

14. La déformation de la croûte terrestre et la production des ondes sismique au foyer

par Mishio ISHIMOTO,

Institut de Recherches sur les Tremblements de terre.

(Lu le 17 janvier 1933, reçu le 20 mars 1933)

1. Introduction.

L'année dernière nous avons publié un mémoire¹⁾ sur le mécanisme de la production des ondes sismiques au foyer : nous avons constaté tout d'abord que deux sortes d'ondes, onde poussante et onde tirante, sont séparées par une courbe de section conique. Pour expliquer cette façon de distribution, nous avons introduit au foyer une source quadruple. Bien que cette hypothèse explique le rayonnement des ondes sismiques du foyer au moyen de l'analyse mathématique, nous sommes obligés d'attribuer une certaine dimension au foyer considéré étant la source énergétique des ondes sismiques. Supposons donc un foyer sismique ayant une certaine dimension dans la croûte. Il correspond à un réservoir contenant une haute pression hydrostatique qui augmente progressivement. Quand la pression intérieure atteindra la limite de la pression extérieure, il se produira une destruction violente du réservoir. Le mouvement initial de cette destruction déterminera certainement la propagation sphérique des ondes de type $P_2(\cos \theta)$. D'un autre côté, nous pouvons supposer des projections de matière en dehors de ce réservoir ce qui produira ainsi un train d'ondes élastiques. Si cette projection est assez violente, il y aura une certaine déformation à la surface terrestre ayant une figure définie par la direction des jets de matière. Nous nous proposons donc d'exécuter une revision des produits topographique résultant surtout des grands tremblements de terre et correspondant à la distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques.

Quand on étudie la déformation de la croûte produite par un séisme, on prête attention surtout à l'apparition des dislocations. Il nous semble que l'on est toujours content de découvrir au moins une trace de faille dans la région épiscopentrale. Mais l'apparition des failles n'est pas le seul phénomène important dans la déformation générale de la croûte. On

1) M. ISHIMOTO, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 10 (1932), 449.

peut constater en outre un exhaussement du terrain qui se produit souvent, surtout au bord de la mer. Evidemment ce qu'on peut observer à l'oeil nu sur le terrain, ce sont des changements dont le gradient de déformation demeure assez grand : on voit donc généralement le phénomène de bordure. Mais quand on veut savoir le fait réel des changements topographiques, on doit consulter les résultats obtenus au moyen des mesures géodésiques : la triangulation et le nivellement de précision.

Les changements topographiques produits par les deux tremblements de terre de Kantô en 1923, et de Tango en 1927, ont été mis au clair par les deux sortes de mesures géodésiques. D'autre côté nous avons les données sur la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses correspondant à chaque séisme. Nous voulons découvrir le rapport, s'il y en a, entre la déformation de la croûte, et les mouvements initiaux des secousses. Cette comparaison nous permettra de faire progresser notre discussion sur le mécanisme de la production des ondes sismiques ainsi que sur la force motrice capable de donner une déformation permanente à la croûte.

Nous étudions, tout d'abord, la distribution des mouvements initiaux suivant l'hypothèse de la source quadruple au foyer dont le pôle est dirigé vers une direction convenable.

S'il y a une certaine correspondance entre les deux phénomènes, l'action de la production des ondes sismiques deviendra un mouvement important pour décider la façon de déformation de la croûte.

Nous avons déjà écrit que la propagation sphérique des ondes longitudinales rayonnant du foyer sera représentée par la formule suivante, spécialement dans un milieu assez éloigné du foyer :

$$\phi = \left[P_2(\cos \theta) - \frac{1}{4} P_0(\cos \theta) \right] \frac{e^{ik(vt-r)}}{r}$$

où l'angle de cône demeure 45° . Nous allons maintenant considérer spécialement deux cas ; a) son pôle (direction de l'axe de cône) a une direction horizontale, b) son pôle a une direction faisant un angle de 20° avec la verticale. Nous pouvons facilement calculer l'amplitude du mouvement de chaque position à la surface suivant une formule²⁾. La

$$2) \quad h \frac{2(h^2 + \rho r \cos \theta)^2 - (h^2 + r^2)(h^2 + \rho^2)}{(h^2 + r^2)(h^2 + \rho^2)^2} \dots \dots \dots \text{pour la composante verticale.}$$

$$\rho \frac{2(h^2 + \rho r \cos \theta)^2 - (h^2 + r^2)(h^2 + \rho^2)}{(h^2 + r^2)(h^2 + \rho^2)^2} \dots \dots \dots \text{pour la composante horizontale.}$$

où θ et r : deux paramètres, h : profondeur du foyer et ρ : distance entre le point percé du pôle à la surface et l'épicentre.

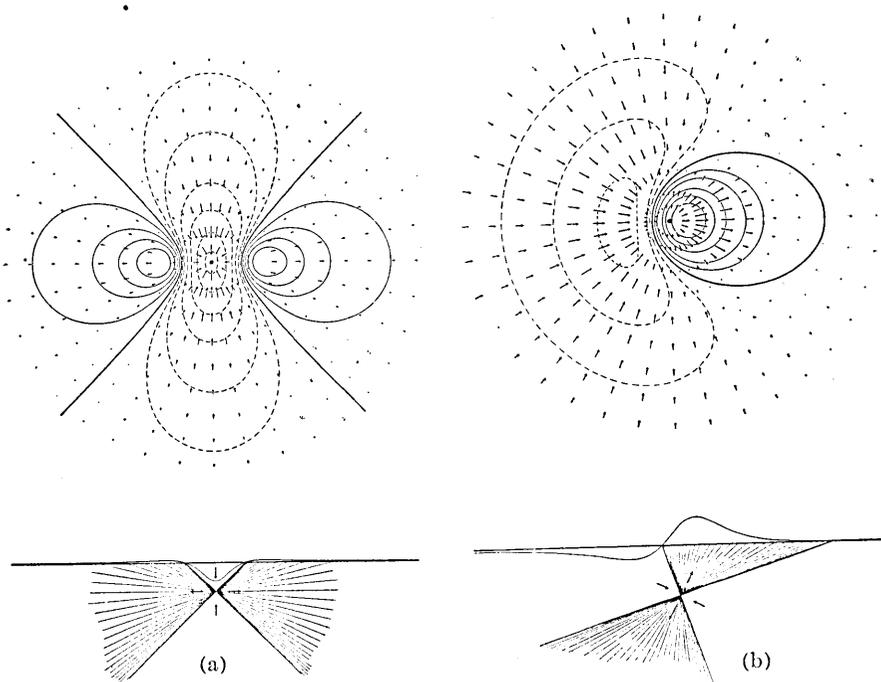


Fig. 1. Déplacement de chaque point à la surface terrestre causé par une source quadruple dans la croûte : a) le pôle dirige dans la direction horizontale, b) le pôle dirige dans 20° avec la direction verticale.

Fig. 1 représente la distribution régionale des déplacements calculés dont la courbe nodale est représentée par une hyperbole pour a), par une ellipse pour b). La région intérieure de la courbe est toujours occupée par les ondes poussantes : c'est-à-dire que la composante verticale se dirige vers le haut et que la composante horizontale se dirige dans un sens opposé à l'épicentre.

En supposant quelque déplacement de matière au foyer pour produire une telle distribution des ondes, on trouvera un certain effet de ce mouvement comme la déformation permanente de la croûte surtout aux environs de l'épicentre. La déformation de la croûte ressemblera plutôt au mouvement initial de chaque point représenté dans la Fig. 1.

Partant de cette idée, nous nous sommes mis à comparer la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses avec les changements topographiques produits spécialement dans les environs de l'épicentre.

2. Comparaison de la distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques avec la déformation permanente de la croûte.

a) Le tremblement de terre de Kantô en 1923.

L'épicentre de ce tremblement de terre a été déterminé par plusieurs personnes. Il nous semble que la conclusion de S. Kunitomi³⁾ est la meilleure, du fait qu'il a consulté tous les enregistrements sismographiques obtenus dans toutes les régions du Japon. A l'égard de la distribution des mouvements initiaux, il y a aussi plusieurs hypothèses possibles d'après l'adoption des différents mécanismes de la production des ondes. Probablement, il n'y a plus de changement sur le fait de la distribution des deux sortes d'ondes, tandis qu'il y aura lieu de modifier le choix de la forme de courbe nodale. Cette différence dépend, d'une part, de la conséquence de la considération sur le mécanisme de la production des ondes sismiques, d'autre part de l'adoption de la réflexion des ondes sur une surface discontinue supposée existant dans la croûte terrestre. Quant à nous, cependant, nous mettons une source quadruple au foyer. Nous traçons, en effet, une ellipse pour expliquer le mécanisme de la production des ondes sismiques: l'autre fois,⁴⁾ nous avons adopté une ellipse ayant une forme très voisine de la parabole quoiqu'il y ait un certain nombre de disconvenances.

D'un autre côté nous pouvons considérer sur un séisme du 27 juillet 1929 dont la position épacentrale se trouve tout près de celle du tremblement de terre de 1923. En 1929, comme les conditions de l'installation sismographique de chaque station étaient améliorées comparativement, nous pouvons savoir le fait réel sur la distribution des mouvement initiaux des secousses sismiques. Nous espérons réussir enfin à connaître le mécanisme du séisme de 1923 avec l'étude sur le séisme de 1929.

Lors que nous avons publié le mémoire précédant, nous n'avons pu trouver aucune étude sur ce séisme. Dans la suite cependant, grâce à H. Kawasumi, ayant su qu'il y avait une étude de K. Hayata,⁵⁾ nous avons constaté que son étude n'était pas complètement identique à celle rapportée dans Kisyôyôran. Suivant cette étude, il y a un domaine d'ondes poussantes autour de l'épicentre et une zone d'ondes tirantes en dehors

3) S. KUNITOMI, *Geophys. Mag.*, 3 (1931), 149.

4) M. ISHIMOTO, *loc. cit.*

5) K. HAYATA, *Kensin Zihô*, 4 (1930), 17.

de ce domaine. Pour mettre ce fait en évidence nous traçons une série de lignes nodales pour séparer les différentes ondes (Fig. 2). Naturellement, nous supposons l'existence d'une source quadruple au foyer et nous supposons que l'écorce terrestre est un milieu hétérogène. Le trajectoire du rayon sismique montre sa convexité vers en bas et des ondes poussantes rayonnant obliquement dans le sein de l'écorce apparaissent à la surface dehors de la zone des ondes tirantes. En considérant ces faits, nous traçons deux courbes pour représenter la node. Cette fois-ci, l'axe de cône se dirige vers la verticale avec un peu de déviation à l'Est. La profondeur hypocentrale se trouve à peu près 40 km.

Cette distribution des deux sortes d'ondes nous suggère un trace des courbes nodales pour le séisme de 1923 quoiqu'il n'y eut aucune station existée correspondant à la région tirante (Fig. 3). La profondeur hypocentrale se trouve à peu près 30 km, moins grande que l'autre. Comme on voit dans la Fig. 3, presque toutes les deux sortes d'ondes sont partagées par ces courbes et l'axe du cône se dirige aussi vers la verticale avec un peu de déviation à l'Est. Les aspects généraux des mouvements initiaux à la surface terrestre correspondront au modèle-b dans la Fig. 1.

Les changements topographiques qui ont accompagné le tremblement de terre de Kantô ont été déterminés au moyen des mesures géo-

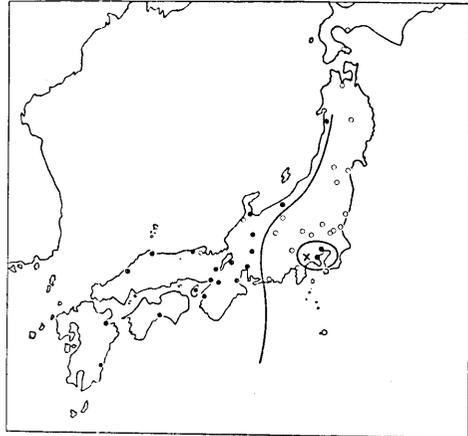


Fig. 2. Distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques pour le séisme du 27 juillet 1929. • onde poussante ○ onde tirante, × épicentre.

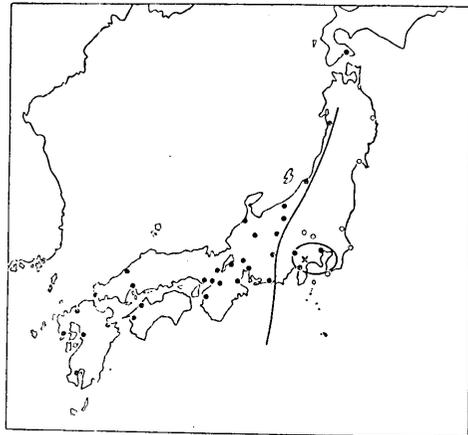


Fig. 3. Distribution des mouvements initiaux des secousses sismique pour le séisme de Kantô (le 1er Sept. 1923) • onde poussante ○ onde tirante, × épicentre.

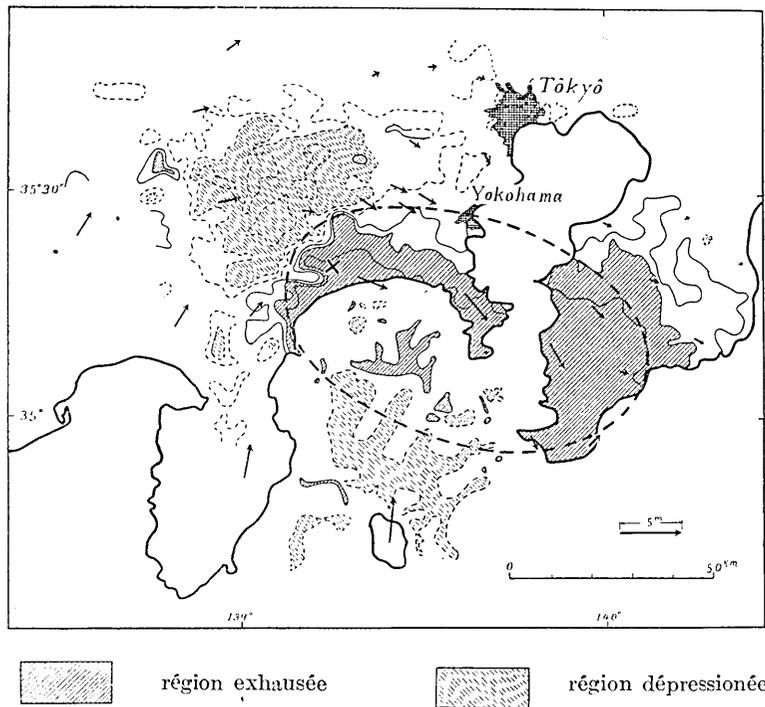


Fig. 4. Déformation de la croûte terrestre causée par le séisme de Kantô.
(D'après les cartes publiées par Rikuti-Sokuryôbu)

désiques par Rikuti-Sokuryôbu.⁶⁾ (Bureau Militaire pour le Levé de terrain) (Fig. 4) Il y a un exhaussement de terrain dans les régions de la côte du golfe de Sagami ainsi que de la moitié sud de la péninsule de Bôsô. La dépression du terrain a été constaté aux régions placées sur le côté Nord-Ouest voisines de la région exhaussée où nous trouvons l'épicentre.

A l'égard du déplacement horizontal du terrain, les résultats dépendent entièrement du choix des points supposés fixes. Il y a deux sortes de données d'après deux différentes conditions. De plus, K. Mutô⁷⁾ a introduit certaines corrections sur les valeurs de déplacements. Il a supposé qu'il y a certaines erreurs dans le résultat des mesures de la base ainsi que dans la direction de deux points de triangulation supposées fixes. Dans la Fig. 4 nous avons pris des données originaux.

Comparant ces déplacements de la composante horizontale à ceux de

6) Rikuti-Sokuryôbu. *Travaux de la Section de Géodésie, Tome 7.*

7) K. Mutô, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 10 (1932), 384.

la composante verticale, nous pouvons trouver une relation serrée représentée dans le modèle-b de la Fig. 1. Nous concluons, donc, que les aspects généraux de la déformation permanente de la croûte, produite à l'occasion du tremblement de terre, sont définis par les mouvements initiaux des ondes sismiques. En constatant cette relation entre eux, nous croyons que le mécanisme de la production des ondes sismiques est toujours assez simple et que la déformation de la croûte terrestre est réalisée dans le sens de l'action initiale provoquée au foyer.

Pour comprendre ces faits, nous sommes obligés de constater, d'une part, la propriété plastique de la croûte terrestre qui conserve la déformation produite, d'autre part le déplacement brusque du magma au sein de la croûte, connu comme le phénomène d'intrusion. Quand le magma se déplace dans une certaine direction ce mouvement signifie la production d'une source quadruple. Conséquemment l'hypothèse de l'existence d'une source quadruple au foyer, nous permet d'expliquer les mouvements initiaux des secousses sismiques ainsi que la déformation de la croûte terrestre.

Or, il y a une étude⁸⁾ sur l'existence d'une faille au fond du golfe de Sagami d'après le fait que le déplacement horizontal du terrain devient plus grand quand on approche de cette faille supposée. Il y a encore cependant une autre étude⁹⁾ qui montre que l'existence d'une faille n'est pas juste quand on revise minutieusement sur les déplacements horizontaux surtout auprès de la faille supposée. Suivant notre opinion, la constatation de la faille n'est pas possible seulement avec la composante horizontale, nous allons voir le fait produit dans la direction verticale. A l'égard des déplacements verticaux du fond du golfe de Sagami, on a les résultats publiés par le Bureau hydrographique naval.¹⁰⁾ Nous distinguons certainement la dépression du fond dans la partie extérieure de la courbe nodale et l'exhaussement du fond à son intérieur. Ces changements s'accordent avec notre hypothèse quoique les valeurs quantitatives des changements ne soient pas pareilles avec celles obtenus sur le terrain. Au fond de la mer, la matière composante ne reste plus égale à celle qui existe sur le terrain : on y constate souvent l'apparition d'un volcan, la dépression brusque du fond, etc. D'après ces phénomènes, nous inclinons à croire à l'apparition d'un grand changement du fond même à l'occasion d'un sévère tremblement de terre. Il sera probable

8) A. IMAMURA et H. KISINOÛÉ, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 5 (1928), 35.

9) S. HUDIWARA, *Kisyô-Syûsi*, 10 (1932), 713.

10) T. UTIDA, *Report Imp. Earthq. Inv. Com.*, No 100, B (1929), 61.

que la production d'une faille sera réalisée en correspondance avec la position de la courbe nodale.

b) *Le tremblement de terre de Tazima en 1925.*

Plusieurs¹¹⁾ personnes ont essayé de déterminer la position épacentrale de ce séisme. D'après l'habitude de poser l'épicentre sur une faille, tous ont choisi l'embouchure du fleuve Maruyama comme sa position : parce qu'il y a eu des dommages catastrophiques au long de ce fleuve. Suivant notre considération, cependant, il n'y a aucune raison de fixer l'épicentre sur cette position même d'après les enregistrements sismographiques obtenus à chacune des stations qui se trouvent autour de la région touchée. Les dommages catastrophiques survenus le bassin de fleuve sont dus au phénomène que les ondes stationnaires se ont produites secondairement à cet endroit et que leur accélération, aussi bien que leur période a été sensiblement grande.

Il nous semble, cependant, que l'épicentre était situé près de Takenomura au fond de la mer. Nous le pensons parce que d'une part, un exhaussement de terrain a été observé dans cette région et que d'autre part le Prof. Nakamura¹²⁾ rapporte qu'on a entendu, auprès de Takeno, sur la mer, des bruits sismiques au moment du tremblement de terre dans la direction N-O : probablement cette direction coïncide avec celle de l'épicentre.

A l'égard de la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses de ce séisme, il y a plusieurs études. Nous citerons ici les données de Dr. K. Wadati et K. Suda¹³⁾. Pour mettre cette distribution en évidence, K. Suda se base sur l'effet de réflexion produit sur la surface discontinue dans la croûte. Nous adoptons, cependant, une source quadruple au foyer et nous con-

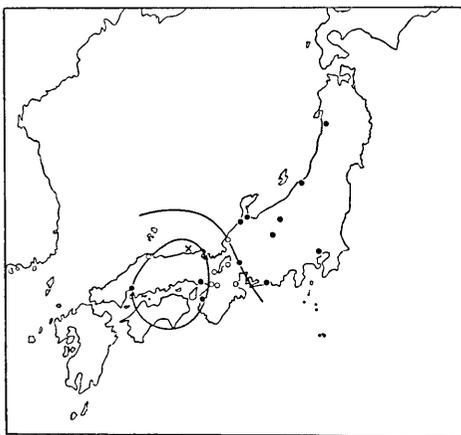


Fig. 5. Distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques pour le séisme de Tazima. (le 23 mai 1925) ● onde poussante, ○ onde tirante, × épicentre.

11) K. SUDA, *Umi to Sora*, 5 (1925), 127. A. IMAMURA, *Reports. Imp. Earthq. Inv. Com.*, 101 (1927), 1.

12) Saem. NAKAMURA, *Saito Hōonkai*, 1 (1925), 22.

13) K. WADATI, *Kisjū-syūsi*, [2], 3 (1925), 1; Suda, *loc. cit.*

sidérons le rayon sismique comme traversant un milieu hétérogène. Avec cette idée, nous pouvons expliquer la distribution régionale de deux sortes d'ondes comme nous l'avons fait dans le cas du tremblement de terre de Kantô de 1923. Les ondes rayonnées obliquement dans le sein de la croûte apparaissent à la surface suivant la loi de refraction. Cette fois-ci la profondeur du foyer était un peu plus grande que l'autre.

On a observé une dislocation du terrain auprès de Tai : à laquelle on a donné le nom de la faille de Tai. Mais, en tout cas, ce changement topographique n'a pas une grande importance : car nous ne trouvons pas aucune influence dans les résultats obtenus au moyen des mesures géodésiques.

Les mesures des changements topographiques produits par ce tremblement de terre n'ont pas été exécutées tout de suite. Après le tremblement de terre de Tango de 1927, la maille de la triangulation a été étendue jusqu'à la région de Tazima et on a pu ainsi assurer qu'une certaine déformation de la croûte avait été produite par ce tremblement de terre. Naturellement, il y a des influences de deux séismes prédominant surtout aux endroits situés entre les deux positions épicentrales.

D'après les résultats obtenus par la triangulation, nous constatons, d'une part qu'il y a des régions dépressionnées surtout dans le bassin de Maruyama-gawa avec un maximum de 36 cm; d'autre part qu'il y a de l'exhaussement de terrain auprès de Takeno, avec un maximum de 34 cm. Il n'y a pas de grands déplacements horizontaux de terrain dans la région exhaussée : mais ils deviennent grands aux points qui s'éloignent de l'épicentre, comme on le voit, dans la Fig. 5. Le sens des déplacements se dirige vers le Sud : c'est-à-dire que le terrain a été déplacé dans une direction opposée à la position épicentrale.

Quand nous faisons la comparaison entre la distribution des mouvements initiaux des secousses et les changements topographiques produits, nous pouvons constater que le mécanisme de ce tremblement de terre peut être expliqué de la même manière que celui du tremblement de terre de Kantô de 1923. L'axe de cône se dirige dans le sens vertical avec un peu de déviation vers le Sud. Dans la région épicentrale, le déplacement vertical prédomine remarquablement, tandis que dans les régions lointaines le déplacement horizontal devient remarquable au lieu du déplacement vertical. Ces faits nous suggèrent l'existence d'une source quadruple au foyer comme nous l'avons déjà noté pour le tremblement de terre de Kantô. En tout cas, il y a ce fait notable que la caractéristique de la déformation de la croûte est produite par le même procédé

que la production des ondes initiales.

c) *Le tremblement de terre de Tango en 1927.*

Le tremblement de terre de Tango de 1927 a causé des dommages catastrophiques aux villes situées surtout auprès de la région épicertrale. D'après S. Kunitomi¹⁴⁾ l'épicentre de ce séisme a été déterminé au large d'Amino. Parmi les nombreuses répliques apparues partout dans la région catastrophée, on peut en distinguer quelques unes apparaissant toujours au Nord de la faille de Yamada (à Mié-mura) pendant assez longtemps après le premier grand séisme.

La distribution régionale des mouvements initiaux des secousses a été étudiée aussi par S. Kunitomi avec les enregistrements sismographiques obtenus toutes les stations au Japon. D'après sa

conclusion, les deux sortes d'ondes se distribuent dans les quadrants dont une des deux lignes partageantes coïncide avec la direction de la faille de Gôamura; il conclut donc que le déplacement relatif de la croûte terrestre au long de cette faille sera la cause de la production des ondes sismiques. Certainement, quand on remarque seulement la distribution des mouvements initiaux de la composante horizontale, elle coïncide parfaitement bien avec les déplacements horizontaux produits dans la région épicertrale. Nous remarquons, cependant, en même temps l'existence d'un déplacement vertical du terrain qui prédomine quelquefois plus que le déplacement horizontal. Pour expliquer les phénomènes sismiques, en effet, on doit tenir compte de ces deux éléments de la déformation de la croûte; autrement la conclusion n'aura pas beaucoup de valeur, parce qu'elle s'appuiera seulement sur une des deux composantes.

Les changements topographiques constatés à l'oeil nu sont d'une part l'exhaussement du terrain sur la côte de la mer du Japon, d'autre part

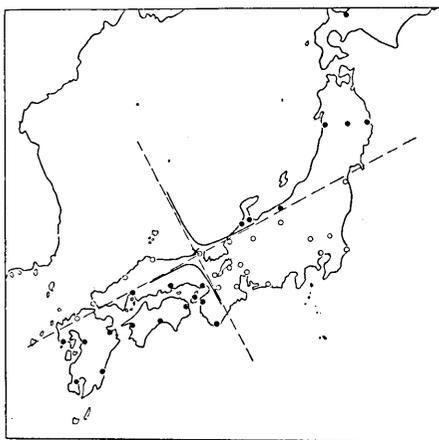


Fig. 6. Distribution des mouvements initiaux des secousses sismiques pour le séisme de Tango. (le 7 mai 1927) • onde poussante, ○ onde tirante, * épicentre.

14) S. KUNITOMI, *Geophys. Mag.*, 2 (1930), 65.

l'apparition d'une série de failles. Sur la côte, nous avons constaté 0,8 m d'exhaussement de terrain rapporté au niveau moyen de la mer : sur la plage on trouve sur les roches l'attachement des huîtres ainsi que des herbes marines comme index de l'ancien niveau moyen de la mer. Le Prof. Saem. Nakamura¹⁵⁾ a étudié la distribution régionale de l'exhaussement au long de la côte et a trouvé le maximum auprès de la Hamadumé.

On considère la faille de Gômura comme la faille principale. Elle commence à l'embouchure de la rivière d'Asamo et court dans la direction S-E, quoiqu'elle ait été suivie sous une forme d'échelon. Le terrain situé sur le côté Est de cette faille a glissé relativement vers le Nord avec une certaine, dépression, Il y a une autre faille produite auprès de Yamada dont la direction demeure perpendiculaire à celle de la faille de Gômura. A l'égard de cette faille nous n'avons vu que le déplacement relatif dans la composante verticale. Ce que nous observons au moyen de l'oeil nu est l'exhaussement relatif du terrain au niveau de la mer et l'endroit où le gradient de changement est assez grand. Donc, il est impossible de discuter la déformation véritable du terrain. Nous sommes, en effet, obligés de consulter les résultats obtenus au

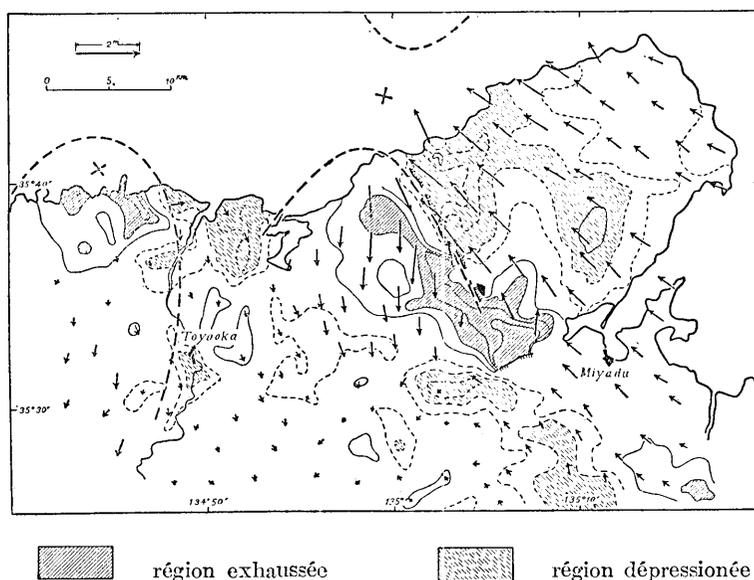


Fig. 7. Déformation de la croûte terrestre causée par le séisme de Tango (le 7 mai 1927) (d'après les cartes publiées par Rikuti-Sokuryōbu)

15) Saem. NAKAMURA, *Saitō Hōonkai Hōkoku*, No. 5.

moyen des mesures géodésiques.

La déformation de la croûte qui a accompagné ce séisme a été déterminée au moyen de la triangulation ainsi que du nivellement de précision. Leurs résultats ont été déjà publiés de Rikuti-sokuryôbu. Nous pouvons constater tout de suite les aspects généraux de déformation représentée par une série de cartes : nous avons fait la Fig 5 d'après ces deux cartes.

Certainement, ce que nous avons observé à l'oeil nu coïncide parfaitement avec les résultats représentés dans la Fig. 5. Nous pouvons déterminer de plus la limite de l'extension de la déformation. Sans entrer dans aucune discussion sur les détails, nous voulons examiner la déformation produite. L'exhaussement du terrain devient maximum sur le côté nord de la faille de Yamada : mais cette déformation n'est pas le résultat simple du grand séisme, car nous y avons constaté l'apparition des nombreuses répliques même assez longtemps après le grand séisme. L'exhaussement de cette région a été probablement achevé à la suite d'un certain cours du temps.

Etant partagée par la faille de Gomura, la portion d'Est de la croûte a été déplacée dans la direction épiscopale avec la dépression du terrain, tandis que la portion d'Ouest a été déplacée dans la direction opposée à l'épicentre avec l'exhaussement du terrain. Ces faits coïncident très bien avec notre hypothèse posant une source quadruple au foyer. Quand on limite la discussion seulement à la composante horizontale, le mouvement du terrain au long de la faille coïncide naturellement avec la distribution des mouvements initiaux des secousses. On suppose que la production d'une faille accompagne le rayonnement des ondes sismiques, et on ne fait pas beaucoup d'attention au déplacement vertical du terrain. Quand on considère en même temps la composante verticale, on est amené à changer l'explication sur la production des ondes sismiques. Nous proposons donc que la force motrice au foyer qui produit des ondes sismiques et puis la déformation de la croûte soit considérée comme présentant les caractéristiques d'une source quadruple.

Nous avons déjà écrit que la production des ondes sismiques est due aux mouvements magmatiques dans le sein de la croûte.¹⁶⁾ Quand la pression de la vapeur dans le magma augmente au delà de la limite de la pression extérieure, il y a certainement un phénomène d'explosion produisant une déformation de la croûte : naturellement l'explosion se

16) M. ISHIMOTO, *loc. cit.*

manifestera sur la partie inférieure de la croûte. Puisque la faille est la zone inférieure de la croûte, le mouvement relatif de la croûte y apparaîtra quand le foyer reste peu profond. Il y a deux cas : le magma se déplace dans la direction verticale ou dans la direction horizontale. Nous voyons d'une part l'apparition d'une faille quand le déplacement du magma se dirige horizontalement, d'autre part l'exhaussement du terrain à la région épiscopale quand le déplacement du magma se dirige verticalement. Nous avons déjà cité des exemples correspondant aux deux cas. L'apparition de la faille n'est plus une règle de déformation relativement à un grand tremblement de terre.

Quand on considère que l'origine des secousses sismiques est due au mouvement relatif de deux portions de la croûte, les ondes transversales deviennent plus importantes que les ondes longitudinales. A notre avis le déplacement magmatique détermine des ondes longitudinales comme produits directs et des ondes transversales comme les produits secondaires. Le Prof. K. Sezawa¹⁷⁾ a déjà montré théoriquement que les ondes longitudinales accompagnent toujours les ondes transversales dans le cas de la propagation sphérique des ondes dans un milieu solide.

En tout cas, ce que nous avons constaté sur la déformation de la croûte est toujours expliqué avec l'hypothèse d'une source quadruple au foyer. Quelquefois, l'axe du cône se dirige dans la direction verticale, quelquefois il se dirige dans la direction horizontale. Nous voulons maintenant appliquer notre hypothèse à toutes les déformations produites par les tremblements de terre pour voir si elle s'y adapte bien ou non.

d) *Le tremblement de terre de Nobi en 1891.*

Lors de ce tremblement de terre l'organisation des stations sismologiques était médiocre et cela ne nous permet pas d'étudier la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses. La déformation de la croûte produite par ce séisme a été assez remarquable. Pour savoir les aspects généraux des changements topographiques, nous citerons ici la description de F. Omori :¹⁸⁾

La faille produite court généralement dans la direction de NO à SE. Partant de Kinbara vers SE, c'est sur le côté NE que se fait la dépression ; tandis que à Midutori, (dans la vallée de Néo) c'est sur le côté SO que se fait la dépression. Même à l'extrémité de la faille, à Noziri, dans la province d'Etizen, le côté

17) K. SEZAWA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 2 (1927), 13.

18) F. OMORI, "*Disin-gaku Kôwa*", 337.

SO a une dépression : la dépression maxima a été mesurée de 18 pouces à Mizutori. Partant de Kinbura vers le Nord, on remarque surtout le déplacement horizontal dont le côté SO a glissé relativement au côté NE dans la direction SE. On a mesuré 18 pouces de déplacement maximum à Nakamura.

Les savants qui ont constaté grande dislocation de la croûte terrestre, ont considéré tout de suite que la production des ondes sismiques a été provoquée la rupture de la matière qui compose la croûte terrestre. Autrement dit, ils ont considéré les changements topographiques comme les résultats de la rupture du terrain à la suite de l'accumulation de l'effort.

Pour savoir la déformation exacte du terrain, le nivellement de précision a été réexécuté dans cette région. D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater un exhaussement de terrain sur le côté SO de la faille et une dépression de terrain sur le côté NE de la faille : l'exhaussement a été plus grand que la dépression. Dans le mémoire publié par M. Sugiyama,¹⁹⁾ ingénieur de Rikuti-sokuryôbu, on trouve une carte représentant la distribution du déplacement vertical du terrain surtout dans le domaine catastrophé. Malheureusement, il n'a pas étendu ses observations jusqu'à Mizutori à cause du manque de données. Rikuti-sokuryôbu²⁰⁾ aussi a exécuté en 1913 la triangulation dans le domaine catastrophé et a publié le déplacement horizontal du terrain ; mais le choix des points supposés fixes n'est pas convenable et les résultats obtenus n'ont pas grande valeur pour faire progresser nos discussions.

D'après la carte de Sugiyama ainsi que d'après les descriptions faites

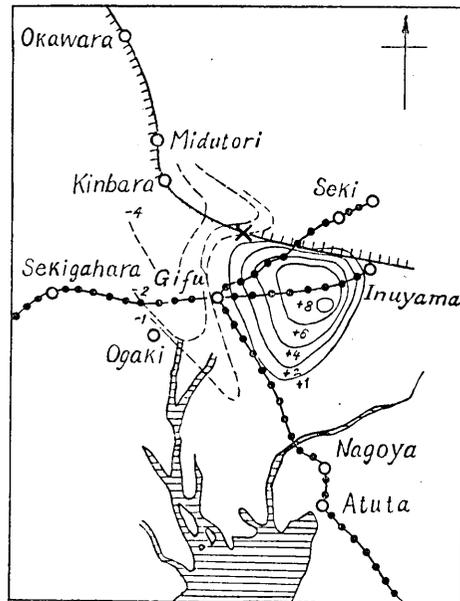


Fig. 8. Déformation de la croûte terrestre causée par le séisme de Nôbi (le 28 oct. 1891) (d'après la carte de M. Sugiyama)

19) M. SUGIYAMA, *C. R. Séances, 14^e Conf. gén. Ass. Géolésique Int.*, I (Berlin, 1894), 138.

20) Rikuti-Sokuryôbu, *Annual Report of Military Land Survey* (1882-1921).

par Omori, nous pouvons fixer l'épicentre sur la faille entre Kinbara et Takatomi. La déformation de la croûte est ainsi expliquée avec une source quadruple au foyer, dont la direction de l'axe est presque horizontale. Ainsi nous trouvons le côté dépressionné tantôt à EN, tantôt à OS de la faille. On verra la production du même type de faille à l'occasion du grand tremblement de terre d'Idu en 1930.

En tout cas, les changements topographiques produits sont expliqués entièrement avec une source quadruple. Cette fois-ci l'épicentre se place à la région dépressionnée et la faille apparaît à la place où l'effort a été son maximum. Au cas du tremblement de terre de Tango, l'épicentre a été au fond de la mer et on n'a observé que la moitié de l'aspect des changements topographiques. A l'occasion du tremblement de terre de Nôbi, cependant, on a pu observer l'aspect entier de la déformation à cause de la position épiscopentrale qui était sur le terrain. Nous regrettons, cependant, que les mesures géodésiques n'aient pas été appliquées partout dans la région troublée.

Considérons le mécanisme de l'apparition de la faille dans la vallée de Néo. Probablement, au foyer la pression hydrostatique du magma est arrivée à la limite de résistance de la pression extérieure. En profitant du point le plus faible endroit de la croûte, c'est-à-dire la faille, une certaine portion de la croûte se sont déplacées pour livrer passage à l'écoulement magmatique. Jusqu'aujourd'hui on a supposé qu'il y a une force poussant agir sur un certain domaine de la croûte afin que provoquer la rupture de matière.

A notre avis, cependant, il y a simplement la pression hydrostatique au foyer d'une certaine dimension. Cette sorte de pression est capable de produire des changements topographiques soit dans la direction verticale, soit dans la direction horizontale.

f) *Eruption volcanique de Sakura-zima en 1914.*

Le volcan de Sakura-zima a fait l'éruption en 1914. Les secousses sismiques produites ont apporté des dommages aux maisons en bois situées dans la ville de Kagosima, à 10 km de distance du cratère du volcan. A cette époque-là, l'organisation de l'observation sismique n'était pas comparable à celle d'aujourd'hui, et il est difficile d'observer la distribution des mouvements initiaux des secousses. On a pu constater cependant, à Kagosima que l'onde poussante a été tracée par le séisme principal et qu'une de deux sortes d'ondes a été tracée par chaque réplique.

La triangulation a été exécutée dans le golfe de Kagosima²¹⁾ ainsi

21) F. OMORI, *Bull. Imp. Earthq. Inv. Com.*, 8 (1920), 322.

appelle la forme volcanique : un exhaussement au sommet, une dépression au pied. Cette sorte de déformation a été constatée à l'occasion de l'éruption de Komagataké en 1929.²³⁾ D'après l'étude statistique du Prof. T. Terada,²³⁾ le volcan prend sa forme avec toujours une région dépressivée à son pied. Nous pouvons compter plusieurs volcans ayant des lacs à leur pied : Huzi, Komagataké et Sakurazima sont de bons exemples.

g) *Foule de séismes à Itô en 1930.*

Une foule de séismes sont apparus aux environs d'Itô en 1930. Cette apparition de séismes nous a fourni beaucoup de problèmes sismométriques ainsi qu'une certaine image sur le modèle de distribution du foyer sismique en foule.²⁴⁾ Parmi eux, le séisme du 22 mars a produit les secousses ayant la plus grande intensité. D'après l'étude de S. Kunitomi,²⁵⁾ les deux sortes d'ondes des mouvements initiaux se distribuent dans les quadrants. Les résultats obtenus²⁶⁾ par les sismographes installés temporairement autour de la région épiscopentrale nous montrent aussi que les deux sortes d'ondes ont même distribution.

Pour constater la déformation de la croûte le nivellement de précision a été exécuté au long de la côte orientale d'Idu.²⁷⁾ Suivant les résultats obtenus, nous sommes certains de l'exhaussement du terrain auprès de Kawana et la dépression auprès d'Aziro. Cette déformation du terrain est expliquée avec la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses. Ce fait est suffisant pour permettre de supposer une source quadruple au foyer.

h) *Le tremblement de terre d'Idu en 1930.*

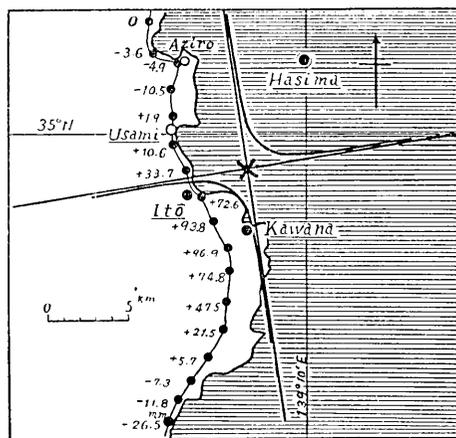


Fig. 10. Déformation de la croûte terrestre causée par la foule de séismes apparus aux environs d'Itô en 1930.

22) C. TUBOI, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 8 (1930), 298.

23) T. TERADA, *ibid.*, 7 (1929), 207.

24) N. NASU, *ibid.*, 2 (1931), 22.

25) S. KUNITOMI, "Iwanami-Kôza", sur physique et chimie, section physique 8.

26) d'après les enregistrements obtenus par N. Nasu.

27) *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 8 (1930), 375.

Ce tremblement de terre s'est produit le 26 Nov. 1930. Son l'épi-centre s'est trouvé auprès d'Ukihasi. Suivant l'étude de K. Honda²⁸⁾ les deux sortes d'ondes aux mouvements initiaux des secousses ont été distribué dans les quadrants. En considérant le fait qu'une des ses lignes nodales coïncide avec la faille produite, il a conclu, que plupart des ondes sismiques ont été rayonnées par le mouvement glissant de deux portions de la croûte terrestre à la surface de la faille.²⁹⁾

Certainement, d'une part nous pouvons observer à la surface terrestre une dislocation distincte en reliant les trois bassions (Tasiro, Tanna et Ukihasi) : d'autre part, nous avons pu observer cette dislocation même dans le tunnel de Tanna creusé justement au desous du bassin de Tanna.

La composante horizontale du déplacement relatif a été mesurée 2,40 m. dans le tunnel, tandis qu'elle était comparativement plus petite à la surface terrestre. La surface glissante de la faille à permis constater qu'elle était constituée par le plan poli de la roche recouvert par de l'eau. Autrement dit, le mouvement relatif des deux portions de la croûte a été produit en profitant de la position où le glissement était le plus facilement réalisé.

Donc, il est bien difficile de croire que toutes les énergies des ondes élastiques ont été rayonnées en suivant le glissement sur l'ancienne faille. Nous considérons en tout cas que la plus grande partie de l'énergie sismique a été rayonnée d'un foyer situé dans le sein de la croûte, probablement plus profondément que la faille.

Quand nous examinons le mouvement relatif du terrain au long de cette faille, nous trouvons que dans sa portion Nord, le côté E de la faille se trouve plus haut que le côté O, tandis que dans sa portion Sud, la hauteur relative devient contraire. A l'égard du déplacement horizontale, la portion E de la faille a glissé vers le Nord relativement à la portion O. Cette sorte d'apparition d'une faille a été observée à l'occasion du tremblement de terre de Nôbi en 1891.

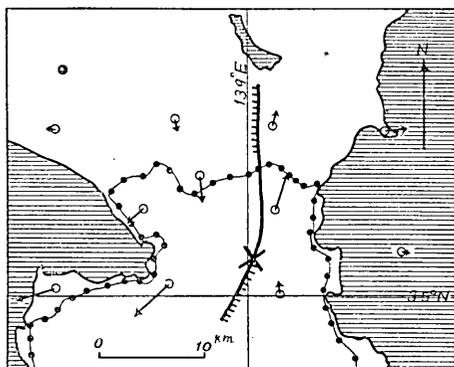


Fig. 11. Déformation de la croûte terrestre causée par le séisme d'Idu (le 26 nov. 1930).

28) K. HONDA, *Kisyo-syûsi*, 9 (1931), 293.

29) K. HONDA, . *loc. cit.*

La triangulation de second ordre a été exécuté dans cette région³⁰⁾ et ses résultats nous montrent le même sens de déplacement horizontaux au long de la faille. Le nivellement de précision a été exécuté d'une part au long de la route autour de la côte d'Idu, d'autre part au long de la route d'Atami à Misima. Suivant ces mesures, nous constatons un exhaussement du terrain auprès d'Atami et une dépression traversée par la faille.

D'après ces faits, nous pouvons aussi supposer une source quadruple au foyer comme nous l'avons fait pour les autres tremblements de terre. Comme l'épicentre du séisme d'Idu a été sur le terrain, nous avons eu la chance d'observer la faille tournante avec le glissement horizontal : identique à celle du tremblement de terre du Nôbi.

Maintenant, nous n'avons que des résultats de triangulation de second ordre et il est impossible de pousser notre discussion dans les détails. Si nous avions les résultats de triangulation de troisième ordre, nous trouverons des faits qui nous permettraient de constater l'existence d'une source quadruple au foyer comme nous l'avons fait pour les tremblements de terre de Kantô ainsi que pour celui de Tango.

i) *Le tremblement de terre de Titibu en 1931.*

La distribution des mouvements initiaux des secousses a été étudiée par S. Kunitomi.³¹⁾ Les changements de la hauteur des repères ont été constatés seulement au long de la route allant de Tôkyô à Takasaki et puis à Suwa.³²⁾ Nous pouvons relever un certain exhaussement et une certaine dépression du terrain correspondant à la distribution des mouvements initiaux des secousses.

3. Conclusion.

Nous avons constaté que la distribution régionale des mouvements initiaux des secousses sismiques explique très bien la déformation de la croûte produite surtout dans la région épacentrale. Jusqu'aujourd'hui la plupart de discussions sur la déformation de la croûte ont été faites en prêtant attention sur le déplacement horizontal du terrain. Naturellement, on considère que les déplacements horizontaux du terrain jouent un rôle plus important que les déplacements verticaux dans le phénomène sismique.

30) *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 10 (1932), 261.

31) S. KUNITOMI, *Kensin-Zikô*, 5 (1932), 223.

32) T. TERADA et N. MIYABE, *Proc. Imp. Acad.*, 8 (1932), 413.

Il nous semble qu'on a cherché à résoudre ce problème en supposant seulement une force horizontale existant *à priori* dans la croûte terrestre. Naturellement, il est nécessaire de supposer une force pour expliquer le mouvement d'un objet. Mais, il ne faut pas limiter la force à la direction horizontale. Pourquoi, se borne-t-on à noter la force horizontale? Parce qu'il y a une idée pré-existante en sa faveur. On considère cette force comme suffisante pour donner le glissement horizontale à la faille, quoique l'origine de la force soit inconnue : mais il y a plusieurs moyens pour réaliser une telle déformation. Nous savons qu'il y a une force qui provoque le plissement des couches dans la croûte et qui détermine les chaînes de montagnes à la surface de la terre. Il n'est pas certain, cependant, que ce mouvement de la croûte ait été réalisé par une force d'origine purement horizontale : nous disons qu'il sera mieux expliqué l'influence de l'action plutonique.

Quand on limite son attention à la déformation locale de la croûte, telle qu'on la constate à l'occasion des tremblements de terre, l'action d'une force de grande échelle ne donnera pas beaucoup d'influence directes. Nous considérons d'ailleurs l'action plutonique plutôt dans le domaine local sur la zone volcanique du monde. Le magma produit une grande pression au cours de son refroidissement.³³⁾ L'action ultime de pression sera suffisante pour produire des ondes sismiques ainsi qu'une déformation brusque à la surface de la croûte. Nous savons que l'écoulement du magma dans la croûte arrive souvent assez violemment pour qu'on le compare avec l'explosion volcanique.³⁴⁾

Nous proposons donc une source quadruple au foyer pour expliquer le mécanisme de la production des ondes sismiques ainsi que la déformation de la croûte. Naturellement, la croûte conserve d'une part une propriété élastique permettant passage des ondes sismiques, d'autre part une propriété plastique admettant les déformations permanentes. Il nous semble, de plus, que la portion superficielle de la croûte est assez fragile sous l'action brusque des forces : nous pouvons constater un ensemble de blocs dans la déformation produite par le grand tremblement de terre.

33) G. W. MOREY, *Journ. Wash. Acad. Sci.*, 12 (1922), 219.

34) J. BARRELL, *Prof. Paper*, 57 (1907), 157.

14. 地殻變動と震源における地震波發生

地震研究所 石本 巳 四 雄

1) 著者は昨年震源における地震波發生機巧に關して一論文を提出したが、其れは地震初動分布の狀況から察して四重源の存在を想定したものである。波動の傳播を對象として、之れを力學的に考へるならば、震源を一點と考へて差支へないであらうが、波動勢力を問題として物理的に之れを考へる場合においては、震源に相當大なる容積の存在を必要とし、波動成生と同時に物質移動を考へる事が至當である。四重源の假説からすれば、物質移動は正に岩漿移動として考へられ、地震に伴ふ地形變動は以上の機巧によつて起され得る筈である。従つて地形變動と初動方向分布との間には密接の關係が存在しなくてはならない。

2) 1923年の關東地震における初動方向分布は極が殆ど上方に向つた四重源を地殻内に想像する事によつて説明されると同時に、地形變動も震源における同一力が生ぜしめたと考へる事が出来る。即ち初動分布より推定し得る節線は楕圓形であり、此の楕圓内は隆起すると同時に震央より遠ざかる水平方向に移動し、楕圓外は陥没すると同時に震央に向つて水平移動が行はれて居る。

但馬地震においても同様四重源を假定して初動方向分布と地形變動とが説明出来る。

丹後地震においては以上の二地震と異り、肉眼により斷層の出現が認められたが、此の場合の初動方向分布は四重源の極が水平方向にある事を示し、剪断力の最も大なる所は斷層の出現場所と一致する。水平移動が震央に向ふ區域は沈降を、又水平移動が震央から遠ざかる所は隆起を示して居る。之れは四重源存在を確めるものとなる。

1891年濃尾地震に伴つて生じた地變の中斷層として認められるものは蝶番型であつた事から、此れは極方向が水平である四重源を想像してよく説明が出来る。なほ震央が陸上にあつた爲め震央においては陥没を呈した事も判斷し得る。

1914年櫻島噴火に伴つた地形變動は全く極の上方に向つた四重源を火山下に想像する事によつて説明出来る。此の場合岩漿運動が上方に向つたと云ふ事實と結びつけて考へるならば地震原因が岩漿流動であると云ふ事を充分推定し得るであらう。

1930年伊東附近に發生した小地震においても水準測量によつて得られた地形變動と一地震の初動方向分との關係は全く同様である。

1930年伊豆地震に伴つて生じた斷層も蝶番型であつた事、又其の水平移動の卓越した區域に震央が決定される事から見て同じく地變は岩漿壓力増進によつて地殻の最も弱い個所において相互移動が行はれた結果生じたと見られる。

3) 即ち大地震によつて生ぜられた地形變動は全く初動方向分布と密接の關係を持ち、四重源の存在を以て説明出来るのである。従來の水平力を地殻内に假定したものに對し、著者は震源に岩漿の靜水壓力を假定して此れが外力を超過する場合、最も移動せしめ易き地殻の一部を移動して地形變動を出現せしめるが一方に此等運動に伴ふ衝動は地震波を放射せしめるものと考へる。