

特集: Lamb の問題 100 年の歩み

One Hundred Years of the Lamb's Problem

特集編集長 川崎 一朗
(京都大学防災研究所)

2004 年は、Lamb の論文 “On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid” が、Philosophical Transactions of the Royal Society of London に出てからちょうど 100 年になる。それを記念して、中西一郎編集委員長から特集を組むことが提案され、通常の投稿論文と同じ査読プロセスを経て、発行の運びとなった。

半無限弾性媒質の表面を S 波速度よりやや小さい速度で伝播するレーリー波の存在は、Rayleigh (1885) に指摘されていた。しかし、地震学や関連分野の研究にとって、弾性波の理論波形が重要なことは言うまでもない。Lamb (1904) は、震源の時間関数 $Sd(t)$ が、 $Sd(t) = pl/(P^2 + t^2)$ のように時間変化する場合の弾性波の時間領域の解を、留数の定理によって、複素平面上の極の留数を評価することによって求めた。その波形は、P 波、S 波、レーリー波からなる単純なものであった。この論文にちなんで、弾性論に基づいて理論弾性波形を計算することは「Lamb の問題」と呼ばれてきた。ただし、この特集では、「Lamb の問題」を広く解釈し、研究の一部に理論波形の計算を含む研究はすべて含まれると見なした。

Lamb (1904) に続いて、日本人では、Nakano (1925) などの研究が続いた。その後、Honda and Nakamura (1954) のダブルカップル論から、Maruyama (1963) と Burridge and Knopoff (1964) の無限媒質中のディスロケーションによる弾性波の解析解と、double couple が shear dislocation に等価であることの証明、Haskell (1969) による有限断層による地震波形の計算、1970 年代に入って、Kawasaki *et al.* (1973) の半無限媒質中のディスロケーションによる弾性波の解析解、Sato (1973) による多層構造中のディスロケーションによる弾性波の解析解などの研究が行われた。自由表面や不連続面がある場合の理論波形を求めるには、複素平面上の極における留数や分岐切断面の有限積分を巧妙に評価する Cagniard の方法 [(Cagniard (1962))] が大きな役割を果たした。

理論地震波形と観測地震波形との比較の研究は、1960 年代からであろう。筆者の知る限りでは、1966 年パークフィールド地震の時、断層からわずか 80 m のところで記録された加速度波形を 2 階積分して求めた変位波形と理論波形の比較から断層面での食い違いの大きさと応力降下を求めた Aki (1968) の研究や、1943 年鳥取地震の時に京都大学阿武山観測所の佐々式大震計により記録された長周期記録と理論波形の比較から震源パラメータを求めた Kanamori (1972) の研究などが最初である。

地球規模の球成層構造の場合の固有関数の計算は、古くは、Alterman *et al.* (1959), Pekeris *et al.* (1961) にさかのぼる。日本からは、Sato *et al.* (1962), Usami *et al.* (1965), Saito (1967), Takeuchi and Saito (1972) などの貢献があった。この場合の理論地震波形と観測地震波形との比較の研究も 1960 年代からであろう。筆者の知る限りでは、長周期の表面波波形と理論波形の比較から、1964 年新潟地震の地震モーメントを求めた Aki (1966) の研究が最初である。その後、この方法は、1963 年エトロフ島沖地震に応用した Kanamori (1970) などの研究によって発展した。

「Lamb の問題」は、計算機の能力の拡大とともに、差分法や有限要素法による波形計算が、地球

規模でも near-field でも広く行われるようになり、地震工学的応用まで含む、大変裾野の広いものとなった。このことは、この特集に掲載される諸論文から読み取れるとおりでである。例えば、1980年代に入ってから、多重震源解析の研究が展開されるようになった〔例えば、Kikuchi and Kanamori (1982)〕。多くの研究者に先駆けて「Lambの問題」の展開に貢献してこられた安芸敬一先生に序文を書いて頂いた。安芸先生の考えが分かりやすく示されている。併せて参考とされたい。この特集が、「Lambの問題」の原点を振り返るとともに、今後の発展の触媒になれば、われわれの望むところである。

ここでは、紙面の制限上、最近は忘れられがちな1970年代までの日本からの貢献に焦点をあてた。他の多くの重要な論文に言及できなかった。お詫び申し上げる次第である。

参 考 文 献

- Aki, K., 1966, Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake movement, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **44**, 73-88.
- Aki, K., 1968, Seismic displacements near a fault, *J. Geophys. Res.*, **73**, 5359-5376.
- Alterman, Z., H. Jarosch and C. L. Pekeris, 1959, Oscillations of the Earth, *Proc. Roy. Soc., A*, **252**, 80-95.
- Burridge, L. and L. Knopoff, 1964, Body force equivalents for seismic dislocations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **54**, 1875-1888.
- Cagniard, L., 1962, Reflection and refraction of progressive seismic waves, English trans. by E. A. Flinn and C. H. Dix, MacGraw-Hill, New York, 282 pp.
- Haskell, N. A., 1969, Elastic displacements in the near-field of a propagating fault, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **59**, 865-908.
- Honda, H. and K. Nakamura, 1954, Notes on the problems on the motion of the surface of an elastic solid produced by a linear source, *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, **5**, 5, 58-66.
- Kawasaki, I., Y. Suzuki and R. Sato, 1973, Seismic waves due to a shear fault in a semi-infinite medium. Part I: Point source, *J. Phys. Earth*, **21**, 251-284.
- Kanamori, H., 1970, Synthesis of long-period surface waves and its application to earthquake source studies—Kurile Islands Earthquake of October 13, 1963, *J. Geophys. Res.*, **75**, 5011-5027.
- Kanamori, H., 1972, Determination of effective tectonic stress associated with earthquake faulting. The Tottori earthquake of 1943, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **5**, 426-434.
- Kikuchi, M. and H. Kanamori, 1982, Inversion of complex body waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 491-506.
- Lamb, H., 1904, On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **203**, 1-42.
- Maruyama, T., 1963, On the force equivalents of dynamic elastic dislocations with reference to the earthquake mechanisms, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **41** 467-486.
- Nakano, H., 1925, On Rayleigh waves, *Jap. J. Astr. Geophys.*, **2**, 1-94.
- Pekeris, C. L., Z. Alterman and H. Jarosch, 1961, Comparison of theoretical with observed values of the periods of the free oscillations of the Earth, *Proc. Nat. Acad. Sci., Washinton, USA*, **47**, 91-98.
- Rayleigh, J. W., 1885, On waves propagated along the plane surface of an elastic solid, *Proc. Lond. Math. Soc.*, **17**, 4-11.
- Saito, M., 1967, Excitation of free oscillations and surface waves by a point source in a vertically heterogeneous medium, *J. Geophys. Res.*, **72**, 3689-3699.
- Sato, R., 1973, Seismic waves due to a dislocation source model in a multi-layered medium, *J. Phys. Earth*, **21**, 155-172.
- Sato, Y., T. Usami and E. Ewing, 1962, Basic study on the oscillation of a homogeneous elastic sphere, IV, *Geophys. Mag.*, **31**, 237-242.
- Takeuchi, H. and M. Saito, 1972, Seismic surface waves, in "Seismology: Surface waves and free oscillations", ed. by B. A. Bolt, *Methods in Computational Physics*, **11**, Academic Press, New York, 217-295.
- Usami, T., Y. Sato and M. Landisman, 1965, Theoretical seismograms of spheroidal type on the surface of a heterogeneous spherical Earth, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **43**, 641-660.