

非水系洗浄における固体粒子汚れの洗浄性・汚染性 —二成分溶剤系の影響—

渡 辺 紀 子

(関東学院女子短期大学)

平成8年7月5日受理

Detergency and Soiling of Solid Particles in Non-Aqueous Cleaning Processes —Effects of the Binary Solvent System—

Noriko WATANABE

Kanto Gakuin Women's Junior College, Kanazawa-ku, Yokohama 236

Soiling and desoiling properties of particulate soil ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) to polyester staple fibers in the binary solvents of petroleum and various alcohols have been investigated in an incubator with weak mechanical oscillation at 20°C.

The main results obtained are summarized as follows:

1) In the single solvent system, the degree of removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ decreased in the order of ethyl alcohol > tetrachloroethylene > *n*-undecane > *n*-heptane > *n*-hexane.

2) In the binary solvent system (*n*-heptane/ethyl alcohol or *n*-undecane/*n*-octyl alcohol), the degree of removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ increased remarkably with a *ca.* 5% alcohol content and similar results were obtained with the addition of surfactant (Aerosol OT) to petroleum solvent.

Therefore, it was suggested to save added surfactant in non-aqueous cleaning with petroleum/alcohol binary solvents.

3) Soiling properties were affected by the component of solvent and the deposition of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ on polyester fiber decreased with a *ca.* 5% alcohol content in the solvent.

4) In the binary solvents of *n*-undecane and various alcohols, the deposition of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ decreased in the order of ethyl alcohol > *n*-propyl alcohol > *n*-butyl alcohol > *n*-octyl alcohol.

(Received July 5, 1996)

Keywords: non-aqueous cleaning 非水系洗浄, staple fiber 単繊維, binary mixture solvent 二成分混合溶剤, petroleum solvent 石油系溶剤, alcohol solvent アルコール溶剤, hydrated iron (III) oxide 水和酸化鉄 (III).

1. 緒 言

従来、非水系洗浄では、塩素系、フッ素系、石油系の溶剤が衣料用として使用されてきた。しかし、フッ素系溶剤は環境保全の立場から使用禁止となり、また、塩素系溶剤も地下水汚染の問題から厳しい規制の対象にあるなど、環境負荷が少なくかつ安全性の高い代替溶剤が必要とされている。

非水系洗浄では、水系洗浄と比べて水溶性汚れの除去と共に粒子汚れの再付着が問題視されている。一般に被洗物と溶剤との同浴洗浄系における正味の洗浄力

は、汚れの脱着量と再付着量との差に依存するため、特に、有色粒子汚れの再付着量を軽減することは、見掛けの洗浄力の増大となる。

著者はすでに平衡論的立場から、非水系における単繊維への固体粒子の付着性を各種溶剤を用いた界面活性剤添加濃度の影響について検討した結果、炭素数が11以下の*n*-アルカン系や塩素系などの非極性溶剤と比べて、アルコールなどの極性溶剤中での粒子汚れの付着が極端に少ないことを確認した(渡辺と矢部1992a, b; 渡辺1994)。また、一連の*n*-アルカン系

の溶剤のうち、*n*-ヘプタン (C₇) と *n*-テトラデカン (C₁₄) との混合溶剤系において、*n*-テトラデカンを 30% 以上混合することにより付着量に著しい低下を認めた。しかし、沸点の高い *n*-テトラデカンを使用することは、実用的には衣料品の乾燥面等において問題があり、取り扱いやすかつ安全な溶剤の検討が残されていた。

そこで、本研究では石油系およびアルコール系溶剤を中心に、ポリエステル単繊維に対する粒子汚れの洗浄性および汚染性の立場から、効果的な混合溶剤組成について検討した結果、若干の知見を得たので報告する。

2. 実験方法

(1) 試料

1) 固体粒子

水和酸化鉄 (Ⅲ) (Fe₂O₃·H₂O) を用いた。形状は球形であり、平均粒子径は 0.7~1.0 μm、密度は 4.1 g/cm³ であった。

2) 溶剤

石油系溶剤として、*n*-ヘキサン (C₆)、*n*-ヘプタン (C₇)、*n*-ウンデカン (C₁₁)、アルコール系として、エチルアルコール (C₂)、*n*-プロピルアルコール (C₃)、*n*-ブチルアルコール (C₄)、*n*-オクチルアルコール (C₈)、および塩素系としてテトラクロロエチレンの以上 8 種類の溶剤を用いた。溶剤の物性 (値) を Table 1 に示す。いずれも試薬特級をそのまま実験に供した。

今回用いた石油系溶剤とアルコール系溶剤との相容性は、いずれの混合比率においても良好であり、相分離が生じないことを確認のうえ実験を行った。

3) 単繊維

円形の断面をもつポリエステル単繊維を用いた。繊維断面の直径は 25.0 μm、平均繊維長は約 60 mm であった。また、繊維を円筒形と仮定して試算した単位外部表面積当たりの繊維重量は 8.63 g/m² であった。精練は、前報 (渡辺 1994) と同様に行った。

4) 界面活性剤

東京化成 (株) の純度 95% であるジオクチルスルホハク酸ナトリウム (商標名 Aerosol OT, 以下 AOT と略す) の試薬をそのまま用いた。

(2) 洗浄実験

1) 汚染繊維の調製

50 ml の共栓付きガラス瓶に Fe₂O₃·H₂O 粒子 5 mg とポリエステル単繊維 20 mg とを精秤し、105 °C で 3 時間乾燥したのち、*n*-ヘキサン 20 ml を入れ、試料瓶を動かしながら超音波を 10 秒間照射する。ただちに汚染繊維を同浴ですすいだのち、濾紙上で脱液し、105 °C で再度乾燥したものを試料とした。汚染繊維 20 mg 試料の Fe₂O₃·H₂O 粒子付着量の平均は、繊維 20 mg (23.2 cm²) あたり 0.930 mg、標準偏差は 0.026 であった。

2) 洗浄方法

50 ml の共栓付きガラス瓶 (35 mm φ × 80 mm) に溶剤 20 ml を入れたのち、さらに精秤後の汚染繊維 20 mg を入れ、恒温振盪機 (Taiyo Incubator M-I 型) により 20 °C、120 rpm の機械力で 1 時間および一部 24 時間の洗浄を行った。洗浄効果 (脱落率) は、次式により求めた。

$$\text{脱落率 (\%)} = \{(A-B)/A\} \times 100$$

A: 洗浄前 Fe₂O₃·H₂O 付着量 (mg), B: 洗浄後 Fe₂O₃·H₂O 付着量 (mg)。

Table 1. Properties of solvents (20 °C) (Ishibashi 1967; Chemical Society of Japan 1993; Editorial Board of Chemical Dictionary 1963)

Solvents		Density (g/cm ³)	Viscosity (cP)	Boiling point (°C)
<i>n</i> -Hexane	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	0.659	0.32	68.7
<i>n</i> -Heptane	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	0.684	0.41	98.4
<i>n</i> -Undecane	CH ₃ (CH ₂) ₉ CH ₃	0.741	—	195.9
Ethyl alcohol	CH ₃ CH ₂ OH	0.791	1.22	78.3
<i>n</i> -Propyl alcohol	CH ₃ (CH ₂) ₂ OH	0.805	2.26	97.2
<i>n</i> -Butyl alcohol	CH ₃ (CH ₂) ₃ OH	0.811	2.96	117.7
<i>n</i> -Octyl alcohol	CH ₃ (CH ₂) ₇ OH	0.830	8.93	195.2
Tetrachloroethylene	CCl ₂ =CCl ₂	1.631	0.88	121.1

(3) 汚染実験

洗浄実験と同種のガラス瓶に一定量の $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子、ポリエステル単繊維 17.3 mg (外部表面積 20 cm^2 相当) および溶剤 20 ml を入れる。超音波を 10 秒間照射し、粒子を分散させたのち、恒温振盪機で 120 rpm, 20℃, 48 時間の振盪を行い平衡付着量とした。

(4) 粒子付着量の定量法

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の粒子付着試料は、約 2 N の塩酸水溶液 10 ml 中で加熱抽出をし、一定容量に希釈した。希釈水溶液中の Fe イオン濃度を、原子吸光光度計 (日立 170-30 形) により 248.3 nm で測定したのち、検量線から $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の粒子付着量を算出した。

3. 結果と考察

(1) 洗浄性

通常、チャージシステムにおける界面活性剤は、水溶性汚れの除去に必要な水の可溶化や再汚染防止の目的で 1~4% の高濃度で溶剤中に添加されている。この 1~4% チャージは、AOT では $2.25 \sim 9.00 \times 10^{-2}$ mol/l に相当する濃度である。

前報 (渡辺 1994) の界面活性剤添加系における $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子の汚染実験では、 2×10^{-4} mol/l 以上の AOT 濃度では汚染性に差が認められず、むしろ希薄 AOT 濃度領域に興味ある挙動が確認されている。そこで、本実験の洗浄実験においても希薄界面活性剤濃度領域を中心に検討することにした。すなわち、AOT 濃度を $0 \sim 2 \times 10^{-4}$ mol/l の 8 段階について、*n*-ヘプタン系における洗浄時間を 1 時間および 24 時間に関して検討した結果を Fig. 1 に示す。 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 汚染ポリエステル単繊維を用いた 1 時間および 24 時間洗浄において、AOT 2.5×10^{-5} mol/l 付近よりほぼ脱落率が一定になり、それ以上の界面活性剤の添加においても脱落率において変化は認められなかった。また、24 時間洗浄の方が 1 時間洗浄より全体に高い脱落率が確認されたが、以下の実験では要因間の差を比較する必要上、洗浄時間を 1 時間に限定して検討を行うことにした。

次に、AOT 添加系における洗浄効果におよぼす溶剤の種類の影響について検討した。Fig. 2 は 5 種類の溶剤に対し、AOT を $0 \sim 1 \times 10^{-1}$ mol/l の 6 段階の濃度について、20℃, 1 時間洗浄後の粒子の脱落率変化を示した。 1×10^{-1} mol/l 前後の実用濃度に相当する AOT 添加濃度における各種溶剤の脱落率は、エチル

アルコール > テトラクロロエチレン > *n*-ウンデカン > *n*-ヘプタン > *n*-ヘキサンの順を示した。特に、AOT 無添加時の脱落率は、*n*-ヘキサン 35.7%, *n*-ヘプタン 37.0%, *n*-ウンデカン 44.3% であるのに対し、エチルアルコールでは 83.0% であった。以上の結果、石油系溶剤とアルコール系溶剤における粒子の脱落率に著しい差のあることが確認された。

そこで、AOT 無添加系におけるアルコールと石油系との混合溶剤の影響を検討するために、まず、*n*-ヘプタンとエチルアルコールとの両溶剤の各種混合容積

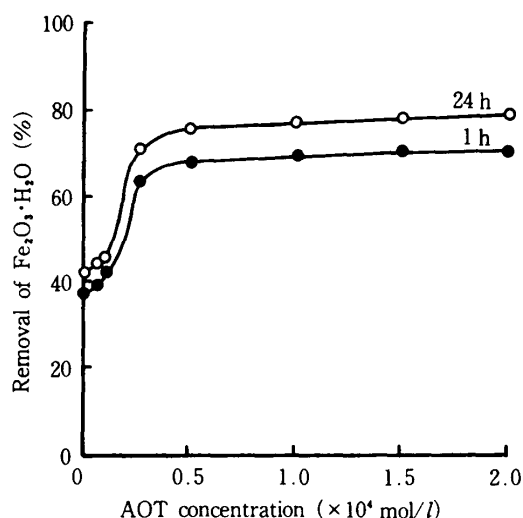


Fig. 1. The relationship between the removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and AOT concentration in *n*-heptane (20℃)

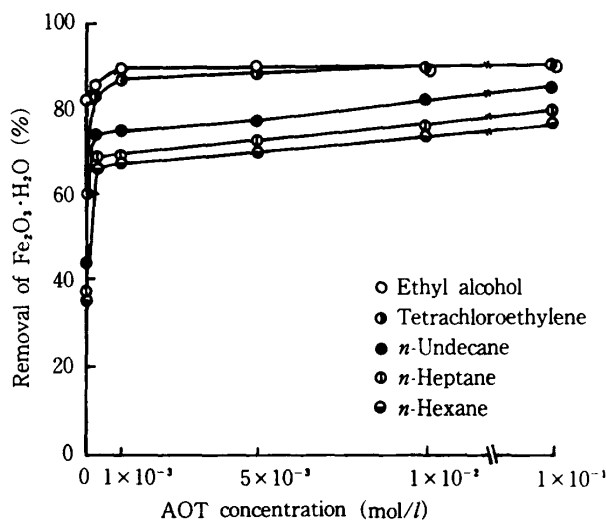


Fig. 2. The relationship between the removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and AOT concentration for various solvents (1 h, 20℃)

比における脱落率変化を Fig. 3 に示す。エチルアルコールの混合(比)率が0~5%の領域において、脱落率に著しい変化が認められた。しかし、5~100%のアルコール混合率では穏やかな増加傾向を示す程度であった。

次に、AOT の添加系における *n*-ヘプタン/エチルアルコール混合溶剤の影響について検討した。エチルアルコールの混合比を0, 10, 50, 100%の4種について、 $0 \sim 2 \times 10^{-3}$ mol/l の AOT 濃度領域における脱落率の結果を Fig. 4 に示す。10, 50, 100%のアルコールの混合溶剤においては、AOT のいずれの添加濃度においても脱落率に顕著な差は認められなかった。しかし、*n*-ヘプタン 100%の溶剤においてのみ、AOT を 5×10^{-5} mol/l 以上添加することにより、急激に脱落率が増加し、AOT の添加効果が認められた。

以上、*n*-ヘプタン溶剤においては、エチルアルコールを5%程度混合することにより、AOT を添加する以上に高い洗浄効果が認められた。

Fig. 5 は、*n*-ヘプタン/エチルアルコール系より沸点が高く、かつ沸点が互いに類似している溶剤として、*n*-ウンデカン (b.p.: 195.9℃) と *n*-オクチルアルコール (b.p.: 195.2℃) との混合溶剤系における脱落率の結果を示す。*n*-ウンデカンと混合した *n*-オクチルアルコール系は、Fig. 3 のエチルアルコール系と比べて幾分脱落率に増加が認められるものの同傾向を示した。この *n*-ウンデカン/*n*-オクチルアルコール系に

おいても、5%以上のアルコールを混合することにより、著しい脱落率の増加傾向が確認された。

(2) 汚 染 性

次に、汚染性の立場から混合溶剤の影響について検討した。正味の粒子汚れの脱落率を高めるためには、洗浴中における粒子の再付着の少ない系が望ましい。そこで、まず界面活性剤無添加系において、ポリエステル単繊維に対する付着量の少ない溶剤組成を検討す

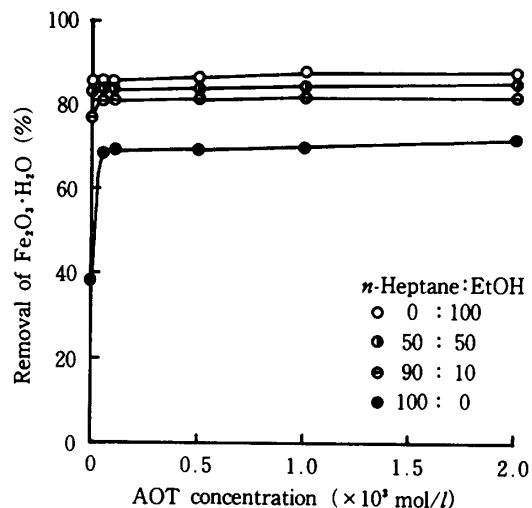


Fig. 4. The relationship between the removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and AOT concentration for *n*-heptane/ethyl alcohol mixture solvents (1 h, 20℃)

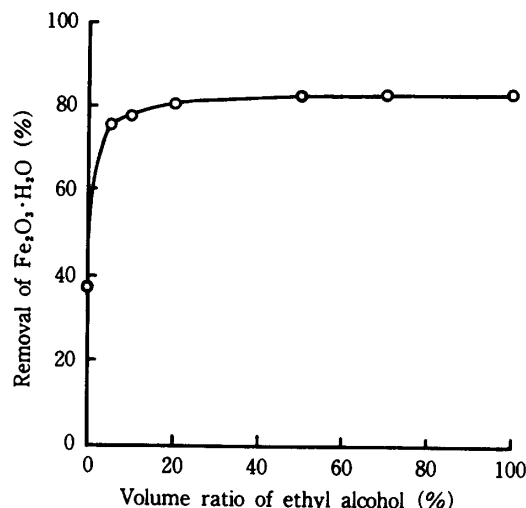


Fig. 3. The relationship between the removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and the volume ratio of alcohol in *n*-heptane/ethyl alcohol mixture solvents (1 h, 20℃)

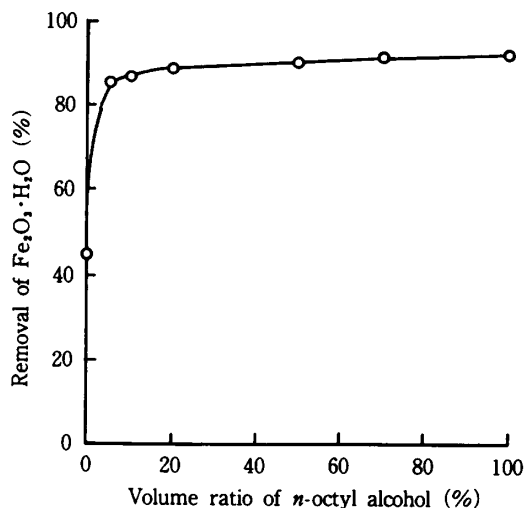


Fig. 5. The relationship between the removal of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and the volume ratio of alcohol in *n*-undecane/*n*-octyl alcohol mixture solvents (1 h, 20℃)

るため、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子浴濃度を 0.30 g/l として、20℃、48 時間の付着・脱着平衡実験を行った。

Fig. 6 は、*n*-ヘプタンおよび *n*-ウンデカンとエチルアルコールとの各種容積混合比における粒子付着量変化を示す。エチルアルコールの混合率を 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 100% の 12 段階について検討した。アルコールが 0～4% の混合溶剤中では急激に粒子付着量が低下しているが、5～20% の混合比では低下傾向は緩やかであり、20% 以上での変化は認められなかった。したがって、エチルアルコールを 5% 以上石油系溶剤に混合することにより、付着量は著しく減少した。

また、汚染系の Fig. 6 と洗浄系の Fig. 3 とを対比すると、汚染性の低い系では洗浄性が高く、逆の傾向を示す。このことは、汚染実験を通じて洗浄結果を推測できることを示唆している。

土井と松本 (1978) は、15 種の溶剤中における α - Fe_2O_3 粒子の沈降速度・沈降容積・粒子の凝集状態とセルロース繊維への汚染性について検討した結果、*n*-ヘキサン・四塩化炭素などの非極性溶剤に対して極性のアルコール系では粒子の分散性が良好であり、繊維への汚染性も低下することを明らかにしている。また、静止系ではあるが四塩化炭素/*n*-ブチルアルコールの二成分溶剤系における沈降速度の実験から、四塩化炭素に *n*-ブチルアルコールを少量添加することにより粒子の沈降速度が遅くなることを示し、これは、*n*-ブ

チルアルコールが粒子表面に吸着し浴中で安定化するためであると報告している。

この点から、本実験の石油系溶剤に対するアルコール系溶剤の添加効果は、親水性の表面をもつ $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子に対する極性のアルコールの寄与も一因であると考えられる。しかし、著者らは非極性溶剤である一連の *n*-アルカンを用いた $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子の汚染実験 (渡辺と矢部 1992 a, b; 渡辺 1994) において、炭素数が 11 以下と 12 以上の *n*-アルカンでは粒子の付着量に著しい差を生じ、*n*-ドデカン (C_{12}) や *n*-テトラデカン (C_{14}) ではアルコールと同程度の低い汚染性を示すことを確認している。このような系での汚染性は、粒子の表面特性以上に、粒子の分散安定性を左右する溶剤特性に多分に影響されたものと考えられる。したがって、今回の石油系溶剤に対するアルコールの添加効果は、粒子の表面特性および溶剤特性とが相互に影響した結果であると推測されるが、各要因の具体的な寄与などについては今後の問題としたい。

次に、アルコールの種類による影響をみるため、*n*-ウンデカンと 4 種のアルコールとの混合比における粒子付着量変化について調べた結果を Fig. 7 に示す。若干の差はあるにせよ、いずれのアルコールにおいても、5% 以上混合することにより付着量は著しく低下した。

アルコールの種類による粒子付着量の順は、エチルアルコール (C_2) > *n*-プロピルアルコール (C_3) > *n*-ブチルアルコール (C_4) > *n*-オクチルアルコール

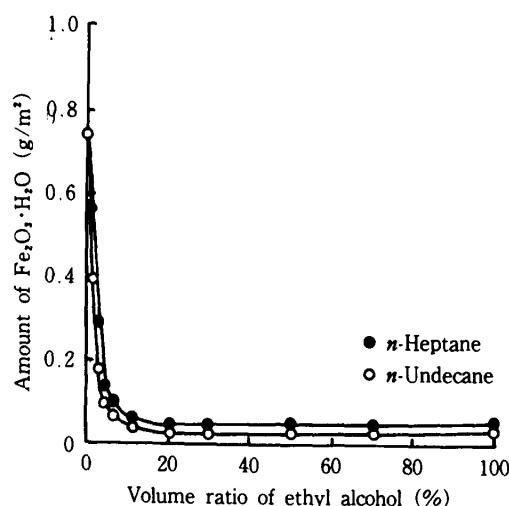


Fig. 6. The relationship between the amount of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and the volume ratio of alcohol in *n*-alkane/ethyl alcohol mixture solvents (48 h, 20℃)

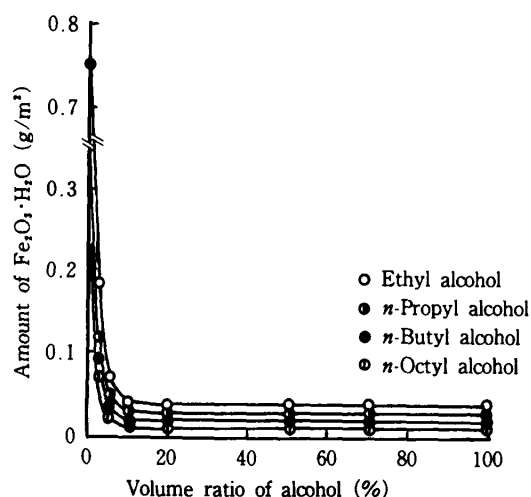


Fig. 7. The relationship between the amount of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and the volume ratio of alcohol in *n*-undecane/alcohol mixture solvents (48 h, 20℃)

(C₈)であり、分子量が増すにしたがい低下した。図より、沸点の類似している *n*-ウンデカンおよび *n*-オクタールアルコールとの混合溶剤が、4種のアルコール中において最も汚染防止効果の著しいことが確認された。

また、非水溶剤系に存在する固体粒子の界面電氣的な性質が、粒子や溶剤の種類、また界面活性剤の添加によっても異なり、分散安定性にも影響をおよぼすことが指摘されているが(北原と古沢 1979, 石渡 1961)、本実験の各溶剤系における Fe₂O₃·H₂O 粒子の ζ-電位の変化に関しては今後の検討課題としたい。

n-アルカン同士の混合溶剤中における Fe₂O₃·H₂O 粒子の単繊維への付着等温図に関してはすでに報告(渡辺と矢部 1992 a, b)しているが、次に、本実験の非極性および極性の二成分混合溶剤の場合の付着機構について検討した。

Fe₂O₃·H₂O の粒子濃度が 0.025~0.30 g/l の 5~6 段階について、*n*-ヘプタンに対するエチルアルコールの混合率を 0, 5, 10, 20, 50, 100 % についての付着等温図 (D_f - D_o 曲線) を Fig. 8 に示す。 D_f (g/m²) は付着平衡時における粒子の繊維相濃度、 D_o (g/l) は付着平衡時における粒子の汚染浴相濃度である。付着等温図においても *n*-ヘプタン 100% 溶剤に比べ、エチルアルコールを 5~100% 混合した溶剤では、平衡粒子付着量の低下が顕著であった。また、付着平衡における各粒子汚れの繊維相濃度 D_f と汚染浴相濃度 D_o を $1/D_f - 1/D_o$ に逆数プロットした結果を Fig. 9 に示す。いずれの混合溶剤においても、よい直線関係が

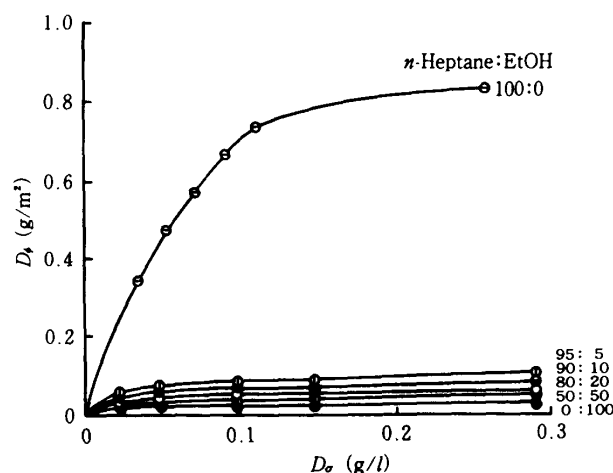


Fig. 8. Adhesion isotherm in *n*-heptane/ethyl alcohol mixture solvents (20°C)

得られた。したがって、本実験の非極性/極性混合溶剤中での付着系においても球形の Fe₂O₃·H₂O 粒子は、ラングミュア型の付着をしていることが確認できた。それぞれの直線のたて軸の切片から飽和付着量 S_f (g/m²) を、また直線の勾配と飽和付着量から平衡定数 K (l/g) を算出した結果を Table 2 に示す。飽和付着量は、エチルアルコールの混合率の増加により減少傾向が確認されるが、平衡定数にはアルコールの混合率による一定の傾向はみられなかった。

以上の実験を通じて、石油系溶剤とアルコール系溶剤との二成分混合溶剤は、粒子汚れの洗浄性・汚染性の立場から代替溶剤として効果的であることが示唆された。本実験では、系を単純化するために可溶化水が無添加とした系で行った。しかし、可溶化水が石油系/アルコール系の混合溶剤系においていかなる挙動を示すか、さらに界面活性剤添加系の影響に関しても今後

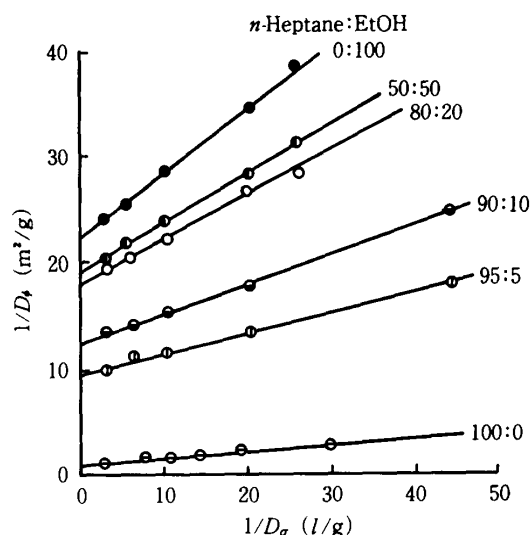


Fig. 9. Langmuir plot in *n*-heptane/ethyl alcohol mixture solvents (20°C)

Table 2. S_f and K of Langmuir isotherm in *n*-heptane/ethyl alcohol (20°C)

<i>n</i> -Heptane : ethyl alcohol	S_f (g/m ²)	K (l/g)
100 : 0	1.160	12.4
95 : 5	0.107	44.6
90 : 10	0.081	42.4
80 : 20	0.055	42.0
50 : 50	0.052	41.1
0 : 100	0.045	36.9

非水系洗浄における固体粒子汚れの洗浄性・汚染性

の検討課題としたい。

4. 要 約

ポリエステル単繊維および球形の $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 粒子を用いて、非水系洗浄における代替溶剤を検討するため、石油系およびアルコール系の混合溶剤を中心に洗浄性・汚染性の立場から実験を行い、次の結果を得た。

(1) 5種類の溶剤の粒子脱落率は、界面活性剤の添加の有無にかかわらず、エチルアルコール>テトラクロロエチレン>*n*-ウンデカン (C_{11})>*n*-ヘプタン (C_7)>*n*-ヘキサン (C_6) の順を示し、特に、界面活性剤無添加系においてもエチルアルコールは石油系に比較して高い脱落率を示した。

(2) 界面活性剤無添加系における石油系 ($\text{C}_7, \text{C}_{11}$)/アルコール系 (C_2, C_8) の各種混合溶剤中での粒子の脱落率は、アルコールを約5%混合することにより、界面活性剤の添加系と同等の洗浄効果を確認した。

(3) 界面活性剤無添加系における石油系 ($\text{C}_7, \text{C}_{11}$)/エチルアルコールの各種混合溶剤系における汚染実験においても、アルコールを約5%混合することにより、粒子付着量は著しく低下した。

(4) *n*-ウンデカン/*n*-アルコール ($\text{C}_2, \text{C}_3, \text{C}_4, \text{C}_8$) の混合系では、分子量の大きいアルコールほど、付着量の低下傾向のあることを確認した。

本研究は、平成6・7年度文部省科学研究費補助金総合研究(A)(研究代表者：多賀谷久子)の助成により行った。記して謝意を表する。本文の要旨は平成8年度の(社)日本家政学会第48回大会で発表した。

引 用 文 献

- 土井千鶴子, 松本恒隆 (1978) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒子の凝集性とセルロース繊維への汚染性, 家政誌, **29**, 162-168
- 石橋弘毅 (編) (1967) 溶剤便覧, 槇書店, 東京
- 石渡 孝 (1961) ドライクリーニングにおける活性剤の挙動 (Ⅲ) —固体汚垢の除去—(その1)—, コロイドと界面活性剤, **2**, 557-565
- 化学大辞典編集委員会 (編) (1963) 化学大辞典, 共立出版, 東京
- 北原文雄, 古沢邦夫 (1979) 分散・乳化系の化学, 工学図書, 東京, 154
- 日本化学会 (編) (1993) 化学便覧 基礎編 I, 丸善, 東京
- 渡辺紀子, 矢部章彦 (1992 a) 固体粒子の繊維基質への付着に関する研究 (第3報)—水和酸化鉄 (Ⅲ) 球形粒子の付着脱落平衡—, 油化学, **41**, 325-329
- 渡辺紀子, 矢部章彦 (1992 b) 固体粒子の繊維基質への付着に関する研究 (第4報)—各種単繊維に対する水和酸化鉄 (Ⅲ) 球形粒子の付着脱落平衡—, 油化学, **41**, 391-396
- 渡辺紀子 (1994) 非水系洗浄における固体粒子汚れの繊維への付着性—界面活性剤添加濃度の影響—, 家政誌, **45**, 633-638