

ナイロン 66の合成実験

—より安全な学生実験を目指して—

Preparation of Nylon 6,6 fiber in the laboratory experiment, looking for less-hazardous reaction conditions

服飾美術学科 大井 龍

1. はじめに

ナイロン 66は1939年に米国デュポン社で工業化された世界初の合成繊維である。当時、高価な絹の代替として女性用ストッキングに使われた事で、その実用性が証明された。「石炭と水と空気から作られ、鋼鉄よりも強く、クモの糸より細い」というキャッチフレーズが有名である。現在ではレインコートやウインドブレーカー、スポーツウエアや機能性肌着などに使われているだけでなく、衣料用途以外にも、内装材やカーペット、網や釣糸、自動車、歯車などの部品、電気電子部品材料等に幅広く使われて、我々の生活の一部になっている。

ナイロン 66の合成実験は、教科書にも手順が掲載され、大学の繊維学実験で行われてきた人気のある実験の1つである。ナイロン 66は工業的にはアジピン酸とヘキサメチレンジアミンを高温・高圧下で脱水縮合させて製造されるが¹⁾、実験室ではアジピン酸に変えてアジピン酸ジクロリドを用いる事で、室温下でも簡便に合成する事ができる。有機溶媒と水溶媒の二層系の界面重合で、界面でアジピン酸ジクロリドとヘキサメチレンジアミンが出会うことでビーカーの中で重合が始まる。重合物をピンセットで引っ張り上げると魔法のようにナイロン繊維が生成する様は、感動的でもあり、若者たちのサイエンスへの興味をかき立てる。

しかし、化学実験には常にリスクが伴う。特に有機溶媒を扱う場合は実験者の健康被害に十分配慮する必要がある。学生実験のような、少量・短時間の実験であれば、ドラフト内で注意深く実験すれば問題ないと思われるが、被爆限界が低く、発がん性や生殖毒性の懸念のある有機溶媒は、可能な限り使用を控えるべきであろう。

被服材料実験書²⁾によればナイロン 66の合成では四塩化炭素が有機溶媒として推奨されているが、四塩化炭素は2018年の分類改定で、発がん性の区分が2から1Bに引き上げられた特定化学物質(第2類物質)である³⁾。該実験書が書かれた当時とは環境安全に対する認識も異なり、使用する場合は細心の注意が必要である。最近の教科書^{4), 5)}では四塩化炭素に変えてヘキサンを使用した実験例があるが、著者が追試したところ、ヘキサンへのアジピン酸ジクロリドの溶解度が低いのが原因と思われるが、四塩化炭素に比べて、紡糸の際に切れやすくなる現象が見られた。うまく重合させるためには、不溶分を除いた上澄み液を使い、同じ速度でゆっくり引っ張り上げるなどのスキルが必要であった。またヘキサンの被爆限界は50ppmと四塩化炭素に比べて10倍大きいのが、生殖毒性で区分2に分類されている点には注意すべきである(表1、No. 2参照)。

そこで著者は、学生実験として、よりリスクの低い有機溶媒を使って、四塩化炭素を使った場合と同様にナイロン 66がうまくできる有機溶媒・合成条件を探索した。

2. 実験

本実験は二層系の界面重合であり、有機層にナイロン 66の片方の成分であるアジピン酸ジクロリドを溶かし(A液)、水層(2.5% aq. NaOH)にもう片方の成分であるヘキサメチレンジアミンを溶かす(B液)。

A液とB液をゆっくり合わせると、界面で重合反応が始まり、副生する塩酸がアルカリ水溶液中で中和されてナイロン66が生成する(図1)。

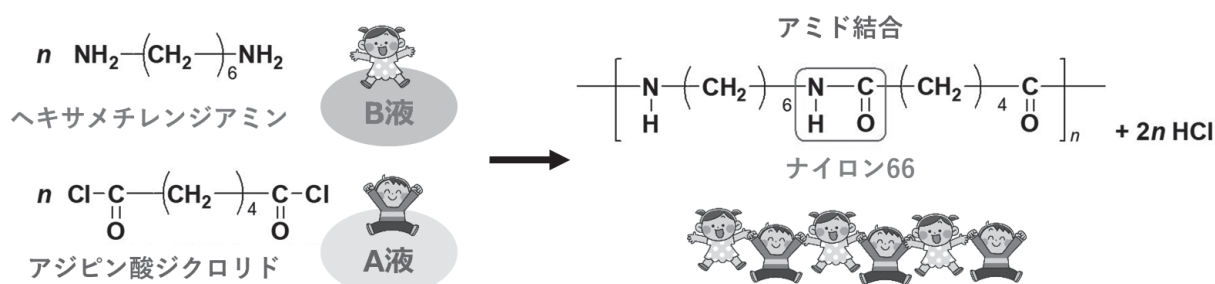


図1. ナイロン66の合成反応

代表的なナイロン66の合成実験として、(1) 四塩化炭素 (d=1.58) を有機層に用いる場合と (2) m-キシレン (d=0.86) を有機層に用いる場合の手順を紹介する。有機層と水層の比重の違いから、前者は有機層(四塩化炭素層)が下になり、後者は有機層(m-キシレン層)が上になる(図2)。実験操作はドラフト内で行う。

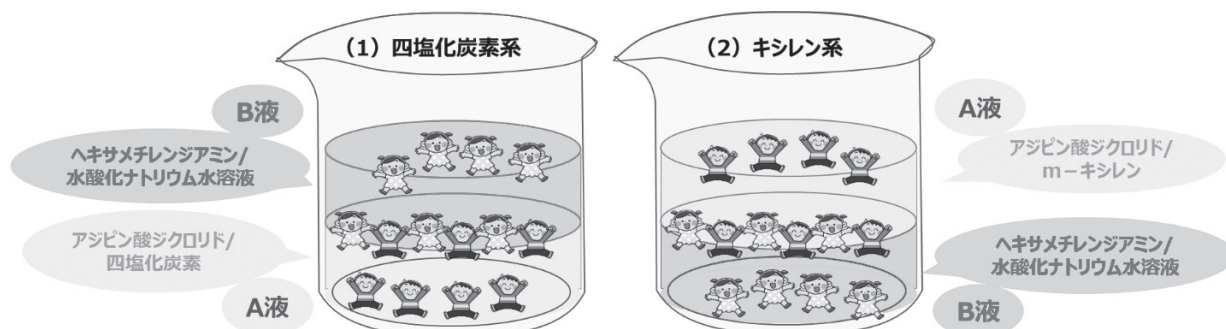


図2. ナイロン66の合成における(1) 四塩化炭素系と(2) キシレン系の違い

(1) 四塩化炭素を有機層に用いた反応

【試薬】 アジピン酸ジクロリド (0.5 mL, 0.625 g, 3.41 mmol, d=1.25, mw=183.030)、四塩化炭素 (20 mL, d=1.58)、水酸化ナトリウム (0.5 g)、ヘキサメチレンジアミン (0.5 mL, 0.420 g, 3.61 mmol, d=0.84, mw=116.208)、エタノール

【器具】 ビーカー (100 mL x 2)、ガラス棒、ピンセット、ピペット、メスシリンダー、巻取り用ビーカー、薬さじ、キムタオル、ろ紙

【試薬調整】

A液: 100 mLのビーカーに四塩化炭素20 mLを入れ、これにアジピン酸ジクロリド0.5 mLを加えて溶解させる

B液: 100 mLのビーカーに水酸化ナトリウム0.5 gを量り取り、蒸留水20 mLを加えて、ガラス棒でかき混ぜて溶解させる。該水酸化ナトリウム水溶液にヘキサメチレンジアミン0.5 mLを加えて溶解させる

【ナイロン合成】

- ① 比重の重いA液にB液を静かに加える。
- ② 2分間室温で静置する。
- ③ 界面付近に生成したナイロンをピンセットで取り出し、巻取り用ビーカーに巻きつける。

- ④巻きつけたビーカーをエタノールですすいだあと、水で洗浄し、キムタオルで水分を取り、ろ紙に挟んで自然乾燥させる（エタノール洗、水洗する前のナイロンの糸には反応液がついているので、手で触らないこと）

【フローチャート】

四塩化炭素溶媒を使った場合のナイロン66の合成フローチャートを図3に示す。

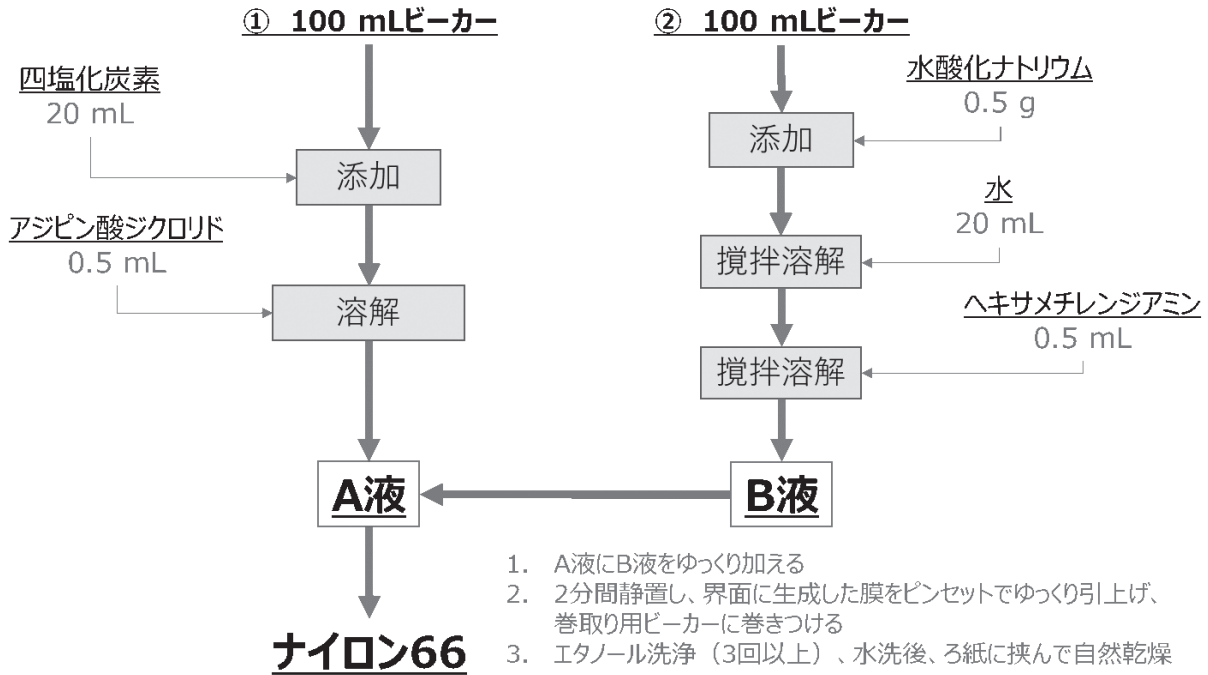


図3. 四塩化炭素溶媒を使ったナイロン66合成フローチャート

(2) m-キシレンを有機層に用いた反応

【試薬】 アジピン酸ジクロリド (0.5 mL, 0.625 g, 3.41 mmol, $d=1.25$, $mw=183.030$)、m-キシレン (20 mL, $d=0.86$)、水酸化ナトリウム (0.5 g)、ヘキサメチレンジアミン (0.5 mL, 0.420 g, 3.61 mmol, $d=0.84$, $mw=116.208$)、エタノール

【器具】 ビーカー (100 mL x 2)、ガラス棒、ピンセット、ピペット、メスシリンダー、巻取り用ビーカー、薬さじ、キムタオル、ろ紙

【試薬調整】

A液：100 mLのビーカーにm-キシレン 20 mLを入れ、これにアジピン酸ジクロリド 0.5 mLを加えて溶解させる

B液：100 mLのビーカーに水酸化ナトリウム 0.5 gを量り取り、蒸留水 20 mLを加えて、ガラス棒でかき混ぜて溶解させる。該水酸化ナトリウム水溶液にヘキサメチレンジアミン 0.5 mLを加えて溶解させる

【ナイロン合成】

- ①比重の重いB液にA液を静かに加える。
- ②2分間室温で静置する。
- ③界面付近に生成したナイロンをピンセットで取り出し、巻取り用ビーカーに巻きつける。
- ⑤巻きつけたビーカーをエタノールですすいだあと、水で洗浄し、キムタオルで水分を取り、ろ紙に挟んで自然乾燥させる（エタノール洗、水洗する前のナイロンの糸には反応液がついているので、

手で触らないこと)。

【フローチャート】

キシレン溶媒を使った場合のナイロン 66の合成フローチャートを図4に示す。また、合成手順の写真を図5に示す。

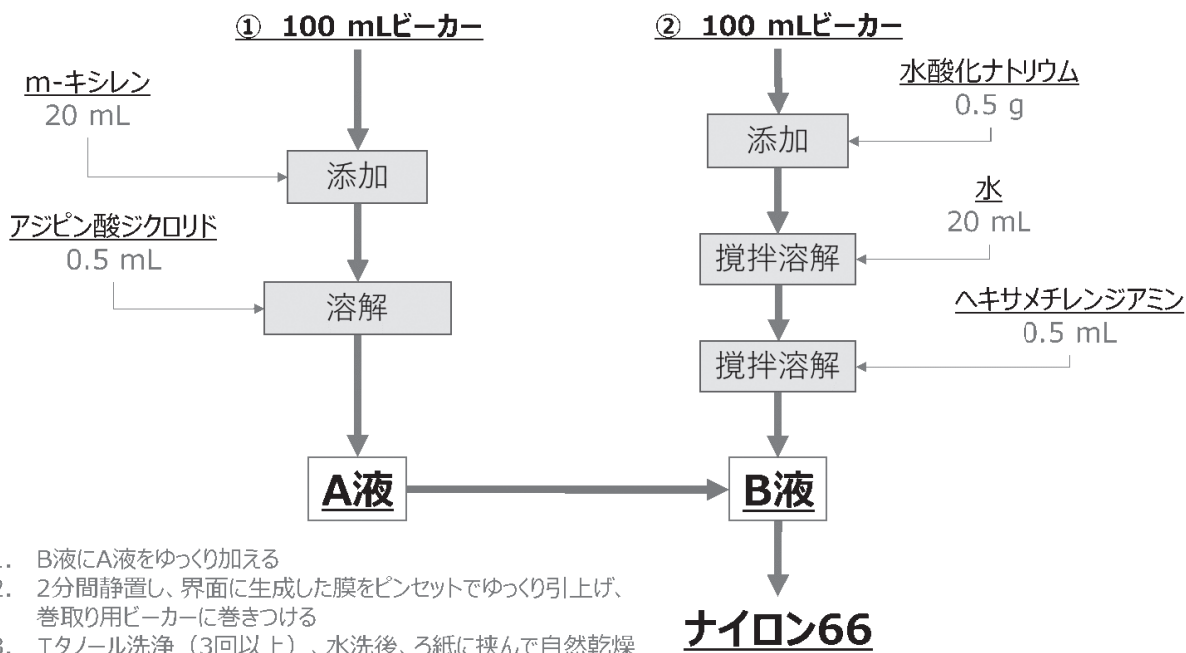


図 4. m-キシレン溶媒を使ったナイロン 66 合成フローチャート

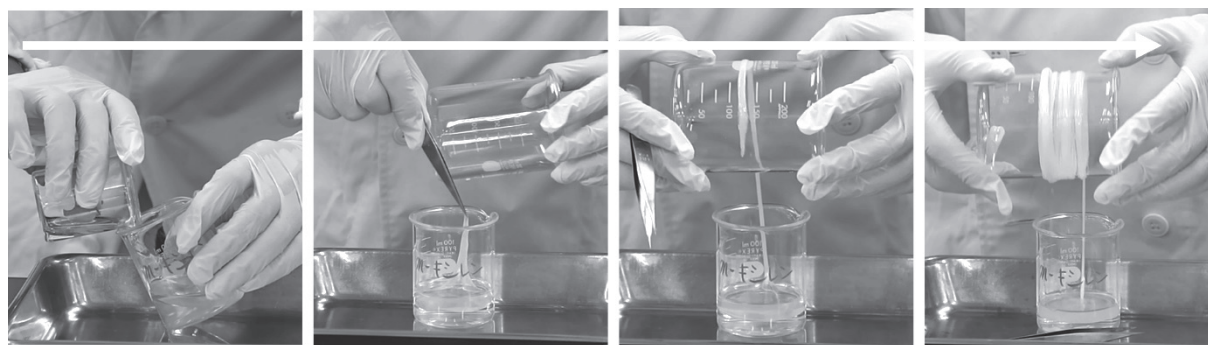


図 5. m-キシレンを使ったナイロン 66 の合成手順

3. 結果と考察

まず、四塩化炭素に代わる有機溶媒として可能性のあるものをいくつか選択してそれらの安全性データを調べた。四塩化炭素がナイロン 66の合成において優れている点は、疎水性が高く水と綺麗に分離することである。なおかつ極性のあるアジピン酸ジクロリドを溶かすために適度な極性を有する必要があると推察した。更に学生実験で使用するには、安全性に加えて汎用性があり安価に入手できる点も重要である。

候補としては表1に記載のヘキサンやヘプタンなどの脂肪族炭化水素系溶媒、トルエンやキシレンなどの芳香族炭化水素系溶媒、そしてジエチルエーテル、ジイソプロピルエーテルなどのエーテル系溶媒を選

択した。反応にはアルカリ水溶液が共存する為、加水分解の恐れのあるエステル系の溶媒は候補から外した。有機溶媒の安全性のポイントとしては、関東化学株式会社の安全性データシート (SDS)⁶⁾ と NITE (独立行政法人 製品評価技術基盤機構) の GHS 分類⁷⁾ を参照して、被爆限界、発がん性、生殖毒性の3点に着目した (区分については厚生労働省のホームページ参照⁸⁾)。また取扱上の危険性として沸点、引火点、自然発火温度を参考データとして記載する。

暴露限界に関しては、いずれの溶媒も四塩化炭素の5ppmに比べて4倍から100倍の許容度がある。発がん性については、四塩化炭素が区分1Bに分類されているが、他の溶媒については区分の記載はない (関東化学のSDSではキシレン (混合物) が区分2に分類)。これは、ガイダンスの改定により「区分外」が選択できなくなったため、現時点で明確な毒性が認められていないものには「分類できない」と記載されている。生殖毒性については、トルエンが区分1Aに、キシレンが区分1Bに分類されており、n-ヘキサン、p-キシレン、ジエチルエーテルが区分2に分類されている (関東化学のSDSではジイソプロピルエーテルが区分2に分類)。キシレンは混合物であり、o-, m-, p-キシレン以外に通常エチルベンゼンが含まれている。エチルベンゼンはマウスを使った動物試験から生殖毒性のリスクが報告されているために、エチルベンゼンを含むキシレンは2014年に区分1Bに再分類された経緯がある。p-キシレン単体については、明確ではないがリスクの可能性があり区分2とされた (関東化学のSDSではp-キシレンが区分1Bに分類)。o-, m-キシレンは現時点で、発がん性と生殖毒性に明確なリスクは確認されていない。また、キシレンはガソリンや灯油などにも含まれており⁹⁾、環境中にも存在するが、良分解性と判定されている。ただし、o-キシレンはm-及びp-キシレンに比べて大気中で生分解されにくい為、キシレンを実験に使うのであれば、健康面及び環境面からm-キシレンを使うのが良いだろう。

表 1. 各種有機溶媒の安全性データ抜粋 a

No	溶媒	暴露限界 ^b (ppm)	発がん性 区分 ^c	生殖毒性 区分 ^c	沸点 (°C)	引火点 (°C)	自然発火温 度 (°C)
1	四塩化炭素	5	1B ^d (2) ^e	- ^f (2) ^e	77	- ⁱ	- ⁱ
2	n-ヘキサン	50	- ^f	2 (2) ^e	69	-38	225
3	2-メチルペンタン	500	- ^f	- ^f	60	-29	265
4	n-ヘプタン	400	- ^f	- ^f	98	-1	204
5	石油エーテル	500	- ^f	- ^f	30-70	-18	246
6	トルエン	20	- ^f	1A (1A) ^e	111	5	480
7	キシレン (混合物)	100	- ^f (2) ^e	1B ^h (1B) ^e	140	25	- ⁱ
9	o-キシレン	100	- ^f	- ^f	144	27	464
10	m-キシレン	100	- ^f	- ^f	139	23	563
8	p-キシレン	100	- ^f	2 (1B) ^e	138	23	564
11	ジエチルエーテル	400	- ^f	2 (2) ^e	35	-45	160
12	ジイソプロピルエーテル	250	- ^g	- ^g (2) ^e	68	-28	405

a. 関東化学株式会社のSDS参照

b. 米国産業衛生専門家会議 (ACGIH) のTWA (Time-Weighted Average) 時間加重平均

毎日繰り返し曝露したときほとんどの労働者に悪影響がみられないような大気中の物質濃度の時間加重平均値で、通常、労働時間が8時間/日及び40時間/週での値。作業環境中で大気中の物質濃度は一日のうちに変動し得るが、TWAは濃度とその持続時間の積の総和を総時間数で割ったもの

c. NITE (独立行政法人 製品評価技術基盤機構) のGHS分類参照 (参照 2020-08-08)

発がん性 (生殖毒性) に対する区分 (厚生労働省のホームページから抜粋)

区分1A 人に対する発がん性 (生殖毒性) が知られている

区分1B 人に対しておそらく発がん性（生殖毒性）がある（動物での証拠）

区分2 人に対する発がん性（生殖毒性）が疑われる

- d. 発がん性区分見直し：2→1B（2018年）
- e. （ ）内は関東化学株式会社のSDS記載の分類
- f. ガイダンスの改定により「区分外」が選択できなくなった。明確な毒性が認められない場合など「分類できない」に区分
- g. データ不足のため分類できない（参考データでは明確な毒性は認められない）
- h. 工業用キシレンに含まれるエチルベンゼンの生殖毒性から1Bに分類（2014年再分類）
- i. データなし

有機溶媒の種類を変えてナイロン66の合成実験を行った結果を表2に示す。反応の良し悪しについては、①アジピン酸ジクロリドの溶解状況、②界面での反応状況（成膜状況）、③引張った時の紡糸状況を観察した。即ち、反応がスムーズに進むためには、まず有機層にアジピン酸ジクロリドが均一に溶解する必要があるが、n-ヘキサンなどの炭化水素系溶媒にはあまり溶解せず溶け残りが見られた（No. 2, 4, 5）。また引き続き、界面での反応状況を観察したところ、炭化水素系溶媒においてオリゴマー（或いはアジピン酸ジクロリドが単に分解したアジピン酸）のようなモヤモヤとした浮遊物が見られた（図6左図参照）。また、引張った時の紡糸状況では不安定で切れやすく、上手に紡糸するためには同じ速度でゆっくり引張るなどのスキルが必要であった。それと比較して、トルエンやキシレンなどの芳香族系溶媒では、アジピン酸ジクロリドが良く溶け、界面での反応状況ではしっかりした均一な膜の生成がみられた（図6右図参照）。更に、引張った時の紡糸状況は四塩化炭素やn-ヘキサンの時よりも安定しており、切れることなく連続的に糸を取出すことができた（No. 6, 7, 9）。しかし、ジイソプロピルエーテルを使った場合は、アジピン酸ジクロリドを良く溶かすものの、界面に均一な膜ができず引張っても途中ですぐに切れて紡糸ができなかった（No. 11）。また、ジイソプロピルエーテルはアルカリ水溶液と合わせた時にアルカリ水溶液が薄い赤褐色に変わった。エーテル自体はアルカリに安定と思われるが、安定剤として添加されているハイドロキノンなどが影響しているかも知れない（詳細は不明）。

界面で生成したナイロン66をピンセットで引張り上げた時の紡糸工程の様子を図7に示す。四塩化炭素（No. 1）をリファレンスとして比較すると、n-ヘキサンなどの脂肪族炭化水素溶媒（No. 2, 4, 5）は膜が薄く、ビーカーの壁面に張付いて紡糸がスムーズに進まず途中で何度か切れてしまった。しかし、トルエンやキシレンのような芳香族炭化水素系溶媒では界面から途切れることなくスムーズに重合物を取出すことができた（No. 6, 7, 9）。特に、キシレンを使った場合（No. 7, 9）は生成した膜がビーカーの壁面に張付くことなく真ん中からまっすぐに連続して糸を取出すことができた。ジイソプロピルエーテルでは直ぐに糸が切れてしまった（No. 12）。

有機溶媒と水溶媒を使う二層系の界面重合反応の良し悪しを決めるファクターとして、有機溶媒と水との親和性がポイントになると思われる。即ち、有機溶媒の疎水性が高いほど水との親和性が低く、それぞれの溶媒に溶けている試薬がお互い混ざりあわず、反応点は界面のみとなり、副反応が抑えられ、目的とする重合反応がスムーズに進むと考えられる。特に有機溶媒に溶解させるアジピン酸ジクロリドは不安定で加水分解を受けやすい試薬であり、有機溶媒の疎水性が低く水への親和性が高いと加水分解が促進され重合反応が阻害されると考えた。それぞれの有機溶媒のn-オクタノール/水分配係数¹⁰⁾を疎水性の指標として比較すると（表2）、四塩化炭素の2.64に対して、n-ヘキサンが3.90、n-ヘプタンが4.66と脂肪族炭化水素は高い疎水性を示す。トルエンやキシレンも四塩化炭素より疎水性が高く、分配係数は2.73～3.20である。それに比べて、ジイソプロピルエーテルは1.52と疎水性が低く相対的に水との親和性が高いことが分かる。即ち、ジイソプロピルエーテルの場合は副反応である加水分解反応が優先し、目的のナ

イロン 66への重合反応がうまく進行しなかったと思われる。

疎水性の点からは脂肪族炭化水素系溶媒が、本反応に好ましいと考えられるが、これらは疎水性が高すぎて、試薬であるアジピン酸ジクロリドの溶解度が低く十分な基質濃度が得られない。そのため、溶け残ったアジピン酸ジクロリドが界面に析出して加水分解が優先し、副生したアジピン酸或いはナイロンのオリゴマーが重合を邪魔しているのではないだろうか。それに対して疎水性と高いアジピン酸ジクロリドの溶解度の両方の性質を併せ持つ芳香族炭化水素系溶媒が本反応に適していると言える。

表 2. 各種溶媒中でのナイロン 66 の反応状況まとめ

No	溶媒	n-オクタノール/ 水分配係数 ^a	アジピン酸ジクロ リドの溶解状況 ^b	界面での反応 状況 ^c	引張った時の 紡糸状況 ^e	価格 ^f (円)
1	四塩化炭素	2.64	○	○	○	2,000
2	n-ヘキサン	3.90	△	△	△	900
3	2-メチルペンタン	データなし	-	-	-	18,600
4	n-ヘプタン	4.66	△	△	△	2,100
5	石油エーテル	データなし	△	△	△	1,100
6	トルエン	2.73	○	○	○	800
7	キシレン (混合物)	データなし	○	○	◎	1,100
8	o-キシレン	2.77	-	-	-	2,300
9	m-キシレン	3.20	○	○	◎	2,000
10	p-キシレン	3.15	-	-	-	2,100
11	ジエチルエーテル	0.89	-	-	-	2,400
12	ジイソプロピルエーテル	1.52	○	× ^d	×	1,400

a. 関東化学株式会社のSDS参照

b. 溶媒20mLにアジピン酸ジクロリド1mL添加した時の溶解状況 (目視)

○：完全溶解、△：未溶解分確認、-：実験未実施

c. 反応初期の界面での反応状況

○：界面に均一な膜が作成、△：界面にできる膜は不均一、×：膜ができない、-：実験未実施

d. アルカリ水溶液が薄い赤褐色に変色した

e. 膜を引っ張り上げた後にビーカーに巻きつける時の紡糸状況

◎：切れずに均一に紡糸できる、○：切れずに紡糸できる、△：切れやすく紡糸にコツがいる、
×：すぐに切れて紡糸できない、-：実験未実施

f. 500mLでの一般販売価格 (関東化学工業株式会社、2-メチルペンタンのみ東京化成工業株式会社)

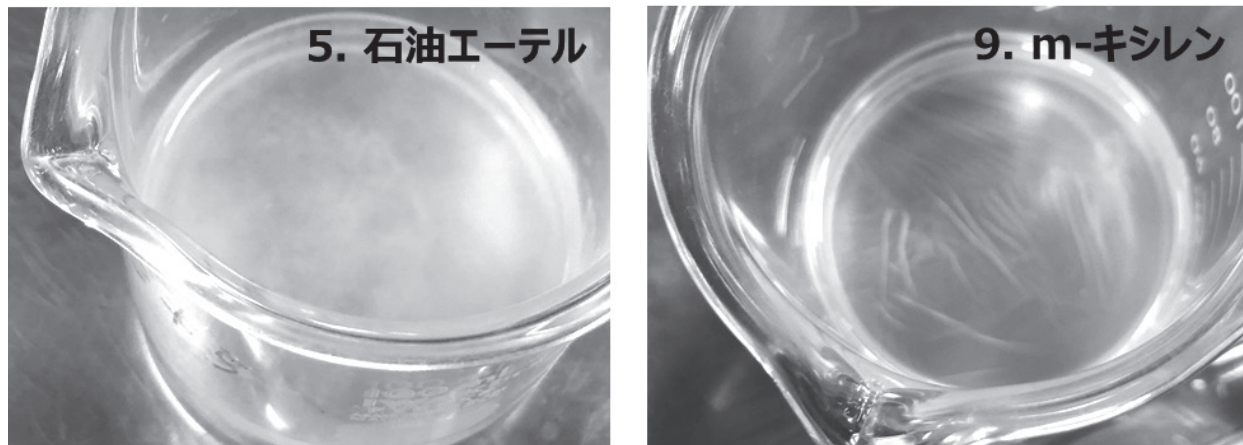
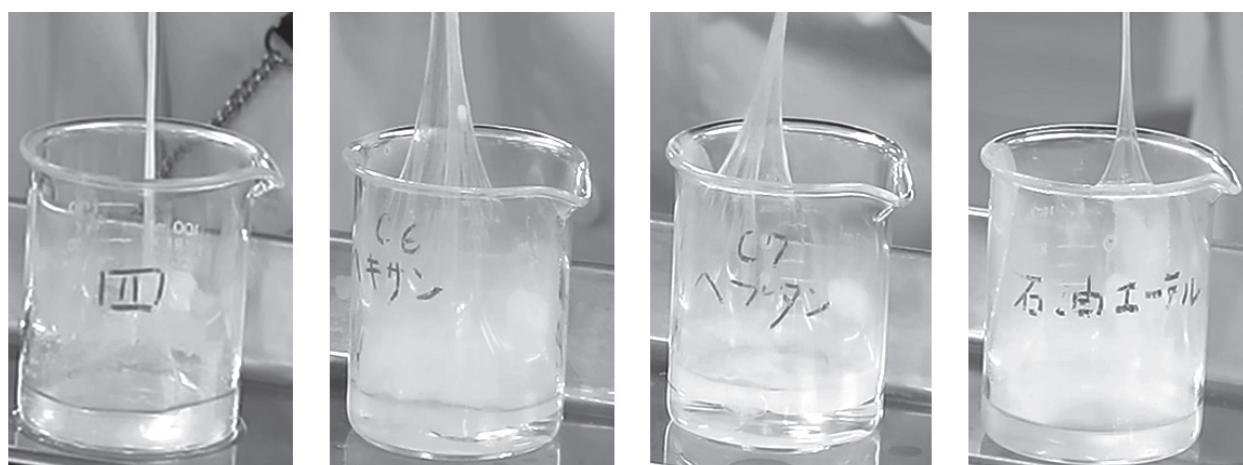


図6. 石油エーテルと m-キシレンを使った場合の界面での反応状況比較



1. 四塩化炭素

2. n-ヘキサン

4. n-ヘプタン

5. 石油エーテル



6. トルエン

7. キシレン

9. m-キシレン

12. ジイソプロピルエーテル

図7. 各種溶媒を使ったナイロン66の紡糸状況

4. まとめ

大学での繊維学実験の教育において、ナイロン66の合成実験は、単分子が重合して繊維ができる過程が観察でき、学生の興味を引くものである。当初、四塩化炭素を用いること²⁾で簡便に合成されていたが、四塩化炭素の発がん性への懸念から、よりリスクの少ない有機溶媒を使う可能性を探った。近年の教科書

には四塩化炭素に変えてn-ヘキサンを使う処方が紹介されている⁴⁾。追試したところ、四塩化炭素を用いる処方と比べて紡糸時に切れやすい欠点があった。また、n-ヘキサンは、発がん性は見られないが、生殖毒性で区分2に分類されている。学生実験では少量かつ短時間の使用であり、ドラフト内で行うことで問題ないと思われる。有機溶媒を極端に恐れるのではなく、危険性を十分理解し正しい取り扱い方法を学ぶのが繊維学実験の目的のひとつであろう。しかし、可能であれば、少なくとも、発がん性及び生殖毒性がみられない有機溶媒を選択すべきである。特に当校は女子大であり女子学生が実験するにあたり、生殖毒性の懸念がある有機溶媒を扱うことは避けるべきと考える。

ナイロン66の合成に、炭化水素系溶媒を使うのであればn-ヘキサンよりはn-ヘプタン或いは石油エーテルを使うべきであろう(但し、n-ヘプタンはn-ヘキサンと比較して分配係数が大きく、疎水性が高いため、アジピン酸ジクロリドの溶解度はより低い)。同じ系統の溶媒でも、炭素数がひとつ違ったり、異性体になると危険性が大きく変わることを留意しておく必要がある。2-メチルペンタン(イソヘキサン)でも良いが、溶媒価格がn-ヘプタンの10倍近くすることを考えると実用的ではない。本研究を通じて、紡糸の安定性から、キシレン溶媒が優れていることが分かった。キシレンはガソリンや接着剤、塗料にも使われており、比較的身近な溶媒である。キシレンには異性体があり、p-キシレンやエチルベンゼンを含むキシレン(混合物)は生殖毒性が懸念されるが、m-キシレンであれば比較的风险は低いと思う。とはいえ、キシレンはアセトンやメタノールと同じ有機溶剤中毒予防規則の対象となる第2種有機溶剤であり、長期的影響により水生生物に有害であることが分かっている。大気中への発散だけでなく、排水への漏出には十分注意を要する。即ち、後処理では、エタノール洗浄を複数回洗い、十分キシレンを除いてから水洗し、乾燥はドラフト内で行うなどの配慮も考えるべきである。近年は、健康や安全に対する人々の意識向上もあり、有機溶媒に対する見方が厳しくなっている。過去には特別な注意を払わずに使っていた有機溶媒が今日では危険性が明らかになり使用制限されるケースが増えている。ナイロン66の合成における四塩化炭素のように、リスクがあるので実験をやらないという選択は簡単だが、何が危険なのか、使い方を工夫することで危険が回避できないか、或いは、四塩化炭素を使わないで実験ができないかなど創意工夫をすることも大切だと思う。今後とも、健康や安全のリスクのある学生実験については積極的に改善を考えていきたい。

5. 参考文献

1. 村木俊夫. ポリアミド. 高分子. 1978, vol. 27, no. 3, p. 201. https://www.jstage.jst.go.jp/article/kobunshi1952/28/5/28_5_342/_pdf/-char/ja, (参照 2020-08-20).
2. 被服材料実験書. 石川欣造編. 同文書院, 1998, p67-69, ISBN 4-8103-1104-X.
3. 環境安全研究管理センター. “特定化学物質”. 大阪大学. <http://www.epc.osaka-u.ac.jp/pdf/sagyoukannkyou.pdf>, (参照 2020-08-08)
4. 衣料材料学実験. 松梨久仁子・平井郁子編. 2018, p. 85-87, ISBN 978-4-254-60634-8.
5. “13. ナイロン66合成”. <http://www.sci.keio.ac.jp/gp/2E73001A/A14E491F/1C836CFC.pdf>, (参照 2020-08-20).
6. 安全性データシート(関東化学(株)):
 - 四塩化炭素: <https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/07140.pdf>
 - n-ヘキサン: <https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/18041.pdf>
 - 2-メチルペンタン(イソヘキサン): <https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/25311.pdf>
 - n-ヘプタン: <https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/18005.pdf>
 - 石油エーテル: <https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/32065.pdf>

トルエン：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/40180.pdf>

キシレン：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/46004.pdf>

o-キシレン：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/46005.pdf>

m-キシレン：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/46006.pdf>

p-キシレン：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/46007.pdf>

ジエチルエーテル：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/14134.pdf>

ジイソプロピルエーテル：<https://www.j-shiyaku.or.jp/pdf/public/sds/015/32463.pdf>

7. 化学物質管理. 「政府によるGHS分類結果」の全対象物質の危険有害性区分一覧表”. Nite 独立行政法人 製品評価技術基盤機構. 2020-07更新. https://www.nite.go.jp/chem/ghs/ghs_download.html, (参照 2020-08-16)
8. “有害性の観点からの化管法対象物質の見直し”. 厚生労働省. <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2007/10/dl/s1029-81.pdf>, (参照 2020-08-16)
9. “CERI有害性評価書 キシレン”. 財団法人化学物質評価研究機構. 2006-03-01. https://www.cerij.or.jp/evaluation_document/yugai/1330_20_7.pdf, (参照 2020-08-20)
10. 木曾祥秋, 平野智巳, Yong-Jun Jung. 簡単なlog P測定法による高疎水性有機化合物のlog P値の評価. 学会誌「EICA」. 2008, vol. 13, no. 2-3, p. 69-72.
http://eica.jp/search/browse.php?file=a_13_2_69.pdf&id=683, (参照 2020-08-21)
11. “有機溶剤を正しく使いましょう”. 厚生労働省・都道府県労働局・労働基準監督署. 2012-08.
<https://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/anzen/dl/120815-01.pdf>, (参照 2020-08-21)

6. 謝辞

繊維学実験の授業におけるナイロン66の合成実験だけでなく、本研究の趣旨を理解し快く実験に協力していただいた、服飾美術学科 被服材料研究室の白井菜月先生に心より感謝いたします。