

**コンクリート製下水管腐食の現状と
耐硫酸性向上のためのフッ化物混合
セメント硬化体に関する研究**

保 坂 成 司

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 下水道とは	5
1.3 日本における下水道	6
1.4 下水道管における問題点	8
1.5 下水道の維持管理	9
1.6 研究の目的	12
1.7 本論文の構成	13
参考文献	15
第 2 章 既設コンクリート製下水道管における腐食の現状	16
2.1 はじめに	17
2.2 既設下水道管の腐食調査	19
2.3 腐食調査結果	23
2.4 腐食調査データの解析	28
2.4.1 腐食調査データの基本統計量および解析方法	28
2.4.2 判別分析法による腐食判定	30
2.4.2.1 線型判別関数による判別	34
2.4.2.2 マハラノビスの汎距離による判別	40
2.5 考察	45
2.6 結論	47
参考文献	49
第 3 章 下水道施設におけるコンクリートの微生物腐食と その対策技術	50
3.1 はじめに	51
3.2 コンクリートの微生物腐食のメカニズム	52
3.3 コンクリートと硫酸の反応	55

3.4	コンクリートの微生物腐食に対する対策技術	57
3.5	まとめ	61
	参考文献	62

第4章 フッ化物混合セメント硬化体の耐硫酸性に関する検討

		63
4.1	はじめに	64
4.2	カルシウム系化合物による耐硫酸性の向上	66
4.3	実験方法	68
4.3.1	実験概要	68
4.3.2	供試体	70
4.3.3	硫酸水溶液による暴露実験条件	72
4.3.4	測定項目および測定方法	74
4.4	予備実験	80
4.5	結果および考察	81
4.5.1	硫酸水溶液の密度測定	81
4.5.2	質量測定	82
4.5.3	形状測定	84
4.5.4	硫酸水溶液の密度と供試体質量	86
4.5.5	質量減少量と厚さ減少量	87
4.5.6	圧縮強度試験	88
4.5.7	中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）	90
4.5.7.1	総面積	92
4.5.7.2	二水石膏部	93
4.5.7.3	健全部	94
4.5.7.4	中性化部	95
4.5.8	単位体積質量	97
4.5.9	硫酸浸透体積	101
4.5.10	粉末X線回折測定（XRD）	105
4.5.11	示差熱-熱重量分析（TG-DTA）	108

4.5.11.1	カルシウム系化合物の試薬のTG-DTA	108
4.5.11.2	各供試体の健全部のTG-DTA	110
4.5.11.3	供試体④の中酸化部のTG-DTA	112
4.5.11.4	各供試体の二水石膏部のTG-DTA	113
4.5.11.5	各供試体におけるCaCO ₃ の定量	118
4.5.12	BET比表面積測定	120
4.6	結論	123
	参考文献	128
第5章	CaF ₂ 混合による耐硫酸性向上の解明	129
5.1	はじめに	130
5.2	実験方法	132
5.3	結果および考察	
5.3.1	CaF ₂ 試薬と10mass%硫酸水溶液による反応性	133
5.3.2	長期暴露による硫酸混合沈殿物の分析	135
5.3.3	耐硫酸性向上メカニズムの解明	138
5.4	結論	140
	参考文献	141
第6章	総括	142
6.1	総括	143
6.2	まとめ	147
	謝辞	149
	付録	150
付表-1		151
付表-2		156

Abstract

Study on Hardened Cement Body with Fluoride for Obtaining Improved Sulfuric Acid Resistance in the Context of Current Issues on Corrosion of Concrete Sewer Pipes

Seiji HOSAKA

In the high economic growth period from the late 1950s, construction of Japanese infrastructure increased rapidly, and, according to studies by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, in the next 20 years, it is estimated that buildings that have existed longer than 50 years and that have accumulated deterioration will comprise more than half of the total. The national sewerage population rate increased by about 70% or more in 50 years, from 6% in 1961 to 76.3% at the end of 2012. Twenty years later, approximately 23% of these sewer pipes will surpass the legally designated service life of 50 years, and after that, the number of deteriorated sewers are expected to further increase.

In Tokyo's 23 districts, and in Yokohama, Nagoya, Osaka and other large cities in which construction had begun a long time ago, nearly 100% of the sewer pipes have been completed, and at present they have entered the period of maintenance management. In this connection, through the phased-in reconstruction work related to Tokyo's Pro-active Deterioration Control Measures Program among others, and using asset management method, which entails an extension of service life 30 years over the established commercial service life (80 years), for reconstruction, efficient and earnest maintenance management is under way.

Since sewerage systems are disposed in poor environments, and due to the occurrence of biological and chemical corrosion, deterioration spreads faster and more easily compared to other construction works. In particular, corrosion due to microbes in concrete causes a faster rate of deterioration over the official service life than that foreseen at the time of construction, and there are cases of breakdown in just a few years. Due to these factors, concrete sewer pipes' life expectancy predictions or efficient maintenance management is rendered difficult.

The final goal of this research is, through research / analysis into the actual conditions regarding concrete microbial corrosion and the regeneration of deteriorated sewer pipes, research into concrete material that will extend the lifespan of reconstructed or newly constructed infrastructure in the interests of creating a sustainable social infrastructure.

This paper consists of 6 chapters, and following is an outline of the chapter contents.

The first chapter, Introduction, outlines the problem of deterioration of social infrastructure, the background to this research, and national policies, etc. regarding this problem. The purpose of this research will be defined after the deterioration counter-measures and maintenance management methods used in Tokyo have been outlined.

While Chapter 2 concerned and was entitled Current Issues Related to Corrosion of Established Concrete Sewer Pipes, the current chapter details the investigation into the cause of early-stage deterioration: bacterial corrosion of concrete. As for the methods used in this research, the Bureau of Sewerage of the Tokyo Metropolitan Government collected, from sewerage ledgers and internal pipe investigation studies conducted in Bunkyo-ku, Taito-ku, Toshima-ku, Arakawa-ku, data relating to readings of the diameter of sewer pipes, gradients, extension, years of use of sewer pipes as well as abnormalities such as corrosion. Based on this, a field study was conducted on building types etc., for buildings connected to sewer pipes.

The cause of bacterial corrosion was analyzed based on data from the study; furthermore, using the discriminant analysis method in a multiple classification analysis, an effort was made to determine the feasibility of using the above parameters for estimates of bacterial corrosion in sewer pipes. The result of the study of the basic data concerning the pipes was the development of a satisfactorily accurate estimation method of corrosion for levels for which speedy intervention is required—Levels A and B, as well as other ranks. This estimation method can estimate / select, through a “screening method”, the highly dangerous pipes that require reconstruction or renovation. The method is used in reconstruction methods, and it can contribute to an optimal maintenance management cycle as well as effective maintenance management generally.

In Chapter 3, Microbial Corrosion of Concrete in Sewerage Systems and Related Technical Measures, the mechanism of microbial corrosion of concrete and the reaction of concrete with sulfuric acid released by microbes is explained. Furthermore, the fundamental current thinking or approach regarding

technical measures against microbial corrosion of concrete and application examples of sulfuric-acid-resistant concrete are introduced.

In Chapter 4, Study on Sulfuric-Acid Resistance of Hardened Cement Body with Fluoride, covers research on the disposing of a $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ layer as a preventer or inhibitor of the permeation of sulfuric acid into the concrete surface in the interests of developing a sulfuric-acid resistant concrete.

In the experiment, a specimen consisting partially of CaCO_3 and CaF_2 substituted cement paste was created, and it was exposed to 10mass% aqueous sulfuric acid liquid to determine if it would exhibit increased sulfuric-acid resistance. The measurement items were of the density of the aqueous sulfuric acid solution the specimen was immersed in; changes in mass and shape modulation of the specimen as well as visual inspection and compressive strength tests on the specimen. Neutralization range measurements to study the degree of sulfuric acid permeation in the specimen were also carried out. Qualitative analysis of measures of reactivity of products to sulfuric acid using X-ray diffraction analysis (XRD); and quantitative measurement of the products reactivity with sulfuric acid using differential thermal analysis and thermogravimetry (TG-DTA) were also carried out, and the products' surface condition was measured with the BET specific surface area.

According to the results of the measurements or the investigations, the following points were clarified regarding sulfuric acid resistance due to/related to Calcium Compound Admixtures.

①: For specimens with a CaF_2 substitution rate of 50% relative to the cement mass, the sulfuric acid diffusion is the slowest, and because it is composed of a passivation layer on the surface layer made up of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, which has high crystalline properties, this prevents or suppresses further permeation of sulfuric acid. As a result, the intact regions exist in high number and the neutralization area cannot be verified, and compared to the CaCO_3 composite specimen, it exhibits a high sulfuric acid resistance.

②: According to TG-DTA, for the specimen with CaF_2 admixture, the material balance for the cement with respect to the production volume of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ is not consistent with that predicted, and this suggests a reaction between CaF_2 and sulfuric acid.

Chapter 5 is entitled Clarifications Regarding Increased Sulfuric Acid Resistance as a result of CaF_2 Admixture. Since in Chapter 4, the CaF_2 reaction with sulfuric acid was suggested, the CaF_2 reagent was mixed with 10 mass% sulfuric acid solution to determine if it would react.

According to the results of XRD and TG-DTA analysis of the sulfuric acid precipitate conducted after the experiment, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ generation was confirmed, and reaction between sulfuric acid and CaF_2 was confirmed in this experiment. The study showed that the HF resulting from the CaF_2 and sulfuric acid reaction dissolved the silica, and a colloidal silica was produced. Furthermore, HF reacted with the proximate Ca type compounds such as $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and C-S-H, etc., resulting in the regeneration of relatively dense CaF_2 . This colloidal silica and the regenerated dense CaF_2 replenish the pores in the concrete, thus densifying it and creating a sulfuric-acid-permeation-preventing silica- CaF_2 layer. It was concluded that due to the silica- CaF_2 layer and the dense $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ layer with its good crystalline properties covering the concrete surface, there is a good synergistic effect and this increases sulfuric acid resistance

Chapter 6, Conclusion, consolidates the knowledge gained from these studies in the interests of dealing with increasing deterioration of social infrastructure going forward through maintenance management and lifespan increases.

This research was determined as having significant potential to contribute to sustainable development.

第 1 章

緒 論

1. 1 研究の背景

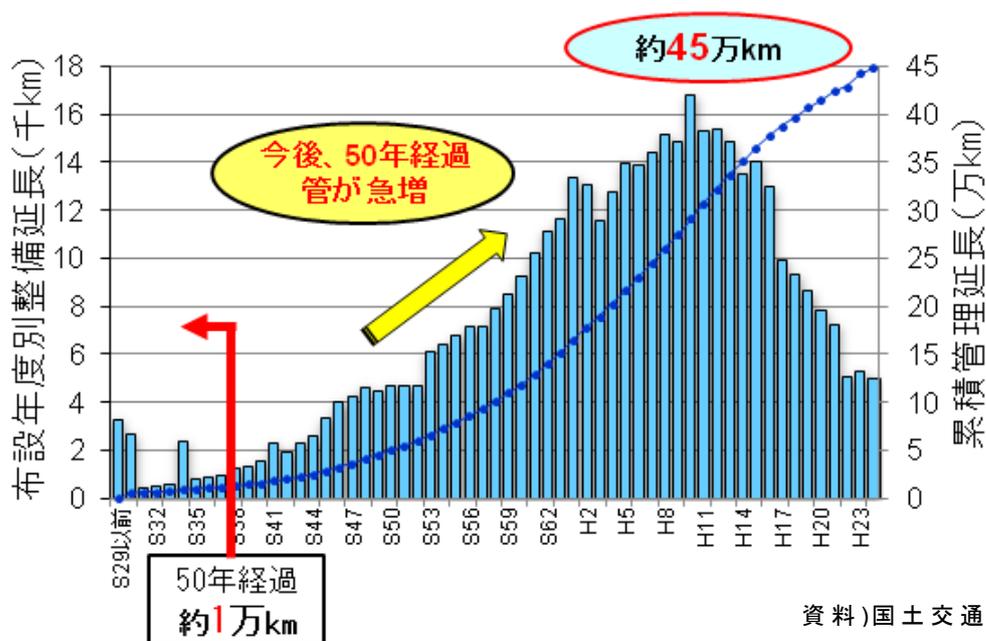
日本における社会資本（インフラストラクチャー）は、戦後 1950 年代後半の高度経済成長期頃から急速に整備が進められた。この急速な整備の結果、表－1.1 に示すように建設後 50 年以上経過する老朽化社会資本が今後 20 年間で半数以上を占めることになる¹⁻¹⁾。

他の社会資本に比べ普及が遅れた下水道管路施設も、2032 年（平成 44 年）には約 23%が 50 年を超えることになり、また図－1.1 に示す 2012 年（平成 24 年）度末の下水道管路施設の年度別整備延長¹⁻²⁾からも明らかのように、その後急速に老朽化施設が増加すること

表－1.1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合¹⁻¹⁾

	平成24年3月	平成34年3月	平成44年3月
道路橋(橋長2 m以上)	約 16%	約 40%	約 65%
トンネル	約 18%	約 31%	約 47%
河川管理施設(国管理の水門等)	約 24%	約 40%	約 62%
下水道管渠	約 2%	約 7%	約 23%
港湾岸壁(水深-4.5m以深)	約 7%	約 29%	約 56%

資料)国土交通省

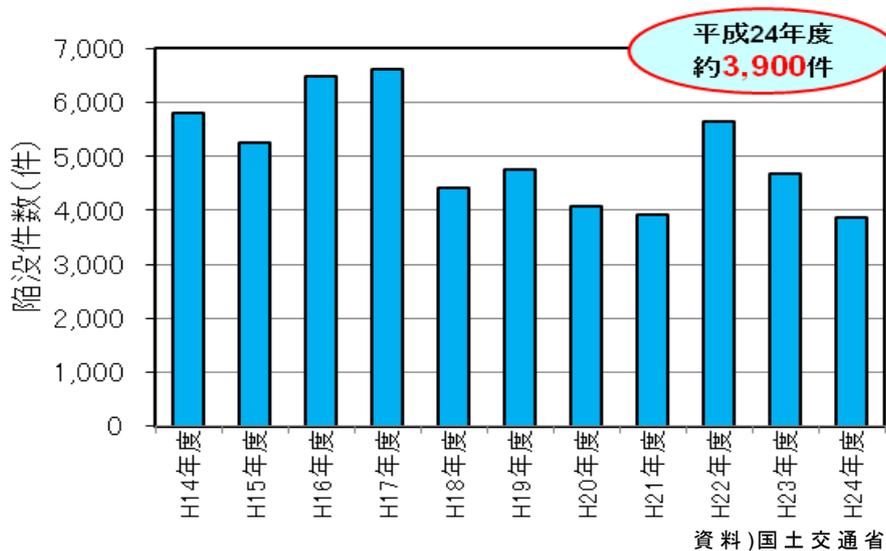


資料)国土交通省

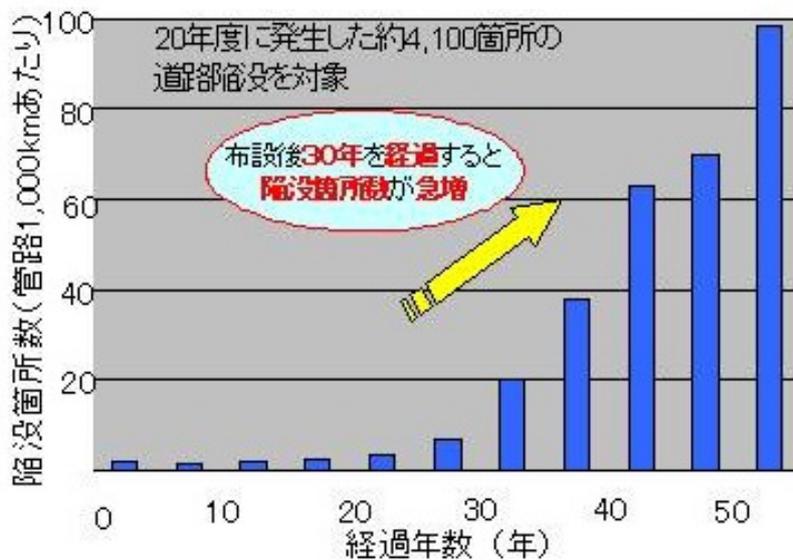
図－1.1 下水道管路施設の年度別整備延長 (H24 末現在)¹⁻²⁾

になる。

老朽化社会資本は、時として重大な社会問題を引き起こす。例えば下水道管路施設に関しては、老朽化に起因する下水道管路の損傷や崩壊、それに伴う道路の陥没事故が発生しており、日本全国においては年間約 3,900 件（図－1.2 下水道管路施設に起因する道路陥没件数の推移¹⁻²⁾）も発生している。また国土交通省関東地方整備局の調査では、下水道管路施設に起因する道路陥没事故は敷設後 30 年を経過すると急増する（図－1.3 下水道管路施設の経過年数別道路陥没箇所数¹⁻³⁾）



図－1.2 下水道管路施設に起因する道路陥没件数の推移¹⁻²⁾



図－1.3 下水道管路施設の経過年数別道路陥没箇所数(全国)¹⁻³⁾

路陥没箇所数（全国）¹⁻³⁾ことが明らかとなっており，効率的な維持管理および予防保全型管理が必要となっている．近年では予防保全型管理により，ピークの2005年（平成17年）度の約6,600件よりも減少しているものの，依然として1日平均10件以上発生している．

国土交通省ではこれら老朽化社会資本の増加に対し，2012年（平成24年）7月に社会資本メンテナンス戦略小委員会を設置し，今後の維持管理・更新のあり方について検討を進めるとともに，国土交通省を挙げて老朽化対策に取り組むための体制として，2013年（平成25年）1月，国土交通大臣を議長とする「社会資本の老朽化対策会議」を設置し，総合的・横断的に検討を進め，同年3月，老朽化対策の全体像を工程表として取りまとめている．

この工程表に基づき，まず2014年（平成26年）3月末を目途に社会資本の集中的な点検の実施，および必要な修繕等を早急に実施し，また各施設の特性を考慮した適切な点検による現状確認と，その結果に基づく的確な修繕を実現するため，原則として同期日までに維持管理基準の改善を行うとともに，維持管理情報のデータベース構築等を進めている．さらに，社会資本の維持管理・更新の推進等，制度面等の見直し・検討や，内容の充実を図った長寿命化計画の策定等を通じ，平成27年度以降，維持管理・更新に係わる本格的なPDCAサイクルへの移行を図っている¹⁻¹⁾．

以上のように現在，社会資本施設の老朽化が社会問題となっているが，本論文は特に社会資本の中でも日常的にその恩恵を被っているのにもかかわらず，一度整備が完了すると人目につきにくく，その存在すら忘れがちな下水道管路施設を研究対象とし，下水道管路施設の現状を把握し，長寿命化のための新材料について研究を行った．

1. 2 下水道とは

下水道法（昭和三十三年四月二十四日法律第七十九号）第一条の法律の目的には『この法律は、流域別下水道整備総合計画の策定に関する事項並びに公共下水道，流域下水道及び都市下水路の設置その他の管理の基準等を定めて，下水道の整備を図り，もつて都市の健全な発達及び公衆衛生の向上に寄与し，あわせて公共用水域の水質の保全に資することを目的とする.』と記されている。

日本では昔から屎尿は農作物の主要な肥料として有償として取引されていた歴史があり，1900年（明治33年）に公布された汚物掃除法において屎尿を廃棄物として規定したが，昭和30年代までは有価物として扱われてきた。このため日本における下水道は汚物処理ではなく，主に都市の雨水排除，浸水防除を目的としていた。

しかし1954年（昭和29年）12月からの高度経済成長期を迎えると急速な都市化と，安価で即効性が高く施肥も容易な化学肥料の増産により，肥料としての屎尿の用途は失われ，屎尿処理施設の建設や，屎尿や生活排水の収集・処理を行う下水道施設の整備が急速に行われるようになった。また高度経済成長に伴い，公共用水域の水質汚濁が社会問題となり，下水道の整備が強く叫ばれるようになった。1967年（昭和42年）の下水道整備五カ年計画で，はじめて水質汚濁の解消がうたわれ，1970年（昭和45年）の公害国会では，下水道法に水質汚濁防止の目的が加えられた。さらに，下水道普及地区においては，水洗便所への改造が義務付けられるなど，下水道の水質保全に果たす役割が拡大し，かつ責任も増大し，下水道の整備が積極的に進められることになった。

この様な変遷を経て現在，下水道には汚水・雨水の排除により都市の衛生環境を衛り，浸水を防除する目的のほかに，公共用水域を保全する役割も担っている。

1. 3 日本における下水道

日本の近代下水道の始まりは、1884年（明治17年）に着工された東京の神田下水である。当時建設に当たっては内務大臣の許可を必要とし、建設費の2/3は自治体が負担するなどの制約があるにもかかわらず、利益を伴わない事業であったため普及は進まず、神田下水着工から約80年後の1961年（昭和36年）度における日本の下水道処理人口普及率はわずか6%¹⁻⁴⁾であった（図-1.4 日本の下水道処理人口普及率の推移）。

しかし戦後の高度経済成長期以降、産業の進展による工業排水や、都市への人口の集中による生活排水の増大により、水質汚濁といった公害問題が顕著になってきた。

この問題に対し、1967年（昭和42年）から始まった下水道整備5カ年計画において初めて水質汚濁の解消がうたわれ、1970年（昭和45年）の下水道法改正により、公共用水域の水質保全という重要な役割を下水道が担うことになった。その後下水道は、毎年1～2%の伸びで着々と整備が進められ、2012年度（平成24年度）末の

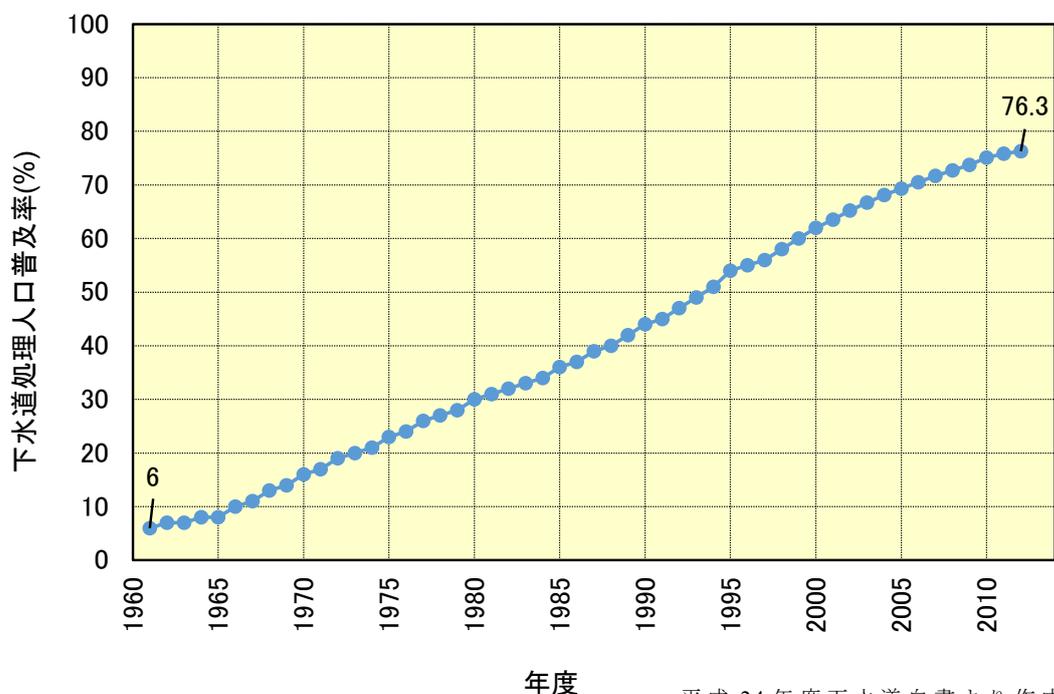


図-1.4 日本の下水道処理人口普及率の推移¹⁻⁴⁾

日本の下水道処理人口普及率は 76.3%（下水道利用人口／総人口；岩手県，福島県は東日本大震災の影響により，調査不能な市町村があるため除外）¹⁻⁴⁾，管渠布設延長は 447,334km，処理場数は 2,134 箇所（2011 年度（平成 23 年度）末）¹⁻⁵⁾と膨大なストックを抱えるまでとなった．しかし未だ約 4 人に 1 人が下水道の恩恵を受けておらず，また徳島県の 16.3%や和歌山県の 22.7%など 50%未満の県が 8 県も存在するなど，先進諸国と比べても決して高い数値とはいえない．

整備が進まない原因としては，日本の地形的特徴が挙げられる．基本的に下水道は自然流下方式で設計されるため，起伏が激しい日本の地形においては計画上不利な場合が多いためである．

一方で古くから整備が開始された東京 23 区，横浜市，川崎市，名古屋市，京都市，大阪市，福岡市などの大都市においてはほぼ 100%整備が完了し，現在は維持管理の時代に移っている．たとえば東京 23 区では，1884 年（明治 17 年）の神田下水の着工を初めに近代下水道の整備が行われ，特に高度経済成長期の 1963 年（昭和 38 年）頃から急速に整備が進められ，1994 年（平成 6 年）度末に 100%普及概成した¹⁻⁶⁾．しかし管理延長約 15,937km（2012 年（平成 24 年）度末）¹⁻⁷⁾の下水道管渠のうち約 1,500km が法定耐用年数（コンクリート製下水道管＝50 年）¹⁻⁸⁾を超え，さらに今後 20 年間で新たに約 6,500km 増加する¹⁻⁹⁾ことから，現在ではアセットマネジメント手法を取り入れた積極的な維持管理が行われている．

このように下水道の普及率には地域格差があるが，既に整備が完了した大都市では下水道管の維持管理と言った新たな課題に直面している．

1. 4 下水道管における問題点

下水道管の材料としては近年、耐薬品性、耐衝撃性に優れる塩化ビニル管がφ450mm以下の小口径管に対して多く使われるようになってきた。しかし以前は小口径管に陶管、鉄筋コンクリート管が多く用いられており、また現在でもφ500mm以上の中大口径管では鉄筋コンクリート管が用いられている。

現在この陶製およびコンクリート製の下水道管に多くの異常を来していることが明らかとなっている。例えば、陶管においては耐薬品性は高いが、衝撃に弱く、破損やクラック等の異常が発生している。また鉄筋コンクリート管においては陶管に比べ衝撃には強いが、耐薬品性は低く、微生物が生成する硫酸（ H_2SO_4 ）による腐食が発生するなど、多くの異常が確認されている。

コンクリート構造物は一昔前、半永久的であると考えられていたが、特に下水道施設におけるコンクリートには種々の異常が生じており、これらの異常は最悪の場合、構造物の損壊、それに伴う道路の陥没といった人命にも関わる社会的問題を引き起こすことになる。

整備が完了した大都市では道路陥没事故等を未然に防ぐため、管路内調査を積極的に実施している。この調査は下水道管が大口径の場合は、直接調査員が管渠内に入り、ハンマーと目視により調査を行うが、小口径で人が入れない場合は、ビデオカメラを取り付けた管路内調査ロボットを地上から遠隔操作し、そのビデオ映像から異常箇所を確認している。

この下水道管の調査を基に維持管理を行っているが、さらに効率的な運用を行うべく、アセットマネジメントの導入や、ライフサイクルコストの最小化を図るための予防的な維持管理が必要となっている。

1. 5 下水道の維持管理

下水道はこれまでの整備により管渠布設延長は 442,952km, 処理場数は 2,145 箇所 (2010 年 (平成 22 年) 度末)¹⁻⁵⁾, 1976 年 (昭和 51 年) 度～2004 年 (平成 16 年) 度の 28 年間の投資額は約 75 兆円という莫大な資産を有している¹⁻¹⁰⁾.

この莫大な資産を有効に活用していく必要があるが, 先に述べたように建設後 50 年以上経過し, 改築・更新を必要とする下水道施設 (管渠) が現在約 2%であるが, 20 年後には約 23%にも達する. この老朽化に伴う下水道機能の低下, および陥没事故等の重大事故の増加が懸念され, また老朽化により災害発生時の脆弱性も高まることが予想される.

下水道の老朽化は人命に関わる重大な問題であり, 安全確保のため, 適正な維持管理あるいは改築を実施することが, 中長期的課題であるとともに, 緊急に対応すべき課題として考える必要がある. しかしながら, 1976 年 (昭和 51 年) 度の下水道普及率が 24%, 2004 年 (平成 16 年) 度が 68.1%と 28 年間で 44.1%の伸びに対する投資額約 75 兆円から計算すると, 普及率 1%に対する投資額は約 1.7 兆円となる. すなわち, 改築・更新を必要とする下水道施設 (管渠) が 20 年後には約 20%増加することから, 20 年間で 34 兆円の維持管理への投資が必要と試算され, 将来を見据えた予算配分により, 改築・更新の事業および費用を平準化する必要がある. あわせて下水道の機能低下・事故防止・震災への対応を, 従来の「発生対応型」から「予防保全型」へ転換することを基本とし, 下水道サービスを中断させることのないよう, 下水道施設に関する点検調査を施設に優先順位を付けて実施し, 機能診断や寿命予測などを通じて, 下水道施設の機能評価を行い, 致命的な下水道機能の低下や重大な事故, 震災による損傷等が発生する前に, その緊急度に応じて適正な維持更新を行うことが必要となる. すなわち「予防保全型」への転換により, 大規模な損傷等の復旧事業が不要となり, 大幅なコスト縮減にもつながることになる¹⁻¹¹⁾.

さらに財政的な制約が厳しくなる中、次世代の利用者にも安定したサービスを提供し続け、社会や利用者へのアカウンタビリティを果たすことや、ライフサイクルコストの低減や投資の平準化などにより、下水道事業に係わる支出を最小化する必要が求められている。そこでアセットマネジメント（政策目標、資産管理、投資計画、維持管理、財務管理など）等により、新規整備、更新改築、および維持管理の計画の一体的な立案による事業マネジメントを下水道事業の運営に導入し、下水道に対する社会ニーズの変化に十分に対応できるような事業展開・運営を実現することを基本とする¹⁻¹²⁾。と「下水道ビジョン 2100」,「Ⅲ. 下水道の使命を実現するための施策体系」の中で示された。

東京都下水道局では老朽化対策への取組が他の自治体に比べ早くから行われ、1982年（昭和57年）度から区部の中でも老朽化が進んでいる再構築エリアを中心に管路内調査を実施しており、また100%普及概成翌年の1995年（平成7年）度からは本格的に老朽化対策に併せて都市化の進展に伴う雨水流出量の増加による流下能力不足の解消などを図るべく、再構築事業を進めている。

また2000年（平成12年）度からは都民生活に直接影響する道路陥没、臭気および震災対策について優先度の高い地区や対策を重点化した「再構築クイックプラン」を策定し実施してきた。

2004年（平成16年）度には「〔新〕再構築クイックプラン」を策定し、道路陥没対策として、能力不足の解消などを図る通常の再構築に加え、段階的に再構築を進める「老朽化対策先行整備」地区の拡大実施や、道路陥没の発生原因の多くを占める取付管を対象とした「取付管対策」の集中的実施、予防保全型の維持管理への移行推進のための「デジタル技術」活用による、再構築エリア内の枝線管渠及び取付管の調査完了などの取り組みを実施し効果を上げている。また臭気対策や震災対策に対する対策も行われている¹⁻¹³⁾。

さらに現在では法定耐用年数より30年程度延命化し、経済的耐用年数（80年程度）で再構築するアセットマネジメント手法により

効率的に再構築を行う¹⁻⁹⁾など、本格的な維持管理の時代に入っている(図-1.5 下水道管のアセットマネジメントのイメージ¹⁻¹⁴⁾。

以上、下水道施設の老朽化が将来にわたって深刻な問題となっており、また財政的な制約から効率的な維持管理手法の確立が必要となっている。

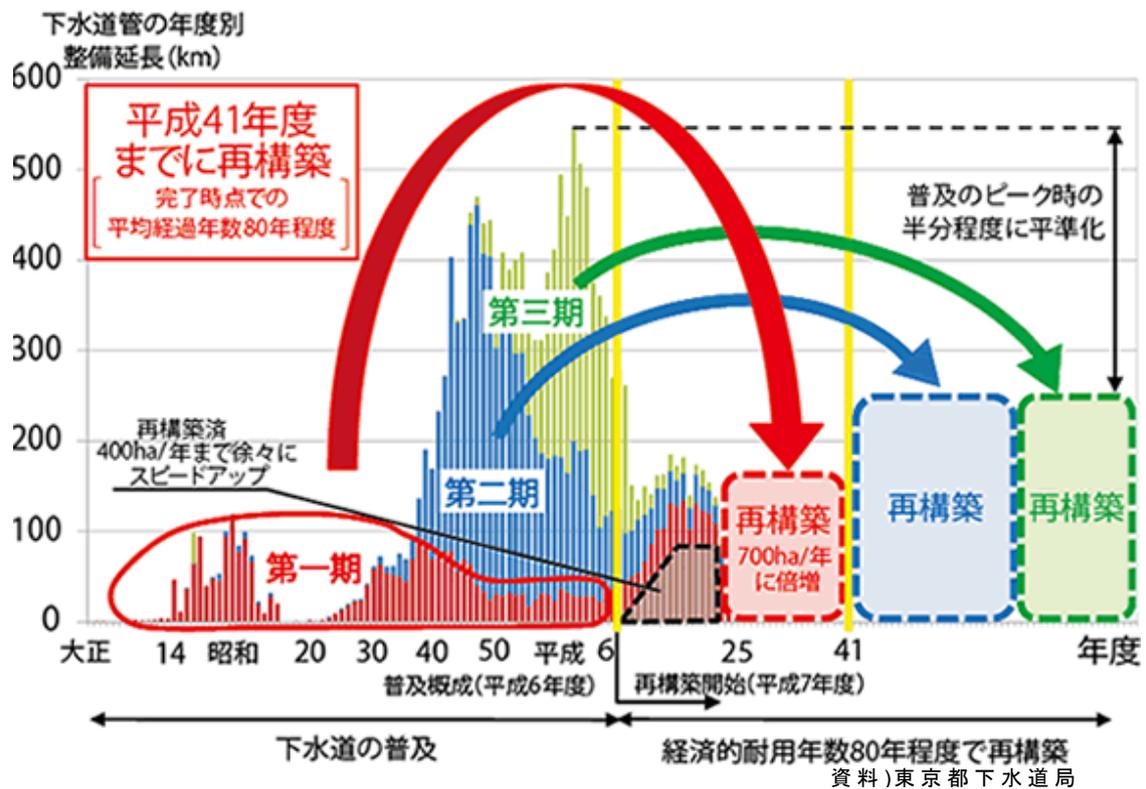


図-1.5 下水道管のアセットマネジメントのイメージ¹⁻¹⁴⁾

1. 6 研究の目的

下水道管内を流下する下水は家庭からの生活排水や尿尿成分などから成っており，流下の過程で嫌気性に変化したり，硫化水素（ H_2S ）を生成するなど化学的な変化が生じている．このような劣悪な環境下に下水道管路施設は置かれており，生物学的，化学的劣化・腐食によりその劣化速度は通常の構造物とは異なる．

特にコンクリートにおいては微生物腐食が発生し，この腐食により設計時に考慮された耐用年数よりも早く老朽化を引き起こし，数年で崩壊した事例が報告されるなど，寿命予測および効率的な維持管理が困難なものとなっている．

本研究はコンクリート製下水管の腐食の現状について調査分析すると同時に，老朽化したコンクリート製下水道管の更生，再構築や新設のコンクリート製下水管の長寿命化のための，微生物腐食に強い新しい発想の材料研究を目的とし，社会が要求する持続発展可能な社会の構築のための，社会資本の効率的かつ戦略的維持管理に応えようとするものである．

1. 7 本論文の構成

本論文は第 1 章から第 6 章まで、全編 6 章で構成されており、各章の項目とその概要は次の通りである。

第 1 章は『緒論』であり、社会資本の一つである下水道管渠の現状や老朽化がもたらす社会問題、および社会資本のメンテナンスへの国の対応などの研究背景と、下水道の目的、下水道の普及率、下水道における問題点、下水道の維持管理などについて概説し、研究の目的について述べた。

第 2 章は『既設コンクリート製下水道管の腐食の現状』であり、特に早期老朽化の原因となる微生物によるコンクリート腐食について調査を行い、その調査結果から腐食が発生しやすい条件を調べると同時に得られたデータの分析を行い、多変量解析による下水道管の微生物腐食予測の可能性について検討した。

なお第 2 章は微生物腐食発生危険箇所について、下水管路内の調査を行う前段階で予測・抽出するスクリーニング手法であり、第 3 章以降は、実調査後に更生・再構築が必要な箇所に対し適用する、微生物腐食に強い長寿命のセメント硬化体の研究である。

第 3 章は『下水道施設におけるコンクリートの微生物腐食とその対策技術』として、コンクリートの微生物腐食のメカニズムおよび微生物が生成する H_2SO_4 とコンクリートとの反応について解説し、コンクリートの微生物腐食に対する対策技術として、現在実用化されている耐硫酸性コンクリートの一例を紹介した。

第 4 章は『フッ化物混合セメント硬化体の耐硫酸性に関する検討』であり、コンクリート下水道管の老朽化の一因となる微生物腐食に対して抵抗性を有する耐硫酸性コンクリートについて、これまでとは異なる新しい理論による耐硫酸性コンクリートに関する研究である。

本研究では Ca 系化合物に着目し、フッ化カルシウム (CaF_2) と炭酸カルシウム (CaCO_3) によりセメントの一部を置換したセメントペースト供試体 (セメント硬化体) の硫酸暴露実験を行い、耐硫

酸性の向上効果およびメカニズムについて検討を行った。

測定・検討項目は、硫酸水溶液の密度、供試体の目視観察、質量測定、形状測定、圧縮強度試験、供試体の中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）、単位体積質量、硫酸浸透体積、粉末X線回折測定、示差熱-熱重量分析、BET比表面積測定である。

第5章は『CaF₂混合による耐硫酸性向上の解明』であり、第4章の結果から、本実験条件では生じないと考えられていたCaF₂とH₂SO₄の反応が示唆されたことから、CaF₂試薬とH₂SO₄による実験を行い、これまでの結果と総合して、CaF₂混合による耐硫酸性向上のメカニズムを明らかにした。

第6章は『総括』であり、本論文のテーマである『コンクリート製下水管腐食の現状と耐硫酸性向上のためのフッ化物混合セメント硬化体の研究』に関して行った種々の実験から得られた知見を総括し、社会資本の維持管理および長寿命化について述べた。

〈参考文献〉

- 1-1) 国土交通省編：国土交通白書 2013 平成 24 年度年次報告，
pp.113～114，2013
- 1-2) 国土交通省ホームページ：ホーム>政策・仕事>水管理・国土
保全>下水道>計画的な改築・維持管理，2014.4
[http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_
tk_000135.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_
tk_000135.html)
- 1-3) 国土交通省関東地方整備局ホームページ：ホーム> 都市・公
園・建設産業 > 社会資本整備 > まちづくり > 下水道 > 下水
道事業の支援制度について，2014.4
[http://www.ktr.mlit.go.jp/city_park/shihon/city_park_shihon
00000271.html](http://www.ktr.mlit.go.jp/city_park/shihon/city_park_shihon
00000271.html)
- 1-4) (公社) 日本下水道協会：平成 25 年度 下水道白書 日本の
下水道 循環のみち下水道の成熟化へ，資料編 p13，2014
- 1-5) (公社) 日本下水道協会：平成 25 年度 下水道白書 日本の
下水道 循環のみち下水道の成熟化へ，資料編 p22，2014
- 1-6) 東京都下水道局：東京都の下水道 2013，p41，2013
- 1-7) 東京都下水道局：東京都の下水道 2013，p4，2013
- 1-8) 地方公営企業法施行規則 第十五条および別表第二号，昭和二
十七年九月二十九日総理府令第七十三号
- 1-9) 東京都下水道局：東京都の下水道 2013，p11，2013
- 1-10) 「下水道ビジョン 2100」，国土交通省都市・地域整備局下水道
部 日本下水道協会，p18，p22，2005
- 1-11) 「下水道ビジョン 2100」，国土交通省都市・地域整備局下水道
部 日本下水道協会，pp.19～20，p22，2005
- 1-12) 「下水道ビジョン 2100」，国土交通省都市・地域整備局下水道
部 日本下水道協会，pp.20～21，p22，2005
- 1-13) [新] 再構築クイックプラン」～老朽施設の速やかな改善～，
2004
- 1-14) 東京都下水道局：東京都の下水道 2013，p12，2013

第 2 章

既設コンクリート製下水道管における 腐食の現状

2. 1 はじめに

現在、下水道の普及率は全国平均で 76.3% (2012 年 (平成 24 年) 度末) と整備が進んだ一方、古くから下水道の普及に着手し、既に整備が完了した大都市においては維持管理・再構築といった新たな問題に取り組んでいる。

『下水道施設改築・修繕マニュアル (案) 1998 年版 (社) 日本下水道協会』によると下水道管渠 (コンクリート製) の標準的耐用年数は 50 年²⁻¹⁾とされており、この耐用年数を過ぎた下水道管は更新の対象となる。また『下水道施設テレビカメラ調査マニュアル (案) 平成 12 年 12 月 (社) 日本下水道協会』では供用後 30 年を超えると、損傷・劣化が進み道路陥没などの事故につながるおそれがある²⁻²⁾ことから、管路内調査を優先するとされている。しかし実際には 50 年を経過しても健全な下水道管もある一方、わずか 1 年程度で早期老朽化する下水道管も確認されている。

このコンクリート下水道管の早期老朽化を引き起こす要因は、大きく外的要因と内的要因の 2 つに分類できる。

外的要因としては外圧等による管のたわみ、ずれ、クラック等物理的現象によるものである。この要因として地盤沈下や他工事の掘削による影響、およびモータリゼーションの発達により当初予想されていなかった交通量、車両重量の増加等によるものである。

一方、内的要因はコンクリートの化学的変化による劣化であり、以下の①から④などの影響によるものである。

- ①大気中の CO₂ とコンクリート成分との反応による中性化
- ②工業排水に含まれる有害物質等とコンクリート成分の反応による劣化・腐食
- ③下水中に含まれる成分とコンクリート成分の反応による劣化・腐食
- ④微生物によるコンクリートの腐食

特に内的要因のうち、微生物によるコンクリート腐食は早いものでは十数年で下水道の機能を低下させることから、近年問題化して

いる．すなわち，微生物の作り出す H_2SO_4 により腐食が徐々内部へ進行し，最悪の場合鉄筋をも腐食させ，構造物としての機能を失い，道路の陥没といった社会問題を引き起こすためである．

以上，本研究は下水道管の老朽化のうち，特に微生物による腐食と思われる箇所について調査を行い，その調査結果から腐食が発生しやすい条件の分析を行った．さらに調査データから，多変量解析により下水道管における微生物腐食予測が可能であるか検討を行った．

2. 2 既設下水道管の腐食調査

既設下水道管の腐食調査は東京都下水道局北部第一管理事務所の協力を得て行った。北部第一管理事務所は古くから下水道整備が進められてきた文京区，台東区，豊島区，荒川区の4区を管理しており，老朽化した下水管渠内の調査報告書が数多くある。

この調査報告書は，下水管渠内に調査ロボットや調査員が入り，映像または目視により異常箇所を調査・記録・集計した成果報告書である。調査異常項目は東京都下水道局による管路内調査工標準仕様書の『テレビカメラ調査および目視調査判定基準』²⁻³⁾では，表-2.1に示す下水道管の破損，クラック，継ぎ目ずれ，腐食，たるみ・蛇行，モルタル付着，浸入水，取付管突出し，ラードの付着・木の根侵入について判定基準を設定している。

表-2.1 テレビカメラ調査および目視調査判定基準』²⁻³⁾

ランク		A	B	C
項目	鉄筋コンクリート管	欠 落	軸方向のクラックで幅:2mm 以上	軸方向のクラックで幅 2mm 未満
		軸方向のクラックで幅:5mm 以上		
管の破損	陶管	欠 落	軸方向のクラックが管長の1/2 未満	-
		軸方向のクラックが管長の1/2 以上		
管のクラック	鉄筋コンクリート管	円周方向のクラックで幅:5mm 以上	円周方向のクラックで幅:2mm 以上	円周方向のクラックで幅 2mm 未満
	陶管	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3 以上	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3 未満	-
管の継ぎ目ずれ		脱 却	陶管:50mm 以上 鉄筋コンクリート管:70mm 以上	陶管:50mm 未満 鉄筋コンクリート管:70mm 未満
管の腐食		鉄筋露出状態	骨材露出状態	表面が荒れた状態
管のたるみ・蛇行		内径以上	内径の1/2 以上	内径の1/2 未満
モルタル付着		内径の3割以上	内径の1割以上	内径の1割未満
浸入水		ふきでている	流れている	にじんでいる
取付管突出し		取付管内径の1/2 以上	取付管内径の1/10 以上	取付管内径の1/10 未満
ラードの付着・木の根侵入		内径の1/2 以上閉塞している	内径の1/2 未満閉塞している	-

※段差はmm単位で測定する。また，その他の異常(木片，他の埋設物等で上記にないもの)も調査する。

一般的にコンクリートにおける腐食は、コンクリートの中性化や塩化物による鉄筋などの鋼材腐食のことを指すが、管路内調査工における腐食は、主に微生物が生成した H_2SO_4 によるコンクリート自体の腐食を指す。 H_2SO_4 によるコンクリート腐食は長期間にわたり持続的進行するため、管の寿命を検討する上で最重要項目である。

本研究では、調査報告書を基に腐食について再調査を行い、さらに現地踏査により得られたデータを基に分析・解析を行った。

図-2.1 に、調査・分析・解析方法のフローを示す。

調査概要は、先ず下水道台帳からコンクリート下水道管理設箇所を調べ、次にコンクリート下水道管箇所の管路内調査工報告書と調査ビデオの映像から路線毎（調査では中間マンホールは考慮せず、マンホール間を 1 路線とした。）に腐食ランクの確認、線延長および勾配、施工年、取付管位置と腐食箇所の確認を行い、これらデータを下水道台帳平面図に記入する。次にこの平面図を基に現地踏査を行い、取付管箇所および建築物の種類・戸数の調査を行う。最後にこれらから得られたデータの集計・分析を行い腐食予測が可能であるか検討を行う。以上の手順である。

ここで、東京都下水道局における腐食ランクの判定基準は先の表-2.1 に示した A, B, C の 3 段階である。

しかしながら、管路内調査工報告書では腐食と判定されていない箇所において調査ビデオによる映像では腐食と思われる箇所が多く存在すること、また明らかに施工当初のコンクリートの表面とは異なる状態のものが存在したことから、調査ではこの様な状態のものを『D ランク』として新たに設け、表-2.2 に示す A~D の 4 段階の評価を行うこととした。

なお、一般的に下水道施設のコンクリート腐食は、気相部に放出された H_2S が硫黄酸化細菌により酸化され、 H_2SO_4 を生成することにより気相部で腐食が発生することが知られているが、ビデオ映像からは水中部においても下水に含まれる成分によると思われる腐食が確認されたことから、これらも腐食として取り扱うこととした。

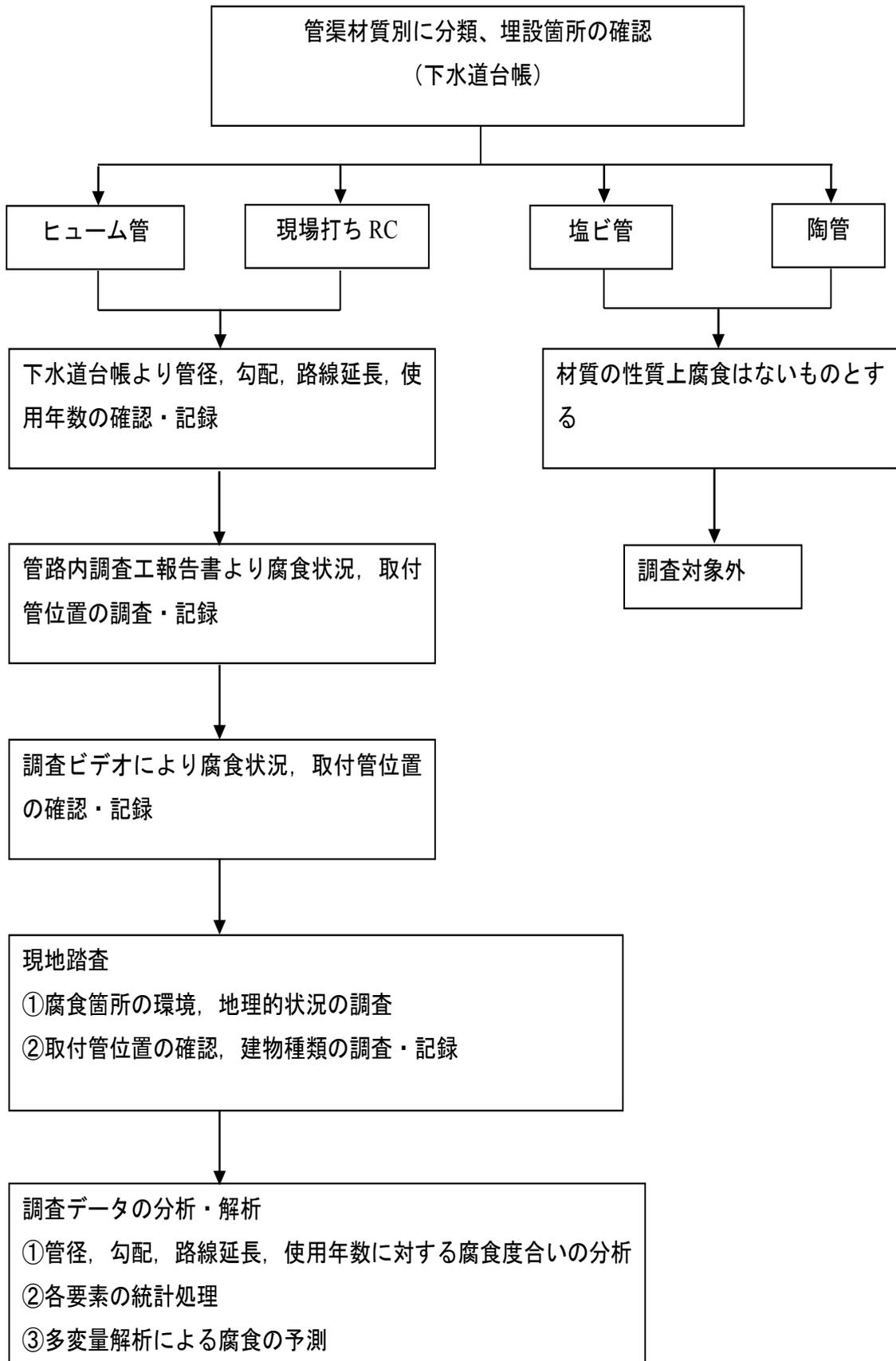


図-2.1 調査・分析・解析方法のフロー

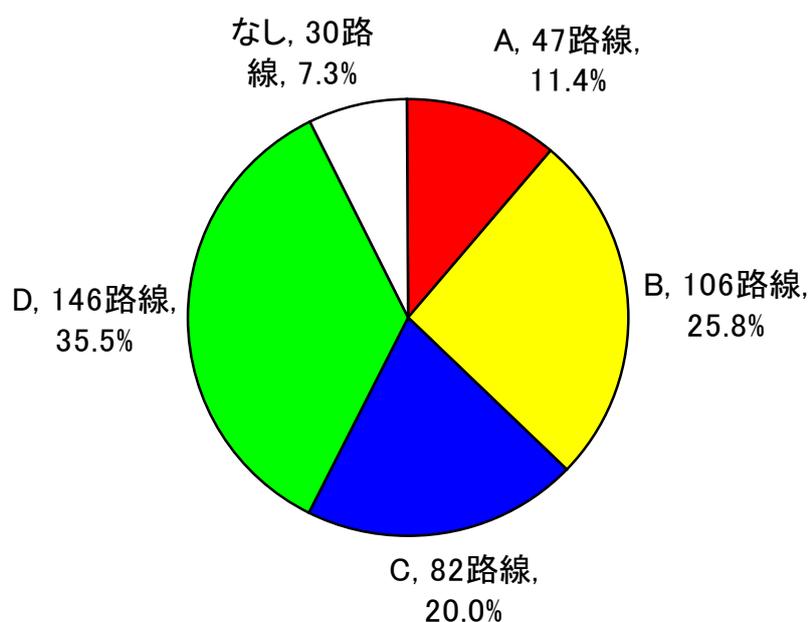
表-2.2 本調査における腐食ランクの判定基準

腐食ランク	状態
A	鉄筋露出状態
B	骨材露出状態
C	表面が荒れた状態
D	表面が腐食していると思われる状態
なし	腐食なし

2. 3 腐食調査結果

付表－1 に下水道管腐食度合いの調査および集計結果を示した。本付表は路線毎の腐食度合い，管径，勾配，路線延長，使用年数，取付管位置など下水道台帳や調査ビデオから得られたデータと，現地踏査により得られた情報（ここで汚水取付管と雨水取付管は数量のみの表示で腐食箇所の環境，地理的状況，建物の種類，集合住宅の場合世帯数などは考慮していない。）についてまとめたものであり，総調査路線数は411路線である。また，一路線内で様々な腐食ランクが混在している場合は腐食ランクが高い方で区別した。なお，使用年数が不明な路線は下水道台帳が整備される前のものであり，今回の調査において最も古いものが，82年（1路線），76年（25路線）あったことから，80年と仮定し処理を行うこととした。

図－2.2 に全調査路線の腐食ランクの割合を示した。グラフより全体の6割弱が東京都の設定したA～Cランクまで腐食しており，さらに本調査で新たに加えたDランクを加えると全体の9割以上が腐食を受けている。また早期に再構築が必要なA・Bランクは約4割の路線で存在することがわかる。



図－2.2 全調査路線の腐食ランクの割合

次にこの調査データを因子毎に分類し、ヒストグラムおよび100%積み上げ棒グラフに表したものを、図-2.3 管径別、図-2.4 勾配別、図-2.5 路線延長別、図-2.6 使用年数に示した。

図-2.3の管径別における腐食のランクは400mm以下でC・Dが、400mm以上ではA・Bランクが多く存在する。すなわち管径が大きくなると（下水の流下に伴い）腐食が進行しやすいと推察できる。

通常、下水道は管径が大きくなるほど勾配は緩やかに計画され、また合流管は計画雨水量と計画時間最大汚水量の合計水量で計画されているため晴天時における実流量は少なく下水が滞留しやすくなる。すなわち、下水道枝線の末端では（管径が小さい時）、流入下水は好気性状態であり腐食の原因となるH₂Sは生成されにくい。しか

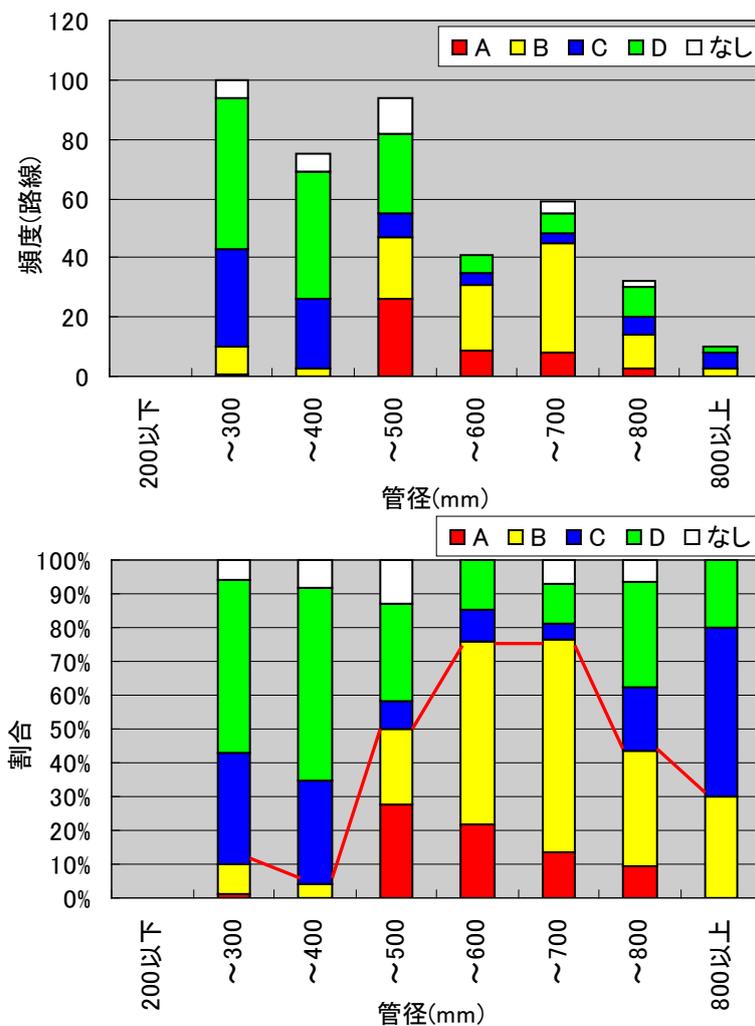


図-2.3 管径別のヒストグラムおよび腐食の割合

し流下に伴い管径が大きく，また流下途中で勾配が大きくなると流速により下水は攪拌され，一度嫌気性状態となった下水からは気中への H_2S 拡散が促進され腐食が進行しやすくなると言える。

図-2.4 の勾配別のグラフより，逆勾配では腐食ランク A・B が約 50%，また 0～5‰でも約 47%を占めている．しかし 5～15‰になると約 20%まで減少するが，15‰以上になると A・B ランクは約 65%に急増する．したがってこの分布図から，勾配が 5～15‰の時，腐食の危険性が低くなることが読みとれる．

すなわち逆勾配や 5‰以下の緩い勾配では下水が滞留しやすく，嫌気性状態となるため H_2S の発生を招き腐食が起こりやすくなる．また勾配が大きくなると流速により下水は攪拌され，気中に H_2S が

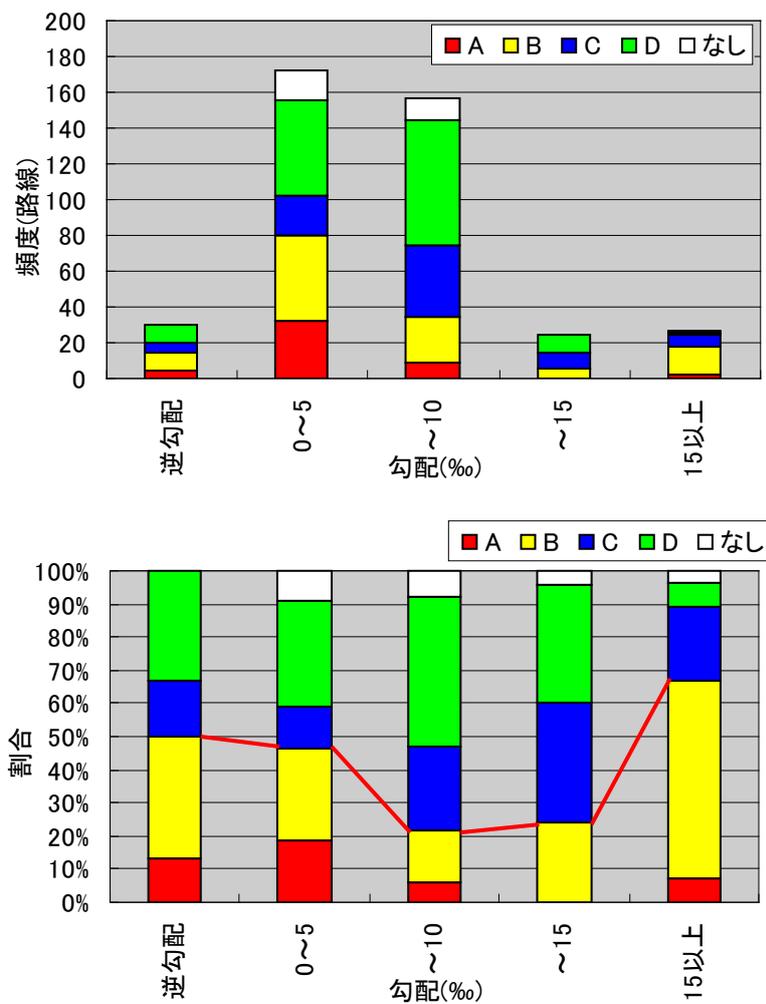


図-2.4 勾配別のヒストグラムおよび腐食の割合

拡散するため腐食が促進されるといえる。

図-2.5 の路線延長別のグラフより、腐食ランク A・B について見ると 50m 以上の路延長では 50%以上、10m 以下では 40%であった。しかし 20m～40m の路線延長では平均 30%程度である。

これらのことから、延長が長い路線はマンホールのステップなど落差・段差における下水の流れに乱れが生ずる箇所が少ないため下水への酸素供給がされにくい。このため下水性状は嫌気性状態となり H_2S が生成され、微生物による腐食が発生しやすくなる。一方延長が短い路線ではマンホールのステップなど落差・段差箇所が近く、攪拌により下水から拡散した H_2S 濃度が高くなりやすく、微生物による腐食が促進されると推察される。

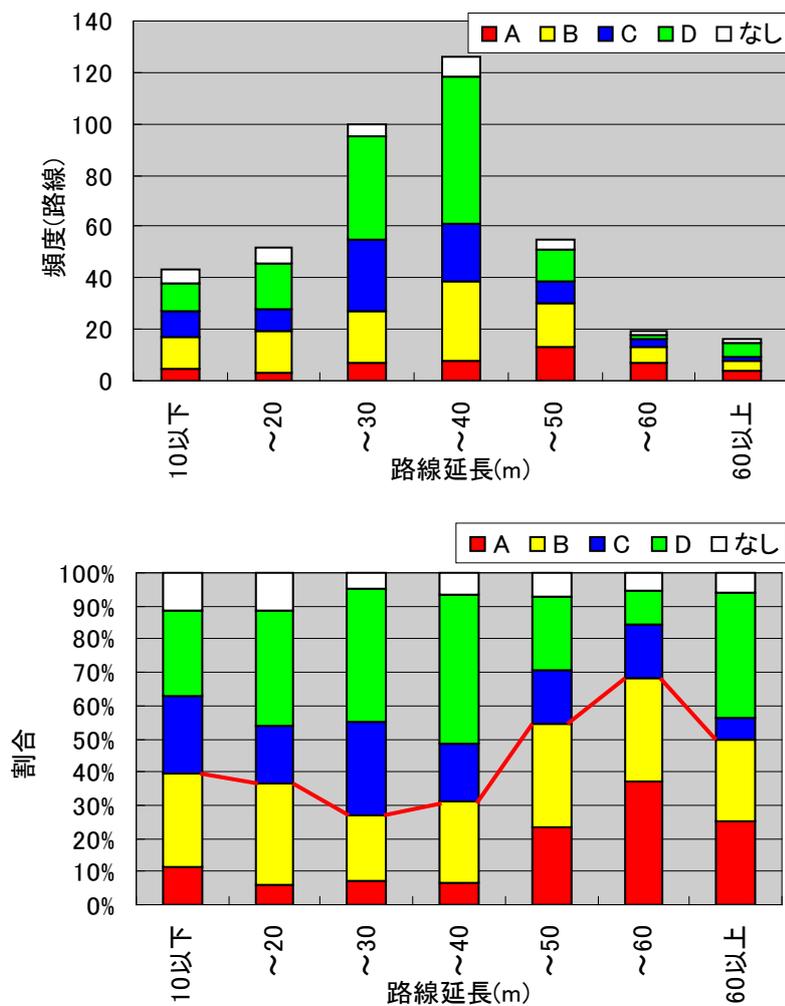


図-2.5 路線延長別のヒストグラムおよび腐食の割合

図-2.6 より使用年数の増加に伴い前述の種々の原因から当然腐食も増加しており，使用年数は腐食に関する最も重要な因子であることは明らかである。

以上の結果を踏まえて，これら管径，勾配，路線延長，使用年数といった要素を複合的に処理し，数値化することにより腐食の予測が可能であるか検討を行うべく，本調査データの分析を多変量解析により行うこととした。

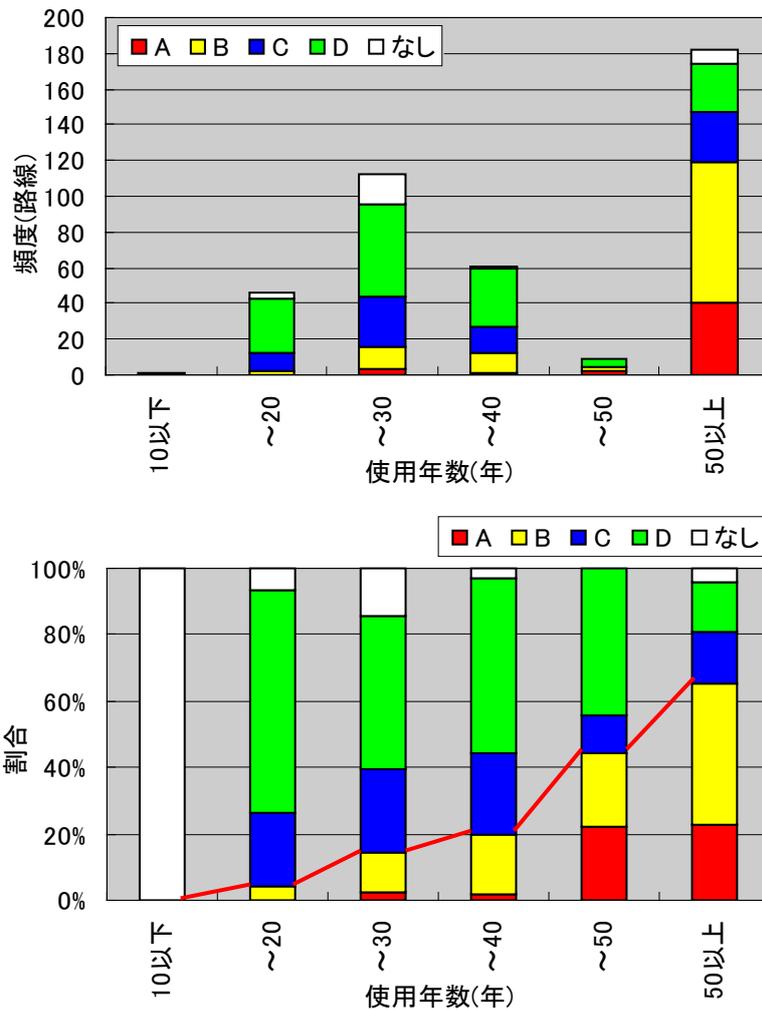


図-2.6 使用年数別のヒストグラムおよび腐食の割合

2. 4 腐食調査データの解析

2. 4. 1 腐食調査データの基本統計量および解析方法

本解析では、既存のデータ（下水道台帳などのデータ）のみで腐食度合いの判別が可能であるかを検討すべく、先の付表-1の調査データの管径、勾配、路線延長、使用年数および腐食ランクを用いて解析を行うこととした。したがって、本分析では現地踏査により得られた情報（腐食箇所の環境、地理的状况、建物の種類、集合住宅の場合世帯数など）加味していない。

まず付表-1の調査データを統計学的に処理する前に、勾配が300%以上など通常の下水道計画・設計では用いない数値で、本集計結果からも明らかに外れ値であり、処理に対して悪影響を及ぼすものや、勾配など量的データが不明な路線は処理の対象外とし、付表-2に示す総路線数397路線とした。この対象路線の基本統計量を求めたものが表-2.3である。

本調査データ（付表-1）は人が入ることが困難な小口径下水道管に対し、管路内調査ロボットにより行った調査であり、また表-2.3の最大値、最小値から分かるとおり、解析対象としたのは管径900mm以下の小口径の一般的な枝線管渠である。

次に付表-2のデータの腐食ランクを構造物（管渠）自体の耐久性に影響を与え早急に再構築が必要とされる重大な腐食度合いであるA・Bランク（以降、『腐食大』と略す）構造物自体への影響は軽微な腐食度合いであるC・Dおよびなし（以降、『腐食小』とする）の2通りに分類し（付表-2備考欄に記す）、多変量解析手法の一つである判別分析法により解析を行った。

判別分析法とはデータが持っている様々な特性から、そのデータがどのグループに属するか判別する手法であり、判別方法には以下の2通りがある。

- ①線型判別関数による判別
- ②マハラノビスの汎距離による判別

これらの判別方法により分析に用いたデータがどのグループに

属するか推定し、実際のグループとの比較により判別の精度を調べる方法²⁻⁵⁾である。

表-2.3 調査データの基本統計量

基本統計量	管径(mm)	勾配(‰)	路線延長(m)	使用年数(年)
サンプル数	397	397	397	397
合計	170830	2467.3	12294.81	19181
平均値	430.3	6.21	30.969	48.3
標準偏差	162.7	8.86	14.630	26.3
分散	26463.9	78.54	214.033	690.6
範囲	650	124.7	75.20	72
最小値	250	-51.5	1.80	10
最大値	900	73.2	77.00	82
中央値	400	5.3	31.35	33
変動係数	0.38	1.428	0.4730	0.54

2. 4. 2 判別分析法による腐食判定

判別分析に使用したデータは付表-2に示した397路線であり、目的変数は前述の『腐食大』と『腐食小』、説明変数は『管径』、『勾配』、『路線延長』、『使用年数』の4つである。

このデータの平均値、標準偏差、分散共分散マトリックスおよび相関マトリックスの計算結果は次の表-2.4～表-2.11に示す通りである。

表-2.4 調査データの平均値

平均	サンプル数	管径 (mm)	勾配 (%)	路線延長 (m)	使用年数 (年)
全体	397	430	6.2	30.97	48
腐食大	151	541	6.6	33.21	67
腐食小	246	363	6.0	29.59	37

表-2.5 調査データの標準偏差

標準偏差	サンプル数	管径 (mm)	勾配 (%)	路線延長 (m)	使用年数 (年)
全体	397	163	8.9	14.63	26
腐食大	151	135	13.4	16.98	20
腐食小	246	139	4.1	12.78	23

表-2.6 分散共分散マトリックス『全体』

全体	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	26465	-294.0	368.92	1165
勾配	-294.0	78.5	-8.65	18.2
路線延長	368.92	-8.65	214.03	20.45
使用年数	1165	18.2	20.45	691

表-2.7 分散共分散マトリックス『腐食大』

腐食大	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	18271	-396.9	112.23	329
勾配	-396.9	179.2	-19.01	41.4
路線延長	112.23	-19.01	288.42	-29.96
使用年数	329	41.4	-29.96	409

表-2.8 分散共分散マトリックス『腐食小』

腐食小	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	19457	-277.1	281.33	-385
勾配	-277.1	16.6	-3.23	-4.0
路線延長	281.33	-3.23	163.38	9.38
使用年数	-385	-4.0	9.38	510

表-2.9 相関マトリックス『全体』

全体	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	1.0000	-0.2039	0.1550	0.2725
勾配	-0.2039	1.0000	-0.0667	0.0780
路線延長	0.1550	-0.0667	1.0000	0.0532
使用年数	0.2725	0.0780	0.0532	1.0000

表-2.10 相関マトリックス『腐食大』

腐食大	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	1.0000	-0.2194	0.0489	0.1203
勾配	-0.2194	1.0000	-0.0836	0.1529
路線延長	0.0489	-0.0836	1.0000	-0.0872
使用年数	0.1203	0.1529	-0.0872	1.0000

表-2.11 相関マトリックス『腐食小』

腐食小	管径	勾配	路線延長	使用年数
管径	1.0000	-0.4878	0.1578	-0.1222
勾配	-0.4878	1.0000	-0.0621	-0.0439
路線延長	0.1578	-0.0621	1.0000	0.0325
使用年数	-0.1222	-0.0439	0.0325	1.0000

これらのマトリックスと調査データを用い、線型判別関数またはマハラノビスの汎距離の式を導き出し、判別分析を行うわけであるが、一般的に判別分析法を適応させる場合、分類するグループ（ここでは『腐食大』と『腐食小』の2グループ）の分散共分散行列の相等性の検定を行い、分散共分散行列が等しい場合は線型判別関数による判別、それ以外場合はマハラノビスの汎距離による判別が適しているとされている。

しかし今回の解析ではどちらが本判別に適しているのか調べる

ことを目的としているため『線型判別関数による判別』と『マハラノビスの汎距離による判別』の両方法について検討を行った.

2. 4. 2. 1 線型判別関数による判別

前記の全体の分散共分散マトリックスと、調査データから解析を行い得られた判別係数は以下の通りである。

変数名	判別係数
管径(mm)	0.0103
勾配(‰)	0.0411
路線延長(m)	0.0100
使用年数(年)	0.0658
定数項	-8.6362

また線型判別関数で表すと以下の式となる。

$$Y = 0.0103 \times X_1 + 0.0411 \times X_2 + 0.0100 \times X_3 + 0.0658 \times X_4 - 8.6362 \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

Y : 判別得点

X₁ : 管径(mm)

X₂ : 勾配(‰)

X₃ : 路線延長(m)

X₄ : 使用年数(年)

ここで判別得点より以下の通り判別される。

Y > 0 のとき 『腐食大』

Y < 0 のとき 『腐食小』

Y = 0 のとき どちらとも言えない

(2.1)式と付表-2のデータから得られた判別得点および判別結果を表-2.12、判別的中率を表-2.13に示した。

判別結果は表の右側に○×で示してあり、『腐食大』における的中率は86.1%、『腐食小』では82.5%と『腐食小』の誤判別率が高くなるが、危険側でなく安全側（腐食小なのに腐食大と判別）の誤判別

なので影響は少ないものといえる。また，全体における判別的中率は 83.9%と比較的良好な精度で判別可能である。

また，表-2.12 の判別得点の分布図を図-2.7 に示した。分布図より 0~1 における判別精度が低く，この区間の得点を持つ路線については判別結果に関わらず『腐食大』として取り扱うことで，誤判別の危険性を低減できるといえる。

表-2.12 線形判別関数による判別得点および判別結果(1)

データNo.	真の群	判別得点	判別群	判別結果
1	腐食小	-1.2628	腐食小	○
2	腐食小	-1.7228	腐食小	○
3	腐食小	-2.5674	腐食小	○
4	腐食大	-2.5674	腐食小	×
5	腐食小	-2.7774	腐食小	○
6	腐食大	2.2628	腐食大	○
7	腐食大	0.8597	腐食大	○
8	腐食大	0.5194	腐食大	○
9	腐食大	0.6701	腐食大	○
10	腐食大	1.9660	腐食大	○
11	腐食大	1.2552	腐食大	○
12	腐食大	5.5542	腐食大	○
13	腐食大	2.7741	腐食大	○
14	腐食大	4.3319	腐食大	○
15	腐食大	4.4551	腐食大	○
16	腐食大	4.9022	腐食大	○
17	腐食大	4.4569	腐食大	○
18	腐食大	4.2222	腐食大	○
19	腐食大	1.0903	腐食大	○
20	腐食大	1.1543	腐食大	○
21	腐食大	2.8165	腐食大	○
22	腐食大	2.8509	腐食大	○
23	腐食大	2.7710	腐食大	○
24	腐食大	3.7270	腐食大	○
25	腐食大	3.7711	腐食大	○
26	腐食大	3.9291	腐食大	○
27	腐食大	-3.7866	腐食小	×
28	腐食小	-3.7224	腐食小	○
29	腐食小	-3.3701	腐食小	○
30	腐食小	-3.3212	腐食小	○
31	腐食小	-3.2888	腐食小	○
32	腐食大	-1.9998	腐食小	×
33	腐食小	-1.4092	腐食小	○
34	腐食小	-3.7670	腐食小	○
35	腐食小	-3.7141	腐食小	○
36	腐食小	-3.3392	腐食小	○
37	腐食小	-3.1957	腐食小	○
38	腐食大	3.0516	腐食大	○
39	腐食大	2.6968	腐食大	○
40	腐食大	2.7195	腐食大	○
41	腐食小	1.7316	腐食大	×
42	腐食小	1.1787	腐食大	×
43	腐食小	1.4059	腐食大	×
44	腐食大	2.3101	腐食大	○
45	腐食小	-4.2439	腐食小	○
46	腐食小	-3.7700	腐食小	○
47	腐食大	1.7843	腐食大	○
48	腐食大	1.8516	腐食大	○
49	腐食大	3.3725	腐食大	○
50	腐食大	3.3221	腐食大	○
51	腐食大	3.3530	腐食大	○
52	腐食小	-3.0742	腐食小	○
53	腐食小	-2.6003	腐食小	○
54	腐食小	-0.9749	腐食小	○
55	腐食小	-0.9619	腐食小	○
56	腐食小	0.0324	腐食大	×
57	腐食小	-3.0231	腐食小	○
58	腐食小	-2.4992	腐食小	○
59	腐食大	-1.0713	腐食小	×
60	腐食大	-1.0663	腐食小	×
61	腐食小	-1.7111	腐食小	○
62	腐食小	-1.7131	腐食小	○
63	腐食小	0.2178	腐食大	×
64	腐食小	-1.1268	腐食小	○
65	腐食小	-3.4126	腐食小	○
66	腐食大	0.2299	腐食大	○
67	腐食小	-0.9909	腐食小	○

データNo.	真の群	判別得点	判別群	判別結果
68	腐食大	0.1012	腐食大	○
69	腐食大	0.1475	腐食大	○
70	腐食大	1.4170	腐食大	○
71	腐食小	1.7750	腐食大	×
72	腐食小	1.6316	腐食大	×
73	腐食小	-3.5335	腐食小	○
74	腐食小	-0.1082	腐食小	○
75	腐食小	1.4389	腐食大	×
76	腐食小	-1.3157	腐食小	○
77	腐食小	1.4986	腐食大	×
78	腐食小	-4.3672	腐食小	○
79	腐食小	-3.3697	腐食小	○
80	腐食小	-2.8547	腐食小	○
81	腐食小	-4.0914	腐食小	○
82	腐食小	-3.3826	腐食小	○
83	腐食小	-2.9157	腐食小	○
84	腐食小	-3.1432	腐食小	○
85	腐食小	-3.5836	腐食小	○
86	腐食小	-4.0464	腐食小	○
87	腐食小	-2.6047	腐食小	○
88	腐食小	1.0203	腐食大	×
89	腐食小	-0.3452	腐食小	○
90	腐食大	-0.3232	腐食小	×
91	腐食小	-3.3766	腐食小	○
92	腐食小	-3.0986	腐食小	○
93	腐食小	-3.5773	腐食小	○
94	腐食小	-3.5673	腐食小	○
95	腐食小	-2.2504	腐食小	○
96	腐食大	1.8603	腐食大	○
97	腐食大	1.9011	腐食大	○
98	腐食大	1.4827	腐食大	○
99	腐食大	1.3912	腐食大	○
100	腐食小	-3.5925	腐食小	○
101	腐食小	-3.5825	腐食小	○
102	腐食小	-4.2550	腐食小	○
103	腐食小	-4.4916	腐食小	○
104	腐食小	-4.4532	腐食小	○
105	腐食小	-4.4612	腐食小	○
106	腐食小	-4.5412	腐食小	○
107	腐食小	-4.5312	腐食小	○
108	腐食小	-3.9439	腐食小	○
109	腐食大	1.5621	腐食大	○
110	腐食大	3.0683	腐食大	○
111	腐食大	3.4917	腐食大	○
112	腐食小	-4.0464	腐食小	○
113	腐食小	-3.8726	腐食小	○
114	腐食小	-3.8726	腐食小	○
115	腐食小	-3.8962	腐食小	○
116	腐食小	-3.9112	腐食小	○
117	腐食小	-4.0342	腐食小	○
118	腐食小	-3.3820	腐食小	○
119	腐食小	-2.6377	腐食小	○
120	腐食小	-1.7847	腐食小	○
121	腐食小	-4.0694	腐食小	○
122	腐食小	-3.7887	腐食小	○
123	腐食小	-3.6864	腐食小	○
124	腐食大	-3.9547	腐食小	×
125	腐食小	-0.0441	腐食小	○
126	腐食小	-2.8022	腐食小	○
127	腐食小	-2.6679	腐食小	○
128	腐食小	-1.5002	腐食小	○
129	腐食大	1.5468	腐食大	○
130	腐食大	1.7601	腐食大	○
131	腐食大	1.5736	腐食大	○
132	腐食小	0.8744	腐食大	×
133	腐食大	3.2630	腐食大	○
134	腐食小	-3.9253	腐食小	○

表-2.12 線形判別関数による判別得点および判別結果(2)

データNo.	真の群	判別得点	判別群	判別結果
135	腐食小	-3.4643	腐食小	○
136	腐食小	-2.9153	腐食小	○
137	腐食小	2.0033	腐食大	×
138	腐食大	1.2183	腐食大	○
139	腐食大	2.6138	腐食大	○
140	腐食大	2.5712	腐食大	○
141	腐食大	3.4909	腐食大	○
142	腐食大	3.4226	腐食大	○
143	腐食大	3.4065	腐食大	○
144	腐食大	4.9095	腐食大	○
145	腐食大	6.0134	腐食大	○
146	腐食大	3.5646	腐食大	○
147	腐食大	2.8597	腐食大	○
148	腐食大	4.2107	腐食大	○
149	腐食小	1.5276	腐食大	×
150	腐食大	-0.0220	腐食小	×
151	腐食大	2.5100	腐食大	○
152	腐食大	4.6337	腐食大	○
153	腐食小	-3.2627	腐食小	○
154	腐食小	-2.3341	腐食小	○
155	腐食小	-3.6677	腐食小	○
156	腐食小	-3.2685	腐食小	○
157	腐食小	-2.1369	腐食小	○
158	腐食小	-0.8360	腐食小	○
159	腐食小	0.1747	腐食大	×
160	腐食小	1.2713	腐食大	×
161	腐食大	1.7898	腐食大	○
162	腐食大	1.8366	腐食大	○
163	腐食大	1.8541	腐食大	○
164	腐食大	2.6702	腐食大	○
165	腐食小	-0.8099	腐食小	○
166	腐食小	0.6636	腐食大	×
167	腐食大	3.1056	腐食大	○
168	腐食大	-1.3454	腐食小	×
169	腐食大	1.9767	腐食大	○
170	腐食大	2.0602	腐食大	○
171	腐食大	3.4920	腐食大	○
172	腐食大	3.1905	腐食大	○
173	腐食大	3.6114	腐食大	○
174	腐食大	3.4689	腐食大	○
175	腐食大	4.0700	腐食大	○
176	腐食大	4.0988	腐食大	○
177	腐食大	3.8680	腐食大	○
178	腐食大	3.9768	腐食大	○
179	腐食大	4.2409	腐食大	○
180	腐食大	2.7629	腐食大	○
181	腐食大	4.2332	腐食大	○
182	腐食大	4.0178	腐食大	○
183	腐食大	5.3162	腐食大	○
184	腐食大	5.3112	腐食大	○
185	腐食小	-0.1675	腐食小	○
186	腐食小	-0.3272	腐食小	○
187	腐食小	0.3633	腐食大	×
188	腐食小	-3.5765	腐食小	○
189	腐食小	-2.4934	腐食小	○
190	腐食小	-2.0148	腐食小	○
191	腐食小	-1.0570	腐食小	○
192	腐食大	0.1476	腐食大	○
193	腐食小	-4.6784	腐食小	○
194	腐食小	-2.7860	腐食小	○
195	腐食小	-2.7549	腐食小	○
196	腐食小	-0.2500	腐食小	○
197	腐食小	-0.2700	腐食小	○
198	腐食小	-3.4756	腐食小	○
199	腐食小	-3.0050	腐食小	○
200	腐食小	-3.1946	腐食小	○
201	腐食小	-2.6705	腐食小	○

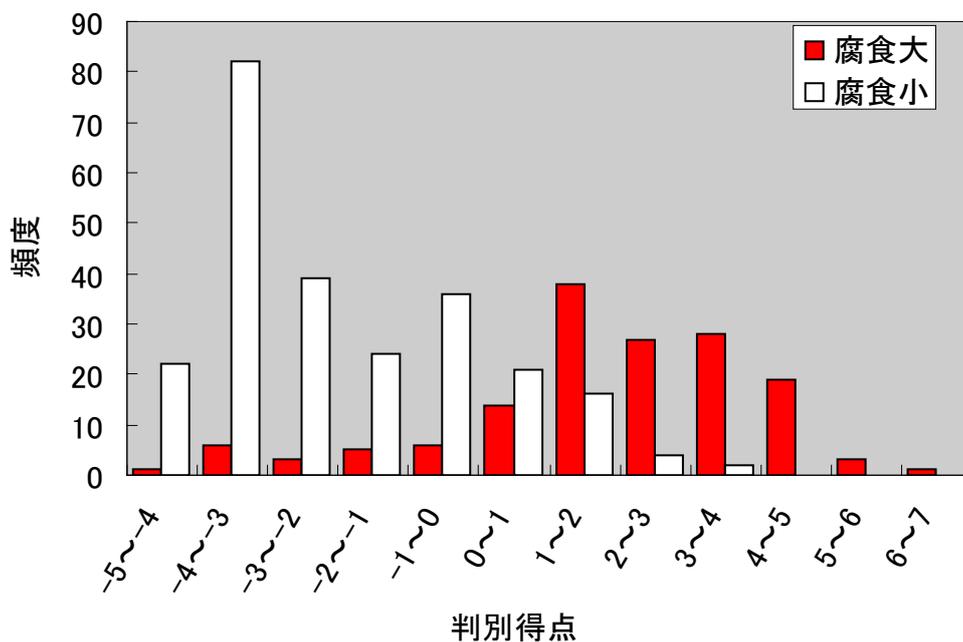
データNo.	真の群	判別得点	判別群	判別結果
202	腐食小	-3.9831	腐食小	○
203	腐食小	-3.7298	腐食小	○
204	腐食小	-3.9969	腐食小	○
205	腐食小	-4.0018	腐食小	○
206	腐食小	-3.2860	腐食小	○
207	腐食小	-2.3515	腐食小	○
208	腐食大	1.6497	腐食大	○
209	腐食大	2.4701	腐食大	○
210	腐食大	2.3347	腐食大	○
211	腐食大	2.8786	腐食大	○
212	腐食大	2.7481	腐食大	○
213	腐食大	2.8002	腐食大	○
214	腐食大	2.7429	腐食大	○
215	腐食小	2.5606	腐食大	×
216	腐食大	2.3724	腐食大	○
217	腐食大	2.3973	腐食大	○
218	腐食大	1.1543	腐食大	○
219	腐食大	0.7590	腐食大	○
220	腐食大	-1.7824	腐食小	×
221	腐食小	-0.4168	腐食小	○
222	腐食小	-0.4434	腐食小	○
223	腐食小	-1.8375	腐食小	○
224	腐食小	-1.7576	腐食小	○
225	腐食小	-1.5202	腐食小	○
226	腐食小	-0.4468	腐食小	○
227	腐食大	3.3464	腐食大	○
228	腐食小	-3.1502	腐食小	○
229	腐食小	-3.3285	腐食小	○
230	腐食小	-2.9035	腐食小	○
231	腐食大	1.9691	腐食大	○
232	腐食小	-3.6439	腐食小	○
233	腐食小	-3.9108	腐食小	○
234	腐食大	3.3170	腐食大	○
235	腐食大	4.3126	腐食大	○
236	腐食大	4.3716	腐食大	○
237	腐食大	4.8351	腐食大	○
238	腐食小	-0.3084	腐食小	○
239	腐食小	-3.2310	腐食小	○
240	腐食小	-2.9174	腐食小	○
241	腐食小	-2.8246	腐食小	○
242	腐食小	-2.2719	腐食小	○
243	腐食小	-1.9187	腐食小	○
244	腐食小	-1.1447	腐食小	○
245	腐食小	-1.2006	腐食小	○
246	腐食小	-3.4586	腐食小	○
247	腐食小	-3.0722	腐食小	○
248	腐食小	-3.5707	腐食小	○
249	腐食小	-2.8881	腐食小	○
250	腐食小	-4.2538	腐食小	○
251	腐食小	-4.3703	腐食小	○
252	腐食小	-3.3394	腐食小	○
253	腐食小	-3.2064	腐食小	○
254	腐食小	-3.4781	腐食小	○
255	腐食小	-3.7811	腐食小	○
256	腐食大	-3.2656	腐食小	×
257	腐食小	-3.0274	腐食小	○
258	腐食小	-2.3015	腐食小	○
259	腐食小	-0.7417	腐食小	○
260	腐食小	-2.5156	腐食小	○
261	腐食小	-2.3231	腐食小	○
262	腐食小	-0.3989	腐食小	○
263	腐食小	-0.1693	腐食小	○
264	腐食小	0.4923	腐食大	×
265	腐食小	-0.0309	腐食小	○
266	腐食小	0.9692	腐食大	×
267	腐食小	1.0021	腐食大	×
268	腐食小	0.9839	腐食大	×

表-2.12 線形判別関数による判別得点および判別結果(3)

データNo.	真の群	判別得点	判別群	判別結果
269	腐食小	0.9005	腐食大	×
270	腐食小	0.8620	腐食大	×
271	腐食小	-3.3302	腐食小	○
272	腐食小	-2.2742	腐食小	○
273	腐食小	-0.6113	腐食小	○
274	腐食小	-0.0911	腐食小	○
275	腐食小	-0.1407	腐食小	○
276	腐食大	-2.6744	腐食小	×
277	腐食大	-3.1950	腐食小	×
278	腐食大	1.3550	腐食大	○
279	腐食大	1.2786	腐食大	○
280	腐食大	1.4873	腐食大	○
281	腐食大	1.1374	腐食大	○
282	腐食大	1.1212	腐食大	○
283	腐食大	2.0117	腐食大	○
284	腐食大	1.9528	腐食大	○
285	腐食大	3.1524	腐食大	○
286	腐食大	3.6217	腐食大	○
287	腐食大	0.5058	腐食大	○
288	腐食大	1.1897	腐食大	○
289	腐食小	1.5049	腐食大	×
290	腐食大	3.1092	腐食大	○
291	腐食大	2.9601	腐食大	○
292	腐食小	3.3040	腐食大	×
293	腐食大	1.6107	腐食大	○
294	腐食大	1.6774	腐食大	○
295	腐食大	1.2190	腐食大	○
296	腐食大	1.6621	腐食大	○
297	腐食大	3.1100	腐食大	○
298	腐食小	0.1146	腐食大	×
299	腐食大	1.0123	腐食大	○
300	腐食大	1.7252	腐食大	○
301	腐食大	-1.7553	腐食小	×
302	腐食大	-0.7323	腐食小	×
303	腐食小	-1.1132	腐食小	○
304	腐食大	-0.9237	腐食小	×
305	腐食大	0.3132	腐食大	○
306	腐食大	0.1174	腐食大	○
307	腐食小	-0.0872	腐食小	○
308	腐食小	-0.2441	腐食小	○
309	腐食小	-0.1753	腐食小	○
310	腐食小	0.0482	腐食大	×
311	腐食小	-3.6313	腐食小	○
312	腐食小	-3.1269	腐食小	○
313	腐食大	2.6555	腐食大	○
314	腐食大	0.5714	腐食大	○
315	腐食大	0.5032	腐食大	○
316	腐食大	0.8893	腐食大	○
317	腐食大	1.2708	腐食大	○
318	腐食大	4.3689	腐食大	○
319	腐食小	-0.2020	腐食小	○
320	腐食小	1.3162	腐食大	×
321	腐食小	1.2596	腐食大	×
322	腐食小	1.6472	腐食大	×
323	腐食小	1.6034	腐食大	×
324	腐食小	2.6265	腐食大	×
325	腐食小	-4.0304	腐食小	○
326	腐食小	-3.9794	腐食小	○
327	腐食小	-3.6216	腐食小	○
328	腐食小	-3.9063	腐食小	○
329	腐食小	-3.3234	腐食小	○
330	腐食小	-3.8940	腐食小	○
331	腐食小	-3.8915	腐食小	○
332	腐食小	-3.7464	腐食小	○
333	腐食小	-3.4803	腐食小	○
334	腐食小	-3.4864	腐食小	○
335	腐食小	-3.6467	腐食小	○
336	腐食小	-3.6056	腐食小	○
337	腐食小	-2.6699	腐食小	○
338	腐食小	-2.5737	腐食小	○
339	腐食小	-4.0929	腐食小	○
340	腐食大	-4.0525	腐食小	×
341	腐食小	-4.3635	腐食小	○
342	腐食小	-2.6362	腐食小	○
343	腐食小	-4.0237	腐食小	○
344	腐食小	-3.4550	腐食小	○
345	腐食小	-3.5937	腐食小	○
346	腐食小	-3.5149	腐食小	○
347	腐食大	-3.7927	腐食小	×
348	腐食小	-3.8333	腐食小	○
349	腐食大	-3.3946	腐食小	×
350	腐食小	-3.0225	腐食小	○
351	腐食小	-3.3433	腐食小	○
352	腐食大	1.9374	腐食大	○
353	腐食小	2.2159	腐食大	×
354	腐食小	3.1988	腐食大	×
355	腐食大	3.5353	腐食大	○
356	腐食小	-0.2717	腐食小	○
357	腐食小	-0.3757	腐食小	○
358	腐食小	0.1607	腐食大	×
359	腐食小	-0.2451	腐食小	○
360	腐食小	-0.4929	腐食小	○
361	腐食小	-0.1112	腐食小	○
362	腐食小	-3.7600	腐食小	○
363	腐食小	2.5895	腐食大	×
364	腐食小	-1.5867	腐食小	○
365	腐食小	0.1873	腐食大	×
366	腐食小	0.4103	腐食大	×
367	腐食小	-3.2051	腐食小	○
368	腐食小	-0.1035	腐食小	○
369	腐食小	-0.1186	腐食小	○
370	腐食大	-0.0884	腐食小	×
371	腐食小	-0.3569	腐食小	○
372	腐食小	0.9661	腐食大	×
373	腐食小	-3.1591	腐食小	○
374	腐食小	-3.1591	腐食小	○
375	腐食小	-2.8256	腐食小	○
376	腐食小	-2.3308	腐食小	○
377	腐食小	-1.7393	腐食小	○
378	腐食小	-3.3485	腐食小	○
379	腐食小	-0.0762	腐食小	○
380	腐食小	-2.3803	腐食小	○
381	腐食小	-2.1349	腐食小	○
382	腐食小	-2.2739	腐食小	○
383	腐食小	-1.8947	腐食小	○
384	腐食小	-1.7612	腐食小	○
385	腐食小	-1.9267	腐食小	○
386	腐食小	-2.0107	腐食小	○
387	腐食大	4.8268	腐食大	○
388	腐食大	4.9606	腐食大	○
389	腐食小	-1.3366	腐食小	○
390	腐食小	-2.3363	腐食小	○
391	腐食小	-2.4024	腐食小	○
392	腐食小	-1.8640	腐食小	○
393	腐食大	2.0869	腐食大	○
394	腐食小	0.3881	腐食大	×
395	腐食小	0.3676	腐食大	×
396	腐食大	-0.0128	腐食小	×
397	腐食小	0.3266	腐食大	×

表－2.13 線形判別関数による判別的中率

真の群	判別された群		的中率
	腐食大	腐食小	
腐食大	130	21	86.1%
腐食小	43	203	82.5%
判別的中率			83.9%



図－2.7 判別得点の分布図

2. 4. 2. 2 マハラノビスの汎距離による判別

マハラノビスの汎距離の式は下記の(2.2)式で与えられ、各グループの式に各説明変数を代入し、それぞれ得られた数値を比較することにより、どちらのグループに属するか判別する方法である。

《マハラノビスの汎距離の式》

$$D^2 = [x_{1i} - \bar{x}_1, x_{2i} - \bar{x}_2, x_{3i} - \bar{x}_3, x_{4i} - \bar{x}_4] \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{1i} - \bar{x}_1 \\ x_{2i} - \bar{x}_2 \\ x_{3i} - \bar{x}_3 \\ x_{4i} - \bar{x}_4 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2.2)$$

$x_{1i} - \bar{x}_1$: i 番目のデータにおける管径の偏差

$x_{2i} - \bar{x}_2$: i 番目のデータにおける勾配の偏差

$x_{3i} - \bar{x}_3$: i 番目のデータにおける路線延長の偏差

$x_{4i} - \bar{x}_4$: i 番目のデータにおける使用年数の偏差

$S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{44}$: 『腐食大』または『腐食小』における管径, 勾配, 路線延長, 使用年数の分散

S_{12}, S_{21} : 『腐食大』または『腐食小』における管径と勾配の共分散

S_{13}, S_{31} : 『腐食大』または『腐食小』における管径と路線延長の共分散

S_{14}, S_{41} : 『腐食大』または『腐食小』における管径と使用年数の共分散

S_{23}, S_{32} : 『腐食大』または『腐食小』における勾配と路線延長の共分散

S_{24}, S_{42} : 『腐食大』または『腐食小』における勾配と使用年数の共分散

S_{34}, S_{43} : 『腐食大』または『腐食小』における路線延長と使用年数の共分散

《判別方法》

(2.2)式に管径, 勾配, 路線延長, 使用年数のデータを代入し 4×4 の行列式に前記の分散共分散の『腐食大』または『腐食小』の数値を用い計算を行う。

計算結果は以下の通り判別される。

$D_{腐食大}^2 > D_{腐食小}^2$ の時・・・『腐食大』

$D_{腐食大}^2 < D_{腐食小}^2$ の時・・・『腐食小』

$D_{腐食大}^2 = D_{腐食小}^2$ の時・・・判別不能

今回説明変数が4つであり(2.2)式に示す 4×4 の行列式となり、計算が複雑化するため途中計算は省略し結果のみを表-2.14に示した。

この2群の重心の距離のマハラノビスの平方距離は3.8989であり誤判別の確率は16.18%となり線型判別関数により得られた判別結果とほぼ一致しており(判別的中率と誤判別確率とは計算方法が異なるため完全には一致しない.)、線型判別関数またはマハラノビスの汎距離による分析、どちらを用いても本分析においては問題ないといえる。

表-2.14 マハラノビスの汎距離による判別結果(1)

データ No.	真の群	$D_{腐食大}^2$	$D_{腐食小}^2$	判別群	判別結果
1	腐食小	2.1234	4.6583	腐食小	○
2	腐食小	3.3962	6.8552	腐食小	○
3	腐食小	1.5688	6.7123	腐食小	○
4	腐食大	1.5688	6.7123	腐食小	×
5	腐食小	3.8156	9.3810	腐食小	○
6	腐食大	6.9710	2.4647	腐食大	○
7	腐食大	2.7288	1.0239	腐食大	○
8	腐食大	5.3384	4.3172	腐食大	○
9	腐食大	3.0007	1.6768	腐食大	○
10	腐食大	12.8287	8.9099	腐食大	○
11	腐食大	6.5328	4.0420	腐食大	○
12	腐食大	72.7321	61.6455	腐食大	○
13	腐食大	7.8532	2.3257	腐食大	○
14	腐食大	36.3902	27.7496	腐食大	○
15	腐食大	21.2502	12.3641	腐食大	○
16	腐食大	27.9057	18.1249	腐食大	○
17	腐食大	10.7448	1.8535	腐食大	○
18	腐食大	11.8184	3.3985	腐食大	○
19	腐食大	3.6761	1.5096	腐食大	○
20	腐食大	3.8600	1.5657	腐食大	○
21	腐食大	10.7464	5.1303	腐食大	○
22	腐食大	11.1826	5.4978	腐食大	○
23	腐食大	11.4131	5.8900	腐食大	○
24	腐食大	32.1285	24.6944	腐食大	○
25	腐食大	32.8383	25.3159	腐食大	○
26	腐食大	20.8192	12.9820	腐食大	○
27	腐食大	1.0123	8.5924	腐食小	×
28	腐食小	1.0972	8.5489	腐食小	○
29	腐食小	0.5475	7.2958	腐食小	○
30	腐食小	0.5199	7.1702	腐食小	○
31	腐食小	0.5304	7.1160	腐食小	○
32	腐食小	0.6532	4.6619	腐食小	×
33	腐食小	0.3113	3.1403	腐食小	○
34	腐食小	1.1000	8.6412	腐食小	○
35	腐食小	1.1975	8.6330	腐食小	○
36	腐食小	0.5640	7.2501	腐食小	○
37	腐食小	0.6816	7.0807	腐食小	○
38	腐食大	12.6133	6.5256	腐食大	○
39	腐食大	5.8936	0.5182	腐食大	○
40	腐食大	5.8503	0.4296	腐食大	○
41	腐食小	8.5866	5.1370	腐食大	×
42	腐食小	6.5616	4.2227	腐食大	×
43	腐食小	3.8500	1.0547	腐食大	×
44	腐食大	6.3179	1.7143	腐食大	○
45	腐食小	1.4677	9.9622	腐食小	○
46	腐食小	1.0324	8.5803	腐食小	○
47	腐食大	4.6576	1.1059	腐食大	○
48	腐食大	4.8143	1.1288	腐食大	○
49	腐食大	8.3563	1.6305	腐食大	○
50	腐食大	7.6736	1.0508	腐食大	○
51	腐食大	7.7150	1.0305	腐食大	○
52	腐食小	0.8078	6.9645	腐食小	○
53	腐食小	0.3847	5.5948	腐食小	○
54	腐食小	0.4659	2.4280	腐食小	○
55	腐食小	0.5178	2.4538	腐食小	○
56	腐食小	6.4339	6.3841	腐食大	×
57	腐食小	0.7298	6.7843	腐食小	○
58	腐食小	0.2273	5.2347	腐食小	○
59	腐食大	0.5100	2.6649	腐食小	×
60	腐食大	0.5244	2.6693	腐食小	×
61	腐食小	0.6696	4.1040	腐食小	○
62	腐食小	0.6890	4.1274	腐食小	○
63	腐食小	4.2251	3.8024	腐食大	×
64	腐食小	2.8569	5.1220	腐食小	○
65	腐食小	0.7522	7.5848	腐食小	○
66	腐食大	4.0874	3.6423	腐食大	○
67	腐食小	4.0615	6.0580	腐食小	○

データ No.	真の群	$D_{腐食大}^2$	$D_{腐食小}^2$	判別群	判別結果
68	腐食大	3.3594	3.1725	腐食大	○
69	腐食大	3.4527	3.1731	腐食大	○
70	腐食大	12.2718	9.4602	腐食大	○
71	腐食小	9.4308	5.8991	腐食大	×
72	腐食小	8.3605	5.1169	腐食大	×
73	腐食小	1.0070	8.0825	腐食小	○
74	腐食小	4.5168	4.7453	腐食小	○
75	腐食小	3.7367	0.8748	腐食大	×
76	腐食小	6.4241	9.0718	腐食小	○
77	腐食小	5.7622	2.7829	腐食大	×
78	腐食小	3.0413	11.7799	腐食小	○
79	腐食小	0.9777	7.7252	腐食小	○
80	腐食小	1.0456	6.7644	腐食小	○
81	腐食小	2.3534	10.5446	腐食小	○
82	腐食小	0.7855	7.5577	腐食小	○
83	腐食小	0.2932	6.1330	腐食小	○
84	腐食小	2.4688	8.7657	腐食小	○
85	腐食小	1.3984	8.5721	腐食小	○
86	腐食小	1.6593	9.7576	腐食小	○
87	腐食小	1.0217	6.2402	腐食小	○
88	腐食小	6.6327	4.6097	腐食大	×
89	腐食小	4.0719	4.7731	腐食小	○
90	腐食大	4.2872	4.9442	腐食小	×
91	腐食小	4.1117	10.8764	腐食小	○
92	腐食小	1.1914	7.3976	腐食小	○
93	腐食小	0.7452	7.9078	腐食小	○
94	腐食小	0.7105	7.8530	腐食小	○
95	腐食小	4.3798	8.8881	腐食小	○
96	腐食大	5.2405	1.5355	腐食大	○
97	腐食大	5.3784	1.5918	腐食大	○
98	腐食大	4.3126	1.3622	腐食大	○
99	腐食大	3.6852	0.9187	腐食大	○
100	腐食小	0.9969	8.1888	腐食小	○
101	腐食小	1.0591	8.2309	腐食小	○
102	腐食小	3.3805	11.8958	腐食小	○
103	腐食小	2.4806	11.4687	腐食小	○
104	腐食小	2.0841	10.9956	腐食小	○
105	腐食小	2.0310	10.9586	腐食小	○
106	腐食小	1.8371	10.9254	腐食小	○
107	腐食小	1.8279	10.8960	腐食小	○
108	腐食小	2.3172	10.2105	腐食小	○
109	腐食大	4.7930	1.6839	腐食大	○
110	腐食大	6.9050	0.7877	腐食大	○
111	腐食大	8.2627	1.2999	腐食大	○
112	腐食小	1.6593	9.7576	腐食小	○
113	腐食小	1.3580	9.1094	腐食小	○
114	腐食小	1.3580	9.1094	腐食小	○
115	腐食小	1.0806	8.8799	腐食小	○
116	腐食小	1.1300	8.9595	腐食小	○
117	腐食小	2.3470	10.4236	腐食小	○
118	腐食小	3.3555	10.1302	腐食小	○
119	腐食小	0.7232	6.0087	腐食小	○
120	腐食小	2.8138	6.3966	腐食小	○
121	腐食小	1.3009	9.4465	腐食小	○
122	腐食小	1.3386	8.9233	腐食小	○
123	腐食小	1.5423	8.9224	腐食小	○
124	腐食大	1.2375	9.1530	腐食小	×
125	腐食小	4.6907	4.7904	腐食小	○
126	腐食小	1.3245	6.9397	腐食小	○
127	腐食小	1.2628	6.6095	腐食小	○
128	腐食小	3.6429	6.6528	腐食小	○
129	腐食大	6.8522	3.7774	腐食大	○
130	腐食大	4.4604	0.9571	腐食大	○
131	腐食大	6.1677	3.0390	腐食大	○
132	腐食小	4.4852	2.7498	腐食大	×
133	腐食大	8.7023	2.1986	腐食大	○
134	腐食小	1.3906	9.2474	腐食小	○

表-2.14 マハラノビスの汎距離による判別結果(2)

データ No.	真の群	$D_{腐食大}^2$	$D_{腐食小}^2$	判別群	判別結果
135	腐食小	0.9697	7.9062	腐食小	○
136	腐食小	1.0713	6.9108	腐食小	○
137	腐食小	5.0344	1.0446	腐食大	×
138	腐食大	4.3985	1.9768	腐食大	○
139	腐食大	5.9573	0.7475	腐食大	○
140	腐食大	5.9800	0.8554	腐食大	○
141	腐食大	8.4392	1.4768	腐食大	○
142	腐食大	8.4250	1.5991	腐食大	○
143	腐食大	8.2735	1.4799	腐食大	○
144	腐食大	13.2295	3.4337	腐食大	○
145	腐食大	19.5556	7.5529	腐食大	○
146	腐食大	9.9603	2.8535	腐食大	○
147	腐食大	6.5315	0.8328	腐食大	○
148	腐食大	42.6444	34.2460	腐食大	○
149	腐食小	4.0053	0.9655	腐食大	×
150	腐食大	7.4520	7.5141	腐食小	×
151	腐食大	22.8722	17.8708	腐食大	○
152	腐食大	29.5808	20.3422	腐食大	○
153	腐食小	1.2746	7.8075	腐食小	○
154	腐食小	1.3487	6.0282	腐食小	○
155	腐食小	1.3466	8.6892	腐食小	○
156	腐食小	1.1350	7.6787	腐食小	○
157	腐食小	0.9036	7.1845	腐食小	○
158	腐食小	8.9071	10.5925	腐食小	○
159	腐食小	7.5455	7.2060	腐食大	×
160	腐食小	4.1177	1.5904	腐食大	×
161	腐食大	6.5333	2.9708	腐食大	○
162	腐食大	4.5928	0.9358	腐食大	○
163	腐食大	5.0257	1.3332	腐食大	○
164	腐食大	8.3511	3.0319	腐食大	○
165	腐食小	7.7630	9.3943	腐食小	○
166	腐食小	12.2928	10.9861	腐食大	×
167	腐食大	28.2462	22.0568	腐食大	○
168	腐食大	0.4677	3.1708	腐食小	×
169	腐食大	4.6909	0.7541	腐食大	○
170	腐食大	5.2398	1.1356	腐食大	○
171	腐食大	9.3425	2.3773	腐食大	○
172	腐食大	7.7163	1.3565	腐食大	○
173	腐食大	10.8396	3.6393	腐食大	○
174	腐食大	13.1588	6.2450	腐食大	○
175	腐食大	12.2243	4.1090	腐食大	○
176	腐食大	10.5284	2.3518	腐食大	○
177	腐食大	12.5513	4.8401	腐食大	○
178	腐食大	12.1953	4.2664	腐食大	○
179	腐食大	11.1936	2.7324	腐食大	○
180	腐食大	22.0256	16.5233	腐食大	○
181	腐食大	10.4493	2.0043	腐食大	○
182	腐食大	12.7250	4.7143	腐食大	○
183	腐食大	21.7390	11.1270	腐食大	○
184	腐食大	16.4904	5.8902	腐食大	○
185	腐食小	4.5436	4.8903	腐食小	○
186	腐食小	5.1173	5.7846	腐食小	○
187	腐食小	4.1019	3.3886	腐食大	×
188	腐食小	0.8744	8.0341	腐食小	○
189	腐食小	0.2752	5.2711	腐食小	○
190	腐食小	0.2902	4.3302	腐食小	○
191	腐食小	1.5481	3.6744	腐食小	○
192	腐食大	4.4855	4.2046	腐食大	○
193	腐食小	3.8774	13.2377	腐食小	○
194	腐食小	0.2801	5.8606	腐食小	○
195	腐食小	0.3872	5.9053	腐食小	○
196	腐食小	4.3926	4.9037	腐食小	○
197	腐食小	4.2778	4.8291	腐食小	○
198	腐食小	0.9936	7.9514	腐食小	○
199	腐食小	0.5396	6.5574	腐食小	○
200	腐食小	0.8114	7.2076	腐食小	○
201	腐食小	0.4593	5.8085	腐食小	○
202	腐食小	1.1759	9.1484	腐食小	○
203	腐食小	1.8248	9.2911	腐食小	○
204	腐食小	1.1699	9.1701	腐食小	○
205	腐食小	1.2586	9.2691	腐食小	○
206	腐食小	0.7090	7.2886	腐食小	○
207	腐食小	0.0723	4.7850	腐食小	○
208	腐食大	4.5363	1.2529	腐食大	○
209	腐食大	5.3165	0.3945	腐食大	○
210	腐食大	5.4496	0.7993	腐食大	○
211	腐食大	12.4364	6.6945	腐食大	○
212	腐食大	8.0733	2.5937	腐食大	○
213	腐食大	9.2207	3.6364	腐食大	○
214	腐食大	10.0985	4.6285	腐食大	○
215	腐食小	6.6000	1.4962	腐食大	×
216	腐食大	6.8688	2.1441	腐食大	○
217	腐食大	6.1012	1.3260	腐食大	○
218	腐食大	4.1297	1.8357	腐食大	○
219	腐食大	3.6738	2.1699	腐食大	○
220	腐食大	44.0950	47.6728	腐食小	×
221	腐食小	4.2740	5.1193	腐食小	○
222	腐食小	4.3615	5.2598	腐食小	○
223	腐食小	1.3135	5.0001	腐食小	○
224	腐食小	2.0187	5.5443	腐食小	○
225	腐食小	2.4454	5.4997	腐食小	○
226	腐食小	4.7346	5.6416	腐食小	○
227	腐食大	7.6109	0.9393	腐食大	○
228	腐食小	1.4406	7.7474	腐食小	○
229	腐食小	0.8007	7.4647	腐食小	○
230	腐食小	0.4881	6.3031	腐食小	○
231	腐食大	4.6246	0.7033	腐食大	○
232	腐食小	0.9431	8.2376	腐食小	○
233	腐食小	3.6199	11.4506	腐食小	○
234	腐食大	8.2087	1.5940	腐食大	○
235	腐食大	22.9312	14.3311	腐食大	○
236	腐食大	17.2449	8.5285	腐食大	○
237	腐食大	12.7915	3.1451	腐食大	○
238	腐食小	5.1979	5.8277	腐食小	○
239	腐食小	1.0773	7.5460	腐食小	○
240	腐食小	0.8710	6.7154	腐食小	○
241	腐食小	0.2876	5.9455	腐食小	○
242	腐食小	0.1638	4.7172	腐食小	○
243	腐食小	0.1683	4.0163	腐食小	○
244	腐食小	1.0969	3.3976	腐食小	○
245	腐食小	0.5805	2.9938	腐食小	○
246	腐食小	0.8723	7.7972	腐食小	○
247	腐食小	1.1282	7.2805	腐食小	○
248	腐食小	1.0912	8.2398	腐食小	○
249	腐食小	0.3497	6.1340	腐食小	○
250	腐食小	1.6235	10.1372	腐食小	○
251	腐食小	1.6282	10.3752	腐食小	○
252	腐食小	1.4692	8.1541	腐食小	○
253	腐食小	1.2431	7.6650	腐食小	○
254	腐食小	1.2694	8.2339	腐食小	○
255	腐食小	1.6283	9.1966	腐食小	○
256	腐食大	1.5134	8.0514	腐食小	×
257	腐食小	0.6984	6.7614	腐食小	○
258	腐食小	1.1902	5.8039	腐食小	○
259	腐食小	10.2857	11.7787	腐食小	○
260	腐食小	4.6049	9.6495	腐食小	○
261	腐食小	5.2853	9.9442	腐食小	○
262	腐食小	10.3885	11.2038	腐食小	○
263	腐食小	7.7746	8.1312	腐食小	○
264	腐食小	7.8090	6.8408	腐食大	×
265	腐食小	8.0820	8.1623	腐食小	○
266	腐食小	12.0105	10.0866	腐食大	×
267	腐食小	12.7418	10.7521	腐食大	×
268	腐食小	11.1969	9.2439	腐食大	×

表-2.14 マハラノビスの汎距離による判別結果(3)

データ No.	真の群	$D_{腐食大}^2$	$D_{腐食小}^2$	判別群	判別 結果
269	腐食小	12.2789	10.4921	腐食大	×
270	腐食小	11.6537	9.9442	腐食大	×
271	腐食小	0.7671	7.4347	腐食小	○
272	腐食小	1.2130	5.7697	腐食小	○
273	腐食小	1.9557	3.1910	腐食小	○
274	腐食小	3.6830	3.8820	腐食小	○
275	腐食小	4.0223	4.3209	腐食小	○
276	腐食大	4.0929	9.4496	腐食小	×
277	腐食大	0.9963	7.3933	腐食小	×
278	腐食大	4.0640	1.3710	腐食大	○
279	腐食大	6.5235	3.9849	腐食大	○
280	腐食大	4.4895	1.5302	腐食大	○
281	腐食大	4.9578	2.6998	腐食大	○
282	腐食大	6.3705	4.1463	腐食大	○
283	腐食大	6.6791	2.6758	腐食大	○
284	腐食大	5.6341	1.7475	腐食大	○
285	腐食大	6.7772	0.4922	腐食大	○
286	腐食大	9.8404	2.6204	腐食大	○
287	腐食大	6.8249	5.8324	腐食大	○
288	腐食大	7.8939	5.5305	腐食大	○
289	腐食小	3.8612	0.8673	腐食大	×
290	腐食大	7.4758	1.2760	腐食大	○
291	腐食大	6.5468	0.6461	腐食大	○
292	腐食小	8.2210	1.6315	腐食大	×
293	腐食大	4.3733	1.1695	腐食大	○
294	腐食大	4.6855	1.3486	腐食大	○
295	腐食大	6.9008	4.4814	腐食大	○
296	腐食大	4.4365	1.1302	腐食大	○
297	腐食大	9.1407	2.9433	腐食大	○
298	腐食小	3.6735	3.4564	腐食大	×
299	腐食大	4.9972	2.9861	腐食大	○
300	腐食大	4.1166	0.6823	腐食大	○
301	腐食大	1.2994	4.8210	腐食小	×
302	腐食大	1.9792	3.4569	腐食小	×
303	腐食小	2.0516	4.2923	腐食小	○
304	腐食大	4.7816	6.6452	腐食小	×
305	腐食大	11.9684	11.3539	腐食大	○
306	腐食大	5.6631	5.4420	腐食大	○
307	腐食小	3.7303	3.9168	腐食小	○
308	腐食小	4.4619	4.9620	腐食小	○
309	腐食小	3.8229	4.1863	腐食小	○
310	腐食小	3.6300	3.5457	腐食大	×
311	腐食小	0.8585	8.1283	腐食小	○
312	腐食小	1.7275	7.9913	腐食小	○
313	腐食大	14.6085	9.3117	腐食大	○
314	腐食大	5.3908	4.2652	腐食大	○
315	腐食大	5.4012	4.4124	腐食大	○
316	腐食大	7.0598	5.2971	腐食大	○
317	腐食大	8.4827	5.9609	腐食大	○
318	腐食大	12.2064	3.4929	腐食大	○
319	腐食小	4.5837	4.9993	腐食小	○
320	腐食小	5.5283	2.9098	腐食大	×
321	腐食小	5.6987	3.1933	腐食大	×
322	腐食小	10.7092	7.4359	腐食大	×
323	腐食小	14.6665	11.4828	腐食大	×
324	腐食小	15.6113	10.3817	腐食大	×
325	腐食小	1.3046	9.3720	腐食小	○
326	腐食小	2.4704	10.4375	腐食小	○
327	腐食小	1.4868	8.7374	腐食小	○
328	腐食小	1.0664	8.8859	腐食小	○
329	腐食小	0.6127	7.2679	腐食小	○
330	腐食小	3.8445	11.6418	腐食小	○
331	腐食小	1.3271	9.1176	腐食小	○
332	腐食小	1.2513	8.7516	腐食小	○
333	腐食小	0.7298	7.6986	腐食小	○
334	腐食小	2.9367	9.9195	腐食小	○
335	腐食小	0.9879	8.2888	腐食小	○
336	腐食小	0.9165	8.1351	腐食小	○
337	腐食小	0.2320	5.5815	腐食小	○
338	腐食小	0.2651	5.4222	腐食小	○
339	腐食小	1.6415	9.8345	腐食小	○
340	腐食大	1.4854	9.5977	腐食小	×
341	腐食小	1.5777	10.3110	腐食小	○
342	腐食小	1.5492	6.8322	腐食小	○
343	腐食小	5.7277	13.7831	腐食小	○
344	腐食小	1.1007	8.0185	腐食小	○
345	腐食小	1.1144	8.3095	腐食小	○
346	腐食小	1.2964	8.3336	腐食小	○
347	腐食大	1.0745	8.6670	腐食小	×
348	腐食小	0.9976	8.6711	腐食小	○
349	腐食大	0.5659	7.3632	腐食小	×
350	腐食小	0.5228	6.5768	腐食小	○
351	腐食小	3.5433	10.2406	腐食小	○
352	腐食大	7.7390	3.8788	腐食大	○
353	腐食小	8.2280	3.8167	腐食大	×
354	腐食小	7.7240	1.3476	腐食大	×
355	腐食大	7.7611	0.7108	腐食大	○
356	腐食小	5.0781	5.6324	腐食小	○
357	腐食小	5.3786	6.1409	腐食小	○
358	腐食小	4.7551	4.4459	腐食大	×
359	腐食小	4.5792	5.0811	腐食小	○
360	腐食小	5.8208	6.8175	腐食小	○
361	腐食小	5.0685	5.3018	腐食小	○
362	腐食小	1.0341	8.5606	腐食小	○
363	腐食小	6.4904	1.3289	腐食大	×
364	腐食小	4.2548	7.4432	腐食小	○
365	腐食小	9.7010	9.3456	腐食大	×
366	腐食小	10.1824	9.3814	腐食大	×
367	腐食小	0.4791	6.8971	腐食小	○
368	腐食小	3.3490	3.5716	腐食小	○
369	腐食小	3.2978	3.5502	腐食小	○
370	腐食大	4.9908	5.1786	腐食小	×
371	腐食小	5.8664	6.5936	腐食小	○
372	腐食小	4.5885	2.6698	腐食大	×
373	腐食小	0.7162	7.0420	腐食小	○
374	腐食小	0.7162	7.0420	腐食小	○
375	腐食小	1.0040	6.6632	腐食小	○
376	腐食小	1.4667	6.1370	腐食小	○
377	腐食小	3.4537	6.9416	腐食小	○
378	腐食小	0.8601	7.5643	腐食小	○
379	腐食小	4.5648	4.7290	腐食小	○
380	腐食小	1.0971	5.8668	腐食小	○
381	腐食小	1.6911	5.9734	腐食小	○
382	腐食小	4.4613	9.0229	腐食小	○
383	腐食小	1.8273	5.6298	腐食小	○
384	腐食小	0.6167	4.1510	腐食小	○
385	腐食小	2.3707	6.2375	腐食小	○
386	腐食小	3.7485	7.7839	腐食小	○
387	腐食大	12.6735	3.0443	腐食大	○
388	腐食大	13.1972	3.2995	腐食大	○
389	腐食小	2.6795	5.3663	腐食小	○
390	腐食小	0.3309	5.0142	腐食小	○
391	腐食小	0.4421	5.2577	腐食小	○
392	腐食小	0.7339	4.4718	腐食小	○
393	腐食大	6.6364	2.4777	腐食大	○
394	腐食小	6.6666	5.9028	腐食大	×
395	腐食小	4.3584	3.6357	腐食大	×
396	腐食大	5.1408	5.1773	腐食小	×
397	腐食小	4.5402	3.8993	腐食大	×

2. 5 考察

既設合流式下水道管の調査，分析の結果，下水道計画時に腐食発生の抑制を考慮するならば，以下の点についての留意が必要である．また効果的な維持管理および長寿命化のためには，必要に応じ腐食防止対策を検討することが望ましい．

- ①管径が 400mm 以上になると腐食が多くなる．すなわち，一般的に管径が大きくなると勾配は緩やかに計画するため，下水は滞留しやすく嫌気性状態になりやすい．このため， H_2S が生成され微生物による腐食が発生しやすいといえる．
- ②管路勾配は 5～15% に設定することが有利である．また 5% 以下や 15% 以上勾配にすると腐食の危険性が高くなることも考慮すべきである．
- ③路線延長は 20m 以上 40m 未満とすることが有効であり，地理的制約により 10m 以下とする場合，マンホールには落差・段差は付けず，なるべく下水を攪拌させない構造とすべきである．また路線延長が 40m 以上であると腐食の危険性が高くなる．
- ④『線型判別関数による判別』または『マハラノビスの汎距離による判別』，どちらを用いても約 84% の確率で早期に再構築が必要な腐食ランク A・B と腐食の初期段階である C・D およびなしに判別することが可能である．

しかしながら，マハラノビスの汎距離の計算は煩雑なため，以下に示す線型判別関数の方が簡略である．

$$Y = 0.0103 \times X_1 + 0.0411 \times X_2 + 0.0100 \times X_3 + 0.0658 \times X_4 - 8.6362$$

Y : 判別得点

X_1 : 管径 (mm)

X_2 : 勾配 (%)

X_3 : 路線延長 (m)

X_4 : 使用年数 (年)

$Y > 0$ のとき 『腐食大』

$Y < 0$ のとき 『腐食小』

$Y = 0$ のとき どちらとも言えない

以上，既設下水道管の腐食調査により得られたデータの分析により，腐食の発生しやすい条件が明らかとなり，さらに多変量解析により下水道の腐食予測が可能であるか検討を行った結果，管径 900mm 以下の合流式下水管渠において管径，勾配，路線延長，使用年数といったパラメータから線型判別関数により良好な精度で腐食予測が可能である。

2. 6 結論

本研究結果より，コンクリート製下水管の微生物腐食の予測が，管径，勾配，路線延長，使用年数などの管渠の基本データから良好な精度で可能であることが明らかとなった。

現在，維持管理のためには，先ず管路内調査ロボット等を用いた管路内調査により現状把握を行うが，面的な調査のため財政への負担が大きい。本手法は，管路内調査実施前に危険度の高い路線を抽出する『スクリーニング手法』として有効であり，危険度が高いと判定された路線から重点的に調査を行うことが可能となる。結果，調査費用の適正配分等により維持管理費用の抑制および適切な維持管理サイクルの実施につながり，効率的な維持管理が行えることから持続発展可能な社会の構築に寄与できると結論する。

なお予測式構築に当たっては，地域ごとにデータベースを整理することが重要であり，地域データの蓄積により各地域に合った適切な予測が行えると考えられる。

また現在，管渠の更生・再構築の方法は，非開削で既設の下水管渠の中に新しい管渠を構築する方法が主流であり，その工法は管径により大きく二つに分けられる。

管径が 800mm 以下の場合，硬化性のビニル樹脂を管渠内に引き込んで，管渠内面まで加圧拡張して密着硬化させる，反転工法や形成工法，管渠内に板状の更生材をスパイラル状に嵌合させながら形成し，既設管との隙間に裏込材を注入する製管工法，管渠内にポリエチレン製の更生材を引き込み，内側から水圧で拡張させた状態で裏込材を注入する鞘管工法，掘進機で既設の下水道管を破砕しながら新しい管渠を構築する推進工法などがある。

管径が 800mm 以上の場合には管渠内に直接人が入ることが出来るため，管渠内面に耐食性，防水性を有するライニング材を塗布，または吹き付けるライニング工法がある。

管渠においてはこのような更生工法が用いられているが，下水処理施設においては，コンクリート表面の腐食物を高圧洗浄水で除去

し、モルタルで下地調整後、エポキシ系樹脂等で表面を防食塗装する方法が主流である。

しかしライニング工法や防食塗装などは、ピンホール程度の小さい孔が存在するとそこから硫黄酸化細菌が侵入し、内側で再度腐食を進行させるため、数年で再度工事が必要になるなど維持管理費用の増大を招いている。

すなわちセメント系材料で、今まで以上に微生物腐食に強く長寿命の材料が開発されれば、構造物の長寿命化はもとより、維持管理サイクルのスパンを飛躍的に拡大でき、さらに維持管理コストも大幅に低減できることから持続発展可能な社会の構築に貢献できるといえる。

以上、第 3 章以降は予測後の調査により、更生・再構築が必要になった管渠の更生・再構築材料、および下水処理施設の補修工事、また新設構造物の材料として、安価で通常の方法と同様に扱うことができ、これまで以上に耐硫酸性を有するセメント硬化体に関する研究を行った。

〈参考文献〉

- 2-1) (社) 日本下水道協会：下水道施設改築・修繕マニュアル（案）
1998年版，p6，1998
- 2-2) (社) 日本下水道協会：下水道施設テレビカメラ調査マニュアル（案），p10，2000
- 2-3) 東京都下水道局：管路内調査工標準仕様書，p16，2010
- 2-4) 菅民郎：初心者がらくらく読める多変量解析の実践（上），p88，
現代数学社，1996
- 2-5) 石村貞夫：すぐわかる多変量解析，東京図書（株），1995
- 2-6) 木下栄蔵：わかりやすい数学モデルによる多変量解析入門，近代科学社，1995
- 2-7) (社) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説 前編 2001年版，2002

第 3 章

下水道施設におけるコンクリートの 微生物腐食とその対策技術

3. 1 はじめに

下水道管のおかれている環境は厳しく，土圧や輪荷重，水圧，摩耗などの物理的要因や，樹根の侵入などの生物学的要因といった外的要因， H_2S 等の腐食性ガス，下水中に含まれる有害成分，微生物による硫酸腐食など化学的要因である内的要因により老朽化する．特にコンクリート下水道管においては中性化や塩害、微生物腐食など内的要因によって早期に機能不全に陥るケースもある．

近年，これらの早期老朽化の原因のうち特に問題となっているのが，標準的耐用年数が50年³⁻¹⁾とされている鉄筋コンクリート下水道管におけるコンクリートの微生物腐食である．

第2章にて論述した合流式鉄筋コンクリート下水道管において行った微生物腐食の実態調査では，調査対象地域の約6割の下水道管が腐食ランクA～Cであり，さらに下水道管内面が腐食し始めていると思われる腐食ランクDの状態の管を合わせると9割以上の管に腐食が認められた．このように微生物腐食はある特定の場所で発生するものではなく，どのような場所でも発生する危険性があり，しかも腐食の進行は早く，施工後十数年で崩壊し，道路陥没事故を引き起こした報告もある．

現在，微生物腐食により劣化した下水道管の処置および対策方法として，腐食した管の内側に樹脂製の管を構築する更生工法や，抗菌剤を混合した耐硫酸性コンクリートなど腐食に強い下水道管の開発なども行われているが，レアメタルを混合するなど高価なものもある．

3. 2 コンクリートの微生物腐食のメカニズム

下水道管渠内では，化学的および微生物学的な反応が起きておりその反応過程は複雑である．しかしコンクリート下水道管の腐食の主原因は，微生物が生成する H_2SO_4 に起因するものであることが明らかになっており，このメカニズムは以下の通りであり，概略図は図-3.1 に示す通りである．

- ①し尿や洗剤などに含まれる硫酸イオン(SO_4^{2-})が，嫌気性状況下において生息する硫酸塩還元細菌によって H_2S へと還元される ((3.1)式³⁻²⁾).



(※本式の C は有機物を表す.)

- ② H_2S は pH が高くなるとイオン態，低くなると分子態で存在し，pH7 付近では約 50%が分子態で存在している．通常の下水は pH6 ~8 であり，分子態の H_2S はマンホールなどの落差箇所や，ポンプによる汲み上げなどの攪拌・衝撃により，容易に気相中に放散される．

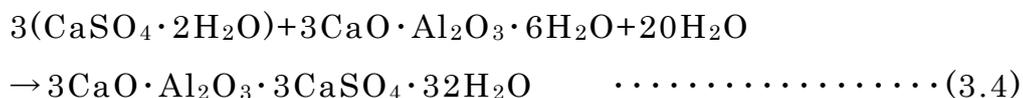
- ③気相中に放散された H_2S は，下水道管渠内面の気相部において好気性菌である硫黄酸化細菌によって， H_2SO_4 へと酸化される ((3.2)式³⁻²⁾).



- ④ H_2SO_4 とコンクリート内に含まれる水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) などのカルシウム分が反応し二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を生成する ((3.3)式)．なお，この $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は下水道管渠内面では膨潤粉化しペースト状となって存在している．



- ⑤さらに $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ とカルシウムアルミネート ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) が反応しエトリンガイト ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) を生成する ((3.4)式)．



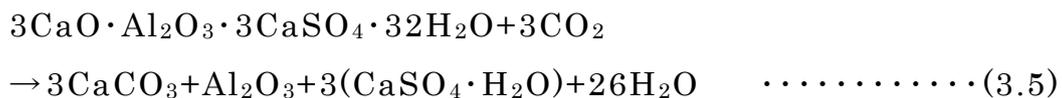
エトリンガイトは 32 の結合水を持つ膨張性の結晶であり，3～4 倍に膨張するため，エトリンガイト生成による膨張でコンクリート表面はポーラスな状態となり， H_2SO_4 による腐食を促進させる．

なお，材料中に塩化物が存在すると，フリーデル氏塩 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) を生成することも知られている．

⑥エトリンガイトはコンクリートの中酸化に伴って炭酸化され，硫酸イオンを解離し，硫酸イオンが未中性化領域へと移動し再びエトリンガイトを生成する ((3.5)式)．

またフリーデル氏塩も同様，中性化に伴い塩素イオンを解離し，塩素イオンが未中性化領域へと移動し再びフリーデル氏塩を生成する ((3.6)式)．

・エトリンガイトの炭酸化



・フリーデル氏塩の炭酸化

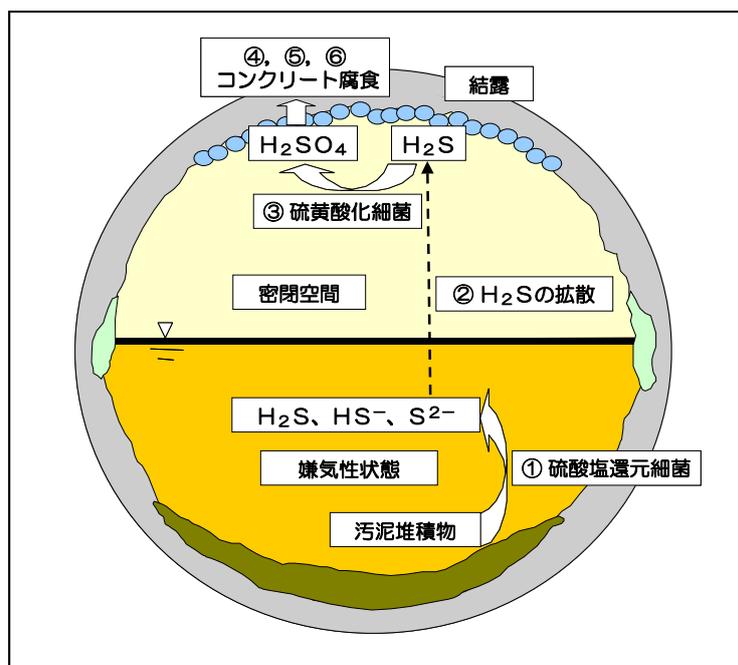
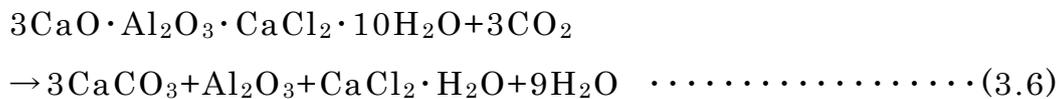


図-3.1 コンクリートの微生物腐食の概略図

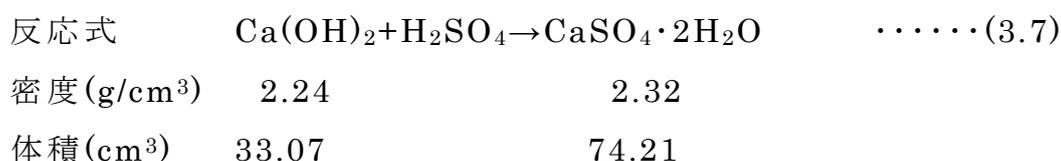
この①から⑥のサイクルを繰り返しコンクリート内部へと腐食が進行していくことから、 H_2SO_4 とカルシウム分との反応を如何にして生じさせないか、または抑制させるかが課題となる。

3. 3 コンクリートと硫酸の反応

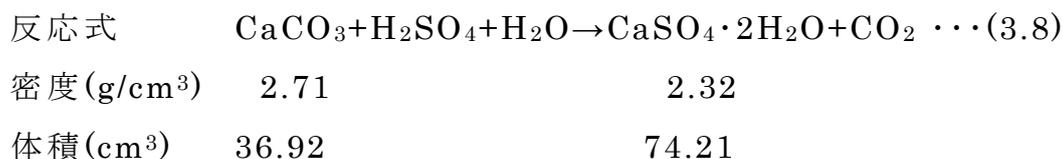
先に記した通り，コンクリートの微生物腐食はコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が H_2SO_4 との反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し，進行することが明らかとなっている．

ここで，コンクリートと H_2SO_4 との反応過程は以下の通りとなる．

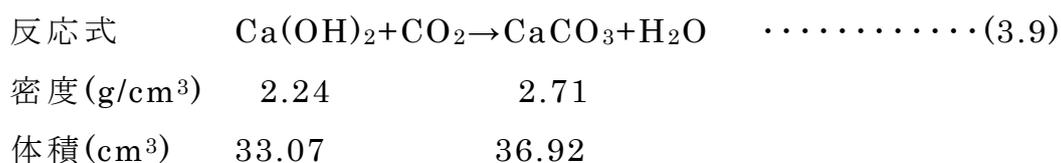
①コンクリートと H_2SO_4 が反応した場合，強酸である H_2SO_4 と強塩基である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の酸－塩基反応((3.7)式)が激しく生じ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成する．



②中性化したコンクリートと H_2SO_4 が反応した場合， H_2SO_4 と弱酸である炭酸カルシウム (CaCO_3) との反応 ((3.8)式) により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し，二酸化炭素 (CO_2) を遊離する．



③なお通常の状態ではコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は大気中の CO_2 により炭酸化 (中性化) され CaCO_3 となる．



ここで体積および密度に着目すると，(3.7)の反応では 1mol の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が 1mol の $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化すると，体積は 2.24 倍，密度は 1.04 倍になり体積，密度ともに増加する．(3.8)の反応では 1mol の CaCO_3 が 1mol の $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化すると，体積は 2.01 倍，密度は 0.86 倍となり，体積は増加し密度は低下するが，実際の質量は増加する．また(3.9)のコンクリート中性化では 1mol の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が 1mol の CaCO_3 に変化すると，体積は 1.12 倍，密度は 1.21 倍になる．

すなわちこれらの反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成した場合, 体積増加によりコンクリート内部に膨張圧が生じ表面を剥落させることになる.

3. 4 コンクリートの微生物腐食に対する対策技術

現在では、この下水道施設におけるコンクリートに対して大きな問題となっている微生物腐食から、コンクリートを護るための様々な対策技術が考案されている。

コンクリートの微生物腐食の対策技術は、表-3.1 に示す『発生源対策』、『腐食抑制』、『防食』の3つに分類され、対策の主眼は以下の6つに分類される。

- ①下水中の硫酸イオン濃度の低下
- ②下水あるいは汚泥中の硫化物生成の抑制・固定
- ③H₂Sの気相中への放散防止
- ④H₂SO₄を生成する硫黄酸化細菌の活動抑制

表-3.1 腐食対策の分類と対策技術³⁻³⁾

腐食対策の分類	対策の主眼	原理と対策
(1)発生源対策	下水中の硫酸イオン濃度の低下	H ₂ S生成ポテンシャルの低下： ・工場排水・温泉排水等の規制，海水浸入の防止
	下水あるいは汚泥中の硫化物生成の抑制・固定	嫌気性化防止： ・圧送管への空気注入，酸素注入，硝酸塩注入など ・伏越し管の構造変更 ・ビルピット対策。 ・自然流下管渠での再曝気，沈殿物の排除，コンクリート表面の洗浄，フラッシング 液相中の硫化物の酸化・固定化： ・塩化第二鉄注入，ポリ硫酸第二鉄注入
(2)腐食抑制	H ₂ Sの気相中への放散防止	H ₂ Sの放散を抑制する構造： ・合流部の攪乱防止 ・段差，落差の解消
	硫酸を生成する硫黄酸化細菌の活動抑制	気相中のH ₂ Sガスの希釈・除去： ・換気・脱臭 コンクリート表面の乾燥： ・換気 硫黄酸化細菌の代謝抑制： ・コンクリートへの防菌剤，抗菌剤混入
(3)防食	耐硫酸性材料	耐硫酸性材料による製品： ・FRPM管，塩ビ管，セラミックパイプ ・レジンコンクリート製品 ・塩ビ製小型マンホール
	コンクリートの耐硫酸性向上および表面被覆	コンクリート自体の耐硫酸性向上： ・耐硫酸性コンクリート コンクリート表面の被覆： ・塗布型樹脂ライニングエ法 ・シートライニングエ法 ・埋設型枠工法

⑤耐硫酸性材料

⑥コンクリートの耐硫酸性向上および表面被覆

これらの対策技術のうち、①、②は H_2S の発生抑制と発生 H_2S の低減、③、④は H_2S の気相中への拡散抑制や、硫黄酸化細菌の増殖抑制し H_2SO_4 生成を抑制する『腐食抑制技術』である。⑤は耐硫酸性材料の使用、⑥はコンクリートの耐硫酸性の向上、コンクリートの表面被覆工法等を行う『防食技術』である。

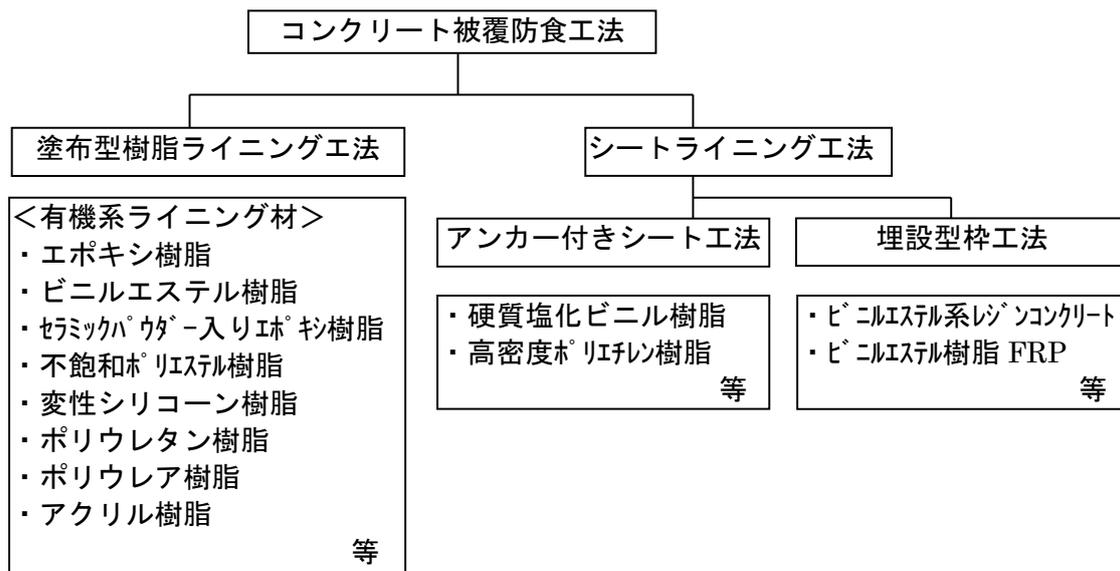
⑥のコンクリートの耐硫酸性向上および表面被覆の方法としては、図-3.2³⁻⁴⁾に示す(a)コンクリート被覆防食工法と(b)耐硫酸モルタル工法に分けられる。

(a)コンクリート被覆防食工法は小さなピンホールから腐食が再度進行する事例が多く、また施工の良否が耐久性に影響する。

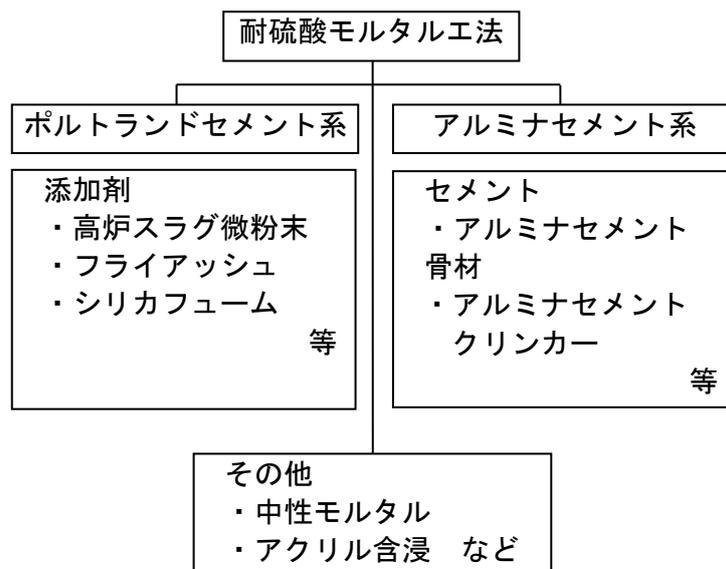
(b)耐硫酸モルタル工法はコンクリート自体の耐硫酸性を向上させる方法である。一般にポルトランドセメント系モルタルの耐硫酸性向上には、① $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の低減による $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成抑止、②構造の緻密化による硫酸浸入抑制のために、高炉スラグや抗菌剤を添加するなど様々な方法がある。しかし、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の低減などにより、腐食の進行を遅らせているだけであり、腐食のメカニズムは基本的に普通コンクリート・モルタルと同様である。

またアルミナセメント系耐硫酸モルタルは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ をほとんど含まないため、ポルトランドセメント系材料とは全く異なる反応を示す。アルミナセメントでは pH の低下に伴い、安定な水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) が形成され、モルタル内への硫酸イオンの侵入を抑制する。pH < 4 となった場合、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ はアルミニウムイオンとして溶出するが、モルタル健全部が酸と接触することで再度 $\text{Al}(\text{OH})_3$ が生成され表層の pH 低下を抑制する³⁻⁵⁾。

これら対策方法の考えのもと、日本下水道事業団と民間企業は共同研究により表-3.2 に示す種々の耐硫酸モルタルの開発を行っている³⁻⁶⁾。



(a) コンクリート被覆防食工法



(b) 耐硫酸モルタル工法

図-3.2 コンクリート防食工法の分類³⁻⁴⁾

表-3.2 日本下水道事業団における耐硫酸モルタル開発の経緯³⁻⁶⁾

調査・研究名			調査年度							備考	
			H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18		H19
<固有研究>	調査・研究の概要										
ライフサイクルコスト低減を目的とした技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の耐硫酸性向上による長寿命化のための開発 ・防食工程の短縮化のための防食工法の確立 							○	○	○	H21まで
<共同研究>	企業名	技術内容	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	
下水道施設のコンクリート耐久性向上に関する技術の開発	宇部興産(株)	耐酸コンクリート、腐食環境下で単独使用可能な補修材料	○	○	○	○					
セメント系耐酸材料の開発	電気化学工業(株)	セメント系耐酸モルタル	○	○	○	○					
耐硫酸性コンクリートおよび耐硫酸モルタルの開発	大成建設(株) 宇部興産(株)	耐硫酸性コンクリートの開発、コンクリート補修材料(アルミナセメント)の開発					○	○	○	○	
アクリル樹脂含浸改質材を用いた補修モルタルの開発	電気化学工業(株)	アクリル樹脂による表面含浸工法の開発					○	○	○	○	
珪素化合物を用いた耐酸酸性モルタルの開発	日本ジッコウ(株)	中性モルタルの材料開発					○	○	○	○	
特殊骨材を用いた耐硫酸性を持つコンクリート用断面修復材の開発	太平洋マテリアル(株)	下水溶融スラグを用いた耐硫酸モルタルの開発					○	○	○	○	
耐硫酸性を有する補修用モルタルの開発	昭和電工建材(株)	アルミナセメントを用いた耐硫酸モルタルの開発					○	○	○	○	
新防菌剤を添加した耐硫酸モルタルの開発	間組(株) 日本ヒューム(株)	二次製品を目的とした防菌剤の使用					○	○	○	○	

3. 5 まとめ

以上、現在実用化されている耐硫酸性コンクリートは、高炉スラグなどの混入により通常 20%程度含有する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量を低減し、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成を抑止するものと、微生物腐食の原因となる H_2SO_4 を生成する硫黄酸化細菌の活動・増殖を抑制、阻害するものの 2 つに分類されるが、いずれも $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成を抑止・抑制することが目的となっている。このため、 H_2SO_4 に対する抵抗性はあるが、いずれの耐硫酸性コンクリートも微生物腐食により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成する可能性があり、生成した場合は進行速度に差異は生ずるものの、コンクリートは表面から膨張、剥離、脱落を繰り返すことになる。

以上、現在実用化されている耐硫酸性コンクリートよりもさらに長寿命な材料が開発されれば、さらに効率的な下水道施設の維持管理が可能になることから、持続発展可能な社会資本の構築に貢献できる。よって次章以降ではさらに長寿命の耐硫酸性コンクリートの研究を行った。

〈参考文献〉

- 3-1) (社)日本下水道協会：下水道施設改築・修繕マニュアル(案)-1998年版-, p6,参考-1(p84),1998
- 3-2) (社)日本下水道協会：下水道管路施設腐食対策の手引き(案), p4,2002
- 3-3) (社)日本下水道協会：下水道管路施設腐食対策の手引き(案), p68,2002
- 3-4) 日本下水道事業団：耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書, p4-4, 2008
- 3-5) 日本下水道事業団：耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書, pp.4～5, p3-15, 2008
- 3-6) 日本下水道事業団：耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書, p4-2, 2008

第 4 章

フッ化物混合セメント硬化体の 耐硫酸性に関する検討

4. 1 はじめに

第1章から第3章で論述した通り，下水道施設の老朽化対策は早急に取り組まなければならない問題であり，持続発展可能な社会の構築のためにも重要な課題の一つである．

以前より，コンクリートの劣化・老朽化は専門家の中でクローズアップされており，特に下水道施設における微生物腐食は進行が早く構造物に致命的なダメージを与え，最悪の場合道路陥没事故等の社会問題を引き起こすことから，コンクリートに耐硫酸性を持たせた様々な耐硫酸性コンクリートが開発され実用化されてきた．多くの耐硫酸性コンクリートは，高炉スラグ等を混入することによりコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量を低減し， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成抑止を目的としているが， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ はコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などと H_2SO_4 の反応により生成する硫酸塩であり，単斜晶系の結晶構造を持つモース硬度 2，密度 $2.315 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ の無色の結晶で，溶解度は $0.208\text{g}/100\text{g}$ (25°C)⁴⁻¹⁾と水に溶けにくい．

この様な性質を持っていながら， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成が腐食の原因とされているのは，以下の事項が考えられる．

①第3章に示した様に， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ がカルシウムアルミネートとの反応により，膨張性物質であるエトリンガイトを生成し膨潤粉化する．

②コンクリートには様々な物質が含まれているため，生成される $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は結晶性が悪く膨潤粉化しやすい．

すなわち耐硫酸対策としては $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成抑止よりも， $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ およびエトリンガイト生成によりコンクリート内部に膨張圧が生ずることから，この膨張圧対策が必要となる．

対策としては以上の2点に対する改善が主な方法であり，現行の耐硫酸性コンクリートは特に $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成抑止に主眼が置かれている．この耐硫酸性コンクリートは H_2SO_4 との反応を遅らせることは出来るが， H_2SO_4 による腐食・劣化は何れ生じ補修が必要となる．

しかし $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は硫酸塩であることから、結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の層をコンクリート表面に作る事が出来れば、 H_2SO_4 の浸透を抑制すると同時に、腐食や摩耗などから表面を護ることが可能であると考えられる。

よって本研究では、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧対策よりも、供試体への H_2SO_4 の浸透を抑制または抑止する、緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層をコンクリート表面に生成させることを目的に研究を行った。

4. 2 カルシウム系化合物による耐硫酸性の向上

コンクリートの微生物腐食では硫黄酸化細菌が生成する H_2SO_4 と、強塩基であるコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が激しく酸-塩基反応を生じ腐食の進行は早く、コンクリートに与えるダメージも大きい。

この強塩基である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量をコンクリート中から減ずることにより耐硫酸性が向上すると考えられること、また既存の報告では、石灰石系材料をコンクリートに適正量添加すると耐硫酸性が向上する^{4.2)}ことから、 CaCO_3 でセメントの一部を置換することにより耐硫酸性の向上を試みた。

過去の研究にはコンクリートに耐硫酸性を持たせる方法としてオクラート法(Ocrat Verfahren)がある。これは密閉容器内の加圧下で腐食性・毒性ガスである四フッ化ケイ素 (SiF_4) をコンクリート中に浸透拡散させ、コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を化学反応によって不溶性化合物の CaF_2 に置換し耐食層を形成するとともに、コロイド状のシリカを析出させコンクリート中の細孔を充填し、緻密化させる方法である。オクラート法はこのような処理方法のため、大規模な設備・施設が必要となり、処理コストが高くなるばかりでなく、 SiF_4 という人体に非常に有害なガスを用いるため、取扱が難しく細心の注意を要する。

オクラート法で生成される CaF_2 は天然に存在する蛍石の主成分であり、不溶性化合物で耐硫酸性が備わっていることから、本研究では CaF_2 と CaCO_3 の2つのカルシウム系化合物(以降 Ca 系化合物と略す)に着目し、これらを混練した供試体の耐硫酸性について検討を行った。

なお $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧の低減対策としては、既往の研究によると、従来コンクリートでは水セメント比が高くなるほど細孔量が増加し、この細孔が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成時の膨張圧を緩和するため、耐硫酸性が向上する^{4.3)}と報告されている。すなわち膨張圧を吸収するためにはコンクリート中の空隙(細孔)を多くすることが有効とされ、もし細孔が膨張圧を受け止めた場合、膨張により

細孔が小さくなり組織が緻密になると同時に質量が増加し，圧縮強度も増加すると予想される．しかし一方では，細孔量の増加により H_2SO_4 が浸透しやすくなると考えられることから，本研究においては練り混ぜに必要な水分量と施工性も考慮し，水粉体比（水／(セメント + Ca 系化合物)の質量比)を 60%とした．

4. 3 実験方法

4. 3. 1 実験概要

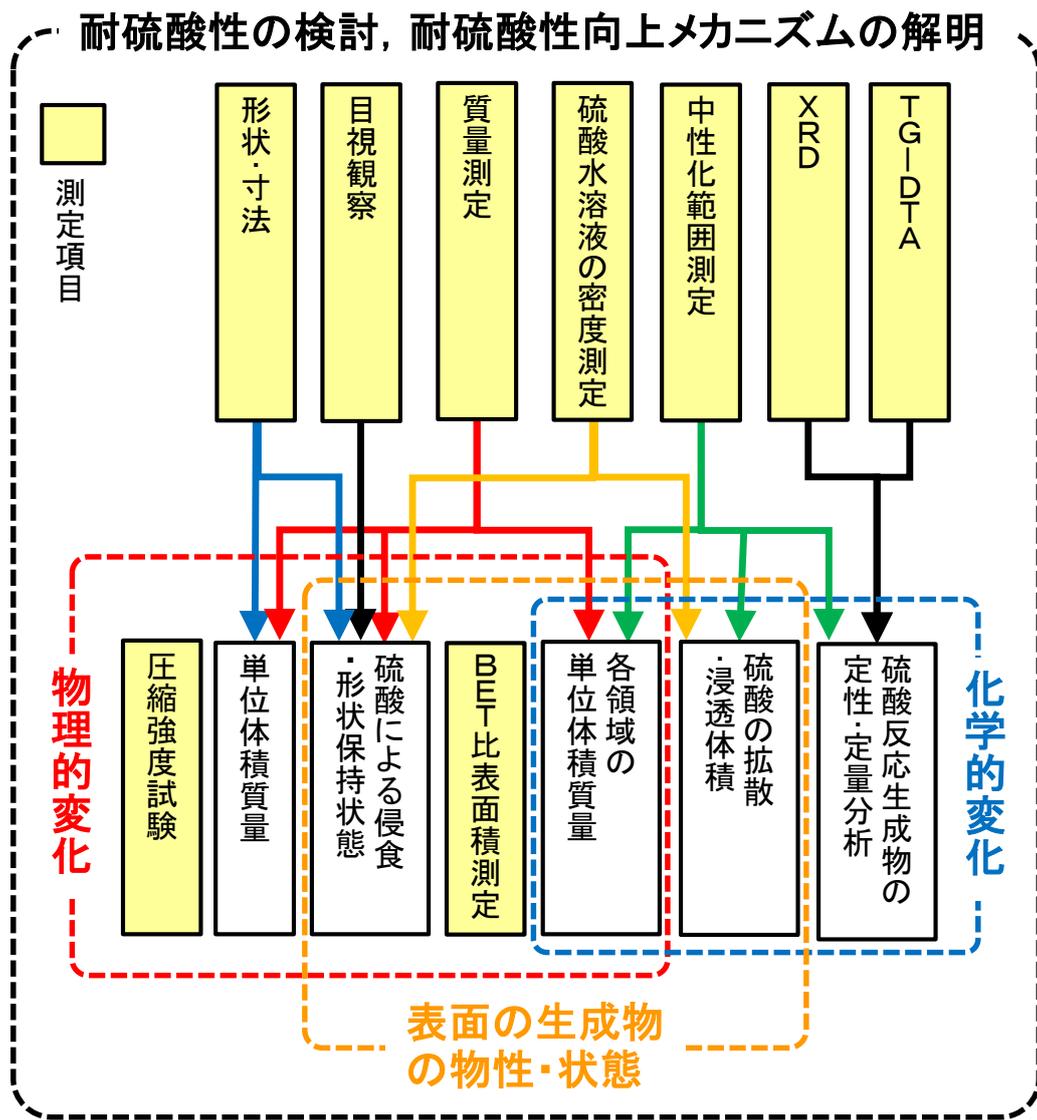
本研究においては、普通ポルトランドセメント（図表中は“セ”と略す）の一部を、 CaCO_3 （図表中は“炭”と略す）および CaF_2 （図表中は“フ”と略す）で置換したセメント硬化体を作製し、硫酸水溶液による暴露実験にて耐硫酸性について検討を行った。

実験方法は、耐硫酸モルタルの性能確認として東京都下水道局による断面修復用モルタルに関する試験⁴⁻⁴⁾および日本下水道事業団の断面修復用モルタルに関する品質試験方法⁴⁻⁵⁾が一般的に用いられるが、本研究では供試体への H_2SO_4 の浸透と硫酸水溶液の密度の変化についても検討を行うため、これら試験方法を参考に実験条件を設定した。

測定項目は以下に示す①～⑧および目視観察とし、各測定項目の結果および各測定項目の組み合わせによる検討も行った。

- ① 硫酸水溶液の密度測定
- ② 質量測定
- ③ 形状測定
- ④ 圧縮強度試験
- ⑤ 中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）
- ⑥ 粉末 X 線回折測定（XRD）
- ⑦ 示差熱－熱重量分析（TG-DTA）
- ⑧ BET 比表面積測定

これらの測定項目より得られた結果は、図－4.1 測定項目と耐硫酸性向上の検討、メカニズムの解明との関係に示す様に、関連する測定項目から、硫酸による侵食・形状保持状態、各領域の単位体積質量、硫酸の拡散・浸透体積、硫酸反応生成物の定性・定量分析といった物理的变化、化学的变化、表面の生成物の物性・状態について複合的に分析・検討を行い、総合して耐硫酸性向上の検討とメカニズムの解明を行った。



図－4.1 各測定項目と耐硫酸性向上の検討，メカニズムの解明の関係

4. 3. 2 供試体

供試体の大きさは $40 \times 40 \times 160 \text{mm}$ で、表-4.1 に示す 5 種類の配合比のものを 6 本ずつ作製した。

セメントは表-4.2 に示す物性値の普通ポルトランドセメント（太平洋セメント製）を、 CaCO_3 および CaF_2 は表-4.3 に示す特性値の試薬を用い、水粉体比 = 60% で練り混ぜ、打設 1 日後に脱型し、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。なお目視観察では養生終了時の供試体にひび割れ等の異常は確認されていない。

表-4.1 各供試体の配合比とセメントに対する置換率

供試体	配合比 (質量比)	セメントに対するCaCO ₃ ま たはCaF ₂ の割合(比)	セメントに対す る置換率(%)
供試体①	セメントのみ	0	0.0
供試体②	セメント:CaCO ₃ =2:1	1/2	33.3
供試体③	セメント:CaCO ₃ =1:1	1	50.0
供試体④	セメント:CaCO ₃ =1:2	2	66.6
供試体⑤	セメント:CaF ₂ =1:1	1	50.0

表-4.2 普通ポルトランドセメントの物理的・化学的物性

密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	凝結			安定性	圧縮強さ N/mm ²			水和熱 J/g		強熱減 量 ig.loss%	MgO %	SO ₃ %	Cl ⁻ %	Na ₂ O _{eq} %	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %
		水量 %	始発 h-min	終結 h-min		3d	7d	28d	7d	28d									
3.16	3340	27.4	2-15	3-20	良	30.3	45.1	61.6	332	384	2.26	1.41	2.10	0.015	0.50	56	18	9	9

表-4.3 Ca系化合物の物理的・化学的特性

名称	分子式	式量	密度 (g/cm ³)	融点 (°C)	純度	溶解性	製造会社/規格
炭酸カルシウム	CaCO ₃	100.09	2.93	825	99.5%以上	水およびエタノール にほとんど溶けない	和光純薬工業 /試薬特級
フッ化カルシウム	CaF ₂	78.08	3.18	1402	97%以上	水および有機溶媒に ほとんど溶けない	和光純薬工業 /特級

4. 3. 3 硫酸水溶液による暴露実験条件

通常，耐硫酸モルタルの性能確認は，東京都下水道局の断面修復用モルタルに関する試験⁴⁻⁴⁾や日本下水道事業団の断面修復用モルタルに関する品質試験方法⁴⁻⁵⁾により行われている。

これらの試験方法は試験体を 5mass%硫酸水溶液に 28 日間浸漬し，水溶液は 7 日ごとに全量を交換する。しかし本実験では硫酸水溶液の密度および濃度の推移と試験体の腐食状況を調べるために，実験期間を通して硫酸水溶液の交換は無しとし，10mass%硫酸水溶液の静水中に供試体を 28 日間を基準に浸漬した。

なお日本下水道事業団の耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書⁴⁻⁶⁾によると，0.5～10mass%硫酸濃度での硫酸浸漬試験では硫酸濃度毎の中性化速度は一定の傾向を示すことから，本研究で用いた 10mass%硫酸水溶液の濃度に問題はない。

供試体浸漬には耐硫酸性を有するポリプロピレン(PP)製のコンテナ容器を用い，供試体の配合種類ごとに浸漬容器 A (容器内寸(mm) ; W=257, D=190, H=122, 水深=約 68) と，浸漬容器 B (容器内寸(mm) ; W=380, D=260, H=160, 水深=約 68) を用意した。

浸漬容器 A は，硫酸水溶液の密度測定および供試体の質量・形状測定用の供試体 1 本を容器中央に浸漬した。浸漬容器 B は中性化範囲測定用の供試体 2 本を容器内に等間隔に配置し，打設面が底面になるよう硫酸水溶液に浸漬させた。容器を 2 つに分けたのは，浸漬容器 B の供試体は中性化範囲測定のため端部を定期的に切断，体積および表面積が減少し，硫酸水溶液の密度変化に影響を与える可能性があったためである。

硫酸水溶液は供試体の配合種類ごとに各 10L 作製し，浸漬容器毎に供試体の質量に対し硫酸水溶液を比例配分した。実験開始前の供試体質量と硫酸水溶液の量は表-4.4 に示すとおりである。

表-4.4 各浸漬容器における測定項目と供試体質量および硫酸水溶液の量

浸漬容器	測定項目	供試体本数	容器の内寸 (mm)	供試体① セメントのみ		供試体② セメント:CaCO ₃ =2:1		供試体③ セメント:CaCO ₃ =1:1		供試体④ セメント:CaCO ₃ =1:2		供試体⑤ セメント:CaF ₂ =1:1	
				質量(g)	硫酸水溶液 (mL)	質量(g)	硫酸水溶液 (mL)	質量(g)	硫酸水溶液 (mL)	質量(g)	硫酸水溶液 (mL)	質量(g)	硫酸水溶液 (mL)
A	1. 硫酸水溶液の 密度測定	1本	W=257 D=190 H=122 水深=約68	492.17	3331	472.82	3331	460.01	3332	449.48	3329	390.21	3369
	2. 質量および 形状測定												
B	3. 中性化範囲測定 (硫酸浸透範囲測定)	2本	W=380 D=260 H=160 水深=約68	491.68	6669	473.06	6669	458.21	6668	450.84	6671	389.61	6631
				493.63		473.38		462.21		450.02		378.40	
合計		3本		1477.48	10000	1419.26	10000	1380.43	10000	1350.34	10000	1158.22	10000

4. 3. 4 測定項目および測定方法

耐硫酸性の検討は、以下の測定項目および測定方法で行った。

(1) 硫酸水溶液の密度測定

供試体を浸漬している硫酸水溶液の密度測定は、溶液中の硫酸密度が均一になるように容器内をよく掻き混ぜた上で約 10mL 採取、濾過（濾紙 5C）により浮遊物質を除去した上で、写真-4.1 に示す U 字管を用いた振動式密度計 アントンパール社製 DMA-35（測定範囲：0～3g/cm³，精度：0.001g/cm³，分解能：0.0001g/cm³，表示値は 20℃換算値）により測定を行った。

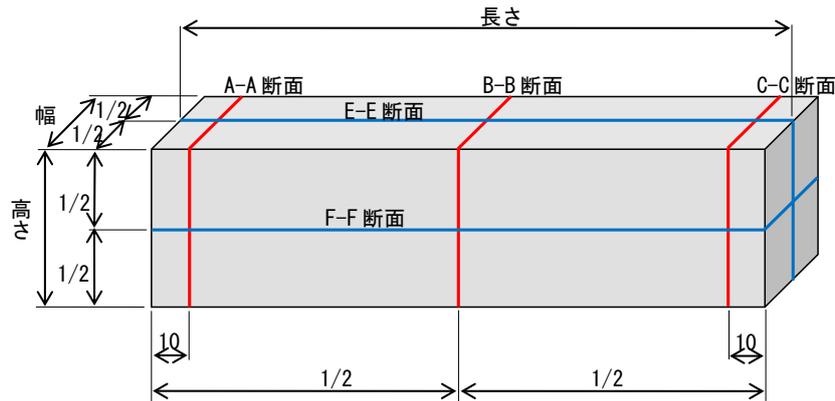
なお測定間隔は実験開始直後は 6 時間毎とし、その後は測定値の推移を確認の上、最大 24 時間まで拡大した。



写真-4.1 振動式密度計（アントンパール DMA 35）

(2) 質量測定および形状測定

供試体を硫酸水溶液から取り出した後、水道の蛇口を完全開放した水圧で全面を均等に 1 分間洗浄し、容易に剥がれ落ちる表面部分を除去した。その後、供試体をイオン交換水中に約 5 分間浸漬後、



図－4.2 形状寸法測定箇所図

表面の水分を拭き取り，さらに約 5 分気中に放置した後，電子天秤による質量測定とノギスによる形状測定，および目視観察を行った．なお測定に要した総時間は約 20 分であり，測定終了後は直ちに硫酸水溶液に浸漬させた．

形状寸法の測定箇所は図－4.2 に示す断面の位置とし容器に接している底部（打設面）は対象外とした．幅は A-A 断面，B-B 断面，C-C 断面の供試体上部 1 面 3 箇所，高さも同断面の供試体側面 2 面 6 箇所，長さは E-E 断面，F-F 断面の供試体底部を除いた 3 面 3 箇所とし測定結果は平均値で表した．

（3）圧縮強度試験

CaCO_3 および CaF_2 混合によるセメント硬化体の圧縮強度への影響，および硫酸暴露による影響について検討した．

試験体は 6 本の供試体のうち，硫酸暴露実験に供しない 3 本を継続して 56 日間水中養生を行った『未暴露』と，硫酸暴露実験により浸漬容器 A において 28 日間暴露した『暴露』の供試体を高さ 40mm になるよう切断し，支圧面を研磨した試験体を 3 本ずつ作製し圧縮強度試験を行った．

圧縮強度試験はマルイ社製 一軸試験器機 HI-TOUCU-U を使用し，モルタル圧縮試験モードで荷重レンジ 100kN，破断検出 95%，変位レンジ 5mm の設定とした．圧縮強度の計算に用いる断面積は支圧面 2 面の平均値とし，支圧面の面積は KEYENCE 社製 デジ

タルマイクロスコープ VHX-1000 の面積測定機能（測定領域を多角形で囲み，包囲線内のピクセル数から面積を測定）を用い，5倍で撮影したデジタル画像（撮像範囲：61×45.5mm，ピクセル数：1600×1200，1ピクセルの大きさ：0.038×0.038mm，面積： $1.44 \times 10^{-3} \text{mm}^2$ ）から計測した．

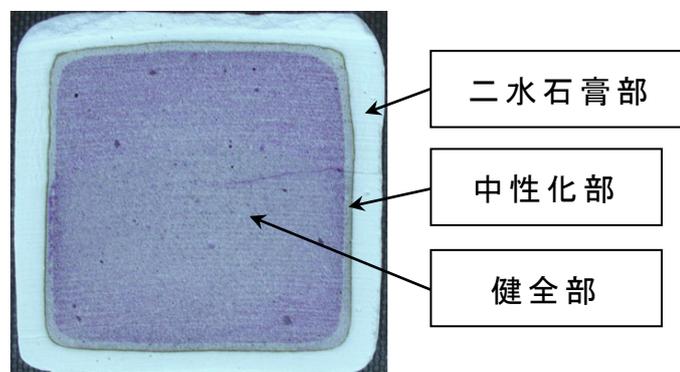
（4）中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）

供試体への硫酸浸透深さは表－4.4 下段の 3.中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）（p72）の供試体を3日ごとに長手方向に対し直角に端部より約1cmの厚さに切断し，流水で切削粉を良く洗い流し，表面乾燥状態で切断面に1%フェノールフタレイン溶液を吹き付けるフェノールフタレイン法（JIS A 1152：2011）により中性化試験を行った．なお浸漬期間3日では硫酸の浸透はほとんどなく中性化は生じないので，1cmの厚さの試験片による中性化試験の測定結果への影響はない．

フェノールフタレインはpH指示薬の一種で，1%エタノール溶液として吹き付けて使用し，pH8.2～10.0以上のアルカリ側で紅色に発色し，中性側では無色である⁴⁾⁷⁾ことを利用した測定方法である．

本研究では以下に示す4領域（写真－4.2 参照）の面積をデジタルマイクロスコープの面積測定機能（倍率×5倍，撮像範囲：61×45.5mm，ピクセル数：1600×1200）により測定した．

1) 『総面積』



写真－4.2 供試体の測定断面

- 2)セメント硬化体中の Ca 系化合物と H_2SO_4 の反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成したと考える『二水石膏部』
- 3)中性化試験で呈色した『健全部』
- 4)二水石膏部とは明らかに異なるが、中性化試験で呈色しない『中性化部』

なお、切断後の供試体は表面洗浄後、水分を除去し再び硫酸水溶液に浸漬し、中性化試験に用いた試験片は浸漬しないこととした。

(5) 粉末 X 線回折測定 (XRD)

硫酸暴露により各供試体に生成した物質の同定を行うべく、実験終了後の各供試体から以下に示す a)~g)からサンプルを採取、粉末状にすりつぶし、XRD により同定解析を行った。なお供試体②、③、④は配合比が異なるがセメントと CaCO_3 の混合供試体であり、分析結果は同様と考え c)、d)、e)を供試体②、③、④の各領域の代表サンプルとした。

- a) 供試体①の二水石膏部
- b) 供試体①の健全部
- c) 供試体③の健全部
- d) 供試体④の二水石膏部
- e) 供試体④の中性化部
- f) 供試体⑤の二水石膏部
- g) 供試体⑤の健全部

XRD 装置は理学電機社製 回折線湾曲結晶モノクロメーター付き RAD-B システムを使用し、測定は対陰極：Cu (モノクロメーター)、管電圧：40kV、管電流：20mA、発散スリット：1deg、散乱スリット：1deg、受光スリット：0.15mm、スキャンスピード：4°/min、スキャンステップ：0.01°で行った。

(6) 示差熱-熱重量分析 (TG-DTA)

Ca 系化合物混合供試体の内部は、硫酸暴露によって基本的に二

水石膏部，中性化部，健全部の3領域に変化する（写真－4.2 供試体の測定断面）ことから，この3領域の生成物質の定性定量分析を行うべく，次に示す a)～k)の各領域からサンプルを採取，乳鉢にて粉末状に磨り潰し TG-DTA を行った．

TG-DTA 装置は Rigaku 社製 示差熱天秤 Thermo plus EVO II /TG-DTA シリーズを使用し，測定条件は測定温度範囲：室温～1000℃，昇温速度：5.0℃/min とした．

- a) 供試体①の健全部
- b) 供試体②の健全部
- c) 供試体③の健全部
- d) 供試体④の健全部
- e) 供試体⑤の健全部
- f) 供試体④の中性化部
- g) 供試体①の二水石膏部
- h) 供試体②の二水石膏部
- i) 供試体③の二水石膏部
- j) 供試体④の二水石膏部
- k) 供試体⑤の二水石膏部

また $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ， CaCO_3 ， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の TG-DTA 曲線の特徴確認のため，試薬の分析も行った．なお Ca 系化合物の分解温度は表－4.5 に示すとおりである．

表－4.5 Ca系化合物の分解温度⁴⁻⁸⁾

物質名	化学式	分解温度℃	その他
水酸化カルシウム	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	580	
炭酸カルシウム	CaCO_3	898	
フッ化カルシウム	CaF_2	1423	
硫酸カルシウム	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	109	半水石膏を生成
	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	133	無水石膏を生成
	CaSO_4	1450	
酸化カルシウム	CaO	2572	

(7) BET比表面積測定

一般的にモルタル供試体などの細孔量の測定は、水銀ポロシメーターを用いた水銀圧入法にて行うが、水銀圧入法は数 nm～数 100 μm までの比較的大きな細孔の測定に適している^{4・9)}。しかし本研究は、セメントの一部を Ca 系化合物で置換したセメント硬化体を用いた基礎的な実験であり、比表面積が測定できる定容量式ガス吸着法である BET 法^{4・9)}により測定を行った。

BET 比表面積測定は日本ベル社製 BELSORP-18 を使用し、サンプルは先の TG-DTA 分析用に粉末状に磨り潰したサンプル a)～k) から分取し、吸着ガスは N_2 、吸着温度は 77K とした。また測定の前処理として水分除去と脱ガスのために 300°C、0.1Pa で 10 時間、減圧・加熱処理した。

なお前処理温度の 300°C では供試体に含まれると考えられる Ca 系化合物は分解しないが、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は 109°C で $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (半水石膏) に、133°C で CaSO_4 (無水石膏) へと脱水分解する^{4・8)}。しかし結晶の一次粒子を測定・評価するため、考察への影響は少ないと考えられる。

4. 4 予備実験

供試体⑤はセメントに CaF_2 を混合していることから、実験において CaF_2 と H_2SO_4 の反応で毒性の強いフッ化水素(HF)発生の懸念があった。

HF の製法は CaF_2 と濃硫酸を混合し、 $450\sim 550^\circ\text{C}$ の加熱条件下で行われる^{4・10)}が、本研究で用いる H_2SO_4 は 10mass%の希硫酸であり、加熱もしないことから HF 発生の可能性は低いと考えられた。しかし実験における安全確保・確認と万々に備え、実験室内（室温約 20°C ）で気体採取用コックを設けた密閉容器を用い、容器内に 10mass%硫酸水溶液と CaF_2 混合供試体が硫酸水溶液に完全に浸漬するように入れ、HF の測定を行った。

測定は気体採取用コックにシリコンチューブを接続したガス検知管（No.17 HF 測定範囲 $0.25\sim 100\text{ppm}$ ）を取り付け、吸引（1回 100mL の吸引時間は約 45 秒）と同時にコックを開いて行った。

測定間隔は実験開始直後は 3 時間毎としたが、1 日経過しても検出されなかったため、徐々に測定間隔を拡大、最大 24 時間とし 1 週間測定を行った。しかしいずれの測定においても HF は検出されなかった。

4. 5 結果および考察

4. 5. 1 硫酸水溶液の密度測定

図-4.3 に暴露実験中の硫酸水溶液の密度の変化を示した。実験開始直後から 90 時間頃までは全ての実験ケースにおいて密度の数値変動が大きく安定しなかったが、90 時間を過ぎからセメントのみの供試体①を浸漬した硫酸水溶液の密度は大きく低下し、実験終了時には 1.0404g/cm^3 (硫酸濃度 6.2%) となった。

またセメントの質量の 33.3% を CaCO_3 で置換した供試体②の硫酸水溶液の密度は 150 時間頃から供試体①と類似した低下傾向を示し、実験終了時には 1.0471g/cm^3 (同 7.5%) となった。

一方、セメントの質量の 50% 以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体③、④、⑤の硫酸水溶液の密度は 90 時間経過後も大きな変化はなく、実験終了時には CaCO_3 で置換した供試体③は 1.0605g/cm^3 (同 9.1%)、供試体④は 1.0596g/cm^3 (同 9.0%)、 CaF_2 で置換した供試体⑤は 1.0620g/cm^3 (同 9.6%) と硫酸水溶液の密度の低下はわずかであった。

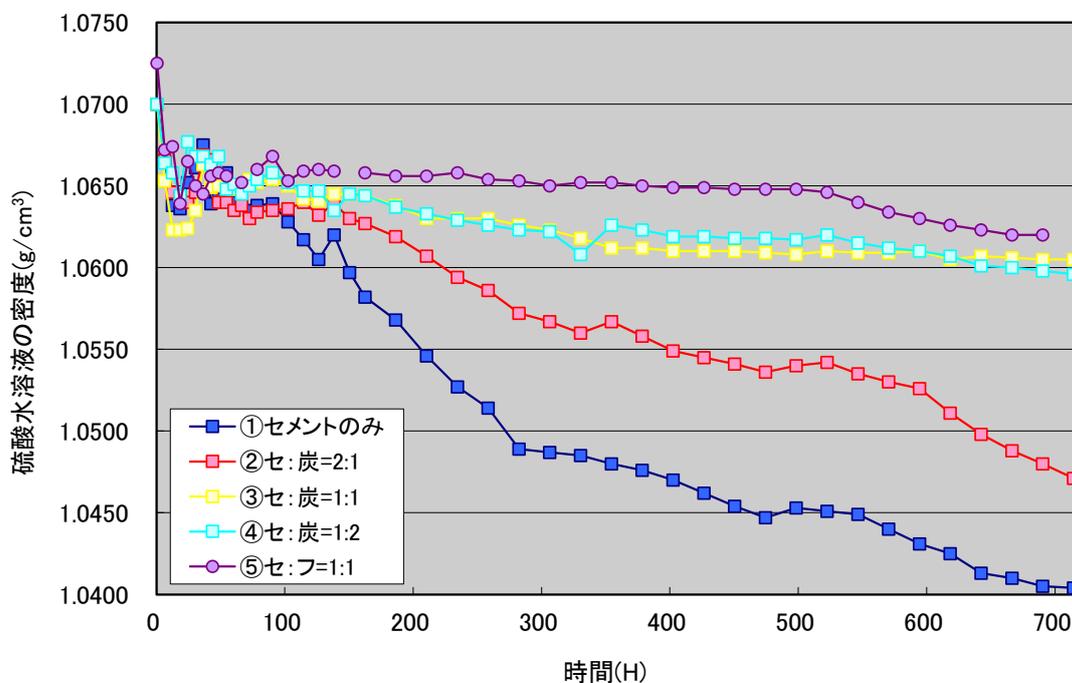


図-4.3 硫酸水溶液の密度の変化

4. 5. 2 質量測定

実験では供試体質量を電子天秤により測定しているが、供試体ごとに初期の質量が異なること、および H_2SO_4 の侵食による質量の減少度合いを見るため、供試体質量の変化率について検討した。

硫酸暴露実験における各供試体の質量の変化率を図-4.4に、またセメントのみの供試体①と、セメントの質量の50%をCa系化合物で置換した供試体③、⑤の硫酸暴露実験前後の様子を写真-4.3に示した。

図より供試体①と供試体②の質量は実験開始後、増加傾向を示し、供試体①では48時間、供試体②では66時間まで増加傾向を示した後、先に示した硫酸水溶液の密度の低下と連動するように質量の減少傾向を示し、実験終了時の30日目には供試体①は65.3%、供試体②は80.2%まで減少した。

また目視観察では供試体①、および供試体②の表面は実験開始直後から H_2SO_4 により激しく侵食し、また容器内底部には供試体より剥離した腐食物が沈殿していた。

一方供試体③は実験開始後36時間に96.7%まで減少傾向を示し、

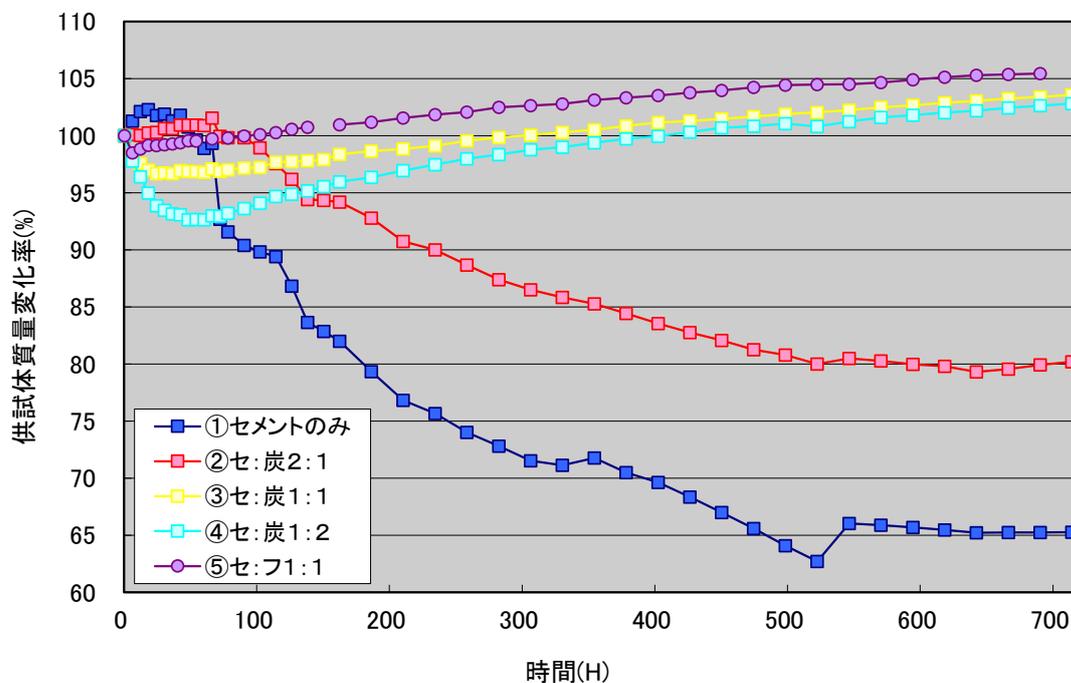


図-4.4 供試体の質量変化率

供試体④では 60 時間に 92.6%まで減少傾向を示した後，増加傾向に転じ実験終了時には供試体③は 103.6%，供試体④は 102.8%となった。

供試体⑤は開始直後 6 時間目に 98.5%を示したが，その後は増加傾向に転じ実験終了時には 105.4%となった。

目視観察では，硫酸暴露により容易に侵食を受けたセメントのみの供試体①，および供試体②とは異なり，供試体③，④，⑤は H_2SO_4 の侵食をほとんど受けず，表面は乳白色の生成物で覆われていた。特に供試体④，⑤の表面の生成物は質量および形状測定時の供試体表面を洗い流す際の触感では表面は滑らかで硬く，また侵食および剥離は認められず，容器内底部への沈殿物もほとんど無かった。

なおこの生成物はその状態，また供試体の混合物から考察すると結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ であると考え，この $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が H_2SO_4 の浸透を抑制していると推察する。

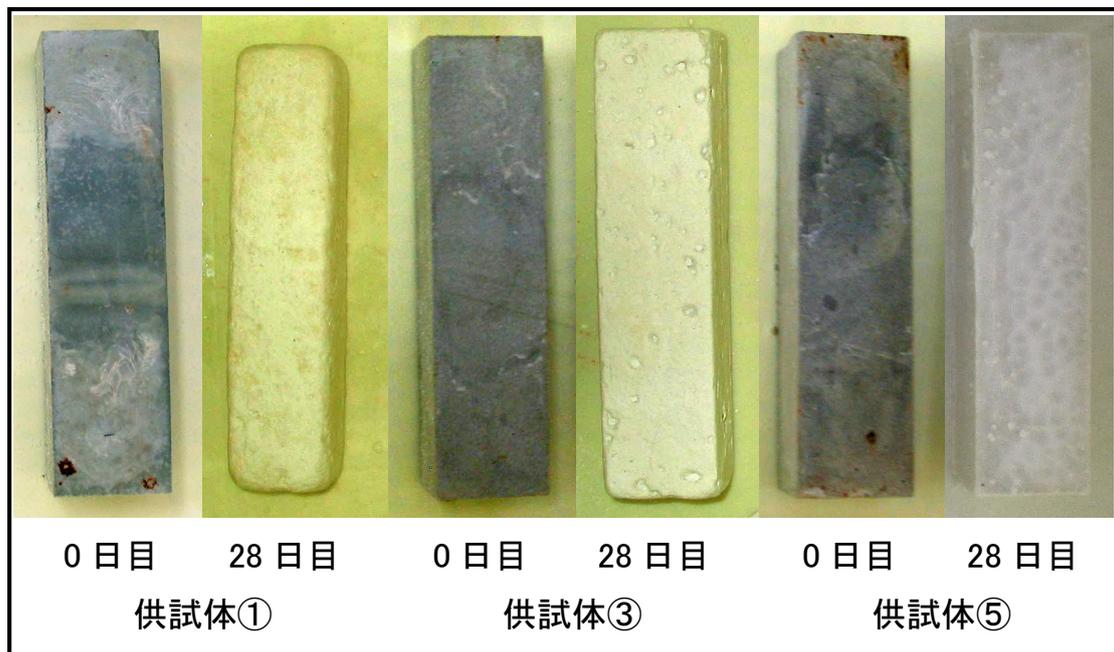


写真-4.3 硫酸暴露実験前後の供試体①，③，⑤の様子

4. 5. 3 形状測定

硫酸暴露実験において供試体の長さ，幅，高さの各寸法を測定しているが，長さ，幅は非常に良く似た傾向と変化量を示したことから，ここでは長さ と高さ の変化量を図-4.5，図-4.6 に示した．

図より長さ と高さ の変化の傾向は似ているものの，高さ の変化量は長さ の約 $3/5 \sim 4/5$ となっている．これは供試体底面が容器に接しているため，供試体底面における H_2SO_4 の浸透および侵食が抑制されたためである．

また長さ，高さ の変化量の両結果より，供試体①は実験開始から 66 時間まで，供試体②は実験開始から 126 時間までは長さ，幅，高さ ともにプラス（膨張）の変化を示し，その後はマイナス（減少）の変化を示した．一方供試体③，④，⑤は実験開始後から 200 時間頃までは極微量な増減の変化を示したが，その後は変化が少なくなり，ほぼ 0mm 付近で安定した値を示した．

なお先の質量測定結果と併せて考察すると，供試体①，②の形状変化は質量の変化と同期しており，目視観察からも供試体は H_2SO_4 による侵食を受け，表面から腐食物が剥離していたことから，このデータの結果は妥当といえる．一方，供試体③，④，⑤に関しては，質量は初期に減少しその後は増加傾向にあるにもかかわらず，形状の変化はほとんど無く 0mm 付近で安定した値を示した．また先に示した様に供試体③，④，⑤は目視観察から表面に結晶性の良い $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ と考える白色の硬質な生成物で覆われていたことから，この生成物が質量増加の原因になったと推察した．

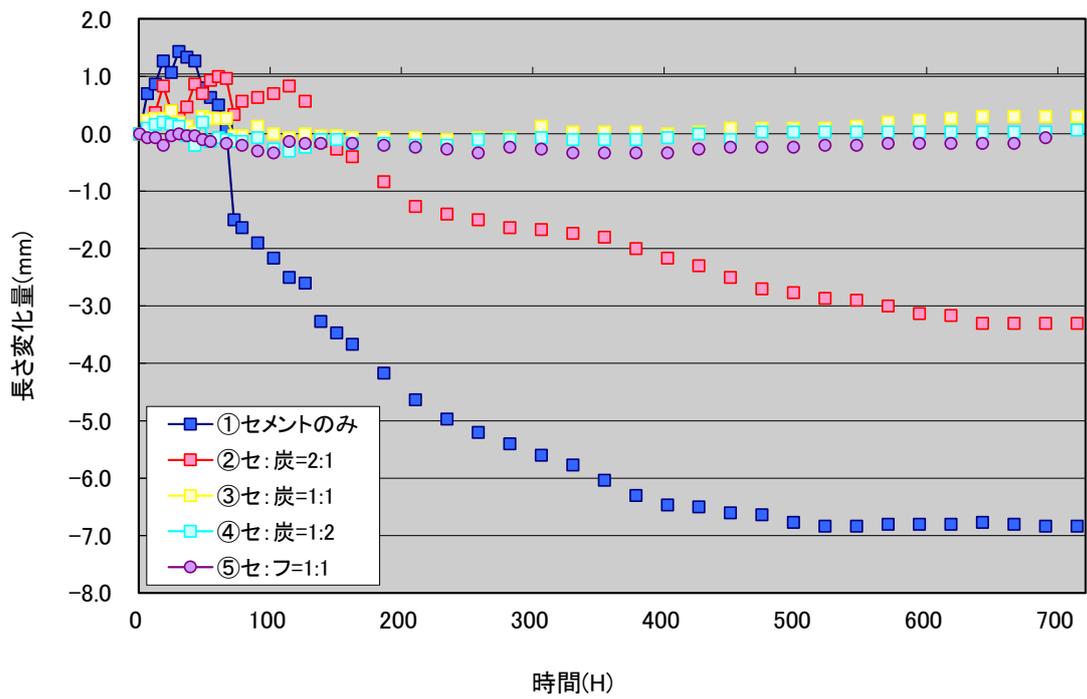


図-4.5 供試体の長さ変化量

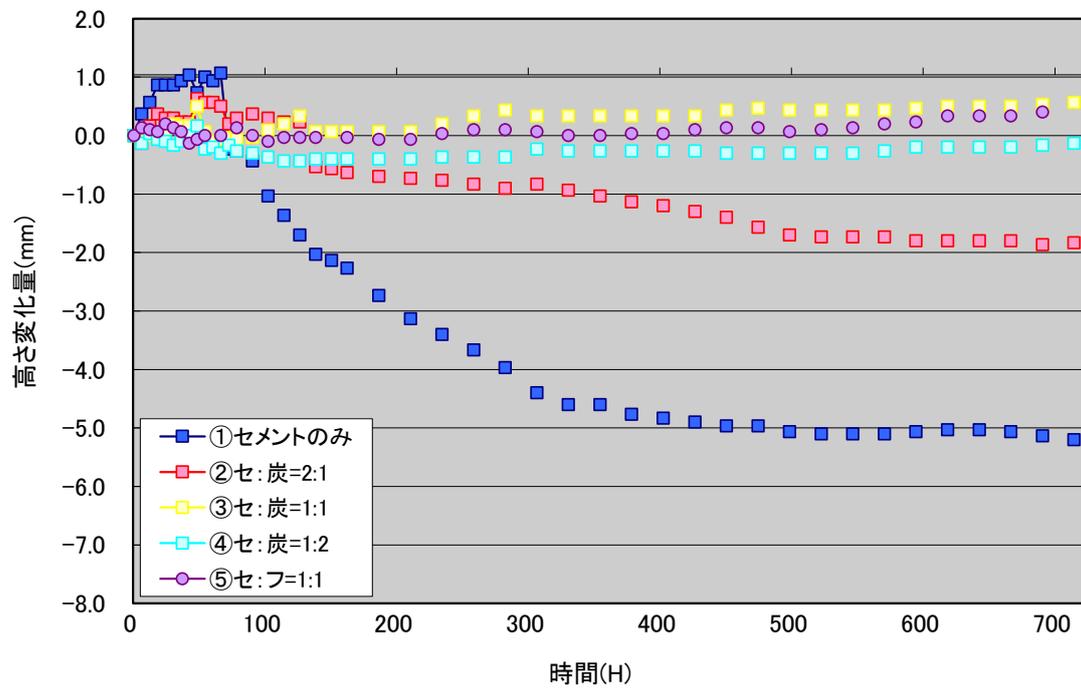


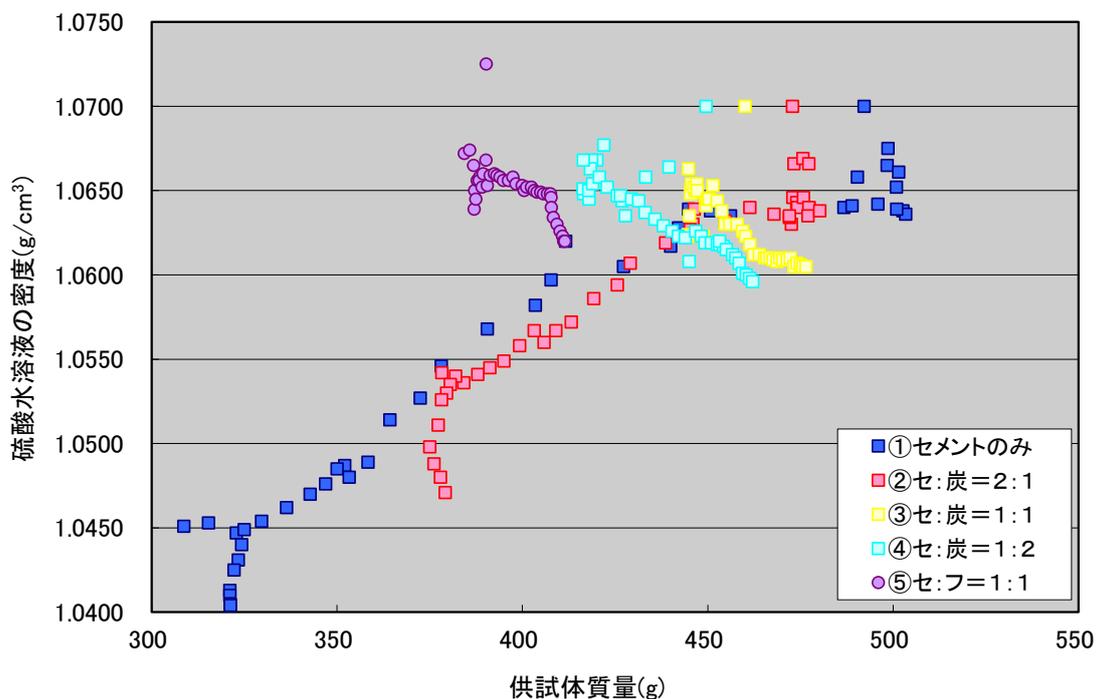
図-4.6 供試体の高さ変化量

4. 5. 4 硫酸水溶液の密度と供試体質量

供試体を浸漬した硫酸水溶液の密度と供試体質量の関係を図－4.7に示した。

図より，供試体①，②は硫酸水溶液の密度と質量の間に強い正の相関が認められる．しかし，供試体③，④，⑤に関しては，逆に負の相関が認められる．これは供試体③，④，⑤が H_2SO_4 との反応により密度の高い物質を生成したことを示しており，さらに先の形状変化の結果からも生成物が剥離せず，供試体表面に留まっているためである．

さらに本図は測定期間中の全データで作成しており，測定期間が各供試体とも同じであることを考慮すると，データの分布幅から供試体⑤が H_2SO_4 との反応，すなわち侵食が一番少なく，次に供試体③，④が少ないといえる．



図－4.7 硫酸水溶液の密度と供試体質量の関係

4. 5. 5 質量減少量と厚さ減少量

硫酸暴露試験における供試体の質量減少量と厚さ減少量の関係を示したものが図-4.8である。ここで厚さ減少量とは供試体の H_2SO_4 との反応面の数を考慮し、底部が容器に接している高さを除外した、長さ、幅の変化量の平均値の1/2とした。

図より、供試体①、②は質量減少量と厚さ減少量に関連性が認められるが、供試体③、④、⑤に関しては、質量の変化に対する厚さの減少量はわずかである。すなわち形状変化は少ないが、質量が変化していることを示している。

さらに、供試体③、④、⑤に関しては質量減少量はマイナス（質量増加）の傾向があり、その傾向は特に供試体⑤が強い。これは前述の通り、供試体⑤が H_2SO_4 との反応により供試体表面に緻密な物質を生成し、形状保持に寄与しているためである。

以上、本結果からもセメントの質量の50%以上をCa系化合物で置換したセメント硬化体には耐硫酸性があり、中でも CaF_2 で置換したセメント硬化体の耐硫酸性は高い。

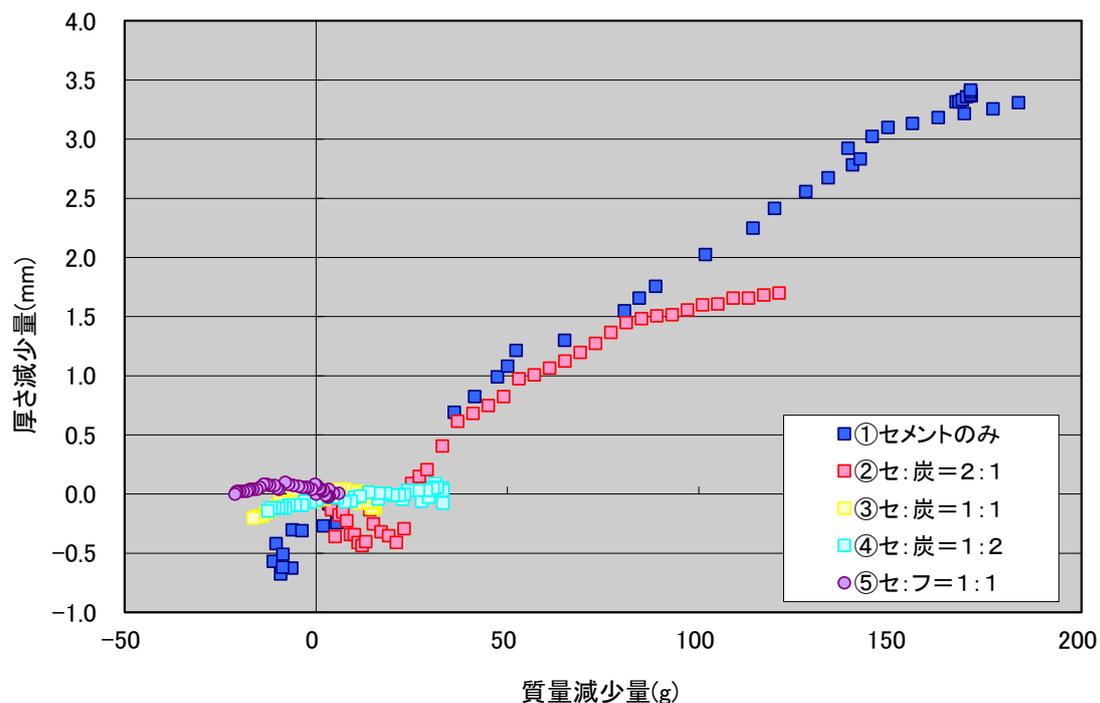


図-4.8 供試体の質量減少量と厚さ減少量の関係

4. 5. 6 圧縮強度試験

表-4.6 および図-4.9 に未暴露、暴露の供試体の平均圧縮強度を示す。平均圧縮強度より、供試体①では暴露による変化はないが、 CaCO_3 で置換した供試体②から④に関しては暴露により圧縮強度が増加しており、 CaCO_3 の置換割合が多くなるほどその傾向は大きくなる。特にセメントの質量の 50%以上を CaCO_3 で置換した供試体③、④は強度増加が著しく、暴露により圧縮強度は約 1.8 倍増加する。また CaF_2 で置換した供試体⑤は若干強度増加の傾向を示しているが、暴露による変化はほとんどないものと判断できる。

なお CaCO_3 で置換した供試体②、③、④の圧縮強度増加の理由としては以下のことが考えられる。

今回作製した供試体②、③、④、⑤のセメント配合量は供試体①に比し 2/3 から 1/3 であり、このセメント配合量の減少が強度低下を引き起している。さらに水粉体比=60%としているが、これは Ca 系化合物でセメントの一部を置換することにより、流動性が低下し練り混ぜが困難になるのを防ぐためである。このため水セメント比は 90%から 180%となり、結果的に水密性の低い細孔量が多い供試体になったと考える。

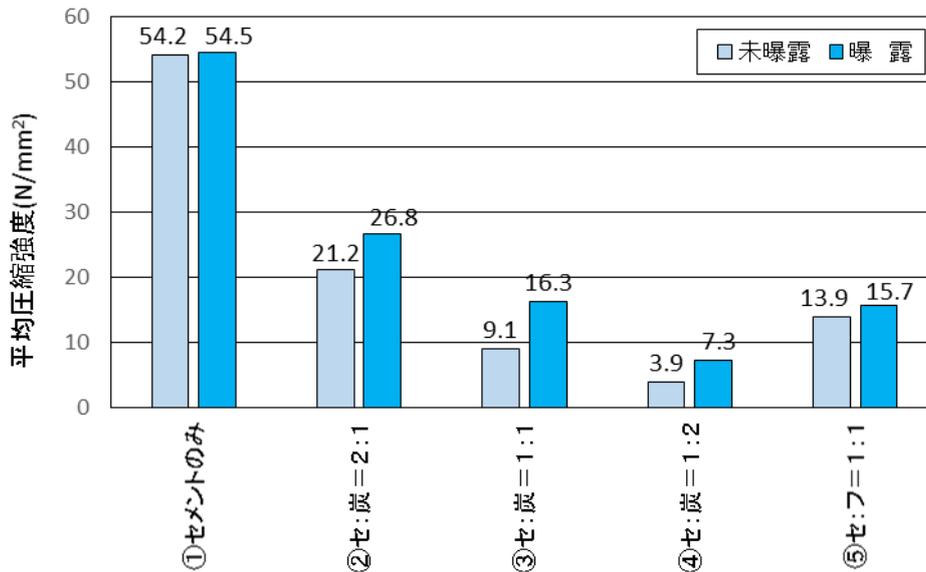
前述のとおり、通常 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 が H_2SO_4 と反応し $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成した場合、体積は約 2 倍となる。さらにエトリンガイトを生成すると体積は 3~4 倍に膨張する。しかし本実験で作製した Ca 系化合物混合供試体は細孔量が多い供試体であると考えられ、この細孔が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ やエトリンガイト生成による膨張圧を受け止め、結果として組成が緻密になり圧縮強度が増加したと考える。

一方 CaF_2 で置換した供試体⑤は、今回の暴露実験の条件下では H_2SO_4 と CaF_2 の反応は考えにくい。また先の硫酸水溶液の密度と供試体質量の結果、および供試体の質量減少量と厚さ減少量の結果より、供試体⑤は質量変化、形状変化および硫酸水溶液の密度の変化が少ないことから CaF_2 には供試体内部への H_2SO_4 の浸透を妨げる効果があるといえる。

表－4.6 硫酸暴露による圧縮強度の変化

(n=3本)

供試体	平均圧縮強度 (N/mm ²) (標準偏差)	
	未暴露	暴露
供試体① (セメントのみ)	54.2 (1.08)	54.5 (6.26)
供試体② (セ:炭=2:1)	21.2 (2.05)	26.8 (1.11)
供試体③ (セ:炭=1:1)	9.1 (0.32)	16.3 (1.87)
供試体④ (セ:炭=1:2)	3.9 (0.09)	7.3 (1.46)
供試体⑤ (セ:フ=1:1)	13.9 (1.32)	15.7 (1.23)



図－4.9 硫酸暴露による圧縮強度の変化

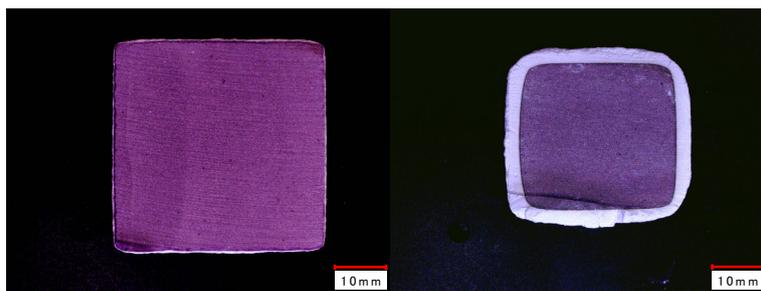
以上圧縮強度試験結果と、先の供試体形状および供試体質量の測定結果を総合すると供試体の質量増加と圧縮強度の増加の関連性が強く、 H_2SO_4 との反応による組成の緻密化が圧縮強度増加に繋がったといえる。

4. 5. 7 中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）

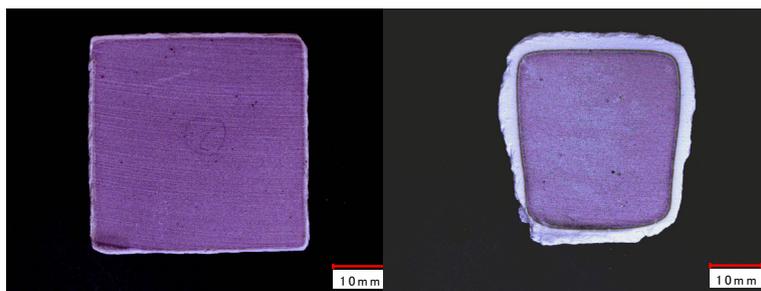
写真－4.4 の左側に硫酸暴露実験開始 3 日目，右側に暴露実験開始から 30 日目に中性化試験を行った各供試体を示した。

図より供試体①，②に関しては総面積の著しい減少が確認された。また供試体③，④では当初の形状をほぼ保っているが，内部のアルカリ分消失が確認され，このアルカリ分消失は特に供試体④において激しく，3 日目の段階で 30%弱，実験終了時（30 日目）では 80%以上のアルカリ分が消失した。

一方供試体⑤では表面付近は二水石膏部に変化しているが，内部はアルカリ分を保持しているのが確認された。



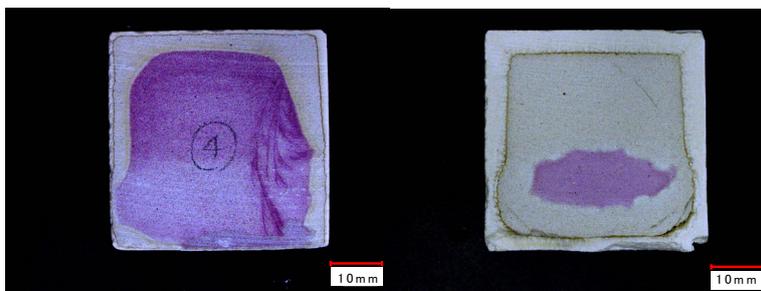
供試体① セメントのみ



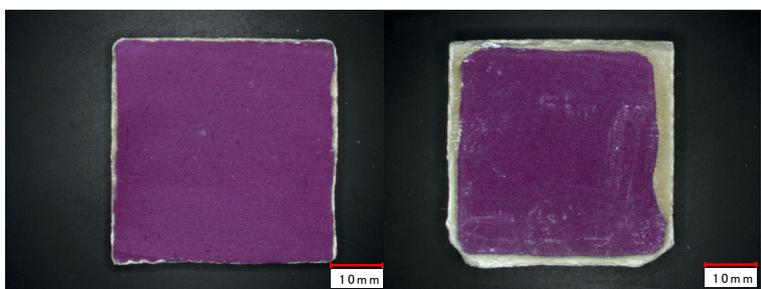
供試体② セメント:CaCO₃=2:1



供試体③ セメント:CaCO₃=1:1



供試体④ セメント:CaCO₃=1:2



供試体⑤ セメント:CaF₂=1:1

3日

30日

写真-4.4 硫酸暴露実験 3日目, 30日目の中性化状況

4. 5. 7. 1 総面積 (図-4.10)

総面積の残存率の経時変化の傾向は、4.5.1の図-4.3に示した硫酸水溶液の密度の変化 (p81)、4.5.2の図-4.4に示した供試体の質量変化率 (p82) および、4.5.3の図-4.5に示した供試体の長さ変化量 (p85) とよく類似している。

供試体①は実験開始後360時間まで直線的に減少したのち緩やかな減少に転じ、実験終了時の総面積の残存率は約65%であった。

供試体②も供試体①同様、減少傾向を示したが供試体①に比べ変化は少ない。しかし写真-4.4に示したように表面が徐々に剥離していく様子が確認され、耐硫酸性は低いといえる。

また実験終了時の質量は元の質量の約80%であったのに対し総面積の残存率は約75%と若干少ない。これは H_2SO_4 との反応により供試体表面に生成した物質の密度が高いことを示している。

供試体③、④、⑤の総面積も減少傾向を示したが、逆に質量変化率は増加傾向を示した。この結果からも H_2SO_4 との反応による生成物の密度が高いことが裏付けされる。

なおデジタルマイクロスコープによる10~50倍での拡大観察では、供試体①、②の表面は H_2SO_4 による侵食で凹凸が多いが、供試

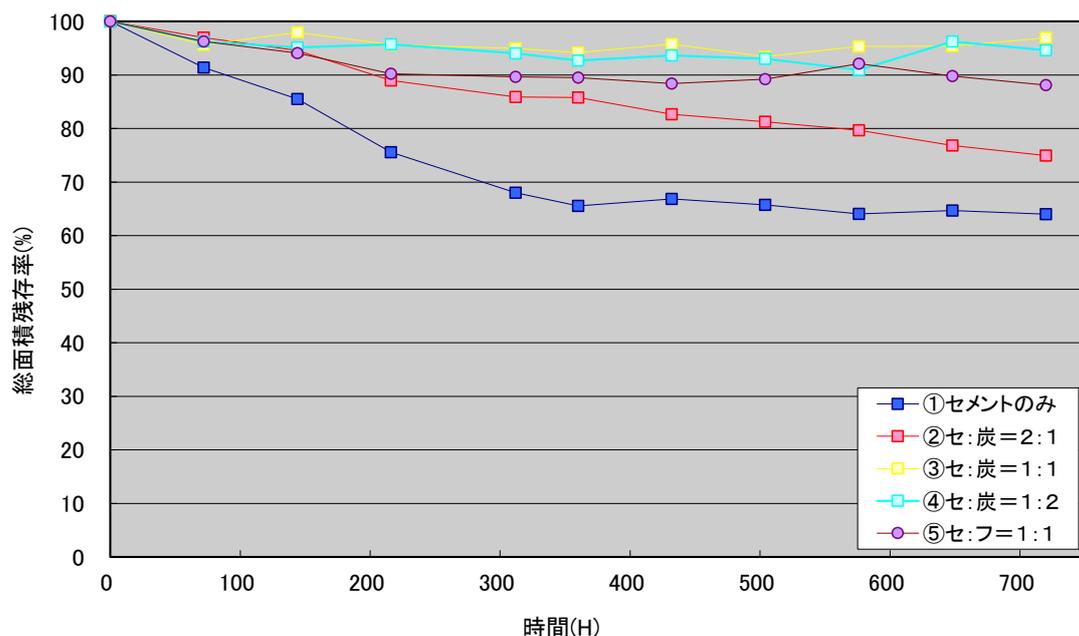


図-4.10 総面積の残存率

体③，④，⑤の表面は $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と考えられる乳白色の生成物で覆われ滑らかな状態であった。

4. 5. 7. 2 二水石膏部 (図-4.11)

二水石膏部は，セメント硬化体中の Ca 系化合物と H_2SO_4 の反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成したと考える，白色に変化した領域である。二水石膏部の測定は実験開始前の総面積から二水石膏部の内側（中性化部＋健全部）の面積を引いて求めており， H_2SO_4 による侵食で脱落した部分も含まれる。

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は本来，水和したセメント中には存在せず， H_2SO_4 との反応により生成することから，図は硫酸暴露実験前の総面積を基に算出した増加率で表した。

なお，以降に示す健全部の残存率および中性化部の増加率の算出も硫酸暴露実験前の総面積を基準とした。

図より供試体①は実験終了時に元の面積のほぼ 50%が二水石膏部に変化した。また Ca 系化合物で置換した供試体②，③，④，⑤も差はあるが約 15%から約 40%が二水石膏部に変化した。

しかし 4.5.3 形状測定 (p84) の結果，目視観察，写真-4.4 (p91)

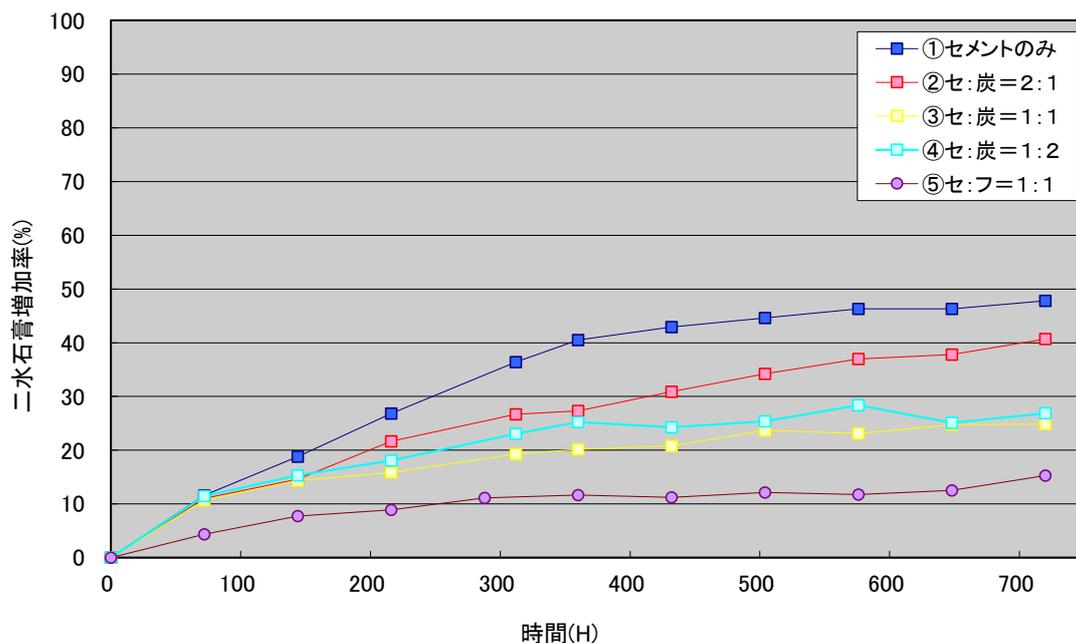


図-4.11 二水石膏部の増加率

および 4.5.7.1 総面積 (p92) の結果より, 供試体③, ④, ⑤の二水石膏部はほとんど脱落せずに供試体表面に留まっているといえる.

また硫酸水溶液の密度の変化からも, セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換することにより $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ などの生成を抑制し, 生成しても膨張圧を内部で受容するため脱落に至らないといえる.

4. 5. 7. 3 健全部 (図-4.12)

健全部は H_2SO_4 との未反応領域であり, 中性化試験で呈色するアルカリ保持領域である.

供試体①, ②, ③は同様な傾向を示し, 実験終了時に約 50%から 60%まで減少したが, 供試体④の健全部は実験終了時で約 16%しか残存しておらずアルカリの消失が著しい.

しかし硫酸水溶液の密度の変化は供試体③とほぼ同じであることから, 供試体④は CaCO_3 置換量が多く元々のアルカリ量が少ないことが健全部残存率が小さい原因と考えられた. また 30 日目の写真からアルカリ分は内部から表面付近へ移動すると推察される.

供試体⑤は最も多く健全部を保持しており, 実験終了時において

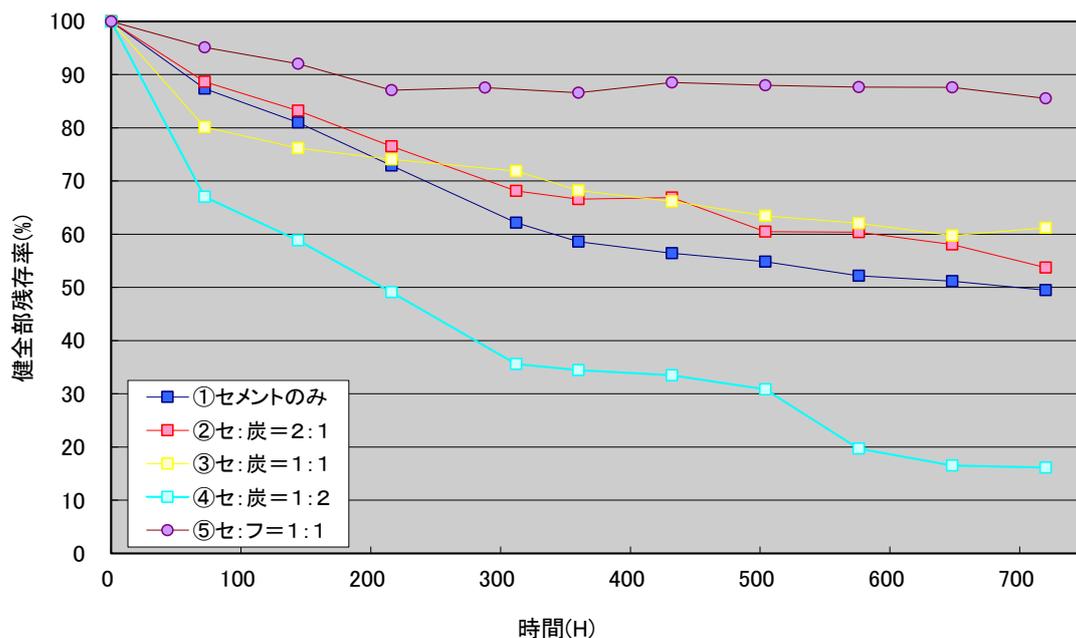


図-4.12 健全部の残存率

約 86%が健全部であった。また 4.5.1 硫酸水溶液の密度測定 (p81) においても H_2SO_4 の消費量が一番少なく、耐硫酸性が高いといえる。

4. 5. 7. 4 中性化部 (図-4.13)

中性化部は中性化試験で呈色しないアルカリ消失領域であり、本実験では二水石膏部と健全部の間の領域である。この領域は鉄筋コンクリート構造としては発錆等の問題が生ずる部分である。

図より供試体④は中性化部の増加が著しく、実験終了時には約 57%が中性化した。また供試体③も約 14%が中性化した。しかし供試体①、②の中性化部は 3~5%とわずかであり、供試体⑤においては中性化領域は確認されなかった。

この結果は供試体①、②は供試体中のセメント量、すなわちアルカリ量が多く、供試体③、④は $CaCO_3$ 置換により元々のアルカリ量が少ないことに起因していると考えられる。なお供試体⑤に関しては、前述したように CaF_2 には供試体への H_2SO_4 の浸透抑制、ならびにアルカリ分の溶出を抑制する作用があるといえる。

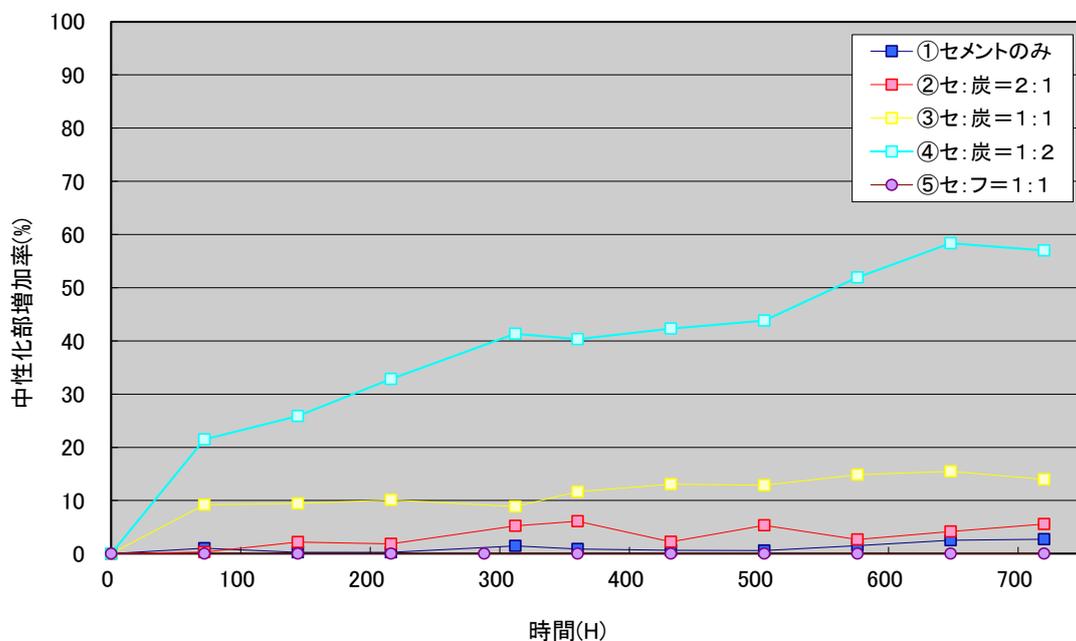


図-4.13 中性化部の増加率

以上、総面積、二水石膏部、健全部、中性化部の測定結果より、供試体①、②は総面積および健全部の減少率が大きく、また二水石

膏部の増加率が大きい。これは供試体表面に生成した二水石膏部が形状を保持できずに脱落し、その結果、供試体内部への H_2SO_4 の浸透を容易にしたことを示している。

二水石膏部の増加率が大きい原因は、供試体①および②はセメント量すなわちアルカリ量が元々多いため、激しい酸-塩基反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量が増加するが、供試体①、②はこの $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を内部で受容することができず供試体表面が崩壊、この崩壊による新たな面の露出、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成のサイクルを繰り返すため、二水石膏部の増加が大きくなると考えられる。

供試体③、④は総面積の減少率および二水石膏部の増加率とも供試体①、②ほど小さくなく耐硫酸性が確認されるが、中性化部の増加率が大きい供試体④に至っては健全部の残存率が 15%とアルカリ分の消失が多い結果となった。これはセメントの一部を CaCO_3 に置換しているため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などの強アルカリ物質が元々少ないことが原因と考えられる。

また既往の研究によると、従来コンクリートでは水セメント比が高くなるほど細孔量が増加し、この細孔が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成時の膨張圧を緩和するため、耐硫酸性が向上する⁴⁾³⁾との報告がある。本研究で作製した供試体は Ca 系化合物置換による施工性（流動性）低下を防ぐため水粉体比=60%としており、実際のセメント量に対する水セメント比は 90%から 180%となり、結果的に細孔量が多く水密性が低い、 H_2SO_4 が浸透しやすい供試体であったとも考えられる。

なお、セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 で置換した供試体は、当初の形状をほぼ保持したことから、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を受容できる細孔が多く存在すると推察する。

供試体⑤については、置換した Ca 系化合物は異なるが水セメント比が同じ供試体③との比較から、供試体⑤は総面積と健全部の減少率が小さく、また二水石膏部の増加率が小さく、中性化部は確認できず、さらに H_2SO_4 の消費量も最も少ないことから、 CaF_2 置換供試体は高い耐硫酸性を有することは明らかである。

4. 5. 8 単位体積質量

4.5.2 質量測定 (p82) と 4.5.3 形状測定 (p84) の結果から算出した各供試体の単位体積質量の変化を図-4.14 に示した. なお単位体積質量は以下の方法で求めた.

$$\text{単位体積質量} = \text{質量} / \text{供試体形状より求めた体積}$$

図より, 単位体積質量は全ての供試体において実験開始直後急激に低下し, 供試体①, ②はその後も低下傾向を示すが, 供試体⑤は

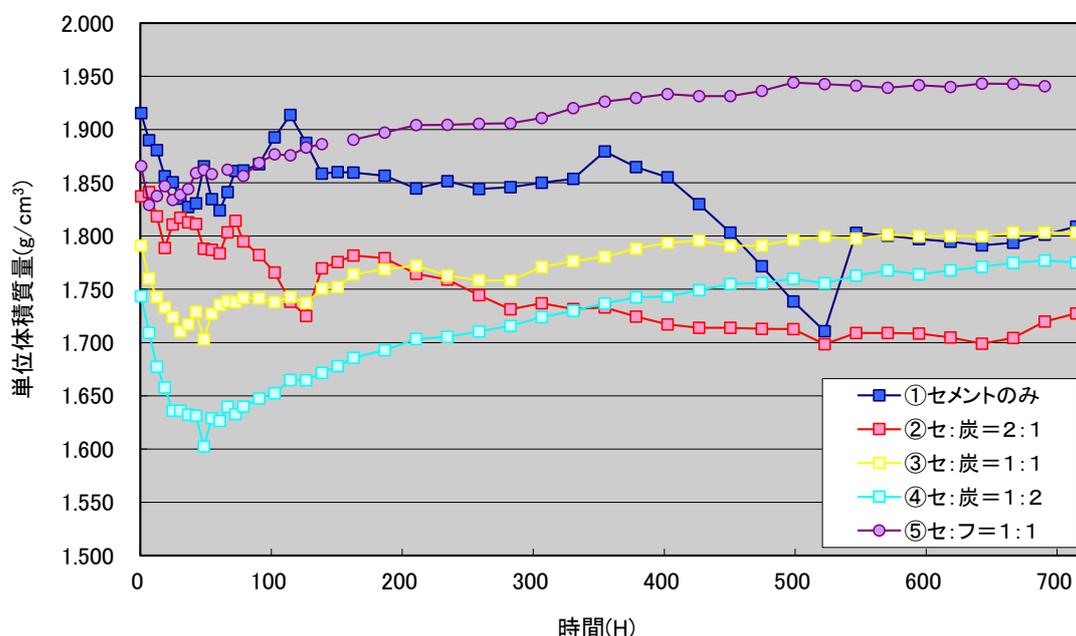


図-4.14 各供試体の単位体積質量の変化

表-4.7 単位体積質量の変化

(単位: g/cm³)

	実験開始前	実験開始直後	実験終了時
供試体①	1.915 100%	1.827(36H) 95.40%	1.809 94.46%
供試体②	1.837 100%	1.789(18H) 97.39%	1.727 94.01%
供試体③	1.791 100%	1.711(30H) 95.53%	1.803 100.67%
供試体④	1.743 100%	1.636(24H) 93.86%	1.775 101.84%
供試体⑤	1.866 100%	1.829(6H) 98.02%	1.941 104.02%

※上段: 単位体積質量; () は測定時間

下段: 実験開始前の単位体積質量に対する割合

直ぐに増加傾向に転じ，供試体③，④は 48 時間から増加傾向に転じる．この実験開始直後の低下と実験終了時の単位体積質量をまとめたものが表-4.7 である．

まず実験開始直後の単位体積質量の低下は CaCO_3 置換量が多いほど大きい．

これは理論上，次のように考察する．

CaCO_3 置換供試体と H_2SO_4 との反応は，次の 2 段階で行われる．

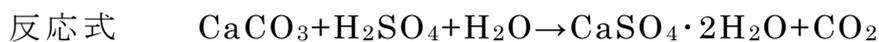
- ・ 第 1 段階（強酸－強塩基の反応）



式量(g) 74.09 98.08 172.17

体積(cm^3) 33.07 53.30 74.21

- ・ 第 2 段階（強酸－弱塩基の反応）



式量(g) 100.09 98.08 172.17 $\dots\dots\dots(4.2)$

体積(cm^3) 36.92 53.30 74.21

(4.1)式および(4.2)式より Ca(OH)_2 が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化した場合，式量は 2.32 倍，体積は 2.24 倍になるため単位体積質量は 1.04 倍の微量な増加となる．

また CaCO_3 が $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化した場合，体積は 2.01 倍となるが式量が 1.71 倍となるため，単位体積質量は 0.85 倍に減少することになる．すなわち CaCO_3 置換量が多いほど Ca(OH)_2 量が少なく，早く第 2 段階の反応に移行するため，実験開始直後の単位体積質量の低下量が大きくなる．

次に，供試体①，②の実験終了時の単位体積質量は供試体① $1.809\text{g}/\text{cm}^3$ (94.46%) ，供試体② $1.727\text{g}/\text{cm}^3$ (94.01%) であった．供試体①はセメントのみ，供試体②はセメントの質量の 33.3% を CaCO_3 で置換したセメント量が多い供試体であり，これら供試体は酸－塩基反応が激しく進行し $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成が急激に行われるが，供試体①，②の配合では $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を受容する細孔が少なく，表面から崩壊したと推察される．

またこの崩壊による新たな面の露出, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成のサイクルを繰り返すため, 結果的に総面積に対する二水石膏部の占める割合が大きくなり, 単位体積質量が低下すると考えられる.

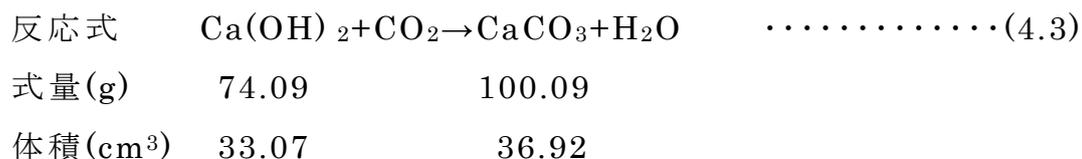
供試体①の 360 時間から 528 時間における急激な単位体積質量の減少は, 4.5.3 形状測定 (p84) の結果では形状の大きな変化はなく, 質量が減少していることから供試体中の Ca 系化合物が H_2SO_4 との反応過程で一時的に脱水や脱炭酸を生じ, 組成がポーラスになったと考えられる. またその後の急な増加は, 脱水や脱炭酸を起こした Ca 系化合物が H_2SO_4 との反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成したためと推察する.

なお供試体②の単位体積質量の変化のサイクルは短い, 供試体①と同様な傾向を示している.

供試体③, ④の実験開始直後の単位体積質量の低下量は CaCO_3 置換量に比例し大きくなるが, 実験期間を通しての全体的な傾向はほぼ同様である.

また先の図-4.13 に示した中性化部の増加率からも明らかであるが, 特に供試体④の中性化部が他の供試体に比べ大きく増加した. これは元々の CaCO_3 置換量が多いことも一因であるが, (4.2)式に示したように CaCO_3 と H_2SO_4 の反応によって生ずる CO_2 が, 硫酸水溶液よりも供試体の細孔中に保持されたアルカリ性の自由水に溶解しやすく, このため供試体内部に CO_2 が濃縮し中性化が促進され, 中性化範囲が拡大したと考えられる.

なお中性化により Ca(OH)_2 が CaCO_3 に変化し, 式量は 1.35 倍, 体積は 1.12 倍となるため ((4.3)式) 膨張圧が生じ, また単位体積質量は 1.21 倍になる.



しかし本実験の配合ではセメント硬化体中の細孔が膨張圧を受容し緻密化するため, 結果として質量が増加したと判断する.

なお、供試体③、④の単位体積質量の変化量の違いは CaCO_3 置換量の違いによるものといえる。

供試体⑤の単位体積質量は実験開始直後 6 時間目の測定で 1.829g/cm^3 (98.02%) を示したのち増加傾向に転じ、実験終了時は 1.941g/cm^3 (104.02%) まで増加した。供試体⑤においては置換した CaF_2 と H_2SO_4 の反応は本実験条件では考えにくい。すなわち供試体⑤の初期の単位体積質量の低下、およびその後の増加はセメント由来の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などに起因すると判断する。

また生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は脱落せず供試体に留まっており供試体③、④と同様、本配合ではセメント硬化体中の細孔が膨張圧を受容、緻密化し単位体積質量が増加したと判断される。

以上、Ca 系化合物混合供試体は H_2SO_4 との反応により $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ などを生成するが、セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 で置換した供試体、および CaF_2 で置換した供試体では、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ などの脱落が生じにくく、また単位体積質量が増加する。これはセメント硬化体中の細孔が生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ などの膨張圧を受容し、結果として組織が緻密化するためと結論する。

なおセメントの質量の 50%を CaCO_3 , CaF_2 で置換した供試体③、⑤の比較から、耐硫酸効果は CaF_2 の方が高いといえる。

4. 5. 9 硫酸浸透体積

図-4.15 に供試体の硫酸浸透体積(=実験開始前の体積-健全部の体積)の変化を示した。

図より各供試体とも時間の経過とともに H_2SO_4 が供試体へ浸透しにくくなることを表している。すなわち、本実験で用いた硫酸水溶液の濃度は 10mass% であり、試料量に対して H_2SO_4 が過剰で H_2SO_4 の濃度が供試体表面で一定であると仮定すると、 H_2SO_4 の拡散量と時間変化の関係は \sqrt{t} で比例関係が成立し、物質の拡散に関する基本法則である Fick の拡散則に従うといえる。

ここで図を詳細に分析すると、供試体①、②、③と、供試体④および供試体⑤は H_2SO_4 の浸透の挙動が異なる。供試体①、②、③はほぼ同等であるが、供試体④は他に比べて拡散速度が速い。これは先の写真-4.4 (p91) や 4.5.7.4 中性化部 (p95) から明らかなように、供試体④はセメントの一部を $CaCO_3$ に置換しているため、 $Ca(OH)_2$ などの強アルカリ物質が元々少なく、また水粉体比=60% のため、実際の水セメント比は 180% となり結果的に細孔量が多く水密性が低い、 H_2SO_4 が浸透しやすい供試体であったと考える。なお図より、供試体③、④の実験開始後 72 時間のプロットは近似曲

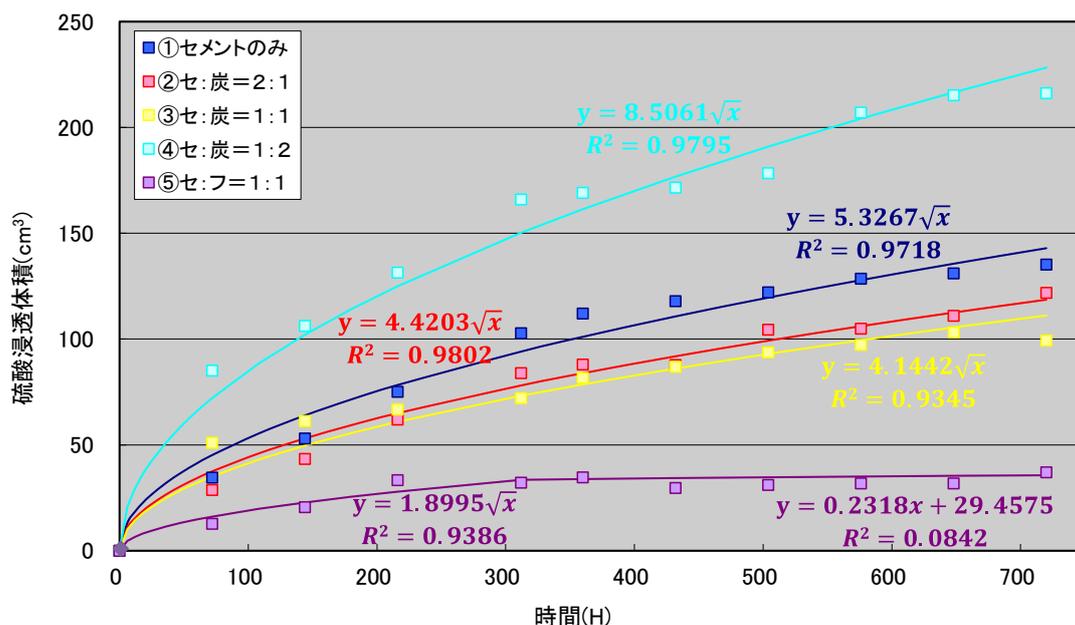


図-4.15 供試体の硫酸浸透体積の変化

線よりも上にずれた位置にあり，初期拡散が他の供試体に比べ速いといえる．

供試体⑤は他の供試体に比べ著しく拡散が遅い．ここで図を詳細に分析すると，300時間付近で H_2SO_4 の拡散挙動が異なることが分かる．312時間を境に近似曲線を分けると，312時間までの初期の拡散は \sqrt{t} で近似出来る($R^2=0.9386$)ことから拡散が生じているが，その後は直線で近似され，拡散現象は生じていないものと考えられる．このことから供試体⑤は初期の H_2SO_4 との反応で表面に H_2SO_4 の浸透を抑制・抑止する不動態層を生成したと判断する．なおこの不動態層は先の単位体積質量の結果より，結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成ると考える．

以上の結果を総合して考察すると，供試体③，④は細孔量が多いため，実験開始直後は H_2SO_4 が浸透しやすく拡散が速いが，表面付近で生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ により細孔が満たされ緻密化するため，以降の H_2SO_4 の浸透を抑制し拡散速度が遅くなると推察される．

なお供試体⑤は H_2SO_4 の拡散が特に遅く，先の中性化範囲測定結果からも供試体③，④とは反応が明らかに異なり， CaF_2 を混合することにより H_2SO_4 の浸透を抑制・抑止する不動態層を生成し，高い耐硫酸性を有したと判断する．

図-4.16は以上の結果を基に，供試体の中性化領域の有無による H_2SO_4 の浸透の概念を示したものである．

(a)の中性化領域のある場合は，二水石膏部と健全部間に緩衝領域となる中性化部が存在するため酸-塩基反応が穏やかとなる．このケースは H_2SO_4 が浸透しやすいが H_2SO_4 との反応生成物の膨張圧を受容し形状を保持するケースであり，供試体③，④が該当する．供試体③，④はセメントの質量の50%以上を CaCO_3 で置換しているため元々のアルカリ量が少なく中性化しやすい．さらに水セメント比が高いため細孔量が多く水密性が低く， H_2SO_4 の浸透が容易で硫酸浸透体積が増加しやすいといえる．またこの細孔が

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ や CaCO_3 生成による膨張圧を受容するため、形状を保持すると判断する。なお供試体③、④の拡散速度の違いは CaCO_3 置換量の違いといえる。

(b)の中性化領域がない場合は、 H_2SO_4 が供試体に浸透しにくく、 H_2SO_4 との反応が二水石膏部と健全部の境界面で行われる。このため激しい酸-塩基反応が生じ、また緻密な供試体であるため H_2SO_4 との反応生成物の膨張圧を受容する細孔が少なく崩壊するケースであり、供試体①、②、⑤が該当する。

供試体①、②はアルカリ量の多い、すなわちセメント量が多く緻密で H_2SO_4 が浸透しにくい供試体であり、また $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を受容できる細孔が少なく生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は容易に脱落すると考えられる。

しかし供試体⑤は、セメントの質量の 50% を CaF_2 で置換した供試体であり、セメント量が 50% であるにもかかわらず中性化部が存在せず、硫酸水溶液の密度の変化も少なく供試体形状も保持し、硫酸浸透体積も少ない。また供試体①、③との比較から供試体⑤には酸-塩基反応を抑制し、さらにアルカリ分の溶出を抑制する効果があるといえる。なお単位体積質量の変化および硫酸浸透体積の変化

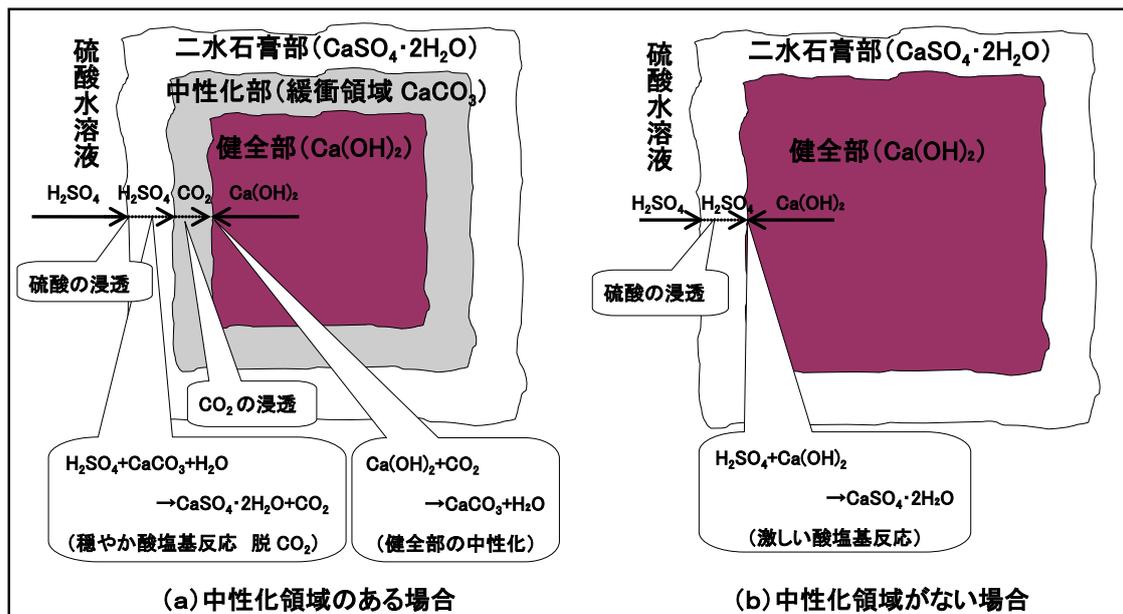


図-4.16 供試体への硫酸浸透の概念図

から、 H_2SO_4 の浸透を抑制・抑止したのは緻密で結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層によるものと結論する。

以上、供試体への H_2SO_4 の拡散は Fick の拡散則に従い、その拡散速度は供試体⑤が最も遅く耐硫酸性が高い。

4. 5. 10 粉末X線回折測定 (XRD)

図-4.17 に供試体①の二水石膏部, 図-4.18 に供試体①の健全部, 図-4.19 に供試体③の健全部, 図-4.20 に供試体④の二水石膏部, 図-4.21 に供試体④の中性化部, 図-4.22 に供試体⑤の二水石膏部, 図-4.23 に供試体⑤の健全部の XRD の結果を示した.

図-4.18, 図-4.19, 図-4.23 に示す各供試体の健全部の XRD より, 供試体①の主成分は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ であり, 供試体③, ⑤は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以外に混合した CaCO_3 や CaF_2 の回折線が認められ, 供試体内部は健全な状態と考えられる.

図-4.17, 図-4.20 に示す各供試体の二水石膏部の XRD より, 供試体①, ④の回折線は $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ のみである. すなわち本結果より, セメントのみの供試体では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などが $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化するが, CaCO_3 で置換した供試体においては $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に加え CaCO_3 も $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化するといえる.

図-4.21 に示す供試体④の中性化部の XRD より回折線は CaCO_3 のみであり, 健全部に存在する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や, H_2SO_4 との反応により生成される $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は確認されない. これは先の図-4.16 の供試体への硫酸浸透の概念図にも記したが, 置換した CaCO_3 が H_2SO_4 との反応により CO_2 を遊離し, 健全部の細孔中に保持されたアルカリ性の自由水に溶解し中性化させたためと結論する.

図-4.22, 図-4.23 に示す供試体⑤の二水石膏部と健全部の XRD より, 二水石膏部では $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 以外に CaF_2 の回折線が健全部と同様に確認されたこと, また理論上本実験条件では CaF_2 と H_2SO_4 との反応は考えにくく, 4.4 予備実験 (p80) の結果からも HF ガスが検出されなかったことから, CaF_2 と H_2SO_4 との反応は考えにくい, 先の写真-4.4 (p91) の結果, 単位体積質量の変化および硫酸浸透体積の結果より, CaF_2 が緻密で結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層生成に何らかの影響を与えたと判断する.

以上 XRD による分析結果より, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 は H_2SO_4 との反応により, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化し, CaF_2 も結晶性の良い緻密な

CaSO₄·2H₂O 生成に影響を与え、この CaSO₄·2H₂O より形状を保持し、以降の H₂SO₄ の浸透を抑制し耐硫酸性が向上すると考える。

しかし CaCO₃ と H₂SO₄ の反応によって生ずる CO₂ は硫酸水溶液に溶解しにくく、供試体の細孔中のアルカリ性の自由水に溶解し供試体内部の中性化を促進する。

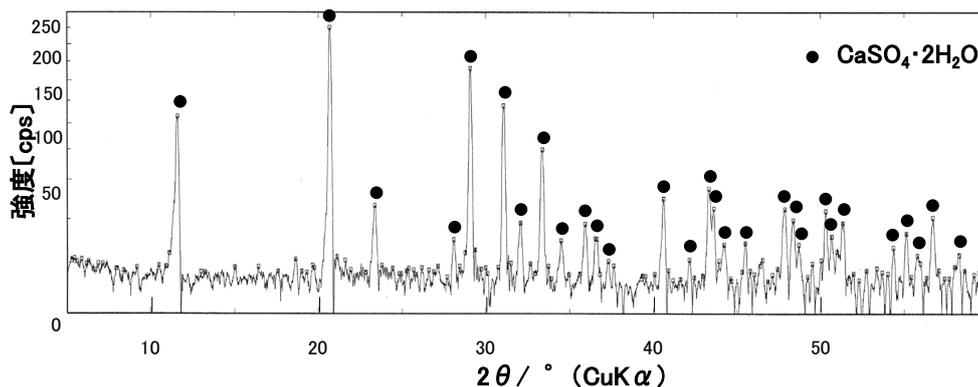


図-4.17 供試体① 二水石膏部

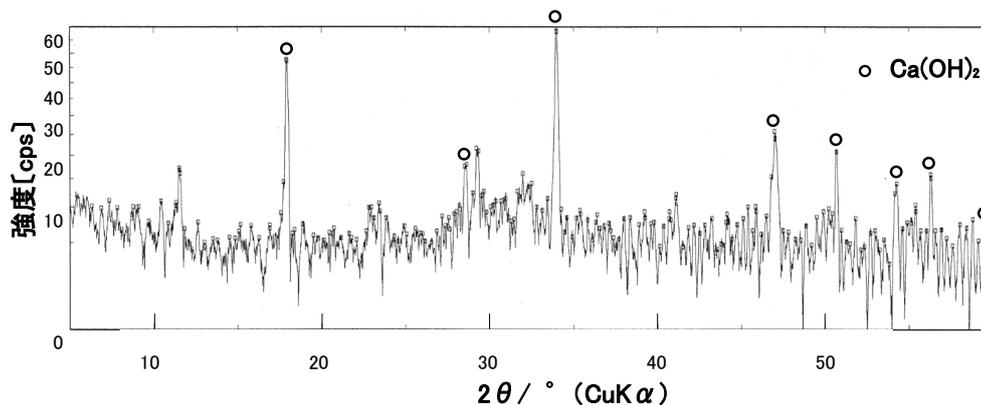


図-4.18 供試体① 健全部

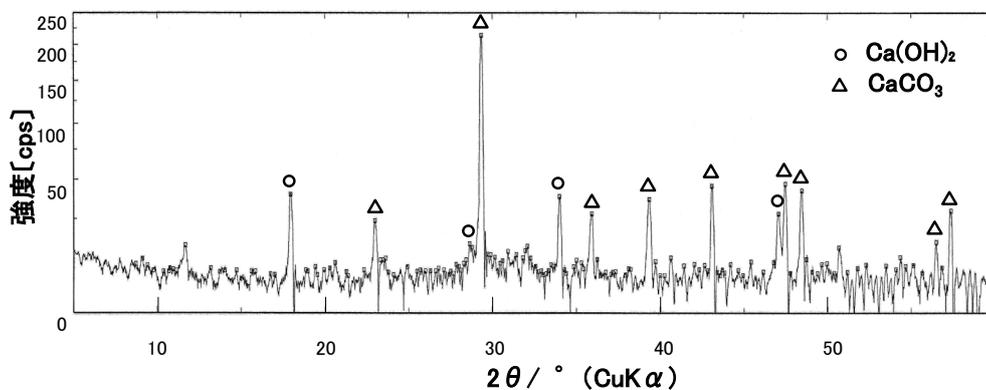


図-4.19 供試体③ 健全部

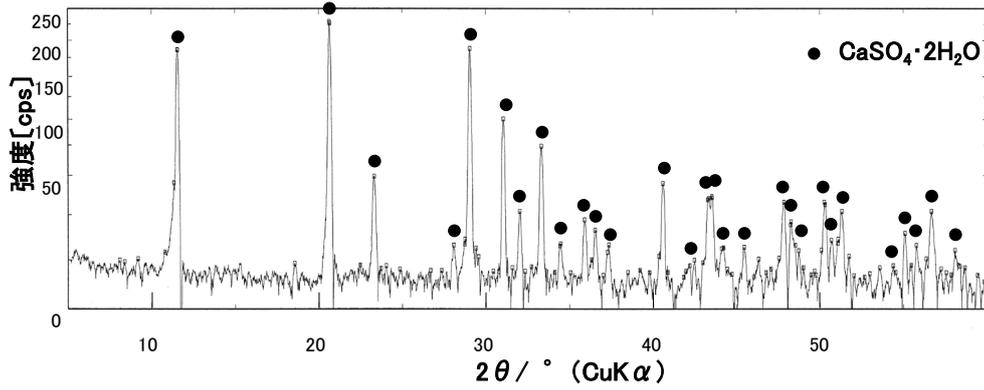


図-4.20 供試体④ 二水石膏部

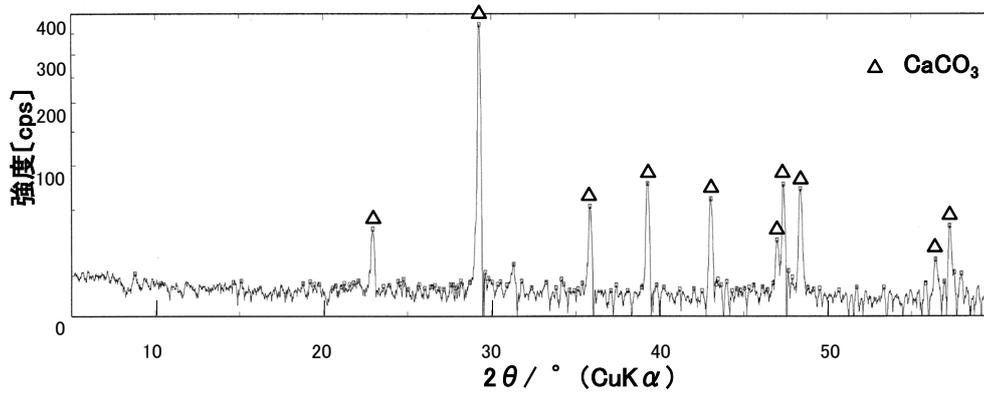


図-4.21 供試体④ 中性化部

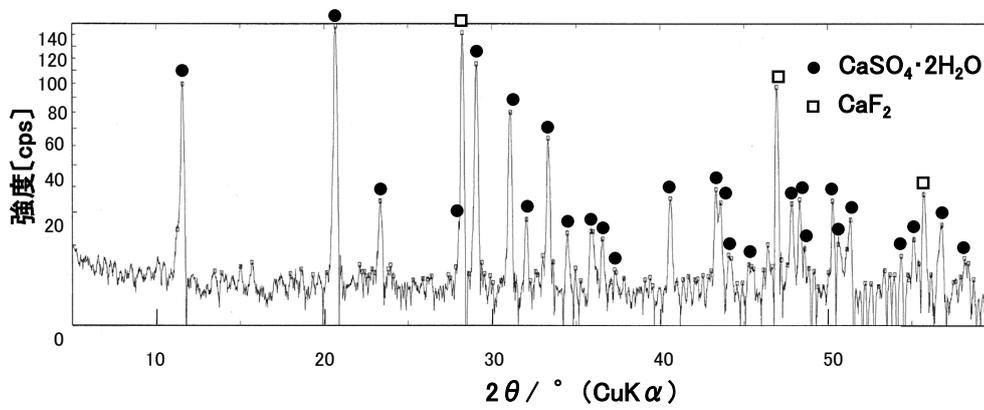


図-4.22 供試体⑤ 二水石膏部

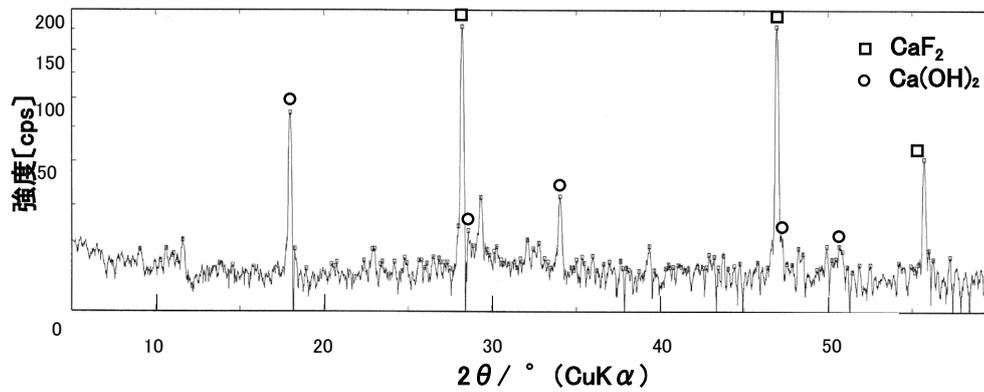


図-4.23 供試体⑤ 健全部

4. 5. 1 1 示差熱-熱重量分析 (TG-DTA)

4. 5. 1 1. 1 カルシウム系化合物の試薬のTG-DTA

図-4.24 に $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 図-4.25 に CaCO_3 , 図-4.26 に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の各試薬 (和光純薬工業製/特級) の TG-DTA の結果を示した.

図-4.24 に示す $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 試薬の熱重量分析 (TG) の結果より, 約 $100 \sim 160^\circ\text{C}$ で水和物の脱水分解が生じており, この時の質量減少量は 5.24mg (20.94%) であった. この減少量から $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の含有率を計算すると 100.10% となり, 試薬の純度 (98.0% 以上) とほぼ一致する.

CaCO_3 の分解温度は 898°C ^{4・8)} であり, 図-4.25 に示す CaCO_3 試薬の TG の結果では約 $660 \sim 760^\circ\text{C}$ で脱炭酸分解による質量減少が生じている. この減少量は 2.20mg (43.96%) であり, この減少量から CaCO_3 の含有率を計算すると 99.99% となり, 試薬の純度 (99.5% 以上) とほぼ一致する.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ の分解温度は 580°C ^{4・8)} であり, 図-4.26 に示す $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 試薬の TG の結果では, 約 $400 \sim 510^\circ\text{C}$ で脱水分解による質量減少が生じている. しかしこの減少量は 6.12mg (22.57%) であり, この減少量から $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含有率を計算すると 92.85% となり, 試薬の純度 (96.0% 以上) とずれが生ずる. また理論上の分解温度以上の約 690°C まで質量が減少していることから $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の一部が炭酸化したと仮定し, 減量分から CaCO_3 の含有率を計算すると 3.33% , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に換算すると 2.46% が炭酸化したことになり, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 試薬の純度とほぼ一致することから, 試薬の一部が炭酸化していたと結論する.

なお, 今回用いた試薬は TG-DTA 分析用として新規に用意したものである.

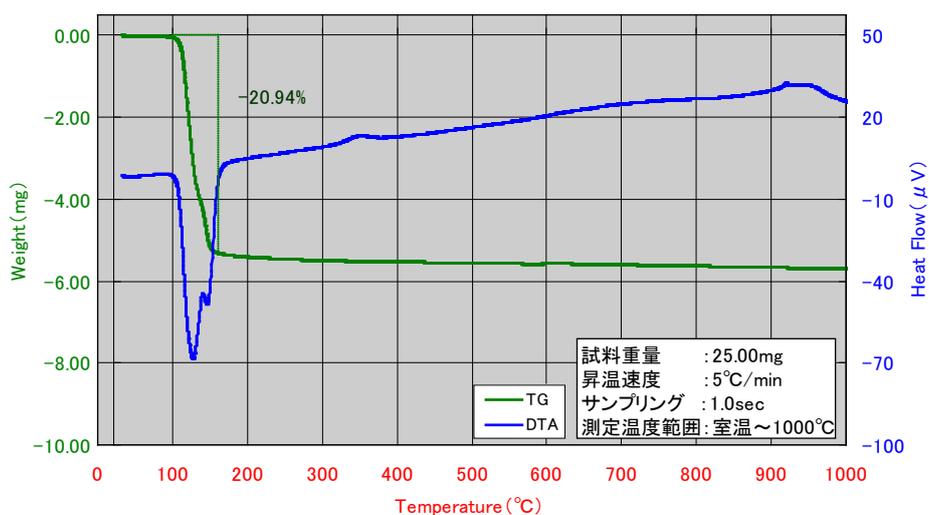


図-4.24 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 試薬の TG-DTA

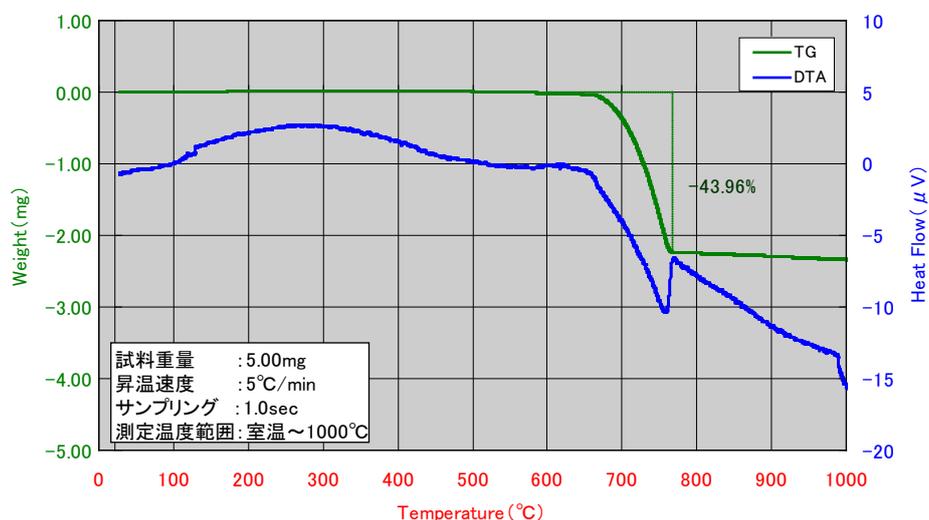


図-4.25 CaCO_3 試薬の TG-DTA

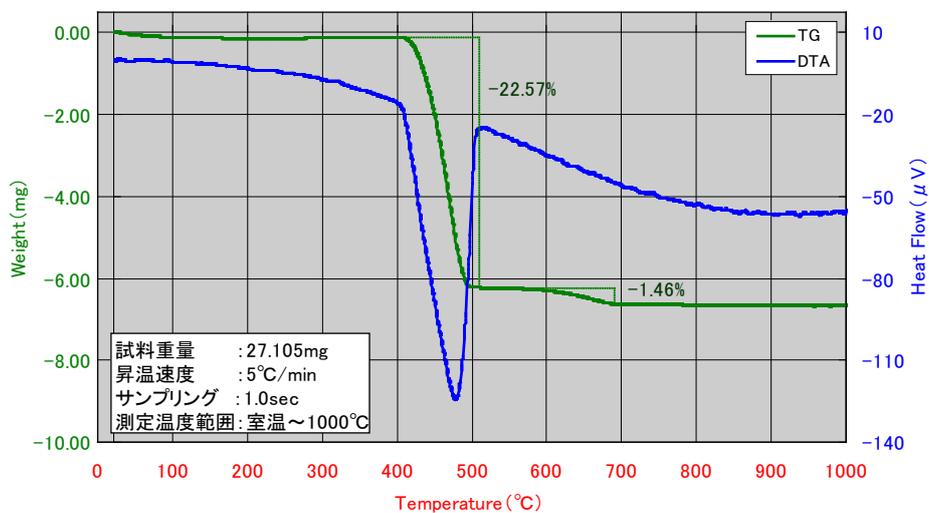


図-4.26 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 試薬の TG-DTA

4. 5. 1 1. 2 各供試体の健全部のTG-DTA

図-4.27～図-4.31 に示した各供試体の健全部の TG-DTA の分析結果より、TG はいずれも同様な傾向を示し、約 100℃までは供試体中の自由水の蒸発、その後約 440℃まではセメント水和物からの脱水による質量減少が見られ、約 440～470℃で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水分解が生じ、その後 CaCO_3 で置換した供試体②（図-4.28）、供試体③（図-4.29）、供試体④（図-4.30）では、約 780～810℃まで CaCO_3 の脱炭酸分解による質量減少が生じている。

一方で CaCO_3 を混合していない供試体①（図-4.27）、供試体⑤（図-4.31）においても、約 690℃付近までセメント水和物の分解

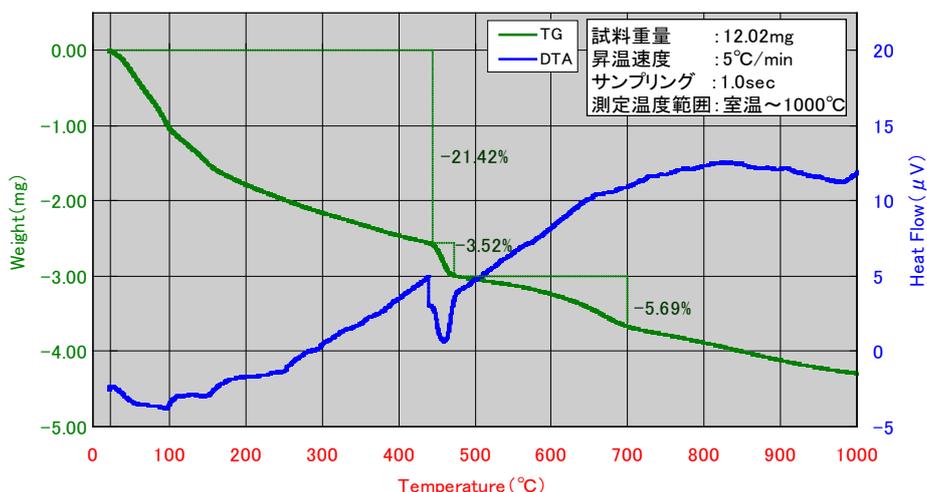


図-4.27 供試体① 健全部のTG-DTA

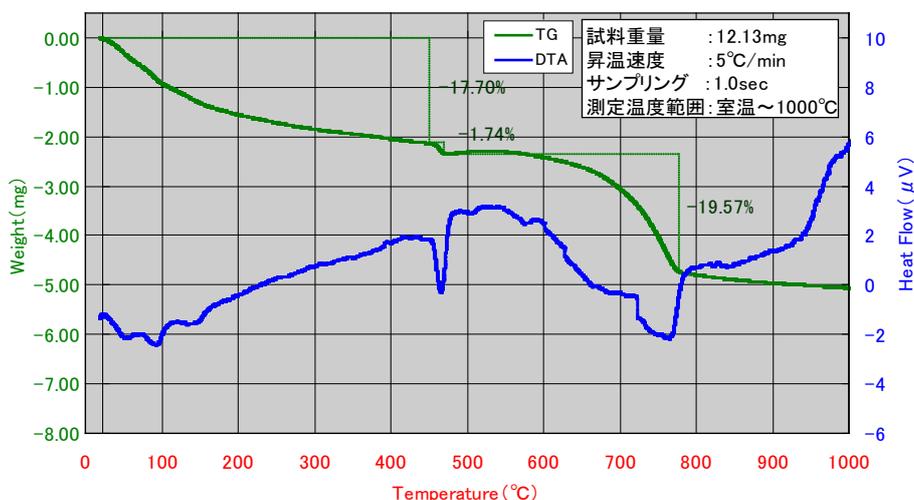


図-4.28 供試体② 健全部のTG-DTA

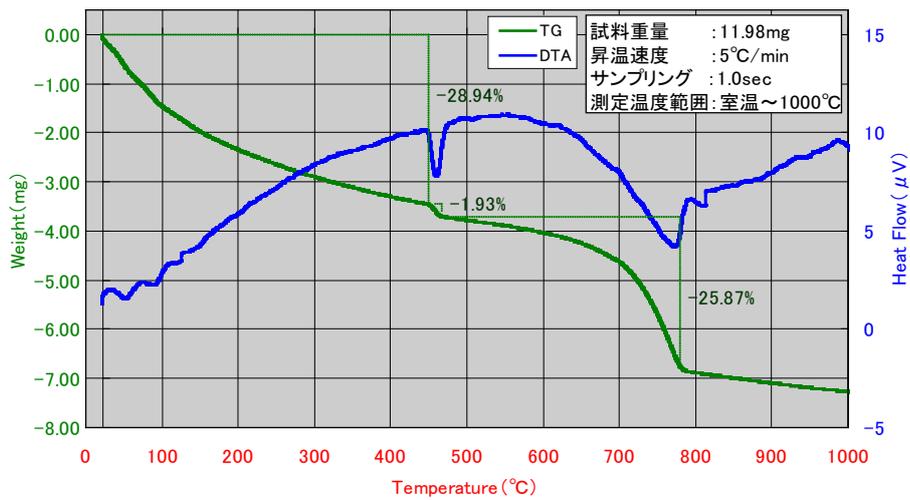


図-4.29 供試体③ 健全部のTG-DTA

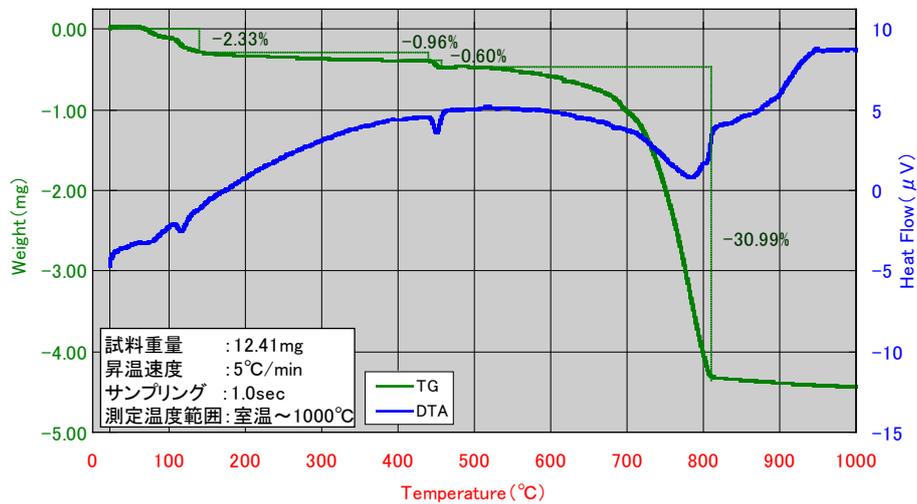


図-4.30 供試体④ 健全部のTG-DTA

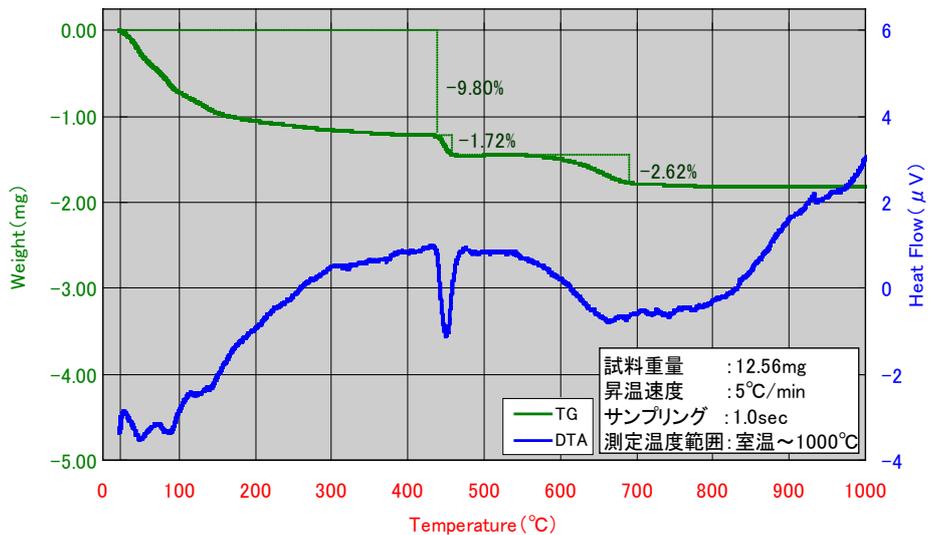


図-4.31 供試体⑤ 健全部のTG-DTA

表－4.8 各供試体の健全部におけるCa系化合物含有率

サンプル	Ca系化合物 と置換率	CaSO ₄ ·2H ₂ O 含有率	Ca(OH) ₂ 含有率	CaCO ₃ 含有率	推定CaCO ₃ 置換率	CaCO ₃ 収支
a) 供試体①の健全部	0.0%	－	14.5%	12.9%	0.0%	0.0%
b) 供試体②の健全部	CaCO ₃ 33.3%	－	7.2%	44.5%	35.9%	2.6%
c) 供試体③の健全部	CaCO ₃ 50.0%	－	7.9%	58.8%	52.4%	2.4%
d) 供試体④の健全部	CaCO ₃ 66.6%	－	2.5%	70.5%	66.1%	－0.5%
e) 供試体⑤の健全部	CaF ₂ 50.0%	－	7.1%	6.0%	－0.5%	－0.5%

とともに CaCO₃ の脱炭酸分解による質量減少が生じている。なお、同温度における TG 曲線の変化は Ca(OH)₂ 試薬の TG (図－4.26) と類似している。

この熱分解による質量減少量から Ca 系化合物の含有率を求めた結果を表－4.8 に示した。表中の Ca(OH)₂ 含有率と CaCO₃ 含有率は TG の変化から計算した含有率であるが、ここでセメントのみの供試体①において CaCO₃ 含有率が 12.9%であったことから、供試体②～⑤に含まれるセメントが CaCO₃ に転換したと仮定し、元々の CaCO₃ 含有率を計算したものが推定 CaCO₃ 置換率である。

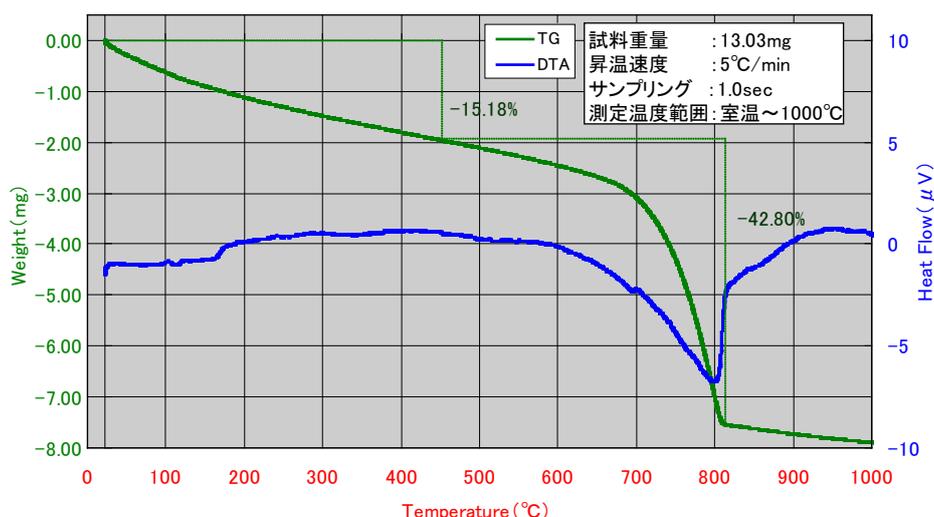
この推定 CaCO₃ 置換率と元々の CaCO₃ 置換率の収支を求めたものが CaCO₃ 収支であるが、推定置換率と置換率はほぼ同じであり、各供試体の健全部は硫酸浸透による影響はなかったと判断する。

4. 5. 1 1. 3 供試体④の中性化部の TG-DTA

図－4.32 に供試体④の中性化部の TG-DTA を示した。

4.5.7 中性化範囲測定 (硫酸浸透範囲測定) (p90～) に示した様に、中性化部は硫酸暴露試験により、供試体⑤以外の全ての供試体に現れ、供試体④は中性化領域が最も大きく 60%近く現れた。また供試体①、②、③は中性化領域が全体面積の数%から十数%と少なくサンプル採取が困難であったため、分析は供試体④のみ行った。

TG の傾向は、他の供試体の健全部の TG から約 440～約 470℃の Ca(OH)₂ の質量減少を除いた変化と類似している。この熱分解による質量減少量から Ca 系化合物の含有率を求めた結果が表－4.9 であり、先の表－4.8 各供試体の健全部における Ca 系化合物含有率の



図－4.32 供試体④ 中性化部のTG-DTA

表－4.9 供試体④の中性化部におけるCa系化合物含有率

サンプル	Ca系化合物 と置換率	CaSO ₄ ·2H ₂ O 含有率	Ca(OH) ₂ 含有率	CaCO ₃ 含有率	推定CaCO ₃ 置換率	CaCO ₃ 収支
f) 供試体④の中性化部	CaCO ₃ 66.6%	—	—	97.3%	93.0%	26.4%

計算方法と同様に、供試体④に含まれるセメントが CaCO₃ に転換したと仮定し、推定 CaCO₃ 置換率を求めると 93.0%となり、CaCO₃ 収支は 26.4%と大幅に置換率を上回ることになる。

すなわち H₂SO₄ との反応により CaCO₃ から遊離した CO₃²⁻が健全部（供試体内部）へ移動し Ca 系化合物を炭酸化させ CaCO₃ 含有率の増加を引き起こしたと判断する。

なお先の図－4.15 供試体の硫酸浸透体積の変化（p101）からも、供試体④において硫酸の供試体内部への拡散が速いことから、CaCO₃ 置換量が多い供試体は内部の中性化が進行しやすいと結論する。

4. 5. 1 1. 4 各供試体の二水石膏部のTG-DTA

図－4.33～図－4.37 に示す各供試体の二水石膏部の TG-DTA 分析結果より、TG に関してはいずれも同様な傾向を示し、約 100～160°Cで CaSO₄·2H₂O の水和物の脱水分解による質量の減少が確認された。

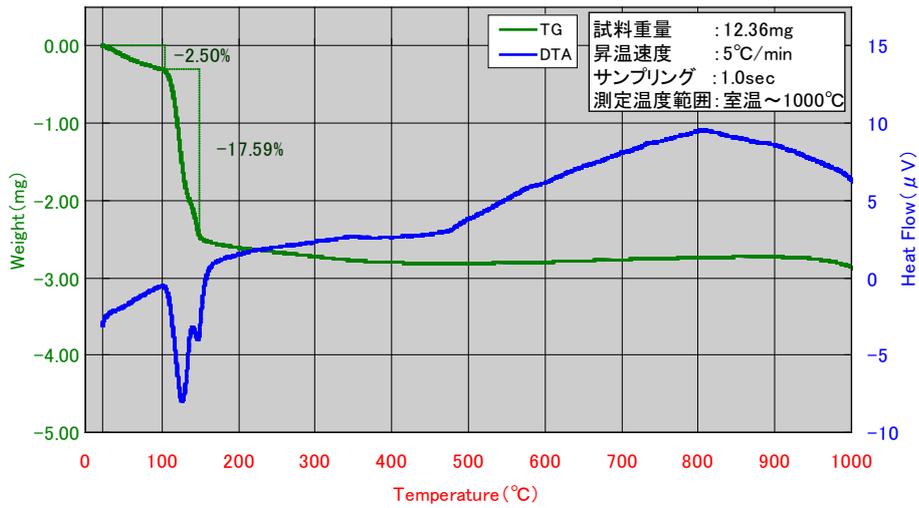


図-4.33 供試体① 二水石膏部の TG-DTA

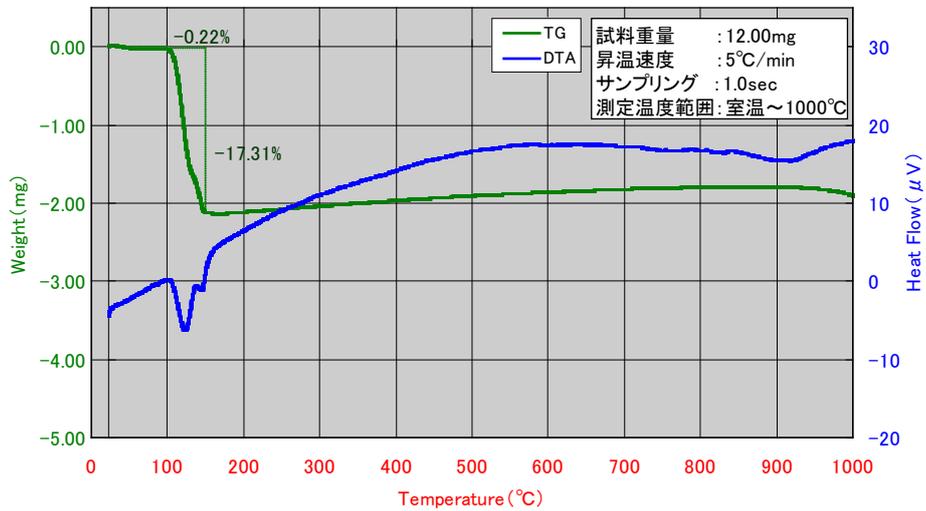


図-4.34 供試体② 二水石膏部の TG-DTA

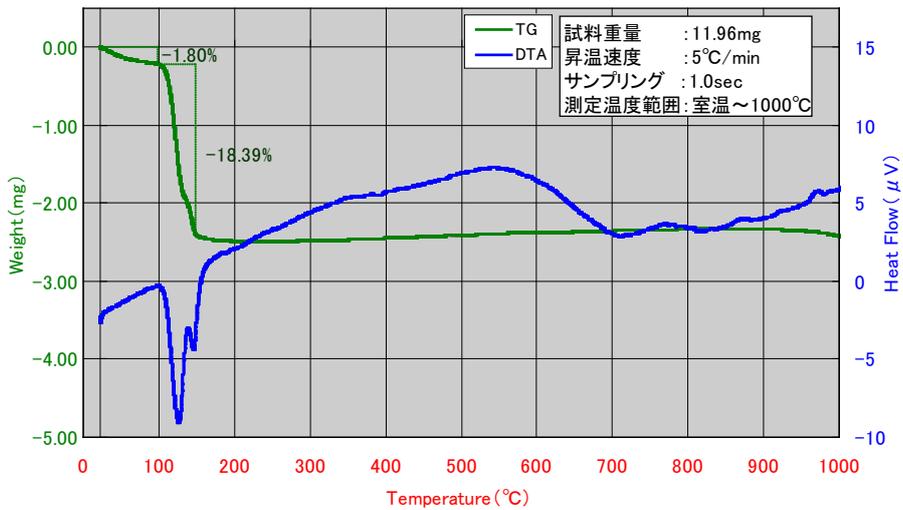


図-4.35 供試体③ 二水石膏部の TG-DTA

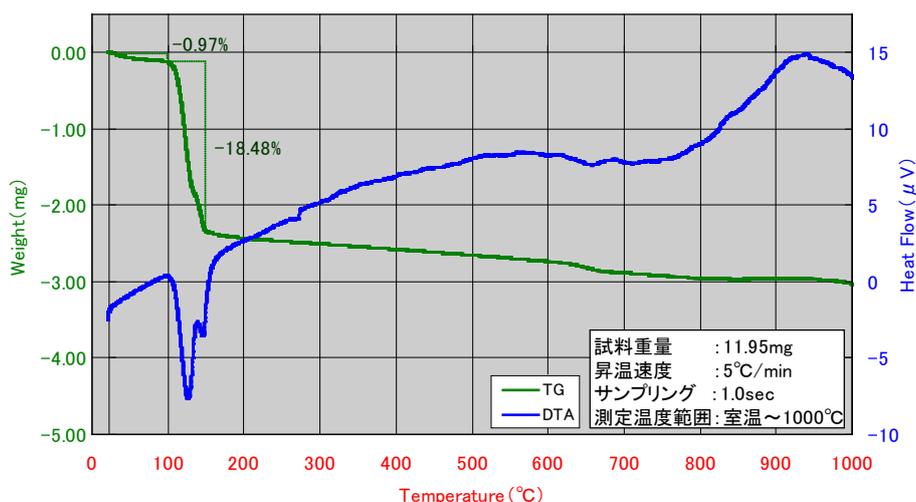


図-4.36 供試体④ 二水石膏部のTG-DTA

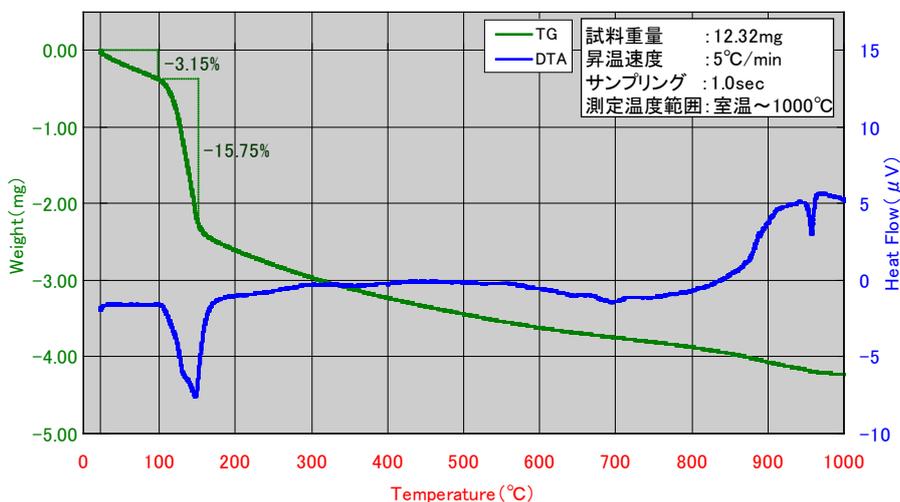


図-4.37 供試体⑤ 二水石膏部のTG-DTA

表-4.10 各供試体の二水石膏部におけるCa系化合物含有率

サンプル	Ca系化合物と置換率	CaSO ₄ ·2H ₂ O含有率	Ca(OH) ₂ 含有率	CaCO ₃ 含有率	CaSO ₄ ·2H ₂ O生成割合		CaSO ₄ ·2H ₂ O転換Ca系化合物	未転換Ca系化合物
					セメント	Ca系化合物		
g) 供試体①の二水石膏部	0.0%	84.1%	—	—	84.1%	—	—	—
h) 供試体②の二水石膏部	CaCO ₃ 33.3%	82.8%	—	—	56.1%	26.7%	15.5%	17.8%
i) 供試体③の二水石膏部	CaCO ₃ 50.0%	87.9%	—	—	42.0%	45.9%	26.7%	23.3%
j) 供試体④の二水石膏部	CaCO ₃ 66.6%	88.3%	—	—	28.1%	60.3%	35.0%	31.6%
k) 供試体⑤の二水石膏部	CaF ₂ 50.0%	75.3%	—	—	42.0%	33.2%	15.1%	34.9%

セメントのみの供試体①(図-4.33), および CaCO₃ の置換率 50% 以下の供試体② (図-4.34), 供試体③ (図-4.35) は 160°C 以降の質量の変化はほぼ横這いか若干の増加を示した。

CaCO₃の置換率 66.6%の供試体④（図－4.36）および CaF₂の置換率 50%の供試体⑤（図－4.37）は 160℃以上で質量の緩やかな減少傾向を示し、供試体④では約 600～700℃の間に CaCO₃の脱炭酸分解と考えられるわずかな質量の減少があるようにも見受けられる。また供試体⑤は 160℃以上でなだらかな減少傾向を示し続けた。この 160℃以上の傾向は先のセメントのみの供試体①の TG-DTA(図－4.27) から Ca(OH)₂の質量減少を除いた変化と類似している。すなわち供試体⑤の二水石膏部には CaSO₄・2H₂O 以外にセメント系の物質が残存していると推察された。

この残存の理由として供試体⑤は 4.5.7 硫酸浸透範囲測定結果 (p90～), および 4.5.1 硫酸水溶液の密度測定 (p81) から実験開始直後は供試体への H₂SO₄の浸透により内部の二水石膏部が増加するが、300 時間辺りから二水石膏部の増加、硫酸水溶液の密度の変化が少なくなる。また 4.5.9 硫酸浸透体積 (p101) においても 300 時間辺りから硫酸の拡散速度が遅くなる。すなわち表面に生成した緻密で結晶性の良い CaSO₄・2H₂O から成る不動態層が以降の H₂SO₄の浸透を妨げたため、表面から内側の二水石膏部は完全に CaSO₄・2H₂O に変化せず、セメント系物質と初期に生成した CaSO₄・2H₂O が共存していたと考える。

次に表－4.10 に熱分解による質量減少量から Ca 系化合物の含有率を求めた結果を示した。結果より、供試体①～④の約 83%～88% が CaSO₄・2H₂O であり、Ca(OH)₂および CaCO₃が定量されなかったことから、ほとんどの Ca 系化合物は CaSO₄・2H₂O に変化したと判断する。また表中の CaSO₄・2H₂O 生成割合は、セメントのみの供試体①において CaSO₄・2H₂O 含有率が 84.1%であったことから、供試体②～⑤に含まれるセメントが同率で CaSO₄・2H₂O に転換したと仮定し、セメント由来と Ca 系化合物由来の CaSO₄・2H₂O の割合を推定したものである。

またこの推定により CaSO₄・2H₂O に転換した CaCO₃および CaF₂の割合を求めたものが、CaSO₄・2H₂O 転換 Ca 系化合物である。

表より、供試体②～④において CaCO_3 は定量されなかったが、計算上未転換 Ca 系化合物が存在する結果となった。

すなわち先の図－4.16 供試体への硫酸浸透の概念図 (p103) に示した(a)中性化領域のある場合の二水石膏部において、 H_2SO_4 は内部への浸透に伴い Ca 系化合物との反応で硫酸イオンが消費され、中性化部との境界ではほぼ H_2O だけとなると推定される。ここで混合した CaCO_3 が H_2O に溶解し供試体内部に移動したと仮定すると、先の表－4.9 供試体④の中性化部における Ca 系化合物含有率 (p113) の CaCO_3 収支で置換率を大幅に上回ったことを説明できる。

硫酸浸透領域の測定および目視観察からは CaCO_3 の置換率 50% 以上の供試体③、④は硫酸暴露後も形状を保持していたことから、 CaCO_3 混合セメント硬化体に生成された $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は緻密で結晶性が高いと判断される。なおこのことは 4.5.6 圧縮強度試験 (p88) に示した硫酸暴露による圧縮強度の増加からも裏付けされる。

一方供試体⑤では、置換した CaF_2 と H_2SO_4 との反応は本実験条件では考えにくく、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量は最大でセメントの占有率である 50%と予想されたが、測定結果は 75.3%となり、また推定では $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に転換した CaF_2 は 15.1%と、 H_2SO_4 との反応が示唆される結果となった。

4. 5. 1 1. 5 各供試体における CaCO_3 の定量

4.5.11.3 供試体④の中性化部の TG-DTA (p112) の結果より、 CaCO_3 で置換した供試体④の中性化部において、置換量よりも多く CaCO_3 が定量され、また 4.5.11.4 各供試体の二水石膏部の TG-DTA (p113) において、 CaCO_3 が H_2SO_4 により Ca^{2+} と CO_3^{2-} に分解され、 CO_3^{2-} が健全部の炭酸化を促進させたと推察された。

このことから 4.5.8 単位体積質量 (p97) で求めた暴露実験前・後の単位体積質量と、暴露実験後の二水石膏部、健全部、中性化部の各領域面積から各領域の単位体積質量を推定し、 CaCO_3 が定量された中性化部、健全部における CaCO_3 含有率を求めた結果を表-4.11 に示した。なお体積は、デジタルマイクロスコープ (KEYENCE VHX-1000) の面積測定機能 (撮像倍率: 5 倍, 撮像範囲: $61 \times 45.5 \text{mm}$, ピクセル数: 1600×1200 , 測定領域を多角形で囲み, 包囲線内のピクセル数から面積を計測) を用いて計測した面積に、単位長さ 1mm を掛けて求めた。

各供試体の中性化部の CaCO_3 含有率は、前述のとおり供試体①から供試体③は全体面積に占める中性化領域が小さくサンプル採取が困難なことから、供試体④の分析値を代替値として用いた。

表より、 CaCO_3 推定含有率は供試体②において若干誤差があるものの CaCO_3 の置換率とほぼ一致した。しかし供試体②は、総体積の減少量と CaCO_3 推定含有率から、元の含有率を推定すると 31.4% となり、置換率とほぼ一致する。すなわち、供試体②は H_2SO_4 との反応により CaCO_3 から遊離した CO_3^{2-} イオンが供試体内部へ移動し、再び CaCO_3 を生成するため内部の CaCO_3 含有率が高くなる。一方で供試体表面に生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ による膨張圧を受容できず、表面が剥離・脱落、総体積が減少するため、内部に CaCO_3 が濃縮された形となり全体として CaCO_3 含有率が高くなったといえる。これは 4.5.10 粉末 X 線回折測定 (XRD) (p105) の結論と一致する。

表-4.11 硫酸暴露実験後の各供試体の CaCO₃含有率

供試体	Ca系化合物 置換率	総体積※ (mm ³)	体積※(mm ³)			実験終了 時単位体 積質量 (g/cm ³)	推定単位体積質量(g/cm ³)			総質量 (g)	推定質量(g)			CaCO ₃ 含有率(%)		CaCO ₃ 推定質量(g)			CaCO ₃ 推定含有率 (%)
			中性化部	健全部	二水石膏 部		中性化部	健全部	二水石膏 部		中性化部	健全部	二水石膏 部	中性化部	健全部	中性化部	健全部	合計	
			A	B	C		D	a	b		c	d	E=A×a	F=B×b	G=C×c	H=D×d	f	g	
供試体① (セメントのみ)	0%	1029	44	795	190	1.81	1.74	1.92	1.37	1.86	0.08	1.53	0.26	97.3%	12.9%	0.08	0.20	0.28	15.1%
供試体② (セ:炭=2:1)	CaCO ₃ 33.3%	1207	90	865	252	1.73	1.74	1.84	1.35	2.09	0.16	1.59	0.34	97.3%	44.5%	0.16	0.71	0.87	41.6%
供試体③ (セ:炭=1:1)	CaCO ₃ 50.0%	1625	253	980	392	1.80	1.74	1.79	1.88	2.93	0.44	1.75	0.74	97.3%	58.8%	0.43	1.03	1.46	49.8%
供試体④ (セ:炭=1:2)	CaCO ₃ 66.6%	1525	919	260	346	1.78	1.74	1.74	1.88	2.71	1.60	0.45	0.65	97.3%	70.5%	1.56	0.32	1.88	69.4%
供試体⑤ (セ:フ=1:1)	CaF ₂ 50.0%	1616	0	1363	253	1.94	1.74	1.87	2.35	3.14	0.00	2.55	0.59	97.3%	6.0%	0.00	0.15	0.15	4.8%

※長さ1mm当たりの体積として計算

4. 5. 1 2 BET比表面積測定

表-4.12に各供試体の各領域のBET比表面積および全細孔容積，平均細孔直径の測定結果を示した。測定結果より，いずれの供試体も二水石膏部のBET比表面積の方が健全部より大きく，全細孔容積は供試体②以外は二水石膏部の方が大きく，また平均細孔直径は二水石膏部の方が小さくなっている。

この結果を基に H_2SO_4 との反応による粒子の表面状態の変化を模式化したものが図-4.38であり，粒子表面の $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 生成

表-4.12 各供試体の各領域のBET比表面積測定結果

サンプル	BET比表面積 (m^2/g)	全細孔容積 (cm^3/g)	平均細孔直径 (nm)
a) 供試体①の健全部	12.1	0.08	27.4
b) 供試体②の健全部	16.0	0.11	28.3
c) 供試体③の健全部	16.3	0.08	18.8
d) 供試体④の健全部	5.7	0.08	53.4
e) 供試体⑤の健全部	9.9	0.07	27.8
f) 供試体④の中性化部	12.7	0.08	26.0
g) 供試体①の二水石膏部	52.5	0.19	14.5
h) 供試体②の二水石膏部	59.6	0.09	6.3
i) 供試体③の二水石膏部	41.4	0.19	18.6
j) 供試体④の二水石膏部	35.9	0.16	18.1
k) 供試体⑤の二水石膏部	26.3	0.11	17.3

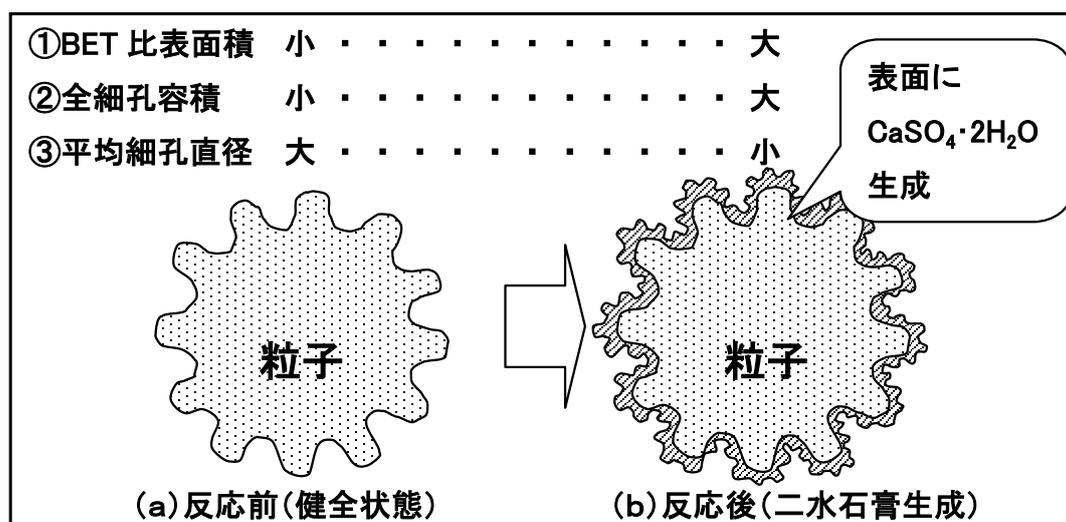


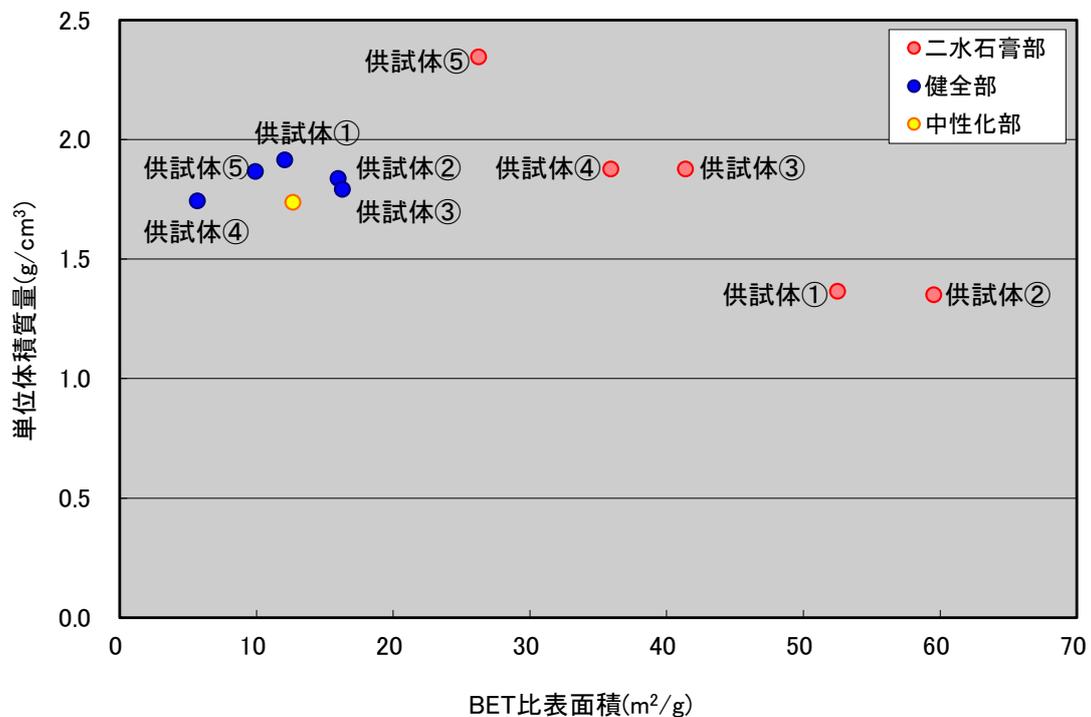
図-4.38 硫酸との反応による粒子表面の状態変化

により BET 比表面積が増加し，全細孔容積も増加するが，逆に平均細孔直径は小さくなると説明できる．

次に表－4.11 に示した各領域の推定単位体積質量と BET 比表面積との関係を示したものが図－4.39 である．図より健全部のプロットは単位体積質量：1.74～1.92g/cm³（範囲：0.18g/cm³），BET 比表面積：5.7～16.3m²/g（範囲：10.6m²/g）と狭い範囲に分布しており，単位体積質量と BET 比表面積の相関（ $r=0.2895$ ）は低い．

一方，二水石膏部のプロットは単位体積質量：1.37～2.35g/cm³（範囲：0.98g/cm³），BET 比表面積：26.3～59.6m²/g（範囲：33.3m²/g）と広い範囲に分布し，高い負の相関関係（ $r=-0.9709$ ）が確認された．特に耐硫酸性が高い供試体ほど，BET 比表面積が小さく単位体積質量が大きいことから，生成した CaSO₄・2H₂O の結晶性が良く，結晶が大きく成長し，供試体表面を被覆していると判断する．

なお供試体①，②は二水石膏化により単位体積質量は低下し，BET 比表面積は他の供試体に比べ大きく，また目視観察では形状を



図－4.39 BET 比表面積と各領域の単位体積質量の関係

保持できず表面から剥離・崩壊していたことから、 H_2SO_4 との反応により生成された $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は結晶性の悪い、ポーラスな構造といえる。

これまでの結果と総合して考察すると、供試体③、④は二水石膏化により単位体積質量は若干の増加を示すが、BET比表面積は供試体①、②に比べ小さく、また形状変化はわずかであり表面の触感は硬質であったことから、生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の結晶性は良く、表面を被覆した状態と考えられる。

供試体⑤は最も BET 比表面積の変化が少ないが、単位体積質量が増加していることから、供試体③、④以上に結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し、表面を被覆していると結論する。

4. 6 結論

本研究は Ca 系化合物を用いコンクリートの耐硫酸性向上を目的とし、セメントの一部を CaCO_3 または CaF_2 で置換したセメント硬化体を用いて硫酸暴露実験を行った。本章の実験結果から得られた知見をまとめると以下の通りである。

(1) 硫酸水溶液の密度測定

セメントの質量の 50%以上を、 CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体の硫酸水溶液の密度の低下は少なく、特に CaF_2 で置換した供試体を浸漬した硫酸水溶液の密度の低下が少ない。

(2) 質量測定

セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体の質量は、実験開始当初は増加傾向を示すが、その後は硫酸水溶液の密度の低下と連動するように質量の減少傾向を示す。

一方セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 で置換した供試体は実験開始当初は減少傾向を示すが、その後は増加傾向に転じ、実験終了時には元の質量とほぼ同じとなった。

またセメントの質量の 50%を CaF_2 で置換した供試体は、実験開始直後に微量の減少を示すが、その後は増加傾向に転じ、実験終了時には元の質量より若干増加した。

(3) 目視観察

硫酸暴露によりセメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体は、容易に H_2SO_4 による侵食を受けるが、セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体は、 H_2SO_4 の侵食をほとんど受けず、表面は結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と考える乳白色の硬い生成物で覆われ、容器内底部への沈殿物もほとんどない。

(4) 形状測定

セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体は、実験開始後若干の膨張傾向を示すが、その後は減少傾向を示す。この変化は供試体の質量変化と同期している。

セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体は、形状変化はほとんどないが、表面は結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と考える乳白色の硬質な物質に変化しており、この変化が先の質量増加を引き起こしたといえる。

(5) 硫酸水溶液の密度と供試体質量

セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体は硫酸水溶液の密度低下とともに質量減少を示す。

しかし、セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体は、硫酸水溶液の密度の低下とともに質量増加を示す。これは供試体が H_2SO_4 との反応により密度の高い物質を生成したことを示しており、また形状変化の結果からも生成物が供試体表面に留まっているためである。

(6) 質量減少量と厚さ減少量

セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体は、質量減少量と厚さ減少量に関連性が認められるが、セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換した供試体は、質量の変化に対し形状の変化はわずかであり、形状は保ちつつ質量が変化している。中でもセメントの質量の 50%を CaF_2 で置換した供試体は質量増加の傾向が強い。

(7) 圧縮強度試験

暴露実験前後でセメントのみの供試体に変化はないが、 CaCO_3 で置換した供試体は圧縮強度が増加しており、 CaCO_3 置換割合が多くなるほどその傾向は大きくなる。この圧縮強度増加は、硫酸暴露による組成の緻密化によりもたらされると考える。

一方 CaF_2 で置換した供試体の圧縮強度に変化はないが、これは CaF_2 に H_2SO_4 の浸透を妨げる働きがあり、内部で H_2SO_4 との反応が生じなかったことが原因と考えられる。

(8) 中性化範囲測定（硫酸浸透範囲測定）

セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3%を CaCO_3 で置換した供試体は、酸-塩基反応が激しく生じ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量も

多い。また水セメント比が他の供試体に比べ小さいため、組織は緻密となり $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を受容できず、二水石膏部が脱落し健全部への H_2SO_4 の浸透が容易になる。このため総面積および健全部の減少率も大きくなる。

CaCO_3 置換供試体は、置換量が増えるほど中性化部が増加する。これはセメント量減少によるアルカリ量の減少と、 CaCO_3 と H_2SO_4 の反応によって生ずる CO_2 がセメント硬化体内部の中性化を促進するためである。

セメントの質量の 50% を CaF_2 で置換した供試体は、総面積と健全部の減少率が低く中性化部も存在しない。また二水石膏部の増加率も小さく H_2SO_4 の消費量も少ないことから、高い耐硫酸性を有するといえる。

(9) 単位体積質量

セメントの質量の 50% 以上を CaCO_3 で置換した供試体は、細孔量が多く $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成による膨張圧を細孔が受容し、組織が緻密化するため、形状を保持しつつ単位体積質量が増加する。

(10) 硫酸浸透体積

供試体への H_2SO_4 の拡散は Fick の拡散則に従い、拡散速度はセメントの質量の 50% を CaF_2 で置換した供試体が最も遅く、また H_2SO_4 との反応で結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層を表面に生成するため、以降の H_2SO_4 との反応が抑制・抑止される。

(11) 粉末 X 線回折測定 (XRD)

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 は H_2SO_4 との反応により、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に変化するが、XRD からは CaF_2 と H_2SO_4 と反応は確認できない。

(12) 示差熱-熱重量分析 (TG-DTA)

CaCO_3 を混合した供試体は、 H_2SO_4 との反応により CaCO_3 から遊離した CO_3^{2-} が健全部（供試体内部）へ移動し、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などと反応し CaCO_3 を再生成するため、内部の CaCO_3 含有率が高くなる。

なお、この結果は暴露実験後の供試体の CaCO_3 推定含有量と置換率がほぼ一致すること、および XRD による生成物質の同定解析結

果からも裏付けされる。

また CaF_2 で置換した供試体において、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量とセメントおよび CaF_2 の配合量との収支が合わず、本実験条件では生じないと考えられていた CaF_2 と H_2SO_4 の反応が示唆された。

(13) BET 比表面積測定

二水石膏部の単位体積質量と BET 比表面積には高い相関関係が確認され、耐硫酸性が高い供試体ほど、BET 比表面積が小さく、単位体積質量が大きくなる。

これは生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の結晶性が良く、結晶が大きく成長しているためと考える。特に CaF_2 で置換した供試体は BET 比表面積の変化が少なく、単位体積質量は増加していることから、結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を表面に生成し、被覆していると結論する。なお、これは先の硫酸浸透体積の結果からも裏付けされる。

以上、総合的に判断すると、セメントのみ、およびセメントの質量の 33.3% を CaCO_3 で置換した、セメント量の多い供試体は耐硫酸性が低く、 H_2SO_4 による侵食が激しい。

セメントの質量の 50% 以上を CaCO_3 で置換した供試体は、 H_2SO_4 との反応により結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し、組織が緻密化し圧縮強度も増加する。しかし、 CaCO_3 から遊離した CO_3^{2-} が健全部（供試体内部）へ移動し CaCO_3 を再生成するため、内部の CaCO_3 含有率が高くなる。なお CaCO_3 置換量が多いほど H_2SO_4 の内部への拡散が速く、中性化領域も増加することから、強アルカリにより鉄筋を保護する鉄筋コンクリート構造には適さない。

セメントの質量の 50% を CaF_2 で置換した供試体は、 H_2SO_4 の拡散速度は最も遅く、また H_2SO_4 との反応で結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層を表面に生成するため、以降の H_2SO_4 の浸透が抑制・抑止される。このため圧縮強度の増加はなく、また健全部が多く残存し中性化領域も確認されないことから、鉄筋コンクリート構造としての可能性が示された。

なお TG の分析結果より， CaF_2 で置換した供試体において $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量の収支が合わず，本実験条件では生じないと考えられていた CaF_2 と H_2SO_4 の反応が示唆された．

〈参考文献〉

- 4-1) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，技報堂出版，p46，pp.139～140，p322，1995.11
- 4-2) 小西和夫，黒澤功，五十嵐秀明，須賀雄一：下水道施設用コンクリートの耐硫酸性に関する研究，セメント・コンクリート論文集 Vol.57，pp.15～320，2003
- 4-3) 蔵重勲，魚本健人：コンクリート中の水和物および微細構造が耐硫酸性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.469～474，2001
- 4-4) 東京都下水道局施設管理部：コンクリート改修技術マニュアル（処理施設編），参-11，2005
- 4-5) 日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル，付 pp.20～22，2007
- 4-6) 日本下水道事業団：耐硫酸モルタル防食技術の技術評価に関する報告書，p6，pp.3-21～3-24，2008
- 4-7) 岸谷孝一，西澤紀昭他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化，技報堂出版，p5，1986.8
- 4-8) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，技報堂出版，pp.215～221，1995.11
- 4-9) 野呂純二，加藤淳：解説 比表面積,細孔分布,粒度分布測定，ぶんせき 2009.7，（公社）日本分析化学会，pp.349～355，2009
- 4-10) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，技報堂出版，p373，1995.11

第 5 章

CaF₂ 混合による耐硫酸性向上の解明

5. 1 はじめに

第 4 章では，セメントの質量の 50%以上を CaCO_3 または CaF_2 で置換することにより，耐硫酸性が向上することを明らかにした．この耐硫酸性向上について種々の測定項目について行った検討結果をまとめたものが表-5.1 である．

特にセメントの質量の 50%を CaF_2 で置換した供試体は，高い耐硫酸性を有することが明らかとなり， H_2SO_4 との反応により結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層を表面に生成し，以降の H_2SO_4 の浸透を抑制・抑止すると考察した．

さらに本実験条件では生じないと考えられていた CaF_2 と H_2SO_4 の反応が示唆された．

CaF_2 と H_2SO_4 の反応により HF を生成する場合，濃硫酸を用い $450 \sim 550^\circ\text{C}$ の加熱条件下で行われる^{4・10)}ため，本実験のように 10mass%の希硫酸を用い，加熱なしの条件では CaF_2 と H_2SO_4 との反応は考えにくく，第 4 章 4.4 予備実験 (p80) から HF ガスは検出さなかったことから，本実験条件では CaF_2 と H_2SO_4 の反応はないと考えられた．しかし供試体⑤の二水石膏部の TG 分析結果(図-4.37 および表-4.10 k) (p115) では $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量は約 75%となり，配合したセメントが全て $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ に転換した場合よりも多くの $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が定量されたことから， CaF_2 と H_2SO_4 の反応が示唆された．

この結果を踏まえ， CaF_2 試薬 (和光純薬工業 / 特級 : 純度 97.0% 以上) を 10mass%硫酸水溶液に入れ，100 時間後の CaF_2 と硫酸混合沈殿物の分析を行った．

表-5.1 耐硫酸性向上に関する測定・検討結果総括表

測定・検討項目	①セメントのみ	②セ:炭=2:1	③セ:炭=1:1	④セ:炭=1:2	⑤セ:フ=1:1
硫酸水溶液の密度	x	x	△	△	○
	低下傾向		低下が少ない		特に低下が少ない
供試体質量の変化	x	x	△	△	○
	減少傾向		一旦減少後、増加傾向		実験開始直後に低下、その後は増加傾向
供試体形状の変化	x	x	◎	◎	◎
	一旦増加後減少		ほとんど変化なし		
硫酸水溶液の密度と供試体質量	xx	x	○	○	◎
	硫酸密度低下と同時に質量減少		硫酸密度低下とともに質量増加、⑤が一番変化が少ない		
供試体の質量減少量と厚さ減少量	xx	x	○	○	○
	質量減少とともに厚さも減少		形状変化は少ないが、質量が変化、特に⑤は質量増加傾向		
圧縮強度試験	○	◎	◎	◎	○
	変化なし		暴露により圧縮強度増加		変化なし
硫酸浸透範囲測定	x	x	x	x	○
	総面積の減少著しい		内部のアルカリ消失、特に④が著しい		アルカリ分保持
総面積	x	x	◎	◎	○
	64%	75%	97%	95%	88%
二水石膏部	x	x	△	△	○
	48%	41%	25%	27%	15%
健全部	x	x	x	xx	○
	50%	54%	61%	16%	86%
中性化部	○	○	△	x	◎
	3%	6%	14%	57%	0%
単位体積質量の変化	x	x	△	△	○
	低下傾向		実験開始後一旦減少、その後増加傾向		実験開始直後に低下、その後は増加傾向
硫酸浸透体積の変化	△	△	△	x	○
	硫酸の拡散ほぼ同じ			硫酸の拡散大	硫酸の拡散小
XRD	Ca(OH) ₂ やCaCO ₃ は硫酸との反応により、CaSO ₄ ・2H ₂ Oに変化				CaF ₂ と硫酸の反応は確認できず
TG-DTA	CaCO ₃ から遊離したCO ₃ ²⁻ が供試体内部へ移動し、CaCO ₃ を再生成				CaF ₂ と硫酸の反応が示唆
BET比表面積測定	耐硫酸性が高い供試体ほど、BET比表面積が小さく、単位体積質量が大きい				
総括	硫酸との反応で供試体が経時的に侵食	セメントのみの供試体①よりも耐硫酸性はあるが、硫酸との反応で供試体が経時的に侵食	<ul style="list-style-type: none"> ・硫酸の密度低下は少なく、形状変化も少ない ・硫酸暴露により質量増加(組成が緻密化)、強度も増加 ・CaCO₃から遊離したCO₃²⁻が内部を中性化させ、CaCO₃混合量が多いほど硫酸の拡散が速く中性化領域の拡大が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・硫酸の密度低下は少なく、形状変化も少ない ・硫酸との反応で結晶性の良いCaSO₄・2H₂Oから成る不動態層を表面に生成 ・硫酸暴露により質量増加(組成が緻密化) ・硫酸との反応は表面のみ、硫酸の拡散が遅く健全部を多く保持 	

5. 2 実験方法

実験は第 4 章 4.3 実験方法 (p68～) に示した供試体⑤の実験条件を考慮し、 CaF_2 と H_2SO_4 の最大反応量は供試体質量を超えることはないため、 CaF_2 量は供試体の質量と同じ比率で次のとおりに設定した。

CaF_2 試薬 : 46.33g

10mass%硫酸水溶液 : 400mL

500mL のビーカーに上記硫酸水溶液と CaF_2 試薬を入れ、よく攪拌した後、100 時間静置した。その後 5C の濾紙で濾過し、 CaF_2 と硫酸混合沈殿物を 40℃ で 12 時間乾燥した。

乾燥後、XRD および TG-DTA により CaF_2 と硫酸混合沈殿物の同定および定量分析を行った。

XRD 装置は理学電機社製 回折線湾曲結晶モノクロメーター付き RAD-B システムを使用し、測定は対陰極：Cu (モノクロメーター)、管電圧：40kV、管電流：20mA、発散スリット：1deg、散乱スリット：1deg、受光スリット：0.15mm、スキャンスピード：4°/min、スキャンステップ：0.01°で行った。

TG-DTA 装置は Rigaku 社製 示差熱天秤 Thermo plus EVO II /TG-DTA シリーズを使用し、測定条件は、測定温度範囲：室温～1000℃、昇温速度：10.0℃/min とした。

5. 3 結果および考察

5. 3. 1 CaF_2 試薬と 10 mass % 硫酸水溶液による反応性

図-5.1 に CaF_2 と硫酸混合沈殿物の XRD の同定解析結果, 図-5.2 に TG-DTA の分析結果を示した.

図-5.1 の XRD の同定解析結果より, CaF_2 と $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の 2 つの回折線が確認され, 本実験条件では生成しないと考えられていた $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の生成が確認された.

図-5.2 の TG-DTA の分析結果より, 約 $100 \sim 160^\circ\text{C}$ 付近に質量減少が確認された. この質量減少は図-5.3 (図-4.24 を再掲) に示す $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 試薬の TG 曲線と綺麗に一致しており, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の脱水分解による減少と断定できる. この減少量から求めた $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成量は 7.8% であり, CaF_2 が 3.5% 反応したことになる.

なお, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は 109°C で $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (半水石膏), 133°C で CaSO_4 (無水石膏) へと脱水分解する⁵⁻¹⁾ため DTA 曲線で約 $100 \sim 160^\circ\text{C}$ の間に通常 2 つの吸熱ピークが現れるが, 本結果においてピークが 1 つしか確認されないのは, 本測定では昇温速度を $10.0^\circ\text{C}/\text{min}$ としたためである.

以上 CaF_2 試薬と 10 mass % 硫酸水溶液による実験結果から, 本硫酸暴露実験の条件でも CaF_2 と H_2SO_4 が反応し, 生成量はわずかながら $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し, HF も発生しているといえる. なお前

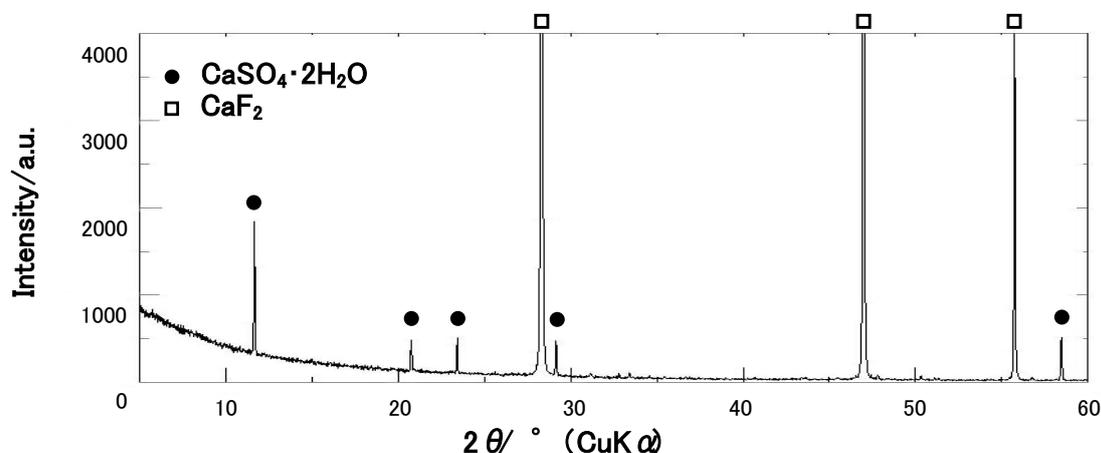


図-5.1 CaF_2 と硫酸混合沈殿物の XRD

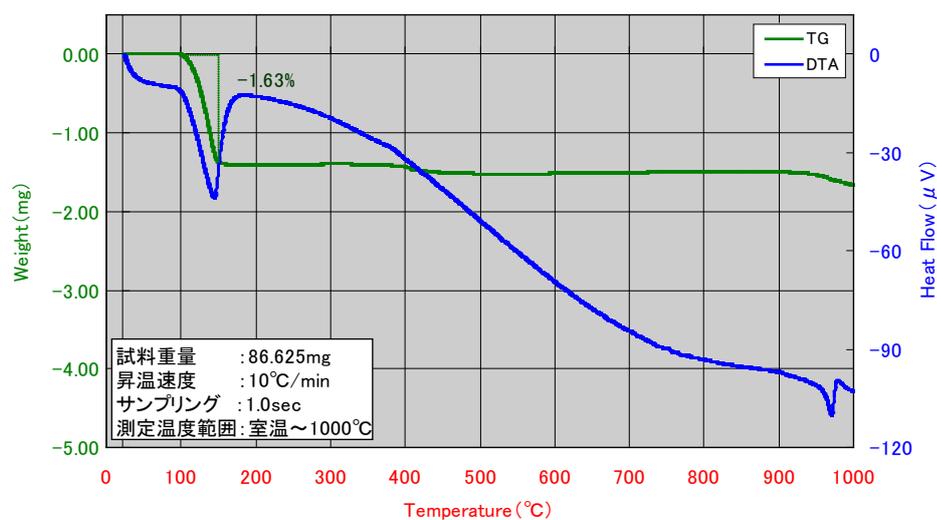


図-5.2 CaF₂と硫酸混合沈殿物のTG-DTA

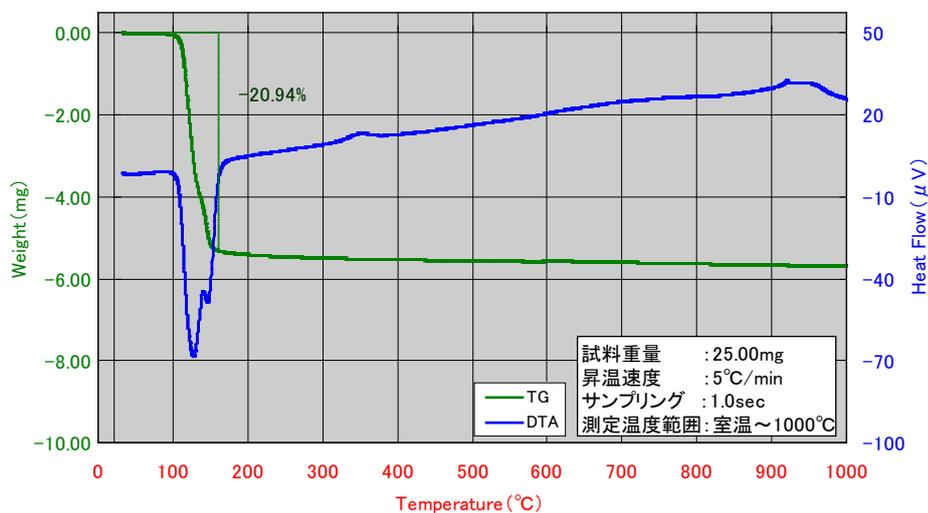


図-5.3(図-4.24) CaSO₄·2H₂O 試薬のTG-DTA

述の HF の製法は大量に HF を発生させることを目的に，反応量が最大になるように設定された条件と考える。

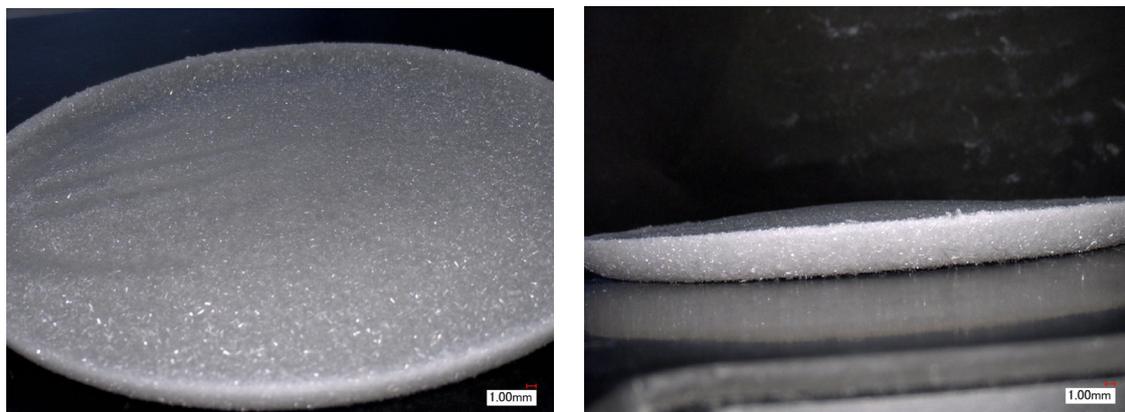
5. 3. 2 長期暴露による硫酸混合沈殿物の分析

CaF₂ 試薬と 10mass%硫酸水溶液による実験結果から，本硫酸暴露実験の条件でも，CaF₂ と H₂SO₄ が反応し CaSO₄・2H₂O を生成することが明らかとなったことから，暴露期間を 9 ヶ月まで延長し CaF₂ と硫酸混合沈殿物の分析を行った。

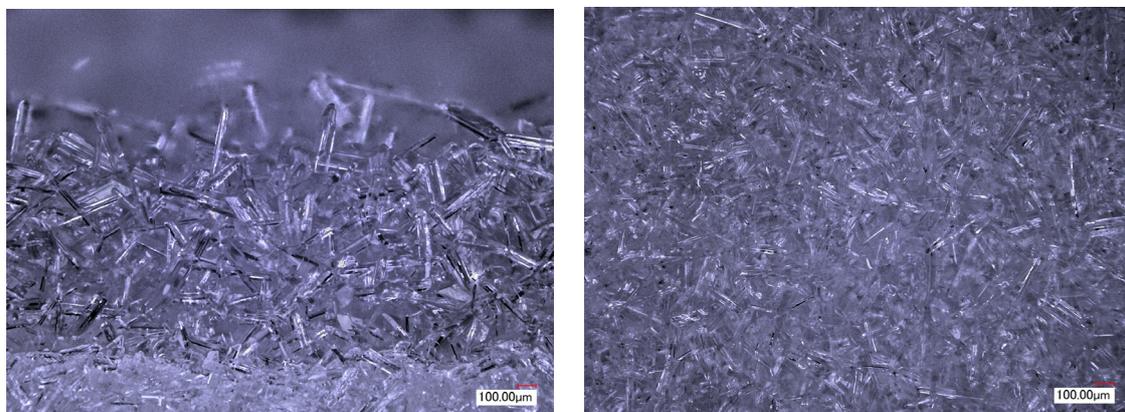
写真－5.1 が 9 ヶ月後の CaF₂ と硫酸混合沈殿物をビーカーから取り出し，乾燥後の状態を写したものである。CaF₂ と硫酸混合沈殿物はビーカー底部で完全に一体化して固化した状態であり，叩くと硬質な音でハンマーを用いないと砕けないほど硬化していた。また表面には透明な針状結晶を生成している様子が目視でも確認された。

写真－5.2 はデジタルマイクロスコープ（KEYENCE 社製 VHX-1000）を用い，倍率×100 で観察した CaF₂ と硫酸混合沈殿物の顕微鏡写真であり，無数の針状結晶が確認される。

図－5.4 に沈殿生成物の XRD を示した。この回折線は CaF₂ と



写真－5.1 9ヶ月暴露した CaF₂ と硫酸混合沈殿物の状態



写真－5.2 CaF₂ と硫酸混合沈殿物の顕微鏡写真(倍率×100)

CaSO₄·2H₂O の典型的なピークと一致している．また TG-DTA の結果を図-5.5 に示した．TG の分析結果より，先の実験結果同様，約 100～160℃ 付近に CaSO₄·2H₂O の脱水分解による質量減少が確認された．この減少量から CaSO₄·2H₂O 生成量を計算すると 54.4% となり，CaF₂ の 24.7% が反応したことになる．すなわち先の 100 時間の実験結果と合わせて，時間経過とともに CaSO₄·2H₂O 生成量が増加することが明らかとなった．また写真-5.3 に CaF₂ の試薬，写真-5.4 に CaSO₄·2H₂O の試薬の顕微鏡写真を示したが，いずれの試薬も写真-5.2 に見られたような結晶とは異なる粒子状のもの

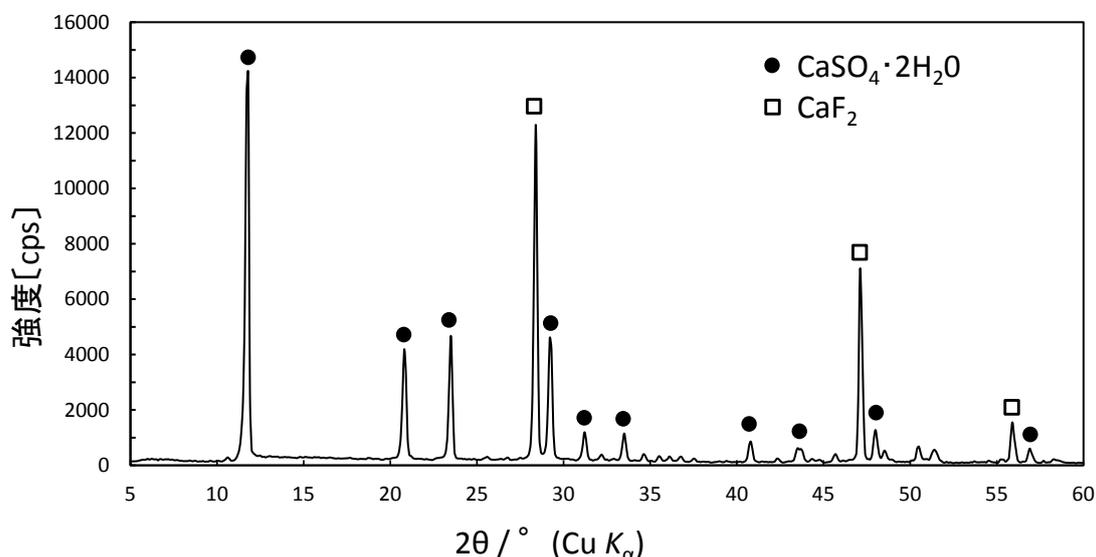


図-5.4 9ヶ月暴露した CaF₂ と硫酸混合沈殿物の XRD

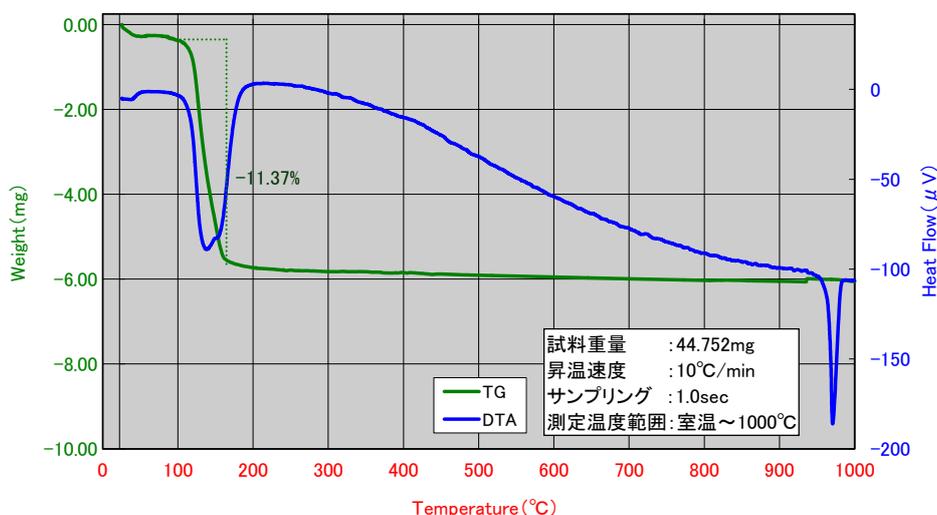
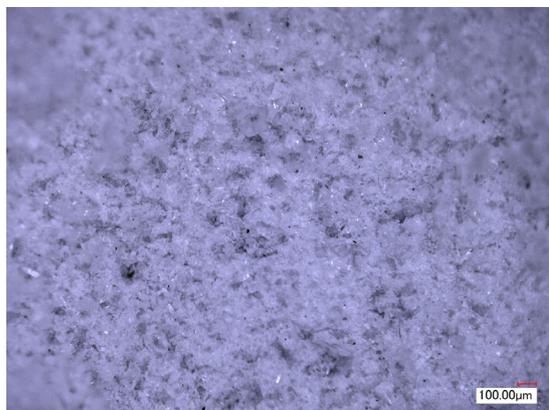
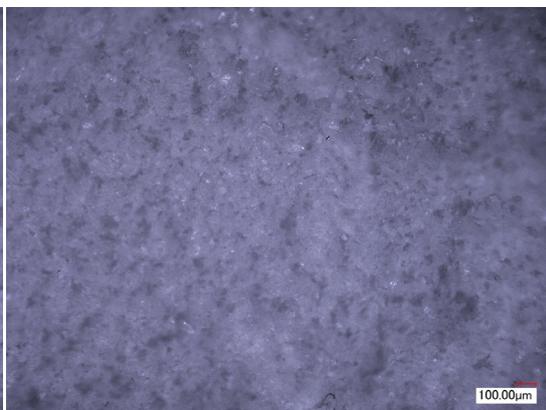


図-5.5 9ヶ月暴露した CaF₂ と硫酸混合沈殿物の TG-DTA

であり、先の針状結晶は CaF_2 と H_2SO_4 との反応により生成した $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が結晶成長したものと判断する。



写真－5.3 CaF_2 試薬の顕微鏡
写真(倍率×100)



写真－5.4 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 試薬
の顕微鏡写真(倍率×100)

5. 3. 3 耐硫酸性向上メカニズムの解明

CaF₂ 試薬と 10mass%硫酸水溶液による実験結果から、本硫酸暴露実験の条件でも、CaF₂ と H₂SO₄ が反応し CaSO₄・2H₂O を生成していることから HF も生成しているといえる。しかし、第 4 章 4.4 予備実験 (p80) においては HF ガスが検出されなかった。

この予備実験の結果と、これまでの結果を総合して CaF₂ 混合による耐硫酸性向上のメカニズムを推察すると以下の通りとなる。

本実験条件において、CaF₂ 混合セメント硬化体と 10mass%硫酸水溶液の反応により生成した HF が微量であり、また HF の沸点は 19.5℃ で、容易に水に溶けて HF になる⁵⁻²⁾ため、ガス態でなくセメント硬化体の細孔中の溶液に溶存状態で存在していると推察する。

さらに HF は反応性が高いため、細孔中の Ca(OH)₂ や、H₂SO₄ により分解されたケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) 中などの Ca 系化合物と反応し微細な CaF₂ を再生成し、細孔を充填していくと考える。

また HF はシリカやケイ酸塩を溶かす⁵⁻²⁾性質があるため、HF 生成から CaF₂ 再生成の過程で、周囲の C-S-H 中のシリカを溶解しコロイド状のシリカを生成する。このコロイド状シリカと再生成した微細な CaF₂ がセメント硬化体中の細孔を充填することにより緻密化したシリカ・CaF₂ 層を形成し、耐硫酸性が向上すると推察する。

結果、図-5.6 に示す概念図のように供試体表面に結晶性の良い

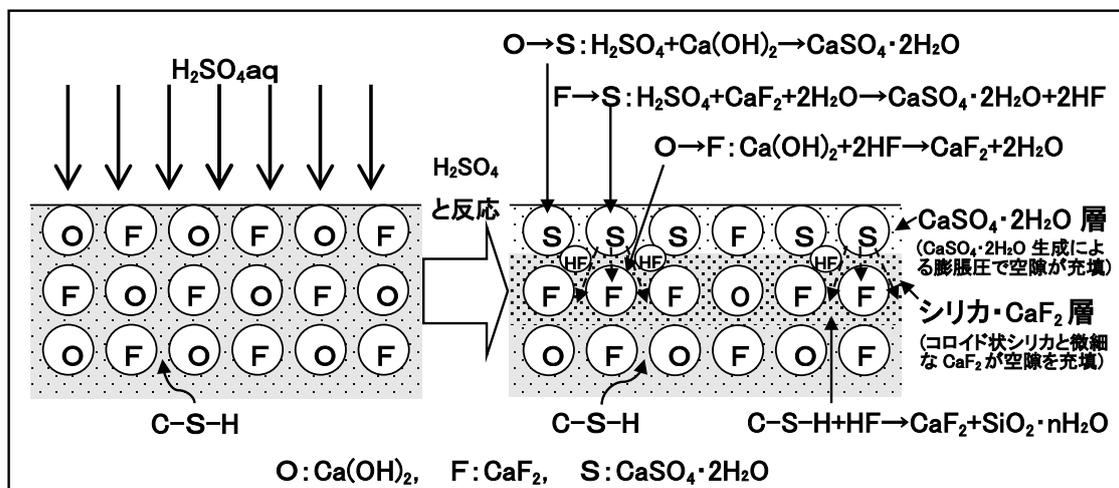


図-5.6 CaF₂ と硫酸による耐硫酸性向上の概念図

緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層を生成すると同時に、その下にコロイド状シリカと再生成した微細な CaF_2 でセメント硬化体中の細孔を充填，緻密化したシリカ・ CaF_2 層を形成し，この二層構造の相乗効果により硫酸浸透抑制効果が高まると結論する．

このシリカ・ CaF_2 層による耐硫酸性向上のメカニズムは， SiF_4 をコンクリート中に浸透拡散させ，コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を化学反応によって不溶性化合物の CaF_2 に置換し耐食層を形成するとともに，コロイド状のシリカを析出させコンクリート中の細孔を充填し，緻密化させるオクラート法の理論と同様なものといえる．

なお供試体表面に結晶性の良い緻密な『 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層』とその下のコロイド状シリカと再生成した微細な CaF_2 でセメント硬化体中の細孔を充填，緻密化した『シリカ・ CaF_2 層』の生成は，以下に示す第 4 章の CaF_2 で置換した供試体の測定結果からも裏付けされる．

- ① 図－4.7 硫酸水溶液の密度と供試体質量の関係 (p86)，図－4.8 供試体の質量減少量と厚さ減少量の関係 (p87)，および図－4.9 硫酸暴露による圧縮強度の変化における変化 (p89) が小さい．
- ② 4.5.7 供試体の中性化範囲測定 (硫酸浸透範囲測定) (p90～) の測定結果から，他の供試体に比べ二水石膏部の増加率が低く，また健全部の残存率が高い．
- ③ 図－4.15 供試体の硫酸浸透体積の変化 (p101) において硫酸の拡散速度が遅い．
- ④ 図－4.37 供試体⑤二水石膏部の TG-DTA，および表－4.10 各供試体の二水石膏部における Ca 系化合物含有率 (p115) より， CaF_2 置換量以上に $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が定量された．
- ⑤ 図－4.39 BET 比表面積と各領域の単位体積質量の関係 (p121) において CaF_2 混合供試体の二水石膏部の比表面積が小さい．
- ⑥ 目視観察では硫酸による侵食が少なく，表面の剥離・脱落も少ない．

5. 4 結論

第 4 章に示した TG の分析結果より, CaF_2 で置換した供試体において CaF_2 と H_2SO_4 の反応が示唆されたことから, CaF_2 試薬を硫酸水溶液に暴露し, CaF_2 と硫酸混合沈殿物を XRD および TG-DTA により分析を行った.

分析の結果, 本実験条件からは生成しないと考えられていた $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 生成が確認されたことから, 本実験条件でも CaF_2 と H_2SO_4 の反応が生じていると結論する.

また反応により発生する HF は C-S-H 中のシリカを溶解, コロイド状のシリカを生成し, さらに HF は周囲の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や C-S-H などの Ca 系化合物と反応し微細な CaF_2 を再生成する. このコロイド状シリカと再生成した微細な CaF_2 が, セメント硬化体中の細孔を充填, 緻密化した, シリカ・ CaF_2 層を形成すると考える.

また第 4 章における種々の測定結果および考察を踏まえ総合的に判断すると, この耐硫酸性向上は, 表面に生成した結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層と, シリカ・ CaF_2 層との二層構造の相乗効果により, H_2SO_4 の浸透が抑制・抑止され, 耐硫酸性が向上すると推察する.

〈参考文献〉

- 5-1) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，技報堂出版，p221，1995.11
- 5-2) 大木道則・大沢利昭・田中元治・千原秀昭：化学辞典，東京化学同人会，p1225，2007.2

第 6 章

総 括

6. 1 総括

本論文は、公衆衛生や浸水の防除などの役割を担い、人々の生活を快適にする、下水道施設の維持管理を効率的かつ戦略的に行い、持続発展可能な社会の構築に貢献すべく行った研究である。特に設計時に考慮された耐用年数よりも早く老朽化を引き起こし、維持管理を困難なものにしている、コンクリート製下水道管の微生物腐食について実態調査と分析を行い、その上で長寿命化のための微生物腐食を生じさせない、新たな耐硫酸性コンクリートについて研究を行った。

第1章では『緒論』として、本研究の背景となる社会資本の老朽化問題および国の対応などについて概説し、特に都市の健全な発達及び公衆衛生の向上と、公共用水域の水質保全に不可欠な社会資本である下水道について、その概略や普及率などの現状、抱えている問題点について概説した。さらに東京都が実施している老朽化対策などの維持管理方法について概説し、その上で本研究の意義について述べた。

第2章の『既設コンクリート製下水道管における腐食の現状』では、下水管渠の早期老朽化の一因であるコンクリートの微生物腐食について、既設下水道管の実態調査を行い、その調査結果から腐食が発生しやすい条件を調べると同時に得られたデータの分析を行った。さらに多変量解析によりコンクリート製下水道管の微生物腐食予測の可能性についても検討を行った。

結果、既設下水道管の腐食調査により得られたデータの分析により腐食の発生しやすい条件が明らかとなり、さらに多変量解析により管径 900mm 以下の管渠において管径、勾配、路線延長、使用年数といった、各自治体が管理している下水道台帳から容易に抽出可能なパラメータから線型判別関数により良好な精度で腐食予測が可能であることを示した。

本手法は危険度の高い路線を選別する、スクリーニング手法として有効であり、本手法により選別された箇所から優先的に調査を行

うことで維持管理費用の削減，および適切な維持管理サイクルの構築などが可能となる．

なお本研究結果を参考に，多くの研究者がこのようなパラメータを用いた老朽化予測や，アセットマネジメントに関する論文を發表しており，本論文に関連した發表論文の引用回数も4回（①～④に示す）と下水道の維持管理手法の構築に貢献している．

①松宮ら，下水道管きよのアセットマネジメント研究，下水道協会誌 Vol.44 No.538，pp.13～19，2007

②稲垣ら，多変量解析を用いた下水道管渠の劣化箇所の予測，セメント・コンクリート No.734，pp.26～30，2008

③藤生ら，アセットマネジメントにおける解析結果の実務的援用手法の提案，下水道協会誌 Vol.46 No.563，pp.118～125，2009

④藤生ら，管渠劣化に関わる必要年間調査延長の算出及び調査箇所の選定のための統計的手法，下水道協会誌 Vol.50 No.605，pp.118～25，2013

第3章では『下水道施設におけるコンクリートの微生物腐食とその対策技術』として，コンクリートの微生物腐食のメカニズム，および微生物が生成する H_2SO_4 とコンクリートとの反応について解説し，現在のコンクリートの微生物腐食に対する対策技術の基本的な考え方，またコンクリートの防食工法として耐硫酸性コンクリート（モルタル）の実用化例を紹介した．

第2章の分析で明らかになったとおり，コンクリート製下水道管に発生する微生物腐食は，特定の箇所ではなく様々な箇所で発生する危険性があり，しかもその進行が早く，供用後10年未満で機能しなくなった例の報告もあり，これら補修にかかる費用や補修工事に伴う施設の停止など，多くの問題を抱えている．

この問題解決のためには新設はもとより，更生・再構築に用いる材料の長寿命化が必要不可欠である．

よって第4章『フッ化物混合セメント硬化体の耐硫酸性に関する検討』では，微生物腐食を受けた施設の補修材料として，また新設

構造物の材料として、「コンクリート表面に緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層を生成させ、 H_2SO_4 の浸透を抑制または抑止する」と言った新しい発想による耐硫酸性コンクリートの研究を行った。

緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層を生成のために本研究では CaCO_3 および CaF_2 に着目し、これらでセメントの一部を置換したセメント硬化体を作製し、10mass%濃度の硫酸水溶液による暴露実験により耐硫酸性の検討を行った。

研究結果より、 CaCO_3 および CaF_2 でセメントの一部を置換したセメント硬化体は耐硫酸性を有するが、置換率により耐硫酸効果に違いが生じ、耐硫酸効果が現れるのは、Ca系化合物をセメントの質量に対し50%以上置換した条件の時であった。

CaCO_3 混合セメント硬化体は H_2SO_4 との反応により結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し、組織が緻密化し圧縮強度も増加するが、 CaCO_3 から遊離した CO_3^{2-} が健全部（供試体内部）へ移動し CaCO_3 を再生成するため、内部の CaCO_3 含有率が高くなる。なお CaCO_3 置換量が多いほど内部への H_2SO_4 の拡散が速く、中性化領域も増加することから、強アルカリにより鉄筋を保護する鉄筋コンクリート構造には適さない。

CaF_2 混合セメント硬化体は H_2SO_4 の拡散速度が最も遅く、 CaF_2 と H_2SO_4 の反応により供試体表面に結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層を生成し、耐硫酸性が向上すると推察した。

第5章は『 CaF_2 混合による耐硫酸性向上の解明』であり、第4章において高い耐硫酸性を示した、 CaF_2 混合セメント硬化体の耐硫酸性向上のメカニズム解明を試みた。結果より、本実験条件からは生じないと考えられていた CaF_2 と H_2SO_4 の反応が生じ、反応により発生する HF が C-S-H 中のシリカを溶解、コロイド状のシリカを生成する。さらに HF は Ca系化合物と反応し、微細な CaF_2 を再生成し、セメント硬化体中の細孔をコロイド状シリカと微細な CaF_2 が充填・緻密化した「シリカ・ CaF_2 層」を形成すると推察する。

CaF_2 混合セメント硬化体はこの「シリカ・ CaF_2 層」と、結晶性

の良い緻密な「 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層」の表面被覆による相乗効果により、高い耐硫酸性を有すると結論した。

以上『フッ化物混合セメント硬化体は』優れた耐硫酸性を有するが、現時点では強度面の問題から構造体ではなく、微生物腐食を受ける施設の補修材、微生物腐食が予想される新設構造物の表面被覆材、遠心成形鉄筋コンクリート管の内面仕上げ材など、様々な用途が考えられる。

6. 2 まとめ

本論文『コンクリート製下水道管腐食の現状と耐硫酸性向上のためのフッ化物混合セメント硬化体に関する研究』から得られた知見は以下の通りである。

- ①コンクリート製下水道管における微生物腐食は，管径 900mm 以下の管渠において管径，勾配，路線延長，使用年数といった下水道の基本データから，多変量解析の線型判別関数により良好な精度で予測可能である。
- ② CaCO_3 でセメントの質量の 50%以上を置換したセメント硬化体は H_2SO_4 との反応により結晶性の良い $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ を生成し，組織が緻密化し圧縮強度も増加し耐硫酸性を示す。しかし CaCO_3 置換量が多いほど内部への H_2SO_4 の拡散が速く，中性化も速くなる。
- ③ CaF_2 でセメントの質量の 50%以上を置換したセメント硬化体は，従来常温では反応しないと考えられていた CaF_2 と H_2SO_4 の反応が生じ，供試体表面に結晶性の良い緻密な $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ から成る不動態層を生成する。さらに反応により発生する HF が C-S-H 中のシリカを溶解，コロイド状のシリカを生成するとともに HF は Ca 系化合物と反応し微細な CaF_2 を再生成し，セメント硬化体中の細孔をコロイド状シリカと微細な CaF_2 が充填・緻密化した「シリカ・ CaF_2 層」を形成する。この表面の結晶性の良い緻密な「 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 層」による表面被覆と「シリカ・ CaF_2 層」による相乗効果で H_2SO_4 の拡散速度が低下し，高い耐硫酸性を示す。

以上まとめると，これから増大する老朽化社会資本を，効率的かつ戦略的に維持管理するためには，既存の老朽化した構造物を調査し，データベース化することが重要である。

本論文で研究対象としたコンクリート下水道管においては，データベースの維持管理への利用はもとより，蓄積したデータの分析・解析により微生物腐食の予測式の構築も可能であり，予測式は危険

度が高い箇所を抽出するスクリーニング手法として有効である。すなわち、管路内調査を面的に全数調査を行うのではなく、危険度の高い地域・箇所を絞り込んで局所的な調査が行えることから、維持管理費用の抑制および適切な維持管理サイクルの実施につながり、持続発展可能な社会の構築に寄与できると結論する。

なお予測を行うに当たっては、日本のように戦後の急速な復興により都市への人口集中、工業化と言った社会的要因や、地形、気候など自然的要因が複雑な国では、地域ごとにデータベースを整理することが重要であり、地域データの蓄積により地域特性に合った効率的な維持管理が可能となる。

また老朽化したコンクリート下水道施設の更生・再構築には、長寿命で低コストかつ施工性に優れた材料が望まれており、本論文で研究を行った CaF_2 混合セメント硬化体は、セメントの一部を比較的安価な CaF_2 で置換するという簡単かつ安全な方法で作製でき、しかも耐硫酸性に優れることから、微生物腐食を受けるコンクリート下水道施設のメンテナンス材料として有効であり、また新設建造物の表面被覆材としても長寿命化に貢献できるといえる。

以上本研究成果は、今後増大する老朽化社会資本のうち、特に下水道施設の維持管理と新設建造物の長寿命化の面から、持続発展可能な社会の構築への貢献が期待できる。

謝 辞

本博士学位申請論文の審査委員である主査 日本大学教授 鵜澤正美博士, 副査 日本大学教授 伊藤義也博士, 日本大学教授 澤野利章博士, 外部副査 日本大学教授 齋藤利晃博士, 日本大学元教授 大木宜章博士には終始懇切丁寧かつ的確な御指導を頂きました。ここに感謝の意を表すとともに, 厚く御礼申し上げます。

また本論文第 2 章『既設コンクリート製下水道管における腐食の現状』において, 調査・分析に用いた管路内調査工報告書の閲覧またデータの提供に御理解, 御協力を頂きました東京都下水道局北部第一管理事務所元所長 梶ヶ谷勝様をはじめ, 多くの下水道局職員の方々に感謝申し上げます。

第 4 章『フッ化物混合セメント硬化体の耐硫酸性に関する検討』, 第 5 章『 CaF_2 混合による耐硫酸性向上の解明』の研究におきましては日本大学元教授 町長治先生, 日本大学教授 古川茂樹先生より, 分析から研究に関する助言, 論文執筆まで懇切丁寧な御指導を頂きました。このように学位申請論文としてまとめることが出来たのも, 両先生の御陰と深く感謝申し上げます。

また本学位申請論文は, 環境安全工学科をはじめとする生産工学部の教職員皆様のお力添えがあり完成することが出来ました。ここに厚く御礼申し上げます。

最後に本研究の実験等にご協力頂いた保坂研究室の卒業生の方々に深く感謝の意を表します。

平成 26 年 10 月 吉日

保 坂 成 司

付録

付表－1, 付表－2

付表-1 下水道管腐食度合いの調査および集計結果(1)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類		計	備考	地域
									汚水	雨水			
1	1	I 4(+2,+2)	350	6	49.5	1956	46	D	5	2	7		谷中
2	2	I 5	350	6	3.5	1956	46	D	0	0	0		谷中
3	3	II 1	250	16	27	1963	39	C	11	0	11		谷中
4	4	II 2	250	16	27	1963	39	B	2	0	2		谷中
5	5	II 3	250	16	6	1963	39	C	0	1	1		谷中
6	7	III 1(+α)	700	6.16	40.9	1956	46	A	22	0	22		谷中
7	8	III 2	700	307.3	6.85	1956	46	C	0	0	0		谷中
8	20	IV 1(+α)	450	3	39.48	1936	66	A	15	1	16		谷中
9	21	IV 2	450	3	5.45	1936	66	A	0	0	0		谷中
10	13	V 7(+2,+2,+α)	450	3.5	18.47	1936	66	B	4	0	4		谷中
11	14	V 8(+2)	520	3.5	75.95	1936	66	A	36	3	39		谷中
12	15	V 9	520	3.5	4.87	1936	66	B	0	2	2		谷中
13	76	VI 1(+2,+α)	530	73.2	45.89	不明	80	B	1	2	3		谷中
14	77	VI 2	530	13.1	14.89	不明	80	B	1	0	1		谷中
15	78	VI 3	530	51	14.9	不明	80	B	2	2	4		谷中
16	79	VI 4	610	33.6	16.33	不明	80	B	9	0	9		谷中
17	80	VI 5	610	41.5	28.57	不明	80	B	8	3	11		谷中
18	84	VI 6(+α)	700	5.46	39.47	不明	80	B	43	3	46		谷中
19	85	VI 7	700	5.4	16.25	不明	80	B	4	0	4		谷中
20	91	VII 1(+α)	460	4.3	46.9	1936	66	A	11	4	15		谷中
21	92	VII 2	460	5.6	47.95	1936	66	A	9	3	12		谷中
22	93	VII 3	460	不明	45.85	1936	66	A	5	5	10		谷中
23	54	VII 1	460	24.3	45.2	不明	80	B	29	1	30		谷中
24	55	VII 2	460	25.4	44.12	不明	80	B	33	1	34		谷中
25	56	VII 3	460	27.7	26.67	不明	80	B	5	0	5		谷中
26	58	VII 5(+VII'8)	460	50.2	29.8	不明	80	A	5	0	5		谷中
27	59	VII 6	460	50.7	32.15	不明	80	B	4	1	5		谷中
28	60	VII 7	530	37.5	30.1	不明	80	B	11	0	11		谷中
29	42	VII'1	250	8.7	27.2	1977	25	B	3	2	5		谷中
30	43	VII'2	250	10.3	27.05	1977	25	C	22	1	23		谷中
31	44	VII'3	300	6.5	26.4	1977	25	D	13	0	13		谷中
32	45	VII'4	300	6.8	30.05	1977	25	D	16	3	19		谷中
33	46	VII'5	300	7.6	30	1977	25	D	5	2	7		谷中
34	47	VII'6	300	4.2	34.7	1956	46	B	9	2	11		谷中
35	48	VII'7	350	6.1	34.45	1956	46	D	8	1	9		谷中
36	49	VII'1	250	9.7	25.05	1977	25	D	6	1	7		谷中
37	50	VII'2	250	11	25	1977	25	D	11	3	14		谷中
38	51	VII'3	300	5.9	31.95	1977	25	D	14	2	16		谷中
39	52	VII'4	300	9.1	33.15	1977	25	D	5	3	8		谷中
40	103	IX 5(+2)	530	6.7	68.94	不明	80	B	4	3	7		谷中
41	104	IX 6	530	5.5	38.39	不明	80	B	2	3	5		谷中
42	105	IX 7	530	6.4	36.97	不明	80	B	5	1	6		谷中
43	11	ⅴ4	460	1.8	62.08	1927	75	なし	5	2	7		松が谷
44	12	ⅴ5	460	1.8	6.79	1927	75	なし	2	2	4		松が谷
45	23	ⅴ3(+2,+2)	460	1.9	29.1	1927	75	C	8	3	11		松が谷
46	29	ⅴ5(+2,+2)	530	1.5	49.06	1927	75	B	19	3	22		松が谷
47	35	ⅴ7(+2,+2)	680	不明	19.09	1927	75	なし	3	2	5		松が谷
48	36	ⅴ8	680	不明	6.82	不明	80	なし	0	2	2		松が谷
49	52	ⅴ1	250	5	23	1981	21	D	8	2	10		松が谷
50	53	ⅴ2	300	4	23	1981	21	D	12	2	14		松が谷
51	49	ⅴ3(+2)	460	2.7	30.75	不明	80	B	11	4	15		松が谷
52	46	ⅴ4(+2)	460	6.2	23.1	不明	80	B	8	2	10		松が谷
53	43	ⅴ5(+2)	610	0.2	45.35	不明	80	B	20	5	25		松が谷
54	40	ⅴ6(+2)	610	3.9	25.1	不明	80	B	14	4	18		松が谷
55	37	ⅴ7(+2)	610	4.7	24.9	不明	80	B	5	2	7		松が谷
56	54	ⅴ1	250	6	24	1964	38	D	5	4	9	路線長24.0m、7.21mで調査不能	松が谷
57	55	ⅴ2	300	5	24	1964	38	D	11	2	13	路線長24.0m、13.7mで調査不能	松が谷
58	59	ⅴ3	450	4.5	34.1	1964	38	D	3	5	8		松が谷
59	60	ⅴ4	450	4.5	35.4	1964	38	D	1	3	4		松が谷
60	58	ⅴ3	300	6	6.8	不明	80	D	0	0	0		松が谷
61	68	ⅴ1	250	7	25	1964	38	D	18	4	22		松が谷
62	69	ⅴ2	300	6	30	1964	38	D	27	4	31		松が谷
63	61	ⅴ3	450	2.3	33.5	1964	38	B	6	3	9		松が谷
64	62	ⅴ4	450	2.3	34	1964	38	B	41	4	45		松が谷
65	66	ⅴ2	400	2.5	20.2	1964	38	D	2	1	3		松が谷
66	67	ⅴ3	400	2.5	20	1964	38	D	1	0	1		松が谷
67	71	ⅴ2	300	5	29.45	不明	80	C	11	4	15		松が谷
68	1	ⅴ	250	8	19.7	1935	67	D	0	0	0		元浅草
69	21	ⅴ2	250	8	28	1971	31	C	4	2	6		元浅草
70	22	ⅴ3(+α)	610	2.1	45.7	1971	31	B	19	4	23		元浅草
71	27	ⅴ4(+α,ⅴ4)	610	0.5	28.9	1986	16	D	20	0	20		元浅草
72	28	ⅴ5	610	1	37.35	1971	31	B	13	4	17		元浅草
73	29	ⅴ6(+1)	610	1.7	39.1	1971	31	B	25	4	29		元浅草
74	30	ⅴ7	760	3.1	5.8	1971	31	B	0	0	0		元浅草
75	33	ⅴ8(+2,+α)	760	1.3	49	1971	31	C	33	2	35		元浅草
76	34	ⅴ9	760	1.4	34.25	1971	31	D	56	2	58		元浅草
77	25	ⅴ3	350	4.5	26	1986	16	D	17	2	19		元浅草
78	126	ⅴ1	250	10	27.8	不明	80	D	8	1	9		元浅草
79	130	ⅴ4(+2,+3)	450	3.7	35.3	1927	75	D	2	4	6		元浅草
80	131	ⅴ5	600	3	9.6	1988	14	D	0	0	0		元浅草
81	134	ⅴ6(+ⅴ)	450	2.1	14.95	不明	80	D	0	0	0		元浅草
82	132	ⅴ1	250	8	44.4	1988	14	D	7	3	10		元浅草

付表-1 下水道管腐食度合いの調査および集計結果(2)

デー タNo.	路線 番号	系統	管径 (mm)	勾配 (%)	路線延 長(m)	施工年 (年)	使用年 数(年)	腐食 度合	取付管の種類 汚水 雨水	計	備考	地域
83	4-1	t2(+1)	350	7	32.1	1986	16	D	8	2	10	元浅草
84	5	t3	400	7	32.1	1986	16	D	12	3	15	元浅草
85	14	t5	300	8	13.9	1987	15	C	0	0	0	元浅草
86	36	ア1	250	8	31	1971	31	D	17	4	21	元浅草
87	37	ア2	300	7	30.3	1971	31	D	13	2	15	元浅草
88	38	ア3	300	7	7.55	1971	31	C	0	0	0	元浅草
89	56	ア'	300	6	40	1982	20	D	54	4	58	元浅草
90	57	ア''1	250	8	37	1982	20	D	47	5	52	元浅草
91	59	ア''2(+1)	400	5	39	1982	20	D	48	3	51	元浅草
92	60	ア''3	400	5	6.7	不明	80	C	0	0	0	元浅草
93	67	ア'''1	250	10	37	1927	75	C	24	3	27	元浅草
94	68	ア'''2	250	10	39.2	1927	75	B	17	3	20	元浅草
95	75	ア''''1	400	4	5.4	1988	14	D	1	0	1	元浅草
96	76	ア''''2	400	4	33.2	1988	14	D	1	1	2	元浅草
97	85	チ1	300	5	25	1979	23	D	9	3	12	元浅草
98	86	チ2	300	5	26	1979	23	C	42	3	45	元浅草
99	87	チ3	400	4	58.8	1979	23	C	22	4	26	元浅草
100	90	チ4(+チ')	450	4.1	42.9	不明	80	B	8	4	12	元浅草
101	93	チ5-1(+2)	450	4.8	44.1	不明	80	A	5	3	8	元浅草
102	110	チ5-2	450	3.1	42.15	1927	75	A	6	4	10	元浅草
103	111	チ6-2	450	3.1	33	1927	75	A	14	4	18	元浅草
104	88	チ1	300	7	35	1982	20	D	10	4	14	元浅草
105	89	チ2	300	7	36	1982	20	C	4	2	6	元浅草
106	97	チ'1	250	16	35.9	1990	12	D	5	4	9	元浅草
107	98	チ'2	250	10	36.9	1990	12	D	10	4	14	元浅草
108	100	チ''1	250	8	35.8	1988	14	D	2	1	3	元浅草
109	101	チ''2	250	8	35	1988	14	D	39	2	41	元浅草
110	102	チ'''1	250	8	27	1988	14	D	23	2	25	元浅草
111	103	チ'''2	250	8	28	1988	14	D	20	1	21	元浅草
112	104	チ'''3	300	6	43.45	1988	14	D	44	2	46	元浅草
113	109	リ4	460	1.9	44.72	1927	75	B	9	2	11	元浅草
114	114	リ5(+チ6-2,リ'')	610	1.93	40.72	1927	75	B	13	2	15	元浅草
115	115	リ6	610	13.76	34.44	1927	75	B	8	2	10	元浅草
116	108	リ'	250	8	37	1982	20	D	27	2	29	元浅草
117	112	リ''1	250	10	33	1980	22	D	8	3	11	元浅草
118	113	リ''2	250	10	33	1980	22	C	8	4	12	元浅草
119	116	リ'''1	250	8	25.7	1978	24	D	2	2	4	元浅草
120	117	リ'''2	250	8	24.2	1978	24	D	2	1	3	元浅草
121	118	リ'''3	250	8	11.9	1978	24	D	8	0	8	元浅草
122	1	に1(+α)	350	0	7	1978	24	D	1	0	1	浅草通り
123	4	に2(+に)	400	0.3	28.7	1978	24	なし	0	0	0	浅草通り
124	7	に3(+に)	450	12.1	14	1978	24	なし	0	0	0	浅草通り
125	85	に'1	250	4.2	24	1978	24	D	63	1	64	浅草通り
126	84	に'2	250	11.2	23.3	1978	24	C	3	1	4	浅草通り
127	83	に'1	250	13.3	24.9	1978	24	D	0	1	1	浅草通り
128	82	に''2	250	4.8	33	1978	24	B	135	2	137	浅草通り
129	42	に''1	250	10.1	33.8	不明	80	C	6(?)	0	0	ホテルあり
130	10-1	え''(+3,+1)	350	6	14	1974	28	なし	2	0	2	浅草通り
131	10-2	え''(+2)	350	9	15.1	1974	28	なし	0	0	0	浅草通り
132	12	え'(+3,+2)	450	4	56	1975	27	なし	1	1	2	浅草通り
133	15-1	い1(+3,+6)	450	5	7.85	不明	80	A	1	2	3	製版
134	15-2	い2	450	4.8	30	不明	80	A	44	1	45	浅草通り
135	15-3	い3(+2,+1)	450	4.8	11.35	不明	80	A	1	0	1	浅草通り
136	19	う'(+2,+α)	350	6	39.5	不明	80	C	21	5	26	浅草通り
137	20	う''(+2,+α)	610	4.7	15.9	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
138	46	あ1	300	3.5	35.85	1985	17	なし	3	2	5	浅草通り
139	47	あ2	350	3	32.5	1985	17	なし	0	2	2	浅草通り
140	48	あ3	400	3	35.9	1985	17	なし	1	0	1	浅草通り
141	49	あ4	460	4	34.15	1920	82	なし	2	1	3	浅草通り
142	50	あ5	400	2.8	35.54	不明	80	A	8	1	9	浅草通り
143	52	あ7	530	3.2	39.55	不明	80	B	9	2	11	浅草通り
144	53	あ8	530	2.2	39.4	不明	80	B	9	1	10	浅草通り
145	54	あ9	610	2.8	46.5	不明	80	B	30	1	31	浅草通り
146	55	あ10	610	1.2	46.25	不明	80	A	16(?)	4	4	ホテル118室
147	56	あ11	610	1.1	45.05	不明	80	A	23	1	24	浅草通り
148	57	あ12	760	0.2	44.55	不明	80	B	14	3	17	浅草通り
149	28	あ13(+2)	760	不明	44.85	不明	80	C	8	3	11	浅草通り
150	27	あ14	760	不明	45	不明	80	C	1	3	4	浅草通り
151	26	あ15	830	6	59	不明	80	B	93	3	96	浅草通り
152	25	あ16	830	不明	5.8	不明	80	C	0	0	0	浅草通り
153	23	あ17(+3)	830	不明	56.18	1927	75	D	14	4	18	浅草通り
154	32	あ19(+α)	600	14.4	16.5	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
155	37	お1(+α)	600	5.2	23.3	1928	74	B	0	0	0	浅草通り
156	34	お3(+α)	500	56.3	11.9	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
157	36	こ4(+2)	450	4.8	39.65	1927	75	C	20	5	25	浅草通り
158	50	こ1(+α)	700	1.9	20.75	1985	17	B	1	0	1	浅草通り
159	49	こ3(+α)	900	0.5	73.7	1985	17	B	5	2	7	浅草通り
160	48	こ4	900	-21.6	1.85	1928	74	B	0	0	0	浅草通り
161	56	く2(+1,+1)	350	6.3	39.1	1985	17	D	68	2	70	浅草通り
162	55	く3(+<)	450	6.8	26.9	1985	17	D	0	0	0	浅草通り
163	57	く2	300	10.8	31.6	1985	17	C	72	1	73	浅草通り
164	61	か1	250	3.4	35	1967	35	D	14	0	14	浅草通り

付表-1 下水道管腐食度合いの調査および集計結果(3)

デー タNo.	路線 番号	系統	管径 (mm)	勾配 (%)	路線延 長(m)	施工年 (年)	使用年 数(年)	腐食 度合	取付管の種類 汚水 雨水	計	備考	地域
165	60	か2	250	6.6	35	1967	35	C	2	1	3	浅草通り
166	21	き2(+1,+1)	250	-2.1	4.75	不明	80	D	1	1	2	浅草通り
167	23	き3(+1)	250	10.8	52.8	不明	80	C	9	2	11	浅草通り
168	68	き5(+1)	400	5	31.8	不明	80	D	0	1	1	浅草通り
169	21	き6(+1)	400	19.5	24.05	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
170	66	き7(+き)	450	5.3	35.6	不明	80	B	23	2	25	浅草通り
171	65	き8	450	4.4	41.05	不明	80	B	1	0	1	浅草通り
172	63	き9(+1)	530	11.7	10.25	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
173	62	き10	600	-2.1	61.4	1985	17	D	41	2	43	浅草通り
174	54	き11	800	-5.7	17.55	1985	17	D	0	0	0	浅草通り
175	70	き4	450	44.4	1.8	不明	80	B	0	0	0	浅草通り
176	53	き10(+1*6)	450	5.6	32	1970	32	B	5	2	7	浅草通り
177	9	け4(+1*2,+2)	460	6.3	35.2	不明	80	A	10	1	11	浅草通り
178	10	け5	460	6.7	41.9	不明	80	A	30	1	31	浅草通り
179	79	な1(+α)	610	1.5	51.95	不明	80	A	65	2	67	雷門
180	78	な2(+2)	610	0.6	25.5	不明	80	B	2	0	2	雷門
181	74	な3(+2,+1)	680	-6.7	25.5	不明	80	B	16	1	17	雷門
182	26	な4(+2)	680	-6.3	9.6	不明	80	B	1	0	1	雷門
183	27	な5	680	7.9	11.35	不明	80	B	4	1	5	雷門
184	31	な6(+2,+1)	680	0	46.7	不明	80	B	21	1	22	雷門
185	32	な7(+3)	680	3.8	8	不明	80	B	0	0	0	雷門
186	35	な8(+2)	680	5.9	10.25	不明	80	B	0	0	0	雷門
187	36	な9	680	2.4	51.05	不明	80	B	14	0	14	雷門
188	38	な10	680	-21.7	2.3	不明	80	B	0	0	0	雷門
189	39	な11	680	3.5	45.75	不明	80	B	54	0	54	雷門
190	16	な12(+3,+2,+1)	680	7.3	8.6	不明	80	B	0	0	0	雷門
191	17	な13	760	2.2	77	不明	80	B	82	2	84	雷門
192	18	な14(+な5)	760	6.3	59.65	不明	80	B	9	2	11	雷門
193	46	な1	250	7.9	30.5	不明	80	C	32	3	35	雷門
194	47	な2	250	7.3	17	不明	80	C	3	5	8	雷門
195	48	な3	300	8.6	29.2	不明	80	C	17	5	22	雷門
196	4	ぬ1	250	6.4	31.35	1973	29	なし	5	5	10	雷門
197	6	ぬ2	350	6.9	34.6	1973	29	D	8	5	13	そば、トンカツ、すし各1
198	7	ぬ3	400	6.1	34.25	1973	29	D	11	2	13	そば:1
199	9	ぬ4(+1)	500	2.7	41	1973	29	C	21	2	23	そば:1
200	10	ぬ5	600	5.1	48.6	1973	29	B	20	4	24	雷門
201	5	ぬ1	250	6.2	47	1992	10	なし	11	6	17	雷門
202	12	て1	300	6.6	31.75	1969	33	D	9(?)	3	3	ホテルあり
203	13	て2	300	6.7	34.45	1969	33	D	8	4	12	ホテルあり
204	18	て1	250	8	35	1924	78	D	16	3	19	雷門
205	19	て2	250	8	33	1924	78	D	5	5	10	雷門
206	21	て1	250	8.1	34.45	1973	29	D	16	3	19	雷門
207	22	て2	300	6.8	35.35	1973	29	D	11	1	12	雷門
208	24	て1	250	7.2	33.35	1968	34	D	18	2	20	ホテルあり
209	25	て2	300	6.8	35.9	1968	34	D	12	5	17	雷門
210	3	て1	250	8.2	29.35	1980	22	D	4	1	5	雷門
211	4	て2	250	14.4	29.2	1980	22	D	5	2	7	雷門
212	1	て1	250	7.9	29.2	1980	22	なし	3	1	4	雷門
213	2	て2	250	8.9	24.6	1980	22	なし	2	0	2	雷門
214	11	て1	250	8	27.5	1969	33	D	54	5	59	雷門
215	14	て2	350	4.8	31.1	1969	33	D	5	1	6	雷門
216	20	て4	460	1.4	35.8	1924	78	B	9	2	11	雷門
217	23	て5	530	4	35.05	1924	78	B	7	4	11	雷門
218	26	て6	530	3.2	24.8	1924	78	B	10	3	13	雷門
219	37	て7(+と)	530	2.5	68.9	不明	80	A	7	0	7	雷門
220	38	て8	530	3	53.8	不明	80	A	4	0	4	雷門
221	39	て9	530	3.1	58.6	不明	80	A	6	0	6	雷門
222	40	て10	530	1	61.5	不明	80	A	4	0	4	雷門
223	41	て11	530	0.7	44.5	不明	80	D	0	0	0	雷門
224	42	て12	530	3.3	15	不明	80	B	0	0	0	雷門
225	50	て13	530	2.3	21.6	不明	80	A	0	0	0	雷門
226	30	と(+つ4)	530	143.9	4.1	1946	56	B	0	0	0	雷門
227	36	と	530	3.4	50.7	1946	56	A	6	0	6	雷門
228	44	と1	530	3.4	50.65	1952	50	B	0	0	0	雷門
229	45	と2(+と)	530	-51.5	22.15	1952	50	A	2	0	2	雷門
230	30	せ1	250	5.9	26.95	1924	78	D	8	3	11	雷門
231	31	せ2	250	4.9	28.4	1924	78	D	5	4	9	雷門
232	42	せ5(+3*2,+2*2)	450	10.1	30.1	1980	22	D	9	3	12	雷門
233	43	せ6	450	8.6	44.25	1980	22	なし	14	7	21	雷門
234	45	せ7(+1)	500	8.1	18.55	1980	22	D	4	2	6	雷門
235	47	せ8(+1)	600	1.6	49.6	1980	22	D	12	6	18	雷門
236	51	せ9(+せ,+せ)	610	4.2	26.3	不明	80	B	1	3	4	雷門
237	48	せ1	250	5	40.25	1967	35	C	14	4	18	雷門
238	49	せ1	250	7.4	32.3	1970	32	C	10	4	14	雷門
239	50	せ2	300	4.6	34.8	1970	32	C	6	4	10	雷門
240	59	そ5(+そ,+1,+2)	460	6.6	33.2	不明	80	B	4	2	6	雷門
241	60	そ1	250	7.9	31.6	1975	27	D	4	2	6	ゲームセンター
242	61	そ2	250	8	4.5	1975	27	D	0	0	0	雷門
243	62	そ6	610	-0.7	43.5	不明	80	A	6	2	8	雷門
244	63	そ7	610	33	4.55	不明	80	B	0	0	0	雷門
245	64	そ8(+せ)	760	-2.9	3.5	不明	80	B	0	0	0	雷門
246	65	そ9	760	不明	32.75	不明	80	C	5	3	8	雷門

付表-1 下水道管腐食度合いの調査および集計結果(4)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類 汚水 雨水	計	備考	地域
247	66	そ10	760	-0.2	38.75	不明	80	B	17	5	22	雷門
248	58	そ'	250	8	16	不明	80	C	1	2	3	雷門
249	71	た1	250	8.7	36.7	1970	32	D	12(?)	2	2	雷門
250	72	た2	300	8.4	17.8	1970	32	D	3(?)	2	2	不明
251	73	た3	300	8.2	27.9	1970	32	D	11	3	14	雷門
252	75	た4(+1)	350	7.9	32.9	1970	32	D	116	4	120	雷門
253	76	た5	400	4	32.75	1970	32	D	16	2	18	雷門
254	78	た6	450	6.5	41.8	1969	33	D	9(?)	3	3	カレー:1
255	79	た7	450	7	34.15	1969	33	D	23	5	28	雷門
256	70	た'	250	6.4	23.4	1970	32	D	6	1	7	雷門
257	77	た''	250	13.3	27.1	1969	33	D	11	2	13	雷門
258	86	す1	250	2.6	27.8	1970	32	D	7	2	9	雷門
259	87	す2	300	5.5	32.65	1970	32	D	7	3	10	デパート
260	89	さ1	250	9.8	28.6	1985	17	C	4	1	5	デパート
261	90	さ2	250	8	24.35	1985	17	C	2	2	4	デパート
262	98	し1	250	5.2	40.25	1970	32	C	15	7	22	雷門
263	100	し2	300	1.1	18.9	1970	32	D	5	2	7	雷門
264	99	し'1	250	7.3	17.75	1970	32	C	4	1	5	雷門
265	5	ち1	250	11.8	34.75	1980	22	D	50	3	53	雷門
266	6	ち2	300	10.5	40.15	1980	22	B	9	2	11	雷門
267	7	ち3	350	4.7	36.3	1980	22	D	3	1	4	雷門
268	8	ち4	400	11.9	27.8	1980	22	D	3	2	5	雷門
269	9	ち5	530	6.3	72.9	1980	22	C	23(?)	3	3	雷門
270	10	ち6	450	0	3.8	1980	22	C	0	0	0	雷門
271	49	ち7	500	-11.4	18.4	1980	22	D	0	0	0	雷門
272	21	つ1(+α)	700	-15.3	20.85	1980	22	D	0	0	0	雷門
273	22	つ2	700	-2.7	18.35	1984	18	D	0	0	0	雷門
274	23	つ3	700	7.4	43	1984	18	D	0	0	0	雷門
275	24	つ4	700	1.3	15.75	1984	18	D	0	0	0	雷門
276	31	つ5	700	3.4	67.65	1978	24	D	0	0	0	雷門
277	32	つ6	700	3.7	69.7	1978	24	D	0	0	0	雷門
278	33	つ7	700	4.5	64.6	1978	24	D	0	0	0	雷門
279	34	つ8	700	1.4	69	1978	24	D	0	0	0	雷門
280	35	つ9	700	0.9	67.2	1978	24	D	2	0	2	雷門
281	1	Y1	250	7.6	31.3	1970	32	C	15	2	17	上野
282	4	Y2(Z1,+α)	350	4.9	45	1970	32	C	14	6	20	駐車場:1
283	21	Y3(AA2,+α)	500	8.5	42	1970	32	C	13	4	17	上野
284	22	Y4(+α)	600	1.4	20.2	1970	32	D	4	1	5	上野
285	23	Y5(+α)	600	0.8	17.7	1970	32	D	3	2	5	上野
286	2	Z1	250	22.9	34	1970	32	B	8	1	9	上野
287	9	AA2	250	10.1	34.55	1970	32	B	32	2	34	上野
288	28	X1(+α)	460	2	23.6	1927	75	A	15	2	17	上野
289	29	X2	460	4.4	6.1	1927	75	A	1	0	1	上野
290	30	X3	460	0.9	41.35	1927	75	A	21	4	25	ラーメン:1
291	31	X4	460	-3.1	22.8	1927	75	A	23	2	25	上野
292	32	X5(+α)	460	-0.1	8.85	1927	75	A	1	2	3	上野
293	33	X6	530	3.5	11	1927	75	B	9	2	11	上野
294	34	X7(+α)	530	0	19.5	1927	75	B	3	2	5	上野
295	27	X8(AK)	610	4.6	38.15	1927	75	B	13	3	16	上野
296	26	X9	680	3.5	17.5	1927	75	A	9	2	11	上野
297	24	X10(+α)	680	-3.3	16.8	1970	32	B	14	1	15	上野
298	25	X11	680	3.9	55.6	1970	32	A	21	3	24	上野
299	53	S1+α	450	3.9	34.5	1926	76	C	22	7	29	上野
300	54	S2+α	600	2.4	46.6	1926	76	B	4	4	8	駐車場
301	55	S3+α	600	1.4	35.8	1926	76	B	1	5	6	駐車場
302	56	S4+α(+1)	600	6.3	50.05	1926	76	C	11	3	14	中華:1
303	61	R3	460	7.4	20.4	1926	76	A	4	4	8	駐車場
304	58	R4	460	9.4	18.85	1926	76	A	4	4	8	上野
305	59	R5(+1*2)	460	1.3	6.3	1926	76	A	0	0	0	上野
306	60	R6	460	8.6	20.6	1926	76	B	7	3	10	上野
307	57	R7	610	8.5	11.3	1926	76	B	3	2	5	上野
308	66	T1	300	7.3	36	1926	76	C	7	4	11	上野
309	49	T3(+1)	400	1.5	46.6	1926	76	A	48	7	55	上野
310	48	T4(+1)	460	6	37.6	1926	76	A	24	4	28	駐車場:1
311	47	T5	460	-1.8	37.45	1974	28	B	16	4	20	上野
312	45	T6(U3)	530	5	39.7	1974	28	A	35	4	39	喫茶店:1
313	46	T7(+1)	530	-0.4	23.8	1974	28	C	8	4	12	上野
314	50	T8(+1)	530	8.3	7	1974	28	B	0	0	0	上野
315	51	T9(+1)	610	1.8	75	1974	28	A	45	6	51	上野
316	52	T10(+3,+1)	610	2	54.6	1974	28	A	23	2	25	駐車場:1
317	41	U1	300	3.4	31.85	1926	76	C	17	2	19	上野
318	42	U2	300	-0.6	32.6	1926	76	D	6	2	8	上野
319	44	U3(+1)	300	2.8	25.5	1926	76	D	32	2	34	ラーメン:1
320	75	AB1	300	6	34.7	1926	76	C	23	5	28	上野
321	81	W1	250	7.7	27.1	1974	28	C	11	4	15	上野
322	85	W2(+2,+1)	300	10.8	13.3	1974	28	D	8	0	8	上野
323	97	V1+α	530	1.7	76.2	1926	76	B	40	6	46	ラーメン:1
324	98	V2+α	680	0.2	35.3	1974	28	B	7	3	10	上野
325	99	V3+α(+1)	680	-0.5	31.35	1974	28	B	5	2	7	上野
326	100	V4+α(W3)	680	4.2	50.65	1974	28	B	12	5	17	ラーメン:1
327	101	V5+α(+3)	760	-1.3	29	1974	28	B	6	2	8	上野
328	102	V6+α	760	-2.5	27.9	1926	76	B	3	2	5	上野

付表-1 下水道管腐食度合いの調査および集計結果(5)

デー タNo.	路線 番号	系統	管径 (mm)	勾配 (%)	路線延 長(m)	施工年 (年)	使用年 数(年)	腐食 度合	取付管の種類 汚水 雨水	計	備考	地域
329	4 E1		250	7	30.75	不明	80	D	16	2	18	上野
330	5 E2		400	2.6	46.15	不明	80	D	4	2	6	上野
331	6 E3		400	1.2	46.25	不明	80	D	10	2	12	上野
332	7 D1(+3,E3,+α)		800	1.9	25.45	1976	26	C	6	1	7	上野
333	8 D2		800	6.9	7.1	1977	25	C	0	0	0	上野
334	19 B4,D2,F4		900	-0.1	28.6	1976	26	C	5	3	8	上野
335	9 A1		250	3	26.25	1977	25	D	8	0	8	喫茶店
336	10 A2		250	8	10.8	1977	25	C	2	0	2	上野
337	11 B1		250	13.3	24.8	1977	25	C	17	2	19	上野
338	12 B2		250	6.3	25.1	1977	25	C	8	4	12	上野
339	13 B3		300	8	24.9	1977	25	C	9	3	12	上野
340	14 B4		300	-1.6	7.3	1977	25	C	0	1	1	上野
341	15 F1		250	7.9	20	1977	25	C	5	1	6	上野
342	16 F2		250	10.7	23	1977	25	C	10	3	13	上野
343	17 F3		300	4.5	23.6	1977	25	C	8	2	10	上野
344	18 F4		300	8.5	6.55	1977	25	C	0	0	0	上野
345	20 C1		250	8.3	23.1	1974	28	C	10	2	12	上野
346	21 C2		250	8.8	25.15	1974	28	D	22	1	23	上野
347	22 C3		350	6.3	26	1974	28	C	13	2	15	上野
348	23 C4		350	8.3	27.4	1974	28	C	18	2	20	上野
349	24 G1		250	3	20	1977	25	C	19	3	22	上野
350	25 G2		250	3.8	20.75	1977	25	B	12	2	14	上野
351	28 H1		250	7.8	25.85	1985	17	C	17	4	21	上野
352	29 H2		450	-1	28.75	1985	17	C	10	4	14	上野
353	30 I1		250	22.3	13.4	1987	15	D	1	1	2	上野
354	31 I2		350	6.1	33.85	1987	15	C	10	1	11	上野
355	32 I3		350	3.2	31.9	1987	15	D	13	2	15	上野
356	33 I4		350	3.9	36.9	1987	15	D	16	2	18	上野
357	35 J1		250	9.1	24.95	1977	25	B	16	1	17	上野
358	36 J2		250	7.6	27.05	1977	25	C	7	2	9	上野
359	37 J3		300	6	26	1977	25	B	10	3	13	上野
360	38 J4		350	2	28.15	1977	25	C	14	2	16	上野
361	39 J5		350	-0.5	6.35	1977	25	D	0	0	0	上野
362	47 M2(L3)		460	0.5	55.1	不明	80	B	46	6	52	上野
363	48 M3		500	9.2	6	不明	80	D	0	0	0	上野
364	49 I6(M3,J5)		610	0.9	25.1	不明	80	C	2	3	5	上野
365	55 I7(K3,N2)		610	5.9	38.2	不明	80	B	10	3	13	上野
366	50 K1		250	4.1	35.7	不明	80	D	33	3	36	上野
367	51 K2		250	1.8	34.75	不明	80	D	19	2	21	上野
368	52 K3		300	2.2	35.25	不明	80	D	11	3	14	上野
369	40 L1		250	6.5	28.5	不明	80	C	16	1	17	上野
370	61 N3		250	-0.6	32.9	不明	80	D	26	4	30	上野
371	62 O		250	7.3	38.6	不明	80	C	97	4	101	上野
372	63 P		250	8.4	31.1	1977	25	D	6	3	9	上野
373	72 Q1(N3)		530	1.5	44.1	不明	80	D	1	1	2	上野
374	74 Q2		530	5.7	10.6	1983	19	D	0	0	0	上野
375	75 Q3		680	11.2	10.9	1983	19	C	0	1	1	上野
376	75		700	11.2	12.6	1983	19	C	0	0	0	上野
377	76 Q4		680	不明	13	不明	80	D	0	0	0	上野
378	80 AC1+α		300	5.9	32.2	1975	27	D	5	0	5	上野
379	81 AC2+α		600	6	32.95	1975	27	なし	2	2	4	上野
380	82 AC3+α		600	5	35.55	1975	27	なし	3	0	3	デパート
381	83 AD1		250	8	38	不明	80	A	13	2	15	上野
382	84 AD2		250	8	11.15	不明	80	D	0	0	0	上野
383	85 AD3+α		350	8	40.45	不明	80	なし	0	0	0	上野
384	87 AE1+α		700	不明	9.25	1940	62	なし	0	0	0	上野
385	88 AE2+α		760	不明	5.18	1940	62	なし	0	0	0	上野
386	89 AF1		250	9	29.5	1968	34	なし	2	1	3	デパート
387	90 AF2		250	9	29.5	1968	34	なし	0	0	0	上野
388	91 AF3		350	7	40.45	1979	23	D	18	2	20	上野
389	92 AF4		400	5.5	44.6	1979	23	D	15	2	17	上野
390	93 AF5		450	5	54.3	1979	23	D	25	3	28	上野
391	95 AH2(+1)		300	8	35.55	1979	23	なし	4	3	7	上野
392	94 AG1		250	10	31	不明	80	D	1	2	3	上野
393	96 AG2(AH)		400	5	41.7	1979	23	なし	16	0	16	上野
394	97 AG3		450	4.5	16.8	1979	23	なし	5	1	6	上野
395	98 AG4		450	4.5	2.9	1979	23	なし	0	0	0	上野
396	99 AG5		450	4.5	14.5	1975	27	D	13	1	14	上野
397	100 AG6		450	4.5	27.85	1975	27	D	3	0	3	上野
398	101 AG7		450	4.5	11.3	1975	27	なし	0	0	0	上野
399	102 AG8(AF)		450	4	4.95	1975	27	D	0	0	0	上野
400	103 AI1(+α)		760	0.9	33.4	不明	80	A	14	3	17	上野
401	104 AI2		760	1.6	43.9	不明	80	A	4	3	7	上野
402	108 AI4(AJ)		830	不明	9.15	不明	80	C	0	0	0	上野
403	109 AJ6		350	11.1	8	1954	48	D	4	2	6	上野
404	110 AJ7		400	4.6	28	1976	26	D	0	0	0	上野
405	111 AJ8		400	3.6	25.5	1976	26	D	2	1	3	デパート
406	105 AJ1(+α)		400	3.3	41.1	1970	32	C	23	2	25	上野
407	120 AK1(+α)		460	5.1	51.15	不明	80	A	7	0	7	上野
408	128 AO1		250	21.2	31.4	不明	80	C	11	2	13	上野
409	130 AO2(AM)		300	7.1	35.8	不明	80	C	6	2	8	上野
410	129 AM1		250	9.5	39.4	不明	80	B	8	3	11	上野
411	131 AN1		300	5.7	37.45	不明	80	C	6	3	9	上野

付表-2 外れ値および量的データ不明路線を除外した集計表 (1)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類 汚水 雨水	計	備考	地域
1	1	I 4(+2,+2)	350	6	49.5	1956	46	D	5 2	7	腐食小	谷中
2	2	I 5	350	6	3.5	1956	46	D	0 0	0	腐食小	谷中
3	3	II 1	250	16	27	1963	39	C	11 0	11	腐食小	谷中
4	4	II 2	250	16	27	1963	39	B	2 0	2	腐食大	谷中
5	5	II 3	250	16	6	1963	39	C	0 1	1	腐食小	谷中
6	7	III 1(+α)	700	6.16	40.9	1956	46	A	22 0	22	腐食大	谷中
7	20	IV 1(+α)	450	3	39.48	1936	66	A	15 1	16	腐食大	谷中
8	21	IV 2	450	3	5.45	1936	66	A	0 0	0	腐食大	谷中
9	13	V 7(+2,+2,+α)	450	3.5	18.47	1936	66	B	4 0	4	腐食大	谷中
10	14	V 8(+2)	520	3.5	75.95	1936	66	A	36 3	39	腐食大	谷中
11	15	V 9	520	3.5	4.87	1936	66	B	0 2	2	腐食大	谷中
12	76	VI 1(+2,+α)	530	73.2	45.89	不明	80	B	1 2	3	腐食大	谷中
13	77	VI 2	530	13.1	14.89	不明	80	B	1 0	1	腐食大	谷中
14	78	VI 3	530	5.1	14.9	不明	80	B	2 2	4	腐食大	谷中
15	79	VI 4	610	33.6	16.33	不明	80	B	9 0	9	腐食大	谷中
16	80	VI 5	610	41.5	28.57	不明	80	B	8 3	11	腐食大	谷中
17	84	VI 6(+α)	700	5.46	39.47	不明	80	B	43 3	46	腐食大	谷中
18	85	VI 7	700	5.4	16.25	不明	80	B	4 0	4	腐食大	谷中
19	91	VII 1(+α)	460	4.3	46.9	1936	66	A	11 4	15	腐食大	谷中
20	92	VII 2	460	5.6	47.95	1936	66	A	9 3	12	腐食大	谷中
21	54	VIII 1	460	24.3	45.2	不明	80	B	29 1	30	腐食大	谷中
22	55	VIII 2	460	25.4	44.12	不明	80	B	33 1	34	腐食大	谷中
23	56	VIII 3	460	27.7	26.67	不明	80	B	5 0	5	腐食大	谷中
24	58	VIII 5(+VIII'8)	460	50.2	29.8	不明	80	A	5 0	5	腐食大	谷中
25	59	VIII 6	460	50.7	32.15	不明	80	B	4 1	5	腐食大	谷中
26	60	VIII 7	530	37.5	30.1	不明	80	B	11 0	11	腐食大	谷中
27	42	VIII'1	250	8.7	27.2	1977	25	B	3 2	5	腐食大	谷中
28	43	VIII'2	250	10.3	27.05	1977	25	C	22 1	23	腐食小	谷中
29	44	VIII'3	300	6.5	26.4	1977	25	D	13 0	13	腐食小	谷中
30	45	VIII'4	300	6.8	30.05	1977	25	D	16 3	19	腐食小	谷中
31	46	VIII'5	300	7.6	30	1977	25	D	5 2	7	腐食小	谷中
32	47	VIII'6	300	4.2	34.7	1956	46	B	9 2	11	腐食大	谷中
33	48	VIII'7	350	6.1	34.45	1956	46	D	8 1	9	腐食小	谷中
34	49	VIII'1	250	9.7	25.05	1977	25	D	6 1	7	腐食小	谷中
35	50	VIII''2	250	11	25	1977	25	D	11 3	14	腐食小	谷中
36	51	VIII''3	300	5.9	31.95	1977	25	D	14 2	16	腐食小	谷中
37	52	VIII''4	300	9.1	33.15	1977	25	D	5 3	8	腐食小	谷中
38	103	IX 5(+2)	530	6.7	68.94	不明	80	B	4 3	7	腐食大	谷中
39	104	IX 6	530	5.5	38.39	不明	80	B	2 3	5	腐食大	谷中
40	105	IX 7	530	6.4	36.97	不明	80	B	5 1	6	腐食大	谷中
41	11	ハ4	460	1.8	62.08	1927	75	なし	5 2	7	腐食小	松が谷
42	12	ハ5	460	1.8	6.79	1927	75	なし	2 2	4	腐食小	松が谷
43	23	ニ3(+2,+2)	460	1.9	29.1	1927	75	C	8 3	11	腐食小	松が谷
44	29	ニ5(+2,+2)	530	1.5	49.06	1927	75	B	19 3	22	腐食大	松が谷
45	52	ホ1	250	5	23	1981	21	D	8 2	10	腐食小	松が谷
46	53	ホ2	300	4	23	1981	21	D	12 2	14	腐食小	松が谷
47	49	ホ3(+2)	460	2.7	30.75	不明	80	B	11 4	15	腐食大	松が谷
48	46	ホ4(+2)	460	6.2	23.1	不明	80	B	8 2	10	腐食大	松が谷
49	43	ホ5(+2)	610	0.2	45.35	不明	80	B	20 5	25	腐食大	松が谷
50	40	ホ6(+2)	610	3.9	25.1	不明	80	B	14 4	18	腐食大	松が谷
51	37	ホ7(+2)	610	4.7	24.9	不明	80	B	5 2	7	腐食大	松が谷
52	54	イ1	250	6	24	1964	38	D	5 4	9	腐食小	松が谷
53	55	イ2	300	5	24	1964	38	D	11 2	13	腐食小	松が谷
54	59	イ3	450	4.5	34.1	1964	38	D	3 5	8	腐食小	松が谷
55	60	イ4	450	4.5	35.4	1964	38	D	1 3	4	腐食小	松が谷
56	58	イ'3	300	6	6.8	不明	80	D	0 0	0	腐食小	松が谷
57	68	ロ1	250	7	25	1964	38	D	18 4	22	腐食小	松が谷
58	69	ロ2	300	6	30	1964	38	D	27 4	31	腐食小	松が谷
59	61	ロ3	450	2.3	33.5	1964	38	B	6 3	9	腐食大	松が谷
60	62	ロ4	450	2.3	34	1964	38	B	41 4	45	腐食大	松が谷
61	66	ロ'2	400	2.5	20.2	1964	38	D	2 1	3	腐食小	松が谷
62	67	ロ'3	400	2.5	20	1964	38	D	1 0	1	腐食小	松が谷
63	71	ロ'2	300	5	29.45	不明	80	C	11 4	15	腐食小	松が谷
64	1	ヲ	250	8	19.7	1935	67	D	0 0	0	腐食小	元浅草
65	21	ル2	250	8	28	1971	31	C	4 2	6	腐食小	元浅草
66	22	ル3(+α)	610	2.1	45.7	1971	31	B	19 4	23	腐食大	元浅草
67	27	ル4(+α,ル'4)	610	0.5	28.9	1986	16	D	20 0	20	腐食小	元浅草
68	28	ル5	610	1	37.35	1971	31	B	13 4	17	腐食大	元浅草
69	29	ル6(+1)	610	1.7	39.1	1971	31	B	25 4	29	腐食大	元浅草
70	30	ル7	760	3.1	5.8	1971	31	B	0 0	0	腐食大	元浅草
71	33	ル8(+2,+α)	760	1.3	49	1971	31	C	33 2	35	腐食小	元浅草
72	34	ル9	760	1.4	34.25	1971	31	D	56 2	58	腐食小	元浅草
73	25	ル'3	350	4.5	26	1986	16	D	17 2	19	腐食小	元浅草
74	126	ハ1	250	10	27.8	不明	80	D	8 1	9	腐食小	元浅草
75	130	ハ4(+2,+3)	450	3.7	35.3	1927	75	D	2 4	6	腐食小	元浅草
76	131	ハ5	600	3	9.6	1988	14	D	0 0	0	腐食小	元浅草
77	134	ハ6(+ハ')	450	2.1	14.95	不明	80	D	0 0	0	腐食小	元浅草
78	132	ハ'1	250	8	44.4	1988	14	D	7 3	10	腐食小	元浅草
79	4-1	ト2(+1)	350	7	32.1	1986	16	D	8 2	10	腐食小	元浅草
80	5	ト3	400	7	32.1	1986	16	D	12 3	15	腐食小	元浅草

付表-2 外れ値および量のデータ不明路線を除外した集計表 (2)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類		計	備考	地域
									汚水	雨水			
81	14	ト5	300	8	13.9	1987	15	C	0	0	0	腐食小	元浅草
82	36	又1	250	8	31	1971	31	D	17	4	21	腐食小	元浅草
83	37	又2	300	7	30.3	1971	31	D	13	2	15	腐食小	元浅草
84	38	又3	300	7	7.55	1971	31	C	0	0	0	腐食小	元浅草
85	56	又	300	6	40	1982	20	D	54	4	58	腐食小	元浅草
86	57	又"1	250	8	37	1982	20	D	47	5	52	腐食小	元浅草
87	59	又"2(+1)	400	5	39	1982	20	D	48	3	51	腐食小	元浅草
88	60	又"3	400	5	6.7	不明	80	C	0	0	0	腐食小	元浅草
89	67	又"1	250	10	37	1927	75	C	24	3	27	腐食小	元浅草
90	68	又"2	250	10	39.2	1927	75	B	17	3	20	腐食大	元浅草
91	75	又"1	400	4	5.4	1988	14	D	1	0	1	腐食小	元浅草
92	76	又"2	400	4	33.2	1988	14	D	1	1	2	腐食小	元浅草
93	85	子1	300	5	25	1979	23	D	9	3	12	腐食小	元浅草
94	86	子2	300	5	26	1979	23	C	42	3	45	腐食小	元浅草
95	87	子3	400	4	58.8	1979	23	C	22	4	26	腐食小	元浅草
96	90	子4(+子)	450	4.1	42.9	不明	80	B	8	4	12	腐食大	元浅草
97	93	子5-1(+2)	450	4.8	44.1	不明	80	A	5	3	8	腐食大	元浅草
98	110	子5-2	450	3.1	42.15	1927	75	A	6	4	10	腐食大	元浅草
99	111	子6-2	450	3.1	33	1927	75	A	14	4	18	腐食大	元浅草
100	88	子1	300	7	35	1982	20	D	10	4	14	腐食小	元浅草
101	89	子2	300	7	36	1982	20	C	4	2	6	腐食小	元浅草
102	97	子1	250	16	35.9	1990	12	D	5	4	9	腐食小	元浅草
103	98	子2	250	10	36.9	1990	12	D	10	4	14	腐食小	元浅草
104	100	子"1	250	8	35.8	1988	14	D	2	1	3	腐食小	元浅草
105	101	子"2	250	8	35	1988	14	D	39	2	41	腐食小	元浅草
106	102	子"1	250	8	27	1988	14	D	23	2	25	腐食小	元浅草
107	103	子"2	250	8	28	1988	14	D	20	1	21	腐食小	元浅草
108	104	子"3	300	6	43.45	1988	14	D	44	2	46	腐食小	元浅草
109	109	子4	460	1.9	44.72	1927	75	B	9	2	11	腐食大	元浅草
110	114	子5(+子6-2,子")	610	1.93	40.72	1927	75	B	13	2	15	腐食大	元浅草
111	115	子6	610	13.76	34.44	1927	75	B	8	2	10	腐食大	元浅草
112	108	子	250	8	37	1982	20	D	27	2	29	腐食小	元浅草
113	112	子"1	250	10	33	1980	22	D	8	3	11	腐食小	元浅草
114	113	子"2	250	10	33	1980	22	C	8	4	12	腐食小	元浅草
115	116	子"1	250	8	25.7	1978	24	D	2	2	4	腐食小	元浅草
116	117	子"2	250	8	24.2	1978	24	D	2	1	3	腐食小	元浅草
117	118	子"3	250	8	11.9	1978	24	D	8	0	8	腐食小	元浅草
118	1	に1(+α)	350	0	7	1978	24	D	1	0	1	腐食小	浅草通り
119	4	に2(+に)	400	0.3	28.7	1978	24	なし	0	0	0	腐食小	浅草通り
120	7	に3(+に")	450	12.1	14	1978	24	なし	0	0	0	腐食小	浅草通り
121	85	に1	250	4.2	24	1978	24	D	63	1	64	腐食小	浅草通り
122	84	に2	250	11.2	23.3	1978	24	C	3	1	4	腐食小	浅草通り
123	83	に"1	250	13.3	24.9	1978	24	D	0	1	1	腐食小	浅草通り
124	82	に"2	250	4.8	33	1978	24	B	135	2	137	腐食大	浅草通り
125	42	に"1	250	10.1	33.8	不明	80	C	6(?)	0	0	腐食小	浅草通り
126	10-1	え"(+3,+1)	350	6	14	1974	28	なし	2	0	2	腐食小	浅草通り
127	10-2	え"(+2)	350	9	15.1	1974	28	なし	0	0	0	腐食小	浅草通り
128	12	え"(+3,+2)	450	4	56	1975	27	なし	1	1	2	腐食小	浅草通り
129	15-1	い1(+3,+6)	450	5	7.85	不明	80	A	1	2	3	腐食大	浅草通り
130	15-2	い2	450	4.8	30	不明	80	A	44	1	45	腐食大	浅草通り
131	15-3	い3(+2,+1)	450	4.8	11.35	不明	80	A	1	0	1	腐食大	浅草通り
132	19	う"(+2,+α)	350	6	39.5	不明	80	C	21	5	26	腐食小	浅草通り
133	20	う"(+2,+α)	610	4.7	15.9	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
134	46	あ1	300	3.5	35.85	1985	17	なし	3	2	5	腐食小	浅草通り
135	47	あ2	350	3	32.5	1985	17	なし	0	2	2	腐食小	浅草通り
136	48	あ3	400	3	35.9	1985	17	なし	1	0	1	腐食小	浅草通り
137	49	あ4	460	4	34.15	1920	82	なし	2	1	3	腐食小	浅草通り
138	50	あ5	400	2.8	35.54	不明	80	A	8	1	9	腐食大	浅草通り
139	52	あ7	530	3.2	39.55	不明	80	B	9	2	11	腐食大	浅草通り
140	53	あ8	530	2.2	39.4	不明	80	B	9	1	10	腐食大	浅草通り
141	54	あ9	610	2.8	46.5	不明	80	B	30	1	31	腐食大	浅草通り
142	55	あ10	610	1.2	46.25	不明	80	A	16(?)	4	4	腐食大	浅草通り
143	56	あ11	610	1.1	45.05	不明	80	A	23	1	24	腐食大	浅草通り
144	57	あ12	760	0.2	44.55	不明	80	B	14	3	17	腐食大	浅草通り
145	26	あ15	830	6	59	不明	80	B	93	3	96	腐食大	浅草通り
146	32	あ19(+α)	600	14.4	16.5	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
147	37	お1(+α)	600	5.2	23.3	1928	74	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
148	34	お3(+α)	500	56.3	11.9	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
149	36	こ4(+2)	450	4.8	39.65	1927	75	C	20	5	25	腐食小	浅草通り
150	50	こ1(+α)	700	1.9	20.75	1985	17	B	1	0	1	腐食小	浅草通り
151	49	こ3(+α)	900	0.5	73.7	1985	17	B	5	2	7	腐食大	浅草通り
152	48	こ4	900	-21.6	1.85	1928	74	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
153	56	く2(+1,+1)	350	6.3	39.1	1985	17	D	68	2	70	腐食小	浅草通り
154	55	く3(+く)	450	6.8	26.9	1985	17	D	0	0	0	腐食小	浅草通り
155	57	く2	300	10.8	31.6	1985	17	C	72	1	73	腐食小	浅草通り
156	61	か1	250	3.4	35	1967	35	D	14	0	14	腐食小	浅草通り
157	60	か2	250	6.6	35	1967	35	C	2	1	3	腐食小	浅草通り
158	21	き2(+1,+1)	250	-2.1	4.75	不明	80	D	1	1	2	腐食小	浅草通り
159	23	き3(+1)	250	10.8	52.8	不明	80	C	9	2	11	腐食小	浅草通り
160	68	き5(+1)	400	5	31.8	不明	80	D	0	1	1	腐食小	浅草通り

付表-2 外れ値および量的データ不明路線を除外した集計表(3)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類		計	備考	地域
									汚水	雨水			
161	21	き6(+1)	400	19.5	24.05	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
162	66	き7(+き')	450	5.3	35.6	不明	80	B	23	2	25	腐食大	浅草通り
163	65	き8	450	4.4	41.05	不明	80	B	1	0	1	腐食大	浅草通り
164	63	き9(+1)	530	11.7	10.25	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
165	62	き10	600	-2.1	61.4	1985	17	D	41	2	43	腐食小	浅草通り
166	54	き11	800	-5.7	17.55	1985	17	D	0	0	0	腐食小	浅草通り
167	70	き4	450	44.4	1.8	不明	80	B	0	0	0	腐食大	浅草通り
168	53	き'10(+1*6)	450	5.6	32	1970	32	B	5	2	7	腐食大	浅草通り
169	9	け4(+1*2,+2)	460	6.3	35.2	不明	80	A	10	1	11	腐食大	浅草通り
170	10	け5	460	6.7	41.9	不明	80	A	30	1	31	腐食大	浅草通り
171	79	な1(α)	610	1.5	51.95	不明	80	A	65	2	67	腐食大	雷門
172	78	な2(+2)	610	0.6	25.5	不明	80	B	2	0	2	腐食大	雷門
173	74	な3(+2,+1)	680	-6.7	25.5	不明	80	B	16	1	17	腐食大	雷門
174	26	な4(+2)	680	-6.3	9.6	不明	80	B	1	0	1	腐食大	雷門
175	27	な5	680	7.9	11.35	不明	80	B	4	1	5	腐食大	雷門
176	31	な6(+2,+1)	680	0	46.7	不明	80	B	21	1	22	腐食大	雷門
177	32	な7(+3)	680	3.8	8	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
178	35	な8(+2)	680	5.9	10.25	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
179	36	な9	680	2.4	51.05	不明	80	B	14	0	14	腐食大	雷門
180	38	な10	680	-21.7	2.3	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
181	39	な11	680	3.5	45.75	不明	80	B	54	0	54	腐食大	雷門
182	16	な12(+3,+2,+1)	680	7.3	8.6	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
183	17	な13	760	2.2	77	不明	80	B	82	2	84	腐食大	雷門
184	18	な14(+な5)	760	6.3	59.65	不明	80	B	9	2	11	腐食大	雷門
185	46	な1	250	7.9	30.5	不明	80	C	32	3	35	腐食小	雷門
186	47	な2	250	7.3	17	不明	80	C	3	5	8	腐食小	雷門
187	48	な3	300	8.6	29.2	不明	80	C	17	5	22	腐食小	雷門
188	4	ぬ1	250	6.4	31.35	1973	29	なし	5	5	10	腐食小	雷門
189	6	ぬ2	350	6.9	34.6	1973	29	D	8	5	13	腐食小	雷門
190	7	ぬ3	400	6.1	34.25	1973	29	D	11	2	13	腐食小	雷門
191	9	ぬ4(+1)	500	2.7	41	1973	29	C	21	2	23	腐食小	雷門
192	10	ぬ5	600	5.1	48.6	1973	29	B	20	4	24	腐食大	雷門
193	5	ぬ1	250	6.2	47	1992	10	なし	11	6	17	腐食小	雷門
194	12	て1	300	6.6	31.75	1969	33	D	9(?)	3	3	腐食小	雷門
195	13	て2	300	6.7	34.45	1969	33	D	8	4	12	腐食小	雷門
196	18	て1	250	8	35	1924	78	D	16	3	19	腐食小	雷門
197	19	て2	250	8	33	1924	78	D	5	5	10	腐食小	雷門
198	21	て1	250	8.1	34.45	1973	29	D	16	3	19	腐食小	雷門
199	22	て2	300	6.8	35.35	1973	29	D	11	1	12	腐食小	雷門
200	24	て1	250	7.2	33.35	1968	34	D	18	2	20	腐食小	雷門
201	25	て2	300	6.8	35.9	1968	34	D	12	5	17	腐食小	雷門
202	3	て1	250	8.2	29.35	1980	22	D	4	1	5	腐食小	雷門
203	4	て2	250	14.4	29.2	1980	22	D	5	2	7	腐食小	雷門
204	1	て1	250	7.9	29.2	1980	22	なし	3	1	4	腐食小	雷門
205	2	て2	250	8.9	24.6	1980	22	なし	2	0	2	腐食小	雷門
206	11	て1	250	8	27.5	1969	33	D	54	5	59	腐食小	雷門
207	14	て2	350	4.8	31.1	1969	33	D	5	1	6	腐食小	雷門
208	20	て4	460	1.4	35.8	1924	78	B	9	2	11	腐食大	雷門
209	23	て5	530	4	35.05	1924	78	B	7	4	11	腐食大	雷門
210	26	て6	530	3.2	24.8	1924	78	B	10	3	13	腐食大	雷門
211	37	て7(+と)	530	2.5	68.9	不明	80	A	7	0	7	腐食大	雷門
212	38	て8	530	3	53.8	不明	80	A	4	0	4	腐食大	雷門
213	39	て9	530	3.1	58.6	不明	80	A	6	0	6	腐食大	雷門
214	40	て10	530	1	61.5	不明	80	A	4	0	4	腐食大	雷門
215	41	て11	530	0.7	44.5	不明	80	D	0	0	0	腐食小	雷門
216	42	て12	530	3.3	15	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
217	50	て13	530	2.3	21.6	不明	80	A	0	0	0	腐食大	雷門
218	36	と	530	3.4	50.7	1946	56	A	6	0	6	腐食大	雷門
219	44	と1	530	3.4	50.65	1952	50	B	0	0	0	腐食大	雷門
220	45	と2(+と)	530	-51.5	22.15	1952	50	A	2	0	2	腐食大	雷門
221	30	せ1	250	5.9	26.95	1924	78	D	8	3	11	腐食小	雷門
222	31	せ2	250	4.9	28.4	1924	78	D	5	4	9	腐食小	雷門
223	42	せ5(+3*2,+2*2)	450	10.1	30.1	1980	22	D	9	3	12	腐食小	雷門
224	43	せ6	450	8.6	44.25	1980	22	なし	14	7	21	腐食小	雷門
225	45	せ7(+1)	500	8.1	18.55	1980	22	D	4	2	6	腐食小	雷門
226	47	せ8(+1)	600	1.6	49.6	1980	22	D	12	6	18	腐食小	雷門
227	51	せ9(+せ'+せ'')	610	4.2	26.3	不明	80	B	1	3	4	腐食大	雷門
228	48	せ1	250	5	40.25	1967	35	C	14	4	18	腐食小	雷門
229	49	せ1	250	7.4	32.3	1970	32	C	10	4	14	腐食小	雷門
230	50	せ2	300	4.6	34.8	1970	32	C	6	4	10	腐食小	雷門
231	59	そ5(+そ'+1,+2)	460	6.6	33.2	不明	80	B	4	2	6	腐食大	雷門
232	60	そ1	250	7.9	31.6	1975	27	D	4	2	6	腐食小	雷門
233	61	そ2	250	8	4.5	1975	27	D	0	0	0	腐食小	雷門
234	62	そ6	610	-0.7	43.5	不明	80	A	6	2	8	腐食大	雷門
235	63	そ7	610	33	4.55	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
236	64	そ8(+せ)	760	-2.9	3.5	不明	80	B	0	0	0	腐食大	雷門
237	66	そ10	760	-0.2	38.75	不明	80	B	17	5	22	腐食大	雷門
238	58	そ	250	8	16	不明	80	C	1	2	3	腐食小	雷門
239	71	た1	250	8.7	36.7	1970	32	D	12(?)	2	2	腐食小	雷門
240	72	た2	300	8.4	17.8	1970	32	D	3(?)	2	2	腐食小	雷門

付表-2 外れ値および量的データ不明路線を除外した集計表 (4)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類		計	備考	地域
									汚水	雨水			
241	73	た3	300	8.2	27.9	1970	32	D	11	3	14	腐食小	雷門
242	75	た4(+1)	350	7.9	32.9	1970	32	D	116	4	120	腐食小	雷門
243	76	た5	400	4	32.75	1970	32	D	16	2	18	腐食小	雷門
244	78	た6	450	6.5	41.8	1969	33	D	9(?)	3	3	腐食小	雷門
245	79	た7	450	7	34.15	1969	33	D	23	5	28	腐食小	雷門
246	70	た7	250	6.4	23.4	1970	32	D	6	1	7	腐食小	雷門
247	77	た7	250	13.3	27.1	1969	33	D	11	2	13	腐食小	雷門
248	86	す1	250	2.6	27.8	1970	32	D	7	2	9	腐食小	雷門
249	87	す2	300	5.5	32.65	1970	32	D	7	3	10	腐食小	雷門
250	89	さ1	250	9.8	28.6	1985	17	C	4	1	5	腐食小	雷門
251	90	さ2	250	8	24.35	1985	17	C	2	2	4	腐食小	雷門
252	98	し1	250	5.2	40.25	1970	32	C	15	7	22	腐食小	雷門
253	100	し2	300	1.1	18.9	1970	32	D	5	2	7	腐食小	雷門
254	99	し1	250	7.3	17.75	1970	32	C	4	1	5	腐食小	雷門
255	5	ち1	250	11.8	34.75	1980	22	D	50	3	53	腐食小	雷門
256	6	ち2	300	10.5	40.15	1980	22	B	9	2	11	腐食大	雷門
257	7	ち3	350	4.7	36.3	1980	22	D	3	1	4	腐食小	雷門
258	8	ち4	400	11.9	27.8	1980	22	D	3	2	5	腐食小	雷門
259	9	ち5	530	6.3	72.9	1980	22	C	23(?)	3	3	腐食小	雷門
260	10	ち6	450	0	3.8	1980	22	C	0	0	0	腐食小	雷門
261	49	ち7	500	-11.4	18.4	1980	22	D	0	0	0	腐食小	雷門
262	21	つ1(+α)	700	-15.3	20.85	1980	22	D	0	0	0	腐食小	雷門
263	22	つ2	700	-2.7	18.35	1984	18	D	0	0	0	腐食小	雷門
264	23	つ3	700	7.4	43	1984	18	D	0	0	0	腐食小	雷門
265	24	つ4	700	1.3	15.75	1984	18	D	0	0	0	腐食小	雷門
266	31	つ5	700	3.4	67.65	1978	24	D	0	0	0	腐食小	雷門
267	32	つ6	700	3.7	69.7	1978	24	D	0	0	0	腐食小	雷門
268	33	つ7	700	4.5	64.6	1978	24	D	0	0	0	腐食小	雷門
269	34	つ8	700	1.4	69	1978	24	D	0	0	0	腐食小	雷門
270	35	つ9	700	0.9	67.2	1978	24	D	2	0	2	腐食小	雷門
271	1	Y1	250	7.6	31.3	1970	32	C	15	2	17	腐食小	上野
272	4	Y2(Z1+α)	350	4.9	45	1970	32	C	14	6	20	腐食小	上野
273	21	Y3(AA2+α)	500	8.5	42	1970	32	C	13	4	17	腐食小	上野
274	22	Y4(+α)	600	1.4	20.2	1970	32	D	4	1	5	腐食小	上野
275	23	Y5(+α)	600	0.8	17.7	1970	32	D	3	2	5	腐食小	上野
276	2	Z1	250	22.9	34	1970	32	B	8	1	9	腐食大	上野
277	9	AA2	250	10.1	34.55	1970	32	B	32	2	34	腐食大	上野
278	28	X1(+α)	460	2	23.6	1927	75	A	15	2	17	腐食大	上野
279	29	X2	460	4.4	6.1	1927	75	A	1	0	1	腐食大	上野
280	30	X3	460	0.9	41.35	1927	75	A	21	4	25	腐食大	上野
281	31	X4	460	-3.1	22.8	1927	75	A	23	2	25	腐食大	上野
282	32	X5(+α)	460	-0.1	8.85	1927	75	A	1	2	3	腐食大	上野
283	33	X6	530	3.5	11	1927	75	B	9	2	11	腐食大	上野
284	34	X7(+α)	530	0	19.5	1927	75	B	3	2	5	腐食大	上野
285	27	X8(AK)	610	4.6	38.15	1927	75	B	13	3	16	腐食大	上野
286	26	X9	680	3.5	17.5	1927	75	A	9	2	11	腐食大	上野
287	24	X10(+α)	680	-3.3	16.8	1970	32	B	14	1	15	腐食大	上野
288	25	X11	680	3.9	55.6	1970	32	A	21	3	24	腐食大	上野
289	53	S1+α	450	3.9	34.5	1926	76	C	22	7	29	腐食小	上野
290	54	S2+α	600	2.4	46.6	1926	76	B	4	4	8	腐食大	上野
291	55	S3+α	600	1.4	35.8	1926	76	B	1	5	6	腐食小	上野
292	56	S4+α(+1)	600	6.3	50.05	1926	76	C	11	3	14	腐食小	上野
293	61	R3	460	7.4	20.4	1926	76	A	4	4	8	腐食大	上野
294	58	R4	460	9.4	18.85	1926	76	A	4	4	8	腐食大	上野
295	59	R5(+1*2)	460	1.3	6.3	1926	76	A	0	0	0	腐食大	上野
296	60	R6	460	8.6	20.6	1926	76	B	7	3	10	腐食大	上野
297	57	R7	610	8.5	11.3	1926	76	B	3	2	5	腐食大	上野
298	66	T1	300	7.3	36	1926	76	C	7	4	11	腐食小	上野
299	49	T3(+1)	400	1.5	46.6	1926	76	A	48	7	55	腐食大	上野
300	48	T4(+1)	460	6	37.6	1926	76	A	24	4	28	腐食大	上野
301	47	T5	460	-1.8	37.45	1974	28	B	16	4	20	腐食大	上野
302	45	T6(U3)	530	5	39.7	1974	28	A	35	4	39	腐食大	上野
303	46	T7(+1)	530	-0.4	23.8	1974	28	C	8	4	12	腐食小	上野
304	50	T8(+1)	530	8.3	7	1974	28	B	0	0	0	腐食小	上野
305	51	T9(+1)	610	1.8	75	1974	28	A	45	6	51	腐食大	上野
306	52	T10(+3,+1)	610	2	54.6	1974	28	A	23	2	25	腐食大	上野
307	41	U1	300	3.4	31.85	1926	76	C	17	2	19	腐食小	上野
308	42	U2	300	-0.6	32.6	1926	76	D	6	2	8	腐食小	上野
309	44	U3(+1)	300	2.8	25.5	1926	76	D	32	2	34	腐食小	上野
310	75	AB1	300	6	34.7	1926	76	C	23	5	28	腐食小	上野
311	81	W1	250	7.7	27.1	1974	28	C	11	4	15	腐食小	上野
312	85	W2(+2,+1)	300	10.8	13.3	1974	28	D	8	0	8	腐食小	上野
313	97	V1+α	530	1.7	76.2	1926	76	B	40	6	46	腐食大	上野
314	98	V2+α	680	0.2	35.3	1974	28	B	7	3	10	腐食大	上野
315	99	V3+α(+1)	680	-0.5	31.35	1974	28	B	5	2	7	腐食大	上野
316	100	V4+α(W3)	680	4.2	50.65	1974	28	B	12	5	17	腐食大	上野
317	101	V5+α(+3)	760	-1.3	29	1974	28	B	6	2	8	腐食大	上野
318	102	V6+α	760	-2.5	27.9	1926	76	B	3	2	5	腐食大	上野
319	4	E1	250	7	30.75	不明	80	D	16	2	18	腐食小	上野
320	5	E2	400	2.6	46.15	不明	80	D	4	2	6	腐食小	上野

付表-2 外れ値および量的データ不明路線を除外した集計表(5)

データNo.	路線番号	系統	管径(mm)	勾配(%)	路線延長(m)	施工年(年)	使用年数(年)	腐食度合	取付管の種類 汚水	雨水	計	備考	地域
321	6	E3	400	1.2	46.25	不明	80	D	10	2	12	腐食小	上野
322	7	D1(+3,E3,+α)	800	1.9	25.45	1976	26	C	6	1	7	腐食小	上野
323	8	D2	800	6.9	7.1	1977	25	C	0	0	0	腐食小	上野
324	19	B4,D2,F4	900	-0.1	28.6	1976	26	C	5	3	8	腐食小	上野
325	9	A1	250	3	26.25	1977	25	D	8	0	8	腐食小	上野
326	10	A2	250	8	10.8	1977	25	C	2	0	2	腐食小	上野
327	11	B1	250	13.3	24.8	1977	25	C	17	2	19	腐食小	上野
328	12	B2	250	6.3	25.1	1977	25	C	8	4	12	腐食小	上野
329	13	B3	300	8	24.9	1977	25	C	9	3	12	腐食小	上野
330	14	B4	300	-1.6	7.3	1977	25	C	0	1	1	腐食小	上野
331	15	F1	250	7.9	20	1977	25	C	5	1	6	腐食小	上野
332	16	F2	250	10.7	23	1977	25	C	10	3	13	腐食小	上野
333	17	F3	300	4.5	23.6	1977	25	C	8	2	10	腐食小	上野
334	18	F4	300	8.5	6.55	1977	25	C	0	0	0	腐食小	上野
335	20	C1	250	8.3	23.1	1974	28	C	10	2	12	腐食小	上野
336	21	C2	250	8.8	25.15	1974	28	D	22	1	23	腐食小	上野
337	22	C3	350	6.3	26	1974	28	C	13	2	15	腐食小	上野
338	23	C4	350	8.3	27.4	1974	28	C	18	2	20	腐食小	上野
339	24	G1	250	3	20	1977	25	C	19	3	22	腐食小	上野
340	25	G2	250	3.8	20.75	1977	25	B	12	2	14	腐食大	上野
341	28	H1	250	7.8	25.85	1985	17	C	17	4	21	腐食小	上野
342	29	H2	450	-1	28.75	1985	17	C	10	4	14	腐食小	上野
343	30	I1	250	22.3	13.4	1987	15	D	1	1	2	腐食小	上野
344	31	I2	350	6.1	33.85	1987	15	C	10	1	11	腐食小	上野
345	32	I3	350	3.2	31.9	1987	15	D	13	2	15	腐食小	上野
346	33	I4	350	3.9	36.9	1987	15	D	16	2	18	腐食小	上野
347	35	J1	250	9.1	24.95	1977	25	B	16	1	17	腐食大	上野
348	36	J2	250	7.6	27.05	1977	25	C	7	2	9	腐食小	上野
349	37	J3	300	6	26	1977	25	B	10	3	13	腐食大	上野
350	38	J4	350	2	28.15	1977	25	C	14	2	16	腐食小	上野
351	39	J5	350	-0.5	6.35	1977	25	D	0	0	0	腐食小	上野
352	47	M2(L3)	460	0.5	55.1	不明	80	B	46	6	52	腐食大	上野
353	48	M3	500	9.2	6	不明	80	D	0	0	0	腐食小	上野
354	49	I6(M3,J5)	610	0.9	25.1	不明	80	C	2	3	5	腐食小	上野
355	55	I7(K3,N2)	610	5.9	38.2	不明	80	B	10	3	13	腐食大	上野
356	50	K1	250	4.1	35.7	不明	80	D	33	3	36	腐食小	上野
357	51	K2	250	1.8	34.75	不明	80	D	19	2	21	腐食小	上野
358	52	K3	300	2.2	35.25	不明	80	D	11	3	14	腐食小	上野
359	40	L1	250	6.5	28.5	不明	80	C	16	1	17	腐食小	上野
360	61	N3	250	-0.6	32.9	不明	80	D	26	4	30	腐食小	上野
361	62	O	250	7.3	38.6	不明	80	C	97	4	101	腐食小	上野
362	63	P	250	8.4	31.1	1977	25	D	6	3	9	腐食小	上野
363	72	Q1(N3)	530	1.5	44.1	不明	80	D	1	1	2	腐食小	上野
364	74	Q2	530	5.7	10.6	1983	19	D	0	0	0	腐食小	上野
365	75	Q3	680	11.2	10.9	1983	19	C	0	1	1	腐食小	上野
366	75		700	11.2	12.6	1983	19	C	0	0	0	腐食小	上野
367	80	AC1+α	300	5.9	32.2	1975	27	D	5	0	5	腐食小	上野
368	81	AC2+α	600	6	32.95	1975	27	なし	2	2	4	腐食小	上野
369	82	AC3+α	600	5	35.55	1975	27	なし	3	0	3	腐食小	上野
370	83	AD1	250	8	38	不明	80	A	13	2	15	腐食大	上野
371	84	AD2	250	8	11.15	不明	80	D	0	0	0	腐食小	上野
372	85	AD3+α	350	8	40.45	不明	80	なし	0	0	0	腐食小	上野
373	89	AF1	250	9	29.5	1968	34	なし	2	1	3	腐食小	上野
374	90	AF2	250	9	29.5	1968	34	なし	0	0	0	腐食小	上野
375	91	AF3	350	7	40.45	1979	23	D	18	2	20	腐食小	上野
376	92	AF4	400	5.5	44.6	1979	23	D	15	2	17	腐食小	上野
377	93	AF5	450	5	54.3	1979	23	D	25	3	28	腐食小	上野
378	95	AH2(+1)	300	8	35.55	1979	23	なし	4	3	7	腐食小	上野
379	94	AG1	250	10	31	不明	80	D	1	2	3	腐食小	上野
380	96	AG2(AH)	400	5	41.7	1979	23	なし	16	0	16	腐食小	上野
381	97	AG3	450	4.5	16.8	1979	23	なし	5	1	6	腐食小	上野
382	98	AG4	450	4.5	2.9	1979	23	なし	0	0	0	腐食小	上野
383	99	AG5	450	4.5	14.5	1975	27	D	13	1	14	腐食小	上野
384	100	AG6	450	4.5	27.85	1975	27	D	3	0	3	腐食小	上野
385	101	AG7	450	4.5	11.3	1975	27	なし	0	0	0	腐食小	上野
386	102	AG8(AF)	450	4	4.95	1975	27	D	0	0	0	腐食小	上野
387	103	AI1(+α)	760	0.9	33.4	不明	80	A	14	3	17	腐食大	上野
388	104	AI2	760	1.6	43.9	不明	80	A	4	3	7	腐食大	上野
389	109	AJ6	350	11.1	8	1954	48	D	4	2	6	腐食小	上野
390	110	AJ7	400	4.6	28	1976	26	D	0	0	0	腐食小	上野
391	111	AJ8	400	3.6	25.5	1976	26	D	2	1	3	腐食小	上野
392	105	AJ1(+α)	400	3.3	41.1	1970	32	C	23	2	25	腐食小	上野
393	120	AK1(+α)	460	5.1	51.15	不明	80	A	7	0	7	腐食大	上野
394	128	AO1	250	21.2	31.4	不明	80	C	11	2	13	腐食小	上野
395	130	AO2(AM)	300	7.1	35.8	不明	80	C	6	2	8	腐食小	上野
396	129	AM1	250	9.5	39.4	不明	80	B	8	3	11	腐食大	上野
397	131	AN1	300	5.7	37.45	不明	80	C	6	3	9	腐食小	上野