(60) 生活環境圏を対象とした環境評価指標の改良提案及び検証

GONG　Nan[1]・鈴木　麻予[2]・桑原　祐史[3]

[1]学生会員　茨城大学大学院　理工学研究科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）
E-mail: 23nd304h@vc.ibaraki.ac.jp

[2]学生会員　茨城大学大学院　理工学研究科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）
E-mail: 23nm826y@vc.ibaraki.ac.jp

[3]正会員 茨城大学教授 大学院 理工学研究科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1）
E-mail: yuji.kuwahara.rs@vc.ibaraki.ac.jp

温室効果ガス世界資料センター(WDCGG: World Data Centre for Greenhouse Gases)による 2021 年の大気解析結果によると、2021 年の全球平均の CO_2 濃度は約 416 ppm であることが報告されている [1]．このような中，茨城大学では 2007 年から現在まで，茨城県内に CO_2 観測地点を開設し，長期観測を継続してきた．加瀬ら（2017）は，計測した CO_2 濃度値を用いて緑地の CO_2 吸収効果に関する環境評価指標を提案し，地理空間情報と合わせて分析することにより指標の効果を検証した [2]．しかし，緑地の CO_2 吸収効果を示すことを目的とした環境評価指標ではあるものの，交通や人流に起因して濃度値のピーク値出現理由が異なるため，必ずしも緑地の効果を示していない可能性が残されていた．本研究では指標の計算方法を改善し，複数地域の指標値との比較に基づき感度が向上したことを示した．

Key Words: *CO_2 concentration, geographic information, improvement of the environment evaluation*

1. はじめに

温室効果ガス世界資料センター(WDCGG: World Data Centre for Greenhouse Gases)による 2021 年の大気解析結果によると、2021 年の年平均 CO_2 濃度は 410 ppm に達した．この値は，工業化（1750 年）以前の約 1.47 倍である [1]．このような中，2015 年に行われた国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）において採択されたパリ協定では，地球温暖化の原因となる CO_2 の削減が求められ，CO_2 排出を抑制する緩和策が盛り込まれた [3]．このように CO_2 の削減，抑制へ注目が高まる中，茨城大学国土空間情報研究室では生活環境圏における CO_2 濃度値変化と地域性との関連を判明させることを目指し，2007 年から最大 11 地点，2023 年現在は茨城県内日立市，高萩市，大子町，石岡市，潮来市，古河市，筑西市の 7 箇所に百葉箱を設置し，県内の長期 CO_2 濃度観測を行った．生活環境圏における CO_2 濃度データの観測について，桑原ら（2013）は茨城県内 CO_2 濃度の地域性について考察を取りまとめた．その結果，CO_2 濃度は 11 月～3 月に高くなり，4 月～10 月に低い傾向にあることが判る．これは，IPCC による全球平均データが示す年間変動とほぼ同じ変動傾向を示している [4]．さらに，加瀬ら（2017）は生活環境圏の CO_2 濃度値変化と観測局近傍の地理情報の関係を対象として，観測地点近傍の環境評価指標の性質を検証した．その結果，環境評価指標は夏季に観測地点付近の植生と強い関連性があり，冬季には人間活動を強い関連があることを示した．また，季節の変動に対して，夏季に環境評価指標が極大，冬季に極小という性質があることが判った [2]．

環境評価指標では，変動量を時間平均 CO_2 濃度の最大値から時間平均 CO_2 濃度の最小値を引いた値と定義している．緑地環境評価指標を**式(1)**に示す．

$$\text{環境評価指標(Index)} = \frac{CO_{2\,max} - CO_{2\,min}}{CO_{2\,max}} \quad (1)$$

$CO_{2\,max}$：時間平均 CO_2 濃度の最大値
$CO_{2\,min}$：時間平均 CO_2 濃度の最小値

しかし，地域によっては，日の出後の通勤通学時間帯が 1 日の最高時間平均 CO_2 濃度になるため，日の出前の CO_2 濃度を正確に抽出できない．また，東京などの都市部では，日中の時間平均 CO_2 濃度が日の出前の時間平均 CO_2 濃度より大きくなる傾向がある [5]．そのため，**図-1**

に示すように [6]，地点①のように朝方に時間平均 CO_2 濃度が最大，日中に時間平均 CO_2 濃度が最小となる地点及び地点②のように日中に時間平均 CO_2 濃度が最大，朝方に時間平均 CO_2 濃度が最小となる地点の 2 地点で環境評価指標値が同じになってしまう．さらに，**図-2** に示しているように，午後の退勤時間によって，人間活動活発化することで，CO_2 濃度が急上昇し，夜間の CO_2 濃度は日の出前の CO_2 濃度より高くなる場合がある．これらの事象に対して，環境評価指標は植物の CO_2 濃度吸収レベルを正しく評価できない可能性がある．そこで，本研究では，上記の環境評価指標の精度に影響を及ぼす可能性が高い要素を排除し，より緑地効果を示すことができる環境評価指標を提案するために，日の出と日の入の時間帯により，**式 (1)** における分子の最大値と最小値の取り方を再定義する．さらに，分析期間の幅によって，環境評価指標は異なる分析期間幅内の性質を確かめるために，改良後の環境評価指標の基準値を月平均と年平均を定義した．また，改良後の環境評価指標と観測地点付近の植生，人間活動との関係を示すため，植生面積が多く，常住人口少ない大子町，都心部と近い，常住人口が多い守谷市，古河市，つくば市，一定量な植生面積を持ち，常住人口は守谷市，古河市，つくば市より少ない，大子町より多い筑西市，石岡市の 6 地点を分析地点とした．観測地点中心として，半径 5 km 以内 6 地点の地理情報を**表-1** に示す．

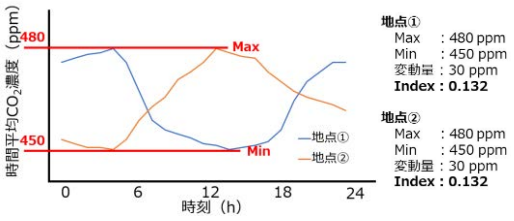


図-1 緑地環境評価指標の問題点 1[6]

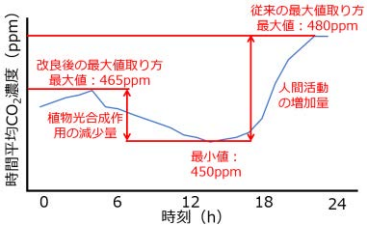


図-2 緑地環境評価指標の問題点 2

表-1 各地点の地理情報

観測地点	緑被率（%）	建築用地（%）	常住人口（人）
筑西	61.1	26.2	57877
大子	69.9	3.4	5724
石岡	60.2	26.1	58903
守谷	48.9	30.8	104001
古河	45.5	35.6	118076
つくば	50.5	30.1	103070

2. 使用機材・データ

(1) 設置型測定器

本研究では，長期間 CO_2 濃度を計測するため，株式会社 U-DOM 開発した設置型 CO_2 測定器（C2D-E01）を使用した．NDIR センサは固体電解質センサに比べて，NDIR センサは長い寿命を持っている．又測定測定誤差が小さく，測定範囲が大きい利点がある [6]．桑原ら（2013）の既往研究により，長時間の室外使用は埃や塵がセンサに付着し，測定器稼働開始後 200 日にデータのドリフト現象を起こすと明らかになっている [4]．そのため，標準ガスを用い，センサの校正作業が必要である．

(2) 衛星画像

加瀬らの既往研究により，環境評価指標は観測地点付近の植生、人間活動と関連性があることが分かった [2]．本研究では Sentinel-2A の衛星画像を利用し，平野ら（2002）の方法により，6 地点の夏季、冬季の代表的な緑被率を算出した [8]．人間活動に関しては，定量的に人間活動を評価するのは困難である．よって，本研究では Y.ZHA ら（2003）提案した**式 (2)** に示す都市域抽出方法を利用し，観測地点付近の都市化域を抽出して，人間活動を評価する指標とした [9]．また緑被率と都市域の計算，抽出範囲は観測ステーションを中心として，半径 5 km 以内の Sentinel-2A の衛星画像を利用した．

$$NDVI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)} \qquad (2)$$

ここで，SWIR：短波赤外線，NIR：近赤外線．

3. データ選定の精密化

各観測地点の環境評価指標がより緑地の効果を示すため，植物の光合成が活発時の CO_2 濃度データを使い，環境評価指標を算出する必要がある．本研究では気象データを利用し，晴天日の抽出方法を検討した．気象庁が公開する天候に関係する降水量，気温，日照時間を用いて，

- 降水量　：日中の降水量が 0 mm
- 気温　　：最高気温が月平均最高気温より高い
- 日照時間：（月平均日中時間 - 2）× 0.6 以上

以上の 3 つの条件全てを満たす日を晴天日と定義した．ただし，気象庁のデータは，該当現象または該当現象に

よる量がない場合は「–」，該当現象による量はあるが 0.1（降水量は，0.5 mm）に足りない場合は「0.0」と表記している[10]．しかし，本研究では降水量に関して，0.0 と表記される日は，降水量が 0 mm であるとする．

4. 環境評価指標の改良提案

(1) 環境評価指標の改良提案

これまでの環境評価指標（以下：Ori_Index：Original Index）と比べて，より観測地点周辺の植生効果による CO_2 濃度変化効果を示すことを目的として，環境評価指標を月環境評価指標（以下：M_Index：Monthly Index）と年間環境評価指標（以下：Y_Index：Yearly_Index）の2つを提案する．M_Indexとは，その月の月平均 CO_2 濃度値を分母に設定したものである．月毎の平均値を使用することで，その各月中の CO_2 濃度変化効果を示すことができる．Y_Indexとは，分母の平均値を年間平均値としたものであり，従来のOri_Indexと比べて，コントラストが大きくなり，長期間の分析に使用できると考える．M_IndexとY_Indexを**式(3)**，**式(4)**に示す．

$$M_{_Index} = \frac{CO_{2_1} - CO_{2_2}}{CO_{2\ monthly\ avg}} \quad (3)$$

$$Y_{_Index} = \frac{CO_{2_1} - CO_{2_2}}{CO_{2\ yearly\ avg}} \quad (4)$$

CO_{2_1}：日の出から日の入までに最大値が現れなかった場合 CO_{2_1} を 1 日の日出前の最大値と定義する．一方，日の出から日の入までに最大値が現れた場合には CO_{2_1} を日出前の最小値と定義する．

CO_{2_2}：日の出から日の入まで最大値が現れなかった場合 CO_{2_2} を 1 日の日の出後から日の入までの間の最小値とする．一方，日の出から日の入までに最大値が現れた場合に CO_{2_2} をこの間の最大値と定義する．

(2) M_Index，Y_Index の考察

各地点における M_Index と Y_Index の 2017 年夏季（8 月），冬季（12 月）の値を**図-4**，**図-5** に示す．M_Index と Y_Index 両者には夏季の数値は冬季の数値より高い傾向が見られる．しかし，守谷と古河両地点の数値を見ると，この両地点では夏季と冬季とのコントラスト差が他の地点より低いことがわかる．そのため，M_Index，Y_Index と整備した地理空間情報の相関係数を**表-2** のように算出した．ただし，2019 年の 12 月に測定器の不具合が発生し，多くデータが欠損したため，今回の相関分析では 2019 年 12 月のデータを議論しできなかった．相関分析の結果，改良後の M_Index と Y_Index は夏季において，植生と高い正の相関があることが分かった．冬季にこの 2 つの指標は観測地点付近の建築用地割合と正の相関があるため，改良後の指標は人間活動に高い関連性があることが分かった．

表-2 M_Index，Y_Index と地理空間情報の相関係数

M index-地理情報相関				Y index-地理情報相関			
2016年				2016年			
地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）	地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）
植生	緑被率	0.54	-0.05	植生	緑被率	0.50	-0.10
人間活動	建物用地	-0.66	0.09	人間活動	建物用地	-0.59	0.17
2017年				2017年			
地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）	地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）
植生	緑被率	0.95	-0.39	植生	緑被率	0.96	-0.33
人間活動	建物用地	-0.77	0.40	人間活動	建物用地	-0.76	0.41
2018年				2018年			
地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）	地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）
植生	緑被率	0.74	-0.43	植生	緑被率	0.72	-0.71
人間活動	建物用地	-0.74	0.58	人間活動	建物用地	-0.60	0.69
2019年				2019年			
地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）	地理空間情報		夏（8月）	冬（12月）
植生	緑被率	0.60	NA	植生	緑被率	0.75	NA
人間活動	建物用地	-0.74	NA	人間活動	建物用地	-0.82	NA

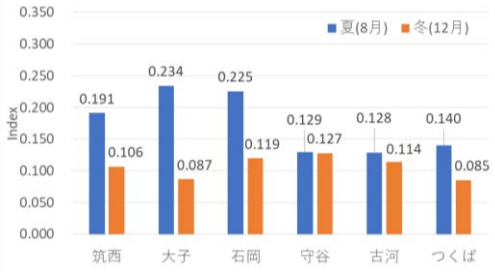


図-4 2017 年夏季，冬季の M_Index

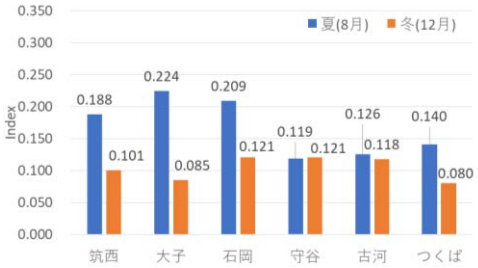


図-5 2017 年夏季，冬季の Y_Index

(3) Ori_Index，M_Index，Y_Index の違い

M_Index，Y_Index の Ori_Index に対する改良効果を明らかにするため，Ori_Index を比較の基準とし，M_Index と Y_Index を比較対象として，二次元散布図を作成した．作成した散布図の一部を**図-6～図-9** に示す．2016 年夏季の散布図では，筑西の改良 Index 値は 45 度斜線の下側に存在しているが，他の 5 地点の改良後の Index は 45 度斜線の上部に存在している．2017 年の散布図を見ると，全ての M_Index は 45 度斜線の上部に存在している．Y_Index に関しては，守谷を除く他の全ての地域は 45 度斜線の上部に存在している．この事により，改良した M_Index，Y_Index の指標値は，夏季に従来の指標値である Ori_Index より上昇する傾向があった．よって，改良した Index は従来の Ori_Index より緑地効果を高い感度で表現できる可能性が高いことが伺え

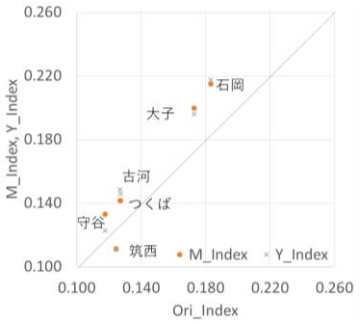


図-6　2016年夏季M_Index，Y_Index対Ori_Indexの散布図

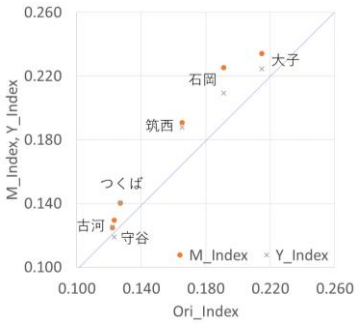


図-7　2017年夏季M_Index，Y_Index対Ori_Indexの散布図

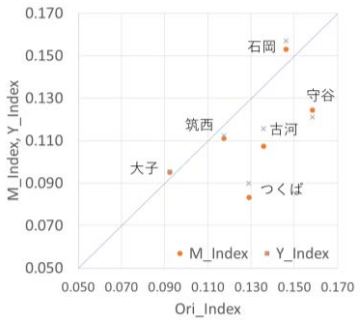


図-8　2016年冬季M_Index，Y_Index対Ori_Indexの散布図

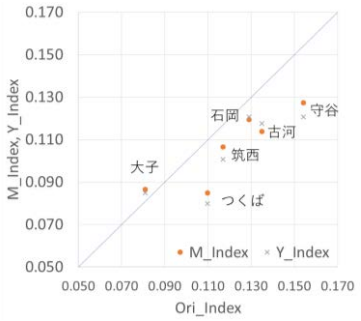


図-9　2017年冬季M_Index，Y_Index対Ori_Indexの散布図

る．一方，冬季の散布図に対しては，2016年において大子，石岡両地点のM_Index，Y_Indexは45度斜線の上部に存在しているが，他の地点の分布は45度斜線の下部に存在している．2017年では，大子のM_Index，Y_Indexは45度斜線の上部に存在しているが，それ以外の他の地点は45度斜線の下側に存在している．以上をまとめると，冬季のM_Index，Y_Indexは従来のOri_Indexより減少する傾向があった．冬季には植物の光合成作用は夏より低くなるため，M_Index，Y_Index両者の数値が従来のOri_Indexより低くなる傾向が高いことが伺える．

5.　まとめ

今回の研究で改良したM_Index，Y_Indexとこれまでの研究で提案した指標値であるOri_Indexとの違いの一部を確認した．改良後の環境評価指標は，観測地点付近の地理空間情報を用いた分析の結果，従来の環境評価指標と比べて，コントラスト差が大きいことが判った．改良した環境評価指標はより緑地効果を詳細に分析できると考えられる．今後は，より多くの地点と時期に対するM_IndexとY_Indexの統計量を算出し，両者の性質を詳細に検証したい．

謝辞：本研究はJSPS科研費JP20K04716の助成を受けたものである．また，CO_2濃度計測のために，茨城県内各地点に電子百葉箱を設置させて頂いた．学外機関である国土交通省国土地理院，大子町営研修センター，石岡市立中央図書館，茨城県県西県民センター，古河商工会議所の皆様には数々のご厚意を頂いた．ここに記して深甚なる感謝の意を表す．

参考文献

1) 気象庁：大気中二酸化炭素濃度の経年変化，＜https://www.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html＞，（入手　2023.7.26）
2) 加瀬秀征，飯田大貴，桑原祐史：茨城県の生活環境圏におけるCO_2濃度変動に着目した環境評価指標の検証，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.73，No.2，pp.I_164-I_172，2017.
3) 気象庁：温室効果ガス等の観測地点，＜https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ghg_obs/station/＞，（入手　2023.6.1）
4) 桑原祐史，山田貴弘，今井友桂子，齋藤修，沼尾達弥：茨城県を対象とした生活環境圏におけるCO_2濃度補正方法の提案と地域性分析，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.38，pp.49-52，2013.
5) 早福正孝，古明地哲人，岩崎好陽，小峯美奈子：二酸化炭素濃度の地域格差に関する検討，東京都環境科学研究所年報，Vol. 2002，pp. 231-236，2002.
6) 鈴木麻予：生活環境圏を対象としたCO_2濃度の地域性評価に関する研究-茨城県守谷市,大子町および筑西市を対象として-，茨城大学学士学位論文，2023.
7) Senseair社：なぜNDIR方式，＜https://senseair.jp/knowledge/sensor_technology/why_ndir.html＞，（入手　2023.6.1）
8) 平野勇二郎，安岡善文，柴崎亮介：都市域を対象としたNDVIによる実用的な緑被率推定，日本リモートセンシング学会誌，Vol.22，No.2，pp.163-174，2002.
9) Y.Zha，J.Gao，S.Ni：Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery，*International Journal of Remote Sensing*，Vol.24，Issue, pp.583-594，2003.
10) 気象庁：値欄の記号の説明，＜https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/man/remark.html＞，（入手　2023.6.1）