

受熱環境にあった舞台幕の防災性能の測定法と防災性能評価法の研究

Study on the Measurement and Evaluation of a Theater Curtain in a Heating Environment

小室 修*
荻野 恭久*

概 要

本実験は、浸漬法により防災加工された舞台幕について、防災性能の評価を付着した防災薬剤量の定量分析あるいは熱特性から評価できないかの実験を行うとともに、消防法に規定する45°法燃焼性試験との相関性について検討を加えた。

供試体は、綿素材を浸漬法により防災加工した舞台幕を用い、舞台幕の劣化要因の一つと考えられる熱的影響について、照明器具の温度特性調査結果を基に、恒温乾燥器により最大1500時間人工的に加熱劣化させた。

これらの経時的な防災性能変化を把握するために、酸素指数法による燃焼性試験、防災薬剤の定性定量分析試験及び消防法に規定する45°法燃焼性試験を行った結果は次のとおりであった。

- 1 酸素指数法による燃焼性試験の酸素指数値と45°法燃焼性試験による炭化面積の結果を比較すると、経時変化による相関性が確認された。
- 2 防災薬剤の定性分析では、リン酸、アンモニウム、硫酸が検出された。また、定量分析結果をみると、硫酸イオンは、加熱時間が長くなるほどイオン濃度が高くなり、加熱時間と硫酸イオンの定量値に相関性が確認された。

In this experiment we analyzed the flame retardants of the theater curtain which has been treated by impregnation, and studied if it is possible to evaluate its flame resistiveness from the amount of flame retardants adhered to the curtain.

We also studied the correlation between this evaluation method and the 45-Degree Angle Burning Test which is prescribed in the Fire Service Law.

The test material was cotton fabric, which had been give flame retardant treatment by impregnation. Based on the results of the temperature characteristics measurement of the stage light, which is considered to be one of the deteriorating factors of theater curtains, we heated the curtain for up to a maximum of 1500 hours which the constant temperature dryer in order to cause deterioration.

In order to assess the changes of flame retardant property by laose of time, three tests were conducted. They are 1) the Oxygen Index Burning Test 2) the 45-Degree Angle Burning Test which is prescribed in the Fire Service Law and 3) qualitative and quantitative tests of the flame retardants. The results were as follows.

1) When we compared the limiting oxygen index of the Oxgen Index Burning Test and the carbonized area of the 45-Degree Angle Basket Method, correlation by lapse of time was confirmed between the two results.

2) In the qualitative analysis of the flam retardants, phosphoric acid, ammonium and sulfuric were detected. In the quantitative analysis,the quantitative value of sulfate ion increased as the heating time is prolonged. This confirmed that there was a correlation between the heating time and the quantitative value of sulfate ion.

1 はじめに

近年の劇場・ホール等は、その使用目的の多様化が進み、舞台と客席が一体となった形態、または高度な演出効果を狙う演劇や音響重視の専用ホール等、多目的なホールが全国各地に普及しつつある。

消防法では、「劇場等における暗幕、カーテン、どん帳、じゅうたんその他舞台で使用する幕及び大道具等の合板」は防災対象物品を使用するよう義務づけられている。

最近では、舞台で使用する照明器具と舞台幕が接触して、舞台幕に着火したものと推定される火災がしばしば見受けられる。

そのほとんどがボヤ火災であったが、着火した舞台幕は、防災処理を施されたものであった。

防災性能を有する物品が火災の初期の段階で、着火物となり燃焼を継続し火災に至った原因として設置場所の環境及び経年による性状変化等が考えられる。この防災物品の防災性能の低下は火災を未然に防ぐ本来の目的を失うことから、その対策等の基礎資料として、舞台部の環境を把握し防災幕に係る防災性能の変化について、酸素指数法による燃焼性試験及び温度特性測定、防災薬剤の定量試験を行い、防災性能への影響を調べるとともに消防法に規定する45°法燃焼性試験（以下「45°法」という）との比較検討を行った。

2 実験項目等

(1) 供試体

供試体は、素材（綿100%貫八別珍243g/m²）を浸漬法により防災薬剤を付着した防災物品である舞台幕を使用した。

(2) 供試体の環境条件等

ア 劇場内は通常無窓居室であり、空調管理された環境であることから、舞台幕を劣化させる条件は、舞台用照明器具の熱影響のみとした。

イ 舞台幕を人工的に劣化させる加熱温度を決定するため、熱電対及び赤外線映像装置を用いて、舞台用照明器具の温度分布及び温度特性並びに照明器具で照射した時の幕の温度特性等の確認を行った。

(ア) ロアホリゾンライト（ミニハロゲン）

100V 85W 12灯

(イ) ハロゲンフレネルレンズスポットライト

100V 1500W 1灯

(3) 供試体の受熱温度及び受熱時間

ア 試験体の加熱温度は、照明器具の能力及び演出効果等による使用目的、使用器具の種別等により、照

明器具本体の温度並びに被照射体の温度は様々であるため、舞台幕の人工劣化に使用する熱風循環式乾燥器の仕様及び高温下による試験体の発火危険等を考慮し、舞台用照明器具本体の鋼製部分の温度を参考に加熱温度を90℃に決定した。

イ 受熱時間は、供試体から各試験毎の試験体の大きさに切り取り、300時間、600時間、900時間、1200時間及び1500時間加熱乾燥させることとした。

(4) 実験項目

供試体を前(3)により劣化を人工的に促進したものと、未処理のものについて以下の実験を行った。

ア 示差熱重量同時測定試験（以下「TG/DTA」という）による温度特性の把握

イ 酸素指数法による燃焼性試験（JIS K 7201）（以下「酸素指数法」という）による燃焼性の把握

ウ 防災薬剤のイオンクロマトグラフ（以下「IC」という）による防災薬剤の定性・定量値の把握

エ 45°法

45°法による防災性能の把握

(5) 実験方法

ア TG/DTA法

各受熱させた試験体から約10mgを秤取った試験片を40℃から600℃まで毎分20℃昇温で28分間の発熱温度及び熱重量変化について測定を行った。

イ 酸素指数法

各受熱時間毎の試験体について、縦15cm、横6cmをU字形保持具に取り付けて燃焼試験を行い、酸素指数値の測定を行った。

ウ IC法

0, 300, 600, 900及び1200時間の各受熱時間毎の試験体から約0.5gを秤取り、超純水200ml中に入れ、ウォーターバスを用いて試験体を湯洗し、東洋濾紙3番で濾過した洗いをICにより防災薬剤の定性及び定量分析を行った。

なお、分析条件は次のとおりである。

(7) 陰イオン

分離カラム 4×250mm

溶離液 1.8mM Na₂CO₃/1.7mM NaHCO₃

流量 1.5ml/min

検出器 電気伝導度検出器

(イ) 陽イオン

分離カラム 4×250mm

溶離液 18mMメタンシルホン酸

流量 1.0ml/min

検出器 電気伝導度検出器

エ 45°法

45°法により、0時間、600時間及び1200時間受熱

の試験体について燃焼試験を行った。

(7) 試験体の裁断

45°法に用いる試験体は、消防法施行規則第4条の3第4項に規定に基づき、裁断する。

(イ) 0時間試験体の養生

消防法に規定する養生から、恒温乾燥器（50℃±2℃）内に30時間放置後、シリカゲル入りデシケータ内に24時間以上放置

(ウ) 45°法試験

供試体は薄手布であることから、マイクロバーナーの炎の長さ45mm、接炎時間1分間として試験を行った。

3 試験結果及び考察

(1) TG/DTA法

示差熱重量曲線の図1から図10の結果から熱重量曲線を見ると、0時間の試験体は250℃付近から熱分解が始まり試験体の残さ率が約50%まで減少し、その後一定の減少する傾向を示す。また、受熱した試験体は、重量減少が二段階に及んでいる。第一段階で残さ率約40%に、第二段階で残さ率約20%に重量が減少した。

示差熱曲線を見ると、0時間の試験体は発熱ピーク値が低く、ピークが緩慢であるのに対し、受熱した試験体は、発熱ピーク値が高いとともにピークそのものが鋭い曲線を描き、熱重量曲線と同様に、炉内温度約360℃付近及び約450℃付近で発熱反応が起り、二段階のピークが検出された。

このことについて、図10から防炎薬剤である硫酸アンモニウム（ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$;FW=132.14）の示差熱曲線と比較すると、硫酸アンモニウムは吸熱反応を示し、各試験体とほぼ同じ温度で反応を示している。

このことから、防炎薬剤は、硫酸アンモニウムを主成分とする防炎薬剤であると推定される。

アンモニウム塩系の防炎薬剤の特徴は、熱分解を行った際、発生するタールその他可燃性ガスの発生を抑え、炭化物の生成を促進することにより、防炎効果を高めている反面、経時的な熱及び湿度等の影響を受けやすい特性を持つものもある。

今回の研究では試験体を受熱することにより、アンモニウム塩系の防炎薬剤の特徴と同様に防炎性能を低下させているのではないかとされる結果となった。

この結果から防炎性能の劣化推移を熱重量曲線の変化から述べると、第一段階のピークから徐々に重量を減少させていたものが、防炎性能の劣化により、重量の変化に二つのピークが生じ、最終的に防炎性能が失われると発熱反応とともに急激に重量を減少させるこ

とが言える。

図1及び図7から熱重量曲線のピーク時の分解開始温度及び発熱開始温度を見ると、0時間の試験体に比べ湯洗後の試験体は、分解開始温度及び発熱開始温度とも80℃程高くなり、防炎処理されていない綿そのものの分解温度及び発熱開始温度を示すとともに、発熱反応と同時に試験体重量は急激に減少し、防炎効果が失われていることを確認した。

防炎処理加工は、物質そのものの燃焼性を早め、すなわち、発熱温度及び分解温度を低くして燃焼の広がりを防ぐことを目的として処理されているものである。

よって、実験では、劣化が促進されると発熱温度及び分解温度とも防炎未処理の温度特性に近づくものと思われたが、今回の実験では、防炎性能の変化について熱特性に明らかな違いを確認することはできなかった。

(2) 酸素指数法

酸素指数法により各供試体につき3回実施した結果を表1に示す。

目視観察では、試験体は、均一に下方へ無炎燃焼（じん）を継続し非常に安定した燃焼性を示した。酸素指数の平均を見ると、試験体は、受熱時間が長いものほど酸素指数値が下がる傾向を示し、防炎性能に熱が及ぼす影響が確認された。（図11「酸素指数平均値と受熱時間」を参照）

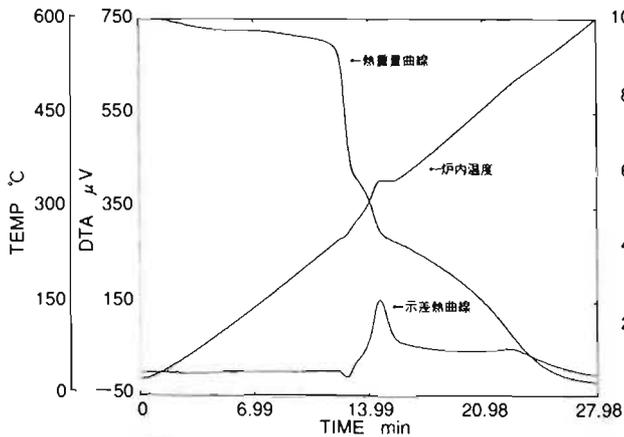


図1 0時間試験体の示差熱重量曲線

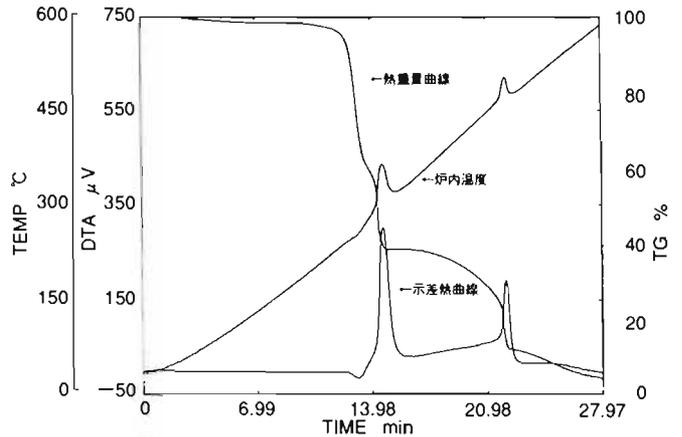


図2 300時間受熱試験体の示差熱重量曲線

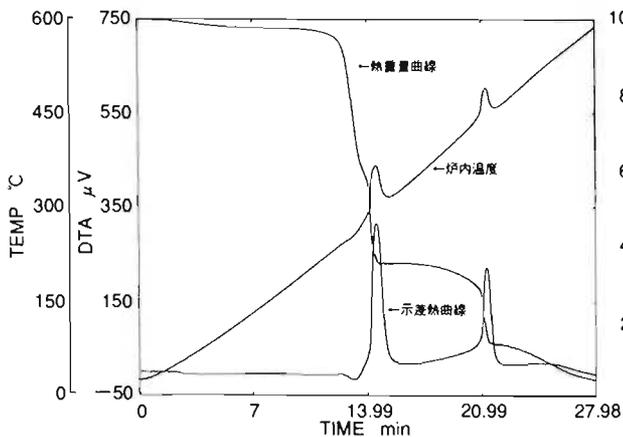


図3 600時間受熱試験体の示差熱重量曲線

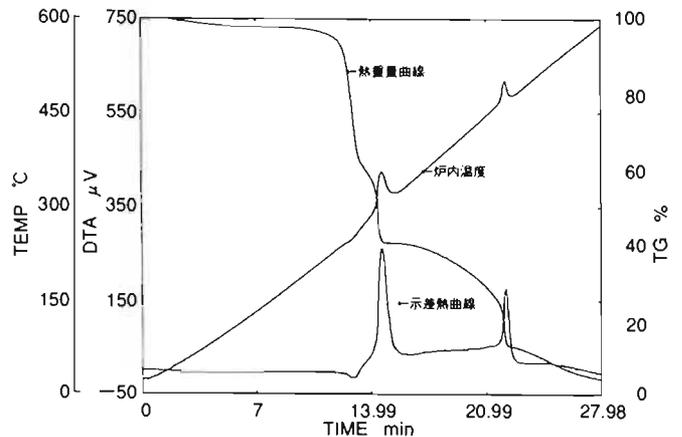


図4 900時間受熱試験体の示差熱重量曲線

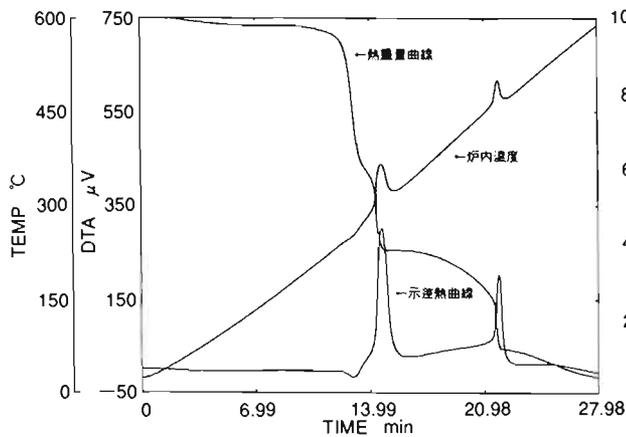


図5 1200時間受熱試験体の示差熱重量曲線

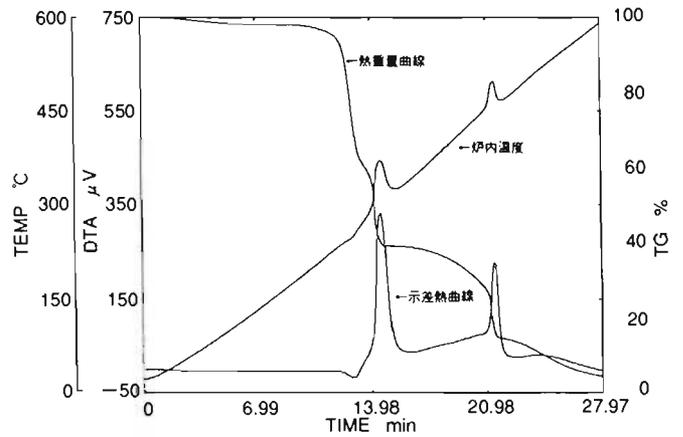


図6 1500時間受熱試験体の示差熱重量曲線

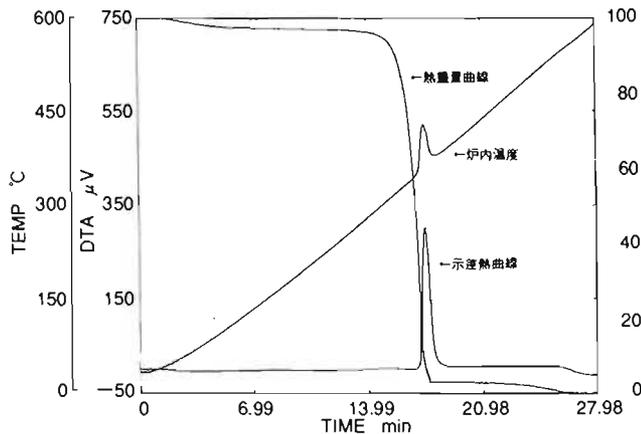


図7 0時間試験体の湯洗後の示差熱重量曲線

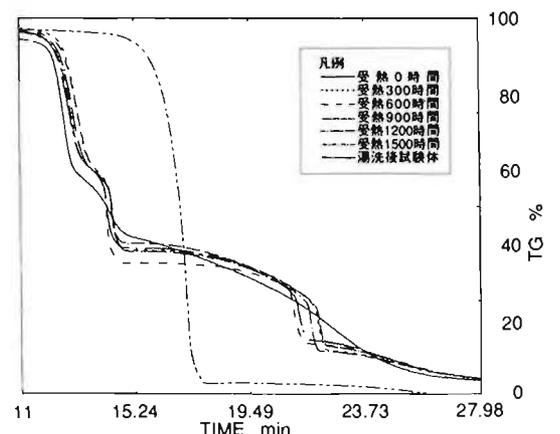


図8 各受熱時間毎の熱重量曲線

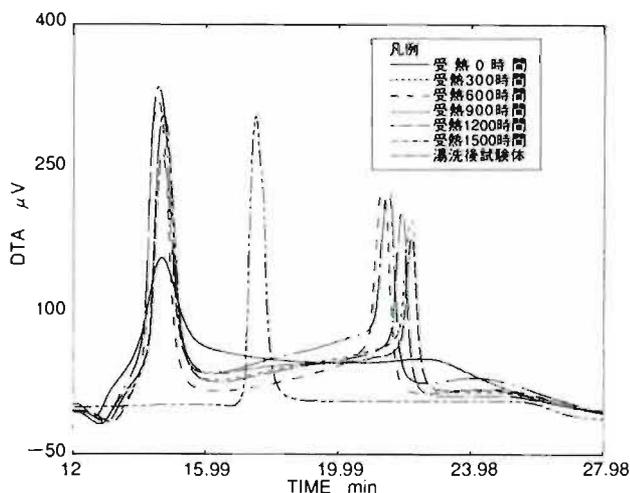


図9 各受熱時間毎の示差熱曲線

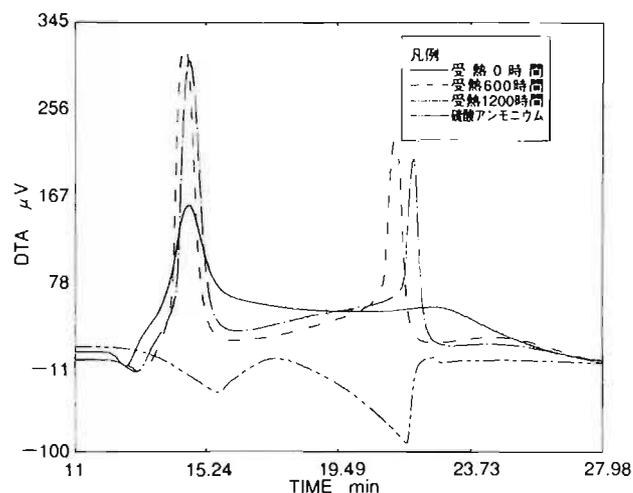


図10 0, 600, 1200 時間受熱した試験体と硫酸アンモニウムの示差熱を比較した曲線

表1 酸素指数平均値と受熱時間

試験体		酸素指数値			
		1 回	2 回	3 回	平均値
受熱時間	0時間	33.8	34.2	33.8	33.9
	300時間	33.8	32.9	33.8	33.5
	600時間	32.9	33.3	33.3	33.2
	900時間	33.3	32.9	32.9	33.0
	1200時間	32.5	32.9	32.0	32.5

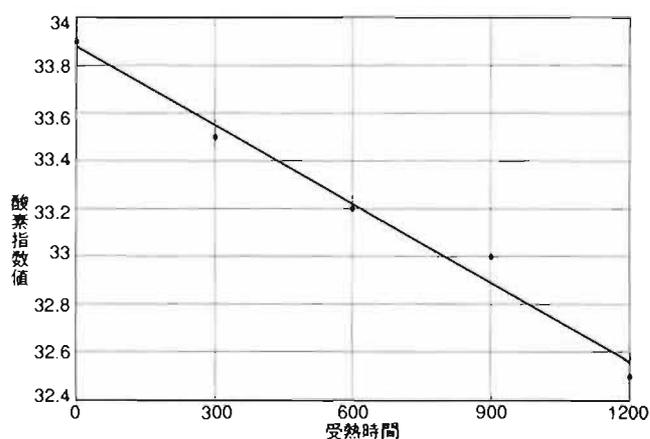


図11 酸素指数平均値と受熱時間

(3) IC法

0時間受熱の舞台幕を湯洗した溶液を、ICにより定性及び定量分析した結果を図12及び図13に示す。

この定性結果から試験体に使用されている防災薬剤は、アンモニウム・リン酸・硫酸が同定され、これらを成分とする水溶性無機防災薬剤（アンモニウム塩）と推定される。

また、図14及び図15をみるとアンモニウムイオン及びリン酸イオンは受熱時間に関係なく一定の量を検出したが、硫酸イオンは、受熱時間が長くなるほど検出量が多く分析される結果となり、受熱時間と硫酸イオンの検出量に相関性が確認された。

この結果を表2及び図16から述べると、長時間受熱により、重合体による結合が熱により弱まり、硫酸イオンが多く定量されたものと考えられる。

この結果は、酸素指数値と相関性を示した。

(4) 45°法

45°法による各試験体の防災性能試験結果は、表3のとおりであった。

長時間受熱した試験体ほど炭化面積の平均値が増加する傾向を示したが、防災性能基準の炭化面積30cm²を超えるものは、確認されなかった。（図17「炭化面積と受熱時間」を参照）

燃焼試験中、目視においても、受熱時間が長い試験体ほど着炎する面積が増加する傾向が観察された。

供試体の素材「綿」に対しては、炭化面積の結果と酸素指数値の結果及びICによる防災薬剤の定量結果に相関性を示し、受熱が防災性能に影響を与えることが確認された。

従って、酸素指数法及びICによる防災薬剤の定量分析方法においても、防災性能の評価を行うことは、有効であると考えられる。

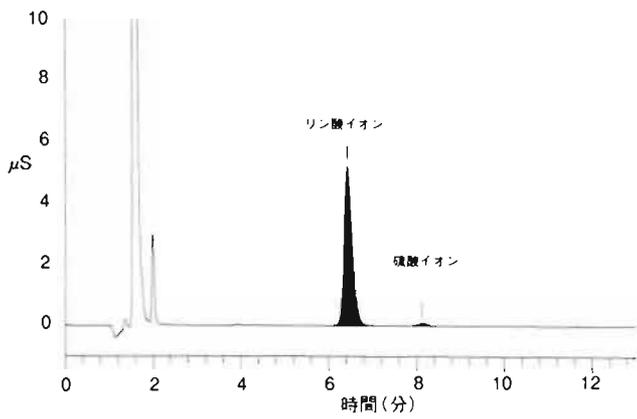


図12 ICによる陰イオン分析結果
(受熱0時間試験体の湯洗溶液)

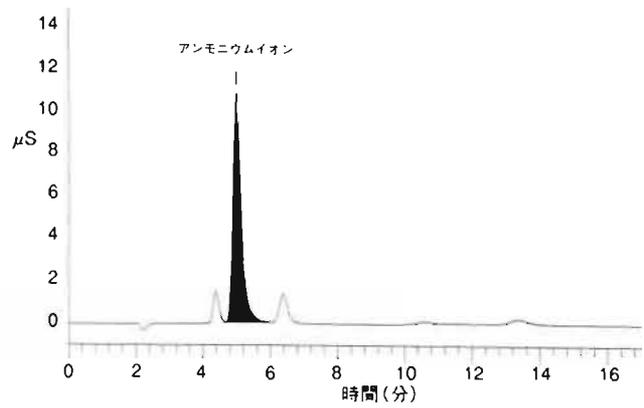


図13 ICによる陽イオン分析結果
(受熱0時間試験体の湯洗溶液)

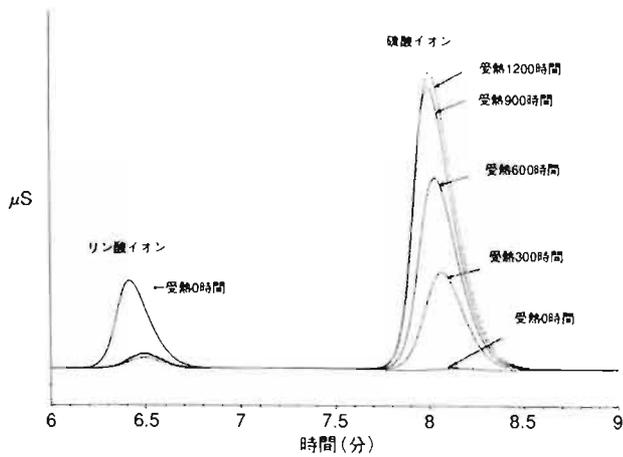


図14 ICによる陰イオン分析結果

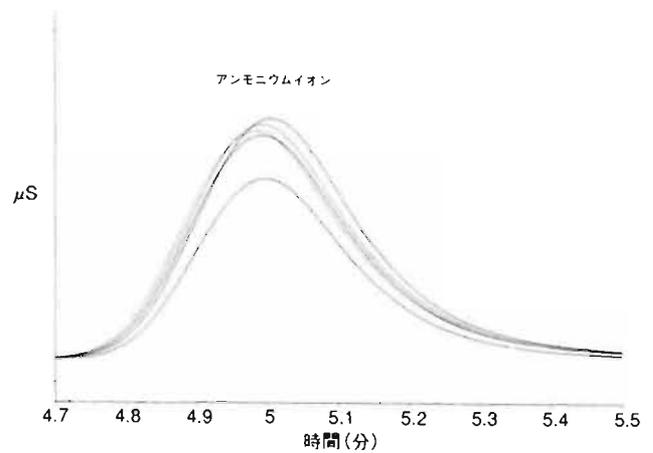


図15 ICによる陽イオン（アンモニウムイオン）分析結果

表2 ICによる防災薬剤量の解析結果

試験体重量 [g]		0.5623	0.5278	0.5628	0.5623	0.5298
加熱時間 [h]		0	300	600	900	1200
データ値 [ppm]	アンモニウム	12.164	8.774	11.238	11.949	11.569
	りん酸	17.847	4.461	6.176	6.543	6.815
	硫酸	0.130	13.380	26.346	39.287	41.527
単位重量の量 [mg/g]	アンモニウム	8.6530	6.6495	7.9872	8.5001	8.7346
	りん酸	12.6957	3.3808	4.3895	4.6545	5.1453
	硫酸	0.0925	10.1402	18.7249	27.9474	31.3530

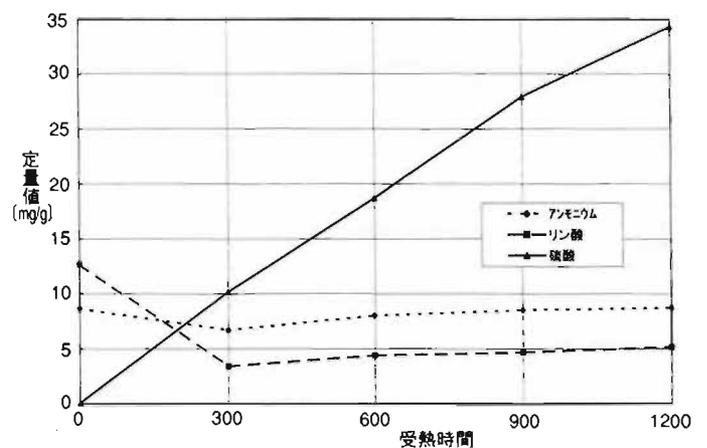


図16 防災薬剤量の解析値と受熱時間

表3 45°法による試験結果

試験体		炭化面積 [cm ²]			平均 [cm ²]
受熱時間	0時間	18.08	15.78	14.94	16.27
	600時間	17.77	18.24	21.72	19.24
	1200時間	21.98	21.79	23.37	22.38

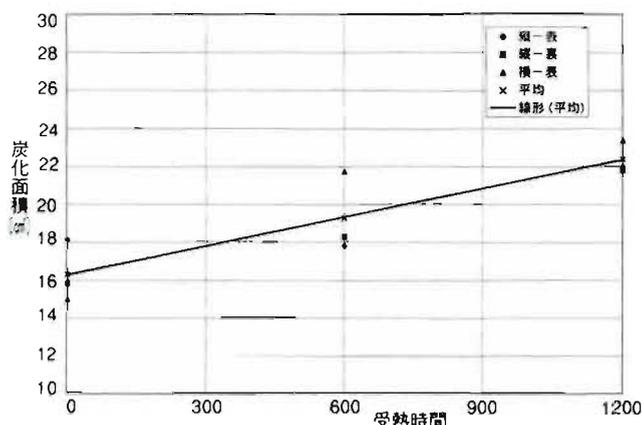


図17 炭化面積と受熱時間

4 まとめ

以上の結果から、素材が「綿」で、防災加工が「二次加工」の舞台幕である供試体については、防災性能の判定に酸素指数法による酸素指数値及びICによる防災薬剤の定量分析値を確認することにより防災性能の劣化の有無の評定が可能であることが確認された。

従って、わずかな試験片でも防災性能の有無を判定できるものと考えられる。示差熱及び熱重量曲線からは、防災性能基準との相関性は確認されなかったが、防災性能の劣化を判断するうえで熱重量曲線に表れる第一段階のピーク以降の変化も見逃すことはできない。

今回の実験では、炭化面積30cm²を超え防災性能基準に適合しない試験体はなかった。

しかし、防災薬剤或いは繊維素材への影響は、舞台部の環境から考えると、単一要因とした今回の実験条件の他、埃等の表面付着による影響及び長期使用に係る舞台幕自体の自重による伸び等の影響などを考慮して実験を実施しなければならないものと考えられる。

今回入手した供試体は、防災薬剤の成分及び付着量が不明である舞台幕での実験であったことから、今後はより正確を期すため、防災薬剤の成分と付着量を明らかにし、劣化に伴う防災薬剤の定量分析値と付着量の関係を把握する実験も必要であると考えられる。

これらの実験は、綿素材を浸漬法により防災加工した舞台幕で行ったが、この他素材難燃であるポリクラーラと約20年近く使用されていた舞台幕（中仕切り幕）についても同様な実験を行った。

素材難燃であるポリクラーラは、受熱による変色及び縮みはあるものの繊維そのものが改質されているため、防災性能に影響はないことが確認された。

劇場で約20年近く使用されていた舞台幕（中仕切り幕）の実験では、天井付近から採取された幕は、防災性能基準を満たしていたが、床上付近から採取された幕は、炭化面積30cm²を超え、防災性能が失われていた。また、酸素指数値及び防災薬剤の定量分析値も炭化面積との相関性を確認することができた。

このことは、舞台部の大空間では、一の舞台幕であっても、上部と下部では環境が異なり、上部には、アッパーホリゾンライト等の照明器具が固定され舞台幕とはほぼ一定の距離を保った状態で使用されるが、下部には移動式のロアホリゾンライト及びスポットライト等が使用され、演出効果等により舞台幕に接近若しくは接触した状態の使用も考えられ、上部と下部とに防災性能に異なった結果がでたものと思われる。

これらの防災物品は、設置場所の環境に左右されず、防災性能を維持することが肝要であるとともに僅かな防災性能の違いであっても、これが火災進展を助長するものであってはならない。

従って、今後ともあらゆる機会をとらえ、防災物品等の性能の確認及び周囲の環境による劣化の確認実験も併せて続けていきたいと考える。

参考文献

- 1 消防科学研究所報 第33号 1996年
- 2 繊維と防災 日本防災協会
- 3 繊維（三訂版） 監修 石川欣造