§2 静電場と近接作用

二つの点電荷に作用するクーロン則の電気力に対し，極限を考えることで電場を定義し，これを近接作用から解釈する．

1） 点電荷がつくる静電場

クーロンの法則により，二つの点電荷の間には電気力が作用する．今，下図のように，静止している二つの点電荷を考え，一方は Q（C），もう一方は q（C）の電荷を持つものとする． 電荷 Q が電荷 q に及ぼす力は，Q から q に向かう位置ベクトルを $\vec{r}$ とすると，

$$\mathbf{F} = \frac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon_0 |\vec{r}|^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \qquad (1)$$

となる．ここで，$\vec{r}/|\vec{r}|$ は，Q から q に向かう単位ベクトルである．

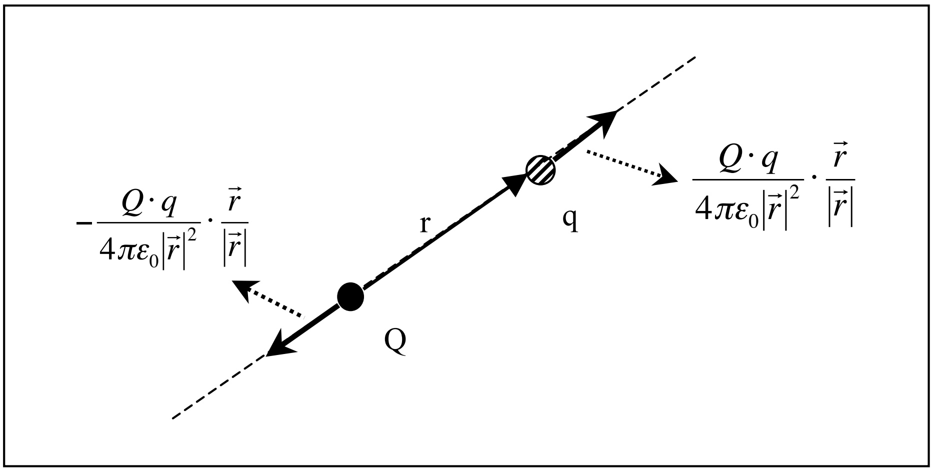

図 2-1．点電荷 Q が位置 $\vec{r}$ にある点電荷 q に及ぼすクーロン力

図 2-1 の状況で，電荷 q が Q の電荷に及ぼす力は，(1)の反作用であるから，(1)に反対符号をつけたものである．従って，(1)の点電荷 Q が位置 $\vec{r}$ にある点電荷 q に及ぼすクーロン力は，次のようにも表現できる．

$$\mathbf{F} = \frac{Q \cdot q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad . \qquad (2)$$

(1), (2)で，電荷 q と Q が同符号の場合は， (Q・q)は正で反発力となるが，q に

働く力は，Q から q に向かうベクトル r の向きになるので図の矢印と一致する．電荷 q と Q が異符号の場合は，(Q・q)は負で作用・反作用は引力で図の向きとは反対になる． $Q\cdot q\cdot(\vec{r}/|\vec{r}|)=|Q\cdot q|\cdot(-\vec{r}/|\vec{r}|)$ となり， Q から q に向かうベクトル r に負符号がつくことがこれに対応する．

（1）は，電荷 Q によって q が受ける電気力 $\vec{F}$ は q に比例することを意味している．q→0 の極限で，この比例定数は， (1)の両辺を q で割った結果に当たるが，これを点電荷 Q が点電荷 q の位置 $\vec{r}$ に作る**電場**と定義する：

$$\mathbf{E}(\vec{r})=\lim_{q\to 0}(\mathbf{F}/q)=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\vec{r}}{|\vec{r}|^3}. \tag{3}$$

この電場の値は，形式的には，点電荷 q の位置 $\vec{r}$ に単位の電荷（１C）を置いた際に，その単位電荷が受ける力となる． 電荷 Q は一定であるが，位置 $\vec{r}$ が変化すればそこでの電場の値は変化する．電場は位置を与えることで決まるベクトル量で，その次元は[力/電荷] = [N/C]である．

点電荷 q の廻りに三つ点電荷が存在する時，点電荷 q_0 に作用する力は，三つ点電荷 Q_1, Q_2, Q_3 から受ける力の合力であるとすることが出来る．**重ね合わせ**

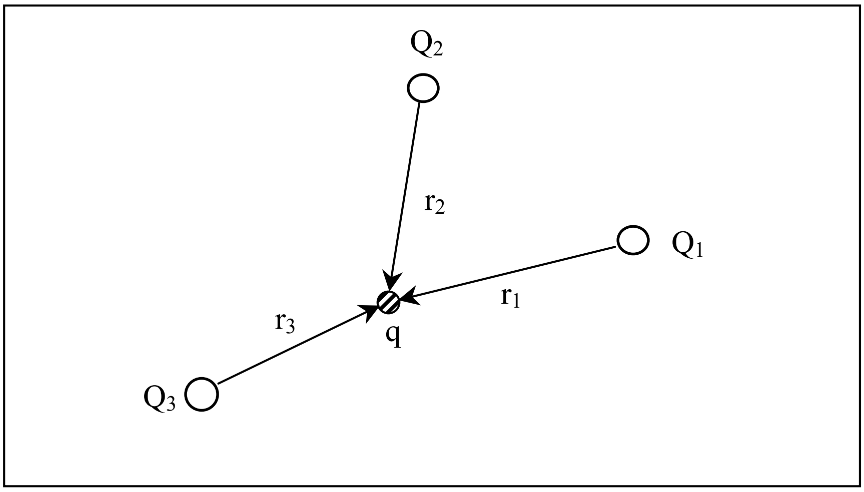

図 2-2．三つの点電荷が点電荷 q に及ぼすクーロン力の和

の原理がクーロン相互作用では成立する．第三，第四の電荷の存在は，その電荷対の相互作用に全く影響しないというのは，考えてみれば不思議なことであるが，クーロン力ではこれが成立する．

$$\mathbf{F}=\frac{Q_1\cdot q}{4\pi\varepsilon_0|\vec{r}_1|^2}\cdot\frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|}+\frac{Q_2\cdot q}{4\pi\varepsilon_0|\vec{r}_2|^2}\cdot\frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|}+\frac{Q_3\cdot q}{4\pi\varepsilon_0|\vec{r}_3|^2}\cdot\frac{\vec{r}_3}{|\vec{r}_3|} \tag{4}$$

ここで，$\vec{r}_k/|\vec{r}_k|$ (k =1,2, 3) は，点電荷 Q_k から点電荷 q に向かう単位ベクトルを意味する．一般に，点電荷が多数あり，Q_k, k=1, 2, …., n である場合は，これらが点電荷 q に及ぼす力は，

$$\mathbf{F}=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}\left(Q_k\cdot\frac{\vec{r}_k}{|\vec{r}_k|^3}\right) \tag{5}$$

となる． そこで，(3) で考えたように，電荷 q の位置での電場を考えると．

$$\mathbf{E}(\vec{r})=\lim_{q\to 0}(\vec{F}/q)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}(Q_k\cdot\frac{\vec{r}_k}{|\vec{r}_k|^3}) \tag{6}$$

となる．

しかし，図 2-3 に示すように，一つの座標系(O-x,y,z)を定めて，各点電荷の位置を指定した方が良い. 電荷 q の位置ベクトルは $\vec{R}$, 電荷 Q_k の位置ベクトルは $\vec{R}_k$ とする．

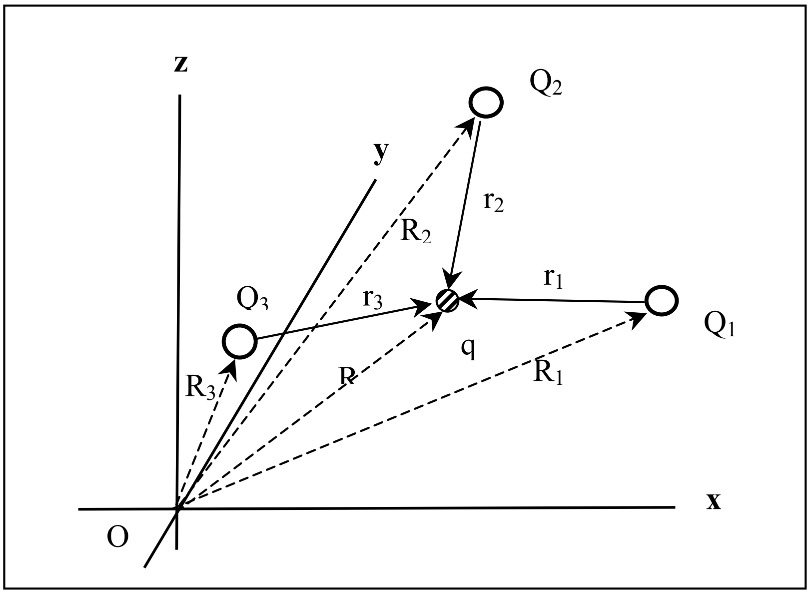

図 2-3．座標系(O-x,y,z) に基づき，点電荷の位置を指定する．電荷 q の位置ベクトルは R, 電荷 Q_k の位置ベクトルは R_k とする．

(3)と(6)では，電荷 q の位置ベクトルは $\vec{r}$ と書いているので，$\vec{r}=\vec{R}$ である．ま

た，これまでに使って来た$\vec{r}_k$と，$\vec{R}$，$\vec{R}_k$との関係は，図 2-3 から，$\vec{R} = \vec{r}_k + \vec{R}_k$であるから．

$$\vec{r} = \vec{R}, \qquad \vec{r}_k = \vec{R} - \vec{R}_k \tag{7}$$

である．(7) を (6) に代入して，

$$\mathbf{E}(\vec{R}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\sum_{k=1}^{n}[Q_k \cdot \frac{(\vec{R} - \vec{R}_k)}{\left|\vec{R} - \vec{R}_k\right|^3}] \tag{8}$$

となる．(8)は，点電荷が位置$\vec{R}$につくる電場は，$\vec{R}$以外の位置に分布する点電荷によって決まることを表している．$\vec{R}$以外の位置に分布する点電荷が，時間と共に変化しないなら，$\mathbf{E}(\vec{R})$ も時間に依存しない，これは**静電場**と呼ばれる．

電場の値は，$\vec{R}$の位置に単位電荷を置いた時にその電荷に作用する力ではあるが，単位電荷を置くからベクトル量である電場が決まるのではない．単位電荷を置くことによって，**元々存在している電場というものが，そのような形で姿を現すと**考える．点電荷による電場では，$\vec{R}$以外の位置に分布する点電荷によって$\vec{R}$での電場が決まるのであって，$\vec{R}$にどのような電荷を置くかとは全く関係がないとの立場を取る．この電場の解釈は，磁場，重力場，と言う考え方と同様に，次に述べる近接作用の考え方に基づくものである．

２）近接作用と遠隔作用の考え方

ニュートン (I. Newton, 1643-1727) による万有引力の法則では，或る天体に作用する別の天体からの引力は，両天体の間の媒体とは全く無関係に，かつ瞬時に，直接的に作用すると考えている．これは，**遠隔作用**の考え方と呼ばれる．ニュートン力学の成功から，クーロンの法則に従う電気的な力もまた，万有引力と同じように，遠隔作用の力の一種であると考えられた．確かに，万有引力の法則 (8) は，

$$\mathbf{F} = -G\frac{m_1 \cdot m_2}{\left|\vec{r}\right|^2} \cdot \frac{\vec{r}}{\left|\vec{r}\right|} \tag{8}$$

であるから，クーロンの法則の式 (1) と類似している．ただし，電荷間には引力のみならず，反発力も作用する．

しかし, 電流には磁気作用があることをデンマークのエルステッド(Oersted, H. C., 1777-1855)が 1820 年に発見する．このニュースは当時のヨーロッパの人々に直ぐに伝わり，フランスのアンペール(Ampere,A. M., 1775-1855)，英国のファラデー（Faraday,M., 1791-1867)，その他の人々により ，電流と磁場の関係が次々とに明らかにされていった．その結果，ニュートン流の遠隔作用の考え方に疑問が投げかけられることとなった.

特に，ファラデーは，クーロンの法則を次の様に解釈した．一対の電荷に力が作用するのは，一方の電荷がその廻りの空間に作用し，その空間に「歪み」のようなものを与え，その「歪み」が有限の速度でもう一つの電荷の廻りの空間にまで及ぶからであり,「空間の状態変化」が有限速度で伝播することで，電気的相互作用が実現すると直感的に考えたのである．**近接作用**と呼ばれる考え方である．ファラデーの実験的研究結果と直感的な近接作用の考え方を理論式にまとめたのは，マックスウェル（J．C．Maxwell, 1831-1879）である．彼はこの理論式から電磁波の存在を予言し, 計算される伝播速度は, フィゾー（A. H. L. Fizeau, 1819-1896）が 1849 年に大気中で測定した光速度$(3.153 \pm 0.005) \times 10^8$m/sec に非常に近いこと示した．ただし，光速度の発見についても，多くの教科書の記述とは違って，現実には遠隔作用の考え方に基づく考察結果が貢献している．詳しくは，太田浩一氏の著書[3] の始めの章を参照されたい.

そして, 1888 年, ヘルツ(Hertz, H. R., 1857-1894)によって電磁波が発見された．マックスウェルがまとめた理論式を，今日の電磁気学で「マックスウェル方程式」と呼ぶ形式に再構成したのは, ヘビサイド(O. Heaviside, 1850-1925)であるが, ヘルツの功績も大きい[3，4)]．時間変動しない静電場，静磁場の問題としてではなく，時間変動する空間の電場・磁場として電磁波は３次元空間を伝わってゆくことが判った．このような電磁波の伝播は，遠隔作用では説明ができず，近接作用の考え方が支持されることになった.

しかし，電磁波は真空中を伝播するが，物質のない真空空間を電磁波が伝播すると想像することは容易ではない．物質はないように見える空間も「目に見えないエーテル(ether)という連続媒体」が充満していると考えることで，この事

実を解釈する状況が続くことになった．今日では「真空の誘電率，ε_0」とか「真空の透磁率，μ_0」と言うが，実は「連続媒体エーテルの誘電率，ε_0」とか「連続媒体エーテルの透磁率，μ_0」と言うのであればもっともらしく聞こえる．

これらの問題は，その後の「エーテルに関するマイケルソン・モーレーの実験」と「特殊相対性原理の発見」を通じて，解決されて行くが，同時に，「エーテルが充満する真空空間」は，「真空の空間」とか単に「空間」とか呼ばれることになる．

以上は簡略化した歴史的過程であるが，今日の電磁気学の内容の背後には，このような経緯がある[3，4，11，12]．遠隔作用か近接作用かの問題は，結局は，静電場の問題だけからは決着がつかなかった．だから，我々も以上の歴史的過程をたどりながら，その内容を学ぶ為に先に進まねばならない．遠隔力が受け入れられるまでの歴史的経過については，§16 に簡単に記す．

これまでの記述では，ベクトルである電場 **E**，力 **F** は単に太字で書き，位置ベクトルについては距離 r，R との区別の為に，$\vec{r}$，$\vec{R}$ のように矢印を付して来た．しかし，以後は，位置ベクトルも単なる太字で表現し，矢印は付さないことにする．