

キュウリ切断面から放出されるガス濃度と成長軸の関係

Relationship between gas concentration emitted from cucumber cross section and growth axis

高木治¹、坂本政道²、世一秀雄¹、小久保秀之¹、河野貴美子¹、山本幹男¹

¹国際総合研究機構 (IRI) 情報研究センター、千葉県千葉市稲毛区園生町 1108-2

² (株) アクアヴィジョン・アカデミー、千葉県成田市津富浦 1228-3

Osamu Takagi¹, Masamichi Sakamoto², Hideo Yoichi¹, Hideyuki Kokubo¹, Kimiko Kawano¹ and Mikio Yamamoto¹

¹Information and Research Center, International Research Institute (IRI), 1108-2 Sonno, Inage, Chiba 263-0051, Japan.

²Aquavision Academy, 1228-3 Tsubuura, Narita, Chiba 287-0236, Japan.

キーワード：キュウリ、ガス、概日リズム、バイオセンサ、成長軸、切断面、生体反応

Keyword: Cucumber, Gas, Circadian Rhythm, Bio-sensor, Growth axis, Cross section, Bio-reaction

要旨

野菜や果物は、様々な刺激に対して生体反応を示す。その一例として、刺激に対して植物どうしがコミュニケーションをとるために、また防御反応のためにガスを放出することが知られている。

我々は本論文において、キュウリ果実が傷ついたことによって起こる生体反応の中で、ガス放出に関する新しい知見を得るため、輪切りにしたキュウリ切断面の方向に依存したガス放出の研究をおこなった。キュウリ切断面の向きが成長軸の向きと同方向か逆方向かの違いによって、ガスの放出量が異なっているのではないかと考え、ガス濃度と成長軸との関係を検証した。実験の結果、キュウリ切断面の方向が、成長軸の向きと逆方向の場合、同方向の場合と比べて、ガス濃度が平均で約 7.5ppm(約 2%)高くなることを実証した

($p=3.8 \times 10^{-2}$, $n=1817$)。夏期と冬期のデータを比較した場合、季節に関係なくガス濃度と成長軸との関係が確認された。同様に昼と夜のデータを比較した場合においてもガス濃度と成長軸との関係が確認された。さらに、切断面の方向が違う表面から放出したガス濃度の比を計算した結果、昼と夜とでは比の値が変化することが判明した ($p=1.5 \times 10^{-6}$, $n=1292$ 昼, $n=525$ 夜)。解析の結果、比の値は概日リズム (1 周期が 24h) や複数の周期変動 (1 周期が 12h,4.8h,1.8h) が合成した波形で振動していることを発見した。

1. 序文

野菜や果物などの植物において、収穫後も生体反応が長期間持続することが知られている[1]。生体反応の一つの例として、植物が何らかの刺激や外傷を受けた後にガスを放出することがある。植物は様々な種類のガスを放出することによって、植物同士のコミュニケーション、植物・昆虫・細菌間での共存のための情報交換、外敵からの防御や免疫作用等の反応をしていると考えられている[2-5]。従って収穫後の野菜や果物の生体反応の研究は、植物の未だ知られていない能力や性質の解明、また実利的には害虫対策や流通、保管等の対策上重要である。

我々はこれまでに収穫後のキュウリ果実を使って、輪切りにされた切断面から放出されるガス濃度に関する研究をおこなった。その結果、キュウリに傷をつける切片作成時の時刻と、その後放出されたガス濃度との間に概日リズムなどの周期性があることを解明した。ガス濃度の周期性が季節によって異なり、夏期は1周期が6時間、冬期は1周期が24時間の周期変動をすることが発見された[6]。季節の違いによって、ガス

濃度の周期変化に違いが生じた理由として、キュウリは外敵からの防御に有効な時間帯に合わせて、ガス生成反応の調節をおこなっている可能性が考えられる。

本論文の目的は、キュウリ果実を傷つけた後の生体反応であるガス放出に関する新しい知見を得ることである。我々はキュウリ切断面の方向に依存したガス濃度に着目し、キュウリ切断面の向きが成長軸の向きと同方向か逆方向かの違いでガス濃度が異なるかどうかを検証した。実験の結果、キュウリ切断面の向きが、成長軸の向きと逆方向の場合、同方向の場合と比べて、ガス濃度が平均で約7.5ppm(約2%)高くなることを実証した ($p=3.8 \times 10^{-2}$, $n=1817$)。夏期と冬期のデータを比較した場合、季節に関係なくガス濃度と成長軸との関係が確認された。同様に昼と夜のデータを比較した場合においてもガス濃度と成長軸との関係が確認された。また、向きが異なる切断面から放出されたガス濃度の比を計算した結果、昼と夜とでは比の値が変化することが判明した ($p=1.5 \times 10^{-6}$, $n=1292$ 昼, $n=525$ 夜)。解析の結果、比の値は概日リズム (1周期が24h) や複数の周期変動 (1周期が12h, 4.8h, 1.8h) が合成した波形で振動していることを発見した。本論文の研究成果は、キュウリ切片を特異な空間特性を検出するためのセンサとして使用する上で、より測定精度を上げるために必要な基礎データとなる可能性がある。

2. 実験

2-1. キュウリ切断面から放出されたガス濃度の測定

生体反応によって切断面から放出されたガス濃度測定のため、零点同時補正法 (Simultaneous Calibration Technique : SCAT) による試料作成をおこなった[7]。この方法は、実験ポイントで測定されたガス濃度を較正基準点で測定されたガス濃度によって補正することが可能である。補正された実験ポイントのデータは、キュウリ個体のばらつきや、周囲の環境条件の違いによって発生する測定データの偏りが排除されている。従って実験ポイントでは、キュウリのガス生成反応系に何らかの影響を与える、微小な効果の検出が可能となった。我々はこれまでに、SCATを用いて既存のセンサでは検出が困難であった、特異な空間特性の検出に成功した [8-11]。しかし本研究においては、実験ポイントにおける空間特性の影響を受けていない、較正基準点に設置されたキュウリサンプルのみに着目し、キュウリ切断面の向きが成長軸の向きと同方向か逆方向かの違いによってガス濃度が異なるかどうかの検証を試みた。

2-2. 試料の作成および設置方法

キュウリ切片試料の準備に関して、Fig.1(a)~(c)に示した。実験の1セット (最小実験単位) は、キュウリを4本、ペトリ皿8個が使用された。4本のキュウリは蔓側と花側が揃った状態で準備された(Fig.1 (a))。キュウリの方向に関する定義は次のとおりである。(1) 成長軸の方向を、キュウリ果実の蔓側から花側の方向とした。(2) キュウリ切断面の方向は、キュウリ切片をペトリ皿に置いた時、上面の切断面に対してのみ考え、その方向はペトリ皿に対して垂直で、ペトリ皿に触れている下面から大気に触れている上面の方向とした。(Fig.1 (b))

キュウリ切片試料の作成は以下のようにおこなわれた。キュウリ A の、蔓側の方から見て太さが均一でない3~5cmの部分切り落とされた(Fig.1(b))。太さが均一になった部分から長さ2cmの切片が4個(A1~A4)切り出された。長さ2cmの切片A1はさらに半分に切断され、それぞれ別々のペトリ皿に置かれた(Pair 1)。A2~A4の切片もA1と同様に半分に切断され、それぞれ別々のペトリ皿に置かれ、Pair 2~Pair 4が作成された。キュウリ B~D についてもキュウリ A と同様に切断され、Pair 1~Pair 4のペトリ皿に置かれた。た

だし、キュウリ個体のばらつきや蔓側からの距離の違いによる影響を排除するため、各ペトリ皿には4本のキュウリから各1切片ずつ、計4個のキュウリ切片が均等に配置された。Pair 1 ~ Pair 4において、ペトリ皿に置かれたキュウリ切片の上面が成長軸と同方向の試料が実験試料 ($G_{E1} \sim G_{E4}$)、逆方向の試料が対照試料 ($G_{C1} \sim G_{C4}$) とされた(Fig.1(c))。SCATでは、実験試料の2個ペトリ皿 (G_{E1}, G_{E2}) が実験ポイントに重ねて設置された。また G_{E1}, G_{E2} とペアである対照試料 G_{C1}, G_{C2} 及び $G_{E3}, G_{E4}, G_{C3}, G_{C4}$ の試料は2個ずつ重ねて実験ポイントから充分離れた校正基準点に設置された。

我々はキュウリ切断面から放出されるガス濃度が、切断面の方向に依存するかどうかを厳密に比較するため、何らかの外的影響を受ける可能性がある、実験ポイント上の実験試料 G_{E1}, G_{E2} およびそのペアの対照試料 G_{C1}, G_{C2} を解析対象から除外した。その結果、切断面の方向以外全く同じ条件にある Pair3(G_{E3}, G_{C3})と Pair4(G_{E4}, G_{C4})のデータが解析された。キュウリ切断面の向きが成長軸と同方向である G_{E3} および G_{E4} の平均値を E、キュウリ切断面の向きが成長軸と逆方向である G_{C3} および G_{C4} の平均値を C とした(Fig.1(c))。E 及び C のデータ数はそれぞれ $n=1817$ であった。

本実験で使用したキュウリは全て日本産で、日本の市場で一般的に流通している食用白いぼキュウリ(ウリ科キュウリ属: *Cucumis sativus* 'white spine type' cucumber) であった[12]。一般的に日本産のキュウリは品質が一定で、形状も太さも揃っている。従って、作成された試料のペアどうしは、重量もほぼ一致していると考えられる。つまり、Fig.1(c)における(G_{E3}, G_{E4})と(G_{C3}, G_{C4})は、キュウリ切断面の方向が違う以外は全て同じ状態である。また、ペトリ皿に置かれたキュウリ切片の下面はペトリ皿と密着しており、下面からのガス放出は無視できると考えられる。

2-3. ガス濃度の測定

キュウリ切片試料は作成後、実験ポイントおよび校正基準点に30分間設置された。その後、ペトリ皿の蓋が取られ容積が2.2リットルのポリプロピレン製の密閉容器の中に設置された。密閉容器の中で、切断面からヘキサノール-ヘキサノール系ガスが放出された。キュウリから放出されるガスの成分は、主に16種類であることが判明している[13,14]。約12時間後、密閉容器の中で放出されたガス濃度は最大に達し、その後平衡状態を保っている。試料を入れた密閉容器は24時間以上、直射日光が当たらず室温が約23~24度に保たれた部屋に保管された。保管後、ガス検知器(GV-100:ガステック、日本)及びガス検知管(141L:ガステック、日本)を使用して、密閉容器中の気体を300ml吸引しガス濃度が測定された。

ガス検知管(141L)は、2-ヘキサノールガスの測定が可能である。2-ヘキサノールを測定した場合、換算係数が3であるため、検知管の読み値(ppm)を3倍することによって、2-ヘキサノールガス濃度の絶対値が決まる。しかし、キュウリ切片から放出される16種類の混合ガスの中には、2-ヘキサノールの異性体等が含まれている。本来であれば、2-ヘキサノール異性体の構成比及び換算係数からガス濃度の絶対値を決定すべきである。しかし、現時点では2-ヘキサノール異性体の換算係数は分かっていない。

本論文の目的は、放出されたガス濃度の絶対値を求めることではなく、ガス濃度が切断面の方向の違いによって異なるかどうかを明らかにすることである。そのため我々は本論文において、検知管の読み値(ppm)をそのままガス濃度として利用し解析をおこなった。

実験は、2010年から2017年にかけて、年間を通しておこなわれた。実験回数は、最小実験単位で1817セットであった(キュウリの使用本数7268本)。本論文で使用したデータの一部は既報論文で使用された[8-11]。

3. 実験結果および解析結果

Fig.2 がガス濃度の測定結果である。キュウリ切断面の方向が、成長軸の向きと同方向の場合 ($E=(G_{E3}+G_{E4})/2$)と成長軸の向きと逆方向の場合($C=(G_{C3}+G_{C4})/2$)の結果である。縦軸がガス濃度(ppm)、横軸が試料作成時刻(試料設置時刻)で0時から24時までの24時間を示す。紫色四角■がEの結果、緑色菱形◆がCの結果である。データ数はそれぞれ $n=1817$ 。Fig.2(b)はEとCの平均値である。誤差棒は99%信頼区間である。キュウリ切断面の方向が成長軸の向きと逆方向の場合(C)、同方向の場合(E)と比べて、ガス濃度が平均で約7.5ppm(約2%)高くなるのが分かる。

Fig.3 がガス濃度比 $\ln(E/C)$ の結果である。横軸は試料作成時刻で0時から0時までの24時間を示す。三角赤▲が $\ln(E/C)$ をプロットした結果である。データ数は $n=1817$ 。Fig.3(b)は $\ln(E/C)$ の平均値。誤差棒は99%信頼区間。 $\ln(E/C)$ の平均値の値が有意にマイナスであることが分かる ($E<C$)。

Fig.4(a)~(c)がガス濃度E,Cおよび $\ln(E/C)$ のヒストグラムの結果である。横軸の値は中央値である。解析の結果、Fig.4(a)~(c)は正規分布でも対数正規分布でもないことが判明した。

Fig.5(a)は、E,Cのデータを夏期と冬期とに分けて比較した結果である。緑色が全データ($n=1817$)、赤色が夏期データ($n=998$)、青色が冬期データ($n=819$)である。夏データとは昼の長さが12時間以上ある時におこなった実験結果であり、冬データはそれ以外の実験結果である。Fig.5(b)は、E,Cのデータを昼と夜とに分けて比較した結果である。緑色が全データ($n=1817$)、黄色が昼データ($n=1292$)、黒色が夜データ($n=525$)の結果である。昼データとは、6:00から18:00の間におこなった実験結果であり、夜データは18:00から翌日の6:00までにおこなった実験結果である。Fig.5(c)は、 $\ln(E/C)$ のデータを夏期と冬期とに分けた結果である。Fig.5(d)は、 $\ln(E/C)$ のデータを昼と夜とに分けた結果である。EおよびCの全データの平均値はそれぞれ、357.9 ppm, 365.3 ppmである。また検定の結果、EとCの間には有意の差が検出された($p=3.8 \times 10^{-2}$, $n=1817$)。誤差棒は、99%信頼区間である。Fig.5(c),(d)はガス濃度比 $\ln(E/C)$ の平均値の結果である($n=1817$)。Fig.5(c)は、全データ(緑色)、夏データ(赤色)および冬データ(青色)を比較した。Fig.5(d)は、全データ(緑色)、昼データ(黄色)および夜データ(黒色)を比較した。全データの平均値は-0.028。誤差棒は99%信頼区間である。この結果から $\ln(E/C)<0$ が有意であることが示され、 $E<C$ であることが実証できた。また、昼データと夜データの間には有意の差が検出された($p=1.5 \times 10^{-6}$, $n=1292$ 昼, $n=525$ 夜)。

Fig.6 はE,Cおよび $\ln(E/C)$ の移動平均の結果である。ステップは1分きざみである。Fig.6(a),(b)はE(青色)およびC(緑色)の結果で、Fig.6(a)は移動平均窓長が60分、Fig.6(b)は窓長が360分である。Fig.6(b)より20:00から翌日の10:00頃までEとCの間に差が現れている。Fig.6(c),(d)は $\ln(E/C)$ の結果で、Fig.6(c)は移動平均窓長が60分、Fig.6(d)は移動平均窓長が360分の結果である。Fig.6(d)の結果から、キュウリ切断面の向きの違いによって、ガス濃度の変化が異なることが明らかになった。特に20:00から翌日の10:00まで、方向性の違いによるガス濃度に違いが現れた。

Fig.7 は $E=(G_{E3}+G_{E4})/2$, $C=(G_{C3}+G_{C4})/2$ および $\ln(E/C)$ と周期近似曲線との相関係数を示す。ここで周期近似曲線に関して説明する。較正基準点に設置された $G_{E3}, G_{E4}, G_{C3}, G_{C4}$ は、キュウリ切片作成時からガス濃度測定まで、環境条件が同一である。そのため、 $G_{E3}, G_{E4}, G_{C3}, G_{C4}$ の生体反応は同期していると考えられる。生体反応に一定のリズムがあるならば、E,Cもリズムをもって変化すると考えられる。EとCが周期的に変化しているかどうかを検証するため、(1)式に示した周期近似曲線を導入した。

$$y = a + b \sin(2\pi x N) + c \cos(2\pi x N) = a + \sqrt{b^2 + c^2} \sin(2\pi x N + \varphi), \quad \varphi = \arcsin\left(\frac{c}{\sqrt{b^2 + c^2}}\right) \dots (1)$$

ここで、 a, b, c は定数。 π は円周率である。 x は時刻を表すが、0時から24時の時刻が、0から1の数値に対応している。周期近似曲線として(1)式を仮定した理由は、キュウリは生物として基本的に概日リズム(1周期が24時間)をもつため、生体反応によって放出されるガス濃度の変化も24時間ごとに位相が一致すると予想したためである。 N は24時間あたりの周期数であり、ここでは N を1から24の整数と考える。従って(1)式は、 $N=1$ の場合1周期が24時間、 $N=24$ の場合1周期が1時間の周期近似曲線を表している。 N が1から24のそれぞれの値で、 E および C の周期近似曲線を求め、定数 a, b, c を確定する。その後、 E および C と周期近似曲線との相関係数を計算する。相関係数が有意であると判断された場合、周期近似曲線の周期が、ガス濃度の周期であり、さらには生体反応の周期でもあると結論することができる。

Fig.7(a)は、 E, C および $(E+C)/2$ と周期近似曲線との相関係数である。紫色四角■が E 、緑色菱形◆が C 、赤色丸●が $(E+C)/2$ の結果である($n=1817$)。図中のラインは、データ数が $n=1817$ のとき、相関係数が有意であるかどうかを判断するための検定値である。有意水準がそれぞれ0.01%(red line), 0.1%(blue line), 1%(black line)である。検定値はそれぞれ、0.0911, 0.0771, 0.0604である。この結果から E, C は、 $N=1$ (1周期24時間)および $N=4$ (1周期6時間)の周期で変化していることが分かる。この結果は、以前我々が報告した内容と同じものになった。以前の報告では、データ数が本論文より少なく ($n=1056$)、また $(GC1+GC2+GE3+GE4+GC3+GC4)/6$ を解析データとして採用した[6]。Fig.7(b)は $\ln(E/C)$ とその周期近似曲線との相関係数である。この結果から $\ln(E/C)$ が周期的に変化していると考えられる。24時間あたりの周期数 N は主に $N=1, 2, 5, 13$ の場合が有意であり、相関係数の値はそれぞれ0.143, 0.103, 0.078, 0.107である。

Fig.8(a)は $\ln(E/C)$ の周期近似曲線である。Fig.7(b)の結果から、相関係数が有意である場合の $\ln(E/C)$ に関する周期近似曲線をプロットした ($N=1$ (赤色), 2(緑色), 5(青色), 13(橙色))。Fig.8(b)は $N=1, 2$ の合成近似曲線、Fig.8(c)は $N=1, 2, 5, 13$ の合成近似曲線である。Fig.8(d)は $\ln(E/C)$ に関して、60分窓長の移動平均 (Fig.6(c)) と合成近似曲線 (Fig.8(c)) とを重ねてプロットしたものである。Fig.8(e)は $\ln(E/C)$ に関して、360分窓長の移動平均 (Fig.6(d)) と合成近似曲線 (Fig.8(b)) とを重ねてプロットしたものである。移動平均と合成近似曲線が非常に良く一致していることが分かり、 $\ln(E/C)$ が周期的に変化していることが実証された。

Fig.9は E, C および $\ln(E/C)$ の移動平均の fast Fourier transform (FFT) 分析の結果である。Fig.9(a)は E, C の60分窓長の移動平均 (Fig.6(a)) の FFT 分析である。横軸は Hz。赤線が E 、青線が C の結果である。図中に現れている代表的なピークに対して、Fig.7(a)の24時間あたりの周期数 N を対応させた ($N=1, 2, 4, 13$)。Fig.9(b)は E, C の360分窓長の移動平均 (Fig.6(b)) の FFT 分析である。Fig.9(c)は $\ln(E/C)$ の60分窓長の移動曲線 (Fig.6(c)) の FFT 分析である。図中に現れている代表的なピークに対して、Fig.7(b)の24時間あたりの周期数 N を対応させた ($N=1, 2, 5, 13$)。Fig.9(d)は $\ln(E/C)$ の360分窓移動曲線 (Fig.6(d)) の FFT 分析である。移動平均の FFT 分析の結果からも Fig.8と同様に $\ln(E/C)$ が周期的に変化していることが実証された。

4. 結果と考察

我々は、キュウリ切断面の方向が成長軸の向きと同方向か逆方向かの違いによって、ガス濃度に差が検出できるのではないかと仮説をたてて検証実験をおこなった。実験の結果、以下のことが判明した。(1) 全データ ($n=1817$) の解析において、キュウリ切断面の方向が、成長軸の向きと同方向である場合(ガス濃度 E) と逆方向の場合(ガス濃度 C) とを比べると $E < C$ となり、 E と C の差が平均で約 7.5ppm (約 2%) 検出できた ($p=3.8 \times 10^{-2}$, $n=1817$) (Fig.2(b), Fig.5(a), (b))。この結果、キュウリ切断面の方向が、成長軸の向きと同方向か逆方向かによって、放出されたガス濃度が違うことが実証された。(2) 夏期 ($n=998$) と冬期 ($n=819$) のデー

夕解析をした結果、キュウリ切断面の方向の違いによるガス濃度の違いは季節によらずに存在した。季節によらず $E < C$ が実証された (Fig.5(a))。 (3) 昼($n=1292$)と夜($n=525$)にデータを分けて解析した場合も、キュウリ切断面の方向の違いによるガス濃度の違いが昼夜によらずに存在し、 $E < C$ となることが実証された (Fig.5(b))。 (4) $\ln(E/C)$ の平均値は、夏期と冬期では有意の差がなかったが、昼と夜とでは有意な差が検出された($p=1.5 \times 10^{-6}$) (Fig.5(d))。 (5) $\ln(E/C)$ が昼と夜で有意の差が検出されたため、 $\ln(E/C)$ の時間変化を解析した。その結果、 $\ln(E/C)$ が周期的に変化していることを発見した。24時間あたりの周期数 N は $N=1,2,5,13$ の場合に $\ln(E/C)$ と周期近似曲線との相関係数が高く (Fig.7(b))、 $\ln(E/C)$ が、概日リズム (1周期が 24 h) および複数の周期リズム (1周期が 12 h, 4.8 h, 1.8 h) の合成した周期変動をしていることが分かった。またこの結果は FFT 分析によっても確認された (Fig.9(c))。

本論文の研究成果によって、キュウリ切断面から放出されたガス濃度が成長軸と関連性があること、またガス濃度が複数の周期性をもって変化していることが明らかにされた。これらの結果は、キュウリ切片を特異な空間特性を検出するためのセンサとして使用する上で、より測定精度を上げるために必要な基礎データとなる可能性がある。

本研究の一部は坂本ハイパーテック・プロジェクト (Sakamoto Hyper-tech Project : SHyP) として、(株) アクアヴィジョン・アカデミー (代表取締役 坂本政道) と国際総合研究機構 (International Research Institute : IRI) (理事長 山本幹男) の共同研究として行われた。

参考文献

- [1] Goodspeed, D., Liu, J.D., Chehab, E.W., Sheng, Z., Francisco, M., Kliebenstein, D.J. & Braam, J. Postharvest Circadian Entrainment Enhances Crop Pest Resistance and Phytochemical Cycling. *Current Biology*. **23**(13), 1235-1241 (2013).
- [2] Farmer, E. E. Surface-to-air signals. *Nature*. **411**, 854–856 (2013). Doi :10.1038/35081189.
- [3] Ozawa, R., Arimura, G., Takabayashi, J., Shimoda, T. & Nishioka, T. Involvement of Jasmonate- and Salicylate-Related Signaling Pathways for the Production of Specific Herbivore-Induced Volatiles in Plants. *Plant and Cell Physiology*. **41**(4), 391–398 (2000).
- [4] De Moraes, C. M., Lewis, W. J., Paré, P. W., Alborn, H. T. & Tumlinson, J. H. Herbivore-infested plants selectively attract parasitoids. *Nature*. **393**, 570–573 (1998). Doi:10.1038/31219.
- [5] De Moraes, C. M., Mescher, M. C. & Tumlinson, J. H. Caterpillar-induced nocturnal plant volatiles repel conspecific females. *Nature*. **410**, 577–580 (2001). Doi:10.1038/35069058.
- [6] Takagi, O., Sakamoto, M., Yoichi, H., Kokubo, H., Kawano, K. & Yamamoto, M. Discovery of seasonal dependence of bio-reaction rhythm with cucumbers. *International Journal of Science and*

Research Methodology. **9**(1), 163-175 (2018). Doi: 10.25166.

- [7] Kokubo H., Takagi O. & Koyama S. Application of a gas measurement method - Measurement of ki fields and non-contact healing -. J. Intl. Soc. Life Info. Sci. **28**(1), 95-112 (2010).
- [8] Takagi, O., Sakamoto, M., Kokubo, H., Yoichi, H., Kawano, K. & Yamamoto, M. Meditator's non-contact effect on cucumbers. Int. J. Phys. Sci. **8**(15), 647-651 (2013). Doi:10.5897/IJPS2012.3800.
- [9] Takagi, O., Sakamoto, M., Yoichi, H., Kokubo, H., Kawano, K. & Yamamoto, M. Discovery of an anomalous non-contact effect with a pyramidal structure. ijSciences. **4**(5), 42-51 (2015). Doi:10.18483/ijSci.714.
- [10] Takagi, O., Sakamoto, M., Yoichi, H., Kokubo, H., Kawano, K. & Yamamoto, M. An unknown force awakened by a pyramidal structure. ijSciences. **5**(6), 45-56 (2016). Doi: 10.18483/ijSci.1038
- [11] Takagi, O., Sakamoto, M., Yoichi, H., Kokubo, H., Kawano, K. & Yamamoto, M. Necessary condition of an anomalous phenomenon discovered by a pyramidal structure. J. Intl. Soc. Life Info. Sci. **34**(2), 154-157 (2016).
- [12] Kokubo H. (2015) Ki or Psi - Anomalous Remote Effects of Mind-Body System. Nova Science Publishers, Inc. ISBN-10: 1634829549.
- [13] Hatanaka, A. The biogeneration of green odor by green leaves. Phytochemistry. **34**, 1201-1218 (1993).
- [14] Hatanaka, A. The fresh green odor emitted by plants. Food Rev. Int. **12**, 303-350 (1996).

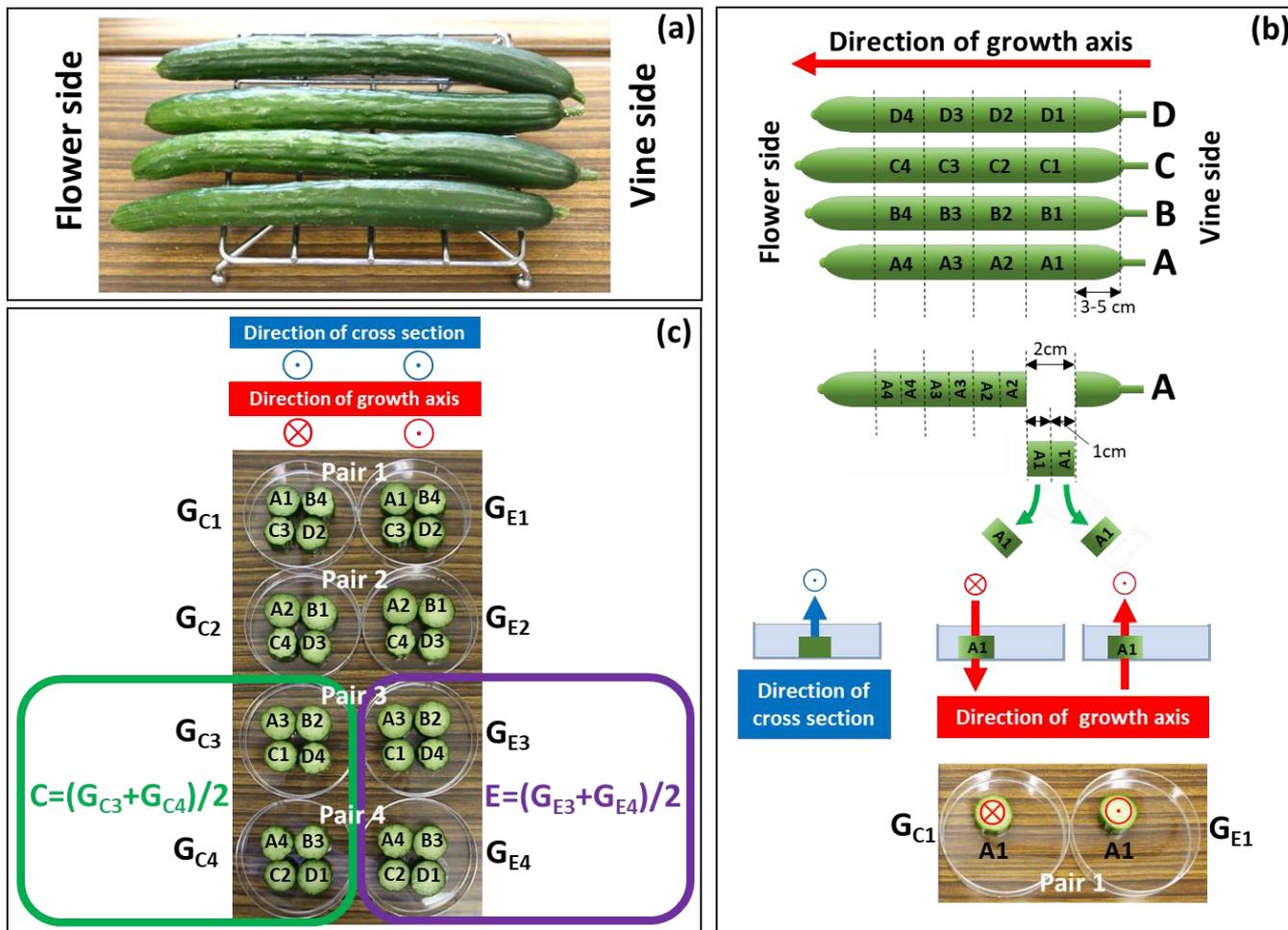


Fig.1 実験試料作成

実験の1セット(最小実験単位)において、キュウリ4本、ペトリ皿8個が使用された。4本のキュウリは蔓側と花側を揃えて準備された(Fig.1(a))。キュウリの蔓側から花側に向かう方向を成長軸の方向と定義した。またキュウリ切片の上面の方向を上向きに定義した(Fig.1(b))。実験サンプルの作成では、まずキュウリAの蔓側の太さが均一でない3~5cmの部分が切り落とされた。太さが均一になった部分から幅2cmの切片が4個切り出された(A1~A4)。A1切片はさらに半分に切断され、それぞれ別のペトリ皿に置かれた(Pair1)。A2~A4切片もA1と同様に半分に切断され、それぞれ別々のペトリ皿に置かれ、Pair2~Pair4が作成された。キュウリB~DもキュウリAと同様に切断され、Pair1~Pair4間の差がおきないようにキュウリ切片が置かれた。Pair1~Pair4において、キュウリ切片の上面の方向と成長軸の方向が一致した試料が実験試料G_{E1}~G_{E4}、不一致の試料が対照試料G_{C1}~G_{C4}とされた(Fig.1(c))。

SCATにおいて、G_{E1},G_{E2}は実験試料として実験ポイントに、G_{C1},G_{C2},G_{E3},G_{E4},G_{C3},G_{C4}は校正基準点に設置される。本研究ではキュウリのガス放出の特性を検出するため、実験ポイントの影響を受けないと考えられるG_{E3},G_{E4},G_{C3},G_{C4}を解析対象データとした。G_{E3}およびG_{E4}の平均をE、G_{C3}およびG_{C4}の平均をCとした(Fig.1(c))。E及びCのデータ数はそれぞれn=1817であった。

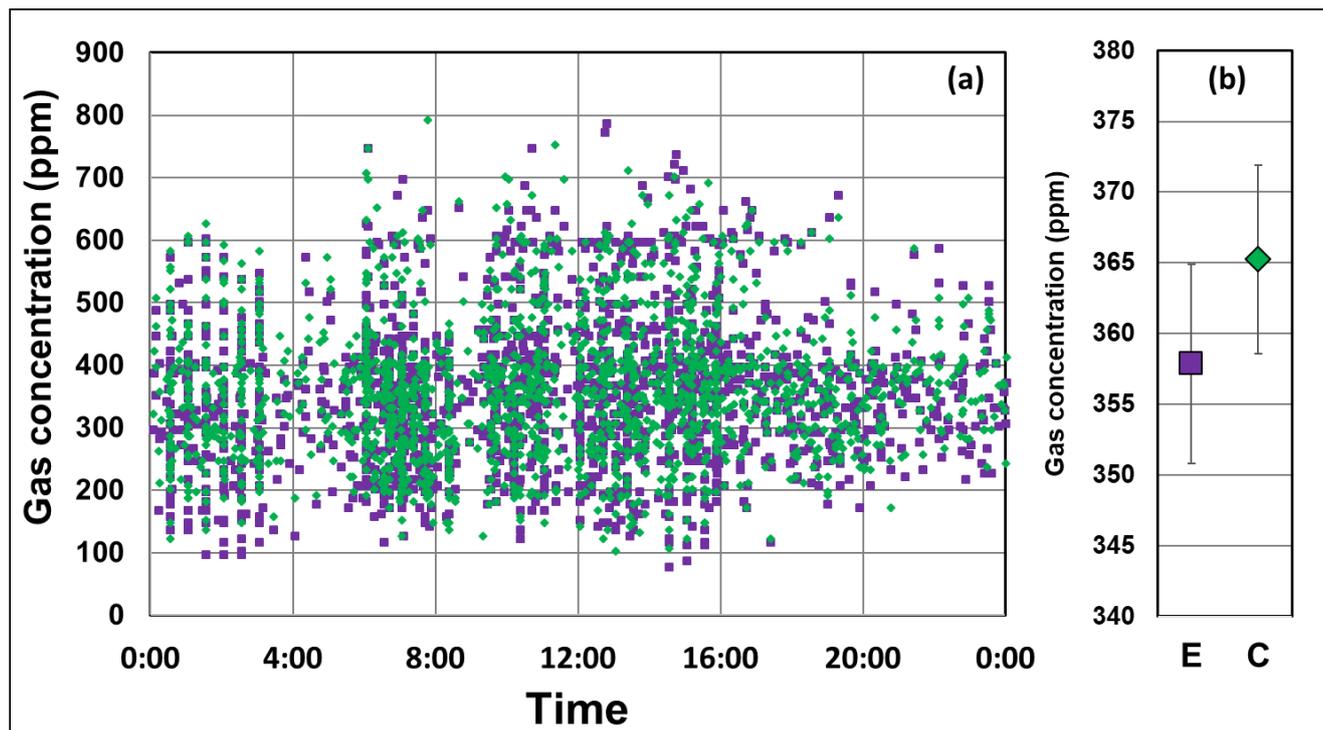


Fig.2 ガス濃度 E および C

縦軸がガス濃度 $E=(G_{E3}+G_{E4})/2$ および $C=(G_{C3}+G_{C4})/2$ の結果である。横軸は試料を設置した時刻で 0 時から 0 時までの 24 時間を示す。四角紫■が E、菱形緑◆が C の結果である(Fig.2(a))。データ数はそれぞれ $n=1817$ である。Fig.2(b)は E と C の平均である。誤差棒は 99%信頼区間である。

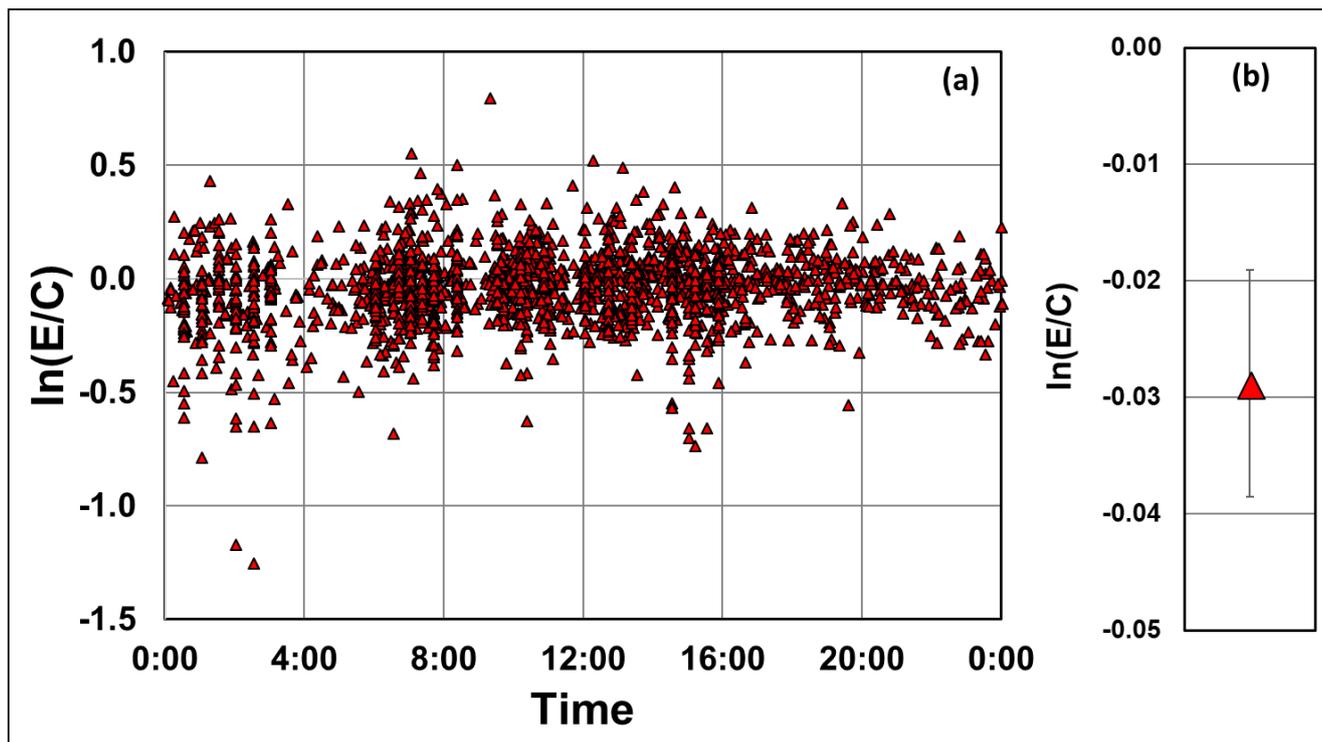


Fig.3 ガス濃度比 $\ln(E/C)$

縦軸が E と C の比の対数、 $\ln(E/C)$ である。横軸は試料を設置した時刻で 0 時から 0 時までの 24 時間を示す。三角赤▲が $\ln(E/C)$ をプロットした結果である(Fig.3(a))。データ数 $n=1817$ 。Fig. 3 (b)は $\ln(E/C)$ の平均である。誤差棒は 99%信頼区間である。

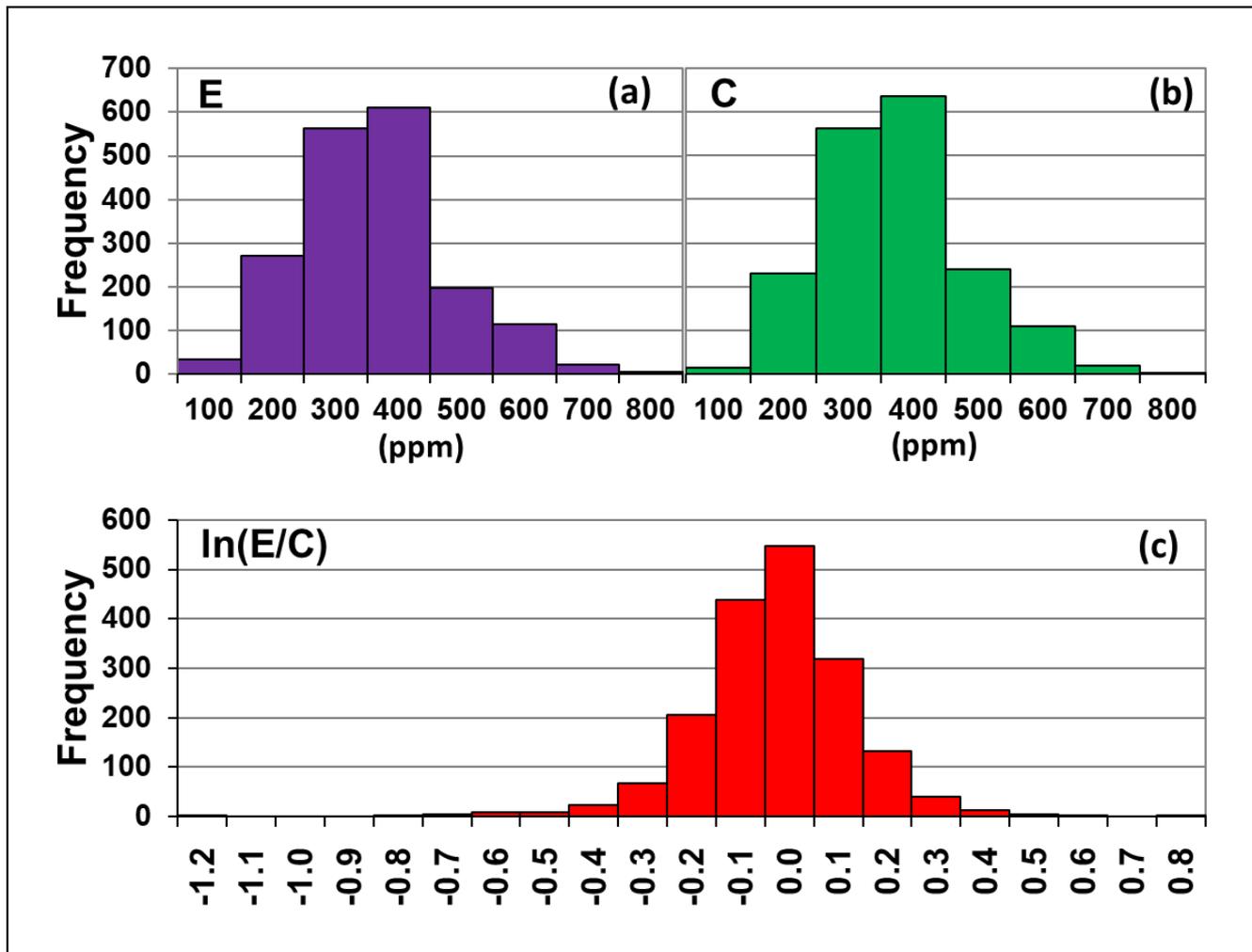


Fig.4 ガス濃度 E,C およびガス濃度比 ln(E/C)のヒストグラム

Fig.4(a) ~ (c)は、E, C, ln(E/C)のヒストグラムである。横軸の値は中央値である。解析の結果、いずれも正規分布および対数正規分布でないことが判明した。

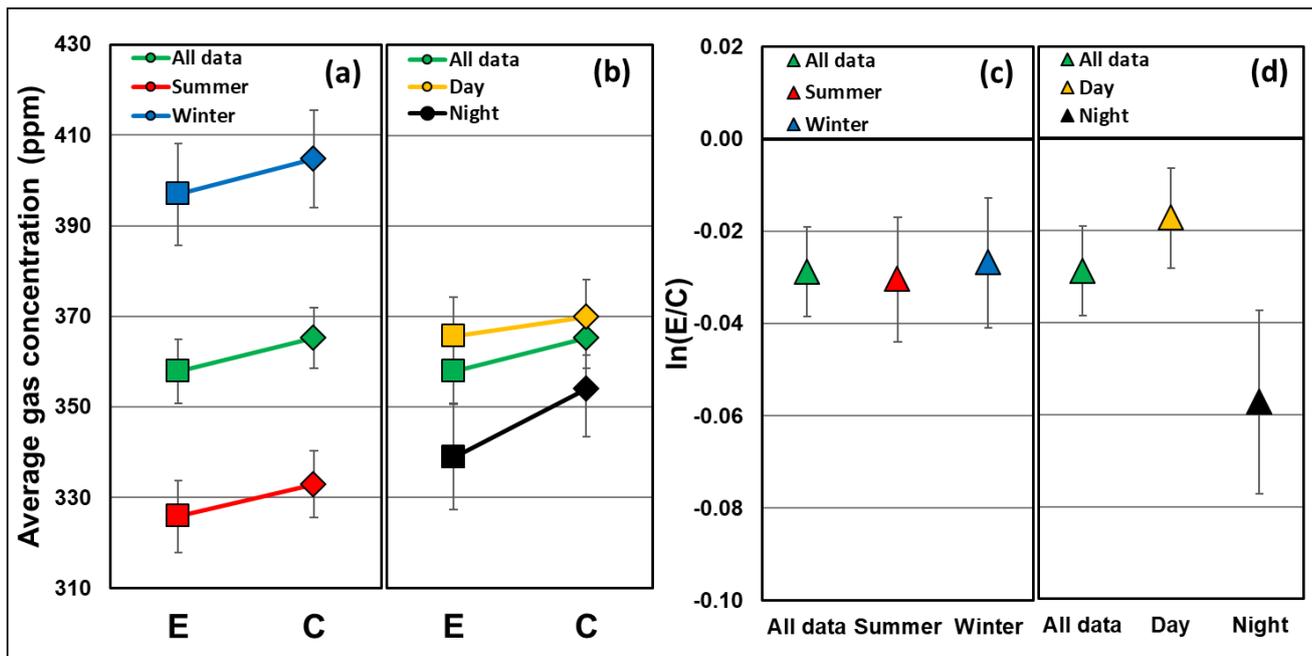


Fig.5 ガス濃度 E,C の平均およびガス濃度比 $\ln(E/C)$ の平均の比較

Fig.5(a),(b)はE及びCの平均ガス濃度の結果である。Fig.5(a)の場合、緑色が全データ(n=1817)、赤色が夏データ(n=998)、青色が冬データ(n=819)の結果である。夏データとは昼の長さが12時間以上ある時におこなった実験結果であり、冬データはそれ以外の実験結果である。Fig.5(b)の場合、緑色が全データ(n=1817)、黄色が昼データ(n=1292)、黒色が夜データ(n=525)の結果である。昼データとは、6:00から18:00の間におこなった実験結果であり、夜データは18:00から翌日の6:00までにおこなった実験結果である。

EおよびCの全データの平均値はそれぞれ、357.9ppm、365.3ppmである。また検定の結果、EとCの間には有意の差が検出された ($p=3.8 \times 10^{-2}$, $n=1817$)。誤差棒は、99%信頼区間である。

Fig.5(c),(d)はガス濃度比の対数、 $\ln(E/C)$ の平均値の結果である(n=1817)。Fig.5(c)の場合、全データ(緑色)、夏データ(赤色)および冬データ(青色)を比較した。Fig.5(d)の場合、全データ(緑色)、昼データ(黄色)および夜データ(黒色)を比較した。全データの平均値は-0.028。誤差棒は99%信頼区間である。この結果から $\ln(E/C) < 0$ が有意であることが示され、E > C であることが検証できた。また、昼データと夜データの間には有意の差が検出された($p=1.5 \times 10^{-6}$)。

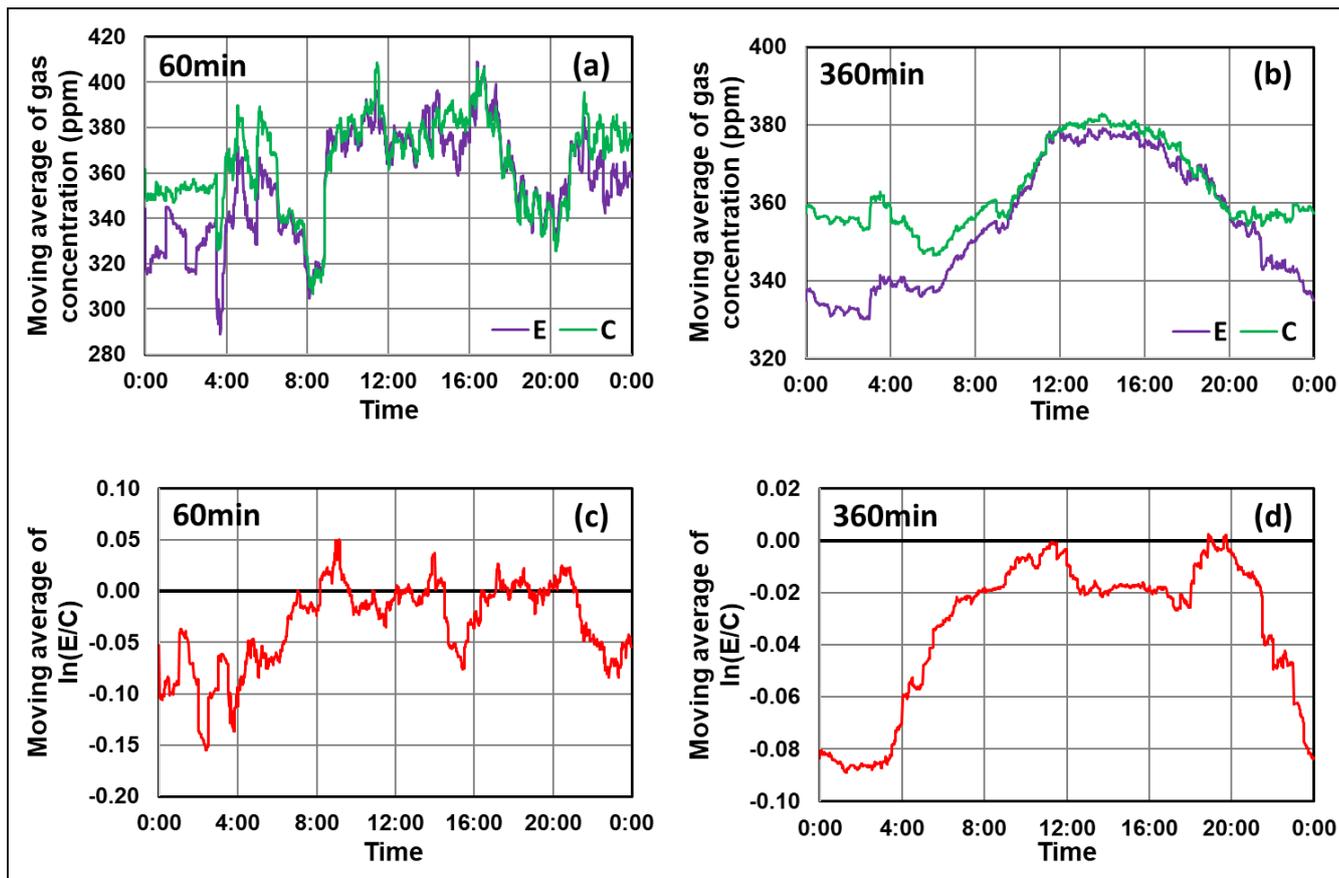


Fig.6 ガス濃度 E,C およびガス濃度比 $\ln(E/C)$ の移動平均

Fig.6(a),(b)はEおよびCの移動平均で、Fig.6(a)は60分窓、Fig.6(b)は360分窓の移動平均である。Fig.6(c),(d)は $\ln(E/C)$ の移動平均で、Fig.6(c)は60分窓、Fig.6(d)は360分窓の移動平均である。ステップは全て1分さみである。

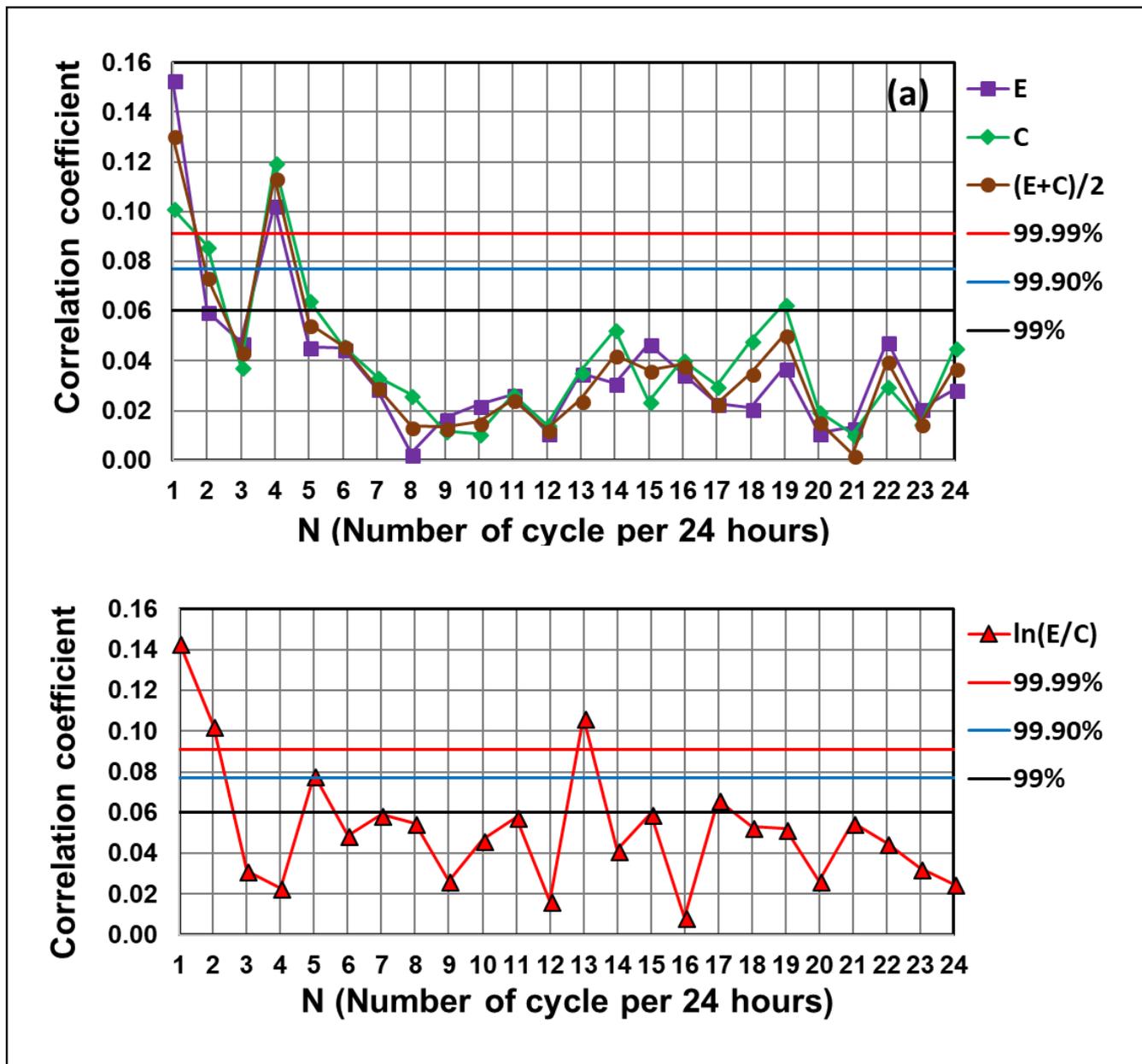


Fig.7 ガス濃度 E,C およびガス濃度比 ln(E/C)の周期近似曲線との相関係数

Fig.7(a)はガス濃度 E,C と周期近似曲線との相関係数。縦軸が相関係数で横軸が周期近似曲線の 24 時間あたりの周期数(N)。紫色■が E、緑色◆が C、赤色●が(E+C)/2 の結果である(n=1056)。赤線が 0.01%、青線が 0.1%、黒線が 1%有意を採用した場合、相関係数が有意であるかどうかを判断するための検定値(n=1817)。検定値はそれぞれ、0.0911,0.0771,0.0604 である。Fig.7(b)はガス濃度比 ln(E/C)とその周期近似曲線との相関係数。

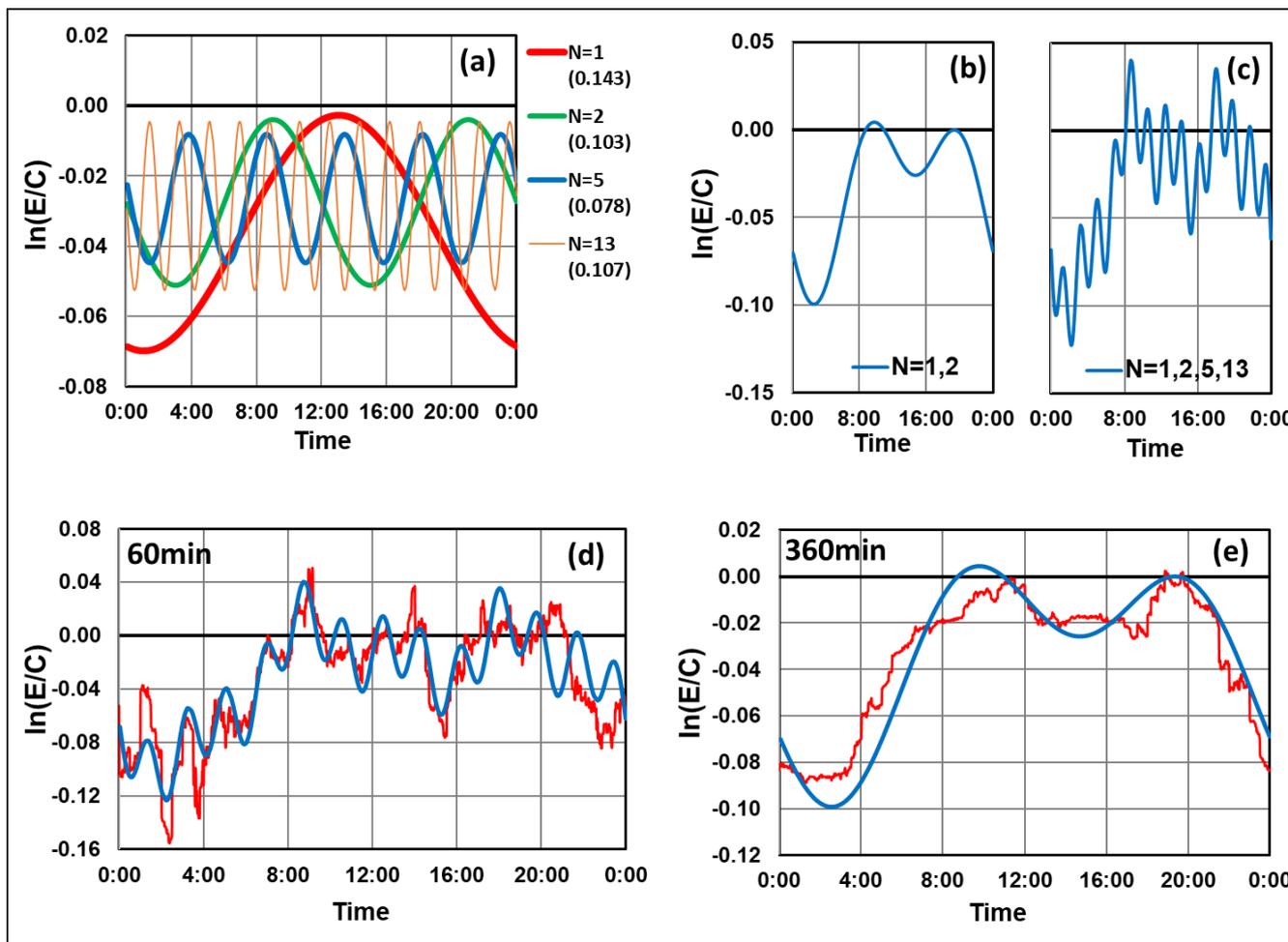


Fig.8 ガスの濃度比 $\ln(E/C)$ の近似曲線

Fig.8(a)は $\ln(E/C)$ の周期近似曲線。Fig.7(b)から相関係数が高い、周期数 N が 1(赤色),2(緑色),5(青色),13(橙色)の場合をプロットした。相関係数はそれぞれ 0.143,0.103,0.078,0.107 である。Fig.8(b)は周期数 $N=1,2$ の合成近似曲線、Fig.8(c)は周期数 $N=1,2,5,13$ の合成近似曲線である。Fig.8(d)は $\ln(E/C)$ の 60 分窓移動平均(Fig.6(c))と Fig.8(b)の合成近似曲線を重ねてプロット、Fig.8(e)は $\ln(E/C)$ の 360 分窓移動平均(Fig.6(d))と Fig.8(c)の合成近似曲線を重ねてプロットしたもの。

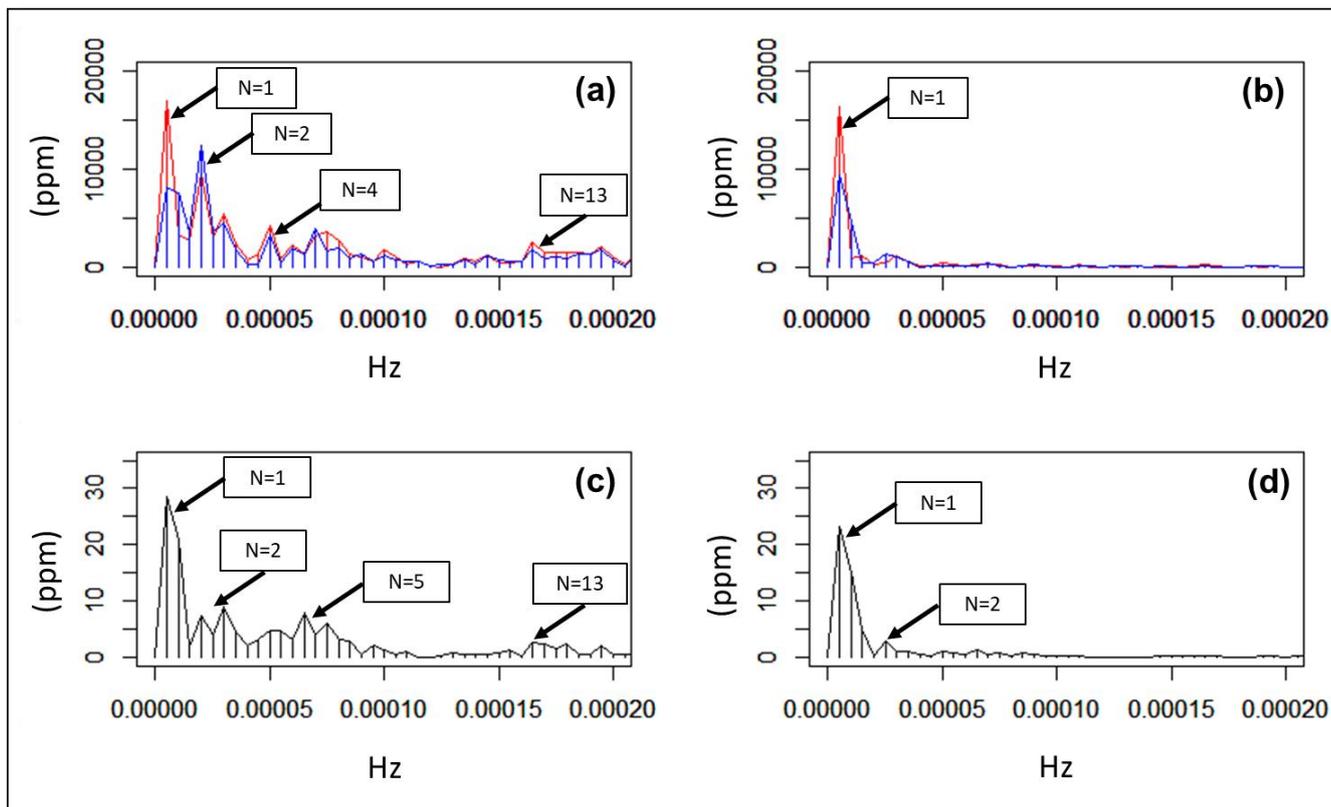


Fig.9 ガス濃度 E,C およびガス濃度比 $\ln(E/C)$ の移動曲線の FFT 分析

Fig.9(a)はガス濃度 E,C の 60 分窓移動曲線(Fig.6(a))の FFT 分析。横軸は Hz。赤線が E、青線が C の結果。図中に現れている代表的なピークに対して、Fig.7(a)の 24 時間当たりの周期数 N を対応させた(N=1,2,4,13)。Fig.9(b)はガス濃度 E,C の 360 分窓移動曲線(Fig.6(b))の FFT 分析。

Fig.9(c)はガス濃度比 $\ln(E/C)$ の 60 分窓移動曲線(Fig.6(c))の FFT 分析。図中に現れている代表的なピークに対して、Fig.7(b)の 24 時間当たりの周期数 N を対応させた(N=1,2,5,13)。Fig.9(d)はガス濃度比 $\ln(E/C)$ の 360 分窓移動曲線(Fig.6(d))の FFT 分析。