

液晶パネル用ガラスのマテリアルフロー分析と含有塩素成分の環境影響評価

Material flow analysis of LCD glass and Environmental Impact Assessment of its chlorine component

○小谷健輔*¹⁾, 益永茂樹¹⁾

Kensuke KOTANI, Shigeki MASUNAGA

1) 横浜国立大学

*d09hf009@ynu.ac.jp

1. はじめに

液晶表示装置パネルに用いられるガラス(LCDG)には性能向上のために塩素(Cl)化合物が添加されている場合がある。他方、近年は環境にやさしいとしてハロゲンフリー製品を求めることが社会的な傾向となりつつあり、製品規格の面でも、国際電気標準会議(IEC)、日本電子回路工業会(JPCA)、米国電子回路協会(IPC)ではプリント基板を対象として、臭素(Br) 900 ppm以下、Cl 900 ppm以下、Br+Cl 1,500 ppm以下の閾値が設定されている。これらが動機づけとなり、電気電子(E&E)製品メーカーは製品中ハロゲンの削減を進めている。しかし、ハロゲン濃度は環境法に則って規制されている訳ではなく、各企業の環境方針で決定されているものである。その定義も様々であり、一部の企業は非常に非現実的な目標を掲げているように見受けられる。LCDGに含まれるCl濃度の低減要求もその一例と言えるかもしれない。このような低減あるいは非含有(ゼロリスク)要求に対し、科学に基づいた議論を展開するためには、環境リスク評価とライフサイクル評価を合わせた評価が必要だと筆者らは考えた。そこで本研究では、マテリアルフロー分析を用いて一般廃棄物として焼却されるLCDGの廃棄量を推定し(2.1節)、LCDG中Cl由来のダイオキシン類(DXN)生成量を推定し(2.2節)、その影響を損失余命で表現することで(2.3節)、この課題の評価を試みた。

2. 方法

2.1 マテリアルフロー分析を用いたLCDG廃棄量の推定

本研究では、LCDGの廃棄量を推定するためにマテリアルフロー分析を用いてE&E製品の廃棄量を把握した。大型E&E製品においては、既存の統計資料¹⁾から得られた毎年度の各製品の国内出荷台数に使用年数分布を乗ずることにより将来の使用済み台数を推定し(式(1)、(2)、(3))^{2,3)}、LCDGはすべて一般廃棄物として処理されると仮定し、使用済み量からリユース、海外輸出分を差し引いた値に、製品中LCDG重量を乗ずることによりLCDG廃棄量を推定した(式(4))。また、液晶パネルを使用している小型E&E製品の廃棄量は既存の研究データ⁴⁾を基に推計した。

$$W_t(y) = 1 - \exp[-\{y/y_{av}\}^b \times \{\Gamma(1+1/b)\}^b] \quad (1)$$

$$f_t(i) = W_t(i+0.5) - W_t(i-0.5) \quad (2)$$

$$U_{waste,t} = \sum \{U_{Shipment,t-1} \times f_t(i)\} \quad (3)$$

$$G_t = w \times \{U_{waste,t} \times (1-R)\} \quad (4)$$

($W_t(y)$): 累積の使用年数分布, y_{av} : 平均使用年数, Γ : ガンマ関数, b : 分布の幅を示すパラメータ, $f_t(i)$: i 年度に出荷された製品が t 年度に使用済みとなる割合, $U_{waste,t}$: t 年度における使用済み台数, $U_{Shipment,t}$: t 年度における国内出荷台数, G_t : t 年度におけるLCDGの廃棄重量, w : ガラス重量, R : リサイクル率及びリユース率)

2.2 LCDG含有Cl成分による一般廃棄物焼却場からのDXN排出量の推定

ハロゲンフリーを求められる原因がDXNの発生であることから、LCDG焼却によるDXN発生を環境影響評価の対象とする。廃棄物中Cl濃度とDXN排出濃度の関係に言及した研究報告は過去に多数あるが、統一的な見解は得られていない。最も包括的な報告⁵⁾では、Cl量がDXN濃度に及ぼす影響がどのようであれ、それは他の要因(排ガス処理条件、灰の化学的組成、燃焼条件、測定精度、局部流動等)の影響に比べるとはるかに小さい、とし、Cl濃度とDXN濃度との間に相関があるとは言えないと結論づけている。しかし、Cl濃度とDXN濃度との相関が観察されている文献^{6,7)}も多数存在することは事実である。これらを踏まえ、本研究では両ケースを考慮することとし、Cl濃度とDXN濃度に相関関係がない場合は「LCDG中Cl成分に起因するDXN類の生成はない」とし、相関関係がある場合は、相関関係の見られた焼却実験データについて回帰分析を行って、一般廃棄物焼却物へのLCDG混入率からLCDG由来のCl成分によるCl濃度増分を算出し、DXN排出量を推定することとした(式(5)、(6))。以下は、相関関係ありの場合の考察である。

$$\Delta DXN_{conc} = \frac{DXN_{conc}}{Cl_{conc}} \times \Delta Cl_{conc} \quad (5)$$

$$\Delta DXN_{emission} = \Delta DXN_{conc} \times Unit \times Mass \times 10^{-9} \quad (6)$$

(ΔDXN_{conc}): LCDG中Cl由来の排ガス中DXN濃度 [ng-TEQ/Nm³], DXN_{conc} : 排ガス中DXN濃度, Cl_{conc} : 廃棄物中塩素濃度, ΔCl : LCDG由来の廃棄物中塩素濃度, $\Delta DXN_{emission}$: LCDG由来のDXN排出量 [g/year], Unit: 排ガス量原単位 [Nm³/t], Mass: 焼却量 [t/year])

2.3 DXNの環境排出によるヒト健康影響の評価

本研究では、LCDG中CI由来のDXN排出量(以下、「排出量」と呼ぶ)に伴うDXN曝露量を推定するため、以下の3つの方法をとった。

- ① 近年の日本における食事由来のDXN摂取量はほとんど変化していないこと、および燃焼由来のDXN排出量と大気中DXN濃度とに関係が見られていることから^{8,9)}、現在の大気へのDXN排出は呼吸による曝露にのみ寄与すると仮定し、「排出量」から曝露量を推定。
- ② 近年の日本におけるDXN排出量と総曝露量(呼吸+土壌+食事)の関係^{8,9)}を利用して、「排出量」から総曝露量を推定。
- ③ 化学物質の動態予測シュミレーションモデル(MuSEM)¹⁰⁾を用い、「排出量」を入力データとして定常状態における総曝露量を推定。

さらに、推定した曝露量から発がんリスク及び損失余命を算出した(式(7)、(8))。

$$\text{Risk} = \text{DXN}_{\text{intake}} \times \text{SF} \quad (7)$$

$$\text{LLE} = \text{Risk} \times 12.6 \text{ years} \quad (8)$$

(Risk: LCDG中CI由来の発がん確率, $\text{DXN}_{\text{intake}}$: 2.3節の方法で推定したDXN曝露量, SF: DXNの発がんスロープファクタ¹¹⁾, LLE: LCDG中CI由来の損失余命, 12.6 years: 発がん一件あたりの損失余命年数¹¹⁾)

3. 結果

3.1 LCDG廃棄量の経年変化

LCDGの廃棄量は2005年度から2030年度までに、約1800から8000トン/年まで増加すると推定された。増分のほとんどは液晶テレビの廃棄増加に伴うものである。液晶テレビは国内に出荷されはじめてから10年ほどしか経っておらず、平均使用年数も長いことが、今後の廃棄量が増加傾向になる原因である(図1)。

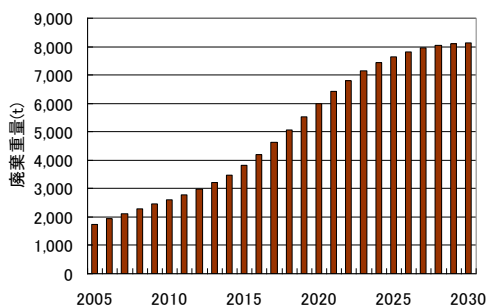


図1. LCDG 廃棄量の推定結果(t/year)

3.2 一般廃棄物焼却場から排出されるLCDG中CI由来のDXNによる損失余命

LCDGの廃棄量の増加に伴い、それらが一般廃棄物に混入する量も増加する。一般廃棄物焼却場から排出されるLCDG中CI由来のDXNもそれに伴って増加すると予想される。本研究では、2030年度の廃棄LCDG重量(8000トン/年)が一般廃棄物に混入して焼却されることによ

り放出されるDXNは0.18 g-TEQ/yearと算出された。これによる日本国民一人当たりの損失余命は0.21秒(2.3節の方法①)~31秒(2.3節の方法③)となる。これは、他の化学物質等から被る健康リスクと比較するとはるかに小さいレベルである(図2)。

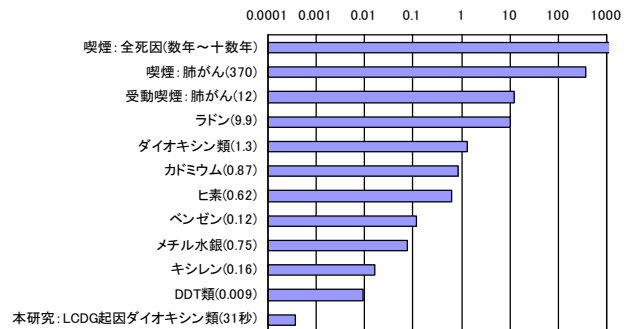


図2. 日本におけるリスク評価例との比較(損失余命[日])¹¹⁾

4. まとめ

焼却炉対策が進んだ今日、廃棄物中CI濃度が焼却排ガス中DXN濃度に影響することはなくなって来ており、LCDGが焼却されても含有CIに起因するDXNリスクは増加しないと想定される。しかし本研究では安全側の評価として、廃棄物中CI濃度と焼却排ガス中DXN濃度に相関があると仮定した場合でも推定した。その結果、LCDGがCIを含有することによるヒト健康影響は、最大で見積っても他のリスクに比べて小さく、LCDG中のCIをことさら制限する必要はないと判断された。

なお、LCDG中のCIは900°Cまでの焼却温度ではほとんどガラスから放出されないとの実験的な示唆が得られており、実際のリスクはさらに小さいと推定される。

5. 参考文献

- 1) JEITA: 統計資料, (オンライン),
入手先<<http://www.jeita.or.jp/japanese/stat/>>
- 2) 田崎智宏 他: 廃棄物学会論文誌, 12(2), 49-58, (2001)
- 3) 小口正弘: 博士論文, (2007)
- 4) 田崎智宏 他: 廃棄物資源循環学会研究発表会, 名古屋大学, A2-4, (2009)
- 5) H. G. Rigo, et al.: ASME Research Report 36,(1995)
- 6) H. Mattila, et al.: Chemosphere,25(11),1599-1609,(1992)
- 7) Frankenfaeuse, et al.: Chemosphere,27(1-3),309-316,(1993)
- 8) 環境省: “ダイオキシン類の排出量の目録”, (2009)
- 9) 環境省: “ダイオキシン類の蓄積・ばく露状況及び臭素系ダイオキシン類の調査結果について”, (2009)
- 10) 国立環境研究所: 公開データ, (オンライン)
入手先<<http://www.nies.go.jp/risk/public/museum.html>>
- 11) Gamo, et al.: Chemosphere,53(4),277-284,(2003)

Supporting Information

LCDG 廃棄重量の推定

各電器電子製品の国内出荷台数(図3)とガラスの廃棄重量を求めるためのパラメータ(表1)を示す。

なお2008年度までは実績値でありデスクトップPC、ノート型PCは2009年度以降2008年度の出荷台数を維持すると仮定し、液晶テレビに関してはアナログ放送が終了する2011年度までは2008年度から前年度比120%で増加し、その後は2011年度の出荷台数を維持すると仮定した。製品中のLCDG重量はインチ数と縦横比から算出した。

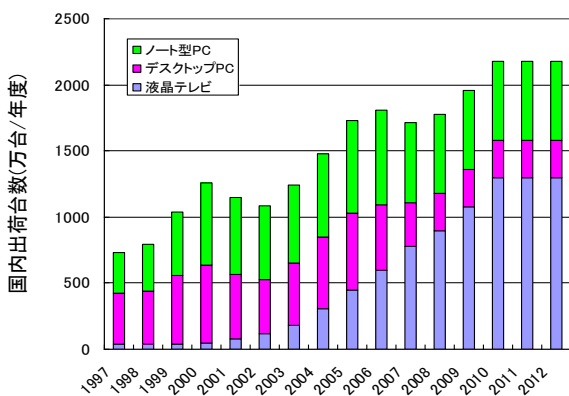


図3. 大型電気電子製品の国内出荷台数の推移¹⁾

表1. 大型電気電子製品のLCDG廃棄重量を推定するためのパラメータ

各パラメータ	液晶テレビ	デスクトップPC	ノート型PC	参考文献
平均使用年数	12	6.6	7.4	3)
パラメータb	3.1	2.6	2.2	3)
リユース・海外輸出率	39.7	63.7	64.5	12)
平均インチ(縦横比)	27(9:16)	20(3:4)	17(3:4)	-

注) 液晶テレビにおいては平均使用年数、パラメータb、リユース・海外輸出率は液晶テレビの値がまだ研究されていないため、ブラウン管テレビのものを使用した。

小型電気電子製品の一般廃棄物への混入率の算出

小型電気電子製品は使用済み後には退蔵されるケースが多いため、使用年数から廃棄量を推定することが難しいと考えた。既存の研究⁴⁾において一般廃棄物中の小型電気電子製品の重量割合が調査されていたのでその値を利用することにした。調査は2回、6都市平均のものであるが、今回はそのデータを全国に拡大して使用することとした。さらに式(9)を用いることで、一般廃棄物として廃棄される小型電気電子製品由来の年間LCDG廃棄量を推定した。

$$LCDG_{\text{waste-small E\&E}} = \text{Waste}_{\text{Japan}} \times \text{Waste}_{\text{rate}} \times LCDG_{\text{rate}} \quad (9)$$

($LCDG_{\text{waste-small E\&E}}$: 小型電気電子製品由来の年間LCDG一般廃棄物重量, $\text{Waste}_{\text{Japan}}$: 日本の年間一般廃棄物重量, $\text{Waste}_{\text{rate}}$: 表2の重量割合, $LCDG_{\text{rate}}$: 小型電気電子製品中LCDG重量割合)

表2. 一般廃棄物に含まれる小型電気電子製品の組成⁴⁾

品目	備考	重量割合%
携帯電話	本体のみ(充電器は含まない)	0.0024
ゲーム機ならびに電子玩具	据置型電子ゲーム機(0.0017)、携帯型電子ゲーム機(0.0020)、その他(0.0003)	0.004
その他の携帯型非大型電気電子製品	手のひらサイズ以下の小型電気電子機器(例、コンパクトデジタルカメラ、携帯型ラジオ等)	0.023

LCDG 一般廃棄後の焼却割合

一般廃棄物として廃棄された後のLCDGの処理フローは、図4のようになると仮定して、LCDGの焼却量を推定した。表3は処理フローの分別比率及び破碎分別率をまとめたものである。

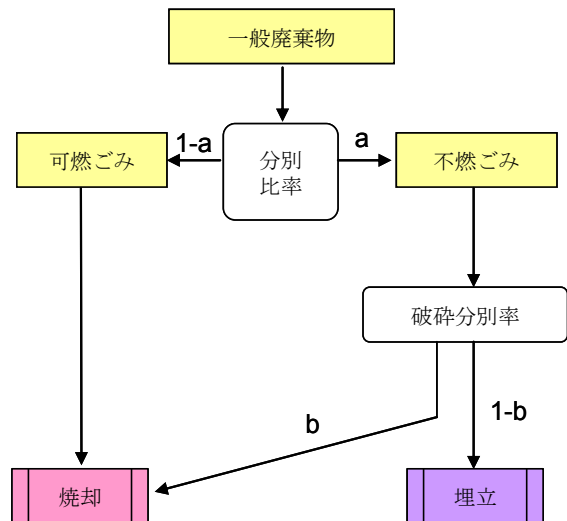


図4. 一般廃棄物の処理フロー

表3. 処理フローにおける分別比率及び破碎分別率

比率	大型電気電子製品	小型電気電子製品	参考文献
分別比率 a	100%	88%	13)
破碎分別率 b	50%	50%	-

注) 破碎分別率bを推定する根拠データを見つけられなかったため、安全側の数値として過大ではあるが50%を採用した。

焼却物中塩素濃度とDXN類排出濃度の関係

廃棄物中の塩素濃度と焼却時のDXN類排出濃度に相関が観察された報告データを図5にまとめた。本研究では、ワーストケースを想定して、図5の中で傾きの最も大きい式(参考文献6)を採用した。

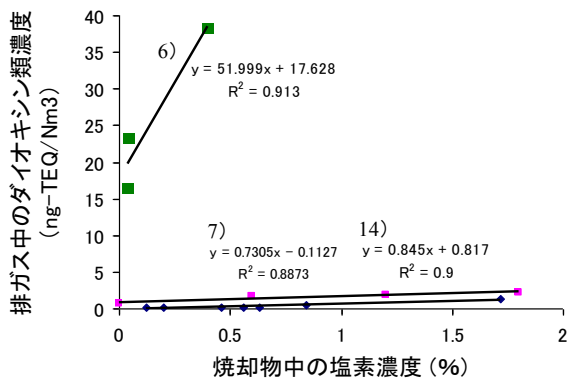


図5. 焼却物中塩素濃度と DXN 類排出濃度の関係

DXN の環境排出によるヒト健康影響の評価

3.2の方法①, においては図6のDXN排出量と大気中濃度関係を用いて, 図6の各年の排出削減量とその年の大気経由の曝露削減量から算出したDXN類排出量原単位当たりの曝露量(図7の傾き= 2.0×10^5 pg/kg-bw/day)を本研究におけるDXN類排出量(0.18 g-TEQ/year)に乗ずることで, LCDG中塩素に起因するDXN曝露量は 5.40×10^6 pg/kg-bw/dayと推定された。

3.2の方法②においては図8のDXN排出削減量と個人総曝露削減量の関係からDXN類排出量原単位当たりの曝露量を算出し(4.07×10^4 pg/kg-bw/day), 本研究におけるDXN類排出量(0.18 g-TEQ/year)に乗ずることで(式(10)), LCDG中塩素に起因するDXNの曝露量は 7.34×10^5 pg/kg-bw/dayと推定された。

$$\Delta \text{DXN}_{\text{intake}} = \frac{\text{DXN}_{\text{intake-reduce}}}{\text{DXN}_{\text{emission-reduce}}} \times \Delta \text{DXN}_{\text{emission}} \quad (10)$$

($\Delta \text{DXN}_{\text{intake}}$: LCDG中塩素に起因するDXN曝露量, $\text{DXN}_{\text{intake-reduce}}$: 日本における平成11年度から17年度までのDXN曝露削減量, $\text{DXN}_{\text{emission-reduce}}$: 日本における平成11年から17年までのDXN排出削減量)

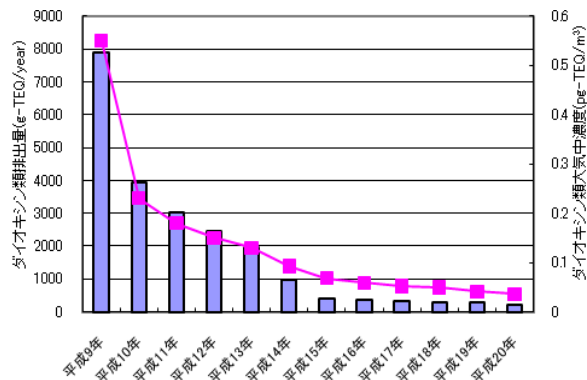


図6. 日本におけるダイオキシン類排出量⁸⁾と大気中濃度⁹⁾の推移(棒グラフ: DXN類排出量, 折れ線グラフ: DXN類大気中濃度)

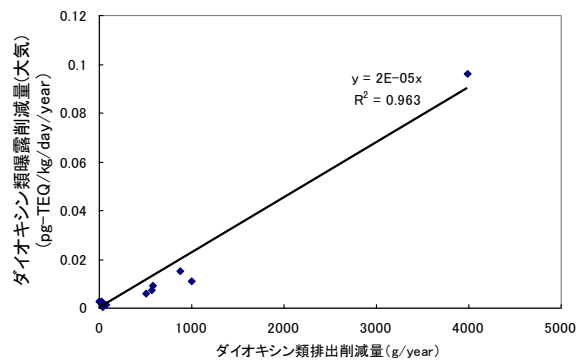


図7. DXN類排出削減量⁸⁾と大気経由の曝露削減量⁹⁾の関係

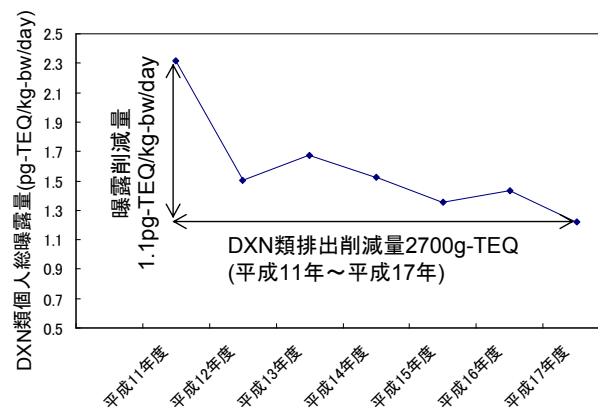


図8. DXN排出削減量⁸⁾と総曝露削減量⁹⁾の関係

3.2の方法③のMuSEMを用いる際には, DXN類の物性として2,3,7,8-TCDDの値を代表値として使用することにした(表4). この結果, 本研究におけるLCDG中塩素に起因するDXN類排出量(0.18 g-TEQ/year)に伴う曝露量は, $1.23 \times 10^{-5} \sim 7.82 \times 10^{-4}$ pg/kg-bw/dayと推定された。

次いで, 方法①, ②, ③で推定された曝露量を基に, 式(7), (8)からヒト健康影響を算出した。

表 4. 2,3,7,8-TCDD の物性

各パラメータ	値	参考文献
分子量	321.9 g/mol	-
溶解度	0.00069 mg/L	14)
蒸気圧	2×10^{-7} Pa	15)
融点	305°C	16)
沸点	447°C	16)
Log ₁₀ Kow	6.8	17)
半減期(大気)	58分~9.3日	18~21)
半減期(水中)	56.8分~50年以上	18~21)
半減期(土壌)	10分~102.7年	18~21)
半減期(底質)	難分解	-
半減期(STP)	難分解	-

参考文献

- 12) 国立環境研究所: 国立環境研究所研究報告, 第 191 号 (2006)
- 13) 中西準子ら: 詳細リスク評価書, 9 (2006)
- 14) 及川智: 東京都環境科学研究所年報 p.129-135 (2003)
- 15) Fiedler H et al.: Chemosphere 20(10-12) 1597-1602 (1990)
- 16) Rordorf BF, et al.: Chemosphere 18(1-6) 783-788 (1989)
- 17) Rordorf BF, et al.: Chemosphere 15(9-12) 1325-1332 (1986)
- 18) Burkhard LP, et al.: Chemosphere 15(2) 163-167 (1986)
- 19) TOXNET HSDB (Hazardous Substances Data Bank) (<http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?HSDB>)
- 20) Handbook of environmental degradation rates (1991)
- 21) Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals (1992-1997)
- 22) Sinkhonen S, et al.: Chemosphere 40(9-11) 943-949 (2000)