

氏名・(本籍)	中 村 修 (埼 玉 県)		
学位の種類	博 士 (工 学)		
学位記番号	生工博甲第375号		
学位授与の日付	令和2年 3月25日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	市販センサーとスパイクングニューラルネットワークとの組み合わせによる2成分系の混合揮発性有機溶剤蒸気の分離計測シミュレーション		
論文審査委員会	委員長	教授	夏 目 季代久
		”	保 利 一
		准教授	大 坪 義 孝
		”	立 野 勝 巳

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

本論文の内容は以下の通りである。有機溶剤の取り扱いに伴い発生する揮発性有機化合物蒸気 (VOC) は容易に体内に取り込まれ、様々な健康障害を引き起こす。健康障害の発生を防ぐためには作業者のばく露量を管理する必要がある。ばく露管理において、市販されている VOC モニターによるリアルタイム計測 (以降「VOC モニター計測」と略す) は有効とされているが、現在 VOC モニター計測では複数種類の混合 VOC を直接分離計測することは不可能であり、成分の応答を合算した値しか得られない。混合 VOC の分離計測のためには試料を採取し、持ち帰った後に煩雑な工程と高額な分析装置が必要なのが現状である。混合 VOC の分離計測をリアルタイムで行えるセンサーがあれば、ばく露管理が簡便になり有機溶剤取扱い者の安全の確保も容易になる。本論文は、空気中の混合 VOC を現場で分離計測するセンサーシステムの開発につながるシミュレーションについて述べている。

1 章では、序論として、化学物質にばく露されることによる健康被害の実態とばく露される量を管理するための従来の計測方法の問題点に触れ、問題解決の一つとして化学センサーアレイとニューラルネットワークを用いた方法に言及している。先行研究を紹介し、本論文においてニューラルネットワークを用いた VOC センサーシステムの提案に至る背景を説明している。

2 章では、混合 VOC のリアルタイム分離計測の産業界における必要性を確認するため、小規模印刷事業所の作業場に 5 日間滞在し、全ての有機溶剤取扱い作業の個人ばく露測定と VOC モニター計測を同時に行った結果を報告している。この事業所では多様な有機溶剤を用途に応じて使い分けているが、個人ばく露測定では改善が必要と判断される作業があったにもかかわらず、そのリスクは VOC モニター計測のみでは判別不能

であったことが示されている。結果として、混合 VOC の分離計測のニーズが有ることを説明している。

3 章では、混合 VOC の分離計測のための多層ニューラルネットワークを提案するために、その隠れ層としてのニューロンモデルを提案している。本論文では、ニューラルネットワークのなかでもスパイクニューロンを採用しており、ニューロンの発火タイミングにより情報を符号化する仕組みを有している。そのため、時空間的なスパイクパターンが重要である。特に、隠れ層の複数のニューロンが時間的には多様なスパイク列を有しながら、空間的には適度に同期した活動が必要である。この条件を満たすため、2 個の Izhikevich 氏により提案されたニューロンを発火特性が異なるようにパラメータを設定し、結合しない形で並べ、共通のパルス入力を加えたときの応答を調べている。ニューロン対に、周期パルスとランダムパルスを入力すると、確率共鳴現象による入力周期パルスに依存した出力周期スパイクが確率的に出力されることが示されている。また、同時に空間的な同期を起こすメカニズムとして、ランダムパルス誘導同期を見出している。結果として、時間的には多様なパターンであり、かつ空間的に同期したスパイクを得ることができたことが説明されている。

4 章では、3 章のニューロンモデルを隠れ層とする多層ネットワークモデルを用いて、3 章のスパイクニューラルネットワークを提案し、2 種の混合ガスの分離計測シミュレーションを行っている。応答特性の異なる 2 個の半導体 VOC センサーを用いることを仮定し、ニューラルネットワークの関数近似能力によって、センサーの応答特性を学習する。近似した関数から各ガス濃度を推定する方式である。入力層は半導体 VOC センサーを内部抵抗に持つニューロンで、ガス濃度に応じて神経スパイクの周波数が変動する。汎用性を考慮し、ガスセンサーには市販の半導体型 VOC センサーを用いることを仮定している。隠れ層と出力層の間のシナプス結合は可塑性を有するものとしており、スパイクの発生時間差に応じて結合が変化する対称型 **Spike-timing-dependent plasticity** を採用している。

ばく露計算機シミュレーション実験では、エタノールとイソブタンの混合気体を想定して、分離定量を行っている。学習手順は、まず高濃度ガスを 1 種ずつ入力し、学習を実施した。シナプス結合強度が十分に大きくなったのち、ランダムに決めた濃度でそれぞれのガスに交互にばく露するシミュレーションを実施している。学習は教師なし学習であるが、エタノールにばく露された場合には、出力層ニューロン 1 には長期増強を、出力層ニューロン 2 には長期抑圧のシナプス可塑性が適用されるようになっている。イソブタンの場合、学習ルールはこの逆が適用されている。この学習が完了したのち、エタノール濃度とイソブタン濃度に対する出力層の各ニューロンの出力周波数を用いて濃度応答曲面を作成した。最後に、ガスを混合した状態を想定したシミュレーションを行い、出力層の神経スパイクの発火周波数を基に濃度応答曲面を用いて濃度を推定している。結果として、エタノールとイソブタンの濃度を 0~2000 ppm の範囲で推定でき

ている。

隠れ層ニューロンのスパイクを強制的に発生させる条件や、同期の程度を低くした条件のようなシミュレーションとの結果とも比較し、いずれもランダム誘導同期を用いた手法のほうが精度は高いことを示している。また、学習速度も速くなるなど、提案手法が優れていることを示している。

さらに、センサーの一つを別のセンサーに置換しても、再度学習を行うことにより、同様に分離定量に成功することも示しており、ほかのセンサーにも同様の学習が適用であり、適用範囲が広いことを示している。

5章では、これまでの結果をうけて、ランダムパルス誘導同期特性と確率共鳴特性を有するスパイクニューロンを含むニューラルネットワークにすることで、センサー出力の違いによるばらつきの特徴を有したまま、時系列パターンのばらつきとして符号化され、かつ空間的同期特性が向上し、関数近似能力が得られたとまとめている。さらに、市販の特異性の低い半導体 VOC センサーであっても、2種の混合 VOC の濃度を広い範囲で分けて推定する仕組みを提案することができたと結論している。

学位論文審査の結果の要旨

本論文に対し、論文調査委員及び公聴会の出席者から、(1)本論文で用いたガスが有機溶剤中毒予防規則や特定化学物質障害予防規則等の法令の対象外の物質であることについて説明するよう求められたり、(2)3成分以上の混合 VOC の分離定量に関する質問を求められたり、(3)ほかのセンサーシステムへの応用に関する質問がなされたりしたが、いずれも著者からの説明がなされ、質問者の理解が得られた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。