

古磁氣學의 方法(II) : 古磁氣學的 측정자료로부터 磁北의 위치를 도시하는 방법

김 인 수*

Methods in Palaeomagnetism (II): Calculation and Plotting of Palaeomagnetic Pole Positions

In-Soo Kim*

Abstract: Palaeomagnetic studies accompany calculation and plotting of pole position. This paper explains three graphical methods for the determination of pole position and plotting problem. It also derives the numerical formula for pole calculation and explains the method how the pole plotted on the rear hemisphere can be transformed to the frontal hemisphere, which is not clarified elsewhere.

서 론

古磁氣學의 연구에서는 定向(orientation)된 岩石 시료를 채취하여 시료의 磁化方向, 즉 偏角(declination)과 伏角(inclination)을 측정하고 이들 값으로부터 磁北의 위치를 결정하는 작업을 수행하게 된다. 이러한 자북의 위치는 우선 stereonet을 사용하는 圖學的인 방법에 의하여 간단히 plotting시킬 수 있다. 그러나 많은 경우에 있어서 자북의 위치를 소수 점이 이하까지 정확하게 읽어내야 할 필요가 대두되게 되는데 예를 들어서 여러개의 자북의 위치로부터 평균값과 아울러 편차의 범위를 구해내야 하는 경우가 바로 그러하다. 이러한 경우에는 도학적인 방법보다는 數值的인 계산방법을 이용하여야 한다. 그동안 고자기학적 연구방법이 해저확장설과 판구조이론을 뼈대로 한 지구조학(tectonics)적인 여러가지 문제들에서 뿐만 아니라 구조지질학적인 문제, 층서학적인 문제, 지질공학적인 문제, 그리고 나아가서 고고학적인 문제에서도 탁월한 공헌을 하게 됨에 따라 많

은 수의 고자기학적 연구방법을 다룬 교과서와 연구서들이 출간된 바 있다(Nagata, 1961; Irving, 1964; Angenheister & Soffel, 1972; McElhinny, 1973; Tarling, 1983; Collinson, 1983; Merrill & McElhinny, 1983; Parkinson, 1983; Jacobs 1984; Rikitake & Honkura, 1985; Thompson & Oldfield 1986; Khramov, 1987 등). 그러나 이들 단행본들에서는 고자기학적 자북의 위치를 계산하는 최종공식만을 서로 인용소개할 뿐 그 원리나 공식의 유도과정을 밝히고 있지 않은 관계로 많은 고자기학도들은 맹목적으로 자신의 측정 data를 이들 공식에 대입하여 사용하고 있는 것 같다. 본 논문에서는 이러한 실정을 개선하여 이 방면의 연구자와 초심자들의 이해에 도움을 주고자 圖學的으로 磁極을 plotting하는 세가지 방법을 제시하고 數值的인 계산에 필요한 공식을 유도하였다.

도학적으로 자북의 위치를 결정하는 방법

지구의 磁氣場은 지구중심에 위치한 geocentric dipole field로 표현되므로(Chapman & Bartels, 1940; Merrill & McElhinny, 1983; Parkinson, 1983; Rikitake & Honkura, 1985) 磁氣學의 餘緯

*부산대학교 지질학과(Dept. of Geology, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea)

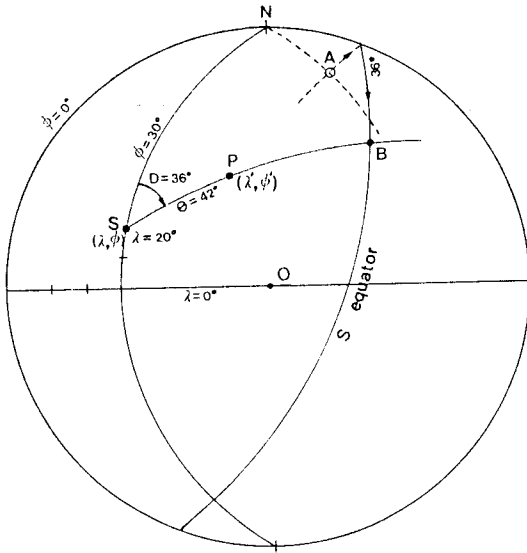


Fig. 1. First example of graphical solution for pole position P determination.

The Greenwich meridian is the left half of the peripheral great circle. Sample site S is plotted at its correct geographical latitude $\lambda (= 20^\circ\text{C})$ and longitude $\phi (= 30^\circ)$, and it is a pole of S equator plane. Point A is a joining point of sample site meridian and S equator plane. Point B is $D (= 36^\circ)$ apart from point A along S equator plane. A great circle through the points S and B is magnetic meridian and pole position P lies $\theta (= 42^\circ)$ apart from S along this great circle.

度(geomagnetic colatitude) θ 인 지표상에서의 magnetic potential 은(Jacobs, 1963 ; Officer, 1974 ; Angenheister & Soffel, 1972)

$$V = \frac{M}{r^2} \cos \theta$$

가 된다. 여기서 M 은 지구자기장의 moment(자기 능률), r 은 지구의 반경을 나타내고 있다. 따라서 이 점에서의 지자기의 수직성분은

$$Z = -\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{2M}{r^3} \cos \theta$$

수평성분은

$$H = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \frac{M}{r^3} \sin \theta$$

이다. 이 두 성분으로부터 이 점에서의 지자기의 북 각(I)과 자기학적 여위도(θ) 사이의 관계식을 구해

낼 수 있는데 이는 바로

$$\tan I = \frac{Z}{H} = 2 \cot \theta \tag{1}$$

로 나타난다. 이 북각(I)이 암석에 기록되어 있는 경우 이를 측정함으로써 당시에 암석이 위치하고 있었던 고자기학적 여위도(θ)를 알아낼 수 있으며 함께 측정된 편각(D)값을 동시에 이용하면 고자기학적 자북의 위치를 구할 수 있다. 이러한 고자기학적 磁北의 위치를 결정하기 위하여 stereonet 를 이용하는 방법은 다음과 같다(Fig. 1). 여기서 시료채취점 S 의 위도(λ)와 경도(ϕ)를 각각 20°N 과 30°E 그리고 암석시료의 편각(D)과 여위도(θ)를 각각 36° 와 42° 로 가정하기로 한다. 첫째 stereonet 위에 투명종이를 덮고 중심점 O 에 핀을 찔러 이를 축으로 투명종이가 자유롭게 회전되도록 한다. Stereonet 의 꼭대기 다시 말해서 모든 大圓(great circle)들이 수렴하는 점을 투명종이에 표시하고 이 점을 N 이라고 한다. Stereonet 의 둘레를 이루는 대원의 좌반부를 $\phi = 0^\circ$ 인 표준경도선으로 잡고 적도선을 $\lambda = 0^\circ$ 선으로 하여 암석시료 채취점의 위치 S 를 표시한다. S 가 stereonet 의 적도선위에 놓이도록 투명종이를 반시계 방향으로 회전시킨 후 S로부터 90° 거리에 있는 대원을 그린다. 이 대원은 S 점을 극으로 하는 평면이며 Fig. 1에서 S equator 로 표시되어 있다. S 와 N 점을 통과하는 대원이 이 S equator 와 만나는 점 A 를 구하고 이로부터 S equator 를 따라 36° 떨어진 B 점을 선택한다. 마지막으로 S 와 B 를 연결하는 대원을 그리면 이 선이 바로 磁氣的 子午線(magnetic meridian)이 되며 이 자오선을 따라 S로부터 여위도값인 42° 떨어진 점 P 를 찍으면 이 점이 바로 구하는 자북의 위치가 된다. 이제는 투명종이의 N 이 stereonet 의 N 과 일치하도록 회전·복귀시키면 net 의 눈금을 이용하여 P 점의 위도(λ')와 경도(ϕ')를 읽어낼 수 있다. 우리의 경우 이들 값은 각각 약 50°N 과 68°E 로 나타난다.

이상의 과정은 stereonet 을 사용하는 원리와 과정을 훈련하는 좋은 연습이 될 수 있다. 그러나 원리를 알았으면 실무에서는 암석시료 채취점의 위치 S 를 stereonet 의 좌측원주상(D 값이 +인 경우) 혹은 우측원주상(D 값이 -인 경우)에 놓고 작도하면(Fig. 2) 훨씬 간편하다. 이러한 작도법은 오직 자북 위치의 위도와 경도만을 신속히 알고자 할 때 가장 유용하다. Fig. 2에 도시된 것으로써 그 작도과정의 自明하겠으나 실제로는 여기에 나타나 있는 대원들

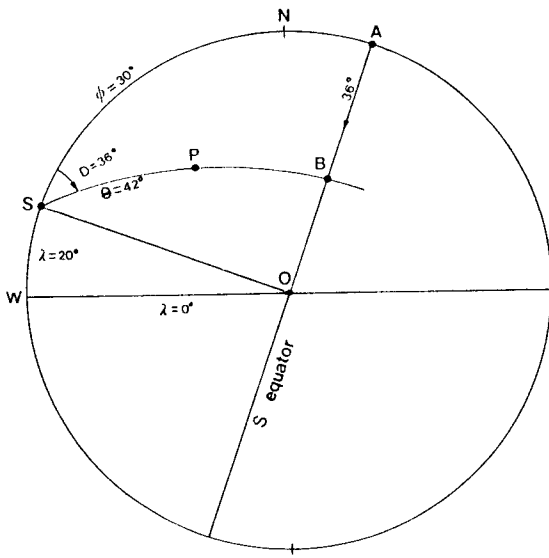


Fig. 2. Second example of graphical solution for pole position determination.

The left half of the peripheral great circle is chosen as sample site meridian.

This is the most rapid and "economical" method of graphical solution.

을 그릴 필요조차 없어진다. 즉 우리의 경우 D 값이 $+$ 인 고로 우선 S 점을 좌측원주상의 $20^{\circ}N$ 에 위치시킨다. 투명종이를 반시계 방향으로 회전시켜서 S 점이 stereonet 의 W 에 일치하도록 한 후 남북방향의 직선대원을 따라 net 의 N 으로부터 아래로 36° 떨어진 점을 찍으면 그 점이 B 이다. 다음은 투명종이를 반시계 방향으로 더욱 회전시켜서 S 와 B 가 동일대원상에 놓이게 한 후 이 대원을 따라 S 로부터 42° 떨어진 점을 선택하면 이 점이 바로 우리가 구하려는 P 이다. 따라서 이 방법에서는 결국 S, B, P 세점의 작도만이 요구될 뿐이다.

또 한가지 실무에서 나타날 수 있는 경우는 암석 시료 채취지역과 그 일대를 포함하는 지도와 함께 자북의 위치를 동시에 나타내고자 하는 경우이다. 이 때에는 Fig. 2와 같은 작도방법으로써는 시료 채취지역 주변의 지도 혹은 지질도를 그려넣기가 불가능하다. 이런 경우에는 시료 채취지점 S 의 경도선이 북판에 나타나도록 작도하는 것이 편리하다(Fig. 3). 우선 stereonet 에서의 남북선을 투명종이위에 그려넣은 후 이 선상에 S 를 표시한다. 다음은 이 S 점을 극으로 하는 대원을 그려서 전술한 남북선과

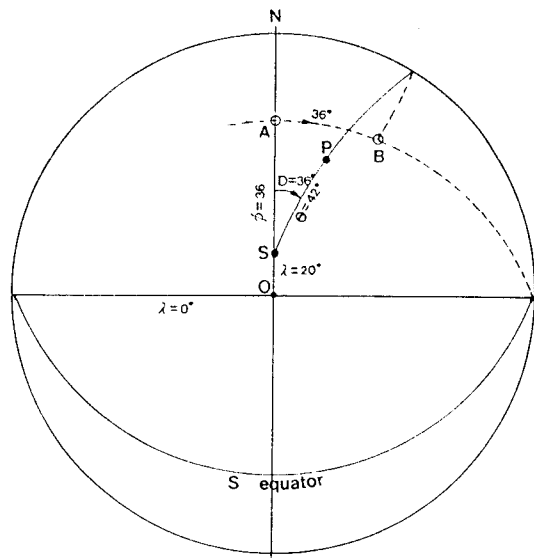


Fig. 3. Third example of graphical solution for pole position determination.

The N-S rectilinear great circle is chosen as sample site meridian. With this deployment geographic and/or geologic map around the sample site may be drawn, and this is therefore the most convenient method for the presentation of study results. Note that there are symmetrical spaces on both sides of S for each case of positive and negative declination. S can be brought to the center of diagram by choosing the $\lambda = 0^{\circ}$ line as rotation axis. Concurrently the pole P should be displaced down along an appropriate small circle.

만나는 점 A 를 구한 후 이 A 로부터 대원을 따라 36° 떨어진 점 B 를 잡는다. 이 B 점과 S 점을 잇는 대원을 작도하면 이 대원이 바로 자기적 자오선이며 S 로부터 이 대원을 따라 42° 떨어진 점이 바로 우리가 구하려는 P 인 것이다. 여위도 값이 크거나 S 의 위도가 높은 경우에는 P 점이 작도평면의 뒷반구, 즉 시료채취점의 반대편 반구에 plot 되는 일이 있게 되는데 이 때에는 P 점을 원점으로 표시하여서 앞반구에 plot 된 검은 점의 P 와 구별되도록 한다. S 점이 고위도가 되어 작도평면에서 너무 위로 치우치게 나타나는 것을 피하려면 $\lambda = 0^{\circ}$ 선을 회전축으로 하여 작도된 모든 점들을 회전이동하면서 원하는 만큼 아래로 끌어내리면 된다.

요약하건데 이상 설명한 세가지의 도학적인 작도법 중에서 첫번째 방법은 가장 일반적인 상황을 나

타내는 것으로써 원리를 터득시키기 위한 교육 및 훈련에 적합한 방법이다. 반면 두번째 방법은 실무에서 신속히 극위치를 계산해 볼 필요가 있을 때 편리하다. 또한 세번째 방법은 연구결과를 종합정리하여 제시하는 데 가장 적절하게 사용될 수 있다. 한편 동일 연구지역에서 시대를 달리하는 암석들이 +와 -편각값들을 동시에 보이는 수가 있는데 이같은 경우 첫번째 방법에서는 시료채취점 S의 양편 공간이 비대칭적이거나 두번째와 세번째의 경우에는 양편 공간이 대칭적이기 때문에 더 편리하다.

계산에 의한 磁北위치의 결정과 이를 plotting 하는 방법

數值的인 방법으로 古磁氣學的 磁北의 위치를 결정하기 위하여서는 球面三角形의 기하학을 이용한다 (Spiegel, 1968 ; 金相輪, 1977 ; Parkinson, 1983 등 참조). 이러한 수치적인 계산의 경우에서도 결국 구해진 자북의 위치를 stereonet에 표시하여야 磁極移動曲線(APWP)을 그린다거나 plate운동의 양상을 검토하기가 편리해지므로 자연히 圖學的 plotting 작업이 뒤따르게 된다. 이 때에도 역시 구해진 자북이 앞반구와 뒷반구 중 어느곳에 놓이게 되는가를 구분하여 각각 검은 점과 흰 점으로 표시할 필요가 있다. Fig. 4에 圖示된 바와 같이 자북 P가 어느 반구에 찍히게 되는냐는 β 각이 결정하게 된다(β 의 변화범위: $-180^\circ \leq \beta \leq +180^\circ$). 이 β 각은 구면삼각형 NSP에 sine 법칙을 적용하면 구할 수 있다. 즉

$$\frac{\sin \beta}{\sin \theta} = \frac{\sin D}{\sin (90^\circ - \lambda')}$$

로부터

$$\sin \beta = \sin \theta \sin D / \cos \lambda'$$

이 된다. 여기서 θ 값은 시료채취점의 고자기학적 여위도로서 ①식에 의하여 얻어지는 값이며 고자기학적 자북의 위도 λ' 는 다시 구면삼각형 NSP에 cosine 법칙을 적용함으로써 구해진다. 즉

$$\cos (90^\circ - \lambda') = \cos (90^\circ - \lambda) \cos \theta + \sin (90^\circ - \lambda) \sin \theta \cos D$$

이므로

$$\sin \lambda' = \sin \lambda \cos \theta + \cos \lambda \sin \theta \sin D \quad \text{②}$$

가 된다.

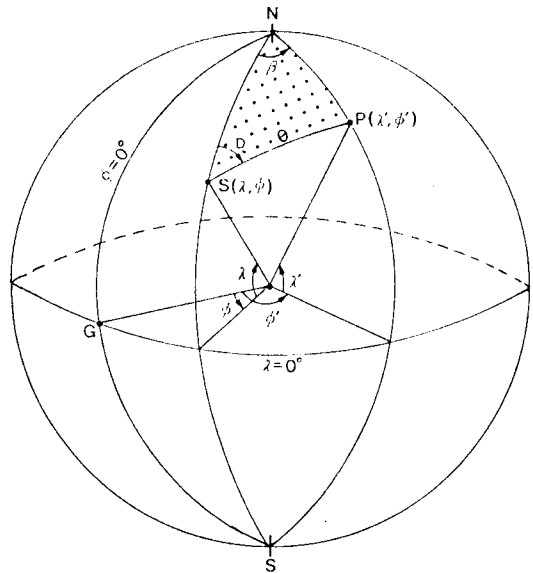


Fig. 4. Geometrical situation for the numerical calculation of pole position.

Pole position (λ', ϕ') can be determined by applying cosine laws to the spherical triangle NSP. Angle β can be calculated by applying sine law on the same triangle. This angle determines on which hemisphere the pole falls (refer to Fig. 5).

한편 고자기학적 자북의 경도 ϕ' 을 구하기 위하여 우선 구면삼각형 NSP에 상술한 β 각이 들어가도록 cosine 법칙을 적용시키면

$$\cos \theta = \cos (90^\circ - \lambda) \cos (90^\circ - \lambda') + \sin (90^\circ - \lambda) \sin (90^\circ - \lambda') \cos \beta$$

로부터

$$\cos \theta - \sin \lambda \sin \lambda' = \cos \lambda \cos \lambda' \cos \beta$$

의 관계식이 얻어진다. 여기서 λ 와 λ' 는 위도를 나타내므로 그 변화범위는 $-90^\circ \leq \lambda, \lambda' \leq +90^\circ$ 이다. 따라서 항상 $\cos \lambda, \cos \lambda' \geq 0$ 이 되어 우변(따라서 좌변)의 부호를 결정하는 것은 $\cos \beta$ 의 부호이다. β 의 변화범위는 $-180^\circ \leq \beta \leq +180^\circ$ 이므로 다음과 같이 $\cos \beta$ 의 부호가 +인 경우와 -인 경우로 나누어 생각하여야 한다.

i) $-90^\circ \leq \beta \leq +90^\circ$ 인 경우 :

이 때에는 $\cos \beta \geq 0$ 이므로 좌변의 부호가 +인 경우, 즉 $\cos \theta \geq \sin \lambda \sin \lambda'$ 의 경우가 된다. 이 경우에는 바로

$$\phi' = \phi + \beta \text{ (Fig. 4)} \quad \textcircled{3}$$

의 식을 사용하여 고자기학적 자북의 경도를 plot 하더라도 항상 시료채취점 S가 있는 반구, 즉 앞반구에 plot 된다(Fig. 5A). 이와 같이 계산하여서 plot 된 자북은 검은 점으로 표시하기로 한다.

ii) $-180^\circ \leq \beta < -90^\circ$ 혹은 $+90^\circ < \beta \leq +180^\circ$ 의 경우 :

이 때에는 $\cos\beta < 0$ 이 되므로 좌변의 부호가 -인 경우 즉, $\cos\theta < \sin\lambda \sin\lambda'$ 의 경우가 된다. 이 경우에는 고자기학적 자북의 경도를 바로 plot 하면 뒷반구로 넘어가게 되므로 원하는 앞반구로 가져오기 위하여서는

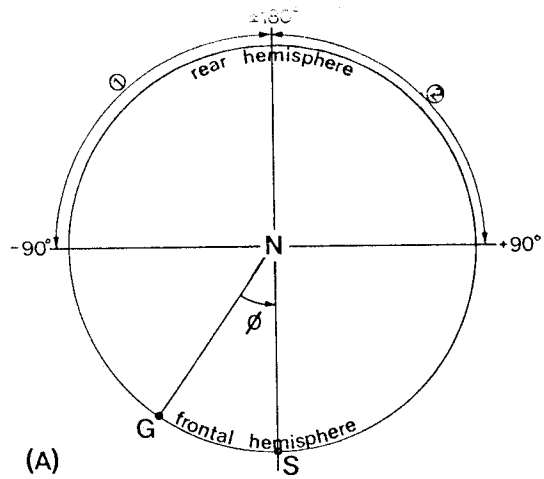
$$\phi' = \phi + (180^\circ - \beta) \quad \textcircled{3}'$$

로 계산하여야 한다(Fig. 5B). 이렇게 계산하여서 plot 된 자북은 흰 점으로 표시함으로써 i)의 경우와 구별되도록 하자.

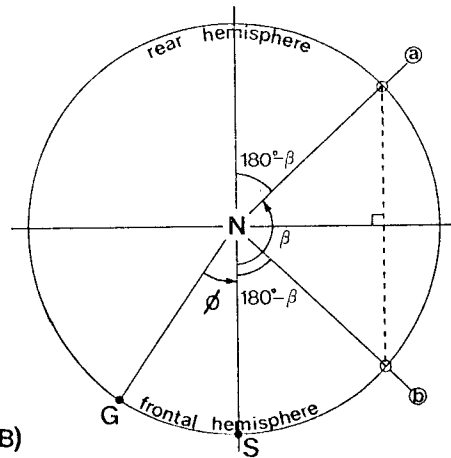
앞절의 예에 이와 같은 수치적 계산방법을 적용하여서 자북의 위치를 계산하면 $\lambda' = 49.72^\circ \text{N}$, $\phi' = 67.47^\circ \text{E}$ 가 되며 앞반구에 검은 점으로 표시된다.

몇가지 용어들에 대한 첨언

마지막으로 고자기학적 연구의 종사자들 사이에서도 드물지 않게 誤用되고 있는 몇가지 정의에 대하여 언급하고자 한다. 고자기학적 연구의 주된 목적은 雙極子 地磁場(geocentric dipole field)에 의한 지구자북의 위치를 결정하는 데에 있다. 즉 암석시료에 기록된 磁化方向(D, I)을 측정함으로써 그 암석이 생성된 지질시대의 지구쌍극자극의 위치를 알아내고자 하는 것이다. 그러나 실제의 지구자기장은 쌍극자장의 성분외에도 長年變化(secular variation)를 하는 非雙極子 成分(non-dipole field)을 포함하고 있으므로(Chapman & Bartels, 1940; Merrill & McElhinny, 1983; Parkinson, 1983; Rikitake & Honkura, 1985; 등) 단 하나의 암석시료로부터 결정된 자북의 위치는 당시의 지구쌍극자장을 대표하는 것으로 볼 수가 없다. 따라서 동일지층내에서도 다소의 생성시간차이(대략 10^3 - 10^4 년)를 갖는 다수의 암석시료를 채취하여 그들 자화방향의 평균치를 구해내야만이 지구쌍극자장에 의한 자북 위치가 결정될 수 있다. 前者에서와 같이 단 하나의 암석시료로부터 얻어진 지자기의 극은 시간적으로



(A)



(B)

Fig. 5. This plan view of Fig. 4 explains how the pole on the rear hemisphere can be brought to the frontal hemisphere. Frontal hemisphere is a hemisphere on which sample site meridian is central meridian.

(A) In the case of $-180^\circ \leq \beta < -90^\circ$ (①) or $+90^\circ < \beta \leq +180^\circ$ (②), pole is plotted on the rear hemisphere if we apply the formula $\phi' = \phi + \beta$ directly.

(B) We can bring the pole to the frontal hemisphere by modifying the formula as $\phi' = \phi + (180^\circ - \beta)$.

Ⓐ The case of unmodified formula $\phi' = \phi + \beta$.

Ⓑ The case of modified formula $\phi' = \phi + (180^\circ - \beta)$.

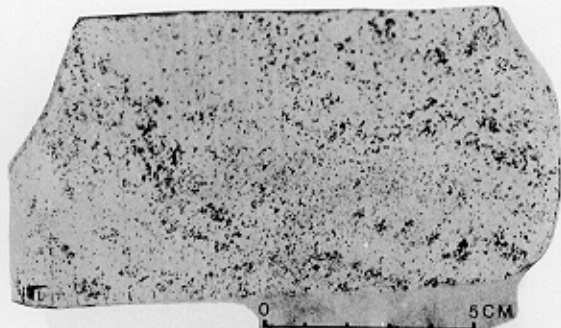


Fig. 16. Autoradiograph of CJ-522

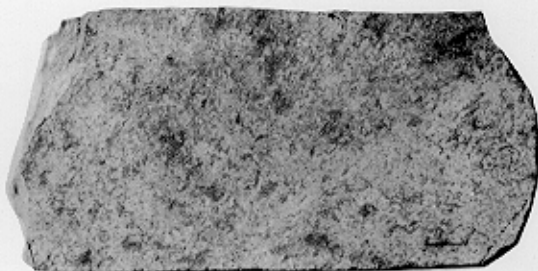


Fig. 17. Handspecimen of CJ-522

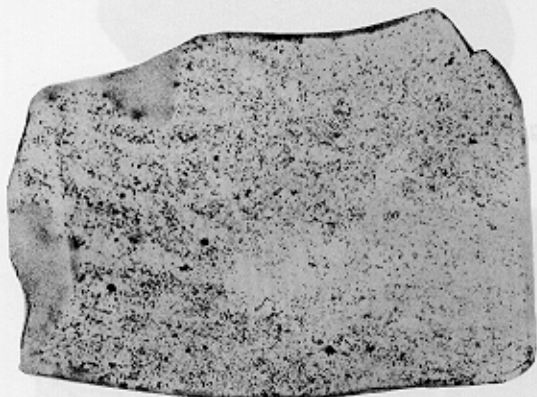


Fig. 18. Autoradiograph of CJ-522



Fig. 19. Handspecimen of CJ-522



Fig. 20. Handspecimen of CJ-3

