

熱流体解析シミュレーションの活用と可燃性ガスの最小自然発火温度の
滞留時間・体積依存性に着目した火災事故の原因究明
旭化成株式会社 生産技術本部 守山エンジニアリング部
○ 安藤 駿

Analysis of the Fire Accident Focusing on Thermal Fluid Simulation and Dependence of Minimum
Autoignition Temperature on Exposure Time and Volume
Suguru Ando
Asahi Kasei Corporation, Moriyama Engineering Department

キーワード: 火災事故, 可燃性ガス, 自然発火温度, 熱流体解析シミュレーション
Keywords : Fire accident, Combustible gas, Autoignition temperature, Thermal fluid simulation

1. はじめに

2016年に自社保有の乾式紡糸設備において火災事故が発生した。発災した設備は合成繊維の生産設備であり、紡糸設備の内部より発火し、堆積していた繊維に引火したことで火炎が拡大、周囲のダクトやケーブルにも延焼した。設備および製品の物的被害を被ったが、幸いにも人的被害は無かった。著者はこの火災事故の原因を解明し、再発防止対策を確立した。本報では当該火災事故について、熱流体解析シミュレーションを用いた現象の可視化手法および可燃性ガスの最小自然発火温度 (AIT) の時間・体積依存性に着目した原因究明に関する知見を紹介する。

2. 火災事故について

2.1. 乾式紡糸技術

当該合成繊維の生産はジメチルアセトアミド (DMAc) を溶媒とするポリマー溶液 (紡糸原液) を用いる乾式紡糸が一般的である [1]。乾式紡糸設備の概略図を Fig. 1 に示す。100℃前後に加熱されたポリマー濃度約 30 wt%の紡糸原液を、紡口と呼ばれるノズルオリフィスから紡糸筒内に吐出し、200～300℃の加熱窒素ガスで DMAc を蒸発させる。蒸発に伴い、糸状の紡糸原液がポリマーの単糸になり、複数本単位で燃りをかけられ、製品糸として集約された後、巻取機で巻き取られる。

2.2. 火災事故の詳細

紡糸原液を吐出し続ける紡口は、生産する糸の銘柄変更や、吐出孔の不良発生、定期整備などに際して、古いものから新しいものに交換する紡口交換と呼ばれる作業を行う。火災事故は紡口交換作業中に発生した。発災時の紡糸設備状況の推移を以下に示す。① 紡口交換終了後、非定常状態から定常状態 (製品を生産する状態) に復旧するため、紡糸筒内の気体を排気する上部・下部排気ラインから加熱窒素ガスを供給する窒素循環ラインへ切り替える際に、設備の不具合が生じ、Fig. 1 に示す 4 つの弁が閉止状態 (無通気状態) に陥った (時刻 12:45 ～ 12:53)。② 無通気状態で、紡糸原液の吐出が約 2 分間続いたことで、紡糸原液から蒸発した DMAc ガスと空気との可燃性混合気が紡糸筒内に形成された (12:53 ～ 12:55)。③ 異変に気付いた作業

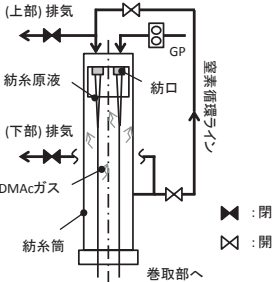


Fig. 1 乾式紡糸設備

が紡糸原液の吐出を停止したが、さらに無通気状態が 4 ～ 5 分間続いた (12:55 ～ 12:59)。④ 空気と DMAc ガスの混合気体が紡糸筒内の高温の雰囲気下に約 7 分間 (② → ④の間) 曝され、発火に至った (12:59 ～ 13:00)。

3. 火災事故の原因究明

3.1. 熱流体解析シミュレーションを用いた現象解明

発災時の紡糸筒内の状態推移より、発火原因の可能性として DMAc ガスの自然発火が挙げられる。上記の仮説を検証するにあたり、熱流体解析ソフト (STAR-CCM+, SIEMENS) を用いて、紡糸筒内が無通気状態に陥った時刻から発火推定時刻までの紡糸筒内の現象を再現した。

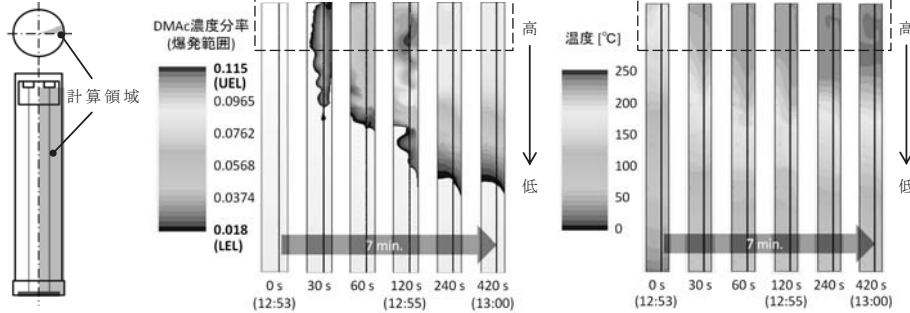


Fig. 2 計算領域および紡糸筒内 DMAc ガス濃度分布 & 雰囲気温度分布

計算領域および紡糸筒断面における DMAc ガス濃度分布・雰囲気温度分布の時間推移の計算結果をそれぞれ Fig. 2 に示す。ここで、計算領域は計算負荷を考慮し、円筒形状の紡糸筒全体の一部を対象とした。筒壁からの伝熱により、紡糸筒内上部が下部と比べてより高温になるため、上部で DMAc の蒸発が活発であり、上部から爆発範囲内に入る様子がわかる。その後、温度差に起因する自然対流と重力に従い、上部から下部に向かって DMAc ガスの爆発範囲が広がる。上記 DMAc ガス拡散シミュレーションの計算モデルの妥当性を評価するため、パイロット試験機を用いて無通気状態を再現し、紡糸筒内の DMAc ガス濃度分布を測定した。その結果と、パイロット試験機用に別途作成したシミュレーションによる濃度分布計算結果を比較したところ、実測値と計算値の誤差が約 8% となり、十分に実用に足ると判断した。

ここで、ASTM 法類似の実験を行い、DMAc の自然発火挙動について報告した参考文献の一部抜粋を Fig. 3 に示す [2]。雰囲気温度が 224.5 ～ 235℃ のとき、発火遅れ時間は 129 ～ 385 秒と報告されている。そこで、上記雰囲気温度と発火遅れ時間の観点からシミュレーション結果を考察した。紡糸筒内上部 (Fig. 2 破線枠内) に DMAc ガスの爆発範囲内かつ温度が 224.5 ～ 235℃ の領域が約 360 秒存在することから、火災事故の発火原因は、高温の紡糸筒内上部で DMAc ガスが長時間曝されたことによる自然発火現象の可能性が高いと考えられる。この仮説を検証するため、DMAc ガスの自然発火現象の実証実験を行った。

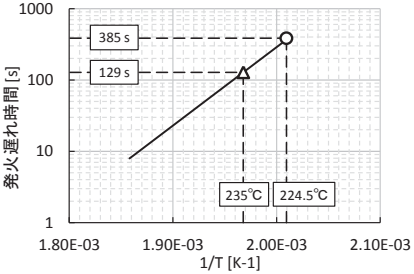


Fig. 3 DMAc の自然発火挙動

3.2. 最小自然発火温度の時間・体積依存性

前節で引用した Fig. 3 の論文値は試験容器の体積が 12 L の場合の結果を表す。一般的に、可燃性ガスの自然発火挙動は気体が存在する試験容器の体積および雰囲気温度に応じて変化する [3]。そこで、上記の観点から次の 2 点を検討することで発火原因の仮説を検証した。

1) 論文値の妥当性を、試験容器の体積と AIT を指標として、論文値と DMAc ガス自然発火の実証試験結果を比較することで評価する。

2) 論文値 (試験容器の体積 12 L) が、紡糸筒 (容積 3 m³ 以上) にも適用可能か検討する。爆発試験装置 (容積 2 L) を用いて、DMAc ガスの自然発火挙動を測定した。爆発試験装置は球形の爆発容器本体とそれを覆うジャケット (断熱材 & 電熱線) から構成される。まず、爆発容器を所定の温度に加温し、空気を導入する。次に加温した DMAc ガスを 9 vol% になるよう導入した後、10 分間保持し、その間の雰囲気温度の時間変化を測定した。DMAc ガス導入終了時の内圧は大気圧になるよう定量し、初期温度は条件 1～4 で 235, 260, 280, 300℃と設定した。

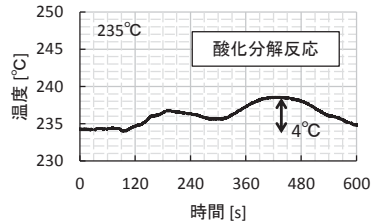


Fig. 4 (a) 雰囲気温度の時間変化 (条件 1)

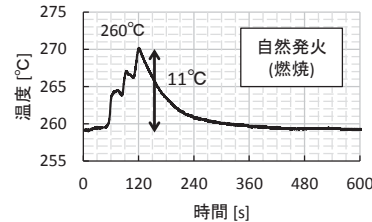


Fig. 4 (b) 雰囲気温度の時間変化 (条件 2)

条件 1 と 2 の試験結果を代表結果としてそれぞれ Fig. 4 (a), (b) に示す。条件 1 ではなだらかに温度が上昇し、ピーク時刻では温度上昇値が約 4℃となった。また、ピークが 2 つあることから、DMAc ガスの酸化分解反応 (冷炎現象) が生じていると考えられる [4]。一方、条件 2 では急激な温度上昇がみられ、ピーク時刻では温度上昇値が約 11℃であることから、DMAc ガスの自然発火現象が生じていると考えられる。条件 3, 4 も条件 2 と同様の温度挙動を示した。以上より、試験容器の体積が 2 L の場合、DMAc ガスの AIT は 260℃と判断した。

ここで、比較対象の参考論文値^[2]および上記の自然発火試験結果に加え、化学物質安全データシート (MSDS) に記載の AIT と、ASTM 法で測定した AIT について、試験容積ごとに Table 1 にまとめた。記号は後述のグラフにおけるプロット位置を表す。これらの試験容積と AIT の関係を、化学反応による発熱と容器からの放熱で表される熱発火理論式で整理する [5]。

$$\ln \frac{ST_{AIT}^2}{V} = K' - \frac{E}{RT_{AIT}} \quad (i) \quad K' = \ln \frac{\rho QEA}{Rh} + 1 \quad (ii)$$

S は試験容器の表面積、V は試験容器の体積、 T_{AIT} は AIT、E は活性化エネルギー、R は気体定数、 ρ は密度、Q は反応熱、A は頻度因子、h は熱伝達係数を表す。式 (i) より、左辺の放熱の寄与率を表す ST_{AIT}^2/V (伝熱パラメータ) の自然対数と右辺の T_{AIT} の逆数との間に直線関係があることがわかる。整理した結果を Fig. 5 に示す。異なる手法で得られた試験結果が全て式 (i) の直線関係を満たすことから、熱発火理論式により自然発火現象を記述でき、かつ参考論文値の妥当性を確認できたと判断した。

続いて、冷炎現象と放熱の観点から、自然発火挙動に対する試験容器の体積の影響を評価する。Table 1 より、容積 5.0 L の場合の AIT と容積 12 L の場合の冷炎発生温度が等しいことに加え、容積 12 L の場合では冷炎現象が観測されなかったと報告されていることから、容積 12 L 以上

Table 1 試験容積ごとの DMAc ガスの AIT

	試験方法	試験容積 [L]	AIT [°C]	S. D. [°C]	記号	冷炎温度 [°C]
文献値	参考論文 ^[2] (ASTM 類似)	0.5	338.5	22.8	□	295
		5.0	249.3	5.1	△	227
		12	224.5	3.5	×	— (発生しない)
	MSDS	0.2	490.0	—	*	— (不明)
実験値	ASTM	0.5	328.0	1.00	○	— (不明)
	自然発火試験	2.0	260.0	—	+	235

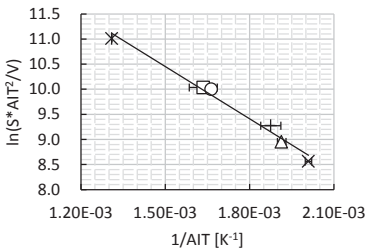


Fig. 5 AIT と容積・表面積の関係

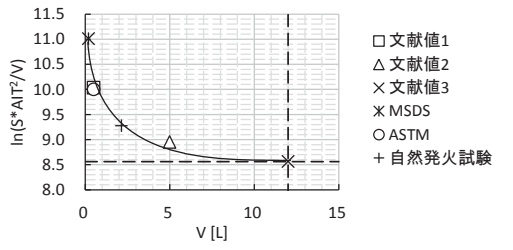


Fig. 6 容積と伝熱パラメータの関係

の試験容器において、放熱の寄与率が無視できるほど微小であると推定される。ここで、Table 1 の結果を、横軸が容積、縦軸が伝熱パラメータの自然対数のグラフで整理した (Fig. 6)。グラフより、容積が大きくなるほど、熱発火理論に基づき、放熱の寄与率が小さくなることから、DMAc ガスの場合、容積 12 L 付近で伝熱パラメータが安定することから、これ以上の容積においては、自然発火挙動に対する容積の影響が同様であるため、参考文献の容積 12 L の実験結果を、容積 3 m³ 以上の紡糸筒内の現象と同等とみなすことができると考えられる。以上より、熱発火理論式により参考論文^[2]、自然発火試験、MSDS、ASTM の結果を整理することができたことから、論文値の妥当性を確認した。また、自然発火挙動の体積依存性より、論文値を火災事故の現象に適用できることから、高温の紡糸筒内上部に DMAc ガスが曝されたことによる自然発火が火災事故の原因であるとした上記の仮説の妥当性が立証された。

4. おわりに

化学プラントにおける可燃性ガスの発火事故は後を絶たない。特に自然発火現象は諸条件によって挙動が異なるため、対策が困難であり、大事故に発展する危険性も高い。本報では自社保有の乾式紡糸設備で発生した火災事故について、可燃性ガスの挙動を熱流体解析シミュレーションで可視化して現象をとらえる手法と、DMAc ガスの AIT の時間・体積依存性に関する知見を紹介したが、これらが火災事故減少へ向けた安全対策検討の一助となれば幸いである。最後に本検討に多大なご協力を頂きました社内外各位に深謝いたします。

参考文献

[1] 古谷 哲郎, 繊維機械学会誌, vol. 56, no. 3, pp. 105-110, 2003.
[2] R. Zalosh and J. Casey, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, pp. 71-76, 2010.
[3] 板垣 晴彦, 産業安全研究所研究報告 NIIS-RR-2000, pp. 19-24, 2001.
[4] F. Buda et al., *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, pp. 227-232, 2006.
[5] K. Gulan, *American Institute of Chemical Engineers Symposium Series*, no. 25, pp. 8-16, 1968.

■ 略歴

2009 年 4 月	京都大学工学部物理工学科 入学
2013 年 3 月	京都大学工学部物理工学科 卒業
同年 4 月	京都大学大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻博士前期課程 入学
2015 年 3 月	京都大学大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻博士前期課程 修了
同年 4 月	旭化成株式会社生産技術本部 エンジニアリングセンター守山エンジニアリング部
2018 年 4 月	旭化成株式会社生産技術本部生産技術センターCAE 技術部 現在に至る

以上