

重機の CO₂ 排出量の測定と今後の展開

Measurement of Co2 Emissions from Heavy Machinery and Its Future Development

(株)砂子組
(株)砂子組
(株)砂子組
(株)砂子組
(株)砂子組

○正 員 岩田 翔吾 (Shogo Iwata)
非会員 谷口 幸輝 (Kouki Taniguchi)
非会員 好川 敏 (Satoshi Yoshikawa)
正 員 佐藤 欣治 (Kinji Sato)
正 員 田尻 太郎 (Taro Tajiri)

1. はじめに

カーボン・ニュートラルとは、植物性由来の燃料・原料（いわゆる化石燃料）の燃焼・分解に伴って排出される CO₂ 排出量を基準とし、元となる植物が成長過程で吸収する CO₂ 吸収量が、前者と同じになる事をさす。現在は、排出量>吸収量である。

カーボン・ニュートラルに方策を絞ったとしても課題は多い。例えばその切り札のように見られる自動車・建設機械の EV 化・ハイブリッド化であるが、原料・部品生産時、製造時、リサイクル時には多大の電力を要し、少なくとも日本ではその電力の多くが火力発電によって賄われるため、トータルではカーボン・ニュートラルになっていない。日本の電力を再生可能エネルギー（グリーン電力）にすれば実現可能という試算もあるが、わが国の電力事情でその目途は立っていない。

このような困難な状況に際して炭素循環型システムは、一つの答えになり得ると考えられる。それは産業やインフラ活動によって排出された CO₂ を、直接的に吸収・再利用し、必要な原料や O₂ などを再生産するもので、そもそもがカーボン・ニュートラルなシステムである。

弊社は、地方中小の土木施工会社にも可能な取り組みとして建設重機の CO₂ 排出に注目した。それに対して「今後の展望」に示すような炭素循環型システムのロードマップを策定し、その基礎研究の第一歩として、建設重機であるバックホーのアイドリング時および動作時における CO₂ 排出量の測定を行った。

2. バックホーCO₂排出量の測定

建設重機の排出 CO₂ を吸収・再利用するような炭素循環型システムを考えた場合、必要な吸収・再利用量を定量化するためには、実際の排出量調査は不可欠である。

調査した結果、一般乗用車の CO₂ 対策やデータ解析等は実施・公表されているが、建設業界における重機に関しては我々が調べた限りでは、そのようなものは存在しなかった。またアイドリング状態および動作時の CO₂ 計測を行った例なども見当たらなかった。唯一公表された測定結果としては国交省の土研が実施した、アイドリング状態で袋に排気ガスをためた、立米当りの排出量 (mg) というデータしかないと思われる。

以上の理由から基礎研究の第一歩として、手持ちのバックホーのアイドリング時および動作時の CO₂ 排出量の計測を試みた。図-1 にバックホー(6000 cc)の排出量

測定状況、図-2 に対照用のライトバン(1500 cc)の排出量測定状況、図-3 にセンサー部を示す。

図-3 の CO₂ プローブには、VAISALA 社製 GPM251、測定範囲：0~20%、動作範囲 0~60℃ を用いた。また風速プローブは、KANOMAX 社製 0693-00、測定範囲：0~50 m/s である。

図-1 のバックホー排気管から直接吐出される排気は 100℃ 以上で、CO₂ プローブの動作範囲は 0~60℃ であったため、12 m のアルミ蛇腹をアルミテープで接続して冷却し、動作範囲温度での CO₂ 濃度を計測した。図-2 のライトバンでも同様である。

バックホーにおいてはアイドリング時と最大回転時、ライトバンではエンジン回転を 2000 回転として行った。

図-5 の CO₂ 排出量は、図-4 の測定結果から次式で計算した。

$$C = \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \times v \times c$$

ここに、

C : 秒当りの CO₂ 排出量(m³/s)

φ : 排気管径(m), BH : 0.15, AD : 0.035

v : 風速(m/s)

c : CO₂ 濃度(%) / 100

アイドリング時でバックホーの CO₂ 排出量は、一般乗用車の 7 倍余りになる事がわかった。最大回転時には 25 倍余りにもなる。これは排気量比以上の値である。

また図-6 に示すように、熱発電素子であるペルチェ素子によって、バックホー排気の排熱を利用し、素子の仕様どおりの発電出力が得られる事が確認できたが、高温な排気ガスなため、素子表裏の温度差を確保する事が出来ず電圧が 1V 程度であったため、今後は吸熱側のヒートシンク構造の改善が必要である。

3. 今後の展望

バックホーCO₂排出量は図-4 より最大回転時 0.01m³/s 程度となった。排気温度を 100℃として 1 気圧の CO₂ 密度は 1.331 kg/m³ なので、重機の 1 日の稼働時間を 8 時間として排出される炭素換算量は、0.01 m³/s×3600×8 s×1.331kg/m³×0.273=104.6 kg/日となる。

一方で 1 ha 当たりの森林が吸収できる年間炭素吸収量は約 2.4 t (1 ha 当たり 31~40 年生の針葉樹千本の立木



図-1 バックホーCO₂排出量測定状況



図-2 ライトバン CO₂ 排出量測定状況



図-3 センサー部

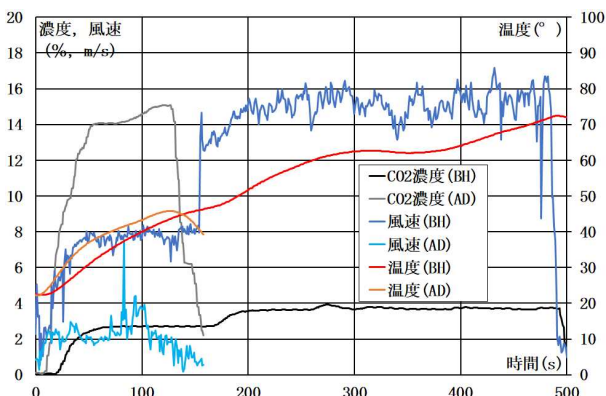


図-4 バックホー，ライトバン測定結果

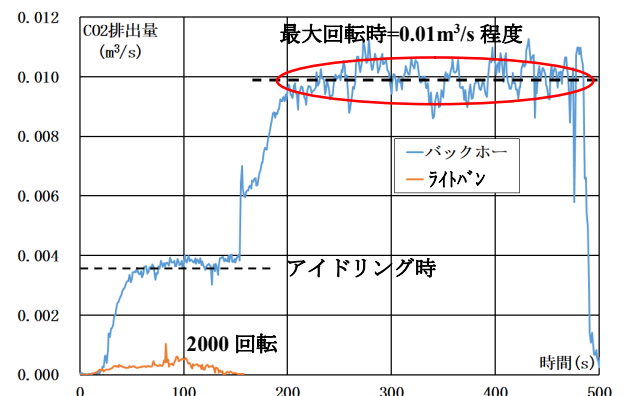


図-5 バックホー，ライトバン CO₂ 排出量

があると仮定した場合)と言われており、同じく1日当たりとすると $2.4 \text{ t}/365/\text{日} \times 1000 \text{ kg} = 6.6 \text{ kg}/\text{日}$ となる。

したがって、建設現場でバックホー1台を1日8時間稼働させた場合に必要となる森林面積は $104.6 / 6.6 \text{ kg} = 15.8 \text{ ha}$ となり、地方中小の土木施工会社である我々には、このカーボン・ニュートラル達成を直接的に実施することは資源、設備等において、現実的に難しいと思われる。

弊社では現状で我々が間接的に実施可能な炭素循環型システムとして、建設重機より発生する排気ガス(CO₂)に注目し、図-7に示す間接的な炭素循環型システムにより、すべてをサイクルする方法としてロードマップを策定した。

弊社が考える炭素循環型システムは、①建設重機より発生する高温な排気ガスを利用し、ペルチェ効果を用い

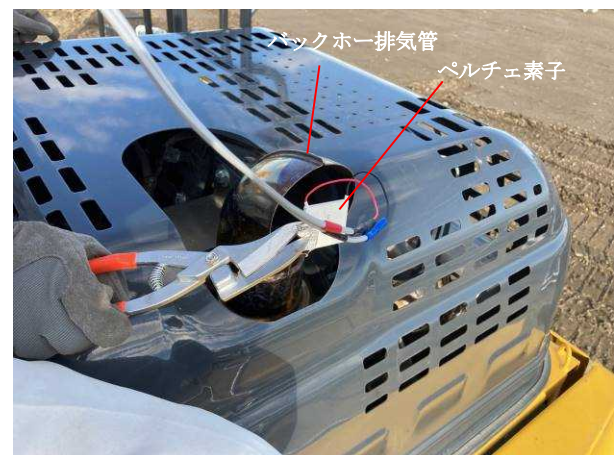


図-6 ペルチェ素子試験

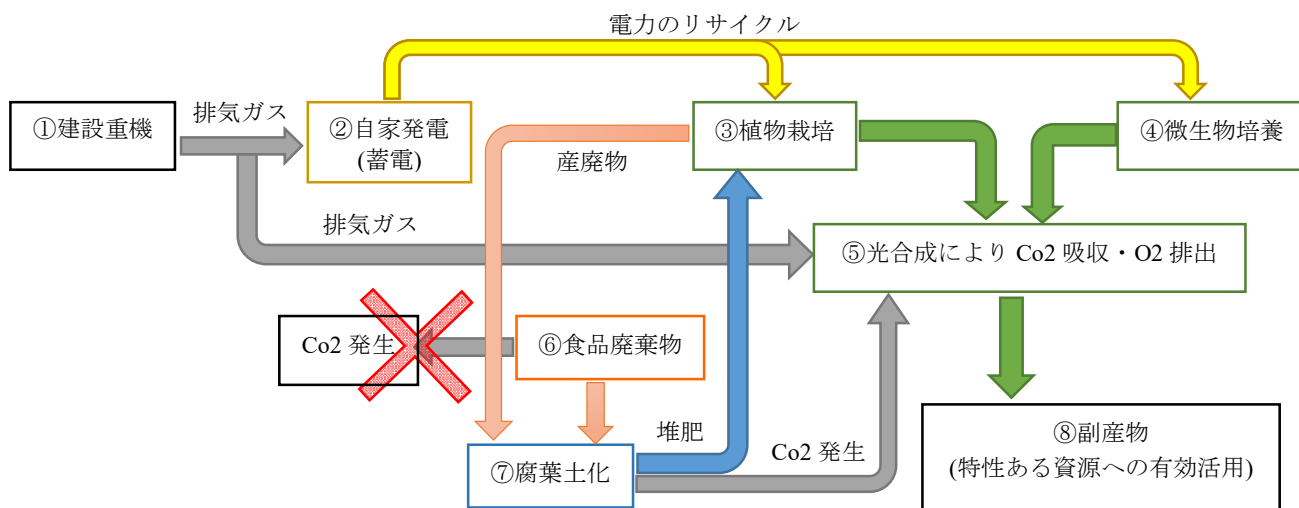


図-7 弊社で考える炭素循環システム

た板状のペルチエ素子により発電，発電出力されたものをバッテリーに蓄電させ，③植物栽培，④微生物培養に必要な光合成の光源となる LED 照明などの施設電力に循環する，②自家発電(蓄電)装置を確立する．

次に③植物栽培④微生物培養であるが、③植物栽培は生育時の CO₂ 吸収率が他の植物より優れていると言われるケナフ栽培を行う。

ケナフは1年生の植物で、4~6か月で3~4mの高さに成長し、各種文献等に差は見受けられるが同面積の森林ならば約1.5~4.5倍程度のCO₂を吸収すると言われており、最大効果の場合であれば、バックホー1台を1日当たり稼働させた際に必要となる森林面積が15.8haから5.2haまで低減することが可能となる。

続いて④微生物培養は植物の特性を有し優れた光合成能力を持ち、15~20%の高濃度なCO₂でも吸収しO₂を排出する事ができるとされているミドリムシの培養を考える。ミドリムシは淡水に生息し、培養方法については様々な研究結果がまとめられているが割愛するが、CO₂吸収量はスギやヒノキの20~30倍と言われている。

また、経済の発展とともに増加の一途をたどる⑥食品
廃棄物の利活用についても考える。

令和 2 年農林水産省資料によると 1535 万トンと言われており、これらの処理は可燃ごみとして焼却されるため、処分時に排出される CO₂ も問題となっているところである。したがって、近隣のコンビニエンスストア・スーパーなどから排出される食品廃棄物の回収を行い、ケナフ栽培過程で産廃物となる葉と混合する事で⑦腐葉土を製造、ケナフ栽培の堆肥として利活用を行う。

以上より、①建設重機、⑦腐葉土から排出される CO₂ も、ケナフ栽培・ミドリムシ培養で行われる光合成により吸収する事が可能となり、栽培および培養過程で収穫されるケナフ、ミドリムシに関しても、その特性を生かした資源活用が行われる工場ラインへ搬出することができれば、前述した炭素循環型のシステムの構築が完成し、かつ地域限定ではあるが食品ロスにも寄与する事が可能であると考える。

4. 特性を生かした資源の有効活用

ケナフおよびミドリムシはその特性を生かし様々な資源へと実用化されているのでその一例を挙げる。

ケナフの茎は表皮、韌皮、茎芯部は多孔質な木質繊維で構成され、韌皮では繊維、紡績などとして毛糸、ロープ、衣料品、パルプが作成され、茎芯部ではチップ化され吸油材、土壌改良材など、さまざまな加工品の材料となっている。特に韌皮より生成された繊維は引張強度が5000～9000 kgf/cm²あると言われている。

ミドリムシはその豊富な栄養素からサプリメントなどに実用化されている事は有名であり、次世代燃料としてバイオ燃料の研究も進んでいるところである。

ここではケナフ繊維の持つ引張力強さに着目し、市販されているケナフ繊維(毛糸)を鉄筋の代替品として使用した環境配慮型コンクリートの可能性について実証実験を行った。

5. ケナフ繊維(毛糸)を使用した実証実験

ケナフ繊維(毛糸)を鉄筋代替品として使用するため、その材料としてはケナフ繊維(毛糸)を概ね直径 1cm 程度まで束ね FRP により固結させ、図-8 に示すケナフ棒(φ1cm)を作成した。固結した FRP 面が割面であるため、コンクリートとの付着を向上させるため、ケナフ繊維(毛糸)をらせん状に巻き付け処理を行った。

また、ケナフ棒強度の対比材料として、ホームセンターなどで一般的に販売されている木の丸棒($\phi 1\text{cm}$)も合わせて鉄筋の代替品として使用するものとした。



図-8 ケナフ棒($\phi 1\text{cm}$)

図-9 示すようにコンクリート供試体 150×150×1000 の下縁側に、ケナフ棒および木の丸棒を1本および2本配置した4Caseにて曲げ強度試験を行った。なお比較対照用にコンクリート単体も1Case設けている。

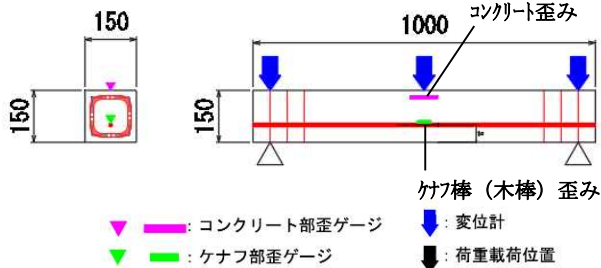


図-9 コンクリート供試体寸法図

測定結果を図-10,11 に示す。今回の試験は、前述したケナフ棒に対する結果であり、ケナフ繊維そのものに対する結果ではない事を注意する。

図-10 は、コンクリート単体とケナフ棒で補強したCaseの载荷履歴であるが、終局荷重は補強の有無に関わらず 11 kN 弱と考えられる。これはケナフ棒が補強材として有効に機能していない事を示すが、その原因として、図-8 に示す程度の処理ではケナフ棒とコンクリートとの付着が鉄筋のように十分ではない事が、まず第一に考えられる。ただし供試体が完全に破壊するまでには補強したCaseの方に、粘りが見られる。そこで終局荷重まではケナフ棒補強のCaseも、コンクリート単体と同様にコンクリートは全断面有効とし、ケナフ棒はその位置のコンクリートと同じ応力にあると仮定すると、図-11 のケナフ棒の応力-歪み関係が得られる。同図によればケナフ棒の弾性係数は、概ね 65000~95000 N/mm² の範囲になる。文献によればケナフ繊維の弾性係数は 53000 N/mm² 程度といわれており、FRP が添加されている事も考慮すると概算値として妥当な数字と考えられる。また降伏点は概ね 2.5~3 N/mm² 程度となった。コンクリートの標準呼び強度を 24 N/mm²、弾性係数を 25000 N/mm² とすれば、ケナフ棒の弾性係数比は 2.5~3.5 である。鉄筋の弾性係数比は実測で 6~8 倍なのが普通であり、また降伏強度はコンクリートの 1/10 程度なので、ケナフ棒を鉄筋の代替品とするのは困難というのが今回の試験結果である。木棒の結果はほぼ同等であった。

しかしながら以上の結果は、今回製作したケナフ棒を用いた限りのものであり、特にコンクリートとの付着の改善等、製作方法の検討と改良は今後の課題である。

次にケナフ棒の引張強度であるが、図-11 に示すように今回の試験では、引張限界に達する前に供試体全体が破壊し、そこで測定が終了したと考えられるのでケナフ棒の引張強度は不明である。じっさい文献によれば、ケナフ繊維の破断歪みは 15000 μ とされている。

そこでケナフ繊維(毛糸)の引張強度に期待するものとして、図-12 に示すような、ケナフ繊維を 3 cm 程度の短繊維となるよう切断し、セメダインもしくは FRP など固めて『ケナフファイバー』を作製し、モルタルに練り混ぜ、その靱性について今後実験する予定である。

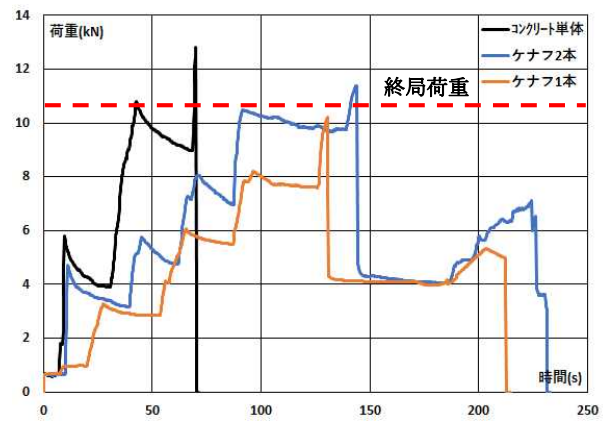


図-10 コンクリート単体、ケナフ補強 Case の载荷履歴

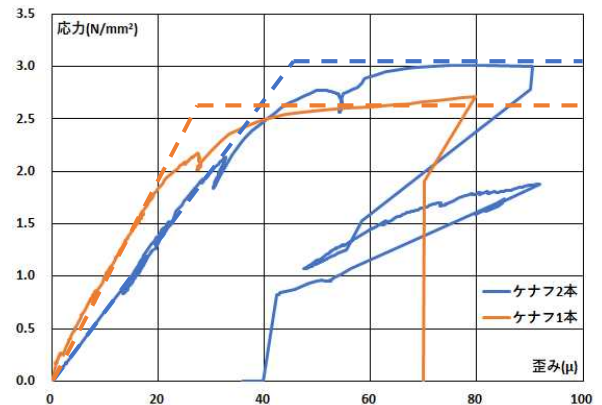


図-11 ケナフ棒の応力-歪み関係



図-12 ケナフ毛糸を用いた繊維

6. おわりに

建設重機より排出される CO₂ 排出量は乗用車の 25 倍程度である事がバックホーCO₂ 排出量の測定で明らかになった。またケナフ繊維(毛糸)に関してもコンクリート構造物との相性について、不十分ながらも期待を込めて、その可能性のある事は確認できた。ここに例示したような炭素循環型システムにより、中小の建設企業もカーボン・ニュートラルの一翼を微力ながらも担えるものと考えられる。これが、地域関連企業との協力、共感をも得る事を切に願うものである。

今後は、炭素循環型システムの構築実現化に向け実証していない事案の検証、合わせてケナフ繊維(毛糸)を使用した環境配慮型コンクリートの可能性を広げるための研究を継続したいと考えている。