ?" Proc. World Environmental and Water Resources Congress 2008 Ahupua'a, ASCE-EWRI Education, Research and History Symposium, Hawaii, USA, Invited Plenary, 13-16 May, R.W. Badcock Jr and R. Walton Editors., Paper 166, 16 pages (CD-ROM).
- Fabre, G., Fiches, J.L., and Paillet, J.L. (2000). "L'Aqueduc de Nîmes et le Pont du Gard. Archéologie, Géosystème, Histoire." ('The Nîmes Aqueduct and Pont du Gard. Archaeology, Geosystem, History.') *CNRS Editions*, CRA Monographies Hors Série, Paris, France, 483 pages & 16 plates.
- Février, P.A. (1979). "L'Armée Romaine et la Construction des Aqueducs." ('The Roman Army and the Aqueduct Construction.') *Dossiers de l'Archéologie*, Séries Les Aqueducs Romains, Vol. 38, Oct./Nov., pp. 88-93.
- Garbrecht, G. (1987). "Hydraulics and Hydraulic Research: a Historical Review." *Balkema Publ.*, Rotterdam, The Netherlands.
- Hodge, A.T. (1992). "Roman Aqueducts & Water Supply." *Duckworth*, London, UK, 504 pages.
- Hodge, A.T. (2002). "Roman Aqueducts & Water Supply." *Duckworth*, London, UK, 2nd edition, 504 pages.
- Leveau, P. (1979). "La Construction des Aqueducs." ('The Construction of Aqueducts.') *Dossiers de l'Archéologie*, Séries Les Aqueducs Romains, Vol. 38, Oct.-Nov., pp. 8-19.
- Leveau, P. (1991). "Research on Roman Aqueducts in the Past Ten Years." *Future Currents in Aqueduct Studies*, Leeds, UK, T. Hodge ed., pp. 149-162.
- Leveau, P. (2004). "L'archéologie des Aqueducs Romains ou les Aqueducs Romains entre Projet et Usage." ('The Archaeology of Roman Aqueducts or Roman Aqueducts between Project and Usage.') in *Elementos de Ingenierai Romana, Libro de ponencias, Congreso Europeo Las Obras Publicas Romanas*, Tarragona, Nov., 13 pages.
- Leveau, P. (2006). "Conduire l'Eau et la Contrôler: l'Archéologie des Aqueducs Romains." ('Carrying Water and Controlling it: the Archaeology of Roman Aqueducts.') *Colloque International de la Société Française d'Archéologie Classique, Archéologie et Histoire des Techniques du Monde Romain*, Paris, 18 Nov., 22 pages.
- Valenti, V. (1995). "Aqueduc Romain de Mons à Fréjus. 1. Etude Descriptive et Technique. Son Tracé, son Profil, son Assise, sa Source ..." ('Roman Aqueduct of Mons at Fréjus. 1. Description and Technical Analysis. Its Plan, Profile, Footings, Source...') *Research Report*, Fréjus, France, 97 pages.



「歴史都市」シンボルマーク

きらめく城下のまち・金澤

国際水圏環境工学会



Supported by

CEDEX

歴史的用水 国際シンポジウム in 金沢

講演集

*Proceedings of
The International Symposium on
Water and City in Kanazawa
-Tradition, Culture and Climate-*

2010.10.14(木)→15(金)

October 14th(Thursday) - 15th (Friday) 2010

金沢市文化ホール
Kanazawa Japan

Proceedings of the International Symposium on Water and City in
Kanazawa - Tradition, Culture and Climate -
歴史的用水国際シンポジウム in 金沢講演集

Published in October 2010 平成 22 年（2010 年）10 月発行

Editing & publishing: Steering Committee of the International Symposium
on Water and City in Kanazawa
920-8577 Ishikawa Prefecture, Kanazawa City,
Hirosaka 1-1-1
(Kanazawa City Hall, Historic Heritage Preservation
Division, Cultural Preservation Section)

編集・発行：歴史的用水国際シンポジウム実行委員会
〒920-8577 石川県金沢市広坂 1 丁目 1 番 1 号
(金沢市役所 歴史遺産保存部 文化財保護課内)