

## 研究施設等廃棄物浅地中処分施設における 廃棄体の受入基準の設定

—トレンチ処分対象廃棄体への砂充填の検討—

Waste Acceptance Criteria for Waste Packages Destined for Near Surface Disposal  
Containing Radioactive Waste from Research, Industrial and Medical Facilities  
— Study on a Method that Fills Voidage in Waste Package with Sandy Soil —

仲田 久和 林 宏一 天澤 弘也 坂井 章浩

Hisakazu NAKATA, Hirokazu HAYASHI, Hiroya AMAZAWA, and Akihiro SAKAI

バックエンド研究開発部門

埋設事業センター

Radioactive Wastes Disposals Project Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

January 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

研究施設等廃棄物浅地中処分施設における廃棄体の受入基準の設定  
— トレンチ処分対象廃棄体への砂充填の検討 —

日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 埋設事業センター

仲田 久和、林 宏一、天澤 弘也、坂井 章浩

(2017年11月16日受理)

日本原子力研究開発機構埋設事業センターが計画している研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分施設は、「核原料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」に規定された廃棄物埋設施設及び廃棄体等の技術上の基準に適合していることが求められる。技術上の基準の一つには、「廃棄物埋設地は、土砂等を充填することにより、当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空隙が残らないように措置すること。」とされている。

また、トレンチ埋設処分施設に埋設する廃棄物の一部では、これまでに実施されてきたコンクリート層を収納したフレキシブルコンテナの他に、主として廃止措置等により発生する金属等を収納するための金属製角型容器も対象としており、第二種埋設規則において金属製角型容器は「廃棄体」に相当するものと考えられる。このため、廃棄体に係る埋設しようとする放射性廃棄物等の技術上の基準の一つである「放射線障害防止のため、放射性廃棄物を原子力規制委員会の定める方法により容器に封入し、又は容器に固型化してあること。」が適用され、具体的には核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示の封入の方法及び固型化の方法での「容器内に有害な空隙が残らないようにすること」が要求される。

そのため、埋設事業センターでは、研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分施設においてこれらの技術上の基準に適合させるため、容器内の有害な空隙を管理した上でトレンチ埋設処分施設全体（廃棄物埋設地）での空隙が残らないものとして技術基準に適合させるものとする。

本報告では、トレンチ埋設処分で金属製角型容器を使用する場合、容器内の空げきを砂を充填することで低減させることを想定した砂充填試験等を行い、充填する砂の特性、砂充填時の加振条件及び対象廃棄物への砂充填特性を調査・取得した。

---

本報告書は、日揮株式会社が国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に基づくものである。

旧本部事務所:〒319-1112 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

Waste Acceptance Criteria for Waste Packages Destined for Near Surface Disposal Containing Radioactive  
Waste from Research, Industrial and Medical Facilities  
-Study on a Method that Fills Voidage in Waste Package with Sandy Soil-

Hisakazu NAKATA, Hirokazu HAYASHI, Hiroya AMAZAWA,  
and Akihiro SAKAI

Radioactive Wastes Disposal Project Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 16, 2017)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) plans to install disposal facilities for radioactive waste arising from research institutes. They must meet the technical standards specified in the rules for the disposal of Category 2 nuclear fuel material or materials contaminated by nuclear fuel material. One technical standard is that the waste disposal facility shall be performance so as not to be left with the voids after the backfilling with soil.

Additionally, the waste of interest is destined for trench type near-surface disposal facilities. It includes not only concrete rubbles placed in a flexible container, which is already proven, but also metal waste arising mainly from decommissioning, which will be placed into metal containers. The later one will be a newly developed waste package according to the rule. Hence, the rule also requires this waste be enclosed in a container in which no harmful voids remain, by a method authorized by the regulatory body for the purpose of preventing from radioactive hazards.

In order to contribute to the development of a method that adapts the disposal facilities to these technical standards, JAEA adopts a waste conditioning that aims for reducing a quantity of voidage in each waste container by a vibration filling method using sandy soil, providing with average void ratios inside the disposal facilities being adequately controlled.

In this report, filling property tests are conducted in the light of filling sand characteristics, types of metal waste and vibration conditions on an assumption that metal waste is placed into a square shape container made of metal. Some considerations are provided in the hope of drafting a relevant waste acceptance criteria.

Keywords: Vibration Method, Disposal Facility, Sandy Soil

---

This work was based on the study performed by JGC Corporation under contract with the Japan Atomic Energy Agency.

目次

1 . はじめに.....	1
2 . 金属製角型容器へ充填する砂の検討.....	2
2.1 砂の基本特性試験.....	2
2.2 砂の基本特性試験の試験結果.....	2
2.3 金属製角型容器へ充填する砂.....	3
3 . スケールモデルによる加振試験.....	3
3.1 加振試験の試験ケースの設定（模擬廃棄物）.....	3
3.2 加振試験の方法.....	5
3.2.1 加振試験手順.....	5
3.2.2 試験装置の仕様（振動台及び土槽等）.....	5
3.2.3 砂の投入方法.....	5
4 . スケールモデルによる加振試験の結果.....	6
4.1 ブランク試験ケース（土槽内全体の嵩密度及び密度分布）の試験結果.....	6
4.2 パターン A ケース（細管への加振中の砂の充填の目視確認）の試験結果.....	6
4.3 配管束設置ケース（細管を束にしたことの充填性への影響）の試験結果.....	6
4.4 細管宙吊ケース（90°及び45°に埋設した細管の加振中の挙動）の試験結果.....	7
4.5 設置角度影響ケース（細管の角度と加振方向に応じた砂の充填の目視確認）の試験結果.....	7
4.6 設置角度影響ケース（土槽内に埋設した細管内の砂の嵩密度）の試験結果.....	7
5 . まとめ.....	9
謝辞.....	10
参考文献.....	10

Table of Contents

1 . Introduction .....	1
2 . Study on filling sandy soil.....	2
2.1 Characteristics confirmation tests .....	2
2.2 Test results relating to caharacteristics of sandy soil.....	2
2.3 Sandy soil to be used.....	3
3 . Vibration test using scale model.....	3
3.1 Vibration test cases(simulated waste).....	3
3.2 Vibration test method .....	5
3.2.1 Vibration test procedure .....	5
3.2.2 Test equipment(Vibration table and soil vessel).....	5
3.2.3 Throwing method of sandy soil.....	5
4 . Vibration test results usin scale model .....	6
4.1 Test results relating to physical bulk density and its distribution in soil vessel .....	6
4.2 Test results relating to visual inspection of filling property of sandy soil.....	6
4.3 Test results relating to filling property of sandy soil into bundling tubes .....	6
4.4 Test results relating to buried tubes with angles about both 90 and 45 degrees .....	7
4.5 Test results relating to filling property changes with angles of tubes.....	7
4.6 Test results relating to physical bulk density in the buried tubes .....	7
5. Summary .....	9
Acknowledgement.....	10
References .....	10

図表・写真リスト

表 2-1	試験対象とした砂の種類	11
表 2-2	試験項目と規格	11
表 2-3	砂の基本特性試験結果	11
表 3-1	加振試験ケース 一覧表	12
表 3-2	加振試験手順	15
表 3-3	振動台の主な性能	15
表 3-4	使用機器一覧表	16
図 2-1	鹿島珪砂(3A~6号)の粒径加積曲線	16
図 2-2	砂のスランプフロー試験状況の例	17
図 3-1	SGP 管ラック概要図	17
図 3-2	パターン A ケースの土槽ガラス面への細管設置概要図	18
図 3-3	パターン A ケースの細管設置概要図	19
図 3-4	配管束設置ケースの概要図	20
図 3-5	配管束	20
図 3-6	配管束設置ケースの配管設置状況(土槽を上から見た図)	21
図 3-7	配管束設置ケースの SGP 管と細管の設置状況(管束を側面からみた図)	21
図 3-8	細管宙吊りケースの細管設置位置の概要図	22
図 3-9	細管宙吊りケースの細管設置状況	22
図 3-10	設置角度影響ケース(パターン B)の土槽ガラス側面部細管(半割り)貼付け位置図	23
図 3-11	設置角度影響ケース(パターン B)の土槽ガラス側面部細管(半割り)貼付け状況	23
図 3-12	設置角度影響ケースの細管設置位置図(設置角 A の場合)	24
図 3-13	設置角度影響ケースの細管設置状況(設置角 A の場合)	24
図 3-14	設置角度影響ケースの細管設置位置図(設置角 B の場合)	25
図 3-15	設置角度影響ケースの細管設置位置図(設置角 C の場合)	26
図 3-16	設置角度影響ケースの細管設置状況	26
図 3-17	振動台の構成	27
図 3-18	振動台の概要図	27
図 3-19	最大能力線図(水平加振の場合)	28
図 3-20	振動台と土槽概要	28
図 3-21	土槽詳細図	29
図 3-22	計測システム概要図	30
図 3-23	土槽へ砂を投入する投入箱と投入状況	30
図 4-1	加速度と振動数に応じた土槽内の全体の砂の嵩密度と加振時間	31
図 4-2	土槽内の砂の密度分布の確認結果	31
図 4-3	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A: 1G-10Hz-10 分加振)	32
図 4-4	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A: 1G-20Hz-10 分加振)	32

図 4-5	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A:2G-20Hz-10 分加振) ……………	32
図 4-6	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A:2G-30Hz-10 分加振) ……………	32
図 4-7	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A:2G-30Hz-60 分加振) ……………	33
図 4-8	ガラス面に設置した細管(パターン A:2G-30Hz-空気抜き-10 分加振) ……………	33
図 4-9	ガラス面に設置した細管内への充填状況(パターン A:2G-30Hz-空気抜き-10 分加振) ……	33
図 4-10	配管内の嵩密度(配管束設置ケース 2G-30Hz-片側閉塞-10 分加振) ……………	34
図 4-11	配管内の嵩密度(配管束設置ケース 2G-30Hz-片側閉塞-30 分加振) ……………	35
図 4-12	配管内の嵩密度(配管束設置ケース 2G-30Hz-両端開口-10 分加振) ……………	36
図 4-13	配管内の嵩密度(配管束設置ケース 1G-10Hz-両端開口-30 分加振) ……………	37
図 4-14	細管内の砂の嵩密度(細管宙吊りケース 2G-30Hz-両端開口-30 分加振)と浮上状況 ……	38
図 4-15	ガラス面に設置した細管内の充填状況(設置角度影響ケース(パターン B) 2G-30Hz-30 分加振) ……………	39
図 4-16	ガラス面に設置した細管内の充填状況(設置角度影響ケース(パターン B) 1G-10Hz-30 分加振) ……………	39
図 4-17	ガラス面に設置した細管内の充填状況(設置角度影響ケース(パターン B) 1G-30Hz-30 分加振) ……………	39
図 4-18	砂中に埋設した細管内の嵩密度(設置角度影響ケース(設置角 A) 2G-30Hz-両端開口-30 分加振) ……………	40
図 4-19	砂中に埋設した細管内の嵩密度(設置角度影響ケース(設置角 A) 2G-30Hz-片側閉塞-30 分加振) ……………	40
図 4-20	砂中に埋設した細管内の嵩密度(設置角度影響ケース(設置角 B) 1G-10Hz-両端開口-水平設置-30 分加振) ……………	40
図 4-21	砂中に埋設した細管内の嵩密度(設置角度影響ケース(設置角 B) 1G-30Hz-両端開口-水平設置-30 分加振) ……………	41
図 4-22	砂中に埋設した細管内の嵩密度(設置角度影響ケース(設置角 C) 1G-30Hz-両端開口-水平設置-30 分加振) ……………	41



## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構法の一部を改正する法律（平成 20 年 6 月 6 日法律第 51 号）に基づき、原子力機構及び国内の研究施設等から平成 60 年度までに発生が見込まれる低レベル放射性廃棄物（以下、「研究施設等廃棄物」という。）のうち、浅地中処分対象の廃棄物に係る埋設(コンクリートピット埋設処分及びトレンチ埋設処分)事業の実施主体となっている。

研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分にあたっては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下、「原子炉等規制法」という。）第 51 条の 6 において、廃棄物埋設施設及び廃棄体等がそれぞれの技術上の基準に適合していることについて原子力規制委員会の確認を受けることが定められている。この技術上の基準は、「核原料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」（以下、「第二種廃棄物埋設規則」という。）において廃棄物埋設施設の覆土に係る基準として第 6 条第 1 項第 4 号に「廃棄物埋設地は、土砂等を充填することにより、当該廃棄物埋設地の埋設が終了した後において空隙が残らないように措置すること。」が、また、廃棄体の物理的な性能に係る基準として第 8 条第 2 項第 1 号に「放射線障害防止のため、放射性廃棄物を原子力規制委員会の定める方法により容器に封入し、又は容器に固型化してあること。」が規定されている。原子力規制委員会の定める方法は、「核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目を定める告示」第 4 条第 3 項第 2 号ハに「固型化に当たっては、予め均質に練り混ぜた固型化材料若しくは固型化材料及び混和材料を容器内の放射性廃棄物と一体となるように充填すること。この場合において、容器内に有害な空隙が残らないようにすること。」となっている。

埋設事業センターが計画している研究施設等廃棄物のトレンチ埋設処分施設<sup>1)</sup>では、埋設対象物にこれまで実施されてきたコンクリート屑を収納したフレキシブルコンテナの他に、主として廃止措置等により発生する金属等を収納するための金属製角型容器も対象としており、金属製角型容器は第二種埋設規則における「廃棄体」に相当するものと考えられることから、これらの技術上の基準を満たした廃棄体の製作を進める必要がある。

そのために、金属製角型容器内への砂による空隙の充填方法を検討するため、充填する砂の特性（種類、粒径、水分等）、砂充填時の加振条件（方向、加速度、加振周波数、波形等）及び対象廃棄物への砂充填特性（空隙の状態等）等について、模擬廃棄物を使用したスケールモデルによる加振試験を行い、基礎データを取得した。試験の結果、原子力機構が計画している研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設で埋設する金属製角型容器について、容器内の有害な空隙に係る管理基準を設定するために考慮する必要のある事項をまとめた。

## 2. 金属製角型容器へ充填する砂の検討

金属角型容器内に砂を充填する方法で、「容器内に有害な空げき残らないようにする」ためには、充填する砂の種類、粒径分布、含水比、流動性が影響因子として考えられる。そこで、一般的に用いられ購入が容易な同一産地の珪砂を対象に、砂の基本特性試験を実施し、その結果に基づいて使用する砂を選定した。

### 2.1 砂の基本特性試験

砂の基本特性を明らかにする試験として、土粒子の密度試験、含水比試験、粒度試験、最小・最大密度試験を実施した。また、流動性を明らかにする試験として、スランプフロー試験を実施した。充填する砂は、鹿島珪砂とし、異なる5種類の粒度分布を持つ購入砂とした。試験をした砂の種類を表2-1に示す。また、実施した試験項目とその規格を表2-2に示す。これらの試験項目及び試験対象とする砂は、先行事例<sup>2),3)</sup>を参考とした。

### 2.2 砂の基本特性試験の試験結果

試験結果を表2-3に示す。この結果について、以下に述べる。

#### 1) 土粒子の密度試験

土粒子密度試験では、5種類の珪砂とも、大きな差はなく、概ね $2.6\sim 2.7\text{g/cm}^3$ であったが、鹿島珪砂5号及び6号が比較的大きい。これは後述の粒径分布で示すとおり、鹿島珪砂5号と鹿島珪砂6号の粒度分布が細かい粒径のものが多いため、砂試料内の空隙が少ないためと考えられる。

#### 2) 砂の最大・最小密度試験

砂の最大乾燥密度は鹿島珪砂5号が大きい。また、最小乾燥密度は鹿島珪砂6号が小さい。砂の最大密度と最小密度の差は鹿島珪砂6号が最も大きい。砂の締固め（空隙内への充填）の確認には、密度を指標とすることを想定すると、鹿島珪砂6号は、最大密度と最小密度の差が最も大きく、加振充填による効果が確認しやすいと考えられる。

#### 3) 含水比試験

含水比は、 $0.5\sim 0.9\%$ 程度であった。鹿島珪砂6号が $0.9\%$ と他より大きい。先行事例<sup>2),3)</sup>においては、自然含水比状態の現地発生砂（含水比 $2.9\%$ ）、浚渫砂（含水比 $13.9\%$ ）は、加振による砂充填に適さず、乾燥砂を用いる必要があるとの知見がある。本試験で得られた含水比は、これらと比較して乾燥しており、空隙内への流動・充填に適していると考えられる。

#### 4) 粒度試験

図2-1に、各ケースの粒径加積曲線を示す。鹿島珪砂の号数が大きくなるほど、粒径が小さい細粒分が多いことを確認した。細粒分が多い方が、砂の充填に適していると考えられる。

#### 5) スランプフロー試験

砂の粒度分布について、細粒分が多いほうが、スランプフロー試験後の広がり直径が大きくな

る傾向が見られるが、安息角で比較すると有意な差（2°以上）は生じない。図 2-2 に試験の実施状況例を示す。スランプフロー試験後の広がり直径が大きく、安息角が小さい方が砂の流動性はよいと考えられる。

### 2.3 金属製角型容器へ充填する砂

以上の試験結果に基づくと、含水比、スランプフロー試験から推定される砂の流動性については、5 種類の砂とも大きな差はない。このため、本試験に用いる砂は、細粒分が多く、空げきへ充填性がよいと期待でき、また、砂の最大乾燥密度と最小乾燥密度の差が大きく、加振充填による締固めの効果が確認しやすいと期待できる、鹿島珪砂 6 号とした。

## 3. スケールモデルによる加振試験

金属製角型容器内への砂による空隙の充填方法を検討するため、砂充填時の加振条件（方向、加速度、加振周波数、波形等）及び対象廃棄物への砂充填特性（空隙の状態等）等について、模擬廃棄物を使用した土槽・加振機を用いた模型試験（以下、「スケールモデル」と言う。）による加振試験を行った。本項では、スケールモデルによる加振試験の内容をまとめた。

### 3.1 加振試験の試験ケースの設定（模擬廃棄物）

加振試験を実施するに当たり、試験時の振動の条件（方向・加速度・周波数・波形）の他、模擬廃棄物の条件（開口と設置方向）を考慮して試験ケースを設定することとした。その際に着目した観点を以下に示す。

- ・土槽内の砂の密度の均一性
- ・配管の角度の影響
- ・配管の片側を閉塞した場合、管内への砂の充填性
- ・配管内の充填に要する時間
- ・配管内に充填された砂の嵩密度
- ・加振方向、加速度、振動数、加振時間による充填状況（嵩密度）の差異
- ・加振により発生が予想される砂の流動による影響（廃棄物の浮き上がり）

また、模擬廃棄物は、原子炉施設を構成する設備・機器のなかで、充填性の観点から最も不利と考えられる、口径が小さい熱交換器の伝熱管（SUS304TP-BA 1/2"×t1.24）（以下、「細管」という。）を用いた。さらに、より充填性の観点から不利になるよう細管の片側の管口を閉塞した管も用いた。これに基づきスケールモデルによる加振試験のケースを設定した。設定した結果を表 3-1 に示す。設定した試験ケースにおける、具体的な模擬廃棄物の設置の方法を以下に述べる。

#### (1) ブランク試験ケース

表 3-1 のうちブランク試験ケースは、試験用の土槽内に模擬廃棄物を設置せずに行うものであ

り、土槽内で砂の密度差の有無の確認や、土槽全体の砂の嵩密度を確認する。なお、ブランク試験ケースでは、土槽内の全体の砂の嵩密度を確認するために模擬廃棄物を入れない試験ケースと、土槽内の砂の密度分布を確認するために、一般的なプラントに用いられるSGP（ID:60.5mm、OD:52.9mm、L:400mm）を土槽内に埋設した試験ケースとしている。SGP管は、土槽内に3行3列に配置した。SGP管の配置状況を図3-1に示す。また、加振方向、加速度、振動数、加振時間による差異が生じるかも確認することも目的とした。

## (2) パターンAケース

パターンAケースは、模擬廃棄物である細管の管口の片側を閉塞した長さ40cmの配管を、加振方向に対して、平行、直角、斜めや垂直に設置し、それらの細管内に砂が流動して充填ができるか、特に細管の片側を閉塞した場合、細管内の空気が抜けないため、充填がされにくいと考えられるが、それを確認することを目的として設定した。パターンAの模擬廃棄物の設置状況を図3-2及び図3-3に示す。

## (3) 配管束設置ケース

配管束設置ケースは、配管の径の違い、配管を束ねたことにより、配管内の充填に要する時間や配管内に充填された砂の嵩密度に差がでるかを確認することを目的とした。配管束設置ケースにおける細管の設置パターンを図3-4～図3-7に示す。配管束は、SGP管の4本の束と、内径:10.22mmの細管7本の束の2種類を加振方向に対し平行と直角のそれぞれに設置した。細管は、管口の両端を開口したものと片側を閉塞したものと2種類ある。

## (4) 細管宙吊ケース

細管宙吊ケースは、仰角45°及び垂直に細管を土槽内に設置したケースで、両端開口の細管を用いた。細管内の砂の嵩密度や、細管が砂の流動の影響を受けてどのように土槽内を移動するかを確認することを目的とした。細管宙吊りケースの細管の設置パターンを図3-8及び図3-9に示す。細管宙吊りケースは、予め両端を開口した細管を宙吊りにした状態で砂を投入したもので、一定の高さまで砂を投入した後に細管を砂に突き刺して設置していない。これは、細管を突き刺すことによって、加振前に細管内の砂の密度が高くなるようにするためである。

## (5) 設置角度影響ケース

設置角度影響ケースの細管の設置パターン（「パターンB」という。）を図3-10及び図3-11に示す。土槽ガラス側面部には、0°～9°の仰角を付け半割した細管10本を加振方向に対し平行と直角の2面に貼り付けた。また、土槽中に埋設した細管は、2°ずつ角度を大きくするパターン（図3-12及び図3-13、これを「設置角A」という。）、水平の細管を等間隔に設置するパターン（図3-14、これを「設置角B」という。）を設定した。その他、「パターンAケース」や「細管宙吊りケース」の場合よりもさらに仰角を高角度としたパターン（図3-15及び図3-16、これを「設置角C」という。）を設定した。これらの試験ケースでは、土槽内の砂の対流による細管の移動（浮き上がり）を確認した。

## 3.2 加振試験の方法

### 3.2.1 加振試験手順

表 3-2 に加振試験の手順を示す。模擬廃棄物は表 3-1 に示すよう配置し、砂を所定の方法で投入する。土槽内には、ガラス面に半割した細管を貼り付け、また、必要に応じ土槽内の砂に埋設した配管（SGP 管、細管）を設置する。加振は、市販で入手可能な振動台で設定可能な条件で行う。加振中は、土槽内のガラス面に貼り付けている半割した細配内に砂が充填される様子を目視確認する。また、加振を 1 分毎に停止し、1 分毎の土槽内の砂の沈下量を測定した。加振後は、土槽内の砂に埋設した細管、SGP 管を回収し管内に充填された砂の嵩密度を測定した。

### 3.2.2 試験装置の仕様（振動台及び土槽等）

#### (1) 小型振動台

加振試験に用いる振動台は、振動発生部である加振装置、動力部となる油圧ユニット、電気制御部を主とした制御装置から構成されている油圧サーボ振動試験機である。油圧ユニットは、制御装置からの信号で電動機が起動されて油圧を発生し、加振機へ伝達される。また、制御装置は試験機の加振信号を発生するとともに、加振機の動作を制御する。本試験では、以下の設定で使用した。

- ・ 加速度波形 正弦波
- ・ 振動方向 水平
- ・ 周波数 10Hz~30Hz
- ・ 加速度 1G~2G

振動台の構成を図 3-17 に、概要図を図 3-18 に、水平加振の場合の最大能力線図を図 3-19 に、振動台の主な性能を表 3-3 にそれぞれ示す。また、振動台に土槽を設置した状況を図 3-20 に示す。

#### (2) 土槽

土槽は、縦約 550mm、横 550mm、高さ 550mm の内部の観察が可能な容器とした。容器壁面はガラス張りとした。加振試験に用いた土槽を図 3-21 に示す。

#### (3) 計測システム

加振装置により発生する土槽の加速度及び変位は、それぞれ、加速度計及びレーザー変位計により計測する。図 3-22 に計測システムを示す。加速度計、レーザー変位計はデータロガーに接続されている。使用した機器の一覧を表 3-3 に示す。

### 3.2.3 砂の投入方法

砂の投入は規定高さより投入するため、図 3-23 に示すように砂を投入した。その都度、砂の投入質量を測定しながら同図中の砂投入箱に砂を投入した。砂の投入位置は同図に示すように横にずらしながら 3 箇所とした。

## 4. スケールモデルによる加振試験の結果

### 4.1 ブランク試験ケース（土槽内全体の嵩密度及び密度分布）の試験結果

ブランク試験ケースにおける、土槽内全体の砂の嵩密度の測定結果を図 4-1 に示す。これは、加振時間 1 分毎に 9 点で測定した砂の沈下量から求めた土槽内全体の嵩密度である。加速度及び振動数が大きい方が、加振後の嵩密度が大きくなる傾向がある。加振から約 10 分以内に表 2-3 に示した砂の最大密度と同程度の嵩密度となる。

また、SGP 管を埋設した場合、それぞれの管内に充填された砂の嵩密度を比較することで、土槽内の砂の密度分布を確認した。その結果を図 4-2 に示す。これにより、土槽内の砂の密度は均一となっていることを確認した。

### 4.2 パターン A ケース（細管への加振中の砂の充填の目視確認）の試験結果

パターン A ケースでは、図 3-2 に示すように、加振中に充填状況が目視確認できるよう、片側を閉塞した細管を半割して土槽ガラス面に貼り付け、加振方向に対して、様々な角度に設置した。これらのケースでの、加振時間 10 分後の細管内への砂の充填状況を図 4-3~図 4-6 に示す。加速度 1G、2G とも、加振方向と平行 (B 面) な面に、水平に設置した細管と、D 面 (底面) に貼り付けた細管 (加振方向に対して 45°) への充填は確認できた。しかし、加振方向と直角の A 面及び C 面に配置した細管への充填はされなかった。

そのため、加振時間を 60 分間として同様の試験を行った。その結果を図 4-7 に示す。加振時間を延長したことにより、加振方向と直角な A 面及び C 面に水平に設置した細管への充填が確認できた。しかし、仰角 45°及び 90°に設置した細管へは充填されなかった。

以上より、加振方向に対して直角な面で、仰角 45°及び 90°に設置した細管への充填はされない。これは、細管の上端を閉塞しており、管内の空気が抜けられないために、砂が管内に充填されないためと推定した。このため、両端を開口した細管を使用した試験 (パターン A: 2G-30Hz-空気抜き 10 分加振) を行った。ただし、図 4-8 に示すように、斜め上向き (仰角 45°) と鉛直上向き (仰角 90°) の細管の上部の開口部からの重力による砂の進入を防ぐため、通気性を有するスポンジを細管に詰めて試験を行った。試験の結果を図 4-9 に示す。本試験の結果では、通気性があっても細管内への砂の充填はされなかった。なお、加振方向に平行 (B 面) 及び直角な面 (A 面及び C 面) に、水平に設置した細管は、両端開口したことによって、10 分間で砂が充填された。

これらの結果により、加振方向に平行 (B 面) 及び直角な面 (A 面及び C 面) に、水平に設置した細管は、片側の管口を閉塞した場合でも適切に加振時間を設定することで充填できる。また、細管の両端を開口することで、充填されるまでの加振時間を短縮することができる。仰角が大きい細管 (ここでは、45°及び 90°) には砂は充填されない。

### 4.3 配管束設置ケース（細管を束にしたことの充填性への影響）の試験結果

配管束を設置するケースにおいて、SGP 管及び細管に充填された砂の質量を測定して評価した嵩密度を図 4-10~図 4-13 に示す。図 4-10 及び図 4-11 は 2G-30Hz の加振条件で片側を閉塞した細管を束にして、加振方向と平行と直角に設置している。SGP 管は、両端を開口して束にして、加振方向と平行と直角に設置している。それぞれ 10 分、30 分ずつ加振した結果であり、加振時間以外は同条件である。

この両者を比較すると、加振時間が10分だった場合、加振方向に対し直角に配置した細管内部(配管№8～14)の相対密度が負であり、細管内は十分に充填されず、空隙が残った。加振時間を30分にすると、加振方向に直角に配置した細管内部の相対密度は、0.6～0.8程度となり、充填された。なお、SGP管は両ケースともに砂が充填された。

このため、加振方向に直角に細管を束にして配置した場合、加振時間を適切に設定する必要がある。

また、図4-12及び図4-13には、両端を開口した細管を束にして、加振方向と平行と直角に設置している。SGP管は、両端を開口して束にして、加振方向と平行と直角に設置している。それぞれ10分、30分ずつ加振した結果であり、加振条件はそれぞれ、2G-30Hz、1G-10Hzとした。

細管の両端を開口した場合は、加振時間が10分としても、加振方向に直角に配置した細管内部の相対密度は、0.7～1.0程度であり、充填がされた。なお、SGP管は両ケースともに砂が充填された。

このため、加振方向に直角に、細管を束にして配置する場合は、両端を開口する必要がある。

これらの結果より、細管を束にして加振方向と直角に配置した場合でも、加振時間を適切に設定すること、細管の両端を開口することで充填ができる。

#### 4.4 細管宙吊ケース(90°及び45°に埋設した細管の加振中の挙動)の試験結果

細管宙吊ケースでは、表3-1(2/3)に示すように、土槽内に仰角45°及び90°に、両端を開口した細管を設置している。同管への砂の充填性に係る試験結果を図4-14に示す。加振方向と平行に設置した細管は、土槽内の砂の流動の影響を受け浮上した。加振方向と直角に設置した細管は浮上しなかった。ただし、浮上しなかった細管内の砂の嵩密度は、最大密度までは充填されなかった。

これらの結果より、細管に仰角(ここでは、90°及び45°)があり、加振方向に平行であると、細管は浮き上がる。

#### 4.5 設置角度影響ケース(細管の角度と加振方向に応じた砂の充填の目視確認)の試験結果

設置角度影響ケースのパターンBにおける加振時間30分後の、土槽ガラス面に設置した細管内への砂の充填状況を図4-15～図4-17に示す。細管の仰角が上がるにつれて、加振後に管内に残存する空隙の量が大きくなる。完全に充填されたのは、加振方向に平行な面(B面)に水平に設置した細管のみであった。2G-30Hzのほうが、1G-10Hz及び30Hzより充填性が高い。なお、図4-15中、A面の上から3本目とB面の上から2本目の細管はガラス面との間に隙間があったことより砂が管内に漏れ入ったため、充填されたものである。

これらの結果より、片側を閉塞した細管に仰角(ここでは、1°～14°)があると砂は充填されない。

#### 4.6 設置角度影響ケース(土槽内に埋設した細管内の砂の嵩密度)の試験結果

設置角度影響ケースにおける細管内の砂の嵩密度に係る試験結果を図4-18～図4-22に示す。図4-18及び図4-19に示す設置角Aの試験においては、表面から25～30cm程度の砂の対流層に細管があるため、砂の流動の影響により表面まで浮上した。浮上しなかった細管内の相対密度は、両端開口の場合、1.0～1.1程度であり充填された。図4-19に示す片側を閉塞した細管の場合は、細管に空隙が残ったため、細管内の充填率( $Fr$ )を以下の方法で推定した。

$$Fr = \frac{V}{V_0} \times 100 \quad \text{式-1}$$

$$V = \frac{m_s}{\rho_{d \max}} \sim \frac{m_s}{\rho_{d \min}} \quad \text{式-2}$$

ただし、

$Fr$  : 充填率(%)

$V$  : ある密度(砂の最小密度～砂の最大密度)で砂が細管内に存在する時の体積( $\text{cm}^3$ )

$V_0$  : 細管内の空隙体積( $\text{cm}^3$ )

$m_s$  : 細管内に充填された砂の質量(g)

$\rho_{d \max}$  ,  $\rho_{d \min}$  : 砂の最大密度・最小密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

式-1 及び式-2 による推定の結果、片側を閉塞した場合、加振方向に直角に配置した細管への充填率  $Fr$  は 30～60%程度となった。

図 4-20 及び図 4-21 に示す、設置角 B(水平)に係る加速度 1G の加振試験においては、埋設した細管のうち、表面より 3cm に配置したものは加振後 1 分～3 分程度で浮上した。このことより、加速度 1G 程度であれば、砂の対流は表面付近となる。図 4-22 に示す、設置角 C の加速度 1G の試験においては、90°、75°、45°に埋設した細管内の嵩密度を確認した。

これらの結果より、細管を埋設する深さは、砂の対流層より深くする必要がある。また、できるだけ水平に埋設することが望ましい。



## 5. まとめ

金属製角型容器内への砂による空隙の充填方法を検討するため、充填する砂の特性（種類、粒径、水分）、砂充填時の加振条件（方向、加速度、加振周波数、波形）及び対象廃棄物への砂充填特性（空隙の状態）について、模擬廃棄物を使用したスケールモデルによる加振試験を行い、基礎データを取得した。試験の結果、原子力機構が計画している研究施設等廃棄物のトレンチ処分施設で埋設する金属製角型容器について、容器内の有害な空隙に係る管理基準を設定するために考慮する必要のある以下の事項をまとめた。

- ▶ 土槽内は、加振時間と加速度、振動数によって到達する密度は一意的に決まる傾向が見られ、砂は最大密度と同程度の嵩密度となる。また、土槽内の砂の密度は均一となっていることを確認した。
- ▶ 片側を閉塞した細管は、充填がされにくい傾向がある。このため、細管は両端を開口する方が望ましい。容器に収納可能な、管の径、長さは、加振条件、金属製角型容器の大きさに依存するため、実際の角型容器を用いて実大規模の加振機を用いて確認する必要がある。
- ▶ 両端開口にした細管であっても、加振方向に直角に配置した場合、また、仰角をつけて設置した配管は、充填されにくい傾向があるため、できる限り加振方向に平行で、水平に近い状態で、金属製角型容器に収納することが望ましい。
- ▶ 加振による砂の対流で、細管の一部が砂の表面まで浮上する場合がある。このため、金属製角型容器に投入する砂の量を適切に設定する必要がある。これは、実大規模の加振機を用いて確認する必要がある。

今後、これらの試験の結果を踏まえ、固体状の放射性廃棄物の一般的な形状に関する組成や、実機を用いて加振条件に応じた角型容器内の空げきへの砂の充填性の把握を行い、トレンチ処分対象廃棄物への砂充填のための受入基準の設定を行うものとする。

なお、現在、原子力機構で保管されている固体状の放射性廃棄物の状態を考慮すると、細管等を水平に収納するには、これまでに保管されている放射性廃棄物を再度分別する作業が必要となり、多大な労力を要する。このため、水平に収納せずとも充填可能なような廃棄物作製に関する手順を検討することも課題である。これらの課題を踏まえ、当該受入基準は、充填する砂の特性（種類、粒径、水分）、砂充填時の加振条件（方向、加速度、加振周波数、波形）及び対象廃棄物（空隙の状態）について指標を示すことを検討する予定である。

謝 辞

本試験を行うに際して、浅池中処分に係る廃棄容器内の空隙充填方法の検討に幅広くご協力頂いた日揮株式会社の高尾肇氏、加賀谷大輔氏に感謝の意を表します。また、バックエンド研究開発部門埋設事業センター埋設技術開発室の齋藤龍郎技術副主幹から丁寧な指導、貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 天澤 弘也 他：“研究施設等廃棄物浅池中処分施設の概念設計”，JAEA-Technology 2012-031(2012), 338p.
- 2) 高尾 肇、山内 豊明、磯部 昌美、田中 靖人、山田 淳夫(2009)：“廃棄物収納容器内への砂質土充填性確認試験”，日本原子力学会 2009年春の年会，11p.
- 3) 高尾 肇、山内 豊明、中房 悟、磯部 昌美、田中 靖人、山田 淳夫(2009)：“廃棄物収納容器内への砂質土充填性確認試験（その2）”，日本原子力学会 2009年秋の年会，4p.

表 2-1 試験対象とした砂の種類

材料 No.	材料名
1	鹿島珪砂 3A 号
2	鹿島珪砂 3B 号
3	鹿島珪砂 4 号
4	鹿島珪砂 5 号
5	鹿島珪砂 6 号

表 2-2 試験項目と規格

試験項目		試験規格	結果の利用等
物理試験	土粒子の密度試験	JIS A 1202 : 2009 土粒子の密度試験方法	・ 間隙比の確認
	含水比試験	JIS A 1203 : 2009 土の含水比試験方法	・ 乾燥密度の算出 ・ 砂の流動性の検討
	粒度試験	JIS A 1204 : 2009 土の粒度試験方法	・ 空隙への充填性の検討
	砂の最小・最大乾燥密度試験	JIS A 1224 : 2009 砂の最小密度・最大密度試験方法	・ 加振前後の砂の密度/ 相対密度の算出
流動性の試験	スランプフロー試験	JIS A 1150:2014 コンクリートのスランプフロー試験方法	・ 砂の流動性の検討

表 2-3 砂の基本特性試験結果(1/2)

砂の種類		鹿島珪砂 3A	鹿島珪砂 3B	鹿島珪砂 4号	鹿島珪砂 5号	鹿島珪砂 6号
土粒子密度	$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.648	2.637	2.636	2.709	2.721
砂の最大密度	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.645	1.618	1.656	1.710	1.654
砂の最小密度	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.441	1.409	1.423	1.444	1.360
含水比	W (%)	0.4	0.5	0.5	0.5	0.9
粒度試験	最大粒径 (mm)	4.8	2.0	2.0	2.0	2.0
	60%粒径 D <sub>60</sub> (mm)	1.45	1.35	0.93	0.39	0.27
	50%粒径 D <sub>50</sub> (mm)	1.32	1.23	0.79	0.35	0.23
	30%粒径 D <sub>30</sub> (mm)	1.10	1.01	0.61	0.29	0.17
	10%粒径 D <sub>10</sub> (mm)	0.92	0.73	0.47	0.18	0.12
	均等係数 U <sub>c</sub>	1.6	1.8	2.0	2.3	2.2
	曲率係数 U' <sub>c</sub>	0.9	1.0	0.9	1.2	0.9

表 2-3 砂の基本特性試験結果(2/2)

砂の種類		鹿島珪砂 3A	鹿島珪砂 3B	鹿島珪砂 4号	鹿島珪砂 5号	鹿島珪砂 6号
スランプ試験	広がり直径(cm)	48	47	49	49	49
	高さ (cm)	10	10	10	10	11
	質量 (g)	8,422	8,221	8,247	8,390	8,031
	見かけ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.53	1.50	1.50	1.53	1.46
	安息角 (deg)	22	23	22	23	24

表 3-1 加振試験ケース 一覧表(1/3)

ケース名		加速度 G	振動数 Hz	加振時間 min	土槽内の模擬廃 棄物の配置	結果の利用等
ブ ラ ン ク 試 験	砂のみ-1G-10Hz	1 程度	10	11	模擬廃棄物なし	加振後の土槽 内全体の砂の 平均密度の確認  結果：図 4-1
	砂のみ-1G-20Hz	1 程度	20	10		
	砂のみ-1G-30Hz	1 程度	30	9		
	砂のみ-2G-10Hz	2 程度	10	7		
	砂のみ-2G-20Hz	2 程度	20	7		
	砂のみ-2G-30Hz	2 程度	30	7		
	blank-1G-10Hz	1 程度	10	11	口径 60mm の鋼 管 (SGP 管) を 土槽内の上層、 中層、下層に 3 本ずつ、合計 9 本を配置 (図 3-1)	土槽内が均一 な密度分布と なっているこ との確認  結果：図 4-2
	blank-1G-20Hz	1 程度	20	10		
	blank-1G-30Hz	1 程度	30	9		
	blank-2G-10Hz	2 程度	10	7		
blank-2G-20Hz	2 程度	20	7			
blank-2G-30Hz	2 程度	30	7			
パ タ ー ン A ※	A-10Hz-1G	1 程度	10	10	口径 10mm の細 管の、片側の管 口を溶接で閉 塞。細管は、加 振中に充填状況 が確認できるよう 半割して土槽ガ ラス面に貼付け、 加振方向対して 、平行から最大 90 度までの角 度をつけた (図 3-2)。パターン A	振動方向と細 管の角度に応 じた充填性を 目視確認  結果：図 4-3~ 図 4-9
	A-10Hz-2G	2 程度	10	10		
	A-20Hz-2G	2 程度	20	10		
	A-30Hz-2G	2 程度	30	10		
	A-30Hz-long	2 程度	30	60		
	A-30Hz-空気抜き※1	2 程度	30	10		

※ ブランク試験の結果、2G のほうがより土槽内の砂が締固められるため、パターン A では 2G を主に実施。

※1 細管の片側を溶接でなく、通気性の綿で栓をして閉塞した。片側を閉塞した細管内の空気存在が、砂の充填性を悪くしていないか確認するため。

表 3-1 加振試験ケース 一覧表(2/3)

ケース名		加速度	振動数	加振時間	土槽内の模擬廃棄物の配置	結果の利用等
		G	Hz	min		
配管束設置ケース	30Hz-配管束設置 (片側を閉塞した細管)	2 程度	30	10	土槽内に口径60mm (SGP管)と10mmの細管を束にして加振方向に平行と直角に配置 (図 3-4)	配管の口径の違い、管を束ねることで充填性が悪くなるかを確認  結果：図 4-10~図 4-13
	30Hz-配管束設置 (片側を閉塞した細管) -30分加振	2 程度	30	30		
	30Hz-配管束設置 (両端を開口した細管)	2 程度	30	10		
	1G-10Hz-配管束設置 (両端開口した細管) -30分加振	1 程度	10	30		
細管宙吊ケース	細管宙吊り-2G-30Hz	2 程度	30	30	土槽内に口径10mmの、両端を開口した細管を45°及び90°の仰角で、加振方向に平行と直角に配置 (図 3-8)	加振方向と細管の角度に応じた充填性を確認  結果：図 4-14

表 3-1 加振試験ケース 一覧表(3/3)

ケース名		加速度	振動数	加振時間	土槽内の模擬廃棄物の配置	結果の利用等
		G	Hz	min		
設置角度影響ケース	2G-30Hz-両端開口-貼付無	2 程度	30	30	土槽内に口径 10mm の、両端を開口した細管を埋設。細管は、5cm の間隔で、2° ずつ傾斜。加振方向に対して、平行と直角に埋設。(図 3-12)。これを設置角 A とした。	加振方向と管の角度に応じた充填性を確認 結果：図 4-18
	B-2G-30Hz-片側閉塞	2 程度	30	30	土槽内ガラス面に口径 10mm の細管の片側を閉塞して貼り付け。細管は、5cm の間隔で、1° ずつ傾斜。加振方向に対して、平行と直角に配置(図 3-10)。これをパターン B とした。また、土槽内に設置角 A (図 3-12) で細管を埋設。	同上 結果：図 4-15 及び図 4-19
	B-1G-10Hz-両端開口-水平設置	1 程度	10	30	パターン B (図 3-10) 及び土槽内に口径 10mm の両端を開口した細管を埋設。細管は、5cm の間隔で水平に設置。加振方向に対して、平行と直角に埋設。(図 3-14)。これを設置角 B とした。	加振方向と管の角度に応じた充填性を確認 水平に配置した細管の浮き上がりの確認 結果：図 4-16 及び図 4-20
	B-1G-30Hz-両端開口-水平設置	1 程度	30	30		同上 結果：図 4-17 及び図 4-21
	1G-30Hz-両端開口	1 程度	30	30	両端を開口した細管を、45°~90° の角度で埋設。加振方向に対して、平行と直角に埋設。(図 3-15)。これを設置角 C とした。	同上 結果：図 4-22

表 3-2 加振試験手順

No	手順
1	土槽の固定 振動台（図 3-18）に土槽（図 3-20 及び図 3-21）を設置し、ボルトで固定する。
2	模擬廃棄物の設置 土槽内に模擬廃棄物を表 3-1 に示すように設置する。ただし、ブランク試験を行う場合で、土槽内全体の嵩密度を測定するときは、土槽内に模擬廃棄物はいれない。
3	砂の投入 図 3-23 に示す砂投入箱を用いて、所定の高さより砂を投入し、投入量を電子天秤で測定する。
4	加振条件の設定・加振・充填状況の目視確認 振動台の制御盤に加振条件を表 3-1 に示すように入力し、振動台を加振させる。加振中は、土槽のガラス面に貼り付けた半割した細管へ砂が充てんされる様子を目視で観察する。
5	加振時間に応じた土槽内全体の嵩密度の測定 振動台は、1 分毎に停止し、加振によって沈下した砂の沈下量を測定する。測定は、土槽上部から砂面までの距離を 9 箇所、定規で測定し平均する。この平均高さより、砂の容積を計算し、土槽内全体の砂の嵩密度及び相対密度を計算する。 これを、表 3-1 に示す加振時間の終了するまで行う。
6	加振終了後の模擬廃棄物内の砂の嵩密度の測定 加振後、土槽より砂を掘り出す。掘り出す過程で、土槽内に埋設した SGP 管及び模擬廃棄物（細管）の両端の口を塞ぎ砂がこぼれないようにしながら回収する。回収後、SGP 管及び模擬廃棄物（細管）内の砂の質量を測定する。

表 3-3 振動台の主な性能

加振力	±30kN	振動台寸法(水平)	0.8m×1.5m
最大振幅	±30mm	振動台寸法(上下)	1.0m×1.0m
最大速度	±50cm/s	定格油圧	21MN/m <sup>2</sup>
最大加速度	±3G	定格流量	44.4L/min
周波数範囲	～50Hz	電動機	18.5KW
加振方向	水平及び上下	電源	AC200V 50Hz

表 3-4 使用機器一覧表

計測機器	メーカー	型式	仕様	個数
レーザー変位計	キーエンス	IL-S100	70~130mm、±42μm	1
加速度計	共和電業	AS-5GB	±49.03m/s <sup>2</sup> (±5G)、 ±50gal	4
データロガー	東京測器	DRA107A	測定点数 10 点、 応答周波数 DC~2.5kHz	1
パソコン	パナソニック	レッツノート W5	—	1

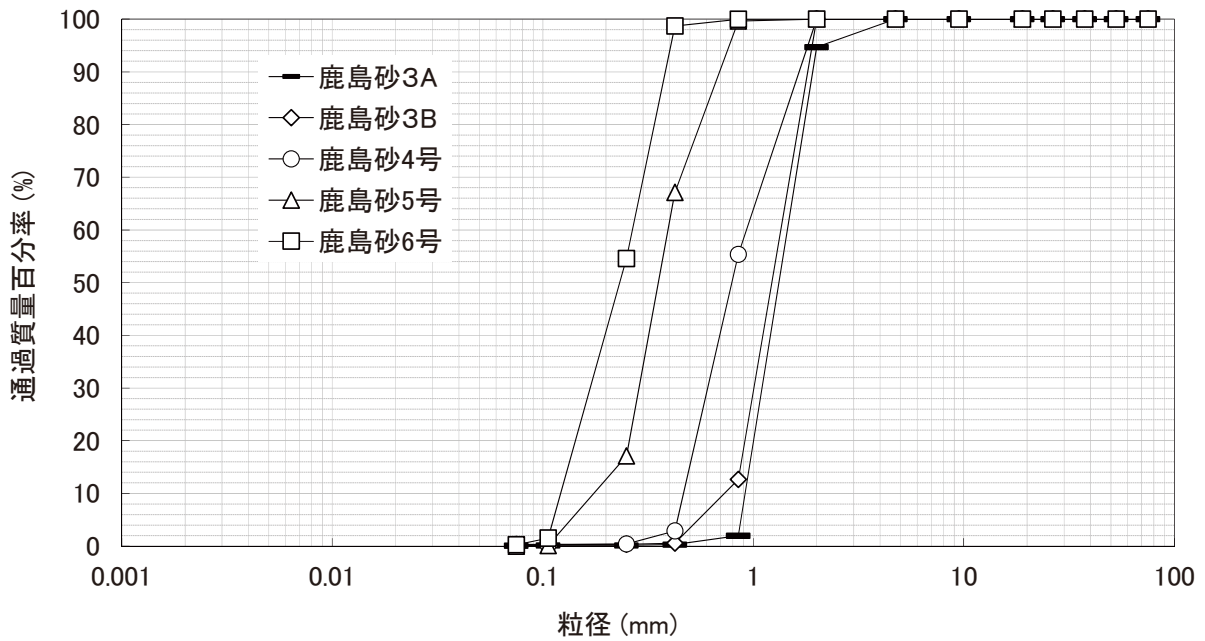


図 2-1 鹿島珪砂 (3A~6号) の粒径加積曲線



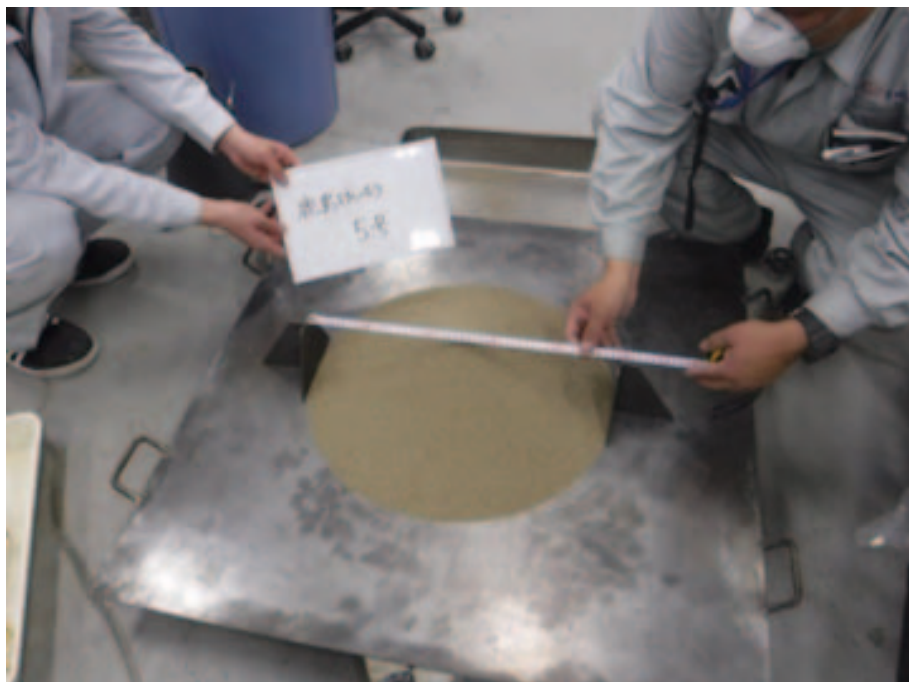


図 2-2 砂のスランプフロー試験状況の例

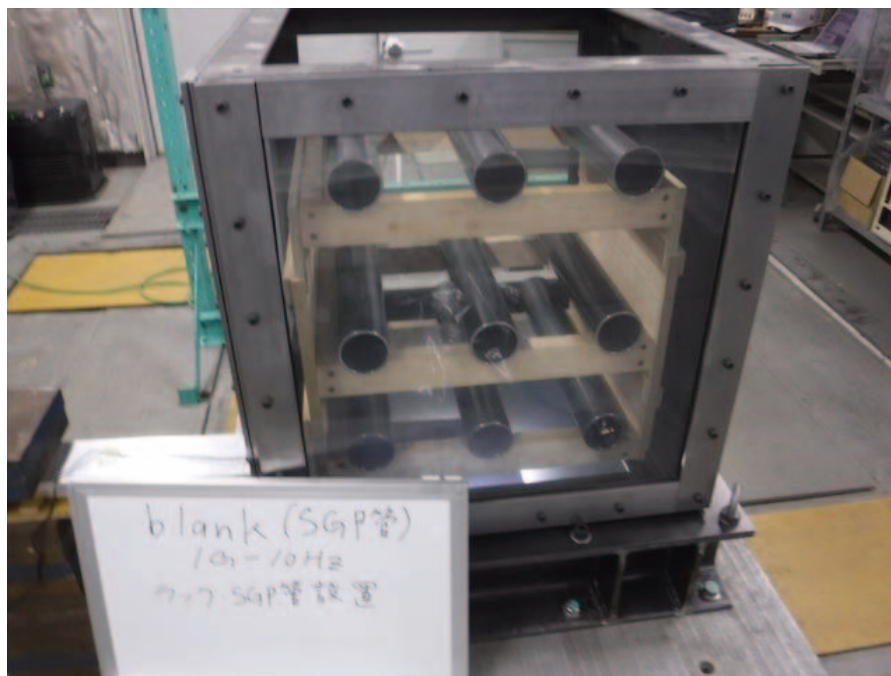


図 3-1 SGP 管ラック概要図

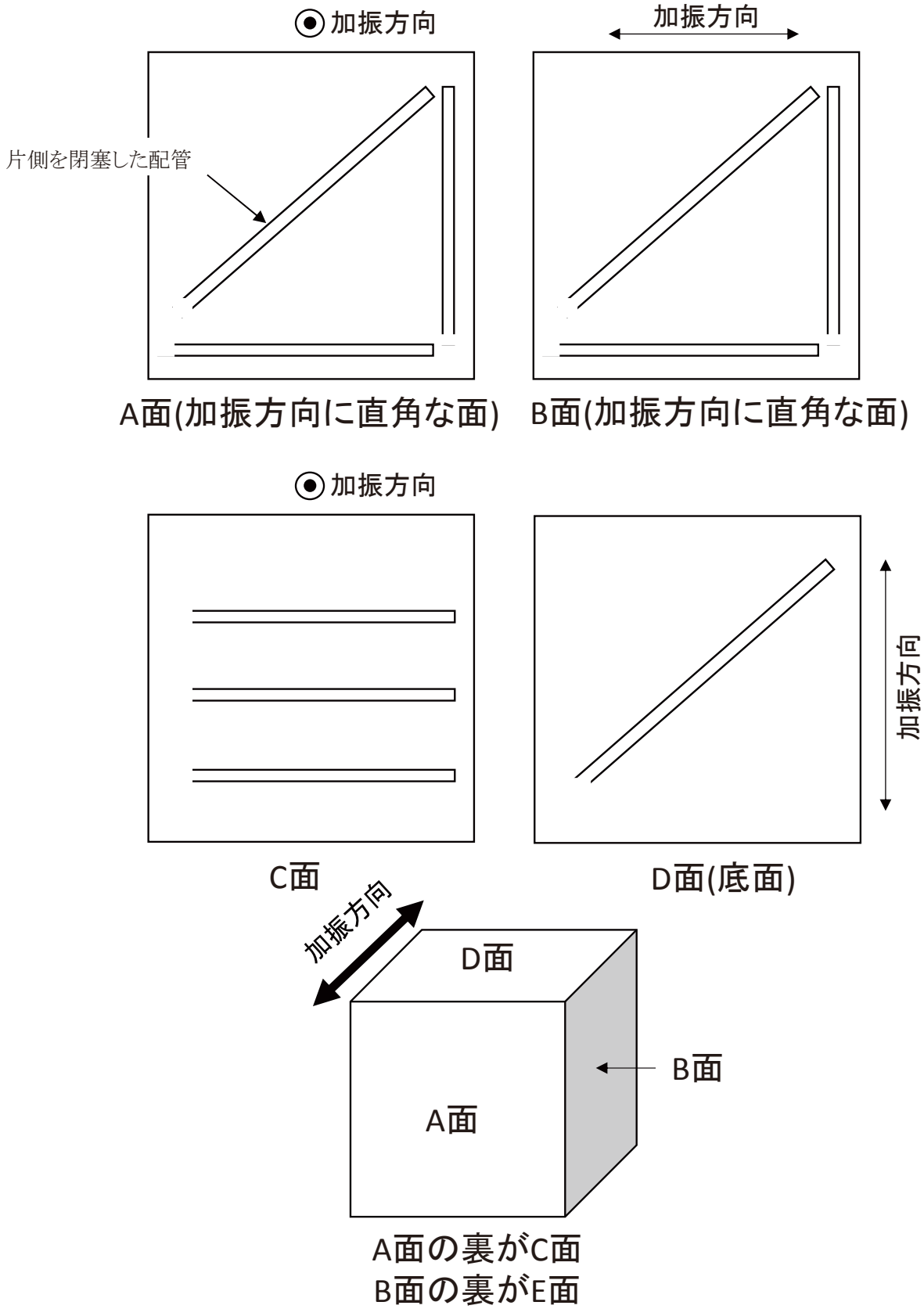


図 3-2 パターン A ケースの土槽ガラス面への細管設置概要図

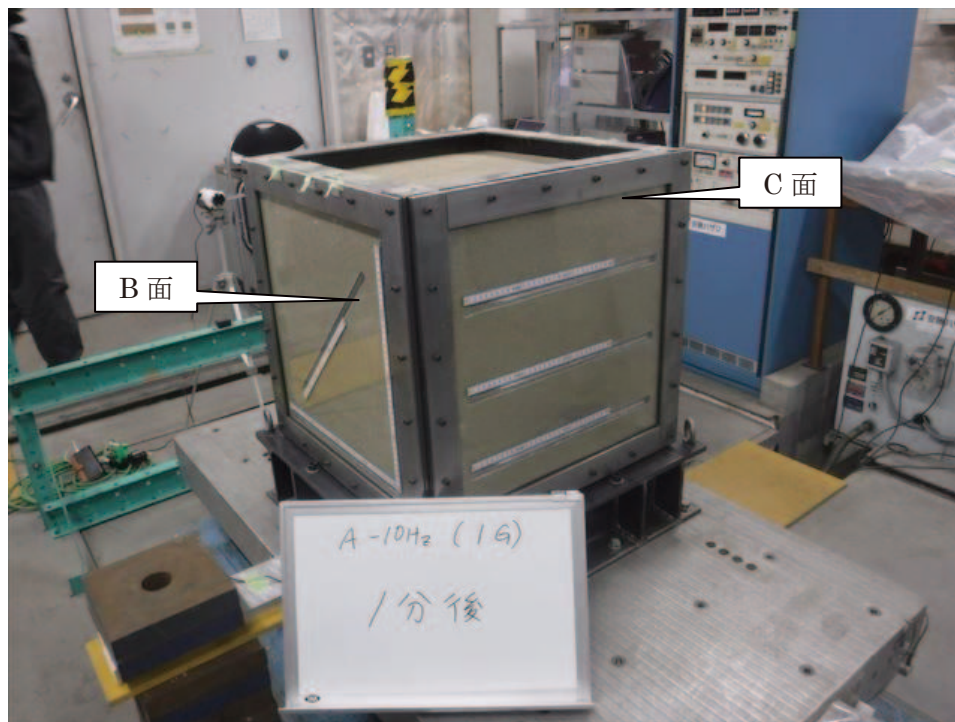
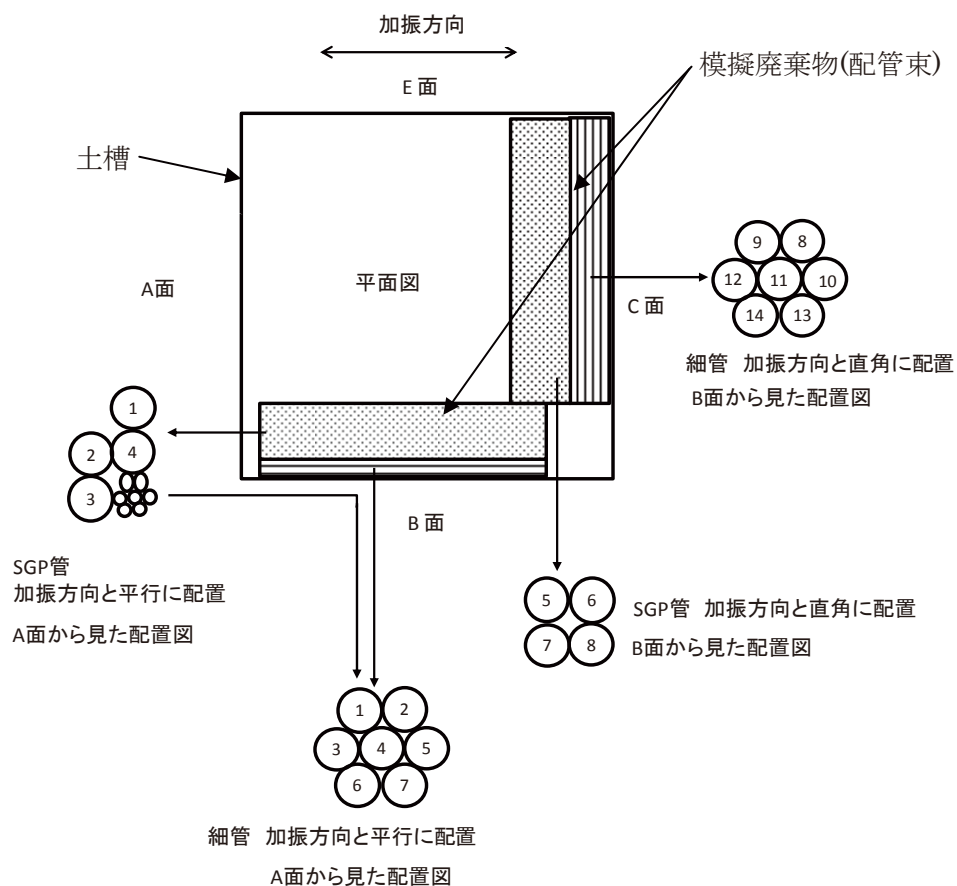


図 3-3 パターン A ケースの細管設置概要図



※上図中の丸印内の数字は、配管の識別番号を示す。SGP管は加振方向に平行に4本(1~4)、直角に4本(5~8)収納した。細管は、加振方向と平行に7本(1~7)、直角に7本(8~13)収納した。細管は両端を開口した場合と片側を閉塞させた場合の試験を実施。

図 3-4 配管束設置ケースの概要図

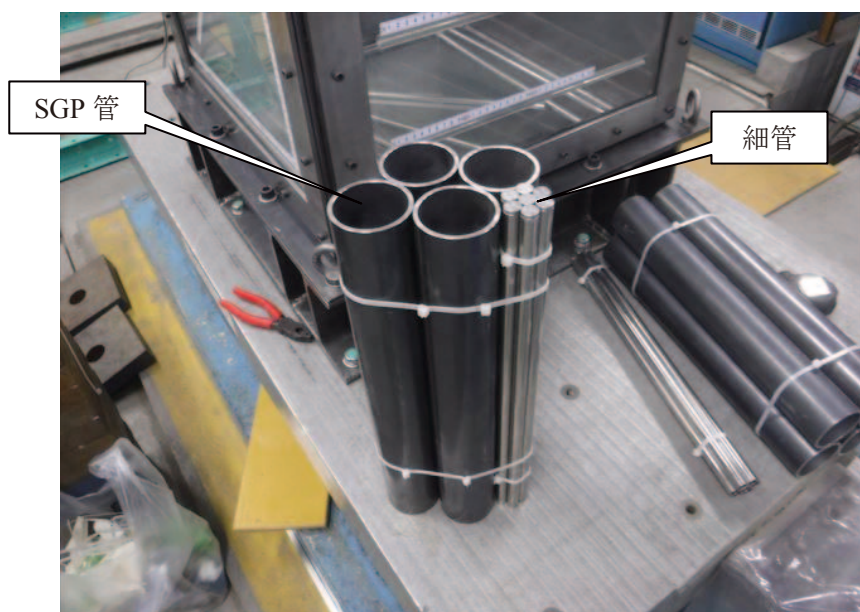


図 3-5 配管束

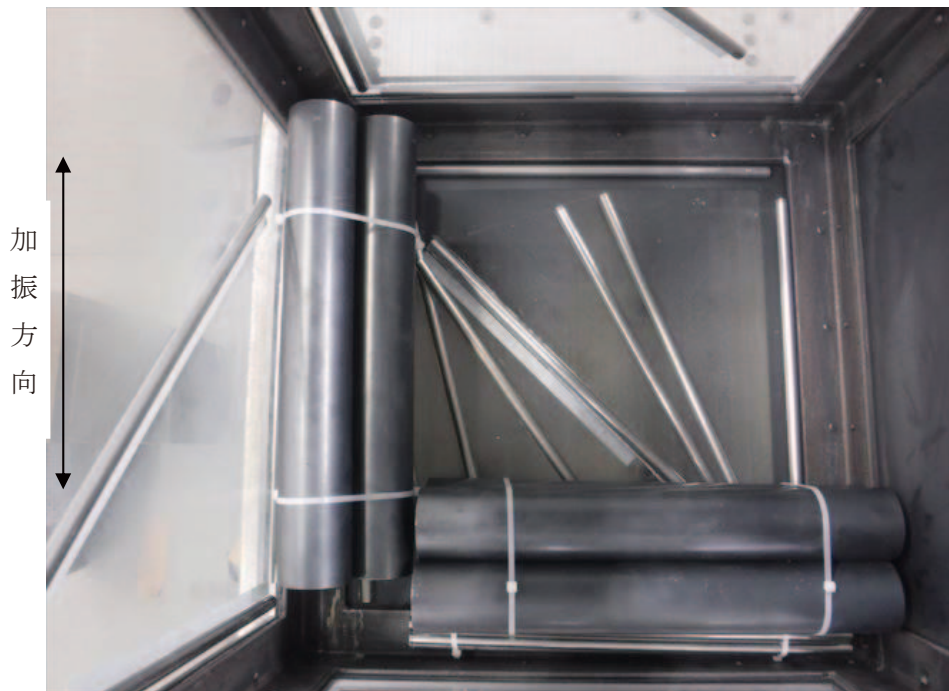


図 3-6 配管束設置ケースの配管設置状況（土槽を上から見た図）

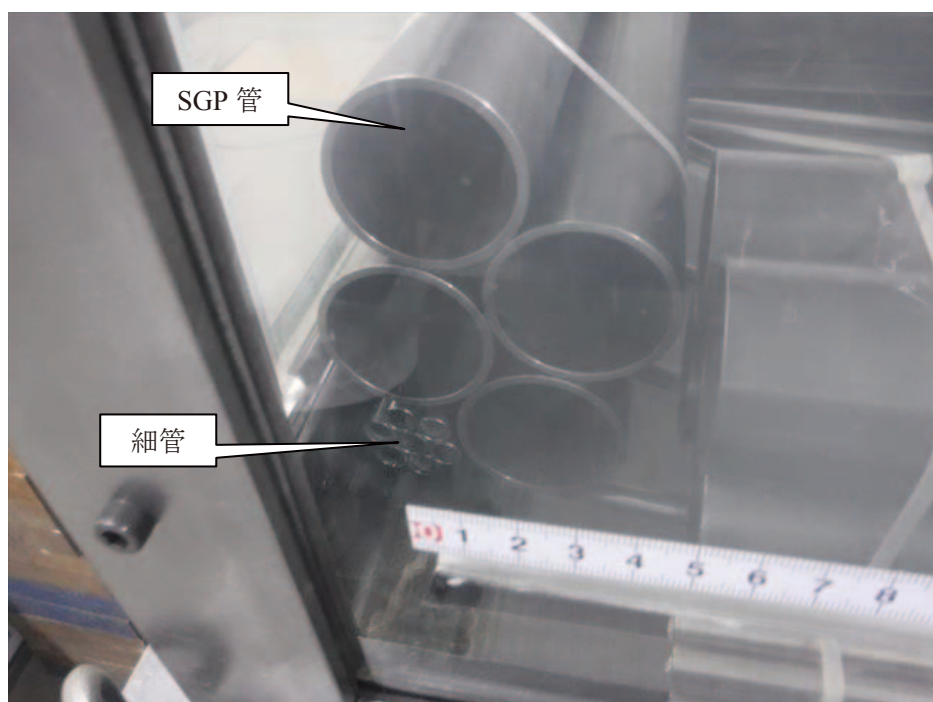
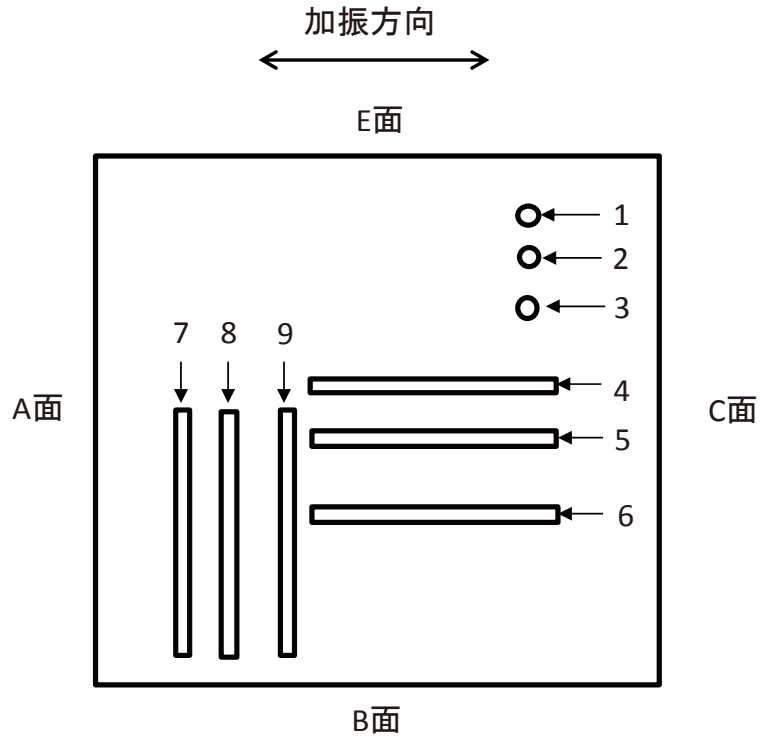


図 3-7 配管束設置ケースの SGP 管と細管の設置状況（管束を側面からみた図）



※上図中の数字は、細管の識別番号を示す。1～3の細管は、両端が開口しており、土槽内の砂中に垂直に設置。加振方向に平行に4～6の細管を仰角45°で設置。加振方向と直角には7～9の細管を仰角45°に設置。

図 3-8 細管宙吊りケースの細管設置位置の概要図

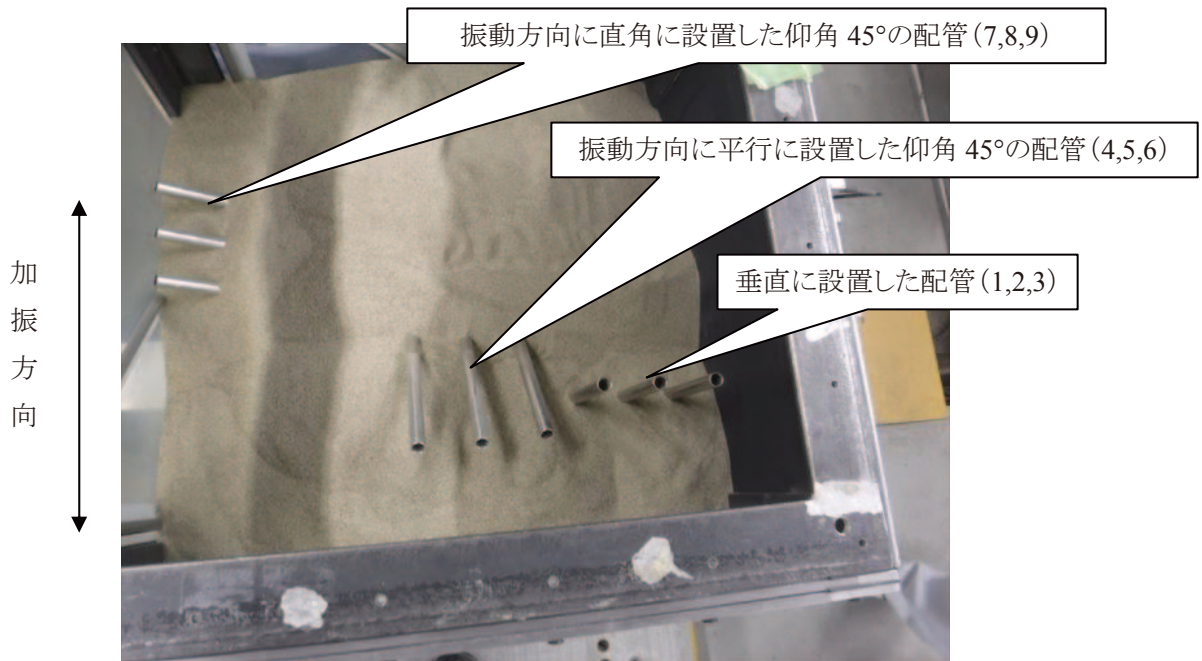
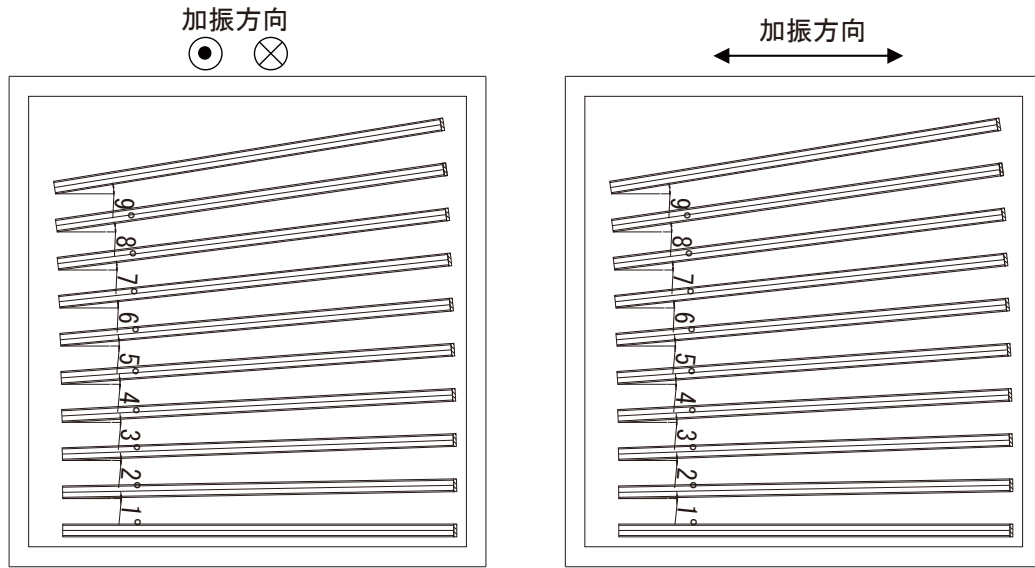
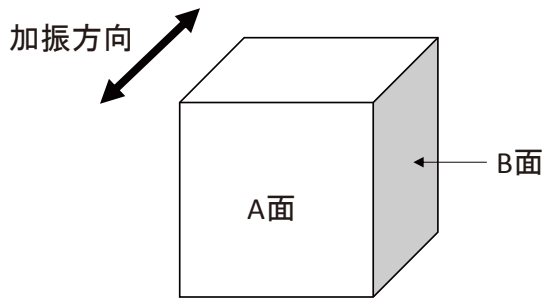


図 3-9 細管宙吊りケースの細管設置状況



A 面 (加振方向に直角な面)

B 面 (加振方向に平行な面)



※ 細管は片側を閉塞している。

図 3-10 設置角度影響ケース (パターン B) の土槽ガラス側面部細管 (半割り) 貼付け位置図

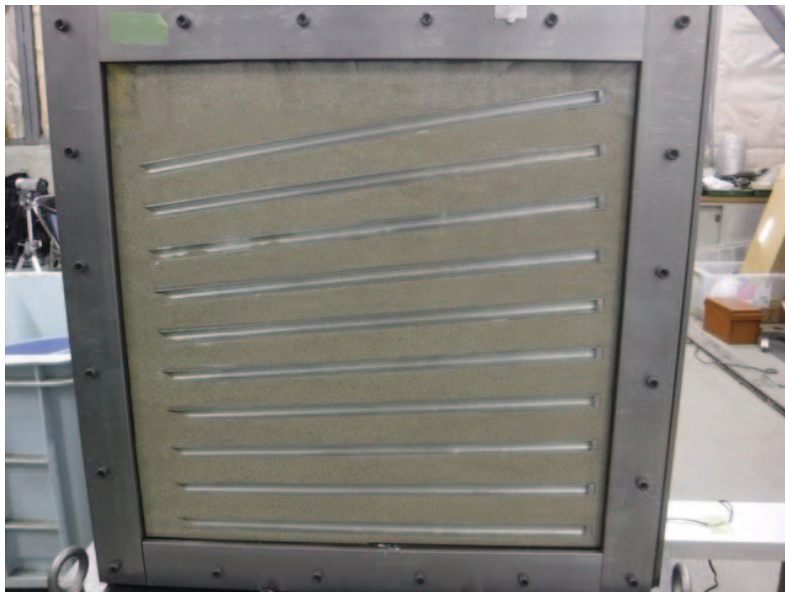
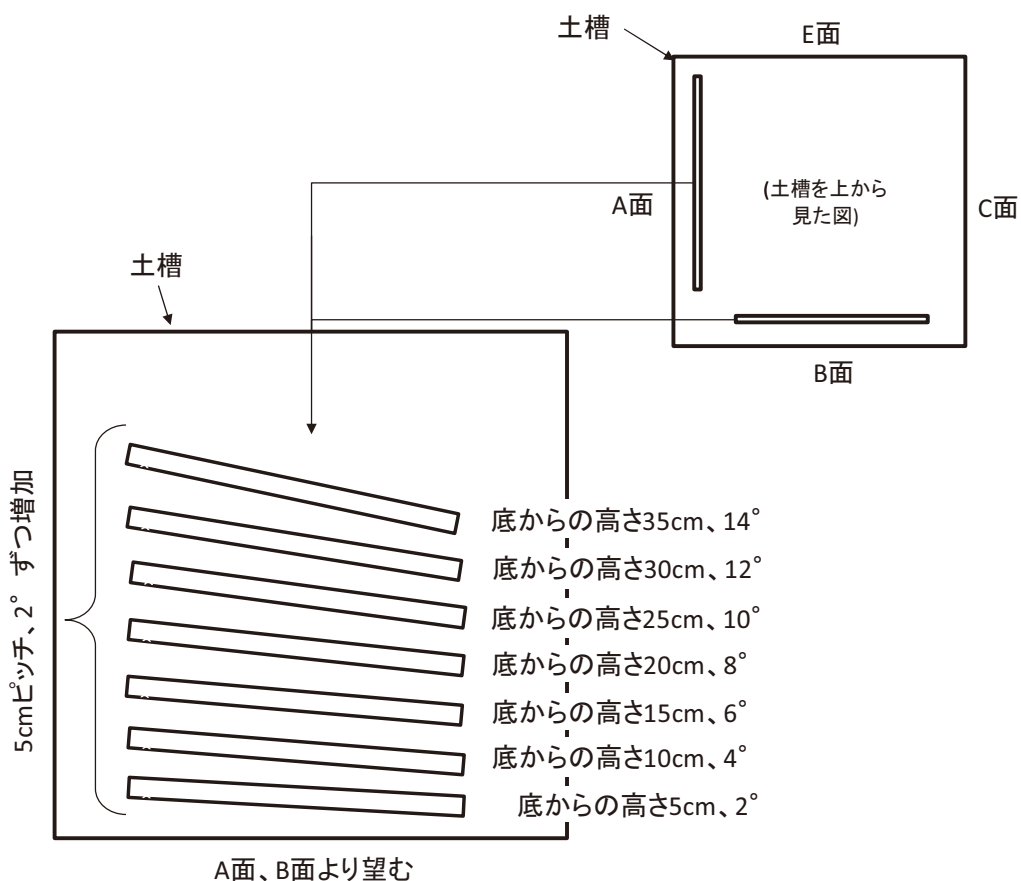
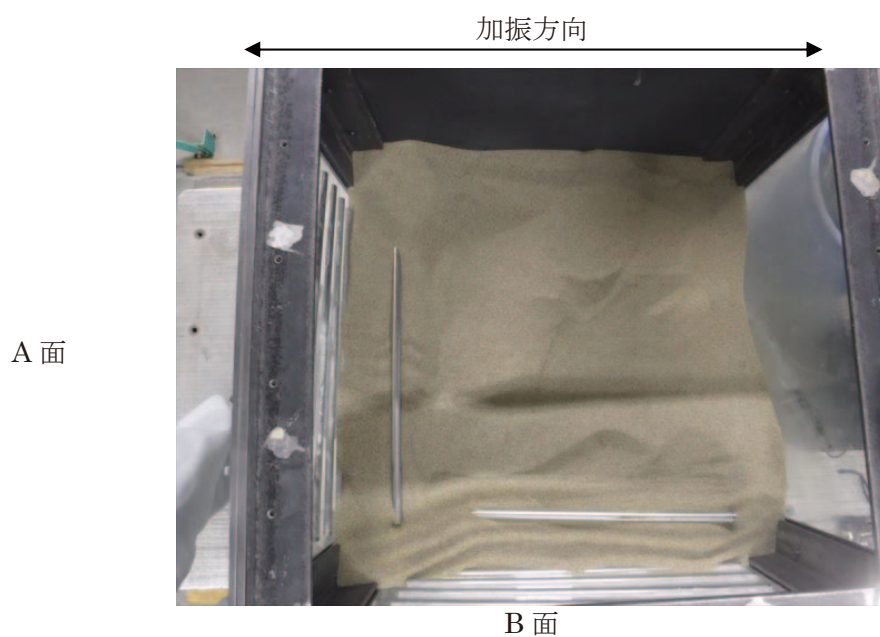


図 3-11 設置角度影響ケース (パターン B) の土槽ガラス側面部細管 (半割り) 貼付け状況



(細管の両端は開口したケースと片側を閉塞しているケースを実施。)

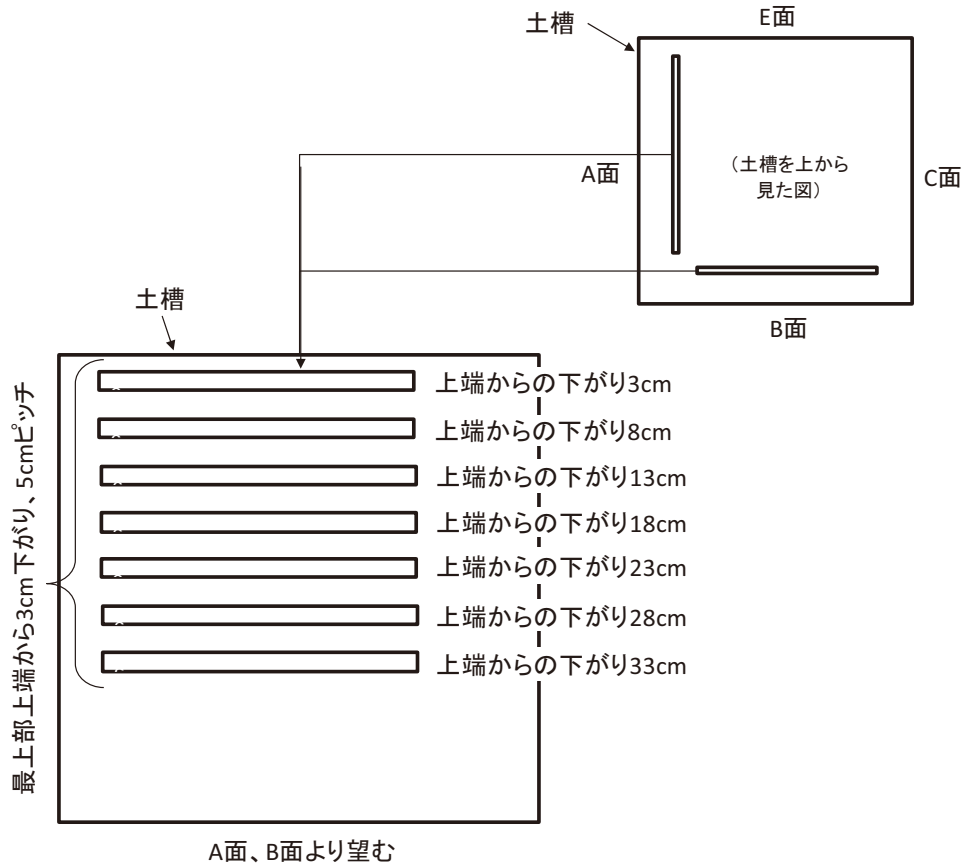
図 3-12 設置角度影響ケースの細管設置位置図 (設置角 A の場合)



※ 加振方向に直角と平行に細管を砂槽内に埋設。細管は、2°の角度で傾けて、深さ方向に5cm間隔で埋設した。細管は、両端を開口しているケースと片側を閉塞しているケースを実施した。

図 3-13 設置角度影響ケースの細管設置位置図 (設置角 A の場合)





※管の両端を開口している。

図 3-14 設置角度影響ケースの細管設置位置図 (設置角 B の場合)

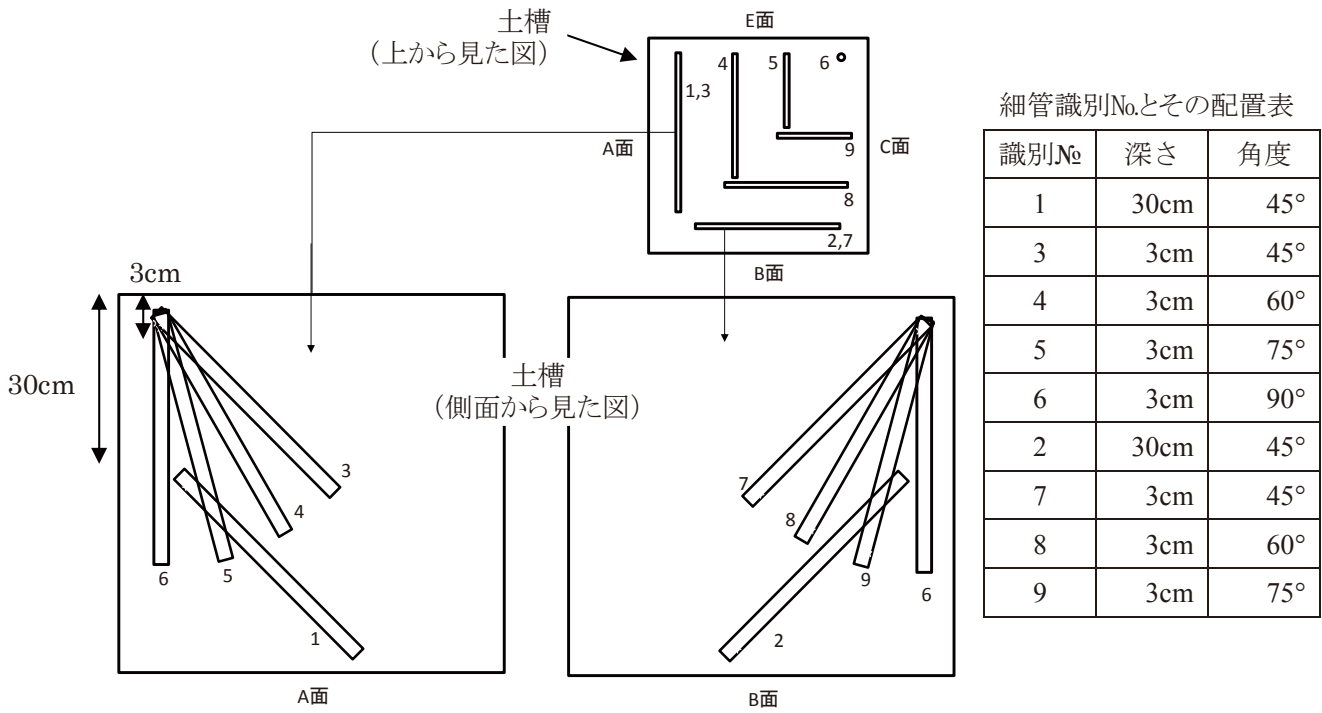


図 3-15 設置角度影響ケースの細管設置位置図 (設置角 C の場合)

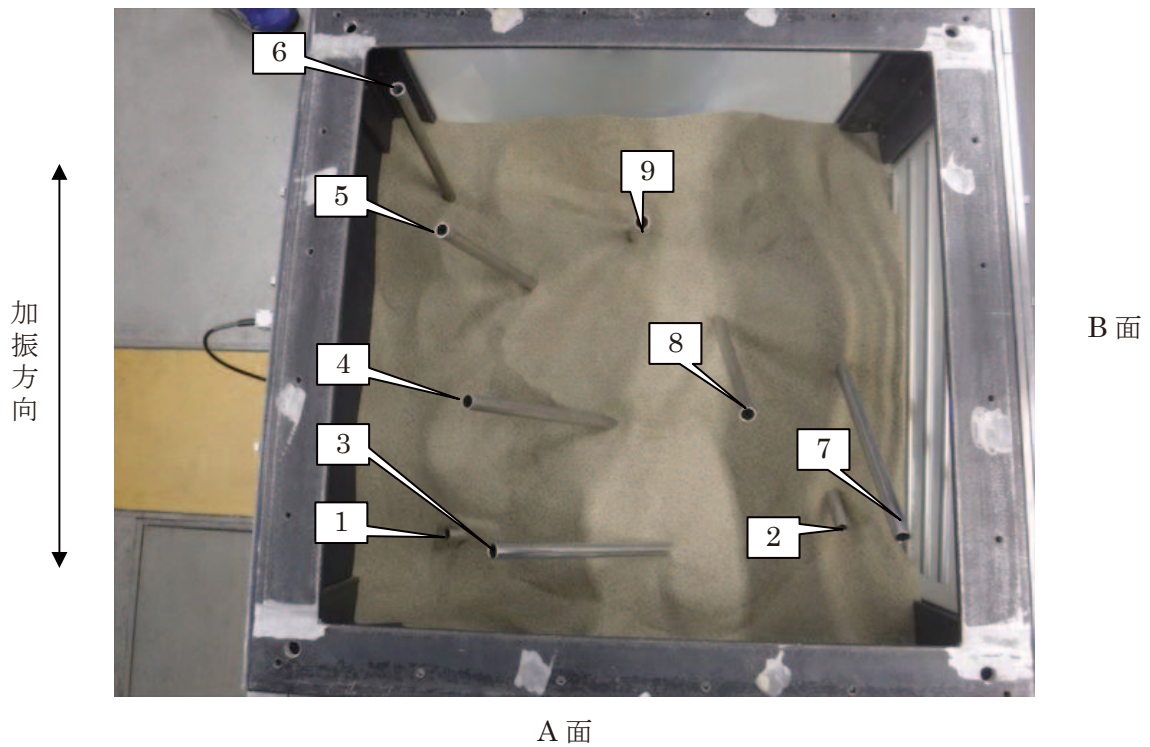


図 3-16 設置角度影響ケースの細管設置状況

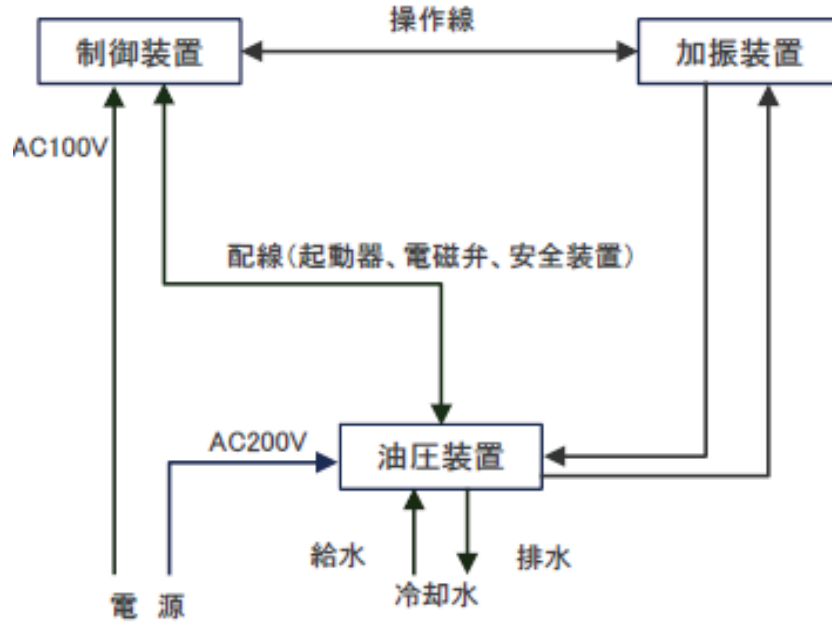
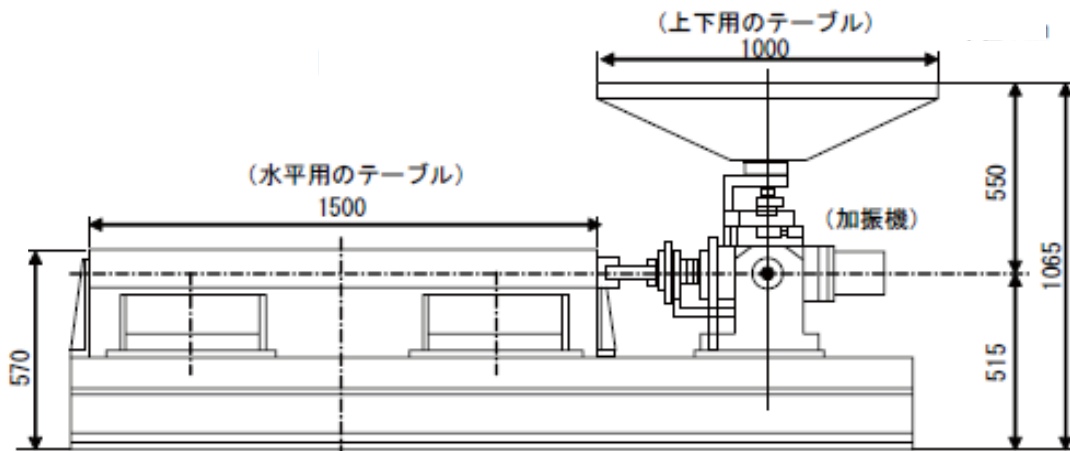


図 3-17 振動台の構成



(本試験では、水平用のテーブルを使用した。) 単位:mm

図 3-18 振動台の概要図

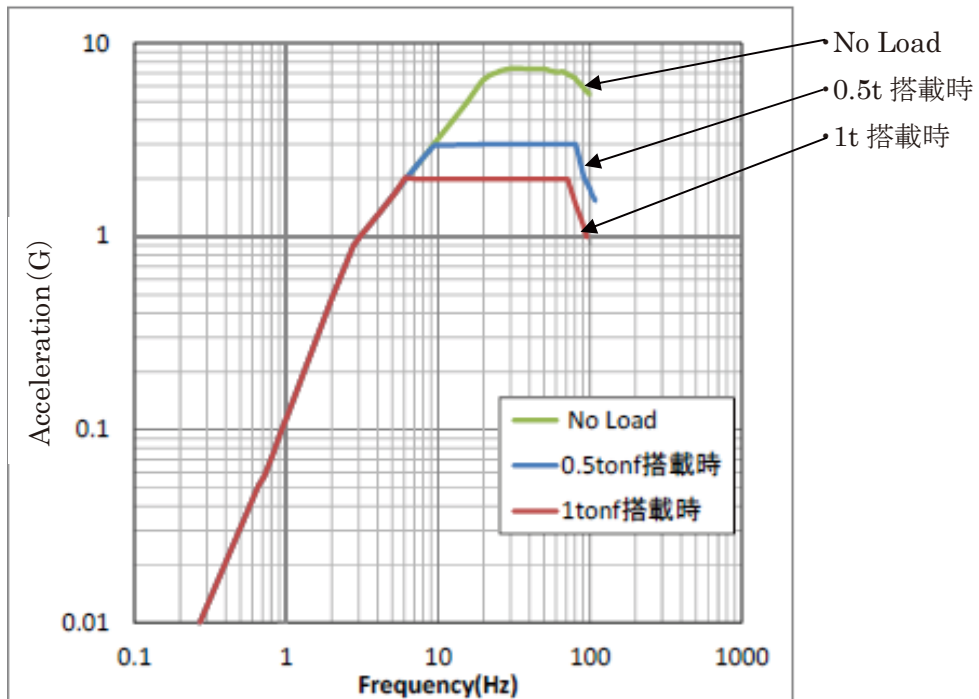


図 3-19 最大能力線図 (水平加振の場合)



図 3-20 振動台と土槽概要

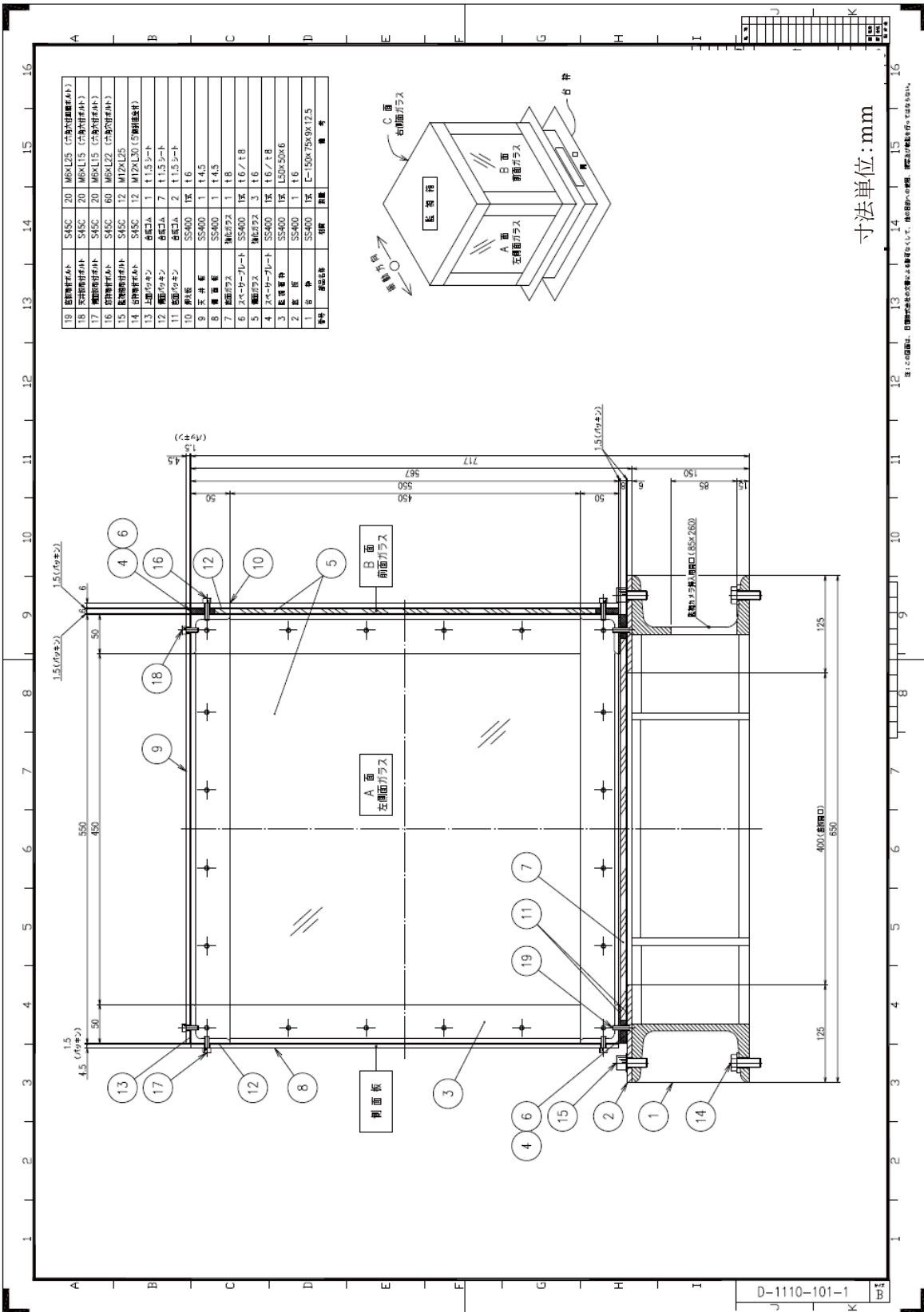


図 3-21 土槽詳細図

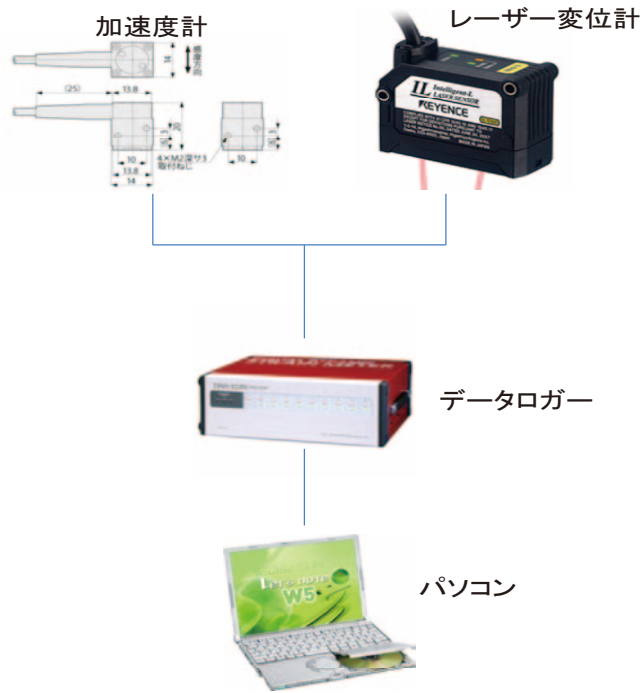


図 3-22 計測システム概要図

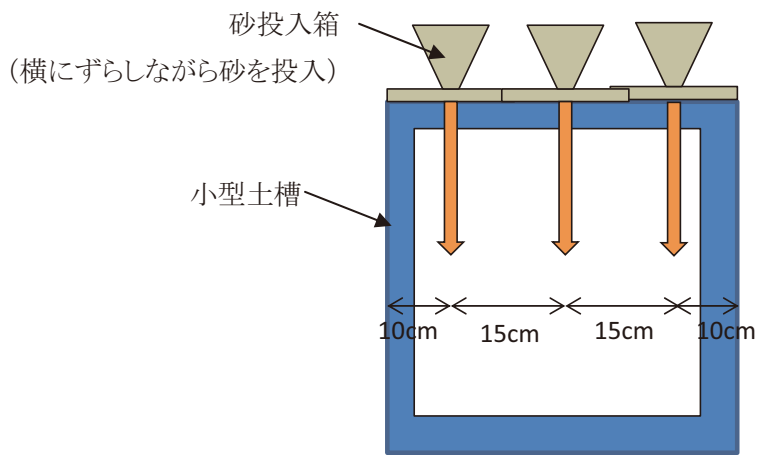


図 3-23 土槽へ砂を投入する投入箱と投入状況

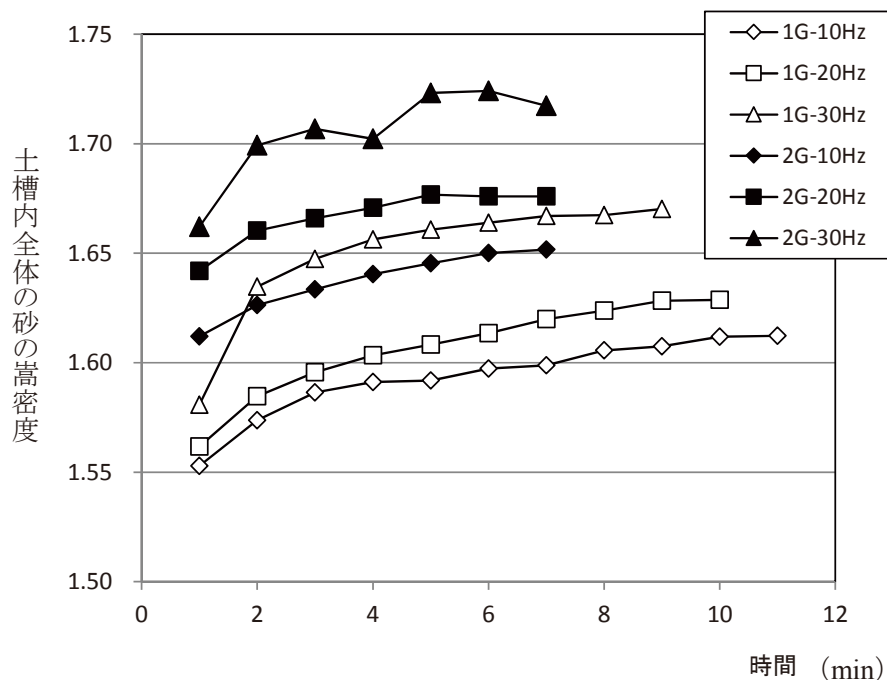


図 4-1 加速度と振動数に応じた土槽内の全体の砂の嵩密度と加振時間

SGP 管内に充填された砂の嵩密度(g/cm <sup>3</sup> )							
加振条件	1G-10Hz	1G-20Hz	1G-30Hz	2G-10Hz	2G-20Hz	2G-30Hz	
配管位置	1	1.67	1.69	1.68	1.64	1.65	1.67
	2	1.67	1.68	1.69	1.64	1.66	1.67
	3	1.65	1.69	1.68	1.64	1.65	1.67
	4	1.66	1.68	1.69	1.64	1.63	1.65
	5	1.67	1.68	1.69	1.64	1.65	1.66
	6	1.67	1.68	1.68	1.64	1.66	1.64
	7	1.66	1.68	1.67	1.63	1.66	1.64
	8	1.65	1.66	1.67	1.64	1.66	1.67
	9	1.66	1.67	1.64	1.64	1.66	1.68
平均値	1.66	1.68	1.68	1.64	1.65	1.66	
標準偏差	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	

配管位置図

※SGP 管は両端を開口し、加振方向に平行に設置

図 4-2 土槽内の砂の密度分布の確認結果

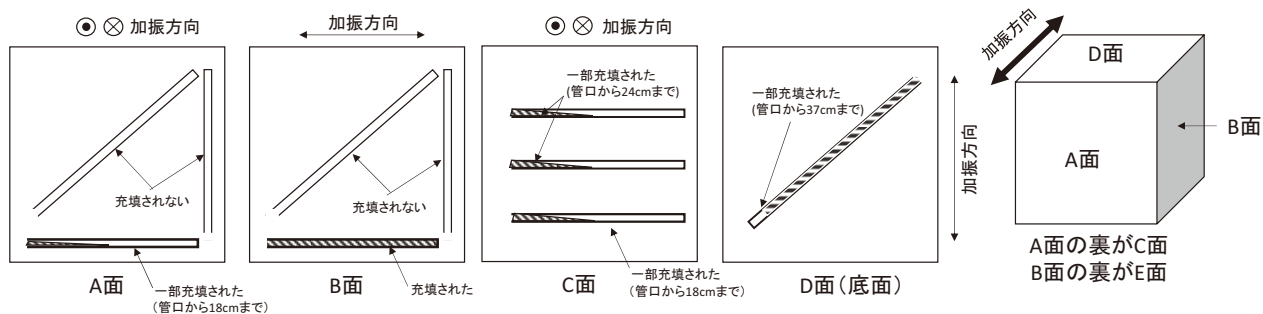


図 4-3 ガラス面に設置した細管内への充填状況 (パターン A : 1G-10Hz-10 分加振)

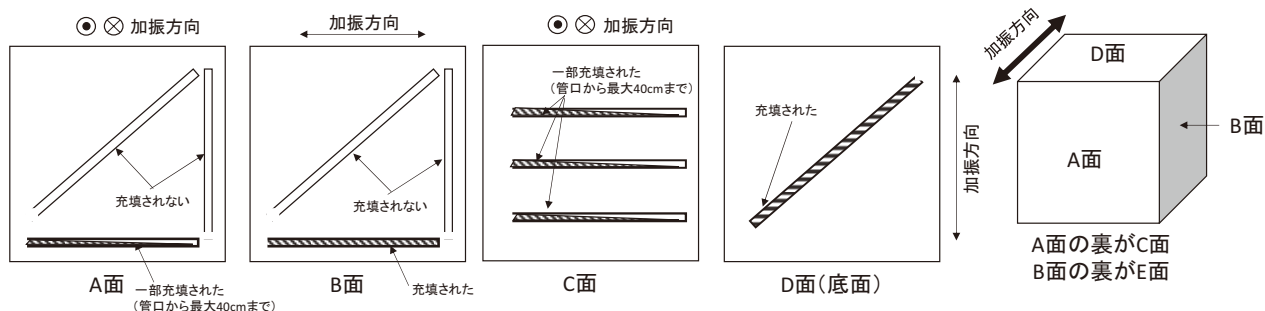


図 4-4 ガラス面に設置した細管内への充填状況 (パターン A : 2G-10Hz-10 分加振)

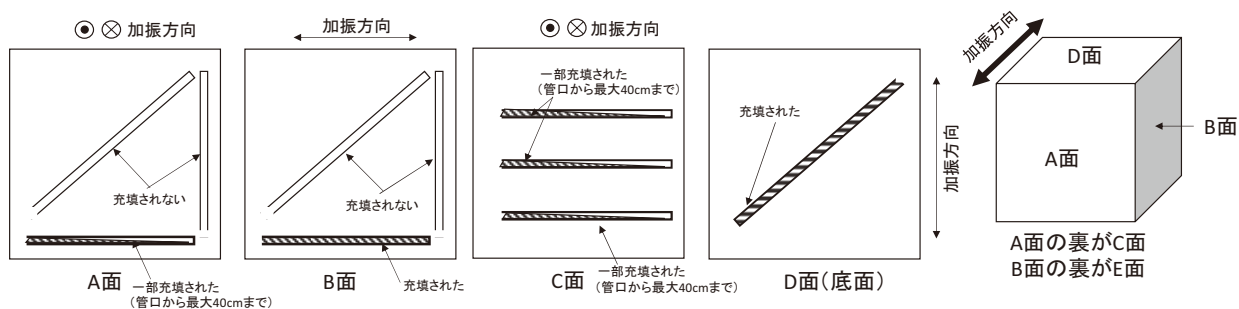


図 4-5 ガラス面に設置した細管内への充填状況 (パターン A : 2G-20Hz-10 分加振)

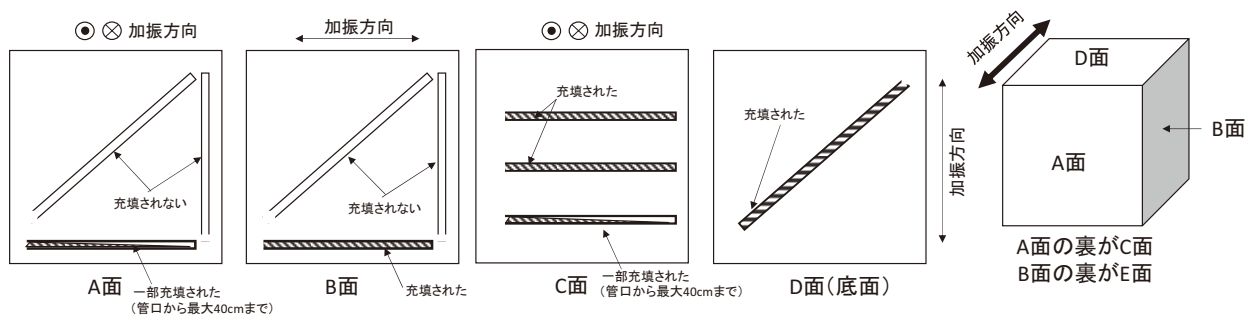


図 4-6 ガラス面に設置した細管内への充填状況 (パターン A : 2G-30Hz-10 分加振)



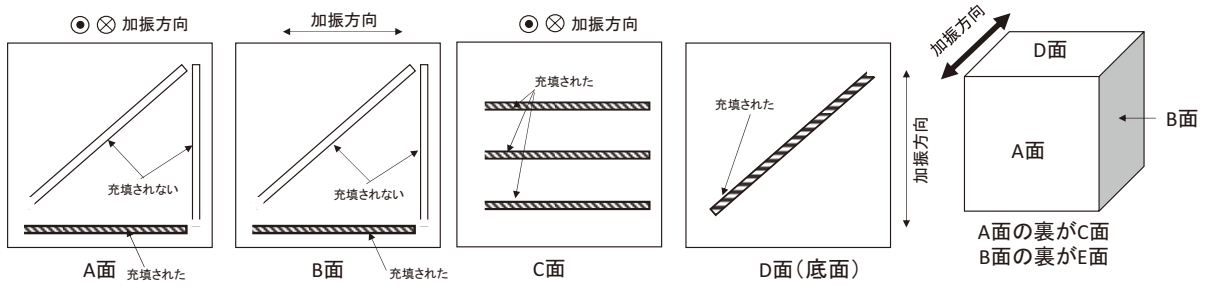


図 4-7 ガラス面に設置した細管内への充填状況 (パターン A : 2G-30Hz-60 分加振)



図 4-8 ガラス面に設置した細管 (パターン A : 2G-30Hz-空気抜き 10 分加振)

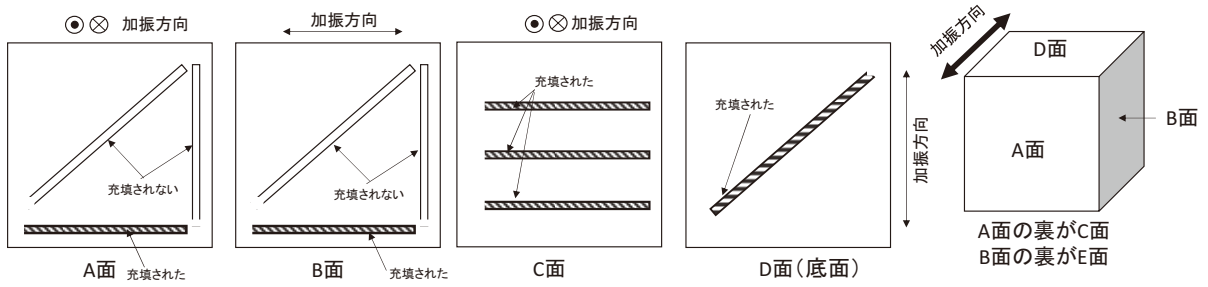


図 4-9 ガラス面に設置した細管内への充填状況  
(パターン A : 2G-30Hz-空気抜き-10 分加振)

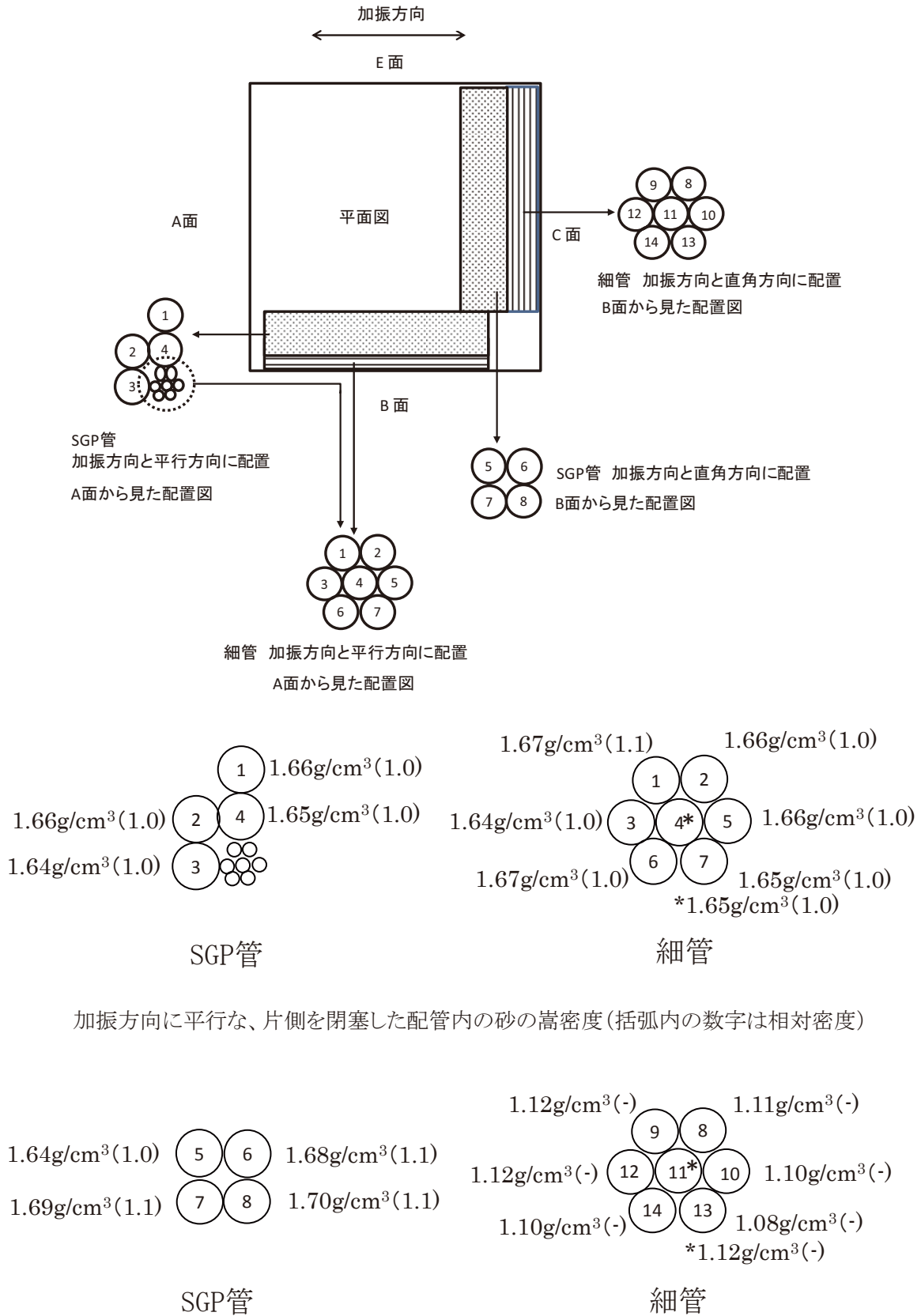


図 4-10 配管内の嵩密度 (配管束設置ケース 2G-30Hz-片側閉塞-10分加振)

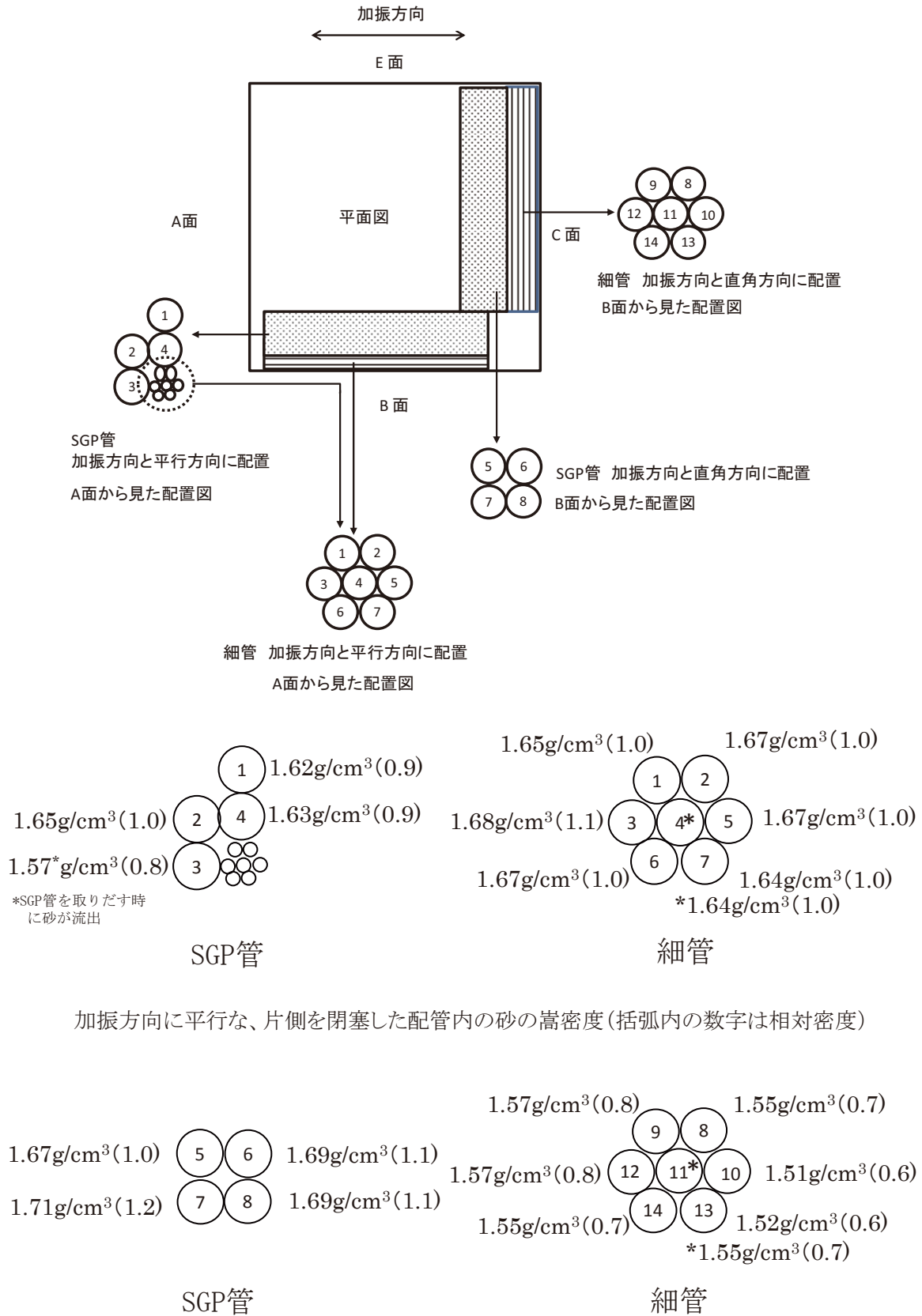


図 4-11 配管内の嵩密度 (配管束設置ケース 2G-30Hz-片側閉塞-30分加振)

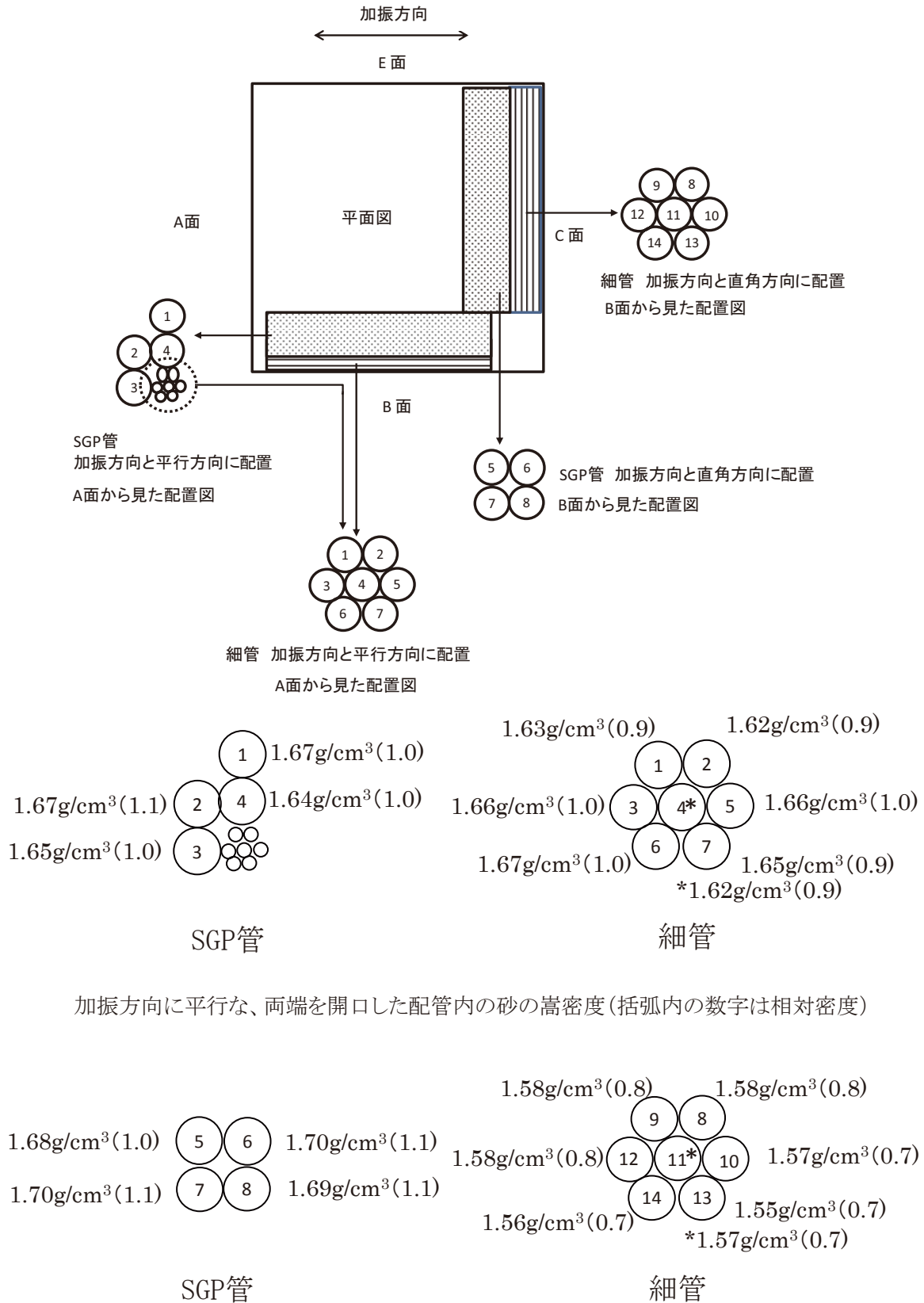


図 4-12 配管内の嵩密度 (配管束設置ケース 2G-30Hz-両端開口-10分加振)

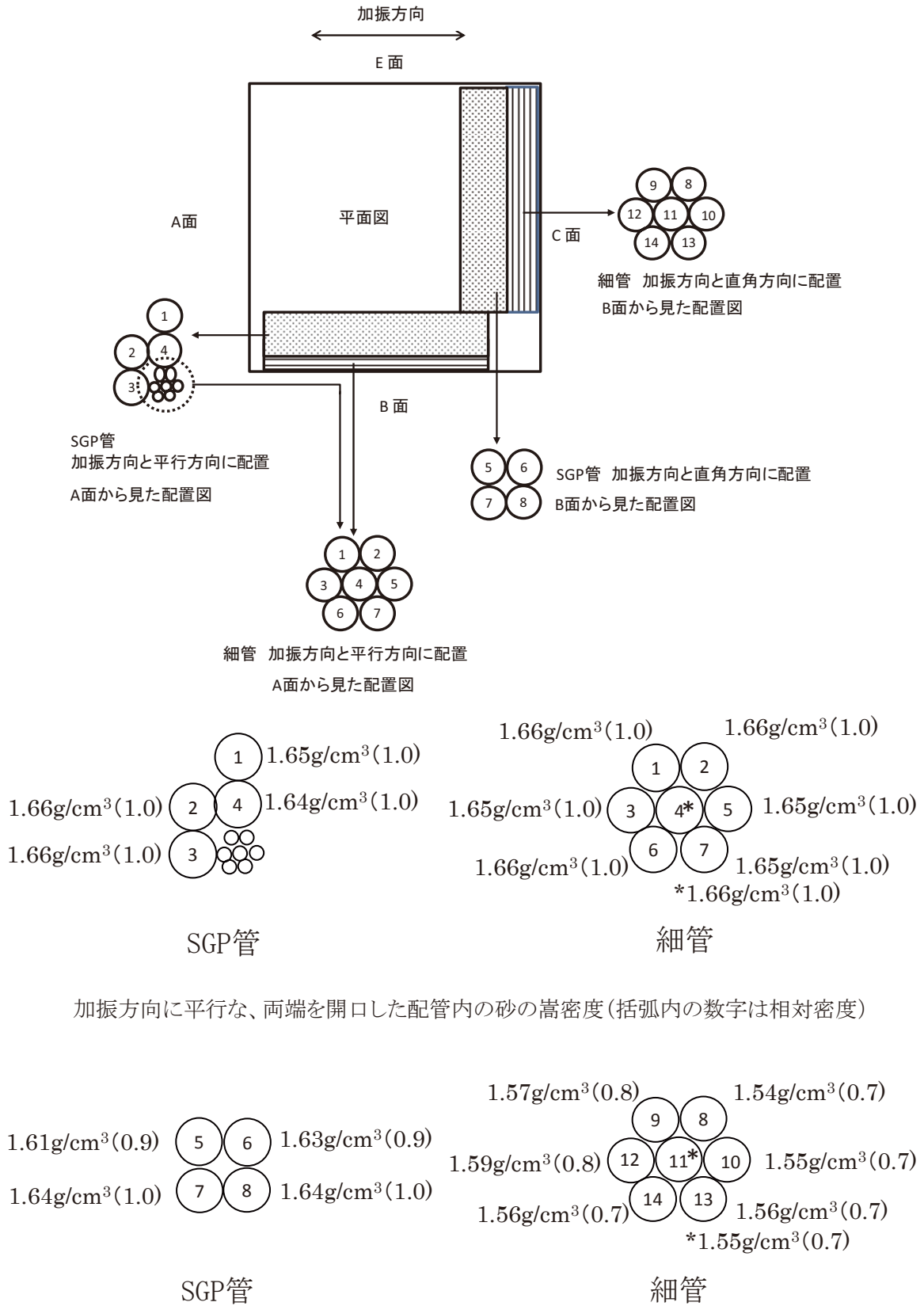


図 4-13 配管内の嵩密度 (配管束設置ケース 1G-10Hz-両端開口-30分加振)

両端を開口した細管内の加振後の砂の嵩密度						
配管 №	管の種類	土槽内位置 (図 3-8)	加振条件	管内の砂の質量 (g)	管内の砂の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
1	管径：10.22mm 管長：40cm 両端を開口	土槽内の砂中に垂直に設置	2G, 30Hz, 30分加振	-	-	以下に示すように加振開始から5分後には、砂から浮上した。
2				-	-	
3				-	-	
4		加振方向に平行に細管を仰角45°で設置		-	-	
5				-	-	
6				-	-	
7		加振方向に直角に細管を仰角45°で設置		51.7	1.58	表 2-3 に示す最大密度 1.652g/cm <sup>3</sup> まで充填されない。相対密度はそれぞれ、0.8,0.7,0.7である。
8				51.0	1.55	
9				51.0	1.55	

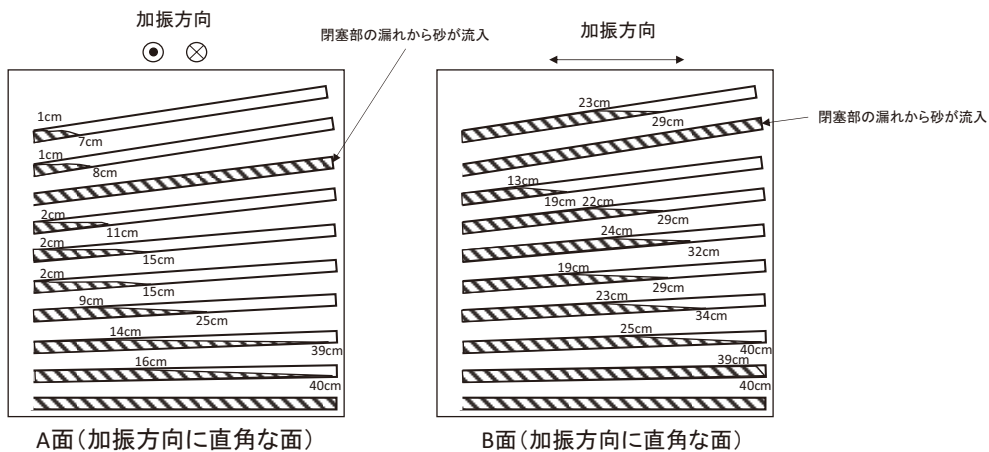
5 分後

10 分後

20 分後

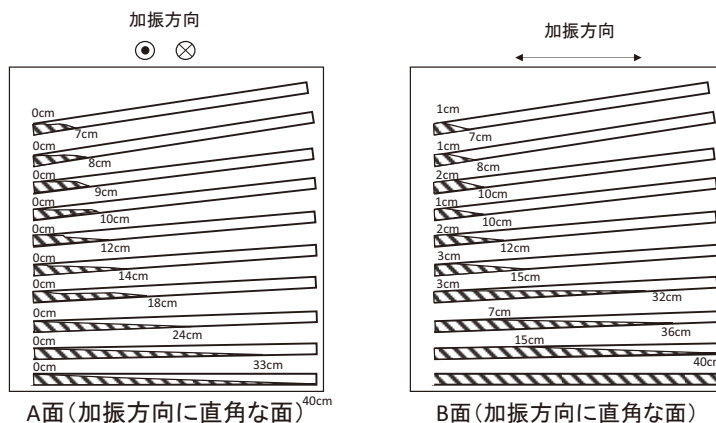
30 分後

図 4-14 細管内の砂の嵩密度（細管宙吊りケース 2G-30Hz-両端開口-30分加振）と浮上状況



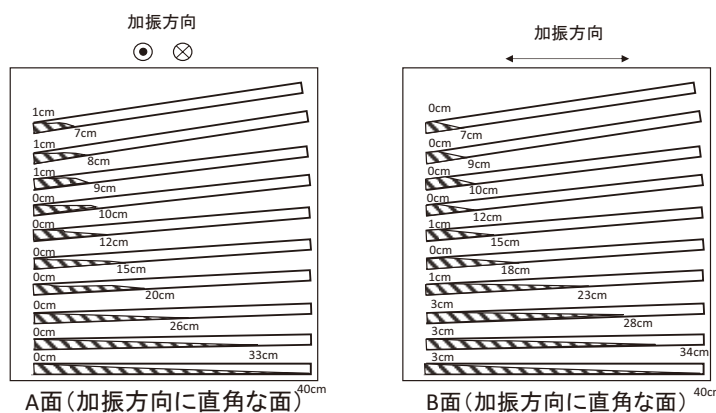
※数字は、細管内に砂が進入した長さを表す。

図 4-15 ガラス面に設置した細管内の充填状況  
(設置角度影響ケース (パターン B) 2G-30Hz-30 分加振)



※数字は、細管内に砂が進入した長さを表す。

図 4-16 ガラス面に設置した細管内の充填状況  
(設置角度影響ケース (パターン B) 1G-10Hz-30 分加振)



※数字は、細管内に砂が進入した長さを表す。

図 4-17 ガラス面に設置した細管内の充填状況  
(設置角度影響ケース (パターン B) 1G-30Hz-30 分加振)

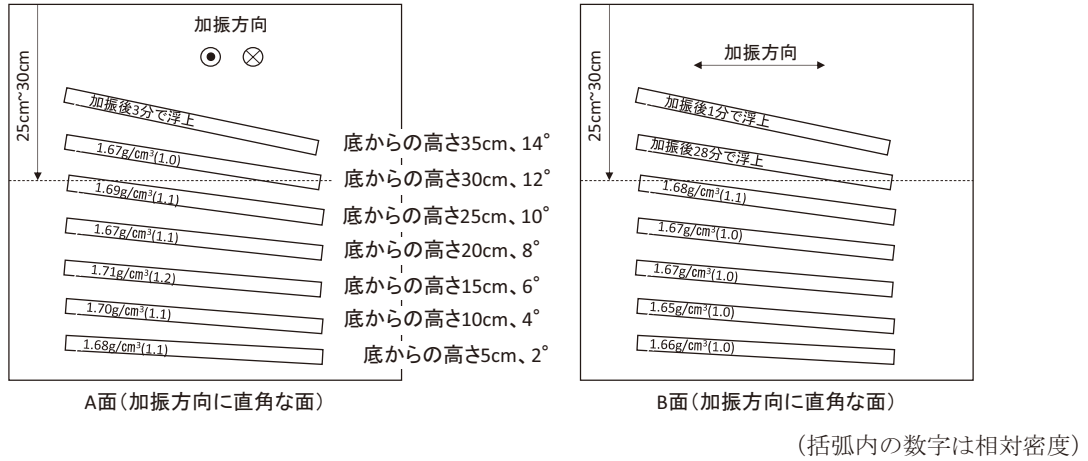


図 4-18 砂中に埋設した細管内の嵩密度 (設置角度影響ケース (設置角 A)  
2G-30Hz-両端開口-30分加振)

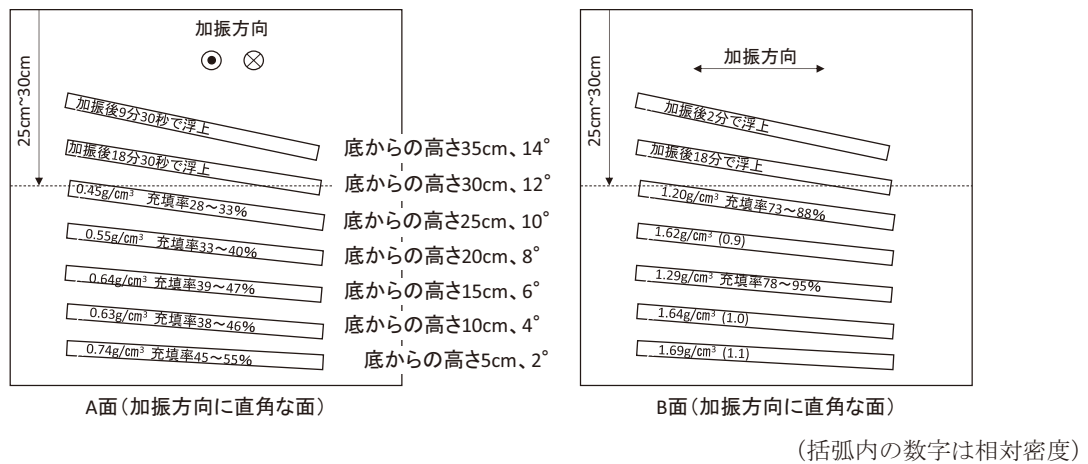


図 4-19 砂中に埋設した細管内の嵩密度 (設置角度影響ケース (設置角 A)  
2G-30Hz-片側閉塞-30分加振)

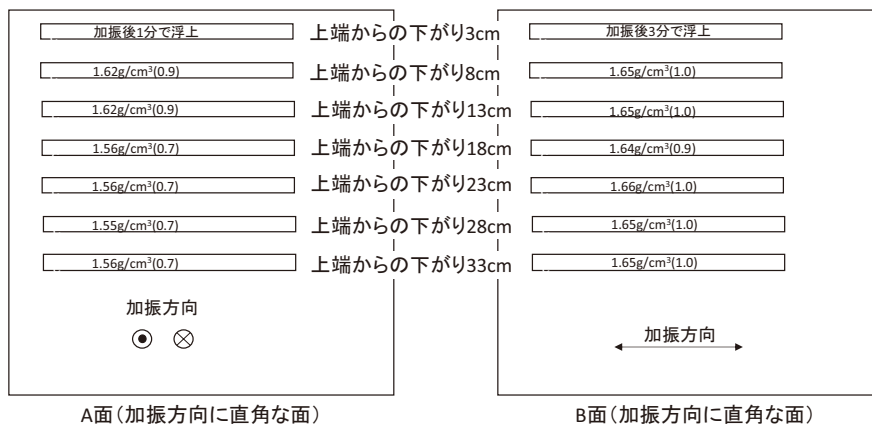
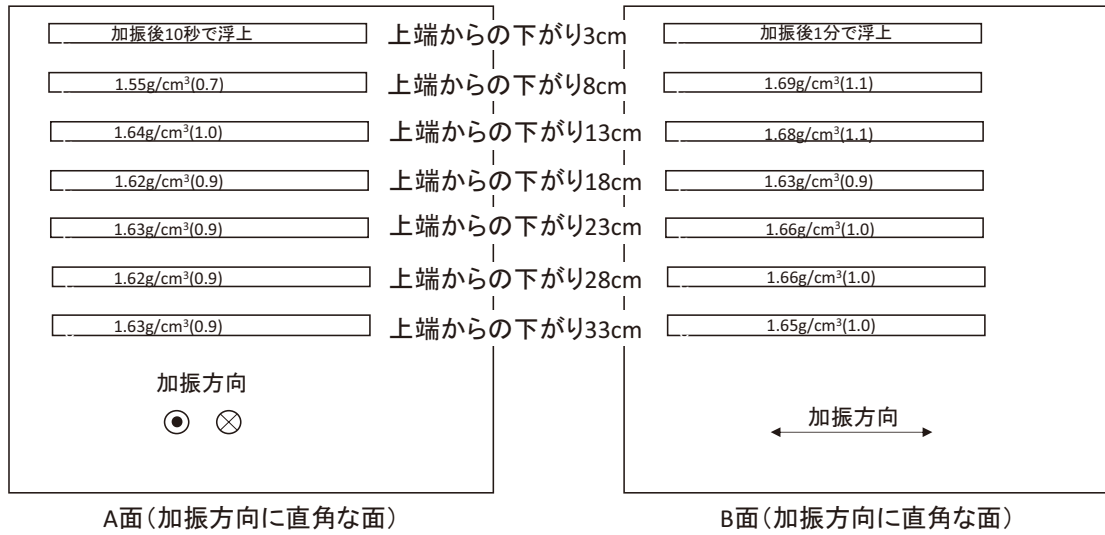


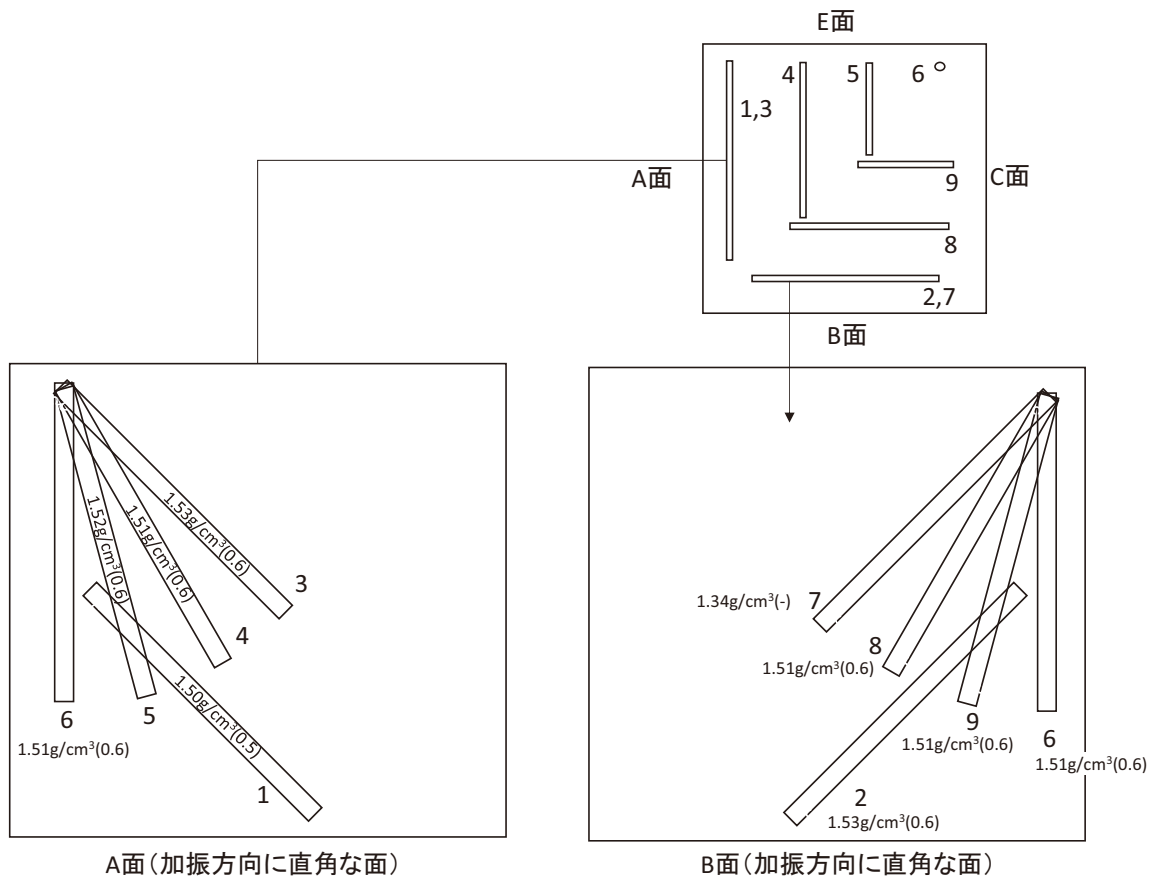
図 4-20 砂中に埋設した細管内の嵩密度 (設置角度影響ケース (設置角 B))  
1G-10Hz-両端開口-水平設置-30分加振)





(括弧内の数字は相対密度)

図 4-21 砂中に埋設した細管内の嵩密度  
(設置角度影響ケース (設置角 B) 1G-30Hz-両端開口-水平設置-30 分加振)



(括弧内の数字は相対密度)

図 4-22 砂中に埋設した細管内の嵩密度  
(設置角度影響ケース (設置角 C) 1G-30Hz-両端開口-30 分加振)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光路長	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

