

星の回転と磁場

岡本 功*

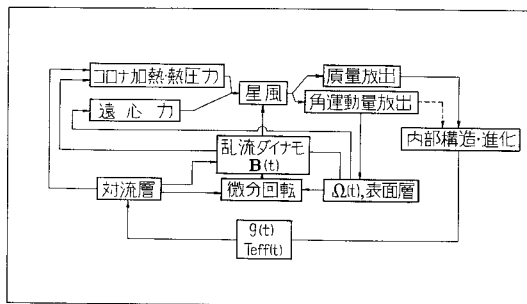
1. はじめに

星には回転と磁場はつきもの(憑物?)である。これらがなければ星はその重力場のもとに球対称性を保つてであろうから、星の内部構造・進化の理論は簡単化され、もう完成の域に達したといっても過言ではあるまい。しかし現実の星はそれほど理想化できなくて、これらのやっかいな代物に悩まされる場合も多い。その反面、回転と磁場は地球、太陽を始めとしてパルサーに至るまで殆どの星に存在して色々興味ある現象を引起し、恰好の研究テーマを提供してくれるのも事実である。

天体の回転の起源について一時は銀河回転の角運動量の一部が星に移行すると考えられたこともあったが、今では星間空間のガス雲が分裂、収縮して原始星が出来るときにランダムなスピニングが与えられて星の角運動量となると考えられている。なぜなら、星の自転軸の分布と銀河回転の軸との相関は見出されていないからである。

天体磁場の起源、その効果、形態学等はアルフベンに始まる電磁流体力学の絶好の応用分野で、今や宇宙電磁流体力学は全盛期を迎えている。星の磁場の起源については三つの可能性が知られている——すなわち、化石説、バッテリー機構、ダイナモ機構。化石磁場はその名の通り星間空間の物質から星が出来るとき凍結していた原始磁場が捕獲されて星の磁場になるというものである。スペクトル型でA型星に強い磁場を持つものが多く、普通これらは化石磁場であるといわれている。しかし、これらとて星の形状を保てる最大の磁場の強度からすればはるかに小さく、これらの磁気星の数は星全体の数からすれば少数派である。従って、天体磁場の起源を探るのももちろん重要であるが、メステル教授のいうように化石磁場がどうして普通の星には見られないのかを問うのも興味あることである。化石磁場自体は星の形成(の研究?)には一つの障害物であるが、原始星の持つ角運動量を取除くという点で一つの有効な手段である。しかし、他の二つの機構ほどには回転の恩恵を蒙ることはない。所が、バッテリー機構、ダイナモ機構では星の回転は本質的に重要である。この解説記事では回転とダイナモ磁場の関係に限定し、最後に化石磁場の運命がどうなるのかについてメステルの考えを紹介する。次の相関図はキッペンハーンのもの(を少し修正したもので、磁場の再生に不可

欠な表面对流層を持つ晩期型星で見られる色々の現象間の関係を示すものである。この図を参照しながら、星の回転とダイナモ製磁場のグローバルな相互作用について述べる(天文月報 1971年3月号(第64巻第3号)の関連記事参照)。



2. 星 風

太陽からの微粒子流の存在が彗星の尾の形からビアンによって発見されたことはよく知られている。この理論的説明はパーカーによって与えられ、太陽風と呼ばれることも衆知の通りである。太陽風が吹く原因は太陽のまわりの数百万度の高温コロナと星間空間との熱圧力差であるから、よく熱風と呼ばれる。相関図にあるようにコロナの加熱は太陽表面下の対流層に由来するもので、対流層で発生した色々の擾乱がアルフベン波等の波動の形で上方に伝播し、コロナで密度低下のため衝撃波となり、それによる散逸化で波動の運動エネルギーが熱エネルギーに転換されて起るといわれている。

太陽風のような熱風は太陽とよく似た構造を持つ星、すなわちスペクトル型でF型より晩期型に属して表面に対流層を持ち、従って高温コロナを持つと期待される星から吹くと考えられる。星風の直接の観測的証拠はないようであるが、熱風を含めて一般に表面活動と称される、対流層の存在と関連した現象を表わすパラメーターとしてよく言及されるものに彩層でのカルシウムK線の輝線がある。このK線の存在からF, G, K型星ではコロナの存在が予想され、従って熱風が吹くことが期待されるわけである。このことは後に触れる星のスペクトル型と自転速度の関係からも確かめられることである。

星から風を吹かせる原因として、熱圧力の他に星の自転に伴う遠心力が知られている。この遠心力は赤道面で

* 緯度観測所

I. Okamoto: Rotation and Magnetic Field of Stars.

重力に対する比が大きくなってくると、熱圧力を助けて強力な風を吹かせる。比が1より大きいとそれ自身で風を吹かせる原因となり、低温コロナからでも遠心力風が吹く。パルサーから吹く星風も一種の遠心力風とみなせる。この他星風の原因としては輻射圧、特殊な構造を持つ磁場のストレスなどがある。

これらの原因による星風は星の重力による束縛（磁場によるものは後記）を振り切らなければならないので、その条件を表わすパラメーターとしてメステルにならって $l = GM/r_s a^2$, $\kappa = \Omega^2 r_s^3 / GM$ を定義するのが便利である。 r_s はコロナ底の半径、 a は等温と仮定したコロナ中の音速、 Ω は星の自転角速度である。コロナ底での熱エネルギーと重力エネルギーの比を表わす l は、これが小さいほど強い熱風が吹くことを福す。 κ は遠心力と重力の比で、 $\kappa l = \Omega^2 r_s^2 / a^2$ は遠心力風と熱風の強さの比に対応する。

3. 回転の磁気制動

パーカーの太陽風理論ではやっかいな回転も磁場も入っていないので、定常球対称解を決めるいわゆる臨界点は流れの速度が音速に等しくなる音速点だけであった。これに回転と磁場が付加されると、熱風に遠心力風が重なり、その流れは磁場によって規制される。コロナ底から音速以下でスタートしたガスは磁力線に沿って流れ、やがて音速に達し、次いで局所的なポロイダル磁場 B_p のアルフベン速度に等しいアルフベン点に達する。ここで流れの運動エネルギーは磁場のエネルギーに等しくなる。アルフベン点より内側では $(1/2)\rho v_p^2 < (B_p^2/8\pi)$ で、流れは磁場に支配されるので、星風物質はこの点まで星と共回転するといっても過言ではない。この点を過ぎると、流れが磁場を支配し磁場は動径分布に近づくと考えられる。磁場に沿って流れを決める臨界点としては上記の音速点の他に磁気音速点があり、これらの二つの点での臨界条件でショックなどの不連続性のない定常解が決まる。

星風に伴う磁場分布は実際には流れの構造と一緒に連立方程式系から解かなければならない。そこで問題になるのは星の表面（またはコロナ底）での境界条件である。これに第0次近似として双極子場を考えるのはそれほど悪くないであろう。すると磁気圧の強い赤道面近くでは流れは押えられ磁力線の閉じた領域が出来、ある限界の磁力線より極側では磁力線は無限遠まで開いていて、風域を形成するであろう。この限界磁力線を決める条件は二つの領域間の「ガス圧+磁気圧」の平衡である。磁場の強さを表わすパラメーターとしてコロナ底の自転軸上での磁気圧とガス圧の比 $\zeta = \bar{B}^2/8\pi\rho_s a^2$ (ρ_s はその点の密度) を使う。前記のパラメーター l , κ およ

び ζ が与えられたとき、自転軸から赤道側への磁力線まで開いているかを決めることは、相関図にある質量放出、角運動量放出の割合を知る上で極めて重要になってくる。例えば、熱風に対し ($\kappa l \ll 1, l \sim 3$), ζ が大きいとき閉じた領域は大きくなり、質量放出の量は小さくなる。しかし、角運動量放出に関しては、 ζ とともに星との共回転の領域が外側に拡大し、風域が狭くなるのを相殺する。従って、 ζ が増えると単位質量放出当りの角運動量放出量は飛躍的によくなり、星は経済的に角運動量を放出できることになる。遠心力風に対しては ($\kappa l > 1$), κ が大きく、また $\zeta/\kappa l = \bar{B}^2/8\pi\rho_s\Omega^2 r_s^2$ が大きいと、単位質量放出当りの角運動量放出効果はよいことになる。

このように星風に伴う磁場の形態学は回転及び磁場の進化だけでなく、相関図にあるように質量放出、角運動量放出を通じて星の内部構造・進化にも影響を及ぼす。しかし、残念ながら回転の入っていない太陽風の場合を除いては、 l, κ, ζ の任意の組合せに対し一般的な解は求められていない。現在のところメステルと筆者が磁場分布を双極子場と動径場の任意の混合型と仮定した場合について質量放出率、角運動量放出率を計算しているだけである。

4. ダイナモ機構

コロナ加熱、星風などの表面活動をコントロールする磁場は星の内部に源があってそこからしみ出して来たものであると考えられる。太陽のように表面下に対流層を持つ星ではそこでのマス運動によってダイナモ活動が期待できる。どのような条件のもとではダイナモが作用するかというのは古くからの大問題の一つであり、ここで正面切って取上げるには荷が勝ち過ぎるので、他の現象との関連性に則して極く現象論的に触れるに留める。

ダイナモに関しては厳密に軸対称な系では定常磁場は維持できないというカウリングの有名な定理がある。星のなかで閉じている軸対称なポロイダル磁場 B_p は必ず O 型の中性点を持ち、軸対称なトロイダル場の中性点は対称軸にある。有限な電気伝導度を持つ流体では閉じた磁力線のループは必ず O 点ヘドリフトし、磁場のエネルギーとフラックスの破壊が起る。どのような軸対称な運動もこの減衰に打ち勝つことはできない。従ってオーム抵抗による減衰に対抗して維持できるような磁場は複雑な構造を持つと考えられる。

最も手近な発磁機構の一つは太陽サイクルで見られるもので、太陽磁場は 22 年周期で変化することはよく知られている。カウリングの定理に則していえば、太陽ダイナモの問題はポロイダル場のループが O 点ヘ縮んでいくのをどのようにして新しいもので補うかということになる。それには初期の磁場をゆがめてポロイダル・フ

ラックスを再生するようなマス運動が必要となる。普通 B_p から B_i をつくり出すのは（例えば表面と内側との）微分回転であると考えられている。この微分回転には色々の原因が知られているが、ここでは相関図にあるように簡単に星風によるブレーキで表面層の回転が遅くなり、内部と回転角速度に差が生ずると考える。頭をひねる必要があるのは B_i からどのようにして新しい B_p' を得るかという点である。ここで非軸対称運動が必要になる。例えば、磁気浮力で部分的に浮き上がったトロイダル磁場を浮き上がった方向のまわりにコリオリ力などで 90° 回してやるといった操作である。これらはパーカーなどの太陽ダイナモモデルの最も基本的な考えで、特徴は微分回転とトロイダル場のひねりという系統的大規模運動にある。太陽ダイナモは定常ダイナモでなく、最初の磁場を再生するよりもむしろそれを消滅させ逆転させる周期ダイナモである。

最近 10 年ぐらいほとんど混沌とした小規模な乱流運動で大規模な磁場がつかれるかという乱流ダイナモの議論が盛んである。乱流の統計的取扱いから厳密に等方的乱流では駄目で、かなり異方性がないとダイナモとして働かないことが示されている。この異方性というのは上記のトロイダル場のひねりに対応した概念で人によって呼び方が異なり、ミラー対称性を持たないとか、ラセン性を持つとかいわれる。統計的には任意の方向で速度と渦度の相関が正であるということに対応する。乱流がこのような異方性を持つとき小規模運動は αB (α は速度の次元を持つ) の起電力を持ち、乱流エネルギーを磁場のエネルギーへ変換できる。乱流では大きなフーリエ成分から小さいフーリエ成分へエネルギーが移動していくことが知られているが、これは磁力線をもつれさせる作用をする。しかし、乱流が上に述べた特性を持つことは小さな波長から大きな波長へと磁場エネルギーの系統的な逆漏洩があることに対応している。このような乱流ダイナモはこの方面で精力的に活躍しているステンベック、クラウゼ等になって“ α -メカニズム”といわれる。 B_i から B_p をつくる時は α -メカニズムで、 B_p から B_i をつくる時は α -メカニズムより微分回転の方がより効果的であるから、この両者を組合せたダイナモは“ $\alpha\omega$ -ダイナモ”と呼ばれる。

このような理論は、乱流から発生した磁場の乱流に対する反作用は小さいと仮定して、線型化した方程式にもとづくものであるから、運動学的ダイナモである。実際の星の対流層でどのくらいの大きさまで乱流から磁場が成長しうるか、あるいは成長した磁場が乱流の速度場によるような影響を及ぼすかについてはこの線型理論からは何もわからない。ここで知りたいのは種磁場があったとして星の対流層でどの程度まで増幅できるか、もっと

具体的には対流層を持つ星の質量、半径、有効温度、回転角速度などのグローバルなパラメーターの関数として期待できる磁場の強さである。この本質的に非線型な現象に対し厳密な理論がないので正確なことはわからないが、成長した磁場の強さの上限の極く大きざばな値として、例えば回転流体のコリオリ力と成長した磁場によるローレンツ力がほぼ釣り合うという条件 $2\rho|\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}| \approx |\nabla(B_i B_p)/4\pi|$ から得てみよう。対流層に混合距離理論を使うと、最もダイナモ活動が盛んな所ではポロイダル磁場の二乗は $B_p^2 \approx 8\pi\rho v_l \omega (B_i/B_p)$ となる。対流層の典型的な速度として全エネルギーフラックスを対流で運ぶとして $v_l \approx (2LR/M \cdot l_i/R)^{1/2}$ 。混合距離 l_i としては圧力のスケールハイト、もっと乱暴には星の半径の $1/5 \sim 1/50$ 程度を取る。 B_p/B_i はステンベック、クラウゼラの理論から α -メカニズムと微分回転の比程度になり、大体 $B_p/B_i \approx (l_i/R)^{1/2}$ 。非常に荒っぽい話であるが、このようにすればともかく星の質量、半径、明るさ、自転角速度の関数として磁場の強さが決められる。これはダイナモ作用が最も活発な領域での評価であるから、星の表面現象をコントロールする磁場としては上記の B_p^2 に例えば $1/10$ ぐらいのファクターを付ければよい。

5. 実際の星では

以上星風、回転の磁気制動、ダイナモ機構の個々のプロセスを説明したが、相関図にあるようにこれらのプロセスは互に規制しあっている。すなわち星における対流層の存在はその外側に彩層コロナ系を発生させ、膨張するコロナは星風として星からの物質損失の原因となる。そのとき星の表面層に磁場がなければ、その星にとって重大な結果を招くことはないであろうが、対流層の存在は同時にダイナモ製磁場の存在を意味する。外まで伸びている磁場は星風をコントロールして角運動量放出量を増大させ、磁場で結びつけられている星の表面層の回転角速度を減少させる。この減少は対流層に微分回転を生じさせダイナモの働きを容易にする効果があるが、巨視的には星全体（あるいは対流層全体）の回転角速度の減少につながり、“ α -メカニズム”の Ω -依存性を通じてダイナモ活動を弱める作用をする。もちろんブレーキのタイムスケールはダイナモの代表的タイムスケールにくらべて十分長いと考えられるから、ダイナモ活動は準定常的に進行すると見なしてもよい。このようにして対流層の効果的存在によって回転とそれを制動する磁場の間に巨視的な相互作用が起ることになる。

もし星が重力収縮の段階にあって、重力収縮のタイムスケールよりブレーキのタイムスケールが小さければ、星の自転角速度は減少していく。もし重力収縮の方がブレーキより早ければ、星の角運動量は減少するにもかか

ならず、自転角速度は増加する。

星の形成について今日では星間空間のガスと塵の大きな雲が全体としての重力収縮の間になんらかの(例えば熱的)不安定性で分裂して、それぞれの小さな塊が更に収縮して星が誕生すると考えられている。そのとき小さな塊はランダムなスピンのを与えられ、その遠心力のために平ぺったい形をとるであろう。星間磁場が原始星と周りの物質を結びつけていれば、原始星からかなり角運動量を取去るのに役立つと考えられている。やがて原始星の動力学的収縮が止まり、準静的収縮段階に達し、*HR* 図上に姿を現わす。主系列前のこの進化の段階は林一フェイズと呼ばれ、星の内部は殆んど全対流的であることはよく知られている。この段階から主系列までの進化は定量的によくわかっており(回転と磁場のないとき)、太陽質量程度の星ではかなりの時期まで全対流的構造を持ち、主系列に近づくとも輻射コアが出来てくるが、表面下にはなお対流層を留めている。太陽質量より少し大きいと全対流的である時期は短かく、主系列に達したときの内部構造は中心に対流コアを持ち、表面は輻射層を成している。太陽質量より小さいとき主系列に到達して水素燃焼が始っても表面对流層は深い所まで達している。

主系列星で対流層を持ち、F型星より晩期のものは自転速度が小さく、早期型のは早いということはよく知られている。回転速度の大きい早期型星と異なり、晩期型の太陽質量程度以下の星は林一フェイズから主系列に至る長い期間中上記の対流層に起因する星風磁気トルクを受け続け、現在観測されるような低速回転になったと考えられる。対流層を持つ星の低速回転を説明するのに、かつてシャツマンは太陽のフレア活動をモデルにして角運動量放出機構を考えた。シャツマン・タイプ・メカニズムとして一世を風靡したこの機構では、太陽の11年周期に相当する周期で変化するランダム発生のフレア活動に伴う磁気制動を考えるわけであるが、彼の磁気制動の考えは現在の星風理論に受継がれている。またフレア等の非定常な表面活動に伴う磁気トルクはむしろ定常的な星風トルクに上乗せされる性質のものである。

ここで重要なことは、林一フェイズから主系列にかけてブレーキ作用に効くのは化石磁場ではなくダイナモ製磁場でなければならないという点である。もし原始磁場が効いたとすると、それは $\Omega(t)$ に依存しないし、磁場フラックス保存で(厳密でなくても)ある程度強まることも考えられるから、収縮に伴う回転の早まりを考慮しても、 $\Omega(t)$ は指数函数的に減少して、星がエンコシしてしまうからである。ダイナモ製であれば Ω -依存性を通して自己規制が効き、 Ω の減少はゆるやかで、主系列に達したときでも太陽のようにある程度の回転が期待できる

わけである。

林一フェイズから主系列にかけての進化の段階にある星として牡牛座 T 型星やフレア星が知られている。牡牛座 T 型星はその活発な対流層に起因するとみられる激しい質量放出が観測されている。またフレア星は太陽のそれによく似たフレアを頻発に起す。ポベダ(A. Poveda)は化石磁場が沢山残っている若い時分にはフレア活動が盛んで、主系列に近づくとも化石磁場の減少のため活動度は低くなるとしているが、観測事実は必ずしもそうではない。ムラン(D.J. Mullan)は筆者の磁気制動の計算と簡単なダイナモモデルを組合せて、フレア星の磁場と回転の進化を追跡している。もしフレア星の各進化の段階に典型的な回転速度と磁場の強さが観測できれば、両者の間には進化の時間をパラメーターとする一義的な関係が見出せるのではないかと考えられる。

6. 化石磁場

以上見てきたようにダイナモ製磁場はその $\Omega(t)$ -依存性によって星の回転に早過ぎもしないし遅すぎもしないブレーキをかけることができる。また理論の詳細な部分には不明な点が多いが、少なくとも色々の観測事実に対応できる柔軟性はありそうである。これに対し融通性に乏しい化石磁場が星の主系列までの進化の間にどのような運命を辿るかは別の興味がある。

化石磁場の強さについて林一フェイズでの乱流と関係づけてメステルは次のように分類している：(i) 強い磁場、星全体の平衡に関与し対流も押え込むぐらい強い。(ii) 並みの磁場、密度の低い表面領域では静水圧平衡にあずかるが、対流を封じ込むことはできない。しかしこのような磁場は林一フェイズを通じてそのフラックスの大部分を留めうる。(iii) 弱い磁場、乱流よりはるかに小さいエネルギーしか持たず、対流によるひきまわして各対流泡の磁気エネルギーが増加しても、スケール減少によるジュール散逸のために乱流に反作用を及ぼすほどにはならない。

メステルによれば星が準静的な収縮段階に達したときにはもはや強い磁場は存在していないだろうという。残留磁場は対流による熱の運搬に幾らか干渉するかもしれないが、進化の道筋に影響するほどではないというわけである。対流は、太陽表面の対流泡のグラニュールやスーパーグラニュールの網目で観測されるように、その泡の縁へ磁場を追いやるくせがある。以前は林一フェイズの乱流は磁力線をもつれさせて磁場を死滅させてしまうという議論が多かったが、現在では太陽との類推から磁場は対流層から追放されて辺境に集められるであろうと考えられている。そのとき磁場フラックスは局所的には大

きいかもしれぬオーム抵抗で減衰するかもしれぬが、対流運動のひきのばしで十分補われる。主系列に近すぎ、対流運動が衰えていく領域では磁場が漏れ戻って来て、むしろ安定な構造を取るであろう。晩期型星では原始磁場は表面で観測されなくても、表面対流層によって輻射コア内に封じ込められて残留している可能性があるということになる。普通の A 型星では原始磁場は早い回転に伴う大循環流で分断されて外の方は散逸率の高い場所で減衰し、内側に閉め込まれた強い磁場は観測にかからない。

これに対し A 型特異星は強い磁場を持ち、かつ自転は遅いものが多い。この遅い自転は何に起因するかは興味深い問題である。林一フェイズではダイナモ製磁場と星風によるブレーキ機構が期待できるが、その期間が短い。原始磁場はこの期間晩期型星と同様対流で内部に閉じ込められているであろう。遠心力風は表面の遠心力

が重力より小さくなると効果的でなくなる。そこでメステルは星の磁気圏への星間ガスの付着を考えた。ガスはレイリー・テイラー不安定性で磁気圏を充たし、星と共回転を始める。星はしだいにのろくなり、磁気圏境界で遠心力が重力より小さくなると、付着したガスは直接星へ落込み始め星の回転速度は小さくなるというわけである。

A 型星を、自転は早く磁場の見えない普通のものと同様に強く自転ののろい特異型のものへ分ける分岐点は、回転に伴う大循環流と磁場のうちどちらが勝つかということにあるかもしれない。もし特異星が連星の一員であれば、連星であるために星の体内に生ずる色々の障害(例えば磁場分布の非対称など)が重要な要素になるかもしれない。

以上筆者の勝手な主観と臆測、メステル教授の受売りを通じて星の回転と磁場の関係の一端を紹介しました。

雑報

木星の衛星の名前

木星の第 V 衛星から第 XIII 衛星には、名前がつけられないままになっていましたが、惑星系天体の命名のためのワーキンググループの働きかけにより IAU 委員会は次の名前を採用することに決定したようです。もちろんこれらの名前の採用の正式決定は今年 8 月グルノーブルで開かれる IAU 総会においてなされるのですが、

衛星	名前	発見者	発見年
satellite V	Amalthea	Barnard	1892
" VI	Himalia	Perrine	1904
" VII	Elara	"	1905
" VIII	Pasiphae	Melotte	1908
" IX	Sinope	Nicholson	1914
" X	Lysithea	"	1938
" XI	Carme	"	"
" XII	Ananke	"	1951
" XIII	Leda	Koowal	1974

この内第 V 衛星の Amalthea は C. Flammarion によって提唱されここ数十年にわたって非公式に用いられて来たものです。

Amalthea は Jupiter を育てた山羊の名前とも、妖精の名前ともいわれています。

第 XIII 衛星の Leda は発見者 C. Kowal によって提案された名前での星に、白鳥と化した Jupiter に言い寄られる美しい乙女を思わせる何かがあるのでしょうか。

歴史的にみても私達にはギリシャ・ローマ神話を自らの血・肉として受け入れる要素が少ないので、それぞれの名前を確かにそれと判定できないのですが、この他にも第 VIII 衛星 Pasiphae は“アリアドネの糸”で有名な Ariadne の母の名でしょう。

しかし今回の命名は、これらのことの他に J. Blunck の提案によって順行衛星には末尾が a で終る名前を、逆行衛星には e で終っているものが選ばれていることです。ややきどりすぎの感なきにしもあらずですがおもしろい試みともいえましょう。

(永井隆三郎)

学会だより

大塚奨学金希望者募集

☆天文月報 8 月号ですすでにお知らせしたように大塚奨学金希望者を募集しております。希望される方は 9 月 16 日までに理事長宛にお申し込み下さい。今年から旅費滞在費としてのみでなく、フィルム、乾板等研究材料の購入費にもあてられるようになりました。

会費納入のお願い

☆会費未納の方には 7 月 10 日付書面で納入をお願いしましたが、会の円滑な運営のためできるだけ早く納入下さるよう重ねてお願いします。

秋季年会について

☆講演時間は 1 講演 7 分ですのでスライドの数は 1 枚 1 分を目安に枚数を考慮下さるようお願いいたします。