

# 非線形分光による表面・界面分光分析

宮前 孝行

## 1 はじめに

1960年のレーザーの発明<sup>1)</sup>により、非線形光学と呼ばれる分野が誕生した。1961年には世界で最初となる二次の非線形光学効果である光第二次高調波発生 (second harmonic generation, SHG) に関する論文<sup>2)</sup>が発表されている。非線形光学とは、非常に強い光と物質が相互作用するとき起きる現象の総称である。通常の可視紫外吸収分光や赤外吸収などは入射する光の強度  $E$  に応じて物質の分極  $P$  が線形的な応答 ( $P = x^{(1)} E$ ) を示すのに対して、ピコ秒からフェムト秒という時間幅の短いパルスレーザー光から取り出される高強度の光を照射した場合には、より高次の項 ( $P_i = x_{ij}^{(1)} E_j + x_{ijk}^{(2)} E_j E_k + x_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l + \dots$ ) が無視できなくなる。SHG や和周波発生 (sum frequency generation, SFG) は、この右辺第2項、すなわち二次の項を測定する分光法である。SHG や SFG をはじめとする偶数次の非線形光学効果の最大の特徴は、「反転対称性を持つ媒質中では発生しない」ことであり、等方的な媒体 (例えば水などの液体やガラスなど) では二次の非線形光学効果は起きない。しかし、その媒質の表面や界面は反転中心がないため、表面、界面では SHG や SFG は許容となる。その結果として SHG や SFG で得られる信号は界面の情報を選択的に取得していることとなる。これが二次の非線形分光が界面選択的な分光法と言われる所以である<sup>3)4)</sup>。機能性材料の開発研究において、表面処理を施したプラスチック材料表面や複合材料の接合界面、複合化した高分子材料と酸化物や金属との密着や剥離といった接合界面の構造解析、液中の電極界面での分子の反応、固体表面での触媒反応や生体適合性材料における、高分子界面の接触界面の構造など、従来の表面分析の手法では十分に解析できなかった対象について、分子レベルで解析したいというニーズの高まりとともに、こうした表面だけを選択的に計測できる手法に対するニーズも大きくなっている。本稿では、近年特に表面選択的な振動分光法として注目されている SFG 分光を中心に解説していきたい。

Surface and Interface Analyses Using Nonlinear Optical Spectroscopy.

## 2 SFG 分光の原理・特徴・装置構成

SHG および SFG は等方的な媒体において反転対称性のない場で発生する。非線形光学では主に反転対称のない結晶などにレーザー光を透過させて SHG や SFG を発生させるが、表面や界面自身が「反転対称性のない場」であるため、透過方向に二次の非線形効果を生じない等方的な試料に光を入射した際の反射方向に発生する SHG や SFG 光は必然的に表面や界面の情報を含んでいる。ここで、SHG と SFG の光学過程を図 1(a) に示すが、この図で示すように SHG と SFG は同様な光学形態を持っており、SHG は SFG において二つの光子の波長が等しい場合であるということがわかる。また SFG において一方の光波長を分子振動領域である中赤外光にした場合の光学過程と赤外、Raman のそれぞれの光学過程は図 1(b) のような関係にある。この図から、SFG で分子振動を見ようとした場合、赤外と Raman の光学

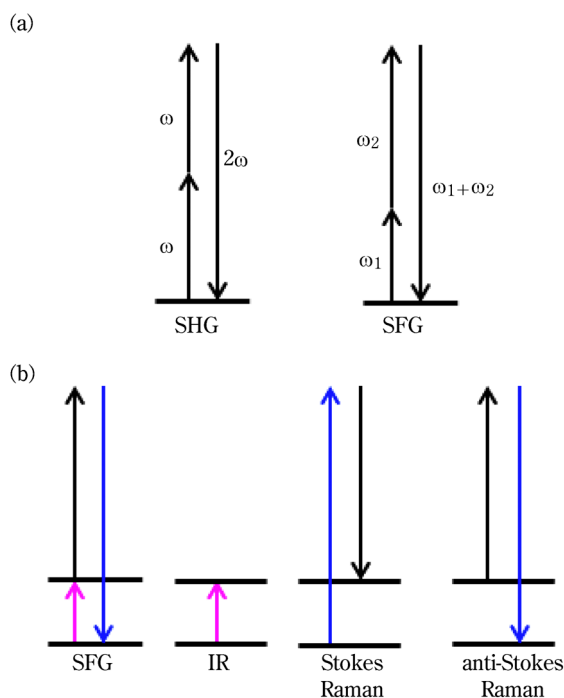


図1 (a) SHG と SFG の光学過程。(b) SFG と赤外吸収、Raman の光学過程

過程を合わせた光学過程となることがわかるが、実際 SFG で観測される振動の選択則は、赤外活性かつ Raman 活性となる。非線形光学で一般的に用いられる和周波発生と区別するために、この SFG 分光法を赤外—可視和周波発生、もしくは振動和周波発生と呼ぶこともある。

SFG 分光法の特徴としては、①超高真空や試料の導電性などを必要としない、②固体表面だけでなく、液体／固体界面や液体表面、固体／固体の埋もれた界面に対しても光が界面に到達すれば測定が可能、③得られた SFG スペクトルは、分子の配向情報を含んでおり、表面・界面に存在する分子がどのような配向をとっているのかを定量的に知ることができる、④測定点から離れた場所でも高感度で検出が可能であり、温度や湿度、電場など外場を加えたときの変化をとらえることが可能、などの点が挙げられる<sup>4)</sup>。

図 2 に SFG 分光に用いる典型的な測定装置の概略を示す<sup>5)</sup>。因みにここではピコ秒レーザーを用いた SFG システムを紹介しているが、近年ではレーザーの技術的進歩により後述のフェムト秒レーザーを光源とした SFG システムが主流となりつつある。SFG の測定装置は、大きく分けて(1)励起用パルスレーザー、(2)赤外および可視レーザー光発生部、(3)試料部、(4)SFG 光検出部から構成される。励起用光源としてパルス幅 25 ピコ秒のモードロック Nd:YAG レーザーを使用し、ここから二つの出力 (1064 nm) を取り出す。一方の光を 532 nm の可視光に波長変換して試料に照射する可視光として使用する。もう一方は光パラメトリック発振/増幅および差周波発生を利用することで 1000 から 4000  $\text{cm}^{-1}$  の範囲で可変の赤外光を得る。この赤外光を一波数ごとに波長掃引することで SFG スペクトル測定を行う。赤外光パルスと可視光パルスは光学的遅延回路を通し、試料表面上で空間的重ね合わせと時間的なタイミングを合わせる。SFG 光は表面や界面でのみ起こる現象

であるため発生する SFG 光は微弱光である。このため多くの場合、レーザー光の照射による試料損傷に注意しながら両方の入射光をレンズなどで 0.5 mm $\phi$  程度に集光して測定を行うことが多い。SFG 光は位相整合条件と呼ばれる条件により指向性を持って試料表面から発生する。SFG 光の検出はフィルターと偏光子、分光器を通し、光電子増倍管で検出する。C=O 伸縮や C=C 伸縮などの指紋領域の SFG を測定する場合には、大気中の水蒸気による中赤外光の吸収の影響を減少させるために赤外光が通過する光路全体を乾燥空気や窒素などでパージしておく必要がある。ここで、通常の測定においては赤外光と可視光の強度で割り算したものを SFG スペクトルとして用いる。

励起用のパルスレーザーとしてフェムト秒のパルス幅を持つチタンサファイアなどのパルスレーザーを使用する場合は、可視レーザー光を分光器やフィルターなどを通して狭帯域化 (波数幅 $\sim 10 \text{ cm}^{-1}$ , パルス幅 $\sim$ ピコ秒) し、これに白色光の赤外パルス (波数幅 $\sim 300 \text{ cm}^{-1}$ , パルス幅 $\sim$ フェムト秒) と重ね合わせる。出てきた SFG 光は入射する赤外光の波数幅に応じた広いスペクトル幅を持つ光として放出されるので、フィルターとポリクロメーターを通した後、CCD 検出器で検出する<sup>6)</sup>。フェムト秒システムで SFG を測定した場合は、水晶や GaAs など、SFG 強度の波長依存性のないものを参照試料として測定し、試料から得られた生の SFG 強度を割り算することで、スペクトルとして用いる。

### 3 SFG 分光によるガラス基板上の単分子膜の構造解析

固体試料の表面を測定する場合、空気中での測定であれば試料ステージに試料をセットして、試料表面位置の高さを SFG 光が発生する高さに調整すれば、そのまま測定が可能である。実際の試料測定に際して、透明な試料の場合は、SFG のピークがない領域の赤外波長では

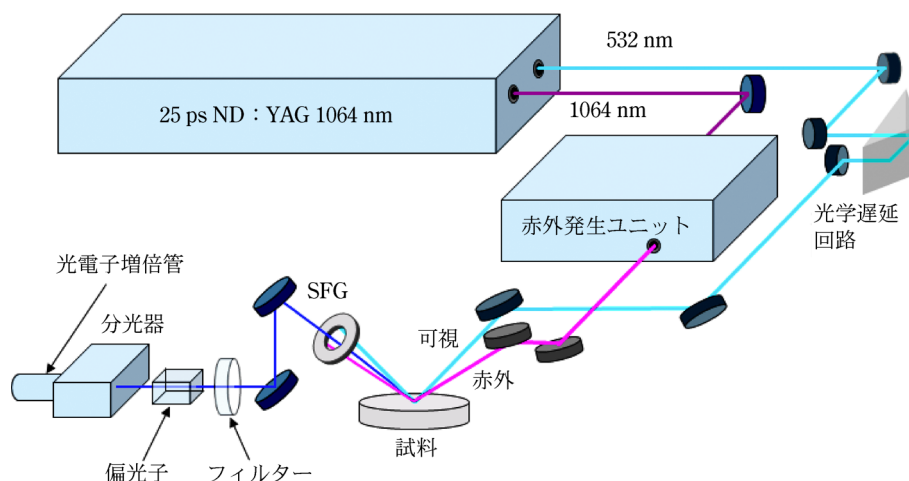


図 2 SFG 分光装置の概略図

SFG 光がほとんど発生しないため、試料位置を探す作業は思ったより難しい作業である。また、試料表面の平滑さについては、SFG 信号の損失を考えると、できるだけ平滑であることが望ましいが、試料によっては粉体試料でも測定は可能である。

図 3 に、シランカップリング剤であるオクタデシルトリメトキシシラン単分子膜が化学吸着したガラス表面の SFG スペクトルを示す。2880  $\text{cm}^{-1}$  と 2940  $\text{cm}^{-1}$  のピークはそれぞれアルキル鎖末端のメチル基の対称伸縮振動とメチル対称伸縮のフェルミ共鳴に由来する振動モードである。ここで、長鎖のアルキル基を有する分子の赤外吸収分光による測定では、末端メチル由来の振動はメチレン基に比べて数が少ないためにほとんど見られず、メチレン基由来の振動が強く観測されるはずである<sup>7)</sup>。これに対して、分子が秩序を持って整列している自己組織化単分子膜末端の SFG スペクトルでは、図 3 で示すようにアルキル鎖のメチレン基由来の振動 ( $\text{CH}_2$  対称伸縮 2850  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\text{CH}_2$  逆対称伸縮 2920  $\text{cm}^{-1}$ ) はほぼ見られず、末端メチル由来の振動のみが見られる。アルキル鎖が all-trans 構造をとっている場合には、局所的な反転対称性のために SFG では不活性な振動となり、 $\text{CH}_2$  由来の振動は見えなくなる。逆に  $\text{CH}_2$  のピークが見られる場合、アルキル鎖は trans 構造ではなく gauche 構造をとっていることが SFG からは示唆される。つまり SFG では表面に存在する分子のすべての官能基の振動が見られるわけではなく、またそのピーク強度は必ずしも官能基の存在比に比例する訳ではない

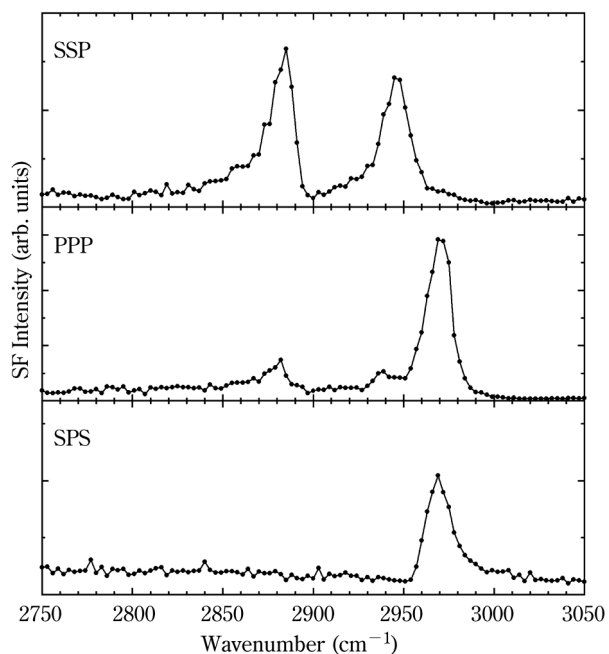


図 3 ガラス上に吸着したオクタデシルトリメトキシシラン自己組織化単分子膜の SFG スペクトル  
SSP (SFG 光 : S 偏光, 可視光 : S 偏光, 赤外光 : P 偏光), PPP, SPS 偏光組合せによる測定。

ことに注意していただきたい。また SFG 分光では図 3 のように測定に使用する光の偏光を変えて測定することで、このメチル基の配向角を求めることも可能である。具体的な配向角の導出については既報を参照していただきたい<sup>3)8)</sup>。このシランカップリング剤の単分子膜では、末端メチル基が表面法線方向から約 30°傾いており、アルキル鎖は all-trans 構造をとっていることがわかる。

#### 4 SFG 分光によるエポキシ高分子へのプライマー塗布界面のその場解析<sup>9)</sup>

本項では SFG 分光によるエポキシ高分子とプライマー溶液界面でのその場計測について解説する。CO<sub>2</sub> 排出削減や燃費向上に向けた航空機や自動車の軽量化とマルチマテリアル化への機運が急速に高まるにつれて、異種材料の接着接合界面のその場計測、そして接着メカニズム解明が強く求められている。接着技術の普及を妨げている要因の一つとして、接着接合の信頼性・寿命を予測することが極めて難しいことが挙げられる。接着界面は埋もれた界面であるがために、従来の分析手法では直接観察することは難しいが、SFG 分光は光を使った手法であるため、埋もれた界面に対して直接アクセスして、接着メカニズムに対して大きな手掛かりを与えることが可能である。

エポキシ樹脂など高分子樹脂材料への接着剤の接着力を高めるために、接着剤塗布前の下塗りとしてプライマーが用いられることが多い。図 4 に測定の際の試料配置の概略と用いた材料の化学構造を示す<sup>9)</sup>。基板として赤外光及び可視光に透明である CaF<sub>2</sub> 基板に SiO<sub>2</sub> (膜厚 100 nm) を成膜したものをを用い、この上にエポキシの前駆体の溶液を塗布し、加熱縮合させてエポキシ高分子薄膜を成膜した。ここで SiO<sub>2</sub> は基板に対する高分子溶液の濡れ性を高めるために挿入してある。プライマーとしてはイソシアネート基を二つ有する 4,4-methylene diphenyl diisocyanate (MDI, 図 4) の 5 wt% 酢酸ブチル溶液もしくはクロロホルム溶液を作製し、図 4 に示すように基板と溶液が接するよう試料ステージに基板を裏向きにセットした状態で、基板越しに光を入射して SFG 測定を行なった。

図 5 に、エポキシ表面、MDI 酢酸ブチル溶液界面、及び酢酸ブチルとの界面の OH 伸縮、NCO 伸縮、C=O 伸縮領域の SFG スペクトルを示す。なお測定では SSP 偏光の光学配置で行った。エポキシ高分子は分子内に OH 基を有するが、エポキシ表面の SFG スペクトルでも OH 伸縮のバンドが見られている。ここで、この OH バンドはブロードなバンドを示していることから、表面では吸着水が存在し、吸着水と高分子表面が水素結合を形成していることが示唆される。エポキシ表面を MDI 酢酸ブチル溶液に浸漬した状態では、この OH のバン

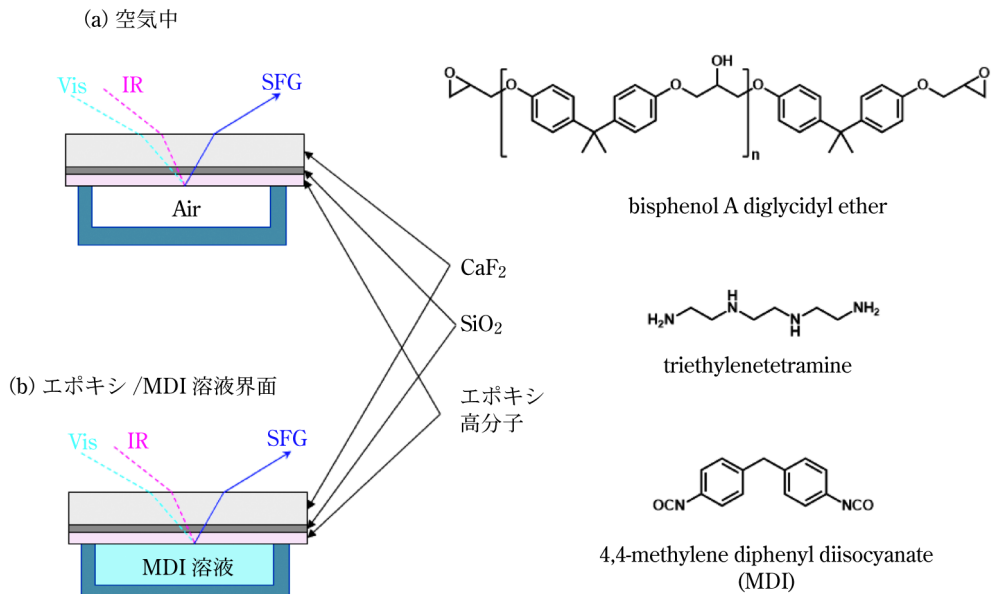


図 4 (a) エポキシ表面及び (b) 界面測定のための光学配置と、用いたエポキシ高分子前駆体および MDI の化学構造

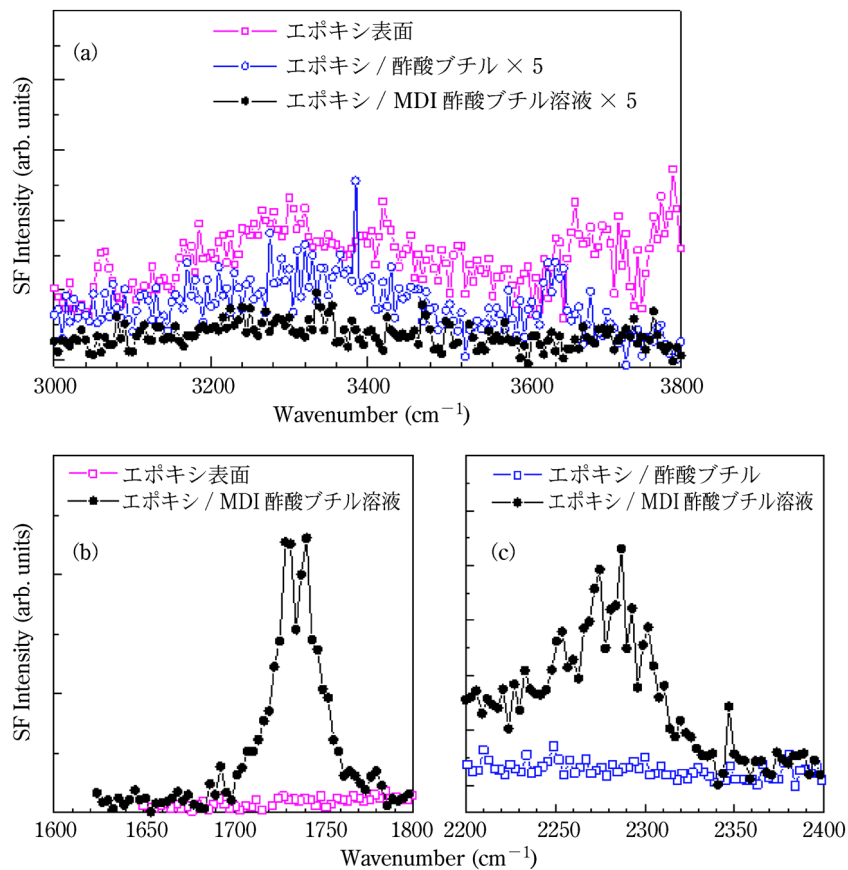


図 5 エポキシ表面及び 5 wt% MDI 酢酸ブチル溶液界面、酢酸ブチル界面の SFG スペクトル  
(a) OH 伸縮領域, (b) C=O 伸縮領域, (c) NCO 伸縮領域。

ドは消失し、NCO のピーク並びに C=O 伸縮が新たに観測されている。コントロールのために MDI を含まない酢酸ブチルのみと接した場合は、空気界面と液体界

面の違いにより屈折率差が小さくなるため OH 伸縮のバンドは弱くはなるものの完全には消失していないのが見て取れる。MDI 溶液と接した際のエポキシ界面での

OH 伸縮バンドの消失は、エポキシ高分子表面の OH 基が MDI のイソシアネート基と反応したことを示唆している。また C=O 伸縮のピークの出現は MDI 酢酸ブチル溶液だけでなく、系にカルボニル基を含まない MDI のクロロホルム溶液と接した際でも見られており、いずれの溶液においても界面で MDI のイソシアネートとエポキシの OH 基が反応してウレタン結合 (-NH-CO-) が形成されたと考えられる。比較として OH 基を有しないポリプロピレンやポリスチレンでも同様の条件で測定を行ったが、いずれの場合でも MDI 溶液の界面では C=O 伸縮は現れず、OH 基が存在するエポキシ高分子界面でのみウレタン結合が生成していることがわかる。因みにこのウレタン結合は、赤外分光ではほとんど確認できていないことから、反応は高分子/溶液界面でのみ起こることが強く示唆される。

興味深いことに、エポキシ高分子と MDI 溶液界面では C=O だけでなく、NCO 伸縮も同時に観測されている。この溶液に浸漬したエポキシ基板を、アセトンで洗浄し 100 °C で加熱した後のエポキシ表面の SFG では、ウレタン結合の C=O 伸縮とともに NCO のピークも観測されている (図 6)。MDI は分子内にイソシアネート基を二つ有しており、片方のイソシアネート基が高分子の OH 基と反応してウレタン結合を形成するのに対し、もう一方のイソシアネート基は未反応のまま表面に固定化された状態であると考えられる。先述したように MDI はプライマーとして接着力を高めるために接着剤の塗布前処理に用いるものであり、表面に固定化されたイソシアネート基は接着剤成分に含まれる OH 基と反応する足場となり得る。プライマーとして MDI を塗布することにより、MDI 分子を介して高分子と接着剤がイソシアネート基により化学結合を形成するため、より高い接着力を示すようになったということでプライマー塗布による接着力の向上は合理的に説明できる。実際、このプライマー処理基板にウレタン系接着剤などに用いられるポリオールを塗布した試料の界面ではイソシアネート基のピークは消失しており<sup>9)</sup>、ポリオール中の

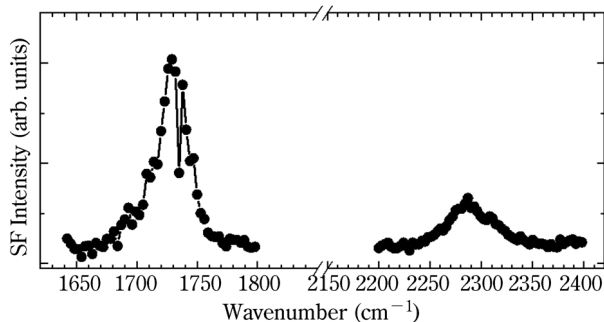


図 6 アセトンで洗浄、加熱した後の MDI プライマー処理エポキシ高分子表面の C=O 伸縮領域および NCO 伸縮領域の SFG スペクトル

OH 基と界面のイソシアネートが反応して消費されたことを示していると考えられる。

## 5 ビール表面の分子挙動と泡の安定性の関係<sup>10)</sup>

ビールの原料にホップが用いられるようになったのは 11 世紀頃のドイツが発祥とされている。ビール独特の苦味は毬花に含まれる  $\alpha$  酸と呼ばれるフムロン類が異性化したイソフムロンと呼ばれる分子群によるものである。一方でホップに含まれる成分は、味だけでなくビールにとって重要な要素である泡の形成にも重要な役目を果たしている。ここで一般的に、「泡」とは気体と液体から構成され、親水性部分と疎水性部分をあわせ持つ分子がその境界面、つまり気液界面に存在している。泡は液体の表面で形成するため、泡の形成過程やその安定性を調べるには液体としてのビールの表面に存在する分子の情報が必要であるが、多様な分子が存在するビールのような液体は複雑で調べること自体が難しく、またそもそも液体表面だけを分子レベルで調べる手法がほとんどなかった。そこで、ビールの表面でどのような分子が泡の形成過程や安定化にかかわっているのかを明らかにするため、SFG 分光を用いたビール表面の研究に着手した<sup>4)</sup>。

### 5.1 ビール表面に存在する分子種の特定

図 7 に、醸造時に加えるホップ添加量を、通常のビールの 0~2 倍まで変えたビール表面の SFG スペクトルを示す。通常市販されているビールに対するホップ添加量は 4.36 g/L に相当する。ホップが添加されている通常のビールには 2926  $\text{cm}^{-1}$  の波数位置に明瞭に振動ピークが観測されているのに対し、ホップが添加されていないビール (0 g/L) ではこの位置に振動ピークが不明瞭であることがわかる。さらにこの 2926  $\text{cm}^{-1}$  のピーク強度はホップの添加量に伴い増加している。SFG 測定における偏光組み合わせを変えた測定から、ホップ添加量の増加に伴う 2926  $\text{cm}^{-1}$  のピーク強度増加は、官能基の配向変化ではなく、主に表面の分子の量の増加に起因する。つまり、図 7 はホップを添加することで表面に何かしら偏析する分子が存在しており、その偏析量はホップ添加量に伴い増加することを示している。

この 2926  $\text{cm}^{-1}$  のピークの起源を調べるために、ビールの構成要素であるホップエキス (Hopsteiner 製。主要な成分として *trans*-イソフムロン、図 8)、エタノール、およびビールから抽出したタンパク質成分を、それぞれビールと同濃度に調整した水溶液を作成し、各々の SFG スペクトルを測定した結果を図 8 に示す。ホップエキスの酸性水溶液では、ビール表面と同じ 2926  $\text{cm}^{-1}$  の波数位置に SFG の振動ピークが見られた

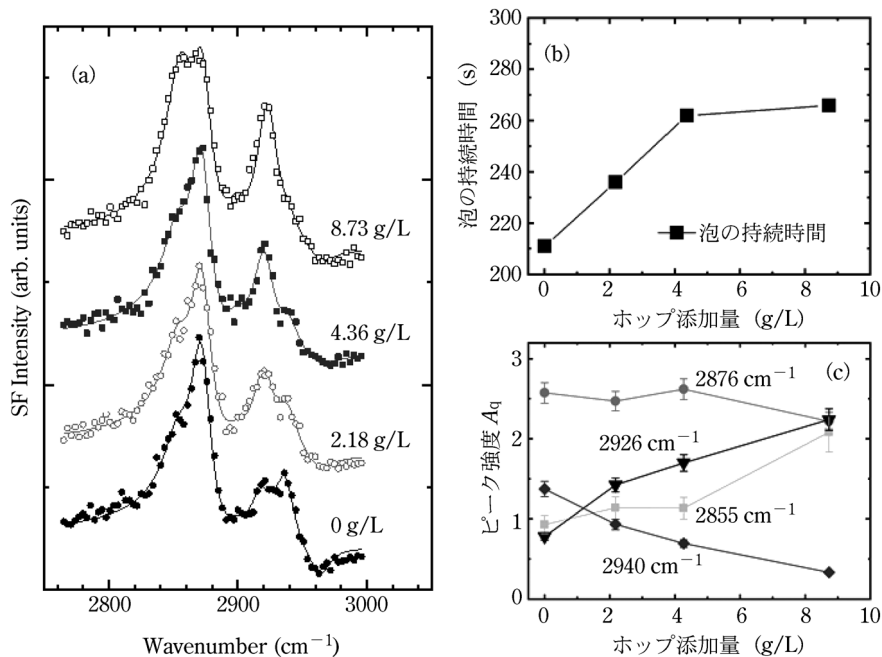


図7 (a)ホップ添加量を変えたビール表面のSFGスペクトル；(b)ビールの泡の持続時間のホップ添加量依存性；(c)CH伸縮領域のSFGスペクトルの各ピーク強度のホップ添加量依存性

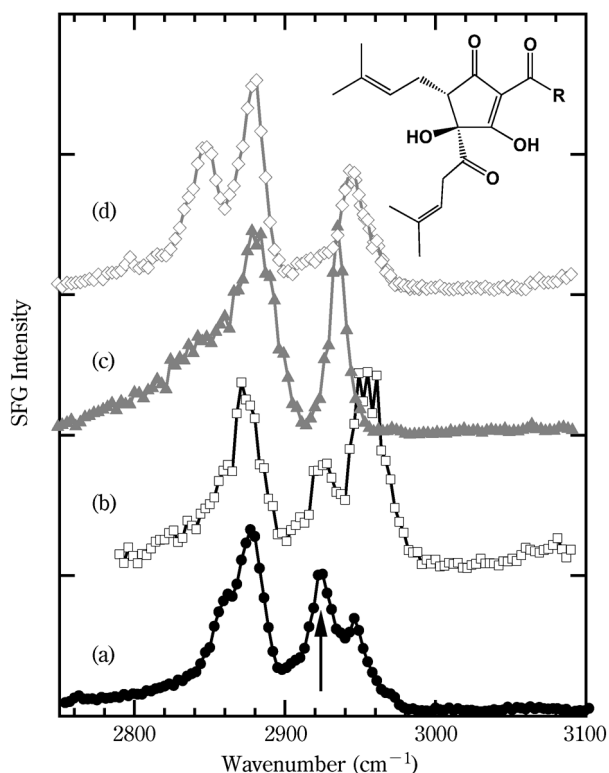


図8 ビール表面、および構成成分のSSP偏光組み合わせによるSFGスペクトル (a)ビール、(b)ホップエキス水溶液 (pH=4.0)、(c)エタノール5 vol% 水溶液、(d)ビールから抽出したタンパク質水溶液。図中の矢印は2926 cm⁻¹に見られるピーク。図中の分子構造は *trans*-イソフムロン。

のに対し、タンパク質水溶液やエタノール水溶液ではこの波数位置にピークは見られないことから、ビール表面のSFGスペクトルの2926 cm⁻¹はホップ由来のイソフムロンに由来する振動ピークと帰属した。イソフムロンには特徴的なプレニル基と呼ばれる、二つのメチル基を有する官能基が存在するが、この2926 cm⁻¹の振動ピークは、このプレニル基のメチル対称伸縮振動に由来すると考えられる。

## 5.2 ビールの泡持ちとイソフムロン

ビール醸造時に加えるホップの添加量の増加に伴い、図7(b)に示すようにビールの泡の安定性(持続時間)は長くなる傾向にある。一方でホップの添加量を増やしたビールのSFGスペクトルでは、2926 cm⁻¹のイソフムロン由来のピーク強度がホップ添加量の増加とともに増していく傾向を示し、この傾向がSFGで観測されるイソフムロン由来の2926 cm⁻¹のSFGピーク強度の増加とも対応している(図7(c))。つまりイソフムロンがビール表面に多く存在するほど、ビールの泡の安定性は向上する。ここで、ビールに限らず一般に泡の安定性には液体の表面粘性が関連しており、表面粘性が高いほど泡の持続時間が長くなることが知られている<sup>11)</sup>。イソフムロンは低分子であり、それ自身が液体の表面粘性を上げていることは考えにくい。表面粘性を高めるものとしてはビール中に存在する高分子量のタンパク質の存在が考えられるが、同時に取得したビール表面のアミド領域のSFGスペクトルでは、1650 cm⁻¹付近にビールに含まれるタンパク質由来のアミドC=O伸縮振動が確認

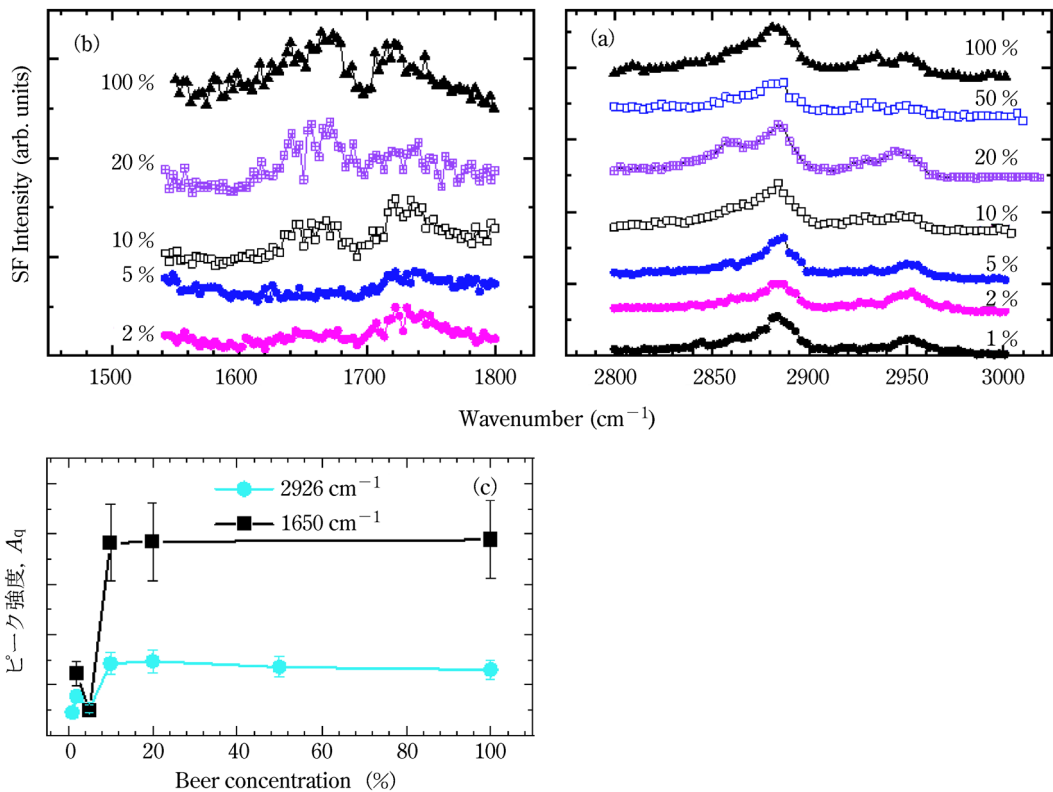


図9 水で希釈したビール表面のSFGスペクトル, (a)CH伸縮領域, (b)C=O伸縮領域, (c) 2926 cm<sup>-1</sup> および 1650 cm<sup>-1</sup> のピーク強度の濃度依存性

できる (図9(b))。イソフムロンとタンパク質との相互作用を詳細に調べるため、ビールを水で希釈していった際のビール表面のCH伸縮及びC=O伸縮領域のSFGスペクトルを図9に示す。2926 cm<sup>-1</sup>のSFGのピーク強度とアミドC=Oのピーク強度の希釈濃度依存性 (図9(c)) から、アミドC=Oのピーク強度は、希釈濃度5%程度までは一定であるが、更に希釈すると消失する。2926 cm<sup>-1</sup>のイソフムロン由来の振動モードでも全く同じ挙動が見られることからビール表面ではタンパク質とイソフムロンが強く相互作用して共存していることが示唆される。ビールの泡の安定化には、表面のタンパク質の存在と共にホップ由来の分子の介在が重要であることは従来から提唱されてきたが、今回の結果からビールの表面ではタンパク質とホップ由来のイソフムロンが強く結びついて緻密なネットワークを形成し、ビールの表面粘性を高めることで泡の持続時間に大きく作用していると結論付けた。

## 6 おわりに

非線形分光であるSFG分光を用いた表面・界面の解析に関しては、近年のレーザー技術の進歩により、より高速な測定システムの開発が進んでいる。また局所的な分子情報を取得する手法としてのイメージング技術も急速な進歩を遂げている<sup>12)</sup>。本稿では紹介しなかったが、位相情報を分離することで官能基の絶対配向を決定

できる“ヘテロダインSFG”や、キラルな分子を高感度で検出する“キラル識別SFG”、媒体の光学遷移と共鳴させることでSFG信号の増強や界面電子状態を同時に調べることが可能な“2重共鳴SFG”、内部電荷が形成する電場を直接調べることができる“電界誘起SHG, SFG”など、測定手法のバリエーションも幅広くなってきており、それに伴って研究対象も大きな広がりを見せている。今後SFGやSHGなどの表面選択的な非線形分光法の持つ可能性を利用することで、新規機能性材料界面の開発や、接着、剥離、吸着、偏析、拡散など界面特有の現象の解明への応用展開が期待される。

## 文献

- 1) T. H. Maiman : *Nature*, **187**, 493 (1960).
- 2) P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, G. Weinreich : *Phys. Rev. Lett.*, **7**, 118 (1961).
- 3) Y. R. Shen : “*Fundamentals of Sum-Frequency Spectroscopy*”, (2016), (Cambridge University Press).
- 4) 宮前孝行 : *OplusE*, **33**, 155 (2011) ; 宮前孝行 : *Polyfile*, **49**, 20 (2012) ; 宮前孝行 : 接着の技術, **32**, 44 (2013) ; 宮前孝行 : “表面・界面技術ハンドブック”, 西敏夫編, p. 290 (2016), (NTS).
- 5) T. Miyamae, K. Tsukagoshi, O. Matsuoka, S. Yamamoto, H. Nozoye : *Langmuir*, **17**, 8125 (2001).
- 6) L. J. Richter, T. P. Petrali-Mallow, J. C. Stephenson : *Opt. Lett.*, **23**, 1594 (1998).
- 7) M. Himmelhaus, F. Eisert, M. Buck, M. Grunze : *J. Phys. Chem. B*, **104**, 576 (2000).

- 8) H. Yokoyama, T. Miyamae, S. Han, T. Ishizone, K. Tanaka, A. Takahara, N. Torikai: *Macromolecules*, **38**, 5180 (2005).
- 9) K. Sensui, T. Tarui, T. Miyamae, C. Sato: *Chem. Commun.*, **55**, 14833 (2019).
- 10) T. Miyamae, H. Kato, M. Kato: *Chem. Lett.*, **677**, 93 (2018).
- 11) 小山内州一: *オレオサイエンス*, **1**, 863 (2001).
- 12) C. Katagiri, T. Miyamae, H. Li, F. Yang, S. Baldelli: *Phys. Chem. Chem.*, **23**, 4944 (2021).



宮前 孝行 (Takayuki MIYAMAE)  
 千葉大学大学院工学研究院物質科学コース、千葉大学分子キラリティ研究センター (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)。名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。《現在の研究テーマ》和周波分光をはじめとする各種分光法を用いた有機界面の研究。  
 E-mail: t-miyamae@chiba-u.jp



## 新刊紹介

### 基礎コース物理化学 IV 化学熱力学

中田宗隆 著

“基礎コース物理化学”は、物理化学の重要な概念をかみくだいて解説した初学者向けの教科書シリーズである。既に第I巻(量子化学)、第II巻(分子分光学)、第III巻(化学動力学)が刊行されており、本書はその第IV巻である。

本書は3部構成からなり、第I部「純物質の熱力学」と第II部「混合物の熱力学」では、一般的な物理化学の教科書では天下一の導入されることの多い熱エネルギーや仕事エネルギー

について、分子論的にわかりやすく説明されている。また、エントロピー、エンタルピー、自由エネルギー、化学ポテンシャルなどの概念について、初学者でも理解できるようにやさしい言葉で説明されている。第III部「地球大気の大気熱力学」では、この“基礎コース物理化学”の総復習として、地球温暖化についての物理化学的な解説がなされている。これは他の教科書には見られないユニークな内容であり、読者は地球温暖化の本質を理解するとともに、物理化学の基礎知識や考え方がいかに重要であるかを実感できるだろう。

理解度を段階的にチェックできるように、各章末に10題程度の練習問題が用意されている。本書は、大学の学部学生あるいは社会人になってからもう一度物理化学を勉強したくなった人に役立つ教科書である。

(ISBN 978-4-8079-0939-1・A5判・208ページ・2,400円+税・2021年刊・東京化学同人)