

コラム

歩行のエネルギー消費についての考察 (1)

計量分析ユニット 松尾 雄司

本稿は宮川卓也「自転車のエネルギー消費についての考察」¹の続報である。勝手な引用を許可していただいた宮川氏にはこの場で初めて感謝申し上げたい。ここでの論点は運輸部門のエネルギー消費の形態として、一般的なガソリン乗用車への乗車と自転車、徒歩とを比較した場合、それらの効率上の優劣はどのようなものとなるか？ということである。

現在販売されるガソリン乗用車の平均的な燃費は 18.3km/L 程度であると言われる。つまり 1 リットルのガソリンで 18.3km の走行が可能である、もしくは 1km の走行をするのに 18.3 分の 1 リットルのガソリンを要する。では自転車の場合はどうなるだろうか。エネルギー消費の統計の上では、通常自転車による消費は計上されない。しかし自転車によりエネルギーを消費せずに走行が可能となるわけでは勿論ない。実際にはそれをこぐ人の体内にあるエネルギー源を利用して、自転車は動いているのである。宮川によると自転車の平均的な時速を 15km/h とし、運転する際の平均的な消費カロリーを 400kcal/h とすると、その燃費（走行距離をエネルギー消費量で割った値）は 0.0375km/kcal となる。比較のためガソリンの発熱量 8,266kcal/L で単位をそろえると、自転車運転時の燃費はガソリン換算で 310km/L となり、平均的なガソリン乗用車の新車燃費 18.3km/L に比べて遥かに効率が良い、という。一方で経済性について言うと、自転車運転時に利用するエネルギーの単価を 0.6 円/kcal（つまりおにぎり 1 個のカロリーを 200kcal、価格を 120 円と想定）とすると、自転車による移動のエネルギーコストは 16 円/km となり、ガソリン車の 8.2 円/km に比べてかなり劣る結果となる、と宮川は言う。

同様の計算は歩行に対しても可能である。仮に歩行の速度を 6km/h、消費カロリーを 200kcal/h とすると、その燃費はガソリン換算で 248km/L となり、自転車（310km/L）に比べて劣るものの、ガソリン車（18.3km/L）に比べると遥かに効率が良い。一方でおにぎりの消費に伴う歩行のコストは 20 円/km となり、自転車と同様ガソリン車に比べてかなり劣る結果となる。即ちエネルギー使用量でみると歩行はガソリン車の 14 倍、自転車は 17 倍燃費が良いのに対して、燃料自体のカロリー当りのコストがおにぎりはガソリンの 33 倍であるために、結果として走行距離当りのエネルギーコストは歩行が最も悪く、次いで自転車、最も良いのはガソリンを消費できる自動車である、ということになる。私が乗用車に乗るということはたった一人の人間を移動させるために 1 トンもの物質を運ぶということであり、エネルギー利用の面からは非常に無駄が多い。しかしコストの面からは、輸送用燃料としての石油製品は非常に優れたものであるということが、上記の結果から明らかにわかる。

繰り返すと、エネルギーコストに関連した経済効率性の評価という観点に立った場合、

¹ 宮川卓也「自転車のエネルギー消費についての考察」 <http://eneken.ieej.or.jp/data/5059.pdf>

その結論は以下の通りとなるだろう。

1. エネルギー消費の効率性の観点からは、歩行は乗車に比べて遥かに優れている。それは前者が運ぶものは人の身体だけであるのに対し、後者が運ぶものは巨大な自動車の車体を含む、という根本的な差異を反映している。
2. 一方で経済性の観点からは、主に燃料価格の違いにより、歩行のエネルギーコストは乗車に及ばない。
3. このため少なくとも経済合理性の観点からは、乗車に対して歩行が選択されることはない。

以下、これらの結論が全て誤りであることを述べる。最も見易いのは 3. であろう。我々は実際に歩くか乗車するかを選択する際に常に経済合理性を考慮するわけではなく、仮に考慮したとしても、それは大抵の場合上記のような形でのエネルギーコストへの考慮ではない。これについて宮川は、「交通手段の選択において自転車と自動車のいずれを選択するかはエネルギー効率やエネルギーコストによって決定されるものではなく、むしろ移動距離、取得・維持費用や保管場所、同乗者や荷物の有無、免許の有無、天候などの条件から決定される」と述べている。経済合理性という観点で言えばむしろ、「スポーツジムに通う費用を節約するために、自動車に乗らずに歩く」というような選択が、しばしばなされるであろう。

次いで誰もが思う疑問は、2. においてコスト計算におにぎりの例を使うことは果して妥当であるか、ということだろう。もし仮にバナナを 1 本 20 円で買い、そのカロリーが 100kcal であった場合には、カロリー当りのコストは 0.2 円/kcal、その場合のエネルギーコストは歩行で 6.7 円/km、自転車で 5.3 円/km となる。つまり毎日おにぎりではなくバナナを食べ続ける限りにおいては、歩行や自転車はガソリン乗用車に比べてエネルギー消費効率・エネルギーコスト双方の面で強い優位性をもつ、という結果になる。勿論逆に、一人前 500kcal で 5,000 円する握り寿司を食べた場合には歩行のエネルギーコストは 330 円/km と極めて高くなる。

しかしより根本的な論点は、そもそもこのようなコスト評価は手法として妥当であるのか、ということであろう。即ち、我々は自動車に乗ったとしても食事をする。もし食事のコストをエネルギーコストとして計上するならば、当然それは乗車した場合についても計上されなくてはならない。そして歩行・乗車双方のケースでかかる食費の差が、歩行を選ぶことによる追加的なエネルギーコストである、ということになるだろう。

いま仮に日曜の朝、私在家から 1km 離れた A という地点まで行く際に車に乗るか、歩いて行くかの選択をすると想定しよう（実際には私は自動車を持っていないので、あくまでも仮定の話である）。仮に私が 1km 先まで 10 分かけて歩き、そこで 33kcal のエネルギーを消費した場合、果して私は追加的に握り寿司を 333 円分、もしくはバナナを 7 円分購入

するだろうか？人にもよるだろうが私の場合、恐らくそうではない。A 地点まで歩いて行くか車で行くかによって、私のその日の昼食もしくは夕食の内容はほとんど変わらない、だろうと私は思う。勿論人によってはより空腹になることにより、より多くの食事をする場合もあるかも知れないが、その場合でも消費したカロリーと同等の食費の増加にはならないだろう。即ち確かに歩行によって私の体内のエネルギーは消費されるものの、身体のエネルギー消費はその他の活動を含む生活の総体において決められるため、一般的には歩行によるエネルギー消費量の増加はそれに応じた食費の増加を意味しない（恐らくはその分、体内の他の何かのエネルギー消費量が減少して調整がなされるのであろう。人によってはそれは体脂肪の蓄積として差が生じるのかも知れず、その場合は逆に上述の通り、エネルギー消費を抑えて蓄積した場合の方がジムの登録料等の追加的な費用を要することになる）。それが平均的にどの程度の *elasticity* をもって増加するかは多数のサンプルを採って実験を行えば解明されるであろうが（しかし私自身はその定量的評価には全く興味がないため、自分でそれを行うことはないであろうが）、いずれにせよ歩行のエネルギーコストは我々が日々バナナを食べるか否かによって変化するとともに、それ以上に、我々自身の生活のあり方もしくは生理的な状況に依存する、とすることができる。私の予想では多くの場合、さほど遠くない距離であれば、結局は歩いた方がエネルギーコスト（追加的な食費とガソリン代を加算した金額）は小さいのではないかと思う。いずれにせよ、これらの問題から上記の 2. が誤りであることは明らかである。

同様の観点から 1. を見た場合にはどうなるか。まず人は仮に一日中乗車していたとしても食事をし、即ちエネルギーを消費するのであり、それも含めてエネルギー効率を評価する必要がある、と言える。ハンドル一つ動かすことでさえもエネルギーなしには決してできない。人によっては車の運転に異常に神経を尖らせるために気疲れをし、多くのエネルギーを消費することもあるかも知れない。ではその場合、乗車中に消費される体内のエネルギーのうちどの程度が乗車のためのものであり、どの程度がそれ以外のものであるのか、ということが問題となる。ここで我々がすぐに受ける印象は、この問いに答えるためには体内のエネルギー消費に関する細心の分類とその評価が必要になり、その作業は容易ではない、ということであろう。或いは簡易には、歩行による食費の増加の問題と同様に、自動車を運転する人とそうでない人とのサンプルを多数採ってその食事の増加量を測定すれば消費するエネルギー量の増加を評価できる、と思われるかも知れない。しかし実はその印象も正しくない。この問題が歩行による食費の増加の問題と根本的に異なる点は、これは仮にどのような実験を行ったとしても解決される問題ではなく、それ以上の概念的な問題を孕んでいる、という点である。

「総合エネルギー統計」によれば平成 23 年度の日本の一次エネルギー消費量（＝供給量）は 21,959,715TJ（≒22EJ）であった。これは平均的な成人男性の一日の摂取カロリーの約 70 億倍である。しかしこれは日本という国が平成 23 年度に実際に物理的に 22EJ のエネルギーを利用した、ということの意味するものではない。よく知られる論点は、エネルギー

バランス表上の電力の一次エネルギー換算の問題である²。例えば石炭を用いて発電を行った場合、1kWh の電力を単位換算して 3.6MJ とし、それを発電効率（日本の場合概ね 40% 程度）で割った約 9MJ が一次エネルギー投入量となる。石炭火力発電では 9MJ の石炭由来のエネルギーを利用して、発電の際に 5.4MJ の損失をして、結果として 3.6MJ の電力を得ることになる。では、地熱発電の場合はどうか。発電した電力 1kWh が 3.6MJ に換算されることは石炭火力と同様であるが、その発電のために一体何 MJ の地熱を消費したのかを、我々は知る方法がない（恐らくはこの場合、地熱の「消費量」という概念自体を定義することができない）。そこで日本政府が公表する「総合エネルギー統計」では、地熱のみではなく太陽光・風力・水力・原子力等全ての非化石エネルギーについて、そのエネルギーバランス表上の「取り決め」としてその発電効率を火力の平均である 41%と想定し、発電量をその値で割り戻したエネルギー量を一次エネルギー消費量と定義している。上記の日本の年間のエネルギー消費量 22EJ の中にはこれが含まれるため、その値は実際に物理的に消費された「エネルギーの量」を示すものではない。ちなみにこの 41%という想定値は、国際エネルギー機関（IEA）のエネルギーバランス表ではエネルギー源ごとに異なった値（原子力について 33%、太陽光・風力等について 100%、地熱について 10%）とされており、このような差はこれがただの「規約」に過ぎないことを誰の目にも示すものとなっている。

これは必ずしも電力ばかりの問題ではない。私が A まで行くその日、仮にそれが冬の非常に寒い日で私が懐炉をもって歩いて出かけたとしよう。その懐炉によるエネルギー消費量は、輸送に係るエネルギーに含まれるであろうか？そうではない、と多くの人は思うであろう。しかし一方で自動車内の暖房のために用いられるエネルギーは、輸送部門のエネルギー消費として計上される（従って空調に伴うエネルギー消費が大きくなる夏期や冬季には、その分「自動車の燃費が悪くなる」、と実際に言われる）。両者の違いは単純に、後者にあつてはエネルギー消費の増加がガソリンの消費量増加に結びつくために、輸送のための燃料に含めて扱うことが便宜上容易である、ということに過ぎない。このように我々がエネルギー消費と言うときに、そこで言及される「エネルギー」とは物理学上のエネルギーと密接に関連はしていても、それとは別の概念であると考えなくてはならない。それは単純にあるエネルギーバランス表（例えば「総合エネルギー統計」であるとか、IEA のエネルギーバランス表であるとか）に基づく特殊な「規約」もしくは「取り決め」としての概念なのであり、そうでない（「規約」でない）「真のエネルギー消費量」などというものは幻想に過ぎない。従って 1.「歩行は乗車に比べて遥かにエネルギー効率性に優れている」というような主張は正しくない。そうではなく、「我々が参照するエネルギーバランス表の規約上、歩行はエネルギー消費量計上の対象外であり、そのエネルギー効率などというものはそもそも存在しない」と言わなくてはならない。寧ろ 1.という主張は、誤りとい

² 戒能一成「電力の一次エネルギー供給の算定方法について」

<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2010EBXANX0100.pdf>

うよりも正確には例えば「私の所有する三角の希望は絶対零度の白熱を帯びている」といった文と同様の、構文上日本語ではあってもその実全く意味を持たない、ナンセンスな主張であると言うべきであろう。このような主張を我々がしたがるのは、単に我々が自らの言語の利用に関して十分な自覚を持たず、その故に「真の」エネルギー消費量などというものが存在すると思いきこんでいるからに過ぎない。しかしそれを「真の」と呼ぶとき、我々は一体何を言おうとしていたのだろうか？またそれが「幻想に過ぎない」というのは、一体どういう意味なのか。これらの問いについては、次回考察することとしたい。