

締固め機械史 2：突固め系の機械化

岡本直樹

盛土の搗固め（突固め）法は、先史時代から種々考案されて延々と近代まで利用されてきた。まず、その突固め器具を紹介し、版築から現代のランマ、タンパ、タンピングローラに至る軌跡を辿る。その機械化は、20世紀初頭の回転タンパ（シープスフートローラ）の発明から、自走化、パッドフート化、全輪駆動化へと改良・発展した。国内の近代化では、明治期のグルーブドローラの導入、戦中の棘付点圧機の模倣製作があり、戦後は模索的開発と輸入機の導入から始まった。現在のタンピングローラは振動ローラと融合して、情報化施工による管理が行われている。

キーワード：建設機械史、版築、突固め、締固め、タンパ、ランマ、タンピング、パッドフート

1. はじめに

締固めは盛土の発生に伴って先史時代に生まれ、当初は足踏み程度だったものが、灌漑工事の築堤等で、より締固め効果の高い突固め法が求められた。我が国では、図-1のような突固め（搗固）法が昭和まで各地の地搗唄に合わせて用いられていた。千本搗きは版築にも用いられている。

版築（図-2）は、文字通り版（型枠）を用いて緻密に突固める方法である。黄河流域で黄土の締固め法として前3千年頃に生まれ、堤防、城壁等に用いられた。前2千年～15百年の里頭遺跡の宮殿跡の基壇・回廊・城壁は、その代表例である。我が国へは6世紀末迄に伝来し、墳丘・築堤・基壇・壁等の築造に用いられた。広義の版築は、吉野ヶ里遺跡の古墳群（BC50年頃）や纏向型前方後円墳、高松塚古墳（7世紀末）等でも使われたと言うが、版の使用痕跡が確認できる厳密なもの限定される。663年の白村江敗戦後の唐・新羅軍来襲に備えた太宰府防衛の水城（写真-1）は版築の代表例である。現在でも版築は壁建築に西アジア等で

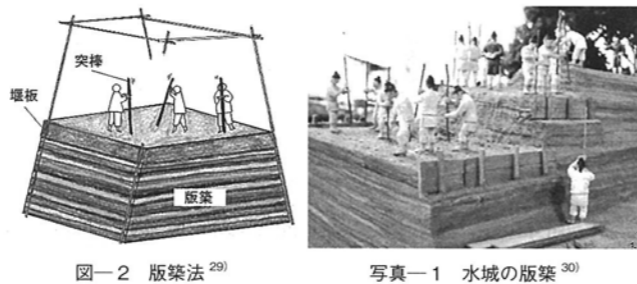


図-2 版築法²⁹⁾



写真-1 水城の版築³⁰⁾

施工されており、我が国の現代建築でも活用している。

1～3世紀のローマ帝国では、道路建設に木製ランマが使用されたと云う。当時のランマ図はないが、参考として後代の中世・近世のランマを図-3に示す。

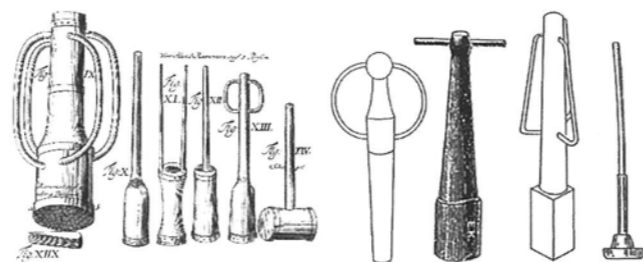


図-3 中世と近世のランマ

2. 機械化へ

転圧器としてのロードローラの起源は不明であるが、6000年前に大木輪切のロールで転圧していたとの説があり、インカ帝国の道路網建設で使われたとされる石造ローラ（5t、φ65cm）も出土している。中国の古書（尚書圖解）にも築堤時に石輪を転がしてい



図-1 搗固め法

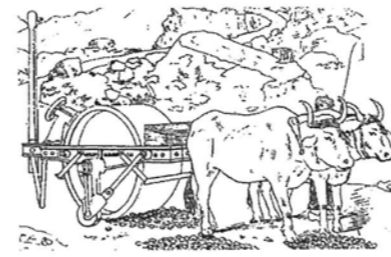


図-4 牽引ローラ

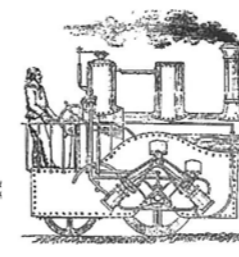


図-5 Lemoine

るような絵がある。欧州では、1725年になって Jakob Leupold の馬牽引鉄輪ローラの描画があり、蒸気ローラは1865年の Aveling が有名であるが、1859年に Lemoine（図-5）が発明している。

(1) タンピングローラ等

ロードローラは、道路等の締固めの高速化と整形に寄与したが、接地圧が低く、堰堤等の締固めには不十分であった。そこで土の締固め用として、線圧を上げた Grooved roller が生まれている。写真-2は、ACME社の1927年型録掲載のグルーブド盛土ローラで、分割独立した各ホイールの間が溝になっている。同様の蒸気ローラは、Kelly-Springfield 等が造っていて、日本にも1911年に導入（後述）されていた。

そして、伝統的なタンピング（突固め）からのアプローチも開始された。19世紀の英米では築堤盛土の締固めに羊等の群れが利用されていた。これをヒントにロサンジェルスで器械化が試みられ、ローラに羊の足が取付けられる。1902年に J.W.Fitzgerald が、最初のシープスフートローラ（鉄道用7inスパイク付3フィート径の回転タンパ：写真-3）を造った。改良・大型化を経て1906年に特許を取り、Fitzgerald Roller と呼ばれて、Killefer Mfg が製造して全国に拡がり、1923年に特許は切れた。フィルダムの締固めには、1920年の Lake Henshow Dam から使われ始め、やがて馬牽引（写真-4）からトラクタ牽引（写真-5）に移行した。

1933年に RR.Proctor が最適含水比を発見して締固め理論を ENR に発表すると、以降の締固め機械の開発もこの科学的な方法で締固め試験が行われ、評価されるようになる。

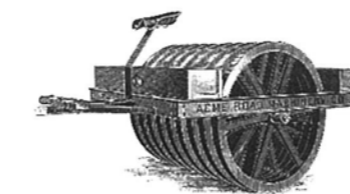


写真-2 Grooved roller



写真-3 Sheepsfoot



写真-4 馬牽引



写真-5 トラクタ牽引

戦後、グリッド（メッシュ）ローラを建設会社の Gardner Byrne が考案、そのデザインを Hyster が1949年から生産すると（写真-6）、広く普及した。また、仏 Albaret 社は、写真-7の下図のように形状を3通りに変えられるターンフートローラを1952年に開発している。

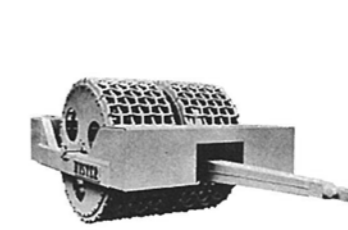


写真-6 Grid Roller

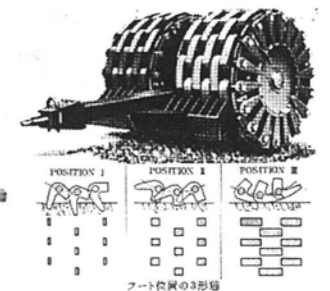


写真-7 Turning Feet

(2) ランマの機械化

一方、手動ランマの機械化は、独 Konrad Haage が最初の Explosion Rammer（combustion powered impact hammer：写真-8）を1926年に開発、同年7月に Albert Pfluger が特許を取得した。1933年には、胴突きの機械化とも言える DELMAG frosch/frog も主任技師の K.Haage が開発し、翌年のライプツィヒの見本市で脚光を浴びる（500kg）。1936年には写真-9の1000kgを開発した。

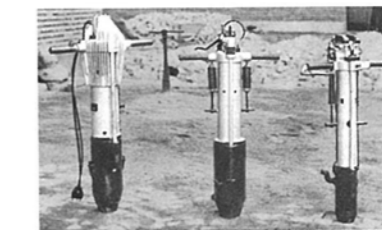


写真-8 Explosion Rammer



写真-9 Delmag 1000

(3) タンピングローラの自走化

1925年に H.W.Rohl が軽トラクタ装着の球状ヘッドフートのタンピングローラ（写真-10）の特許を取っているが、これが自走式の嚙矢のようだ。1930年代になるとメーカー製として、Trojan が3輪ローラ改造の Speed Tamper（250psi：写真-11）を販売している。シープスフートローラでは、kneading 効果を上げながら Walk out となるまで締固めるが、土質によっ



写真-10 Rohlの自走式 写真-11 Trojan Speed Tamper

ては過剰こね返しとなり、これを駆動輪とするとより顕在化した。その解決策として、Buffalo-Springfieldはタンデムローラで、セグメントホイールによるパッドフット化(写真-12)を試み、本格的な4輪駆動型K45 Kompactor(写真-13)を1954年から1968年まで生産した。グループローラの流れを汲むセグメントホイールは、土離れをよくするためであろう。

変わったところでは、Weierhammer社が3輪ローラにシュー付車輪の一種であるKoppisch System(写真-14)を装着した18tのBBV18と25tのGBV25を1950年代に製作している。他のメーカーでは、Ferguson(写真-15)やBros SP-255B Tamper(1966年:写真-16)等が造られている。

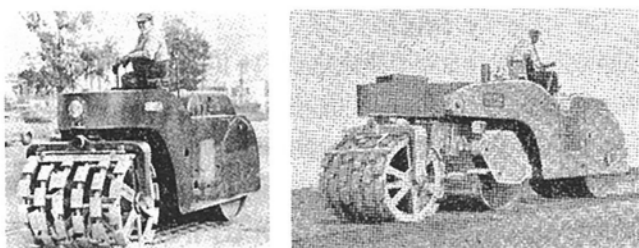


写真-12 BuffaloのPad-foot

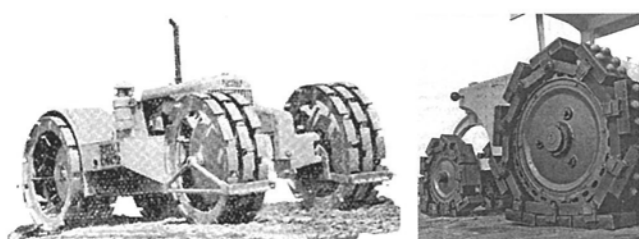


写真-14 Koppisch



写真-15 Ferguson



写真-16 Bros SP-255B

また、タンピングローラの高速度化にモータスクレーパ(MS)のトラクタ利用が流行っている。特にHyster

が各種モデルを60年代に提供した。C410A(写真-17)は、CAT DW21, 631等のトラクタ部を利用して牽引している。C400B(写真-18)では、CAT 630の駆動輪をパッドフットローラに置換えた。写真-19はCAT DW20の駆動輪をパッドフット化して、更にパッドフットローラを牽引している。

その他のメーカーではROMEがSegmented Wheel Compactorを1965年にCAT 651に取付け、1968年には631(写真-20)に取付けている。



写真-17 DW21+Hyster C410A 写真-18 C400B



写真-19 Hyster DW20A



写真-20 Rome Compactor 写真-21 Tournapull Roller

(4)アーティキュレートと全輪駆動化

そして、土工機械の発明王R.G.LeTourneauも自走化に取組み、1950年代初期に道路市場用にTournapull Roller(写真-21)を試作しているが、1959年に45tアーティキュレート型全輪駆動のPower-Packers M-50(写真-22)とM50-55(写真-23)を設計、続けて改良型のM60-55(写真-24)やM-20も開発している。これらのシリーズは35台が生産され、後の各社のタンピングローラ設計に影響を与えた。

写真-25は、60年代初頭のPactor社のRex Segmented-pad Compactorであるが、3輪として全幅を締固められ、排土板を装着している。また、分割ホイールにも特徴があり、小口径ドラムにより図-6のように深部まで締固められる。これらにより人気があるのか、未だに生産が続いている。CMIが1997年に買収して、現在はCMI RexPactorとして販売されている。

他のメーカーでも全輪駆動型は、littleford(写真-26)、Wagner WC17 Padfoot(1963年:写真-27)、



写真-22 M50 Power-Packers 写真-23 M50-55



写真-24 M60-55 写真-25 Rex Pactor

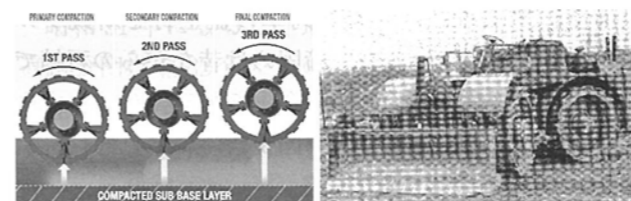


図-6 Walk out 写真-26 Littleford



写真-27 Wagner WC17 写真-28 RayGo Ram45

RayGo Ram(写真-28)等が造られた。RayGo Ram 45は、ホイールドーザをコンパクタに改造しているが、クッションのためか、タイヤにパッドフットローラを巻いている。因みに、RayGoはMSを改造した1969年の大型グレーダGiantで名を馳せ、Hysterと並ぶ転圧機の2大メーカーでもあったが、1985年にCMIに買収された。

4輪駆動化では、Petersonも足跡を残している。G.F.Atkinson社が施工のBrionesダムでは、当初、D8+ シープフットローラとDW-21牽引のHyster C410A, 50tタイヤローラが使われていた。しかし、盛土材の含有巨礫に対処するため、CAT製品の改造で定評のあるB.PetersonがDual 631 Stomper(写真-29)を1963年に開発して投入した。631のタイヤをHyster C400Bのパッドフットローラに置換えた2台のトラクタ部を結合したものである。後に改良型のTwin 631B Tamperも1966年に製作して、Orvilleダ

ムに投入している。

そして決定打として、Caterpillar社が1969年にホイールドーザ(8x4シリーズ)をベースに、Pad-foot roller(写真-30)に換装した825, 835(写真-31)を開発して市場投入した。翌年には815も追加した。写真-32の825はシープフットを装着した珍しいタイプである。ゴミ埋立用ではフット形状を変えて、ランドフィルコンパクタ8x6シリーズとして販売した。類似同形式の自走式タンピングローラはBOMAGやDynapac(写真-33)も販売しているが、写真-34のBomag K-300は多角形型である。



写真-29 Dual 631 Stomper 写真-30 CAT Pad foot



写真-31 CAT 835 写真-32 CAT 825Sf



写真-33 Dynapac 写真-34 BOMAG K-300

(5)振動化

そして、振動型タンピングローラが出現する。振動ローラのフラットローラをタンピングタイプに置換えた振動タンピングローラVibro-Verken/Dynapac CF-30(写真-35)が販売され、やがて、各社が自走式を生産して普及すると、4輪駆動型タンピングローラの需要は低迷した。しかし、排土板付の高速度タンピング敷均し能力には、まだ魅力が残っている。

写真-36~39に各社(ABG WZH185, 1968年のHyster CA450A, Ingersoll Rand SPF-56, CAT CP563E)の振動タンピングローラの例を示した。CATの振動ローラは、1985年からCMI傘下のRayGoの製品供給を受け、1987年に製造ラインを引継いだ。また、

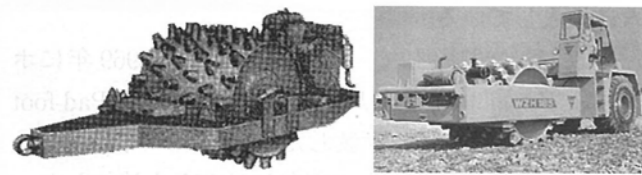


写真-35 Dynapac CF-30

写真-36 ABG WZH185



写真-37 Hyster CA450A

写真-38 IR SPF-56



写真-39 CAT CP563E

写真-40 Tamping Wheel

参考として写真-40のバックホウ用アタッチメントのタンピングホイールも付加えた。これはトレンチ等の転圧に使われる。

3. 我が国の近代化

(1) 戦前

我が国でも古代から石材ローラが一部で使われていたとか、幕末期の道路工事では使われたとの説もあるが、確たる証拠は見つからない。しかし、遅くとも明治7年の兵庫県生野町や銀座の舗装工事では手押し式が使われただろう。自走式は蒸気ローラを明治28年に輸入していて、国産化は大正期となる。

アースダム工事では、明治44年/1911に大野ダム工事(48万m³, 堤高37m)において、前述のグループドロウラーが導入され、蒸気式4台(10t, 6t, 4t)と電動ウィンチ牽引式6台(8t, 6t, 2.7t: 写真-41)による薄層締固めが行われ、初めて物理的・工学的な土質試験が行われた。昭和2~9年の東京市水道局山



写真-41 グループドロウラー

写真-42 粘土試験所

口貯水池(狭山湖)工事のアースダムでも、盛土材の物理的・力学的試験(写真-42)による管理が行われ、蒸気ローラが使われた。

土の締固めに対してロードローラは非力であったが、タイヤローラが昭和5年から我が国に導入され、土の締固めへの有効性も確かめられることになる。

そして、太平洋戦争が始まり、米軍の飛行場の急速施工能力に驚いた我が軍が、急速、ブルドーザ等を緊急開発して、機械化設営部隊を創設し、シープフートルローラ(棘付点圧機: 写真-43)も模倣作成して、施工に取入れた。

(2) 戦後

さて、戦後の昭和22年のカスリーン台風での利根川決壊復旧工事では、土工列車の盛土材を新鋭ブルドーザで敷均しているが、締固めは昔ながらの石蛸での突固め(写真-44の人の輪)である。石蛸も中国伝来のようで、昭和32年の中国視察時に蛸打ち(夯碓: 写真-45)が撮影されている。



写真-43 設営隊の棘付点圧機

写真-44 石蛸による突固め



写真-45 黄河での夯碓

写真-46 鹿島式

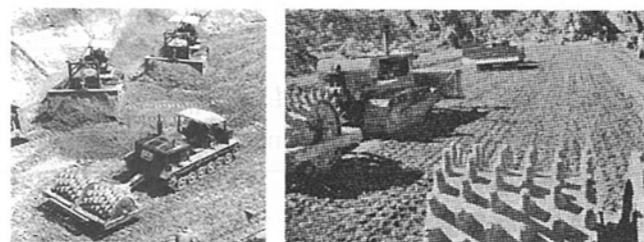


写真-47 山本調整池

写真-48 御母衣ダム

ローラの生産再開は、渡邊機械工業がBuffalo-Springfieldと昭和24年に提携し、同社型タンデムローラを生産した。シープフートルローラは、前述のように戦中から製作されていて、戦後はSouthwest社製等が輸入

されたが、我が国の高含水比粘性土では過剰こね返しの問題が発生した。そこで、鹿島製作所は(財)建設技術研究所の基礎研究と施工実績に基づいてタンピングフット形状を工夫したパッドフット型(写真-46)を早くから開発していて、昭和25年時点で12機種を揃えて受注生産としている。他に渡邊も先端角錐型テーパフットの単胴(~2.8t)と複胴型(~5.5t)を販売した。

昭和24年頃からは、発電・洪水調整・農業用等のダム建設が活発化した。写真-47の国鉄東京操機が機械施工で築造する信濃川発電所(山本調整池27~29年)のコア締固めでは、パッドフット型ローラが使われている。牽引トラクタは旧軍のロケ車がまだ使われている。

昭和31年になると「道路土工指針」が発刊され、道路公団は翌32年に土の締固め基準を作成し、名神高速道路を起工した。ダム工事では、初の大規模ロックフィルの御母衣ダム工事が昭和32~35年に行われ、コア締固めの20tシープフートルローラは、テーパフット型(写真-48)が使われている。

また、シープフートルローラによるこね返し対策として、山王海アースダムでウェブローラ(写真-49)が考案され、その報告が昭和26年に出ているが、各地で使われた記録も残っている。タンピングローラには新和機械工業も参入したが、写真-50は新和の自走式ウェブローラ(2.3t)である。タンピングローラは各種のフット形状が考案されたが、整理すると図-7のようになる。

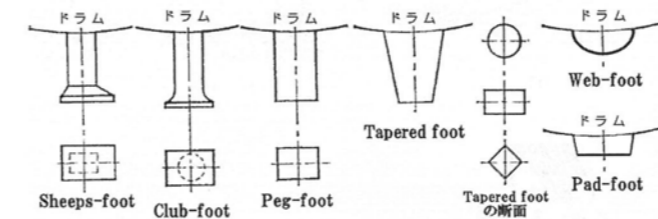


図-7 各種のタンピングフット形状

その他にメッシュローラも造られ、酒井製作所が牽引式(写真-51)を昭和33年に製作した。軟弱地や破碎転圧に効果を上げ、建設省に多数導入された。翌年からはマカダムローラをベースとした自走式MR8508(写真-52)も製造された。破碎効果の他に駆動系が強化され勾配に強いので、林野庁の林道工事に歓迎され、インドネシア等へも輸出された。

写真-53は、渡邊が昭和36年頃に試作したパッドフット型の4輪セグメントホイールコンパクト(10t)である。詳細は不明であるが、Buffaloのセグメント

ホイール(写真-12, 13)の様には隙間が空いていないみたいである。

初の自走式タンピングローラの導入記録としては、北海道開発局がショベルサプライ社のFerguson SP-22(22t: 写真-54)を昭和36年に輸入、翌年に尾白利加ダムに投入、開発局は38年にも追加輸入している。

酒井のタンピングローラ参入は昭和38年で、FT1(6~10t), FT11(3.3~5.4t)を投入している。同じ頃、新三菱重工は提携先の仏アルバレ社のターンフートルローラF12(写真-55, ポジション-3の写真と形状変化図は写真-7を参照)を製造販売するが、取扱の煩雑さが難点であった。更に小松、日立もタンピングローラ製造に参入した。

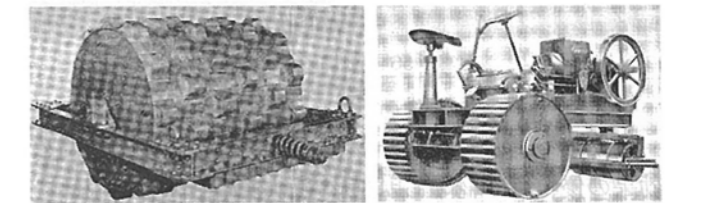


写真-49 鹿島式ウェブローラ

写真-50 新和ウェブローラ

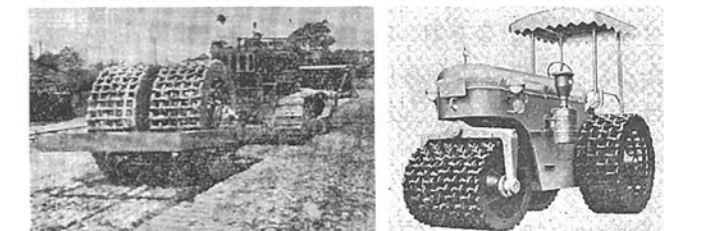


写真-51 牽引式メッシュローラ

写真-52 自走式MR8508

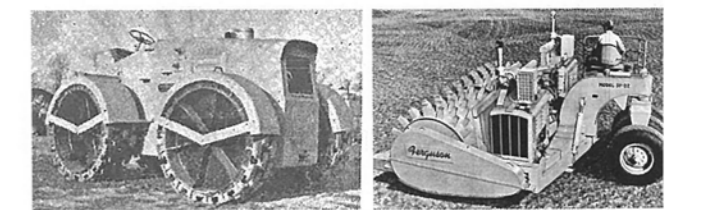
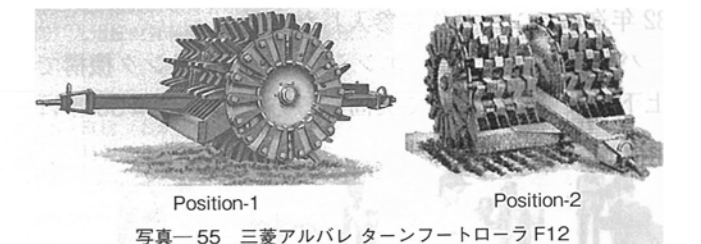


写真-53 渡邊セグメントホイール

写真-54 Ferguson SP-22



Position-1

Position-2

写真-55 三菱アルバレ ターンフートルローラF12

昭和45年になるとCATの自走式タンピングローラ825が輸入販売され、各地のフィルダムに導入され、コア締固めの花形となる。小松も同形式のWF22Aを

製造した。昭和49～55年の新秋田空港工事では、著者も試験盛土から参加したが、超高盛土にゾーン型盛土を初採用し、3台の自走式タンピングローラ825でシルト岩を破碎転圧して急速施工を行った。また、著者は海外のMS施工の高速道路工事に、その急速締固め能力を生かすべく、825と815の7台を投入して施工したことがある。写真—56は、寒河江ダム工事に投入された825である。



写真—56 寒河江ダムの825

自走式タンピングローラは、公的室内試験で締固め効果の優位性が認められている。また、高速締固めを意図したものであったが、国内では施工業者の思惑から、試験盛土で低速試験を余儀なくされ、施工でもそうした運用がなされ、高速施工能力を余り生かせなかった。そのためもあり、現在では振動型タンピングローラに覇を譲っている。

(3) ランマ

我が国におけるランマは、ガソリン機関の爆発を応用したジャンプランマが戦後導入された。昭和25年迄に、新和のエキスプロージョン(写真—57)と守住土木機械のジョンソンランマが販売され、胴突・蛸塙を機械化したとある。28年に明和製作所がジャンプランマMS-5型3機種(100～60kg:写真—58)で参入、田中土鉦機械も28年迄に加わり、その後、Delmagの模倣であろうか、田中式フログランマ(写真—59)も造っている。東京機械製造もTK10型で32年迄にランマ製作に参入した。

バイプロランマは、エンジン回転をクランク機構で上下往復運動に変えて突固める方式で、昭和36年に



写真—57

写真—58

写真—59

写真—60

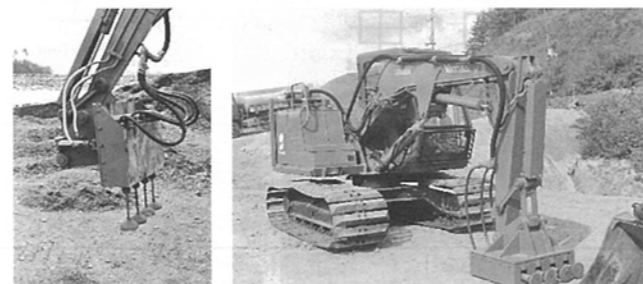
三笠産業がMTR-60(60kg:写真—60)を初国産。翌年に明和製作所もバイプロ型VRA-120,80,60(120～68kg)を開発。その後も駆動方式は2サイクル、4サイクル、電動、油圧、ディーゼル式と各種のものが開発された。協会では一時、ジャンプランマ(爆発ランマ)をランマ、バイプロランマをタンパと呼称して区別していたこともあったが、ジャンプランマは故障しがちで危険もあり、平成期には姿を消した。そのため、現在ではタンパ(バイプロランマ)をランマと称している。また、製造メーカーは大日本土鉦機械、大旭建機、ダイナパック建機、特殊電気工業、丸善工業、日本ワッカー、和光機械工業等も参入したが、現在残っているのは三笠、和光、酒井である。

さて、フィルダム岩着部のコンタクトクレイの締固めにプレートコンパクタやランマ、エアータンパが使われるが、岩着凹部では、岩着材の微妙な突固めに動力ランマではなく、杵が使われている(七ヶ宿ダム:写真—61)。そして、水平部の4層目以降は、ローラ転圧に切替わるが、アバット斜面部はエアータンパ突固めによる上昇が続く(写真—62)。そこで、このエアータンパの機械化を施工業者が図り、小型油圧ショベル用の4連タンパアタッチメント(写真—63)を自作して施工している。



写真—61 凹部の杵突き

写真—62 アバット部



写真—63 4連タンパ

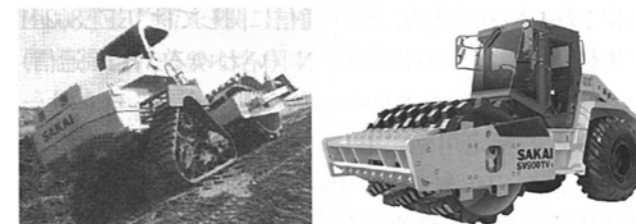
(4) 近年の動向

盛土の締固め管理では、平成10年に第二東名工事において厚層締固めが始まり、垂直振動(2軸偏心)式の起振力320kN級の大型振動ローラが活用された。また、10年代にGPSを利用した管理要領をNEXCO

や国交省が規定化して運用を始め、近年は情報化施工による締固め回数管理に加えて、加速度応答法を用いた管理規定が活用されている。そして、タンピングローラも振動型が一般的となった。斜面用にクローラ駆動型振動ローラも造られたが、写真—64はそのタンピングフット型である。そして、写真—65は酒井重工の垂直振動型タンピングローラSV900TVである。

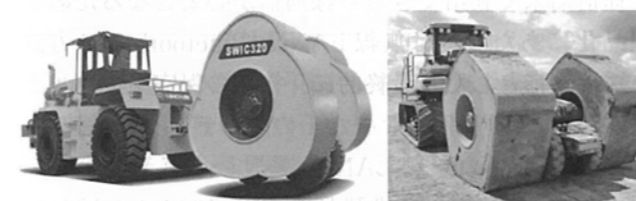
ところで、高エネルギー衝撃を利用した締固め法には、クレーンを利用して10～30mの高さから、10～20tの重錘を落下させる動圧密工法(DC工法)が埋立地では行われている。小松は落差2.8mで550kgハンマの移動式ドロップハンマAH05を造ったことがある。

ローラでは、高エネルギーインパクトローラとして、写真—66のような多角形(3～5角)の牽引式ローラが海外にあり、小型のものはボマークがポリゴンドラム(八角形振動ローラ:写真—67)を2003年に発表し、我が国にも輸入された。ボマークは4輪自走型タンピングローラでも多角形型(写真—34)を出していて、白川ダムで使われた。

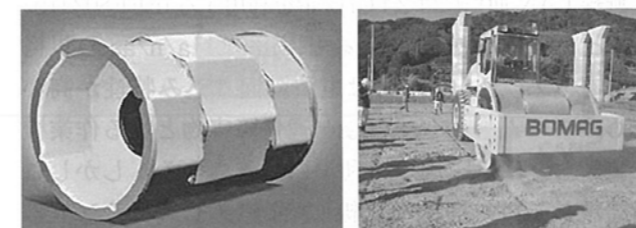


写真—64 法面用クローラ型

写真—65 酒井 SV900TV



写真—66 牽引式 Impact Roller



写真—67 BOMAG ポリゴンドラム

4. おわりに

締固め機械を調べ始めると、Earthmover関係の書籍には、地味なためか締固め機械に焦点を当てた写真や解説記事が殆どない。舗装用を主眼としたロードローラ史は国内外に散見できるが、土の締固めに関わるタンピング史の全体を俯瞰したものが見当たらなかった。施工関係の古書を捲り、写真等の断片を拾い集めると、初見の機械が多く出てきて驚くが、メーカーは殆ど消滅しており、詳細が不明で調査は難航した。しかし、不十分であるが、この方面のパイロット調査研究として取敢えずまとめたので、参考として頂ければ幸いである。不詳なところは課題として調査を継続させたい。

JJCMA

(参考文献)

- 1) 大野調整池工事報告, 久保茂, '15.4
- 2) 建設機械概要, 河野, 笠原, 芳野, '60.6
- 3) 施工用土木機械, 中岡二郎, '60.6
- 4) 土の締固め, 久野悟郎, '63.2
- 5) モータグレーダと締固め機械, JICMA, '69.8
- 6) 産業機械工業戦後20年史, 日本産業機械工業会, '68.11
- 7) フィルタイプダムの施工技术, ダム協会, '69.8
- 8) 寒河江ダム工事誌, 東北地建, '91.3
- 9) 七ヶ宿ダム工事誌, 東北地建, '92.3
- 10) ダムのはなし, 竹林征三, '96.2
- 11) 締固め機械, 酒井重工, '96.3
- 12) 機械化土工のあゆみ, 岡本, 土木施工, '09.8
- 13) 締固め・仕上げ, 岡本, 土木施工, '09.12
- 14) 地盤の突固め技法と地搦石伝承の史的的研究, 奥田他, '10.9
- 15) 我が国における締固め機械の変遷, JICMA, '11.9
- 16) 土の締固め, 地盤工学会, '12.4
- 17) 工事用の軽便軌条小史, 岡本 JICMA, '14.5
- 18) 土の史跡, 岡本, 建設機械施工, '15.8
- 19) 古代東アジアにおける各種盛土の構築方法と風土の関係, 鬼塚克忠, '16.
- 20) 建設の機械化, 各号, JICMA, '50～
- 21) 日本建設機械要覧, 各号, JICMA, '50～
- 22) Factors that influence field compaction of soils, AW Johnson, JR, Sallberg, 1960.
- 23) The History of Road Building Equipment, F Pierre, KHL, '98
- 24) RGLetourneau heavy equipment, EC, Orlemann, Ig, '09
- 25) 90th Anniversary of DELMAG '12.1
- 26) The First Embankment Compactor, T. Berry, '18.3
- 27) Origins of Mechanical compaction, UMR
- 28) 土工教室 /http://hw001.spaqs.ne.jp/geomover/
- 29) 大野市教育委員会所蔵
- 30) 九州歴史資料館(九州国立博物館ジオラマ)

[筆者紹介]

岡本 直樹(おかもと なおき)
建設機械史研究家
e-mail: gemvnyk@gmail.com