

二酸化炭素濃度の時間変動

The Time Variation of CO₂ Concentration in the Residence Zone

大原 莊司、藤原 昇

OHARA Soji, FUJIWARA Noboru

第1章 はじめに

二酸化炭素は、地球温暖化の原因とされる温室効果ガスの約60%を占めている。地球温暖化の主原因が、温室効果ガスによるのかどうか賛否両論あるが^{1) 2)}、地球規模の炭素収支がCO₂換算で、化石燃料の燃焼など人間社会の産業活動により生ずるものが約230億トン/年、大気と海水中の二酸化炭素の分圧の差が要因となる海洋吸収が約85億トン/年、植物の光合成などによる陸域吸収が約25億トン/年で、都合約120億トンが毎年大気中に蓄積されていることは事実である。大気中CO₂濃度も、産業革命以来約1.5倍に増加し、地球温暖化の主原因と考えられている。日本は京都議定書で、08～12年の平均排出量を90年比で6%減らす義務を負っている。福島原発事故に伴う、原発稼働率低下はいっそう困難な局面に立たされていることを意味している。CO₂濃度の削減には、再生可能エネルギーの活用による排出量抑制以外に、CO₂の化学的固定化技術の開発や植物による光合成の促進また人工光合成による固定化などの具体的方策を積極的に進める必要がある。

そのような状況の中で、生活環境中のCO₂濃度の時間変動を長期間連続して測定することは、CO₂の振る舞いの実態を基礎的に把握する意味で重要であると考ええる。我々は、前論文³⁾で報告したフィンランドVaisala社のCO₂プローブGMP343システムをあらたに1式導入して2地点でのCO₂濃度の時間変動を同時に計測した。その結果、大気中二酸化炭素濃度に対する光合成の影響やこれに関連した、日射量との相関、風速との相関、湿度との相関など、植物の個葉で研究されていることが地域規模でどのように反映されるかなどについて新たな知見が得られた。

第2章 二酸化炭素濃度連続測定

CO₂プローブの屋外設置方法としては、大気圧での空気平均自由行程、直射日光によるプローブ加熱の影響、風通しなどを考慮し、さまざまな格納容器を試作して試行錯誤した結果、図1のように断熱材で300×400×200（高さ）の容器を作成し、四方を開放して中央にプローブを設置した。

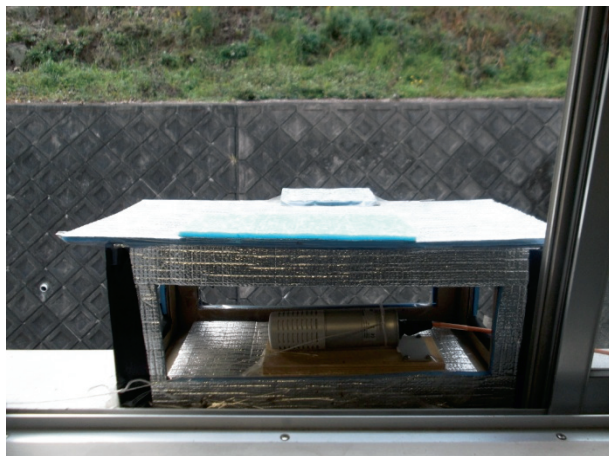


図1 CO₂測定プローブの格納容器
（1号館測定室窓設置の様子）

設定した測定条件は、以下の通りである。

出力間隔 : 1 h

内部補正 :

温度補正（内部温度センサによる） ON

酸素補正（酸素濃度 21 % に設定） ON
 気圧補正（1013.25 hPa に設定） ON
 相対湿度補正（相対湿度 50 % に設定） ON
 平均化フィルター 60 秒

ここでいう相対湿度補正は、水蒸気成分による測定上の誤差を補正するという意味であって、のちに述べる湿度による光合成への影響などの議論に直接関係するものではない。

図1の格納容器に2つのGMP343測定器を並べて設置（奈良産業大学、1号館測定室）して数日連続測定した結果を図2に示す。

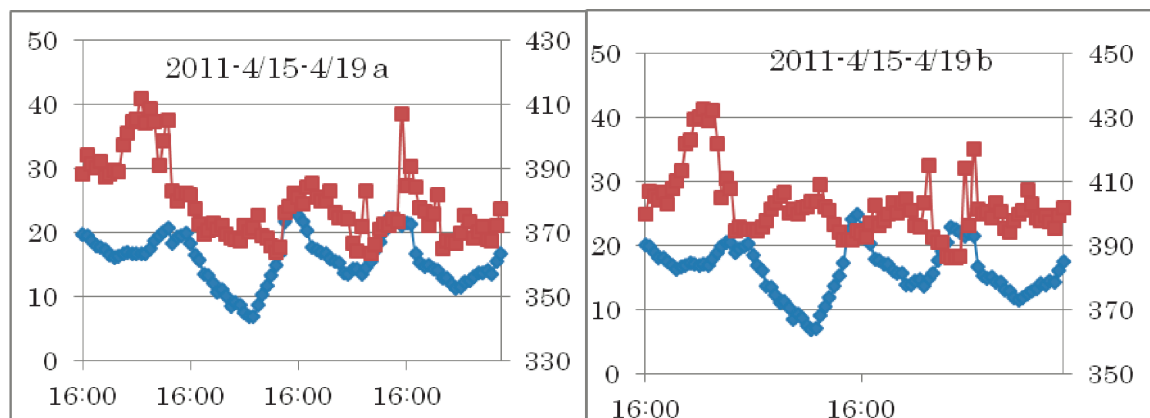


図2 同一場所に設置したGMP343システムの同時測定結果。赤ラインが二酸化炭素（右目盛り単位 ppm）で青ラインが温度（左目盛り単位度 C）

図のように、内蔵温度計の測定値はよく一致しているが、二酸化炭素濃度に関しては新規導入のプローフ（図中b）で約10 ppmのバイアスを踏んだ状態になっている。更正の必要性を含みながら、当面定性的な分析に重点をおくこととする。

大気中二酸化炭素濃度の連続測定の課題として、比較的近い2地点での変動状況の比較と、周辺環境のかなり異なった2地点間の比較を行うこととした。図3に奈良産業大学10号館中庭側窓に設置した様子と、大阪柏原市住宅街に設置した様子を示す。図4は、奈良産業大学キャンパス内に設置した2ヶ所の位置関係を示している。10号館2階（データにはAと表記）、他の一つは1号館2階の外部の山側向きの窓の外（図1、データにはBと表記）に設置した。いずれも窓ガラスの反射光が直接プローフに入射することのないよう配慮した。窓ガラスは完全に締め切り、室内にいる人間の呼吸の影響が及ばないように注意した。

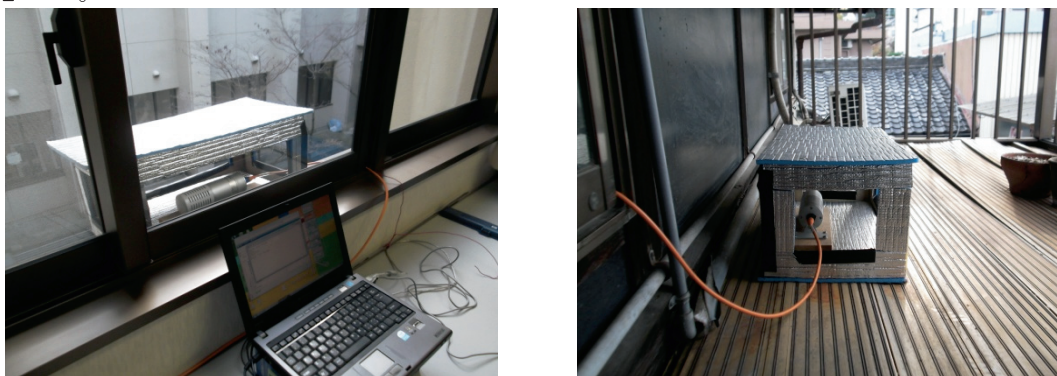


図3 二酸化炭素測定器の設置の様子。奈良産業大10号館2階中庭側窓（左図）
 大阪柏原市住宅街2階テラス



図4 奈良産業大学キャンパス内 CO₂ 濃度計測器設置箇所

2つの設置箇所間の距離は約200mであり、信貴山の麓で広葉樹や杉木立に隣接している。10号館の場合はコの字校舎の中庭の植え込みに向けて設置しているのでプロウが風を直接うけることはないと考えられる。

環境条件の異なる2地点としては、1号館2階と大阪側に隣接する柏原市の山裾の住宅街を選んだ。図5は、その際の2地点の位置関係を示す航空写真である。

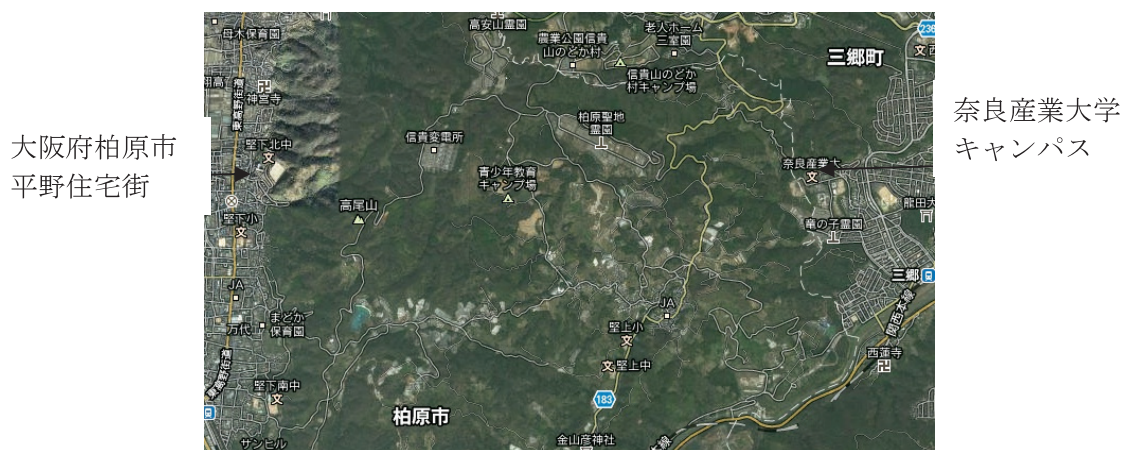


図5 環境条件の違う CO₂ 濃度測定2地点を示す航空写真

この2地点間の距離は約4.2kmである。2地点の間は、信貴山麓の標高200m前後の緑の山並みであり、奈良産業大学1号館の標高は約130m、柏原市平野住宅街の標高は約30m程度である。奈良産業大学側は、奈良盆地の西面の一角であり、柏原市平野は海に面した堺工業地帯に連なる大阪平野の東面の一角である。測定したCO₂濃度データの解析に際しては、気象庁のウェブサイトから奈良産業大学データについては奈良市の、柏原市のデータについては大阪市の気象データをそれぞれ参照した。参照したデータは、1時間ごとの湿度、風速、全日射量の値である。

第3章 測定結果

大気中二酸化炭素濃度の2地点同時連続測定は、奈良産業大学キャンパス内で5月から9月まで行われ、奈良産業大学キャンパスと柏原市住宅街で9月より11月まで行われた。いずれの測定システムについてもほぼ3日に一度ずつデータの採取が続けられた。

まず、奈良産業大学キャンパス内の2地点の測定については、二酸化炭素濃度変動が温度変動と逆相関の関係が明瞭にあらわれるか、2地点の相違があるかなどに注目して行われた。図6に6月の後半の1週間にわたる測定結果を示す。

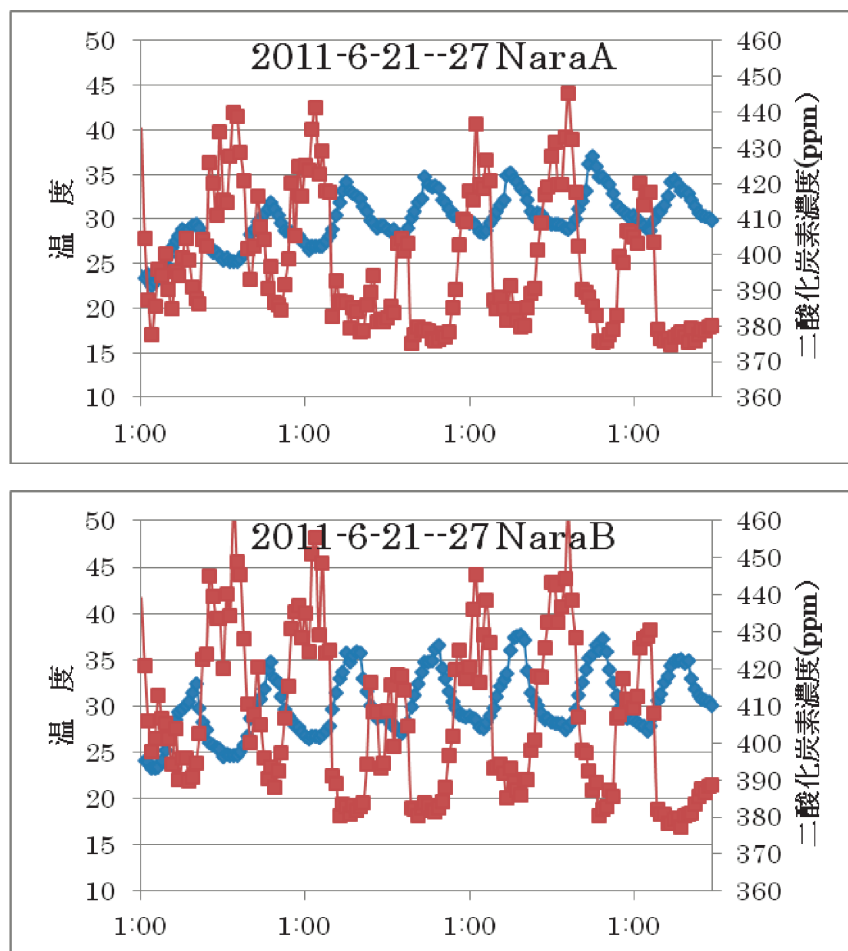


図6 奈良産業大学キャンパス内2地点の二酸化炭素濃度変動(2011年6月21日～27日)
10号館中庭側(上図)と1号館西窓(下図)

両データの振る舞いはBのほうが二酸化炭素濃度が数ppm高い時期もあることを除けば定量的にも極めてよく一致している。温度変化(一般に温度が高くなるのは日射量の多い昼間)との逆相関も明瞭で、光合成による大気中二酸化炭素の吸収が顕著であったことを示している。ちなみに天気は前半が曇り、後半が晴れであった。全日射量との相関をBの同じ期間でみると図7のようになる。

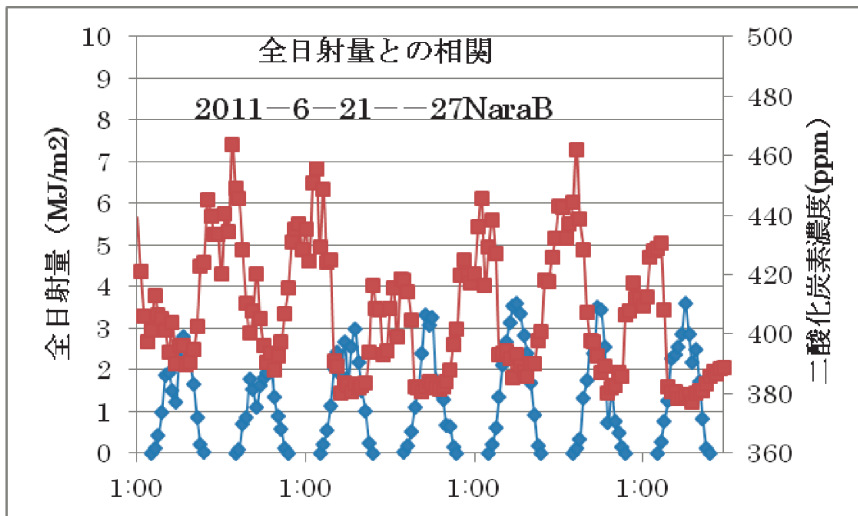


図7 二酸化炭素濃度の変動と全日射量変動の相関

全日射量との相関でも、光合成による二酸化炭素吸収の効果が極めて顕著にあらわれている。しかも、附属する建屋の構造や建屋との位置関係が全く異なり200mも離れた2地点で二酸化炭素濃度の時間変動がこれほど一致することは1気圧の大気中の空気分子の平均自由行程が $0.1\mu\text{m/s}$ であることを考えれば驚きである。風などにより大気の均一化がきわめて迅速に行われていると一応考えられるが、対流など全く異なる大気均一化のメカニズムを考える必要があるかもしれない。

この1週間で全日射量が 0.01MJ/m^2 以上のデータを選別し日射量と二酸化炭素濃度との相関をプロットすると図8のようになる。

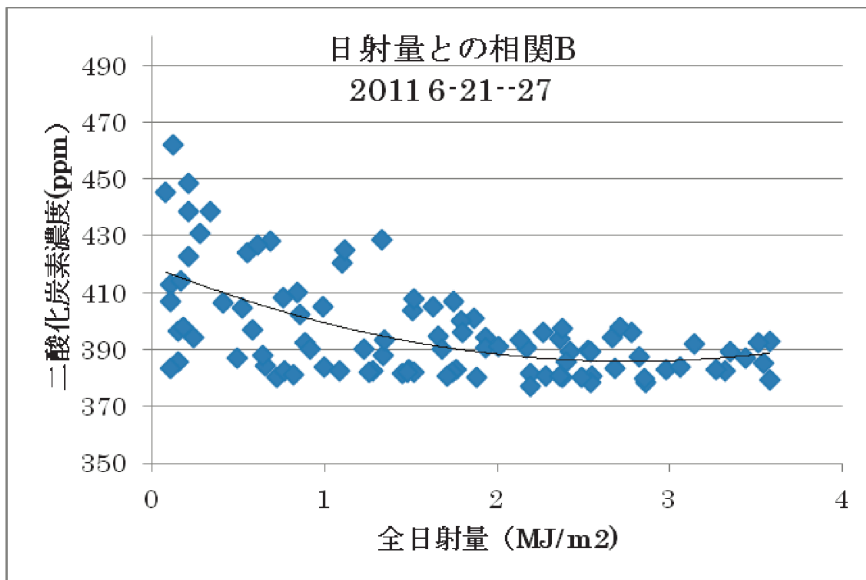


図8 全日射量と二酸化炭素濃度との相関

全日射量が 2MJ/m^2 までは二酸化炭素濃度現象におよぼす影響が大きい、それ以上ではあまり減少効果は出ていない。この傾向は、後にものべるように植物の個葉を対象とした

光合成の研究結果ともよく一致している。

次に、9 月半ばから 2 カ月にわたって行われた、大阪柏原市での測定結果（プロローブは上述の A を用いた）との比較について述べる。図 9 は、大阪と奈良の同時測定結果を示している。

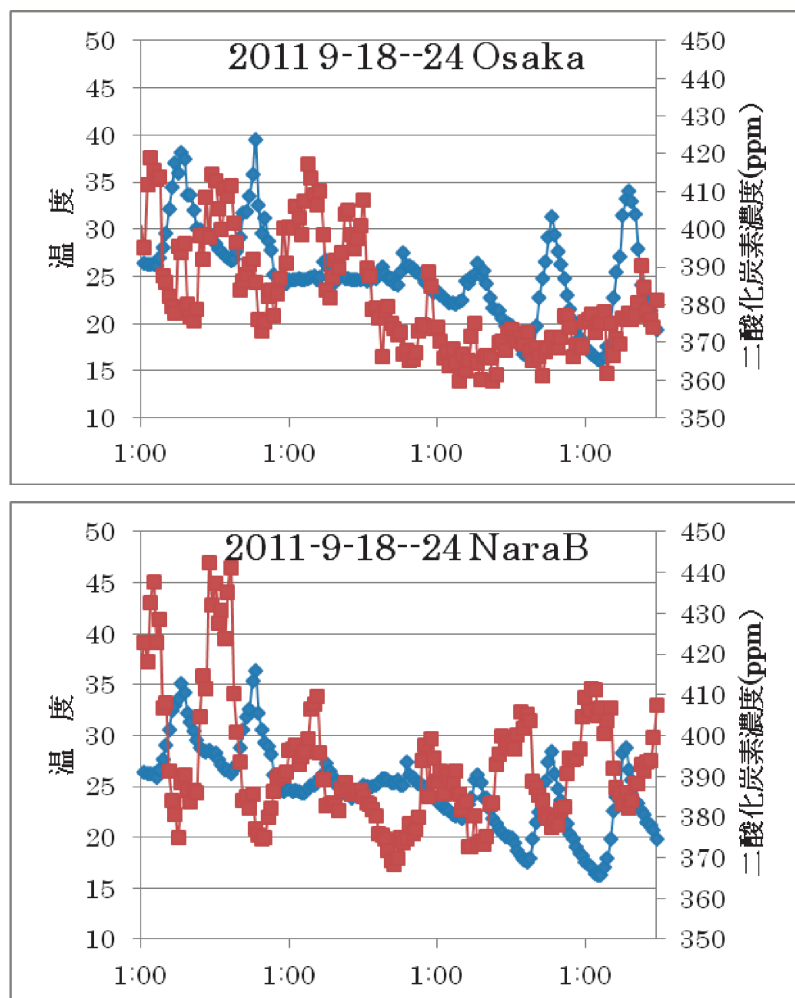


図 9 大阪柏原市（上図）と奈良産業大（下図）での二酸化炭素濃度同時測定結果

ちなみに9月19日午後より曇りから雨となり、21日は台風通過で気圧が大阪976 hPa、奈良で972 hPa程度まで下がっている。それでもなお、奈良では台風下でも二酸化炭素濃度の周期的変動が観測されている。それに対して、大阪では、370 ppm付近の比較的低い濃度にとどまって推移しているのが特徴である。21日付近での濃度の低下は、気圧低下の影響も考えられ、温度を20度C、気圧を970 hPaとして、次式

$$C(\text{補正ppm}) = C(\text{測定値ppm}) \times (1013\text{hPa} \times 293^\circ \text{K}) / (976\text{hPa} \times 298^\circ \text{K})$$

から補正值を求めると、測定値370 ppmに対して、補正值376 ppmとなる。

第4章 測定値の解析と考察

二酸化炭素濃度の時間変動データについて、図9でみられたような大阪データでの周期性の消滅は、図10のように大阪では頻繁に現れる。

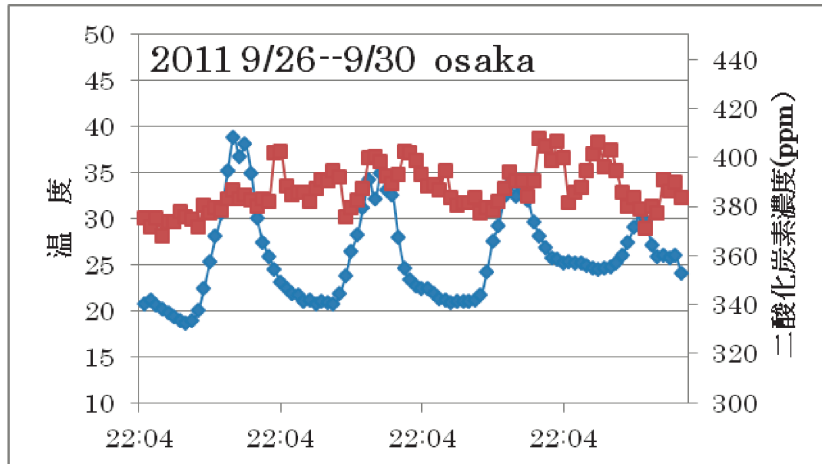


図10 大阪での二酸化炭素濃度変動（2011年9月末）

大阪での測定点である柏原市は、東側に緑に包まれた信貴山を控え、奈良産業大キャンパスともわずか4.2 kmの距離である。にもかかわらずこのような違いが出るのは、農耕地以外の緑被率が大阪で約30%、奈良では約50%という光合成主体数の違いと西側が海に面して開放され、生産活動による二酸化炭素放出の盛んな大阪と盆地で緑の山に囲まれた奈良の違いが現れたものと推定される。図9のような周期性の消失が、プローブのトラブルによるものでないことは、大阪での約2ヶ月の連続測定後、奈良産業大学キャンパスに戻しプローブBと併置して測定すると二酸化炭素濃度変動の傾向がほぼ一致したことで確認されている。図9のような周期性の消失した状況では、二酸化炭素濃度の全日射量に対する相関も図11に示すようにほとんど見られない

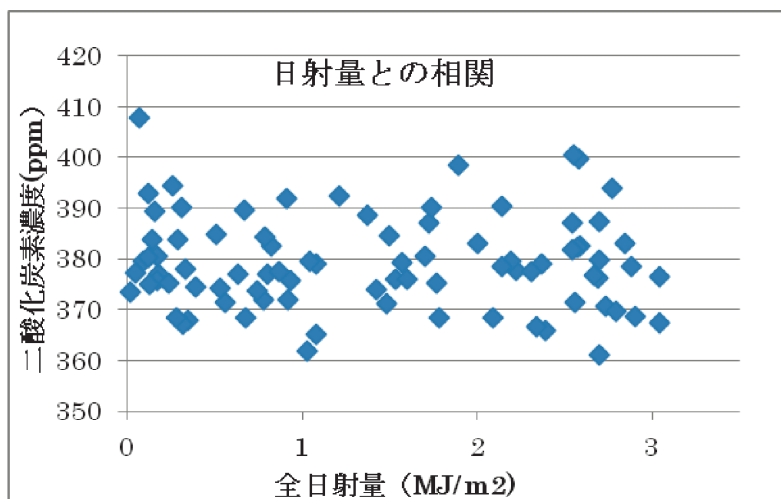


図11 二酸化炭素濃度と全日射量との相関。2011年9月末、大阪

一方二酸化炭素濃度の顕著な周期的変動の見られる奈良産大キャンパスデータでは、図7のような明確な相関が得られる。全日射量が 0.01 MJ/m^2 を超える時間を選別し、その間での二酸化炭素濃度と風速との相関、湿度との相関を求める。

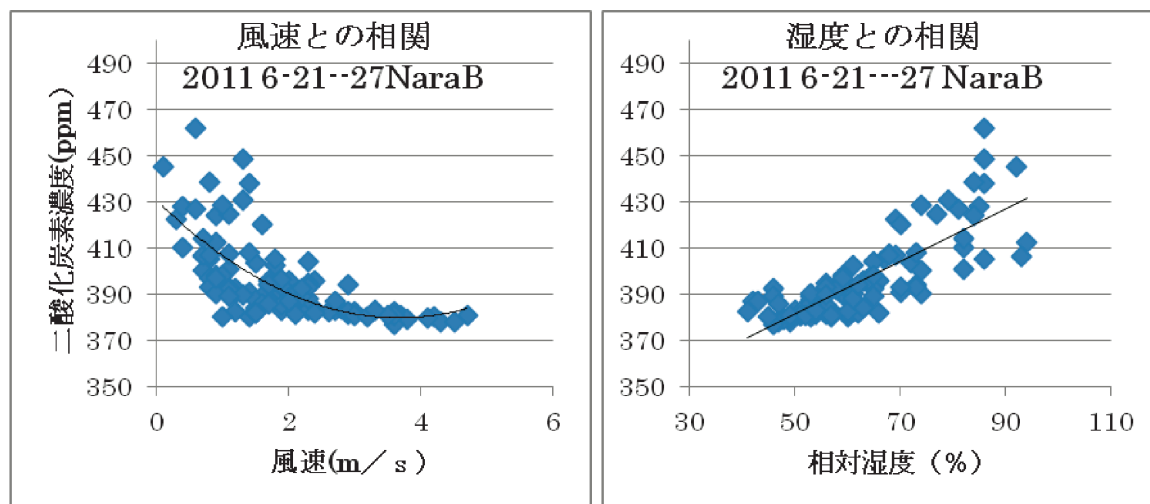


図1.2 全日射量 $>0.01 \text{ MJ/m}^2$ の条件での二酸化炭素濃度と風速および湿度との相関。
2011年6月21日～27日於奈良産業大学キャンパス1号館

図1.2は、図8と同一期間での二酸化炭素濃度の風速、湿度との相関を示す。図7に示した全日射量との相関は、光—光合成速度曲線に対応しているが、個別の植物について観測されている光の強さと光合成速度との関係をあらわす曲線ともよく類似し、形状は農作物よりはケヤキなどに近いものである。全日射量に比例して光合成速度が上昇（二酸化炭素濃度が減少）しないのは、「光強度が大きくなると大気から葉内への二酸化炭素拡散量が少なくなるものと考えられる」という矢吹の推論⁴⁾を広域での二酸化炭素濃度の動態の形で実証している。風速や湿度の影響も、葉面における二酸化炭素吸収に及ぼす影響という観点から理解される。「風速が速くなる（ 2 m/sec 以上）葉面境界層の厚さは薄くなる。それで二酸化炭素拡散速度が大きくなるばかりでなく、同時に葉面からの蒸散速度も大きくなり、葉内含水率が減少して光合成速度が低下する。」とする矢吹の推論については、図1.3に顕著に表れている。図中Bの10号館測定点は、ロの字3階建てビルの2階中庭側で測定しており、直接風が測定プロローヴに当たることは考えられないにもかかわらず、1号館データの相関とよく類似しているということは、この相関がプロローヴ周辺の局所的な現象ではないことをあらわしている。

気温も光合成と深い関係があり、矢吹によると「気温が高くなると葉温も高くなり、葉内水蒸気張力が高まり、蒸散速度が増加する。根から葉への水の供給量が蒸散量を下まわると、水ストレスをおこし、光合成速度が低下し、ついで気孔開度が小さくなる。さらに光合成速度が低下するという過程をたどることになる。」であるが、図1.4に示す相関はこの記述をうらづけている。

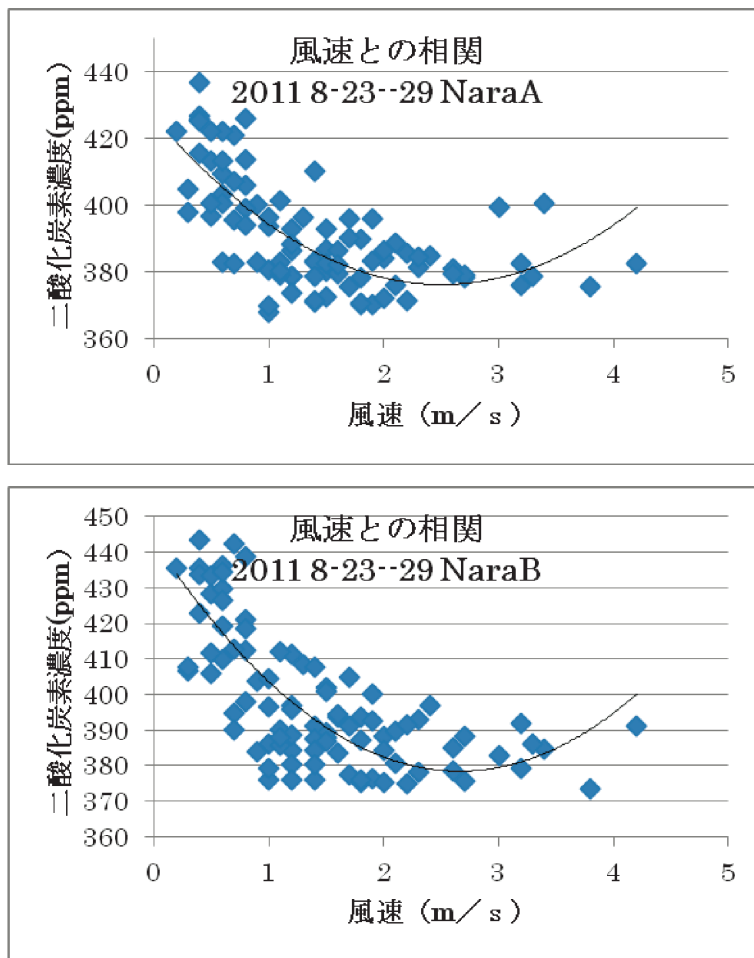


図 1 3 二酸化炭素濃度と風速との相関。奈良産業大キャンパス内
1 号館と 1 0 号館で同時測定 2 0 1 1 年 8 月 2 3 日～2 9 日

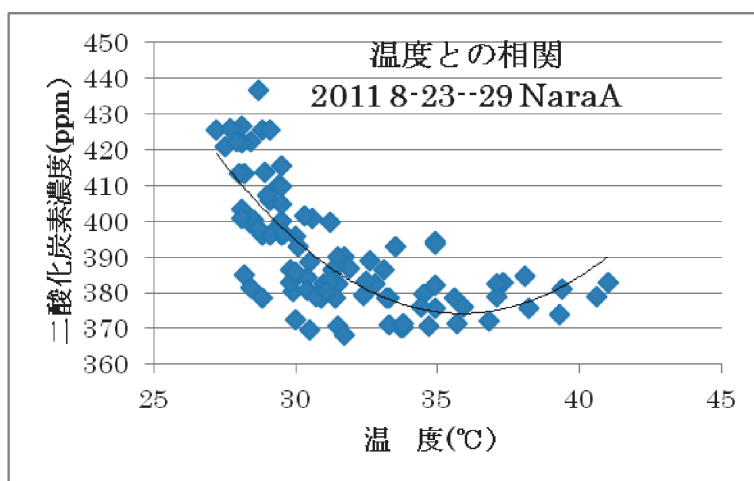


図 1 4 二酸化炭素濃度と温度との相関 2 0 1 1 年 8 月 2 3 日～2 9 日
於奈良産業大学キャンパス内 1 0 号館

光合成に対する湿度の影響に関しては、矢吹の理論では、「植物は大気が低湿度になると、葉内水分含有率の低下を防ぐために自己制御をして気孔開度を調節しており、その結果と

して光合成速度の低下を招いている。」とあるが、光合成による二酸化炭素濃度変化の周期性が明瞭な奈良産業大キャンパス内のデータでは、図 1 5 に示すように湿度が高くなるほど二酸化炭素濃度が上昇するという結果になっている。図 1 5 のデータは、全日射量が 0.01 MJ/m² 以上の場合である。大阪柏原市のデータでは、逆の傾向がでている。

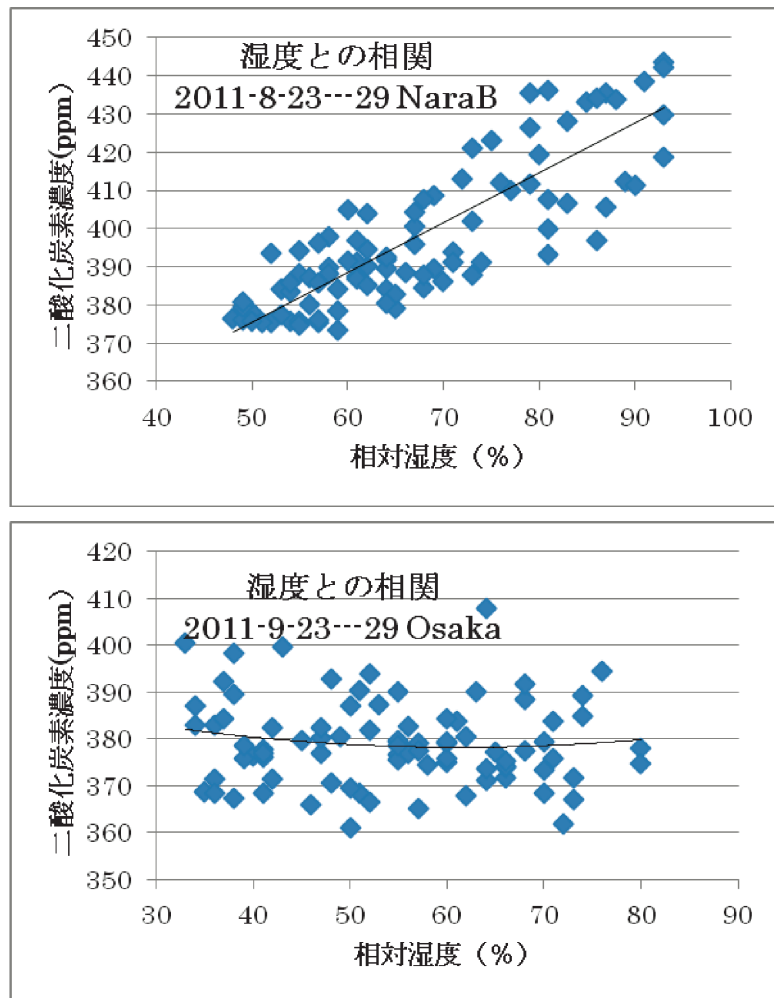


図 1 5 二酸化炭素濃度の湿度との相関（全日射量>0.01MJ/m²）

図 1 5 上図の同期間で、全日射量と湿度は逆相関の関係にあり、この結果はうなずけるが、全日射量の条件を 1.5 MJ/m² より大きい場合とし、ほぼ晴天下でかつ矢吹のアプローチを参考にして風速が 1.5 m/秒より大きい場合を NaraB の 8 月全体のデータに適用すると、二酸化炭素濃度と湿度との相関は図 1 6 のようになる。正の相関性が残っている部分もあるが、矢吹が実験した「キュウリの光合成に対する風速と湿度の影響」のデータを支持する結果となっている。すなわち一定以上の風速と日射量の条件下では、湿度が高くなるほど光合成速度は促進されるというものである。二酸化炭素の葉内での拡散速度が相対湿度や葉表面の境界層の厚さに関係する風速の影響を微妙に受けるという仮説が成り立っていることになる。

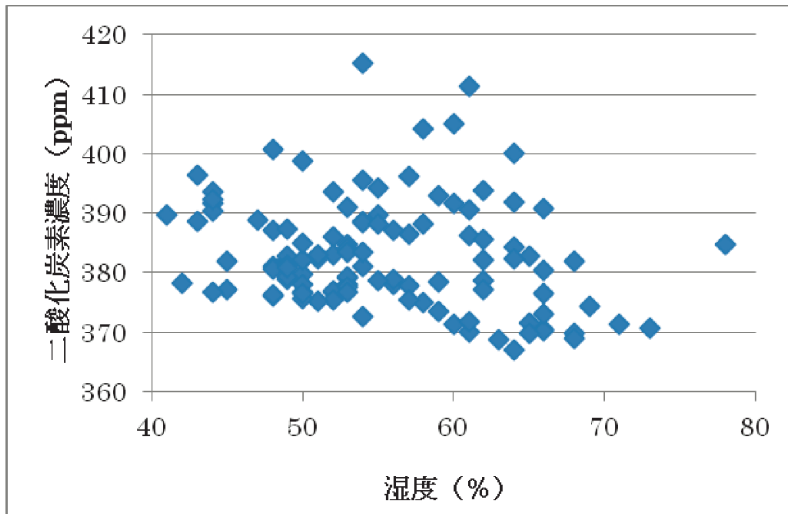


図 1 6 二酸化炭素濃度と湿度との相関（全日射量 $> 1.5 \text{ MJ/m}^2$ かつ
風速 $> 1.5 \text{ m/秒}$ ）於奈良産業大学キャンパス 1 号館

限られた空間の中での矢吹の実験データと本論の開かれた空間を対象とした測定データが少なくとも定性的に一致していることはおどろくべきことである。1 km 四方程度の地域の中の一部の緑の群落で形成される大気の状態が、あたかも瞬時に地域全体にスリップしてコピーされるかのような印象を受ける。

第 5 章 おわりに

植物による光合成によって、100 ppm 近くの変動幅で大気中の二酸化炭素濃度が変動することは、今回の連続測定でも明らかであるが、そのことは、産業革命以前の二酸化炭素濃度に戻すことが人類の努力範囲であることを示している。光合成のメカニズムの詳細をさらに研究して、その有効で適正な活用によって温暖化防止の可能性も開かれてくると思われる。

参考文献

- 1) 阿部修治「地球温暖化の科学—遅れてきた懐疑論の虚妄と罪」日本物理学会誌、Vol.65, No.4, 2010
- 2) 槌田 敦「原因は気温高、CO₂ 濃度増は結果」日本物理学会誌、Vol.65, No.4, 2010
- 3) 藤原昇、大原荘司「奈良周辺の二酸化炭素濃度」奈良産業大学地域公共学研究所年報、第 1 集、2011 年 3 月
- 4) 矢吹萬壽「風と光合成」農山漁村文化協会、1990