

呉工業高等専門学校

研 究 報 告

第29巻 第2号 (通巻第53号)

平成6年2月 (1994)

目 次

1. ウェールズの地名(2)	石 井 淳 二	1
2. 二円筒試験における超仕上面の摩擦特性.....	河 野 正 来 灘 野 宏 正	15
3. アルゴン陽光柱プラズマへの不純物の影響.....	山 崎 勉	21
4. 根系により補強されたまさ土のせん断特性の研究.....	小 堀 慈 久 八 木 則 男 榎 明 潔 矢田部 龍 一	31
5. 鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力解析.....	福 原 安 洋 斎 藤 透	47
6. 中国地方における建築用石材採石業について.....	福 原 安 洋 濱 本 昌 代 平 田 研 二	57

ウェールズの地名 (2)

(一般科目) 石 井 淳 二

Place-Names in Wales (2)

Junji ISHII

In *Place-Names in Wales (1)* I dealt mainly with the typical prefixes and suffixes which are used as the constituent elements of the place-names in Wales.

Here in this part I would like to deal exclusively with the place-names in Anglesey, or *Môn*.

§ 1. はじめに

Samuel Johnson (1709–84) は, Thrale 夫妻とウェールズを訪れたことがある。その時の旅行日記が, *A Diary of a Journey into North Wales, in the year 1774* (1816) である。この中では自然から受ける深い印象が記されている。しかし, 筆者にとって特に興味深いのは, ウェールズ語に関して彼が次のように述べていることである。

After dinner, the talk was of preserving the Welsh language. I offered them a scheme...

I recommended the republication of David ap Rhy's Welsh grammar...the sound of Welsh, in a continued discourse, is not unpleasant.

『ウェールズの地名(1)』では, 主として, 地名構成要素としての接頭辞と接尾辞を取り扱った。今回は, アングルシー島 (Anglesey) の地名について述べることにする。図 2 を参照。

§ 2. アングルシー島について

アングルシー島は, ウェールズ語で *Ynys Môn*, または *Ynys Fôn* と言い, 「モーナ島」の意。*Môn* についてはさまざまな説がある。Philotechnus は, この語がギリシャ語の *monos* 「一人で」に, つまりこの島が海によって北ウェールズの他の諸州から分離されていることに由来する, と述べている。Owen Pughe はこの説を支持して, 「*Môn* は孤立したもの, 分離したもの」と言っている。Henry Rowlands は, この語の起源を *bôn* 「幹, 基礎, 土台」に跡付けている。*Monau* (Enotodin) の起源をこの島がウェールズの先端に位置していることに, 或いはこの島が “*Môn, mam Cymru*” (Mona「ウェールズの母」) と呼ばれることに跡付けているのと同様である。南スコットランドの *Monau Guotodin* は, *Môn* という語のもう一つ別の適用を例示している。

モーナ島 (the Isle of Mona) とマン島 (the Isle of Man) の名称の起源は, きっと *mon* 「孤立, 分離しているもの」に由来しているであろう。英語名 Anglesey は, *Llanvaes* の戦いの後に付けられたが, この戦いで Egbert は, *Merddyn* に対して勝利を収めた。彼は 818 年か 819 年に Mona を征服して, これを Anglesey, 即ち “the Isle of the Angles” と称した。末尾音節の *ey* は, 「島」を意味する古期スカンディナヴィア語である。もう一つの説は, 古期スカンディナヴィア語の *Angul's ey* (the isle of the strait 「海峡の島」) に由来する, としている。

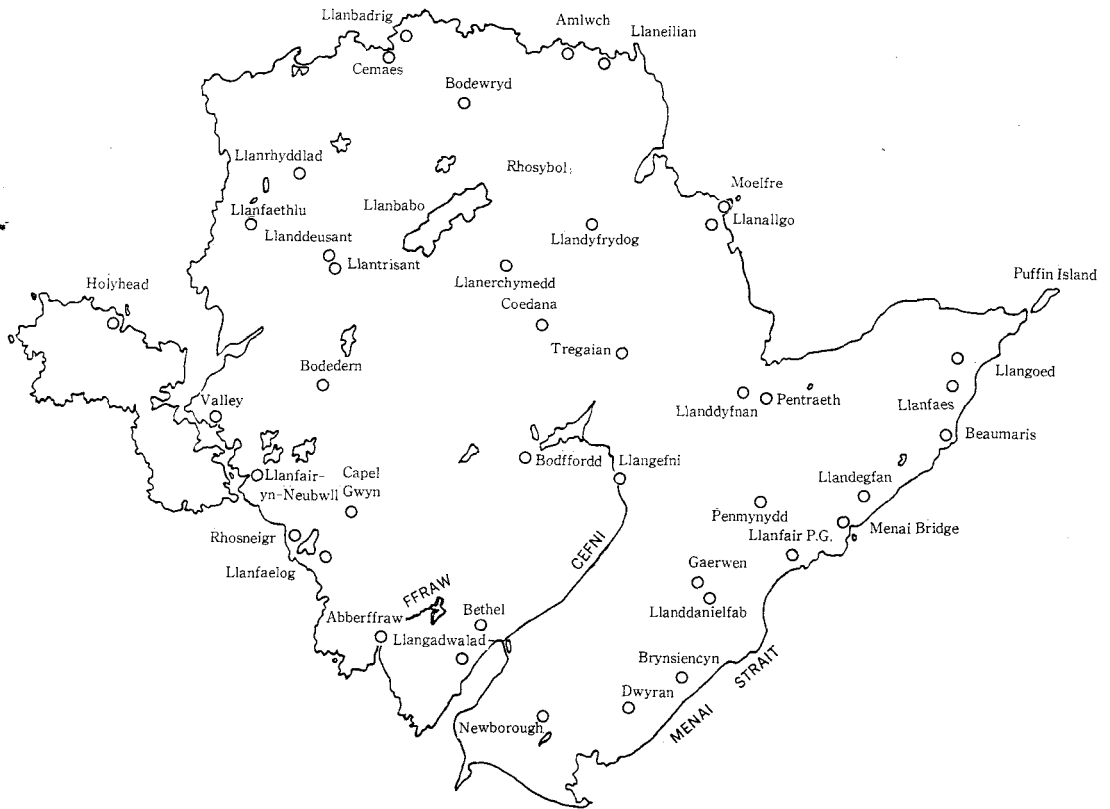


図2 ANGLESEY

§ 3. アングルシー島の地名

ABERFFRAW

この海港の村は、*Ffraw* 川の河口に位置している。その地名は、*aber*「河口，入り江」+ *ffraw*「波立たせること，活動，迅速」に由来する。*Effraw* は、「目がさめて，油断のない」の意味。古代ローマ人は，この地を *Gadavia* と呼んだ。*Gada* は「流れ下る，または走り下る」，*via* は「道」の意味。従って，「速い，または流れる水」を表す。この村は，かつて，ウェールズの三つの王宮のうちの一つと主要な裁判所の所在地であった。

AMLWCH

この地名は，種々の推測を生んだ。例えば，これは *ami-llwch* という合成語で，「埃っぽい場所」を表す，とする説がある。*Llwch* は「埃」の意。また，*am*「～の回りに」+ *llwch*「湖，入江」で，「円形の入江」を表すとする説もある。因みに，*llwch* はスコットランド語の *loch* と同語源語である。ウェールズの多くの地名が，この語を含んでいる。例えば，*Penllwch*，*Talyllychau*，*Llanllwch*，そして多分 *Amlwch* も。1451年頃に書かれたと思われる『カナーフの記録』(*The Record of Carnarvon*) という古い本の中で，この地名は *Amlogh* と綴られている。*Amlwch* の港は，一種の *llwch* である。

BEAUMARIS

種々の地名が、この町に対しては与えられている。例えば, Bumaris, Bimaris, Beumarish, Bello-Mariseum, そして Beaumaris など。ウェールズの教区に関する Myvyrian の一覧表の中では、これは Bywmares と綴られている。Edmunds の説によれば、これは *buw* 「雌牛」 + *mor* 「海」 + *is* 「低い」 に由来し、「雌牛がいる海辺の低地」の意。また、この地名は *bis* 「二度、二倍に」 + *maris* 「海」の合成語である、とする説がある。その理由は、この町の位置が二つの海、即ちアイルランド海 (the Irish Sea) とセントジョージズ海峡 (St. George's Channel) との間にあることに基づいている。更に、この語根は *beau* 「美しい、綺麗な」 + *maree* 「海」から成り、「美しい海に近い場所」の意味を表す、とする説もある。上述の地名の多くは、接尾辞としてフランス語の *marais* を含んでいるが、これは「沼沢地 (marsh), 時折冠水する低地」の意。従って、全体で「美しい沼沢地」を表す。この町は、昔、Porth Wygyr と呼ばれていた。Porth は「港 (port)」の意。Wygyr は、*Wig-ir* が転訛したものであろう。*Gwig* 「森林中の空地、森」 + *ir* 「新鮮な、華麗な、緑色の」で、「青葉の茂った森」を表す。*Pren ir* は「青葉の茂った木」。Beaumaris という新しい地名は、Edward I (1239–1307) によってこの町に付けられた、と言われている。彼は1285年頃ボウマリス城 (Beaumaris Castle) を築き、地名を Beaumaris に変更した。それは、この町が低地の良い場所にある、ということを説明している。

BELAN

Paulinus の息子である Beulan に献納された教会 *Llanbeulan* の省略形。

BETHEL

この村にある非国教徒 (Nonconformist) の教会堂の名に因む。英国国教会 (the Established Church) の建物は、一般に、著名なウェールズの聖人に献納されている。しかし、非国教徒の聖所は、通例、聖書に出てくる地名に因んで命名されている。

(参考) And he called the name of that place Beth-el: but the name of that city *was called* Lüz at the first. (*Gen*, 28:19)

(そして、ヤコブはその所の名をベテルと名づけた。その町の名は、初めは、ルズとあった。)

BODEDERN

Bod 「住所、住居」 + *Edern*, または *Edeyrn* (*Beli* の息子 *Nudd* の息子)。彼は戦士であり、詩人でもあった。晩年を宗教に捧げ、この土地に教会を建てた。そして、その教会が彼に献納されたため、この名称がある。

BODEWRYD

この町は Amlwch の約 4 マイル西方に位置している。*Bod* + *ewryd* (恐らく *ewiar* 「静かな、澄み切った」の短縮形 + *rhyd* 「浅瀬」) の合成語。従って、「水の澄んだ浅瀬の側にある大邸宅」を表す。

BODFFORDD

Bod + *ffordd* 「道、道路」。従って、この名称は「道端の住宅」を表す。

BODOWEYR

聖職者たちの住宅。Tre'r Dryw 「ドゥルーイド祭司長の邸宅」の近くにある小村落。

BODWROG

Bod + Twrog (教会が献納されているブルターニュの *Ithel Wael* の息子であると思われる。) この地名は「防備を固めた邸宅」の意。

BRYNSIENCYN

Bryn 「丘」+ *Siencyn* (Jenkin のウェールズ語化された形で、「小さくて、可愛らしい John」の意)。

CAERCEILIOG

この名称を持つ農場に由来する。正しくは *Caergeilyg* (*Caer* 「防壁」+ *Geilyg* 「はっきり見える, 目立つ」) である, という説もある。更に, この地名は *Cae'r ceiliog* 「雄鶏の畑」が少し転訛したものである, という説もある。それは, この農場所所有の或る畑がかつて闘鶏で有名だった, という言い伝えによる。

CAPEL GWYN

Capel 「教会堂」。 *Gwyn* は, 恐らく, *Pawl* の息子 *Gwynngenau* の短縮形であろう。或いは, この *gwyn* は教会に関する意味を持っていて, 「神聖な, 幸いな」の意を表すとも考えられる。因みに, “Gwyn ei fyd y gwr” は, 「その男は幸いである」の意。

CAPEL MEUGAN

Meugan は, *Emyr Llydaw* の息子 *Gwyndaf Hen* の息子。 *Meugan* は古くから用いられている人名で, アイルランド語起源かもしれない。 *Fegan* を参照。

CELRCHIOG

この地名は, 「オート麦 (oats) が豊富にあって」の意。因みに, *ceirch* は oats の意。また, *-iog* は形容詞語尾の一つで, 「～に満ちた, ～の多い」の意を表す。この地方の土壌は, オート麦を豊富に産することによって有名である。

CEMAES

この地方は, ウェールズではありふれたものである。 *Cefn* 「山の背, 尾根」+ *maes* 「野原」の合成語で, 「高地の野原」の意。この地方の土壌が肥沃であることから, 「畝を立てた, または耕作に適した土地」を表す, とする説もある。また, *camp* 「手柄, 試合」+ *maes* の合成語であるとも考えられる。しかし, この語は軍事的な意味で解釈されるべきだと思われる。つまり, 「軍事行動や戦争のための有利な地点を形成している高台の野原, 地域」を表す。この地名は, Cadwaladr の時代からウェールズの独立に終止符が打たれた Llewelyn の没落に至るまでの, 守勢に立たされたウェールズ人の戦いの様子を示している。

CERRYG CEINWEN

Cerryg は「石」の意。 *Ceinwen* は, 教会が献納されている Brychan Brycheiniog の娘。

CERRYG Y GWYDDYL

Gwyddyl は「アイルランド人」の意。*Caswallon Law-Hir* (Long Hand) は、500年頃、北ウェールズでアイルランドからの侵略者と勇敢に戦った。彼はアングルシー島の或る場所で見事な勝利を得た後、その地に教会を建て、それを *Llan y Gwyddyl* と呼んだ。しかし、それは現在 *Cerrg y Gwyddyl* という地名で知られている。

CLEGYROG

語根は多分 *clegr* 「岩、崖」であろう。*Clegyrog* は、「岩の多い、凸凹の」の意。この地名は、この地域に岩が多いことをよく説明している。

COEDANA

Coed 「森、樹木」 + *Ana* 「アン (Anne)」。 *Ana* は、ここの教区教会が献納されているウェールズの婦人であると思われる。因みに、*Anne* または *Ann* は *Hannah* の短縮形である。

DWYRAN

Dwy 「二つの」 + *ran* 「一部、部分」。プリンス・オブ・ウェールズの *Idwal* は、この村を二つに分割し、一方を *St. Beuno* へ、そして他方をバンゴー (*Bangor*) の司教へ与えた。そこで、*Dwyran Beuno* と *Dwyran Esgob* という名前が生じた。この土地は、また、*Aberbraint* と呼ばれている。

GAERWEN

語根は *gwar* (*gwareddawg*) 「柔順な、優しい、おとなしい」であると思われる。正しくは *Gwaeredog* 「保護されている、或いは救われているもの」である、という説もある。これは、恐らく、*gwaered* 「下り坂」に由来しているのであろう。ここでは後者の説を採用することにする。従って、正しい語は、*Gwaeredog* 「高台の麓にある平地、または窪地」である。この語は、アングルシー島にある幾つかの農場の名前に用いられている。例えば、*Gwaeredog*, *Amlwch*, *Llanerchymedd* の近くにある *Gwaeredog Uchaf* と *Gwaeredog Isaf* など。

GWYNDY

Gwyn 「白い、神聖な、祝福を受けた」 + *dy = ty* 「家」。従って、「祝福された家」を表す。この語は、かつて、司教の邸宅を表すために用いられた。*Gwyndai* (司教の邸宅) は、聖ジャーメイナス (*St. Germanus*) の時代に、まず司教へ割り当てられた。大勢の処女たちが、かつて、礼拝に専心した場所には修道院があった、と考えられた。

HOLYHEAD

ウェールズ語では *Caergybi* と言う。或いは *Côr Cybi* であるとする説もある。*Cybi* はコーンウォール王の息子で、4世紀後半頃(6世紀中頃とする説もある)の人だった。彼は *Hilary* 司教と共にしばらくガリア (*Gaul*) で過ごした後、帰国してここに住居を定めた。言い伝えによると、アングルシー島の王子は、貧苦の中にある彼に同情を寄せて、ここにある城を一つ彼に与えた。その中に *Cybi* は小さな修道院を設立したので、その城は *Côr Cybi* 「*Cybi* の聖歌隊」と呼ばれた。*T. Pennant* (1726-98) によれば、正しくは *Caergybi* である。これは上述した城に由来していて、その廃墟は現在も認められる。*Cybi* は、また、この町の近くにあるローマの灯台と関係が

あるため、忘れ難い聖人である。教区教会の北端に、次のような碑文が見られる。*Sancte Kybi, ora pro nobis.* (おお! 聖 Cybi 様。私たちのために祈って下さい。)

Holyhead の起源に関しては意見が異なる。この土地には、大きくて立派な教会が沢山あったからそう名付けられた、という説がある。イングランド人が、決して忘れることのできない Saint Kybi の信仰生活の故に、この土地に“Holyhead”という名称を与えたのだ、という説もある。更に、正しい語は、*Pencelyn* を、もっと正確に言えば *Pen Cyhelyn* を翻訳した *Hollyhead* である、とする説もある。*Pen* は「頭」の意。そして、*Cyhelyn* は holly-wood、つまり「西洋柞の森」を意味する *Celyn* に短縮された。因って *Hollyhead* の地名が生じ、その後 *Holyhead* となった。

LLANALLGO

教会が Caw Cawlyd の息子 *Gallgo* に献納され、7 世紀に建立された。この近くで国王の特許状 (the Royal Charter) が紛失した。それは 1859 年 10 月 26 日のことであるが、400 を超える生命が失われた。教区では、また、巨大な *cromlech* 「環状列石」が見られる。

LLANBABO

Pabo Post Prydain は有名な戦士であったが、晩年になって信仰に専心した。彼が建てた *Llanbabo* 教会には、今でも石碑が残っていて、彼の肖像と “*Hic jacet Pabo Post Prud Corpors-te-Prima.*” という碑文が見られる。

LLANBADRIG

Iolo の原稿は、*Padrig* が 7 世紀の聖人で、Elford と同時代の人であり、Kybi 神学校の仲間であったことを知らせてくれる。彼は上述の教会を建てたが、それには今でも彼の名前が付いている。これは St. Patrick、即ちアイルランドの偉大な使徒である。因みに、Patrick という名前は、「元老院議員、貴族」の意味。

LLANDEGEAN

Tydecha と彼の妹の *Tegfedd* によって教会が建てられ、それが 6 世紀に後者に対して献納された、という説がある。しかし、*Tegfan* (Elian の叔父、そして Kybi 神学校の聖人であり、かつ聴罪師でもあった) が、彼の名前を教会に付けたのだとする説の方が説得力がある。*Tegfan* は、「美景、絶景」の意味であろう。

LLANDYSSILIO

この教会は *Tyssilio* に献納されている。彼は 6 世紀 (または 7 世紀) の名高い聖人である。

LLAN DDANIEL FAB

Mr. Rowlands によれば、Daniel は Llan Aiden 教会の近くにある教会を持っていた。彼は最初のバンゴー司教 Daniel の息子であった。従って、その教会は一般に *Llan Ddaniel Fab* と呼ばれている。因みに、「息子」はウェールズ語で *Mab* と言うが、ここでは mutation のため *Fab* と変化している。

LLANDDEUSANT

この教会は *dau sant* 「二人の聖人」、即ち *Marcellus* と *Marcellinus* に献納されている。

LLANDDWYN

この教会は *Brychan* の娘, *St. Deuwen* (または *Dwynwen*) に献納されている。彼はイギリスの初期のキリスト教徒の一人である。この教区は、ヘンリー 8 世の代には、バンゴー大聖堂参事会の聖職禄を生むもっとも富裕な地域の一つであった。一般人は、迷信深くも、当地の十字架、聖遺物、神聖な泉、厳しい試練、そして魚占いに参詣した。

LLANDDYFNAN

この教会は、5 世紀に、*Brychan* の息子 *Dyfnan* に献納された。彼はブリトン族をキリスト教に帰依させるため、180年にローマから当地へやって来た、と記録されている。*Dyfnan* は、「深い小川」の意味であろう。

LLANDYFRYDOG

Arwystl Gloff の息子 *Trifrydog* は、*Enlli* 神学校の一員であり、この教会の創建者でもあった。教会は 6 世紀に彼に対して献納されている。*Dyfrydog* は、「考え込んでいる、物思いに耽る、悲しい」の意。

LLANEDWEN

この教会は、*Edwin* 王の姪か娘で、6 または 7 世紀のサクソンの聖女であった *Edwen* によって建立された、と考えられている。*Edwen* は、恐らく *Edwin* の女性形であろう。

LLANEILIAN

Gellan Ruddawg の息子で巡礼者の *Eilian Geimiad* は、初期の聖人である。彼は *St. Kybi* と同時代の人であったかもしれない。ウェールズには、彼の名前を付けた教会が多少ある。*Caswallon Law Hir* は、この土地の近くに彼の宮廷を所有していた。

LLANERCHYMEDD

この町は、昔、*Clochran* (*cloch* 「鐘」 + *ran* 「一部、部分」) と呼ばれた。この教会の尖塔は、たとえ四つでなくとも、三つの教区が隣接する部分に立っていたと思われる。因って、この地名が生じた。現在の地名の起源に関しては、種々の憶説が出されている。或る言い伝えによると、*Tegerin* という名の男が、今この古い教会のある地点に一家の墓を作る準備をしていた。彼が地下納骨堂を作っていた時、誰かが彼に尋ねた。「君はここに何を建てるのですか」と。彼の返答は “*Llanerch fy medd*”, 即ち「私の墓所です」であった。

この名前は、*Tafarn y medd* 「蜂蜜酒の居酒屋」に由来する、とする説もある。*Medd* は *mead*, 即ち蜂蜜と水で作られたアルコール入りの飲み物である。この昔の飲み物が、恐らく上述の居酒屋で作られ、飲まれたのであろう。因って、この地名がある。

LLANEUGRAD

この教会は *Caw Cawlwyd* の息子で、*Illtyd* の神学校の一員であり、6 世紀の聖人であった *Eugrad* に献納された。ここでは、873年に、*Rhodri Mawr* とデイン族との間で大激戦が交えられた。退却したのは後者である。

LLANFACHRETH

この教会は、*St. Machraith* に献納された。彼は7世紀の人で、*Merioneth* と *Anglesey* に教会を建立した。

LLANFAELOG

この教会は、7世紀頃、*Caw Cawlwyd* の息子 *Maelog* に献納された。すぐ近くに "*Llyn Mae-log*" (*Maelog* の pool の意) と呼ばれる湖がある。

LLANFAES

Maes は「野原」の意。*Egbert* とウェールズ人の間で、819年に、忘れ難い戦いが交えられた。この名前は、その地点に建てられた教会を示している。名声不朽の人 *John Elias o Fon* の遺体は、1841年6月ここに埋葬された。

LLANFAETHLU

この教会は、6世紀に、*Caradog Freichfras* の息子 *Maethlu* に献納された。*Maethlu*, または *Maethle* は、「保育所」の意。

LLANFAIR—MATHAFARN—EITHAF

まず、ここと隣の二つの教区の名前を比較して、それらの意味を明らかにしたい。隣接する教区の *Llanbedr-goch*, または *Llanbedr-Mathafarn-Gwion-Goch* は、*Llanbedr* 「聖ピーターに献納された教会」と呼ばれる。*Mathafarn* は、「居酒屋の場所〔男〕」の意。*Gwin Goch* は、その居酒屋の所有者の名前である。

次に、*Llanfair* は、「聖メアリー教会」を表す。*Mathafarn* は「居酒屋」。*Eithaf* は、「一番端の、最も遠い」の意。接尾辞の *eithaf* は、この居酒屋を他の居酒屋と区別するために加えられている。この教区は、ウェールズの最も偉大な詩人の一人、*Goronwy Owen* の生まれ故郷として有名である。

LLANFAIR—PWLL—GWYNGYLL

Llanfair 「聖メアリー教会」、*pwll* 「水溜まり」、*gwyn* 「白い」、*cyll* 「はしばみの森」。メナイ海峡の *Ceris Pool* は、この場所に隣接している。海峡の両岸は、かつて、白いはしばみの森で覆われていた。この地名は、省略しないで、LLANFAIRPWLLGWYNGYLLGOGERYCHWYRNDROBWLTYSILOGOGOGOCH (56字) として与えられることがある。その長さで有名な興味ある地名と言えるだろう。鉄道駅は *Llanfair P.G.* と呼ばれるが、今は無人駅である。因みに、J.C. Wells は、LLANFALRPWLLGWYNGYLLTOGERYCHWYRNDROBWLLELANDYSILOGOGOGOCH (58字) の語形を紹介している。これは、例えば、
 “The church of St. Mary in a hollow of white hazel near the rapid whirlpool and the church of St. Tysilio near a red cave. 「速い渦巻き近くの、白いはしばみの窪地にある聖メアリー教会と、赤い洞穴の近くにある聖ティシロ教会」と訳出できる。因みに、*trobwll* 「渦巻き」、*chwyrn* 「速い」、*ger* 「～の近くに」、*o* 「～の」、*ogof* 「洞穴」、*coch* 「赤い」。

LLANFAIR—YN—NGHORNWY

Llanfair は、「聖メアリーに献納された教会」。*Yn* は定冠詞。*Corn-wy* は「海に突き出ている陸地」を表し、教区のこの地域をよく説明している。

LLANFAIR—YN—NEUBWLL

Yn 「～の中に」, *neubwll daw bwl* 「二つの小池」。これらの小池を聖メアリー教会から見ることができる。

LLANFECHELL

Echwydd の息子 *Mechell*, または *Mechyll* はウェールズ人司教である。教会が彼に献納されたのは7世紀。彼は *Penrhos Llugwy* に埋葬された。Henry Rowlands は、彼の *Mona Antiqua Restaurata* (1723) の中で、「*Mechell* の名前を刻んだ古い石が、ここで18世紀に発見された」と言っている。

LLANFIHANGEL DIN SYLWY

Llanfihangel は、「聖マイケル教会」の意。因みに、「マイケル」は、ウェールズ語で *Mihangel* と言う。*Din Sylwy* は *Dinas Sylwi* 「見渡している都市」の短縮形である、という説がある。また、この語源は *Din Sol* 「太陽の都市」にまで溯る、とする説もある。
ここにはブリトン族の古い砦があったが、ローマ軍によってアングルシー島鎮圧の間に占拠された、と一般に信じられている。この地名の由来について、筆者は次のような説を述べている。即ち、*din* は「丘」、*syl-syllu* は「見つめる」の意。従って、全体で「川か水面を見下ろしている丘の上の教会」の意味を表す。

LLANFIHANGEL TRE'R BEIRDD

Tre'r Beirdd は、「ケルト族の楽人たちの住所」の意。遠い昔、この地にドルーイド教の礼拝所と楽人のための学校があった。因って、その事実がこの村と教区の名前が由来している、と考えられる。

LLANGADWALADR

この教会は *Cadwaladr* によって建立され、アングルシー島の聖所の一つにされた、と言われている。彼はブリトン族の最後の王、*Cadwallon ap Cadfan* の息子である。

LLANFEFNI

この名前は、村を貫流している *Cefni* 河畔にある教会を表す。

LLANGOED

Coed は「森」の意。従って、「森の中にある教会」を表す。周囲に森林が多いため、このように呼ばれた。この教会は、6世紀に、*Cawrdaf* に献納されたので、教区を *Llangawrdaf* と呼ぶことがある。

LLANGLISTIOLUS

Cristiolus は7世紀の人で、彼の名前を記念する教会を建てた。彼は6世紀にウェールズへやって来たブルターニュ (Breton) の聖人、*Emyr Llydaw* の子孫である。*Emyr* は *Ynyr* の異形。

LLANLESTYN

この教会の守護聖人は聖イエスティン (St. *Iestyn*) である。彼はアーサー王の騎士の一人、*Ge-*

raint の息子。

LLANRHYDDLAD

アイルランドの Leinster 王の娘 *Rhuddlad* は、7 世紀の聖女である。彼女はこの教会の創建者である、と思われている。この地名の正しい表記は *Rhyddlad* である、という説もある。*Rhydd* は「自由な、束縛のない」、*lad* は *gwlad* 「国」の意。しかし、接頭辞は恐らく *rhudd* 「赤い」であろう。従って、この地名は「赤い土、または国土」を表す。

LLANTRISANT

この教会は *tri sant* 「三人の聖人」、即ち *Afren*, *Ieucan*, そして *Savan* に献納されている。彼らはこの教会を570年に建てた、と考えられている。

Hugh Williams 師を偲ぶ記念碑が、ここに見られる。彼は Sir Wm. Williams の父で、1687年に下院議長と法務次官を務めた。

LLECHYSCHEID

この教会は *Ilched*, または *Ylched* に献納されている、という説がある。この地名は、恐らく、*llech* 「平たい石」+ *cylched* 「周辺、円周、囲むもの」の合成語であろう。ドゥルーイド教の環状列石と関係があるかもしれない。因みに、*cylchedu* は、「取り囲む、円で囲む」の意。

MALLDRAETH

Mall は「水に漬かった」、*traeth* は「浜、湿地」の意。ここは *Cors Ddygai* と呼ばれることもある。この村落は多くの教区を含んでいて、Aberffraw 近くの海から *Traethcoch* 辺りまで広がっている。

MENAI BRIDGE

ウェールズ名は、*Porthaethwy* で、その由来に関しては種々の説がある。P.B.Williams 師は、「この渡船場は、恐らく *Tindaethwy* という村落の名前を取ったのでであろう」と言っている。*Iago Emlyn* は、*aethwy* の由来について、*aeth* は「恐ろしい、怖い」、*wy-gwy* は「水」の意である、と説明している。彼の説は、この海峡を渡るのが大変危険であることに基づいている。また、*Porth-y-caeth-wy* 「狭い水路の港」である、という説もある。

Menai は *Main-aw*, 或いは *Main-wy* に由来し、「幅の狭い水路、海」の意。

MOELFRE

ウェールズの極めて一般的な地名である。これは、*Moel* 「露出した、禿げた」+ *bre* 「丘、山」の合成語。この語は、普通、「樹木は生えていないが、ヒースが散在することもある、短い、すべすべした草に覆われている丘」を表すのに用いられる。

MYNDD PARYS

Mynydd は「山」の意。*Parys* は、ヘンリー四世の代に、北ウェールズの式武官であった Robert Parys に由来している、と考えられる。この小山は、銅鉱石で有名である。

NEBO

この村の名前は、ここにある非国教徒の教会名に由来している。

NIWBWRCH, または NEWBOROUGH

昔の地名は、聖メアリー教会に献納された或る小さな教会に由来する *Rhosfair* であった、という説がある。Rowlands は、*Rhos Hic* 「草の生えている細長い低地」である、と考えている。それは、ここが東側の広大な湿地帯に位置していることによる。この場所は、かつて、アングルシー島の首都であった。また、北ウェールズの王たちの住所でもあった。エドワード一世がここを自由な自治体としたことにより、Newborough という新しい地名が生まれた。*Niwburch* は、恐らく、Newborough のより古い発音を表しているであろう。

PENCARNEDDI

Pen 「頭、頂上、端」 + *carneddi* の合成語。後者は、*carnedd* 「ケルン、即ち墓標としてピラミッド形に積み上げた石塚」の複数形である。*Carneddau* は、古代ブリトン族が彼らの英雄たちに敬意を表して築いたもので、よく知られた記念物であった。

PENMYNDD

この地名は「山の頂上」を表し、同名の大邸宅に対する敬意から、この村に付けられた。その大邸宅は、Owain Tudor が1384年に生まれた所として有名である。

PENSARN

Pen + *Sarn* 「ローマ軍が英国占領中に築いた舗道、人道」の合成語。ウェールズの地勢図によく出ている地名である。

PENTRAETH

Traeth は「海浜、海辺」の意。この教区は、*Llanfair-Bettws-Geraint* と呼ばれる。教会はコンスタンチヌス大帝の孫息子 *Ceraint*、即ち Gerimius によって建てられた、と推定される。そして、聖メアリーに献納されたのは、6世紀頃であった。この村が *Pentraeth* と呼ばれるのは、*Traethcoch* 「赤い海岸の湾」と称する砂浜の上手の端に位置しているからである。

PONTRIPONT

これは *Pontrhyd-y-bont* の転訛であろう。昔の地名は *Rhydpont*、または *Rhyd-y-bont* 「橋の架かっている浅瀬」であった。接頭辞の *pont* 「橋」は、もう一つの別の橋が *Rhydybont* に架けられた時に加えられた、と考えられる。

PHOSBEIRIO

Rhos 「荒れ野、乾燥した草地」 + *Peirio* の合成語。*Peirio* は、*Twrcelyn* の *Caw* の息子の名前、で、「原因となるもの、生じさせること」の意。この教会は、彼に対して献納されている。

RHOSCOLYN

Rhos + *colyn* の合成語。*Colyn* は、恐らく *colofn* 「柱、円柱」と類縁であろう。ローマ軍は、彼らのアングルシー島征服を永遠に記念するため、この地に円柱を立てた、と言われている。この教区は、昔、*Llanwenfaen* と呼ばれた。それは *Pawl Hen* の娘で、ここに教会を建てたと考

えられている *Gwenfaen* に対する敬意によるものであった。

RHOSNEIGR

Rhos + neigr の合成語。後者は、一般に, *niger* (土の黒い色合いと、泥炭の多い特質を暗にさして、「黒い」の意) の転訛である、と考えられている。

RHOSYBOL

Bol は語源上の謎である。*Paul-Paulinus* の短縮形であるように見える。Edward Llwyd は、*Pant-y-Polion* と呼ばれる場所に言及しているが、彼はその付近で *Paulinus* という名前の碑名を発見した。Suetonius Paulinus は、かつて、*Talybolion* に住居を定めたと思われる。筆者は、*bol* が *moel* 「草木の生えていない、円錐形の丘」の転訛した語である、と考えている。*Moel Don* は、現在では普通 *Bol y Don* と呼ばれる。*Talybolion* は、かつて、*Talymoelion* と呼ばれたと思われる。従って、この地名は、「円錐形の丘に近い荒れ野」の意味を表す。

TRAETHCOCH

Traeth 「海辺、砂浜」 + *coch* の合成語。後者は *Gwion Goch* に由来している、と推定される。

TREGALAN

Caian は6世紀中頃の聖人で、*Tregaian* 教会を創建した。

TRE-WALCHMAI

Tre は「住所」の意。*Gwalchmai* は、*Meilir* の息子である。この地名は12世紀頃に付けられた。*Gwalchmai* は、「戦の勇士」を暗示する。因みに、*gwalch* は「鷹」、*mai* 「戦場、野原」の意。

VALLEY

これはウェールズ語の *mael-by*, または *mael-le* 「商会、商社」を著しく削除したものである。ローマの歴史家タキトゥス (Tacitus) は、大規模な貿易が、*Julius Agricola* の時代に、この地域とアイルランドの間で行われた、と伝えている。ここから余り遠くない所に “*Ty Milo*” と呼ばれる家屋敷があるが、これは明らかに “*Ty Maelu* 「商会」” の転訛である。

YNYS BRONWEN

Llyr の娘 *Bronwen* がこの地に埋葬された、と “*Mabinogin*” の中に記されている。“*Bedd petryal a wnaed i Vronwen, verch Llyr, ar lan afon Alaw*”, すなわち “A square grave was made for Bronwen, the daughter of Llyr, on the bank of the river Alaw” の意 (*Cambro-Briton*, vol. ii, p.71)。*Ynys* は「島」の意。

YNYS SEIRIOL

これは *Puffin Island* とも呼ばれる。この島は縦が約1マイル、横が半マイルである。*Owen Danwyn* の息子 *Seiriol* は、ここに自分の庵を建てた。それは6世紀のことである。

(未完)

〈参考文献〉

- 1) Gruffud, H. 1980. *Welsh Names for Children*. Y Lolfa.
- 2) Jones, G. T. 1989. *The Rivers of Anglesey*. Research Centre Wales. The University College of North Wales, Bangor.
- 3) Jones, H. C. 1976. *Place Names in Glamorgan*. The Starling Press Ltd.
- 4) Morgan, T. 1912. *The Place-Names of Wales*. Second and Revised Edition, Newport.
- 5) Morgan, T. J. and Morgan, P. 1985. *Welsh Surnames*. The University of Wales Press, Cardiff.
- 6) Room, A. 1983. *A Concise Dictionary of Modern Place-Names in Great Britain and Ireland*. OUP.
- 7) Stephens, M. (com. and ed.) 1986. *The Oxford Companion to the Literature of Wales*. OUP.
- 8) Wells, J.C. 1990. *Pronunciation Dictionary*. Longman.
- 9) *National Geographic Atlas of the World*. 1981. Fifth Edition. National Geographic Society.
- 10) *Road Atlas of Britain*. 1990. Fifth Edition. The Automobile Association.

(平成 5 年11月22日受付)

二円筒試験における超仕上面の摩擦特性

(機械工学科) 河 野 正 来

(機械工学科) 灘 野 宏 正

Frictional Characteristics of Superfinished Surface in Two Roller Test

Masaki KOHNO

Hiromasa NADANO

To clarify the frictional characteristics and the seizure resistance of superfinished surface, two roller test on superfinished rollers of which the surface roughness was about $0.2\mu\text{m} R_{max}$ was carried out under forced lubrication with an Amusler machine. Further, the critical surface temperature for seizure was calculated. From the experimental results it was found that the coefficient of friction of superfinished rollers was considerably lower than that of un-superfinished rollers, and also the seizure resistance of superfinished rollers was about 1.3 times as large as that of un-superfinished rollers.

§ 1 緒 言

近年、機械装置の小型化、高速化に伴って、機械装置を構成する機械要素の摩擦面に高負荷がかかり、摩擦面の摩擦特性や耐焼付き性能が問題となるケースが多くなっている。このような問題点を改善するために摩擦面に種々の表面処理を施したり精密加工を行う方法がとられており、それらの一つとして超仕上がある。超仕上は、短時間で表面あらさ $0.5\mu\text{m} R_{max}$ 以下の鏡面状態が得られ、加工変質層がきわめて薄く耐摩耗性が大きいことなどの特徴があり、幅広く用いられている。

本研究では、超仕上を施した円筒を製作し、アムスラー摩擦試験機を用いて二円筒試験を行い、円筒の摩擦特性および焼付き強さを調べた。さらに、油膜厚さと瞬間温度上昇の計算を行い、潤滑状態および接触面温度の観点から検討を行った。

§ 2 実験方法

2. 1 試験円筒の形状および材料

図1に試験円筒の形状と寸法を示す。有効接触幅は8mmとした。また、低速側円筒の側面の穴には、クロメル-アルメル熱電対を挿入して運転中における円筒の本体温度を測定した。円筒材料は肌焼き鋼SCM415Hとし、930°Cで4.5hガス浸炭・拡散した後、840°Cで油焼入れを行い、160°Cで2h焼戻しを行った。この場合、円筒表面の浸炭深さは約1mmであった。熱処理後、円筒外周面には円筒研削を行った。円筒研削を施した後の軸方向の表面あらさと表面のビッカース硬さはそれぞれ約 $2\mu\text{m} R_{max}$ 、約720HVである。

2. 2 超仕上加工

超仕上加工は普通旋盤の刃物台に市販の超仕上ユニットを取り付けて行った。表1に本研究で使用した超仕上砥石の寸法, 特性を示す。本試験円筒を旋盤の主軸チャックに直接取り付けて超仕上を行うことは困難であるため, 専用の試料取り付け軸を製作し, これに円筒を取り付けて主軸チャックに固定した。加工液としては, 軽油 (80%) とマシン油 (20%) の混合液を用いた。加工液は, ポンプを作動させて, オイルクリーナーを介して流量 1.2 L/min で滴下させた。

表2に超仕上条件を示す。これらの条件の設定には, 砥石圧力, 砥石振幅および円筒の回転数を変化させて予備実験を繰り返し, それらのうちで最も良好な表面状態が得られたものを採用した。

図2に試験円筒の軸方向の断面形状を示す。断面形状の測定には触針式表面あらさ計を用いた。超仕上を施した円筒の表面は超仕上を施していない円筒のそれと比較してきわめて平滑であり, 超仕上を施した円筒の表面あらさは約 $0.2\mu\text{m } R_{\text{max}}$ である。また, 仕上面は鏡面状態を呈した。

2. 3 試験機および試験条件

二円筒試験はアムスラー摩擦試験機を用いて行った。垂直荷重は, 低速側円筒の保持部に油圧を加えて与え, ロード・セルによって検出した。摩擦力は, 高速側円筒を固定する回転軸に連結した振り子の摩擦トルクによる変位を差動トランスにより検出して測定した。また, 低速側円筒に埋め込んだ熱電対の熱起電力は, 低速側円筒を固定する回転軸の中心にあけた穴 ($\phi 5\text{ mm}$) に熱電対素線を通して, スリップリングにより取り出した。

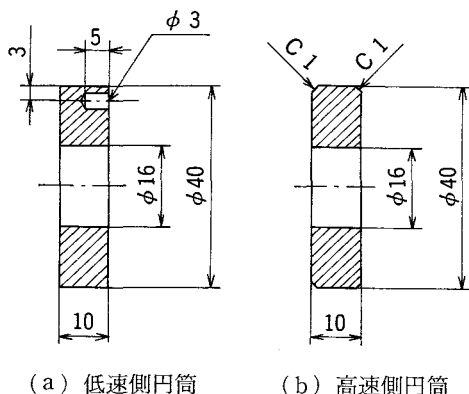


図1 試験円筒の形状と寸法

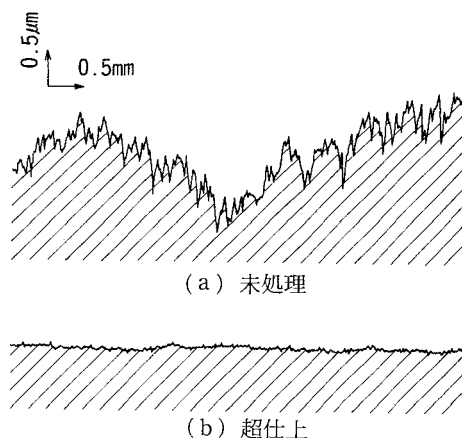


図2 試験円筒の断面形状

表1 超仕上砥石

砥石の寸法	15 mm × 15 mm × 2.5 mm
砥粒の材質	WA (白色アルミナ)
粒 度	#3000
結 合 度	70 RH
結 合 剤	V (ビトリファイド)

表2 超仕上条件

砥石	圧 力	k P a	1 9 6	
	振動数	c p m	1 3 8 0	
	振 幅	mm	1. 5	
円筒	回転数	r p m	2 7 5	
	円周速度	m／m i n	3 4. 6	
最大切削速度			m／m i n	3 6. 9
切 削 方 向 角				2 0. 6°

試験は強制潤滑の状態で行った。潤滑油としては無添加タービン油 ISO-VG56 を用い、両試験円筒のかみこみ側に吹き付けた。この場合、油温は $30 \pm 3^\circ\text{C}$ 、油量は約 0.3 L/min とした。

表3に試験条件を示す。試験は荷重漸増方式で行い、各試験段階では、最初の約10s間を荷重上昇区間、残りの約50s間を荷重一定区間として、焼付きが発生するまで連続的に試験段階を上昇させた。焼付き発生と同時に摩擦力が急上昇し、騒音、振動が大きくなるため、直ちに運転を停止した。試験円筒の組合せとしては、超仕上を施した円筒同士（以下、超仕上円筒と称する）および超仕上を施していない円筒同士（以下、未処理円筒と称する）の二つの組合せについて試験を行った。

§ 3 試験結果および考察

3. 1 摩擦係数および焼付き強さ

超仕上円筒および未処理円筒について、摩擦係数 μ と垂直荷重 W の関係および焼付き荷重を図3に示す。試験は両円筒について6回ずつ行っており、それらの平均値を示す。また、焼付き荷重については、図示した荷重範囲内で焼付きが発生し、記号で示した荷重はそれらの平均値を表す。

未処理円筒の場合には、初期の試験段階における摩擦係数は0.1以上の高い値を示す。垂直荷重の増加につれて、接触面がなじむため摩擦係数は低下するものの、その最低値は0.07以上である。一方、超仕上円筒の場合には、運転開始直後から垂直荷重 $W=3\text{ kN}$ までの摩擦係数は約0.05のかなり低い値を示す。その後、摩擦係数は徐々に上昇するものの焼付き発生直前まで0.08以下の値を示す。このように、両円筒の摩擦係数の変化の状況がかなり異なるのは、円筒の表面あらさの違いだけでなく、加工変質層の厚さの違いなどが影響しているものと考えられる。

焼付き荷重に関しては、超仕上の効果はかなり認められ、超仕上円筒の焼付き荷重は未処理円筒のそれに比べて約1.3倍である。なお、焼付き発生時の最大ヘルツ応力 σ_H （平均値）は、未処理円筒の場合には $\sigma_H = 1.45\text{ GPa}$ 、超仕上円筒の場合には $\sigma_H = 1.65\text{ GPa}$ である。

表3 試験条件

		低速側円筒	高速側円筒
回 転 数	$N \text{ rpm}$	2 5 8	7 9 4
円 周 速 度	$V \text{ m/s}$	0. 5 4	1. 6 6
す べ り 率	$s \%$	-2 0 8	6 7. 4
相対すべり速度	$V_s \text{ m/s}$	1. 1 2	
試験開始時の垂直荷重	$W_0 \text{ kN}$	0. 9 7 4	
1段階当たり増加荷重	$W_i \text{ kN}$	0. 2 4 3	
各試験段階の運転時間	$t \text{ min}$	1. 0	

3. 2 円筒の本体温度

図4に低速側円筒の本体温度 θ_b （各試験段階の終了直前における測定値）と垂直荷重 W の関係を示す。本体温度の測定は各試験円筒について2回ずつ行っており、それらの平均値を示す。摩擦係数の変化と同様に、超仕上円筒の本体温度の変化は未処理円筒のそれと比較してかなり異なり、未処理円筒の場合には運転初期の摩擦係数が高いため、本体温度の上昇がかなり急激である。一方、超仕上円筒の場合には、垂直荷重の増加につれて本体温度は比較的緩やかに上昇する。しかしながら、この場合

表4 膜厚比の計算

試 験 円 筒		超仕上	未処理
垂直荷重	$W \text{ kN}$	2. 4 3	
最小油膜厚さ	$h_{min} \text{ }\mu\text{m}$	0. 1 7 8	
表面あらさ	$R_{rms} \text{ }\mu\text{m}$	0. 0 6	0. 2 0
膜厚比	$\lambda (= h_{min}/R_{rms})$	3. 0	0. 9

の焼付き直前の本体温度は約190℃に達する。なお、運転中における高速側円筒の本体温度は測定していないが、運転停止直後に低速側、高速側円筒の表面温度を接触式サーミスタ温度計により測定した結果によれば、両円筒の表面温度に大差は認められなかった。

3. 3 摩擦面の状態

図5に低速側円筒表面の走査電子顕微鏡写真（二次電子像）を示す。試験開始前の円筒については、未処理円筒の場合には、研削加工条こんに沿って部分的なむしれが認められる。一方、超仕上円筒の場合には表面はひじょうに平滑であり、わずかに砥石の研削方向に沿った加工条こんが認められる。

つぎに、比較的初期の試験段階の垂直荷重 $W=2.43\text{kN}$ で運転を停止したものについては、未処理円筒の場合には試験前の研削条こんが不鮮明になり、表面がやや平滑になっている。

これは、摩擦面の初期摩耗によって、表面の微小な突起が摩耗したためと考えられる。焼付き発生後では、いずれの円筒の場合も表面はきわめて荒れた状態となり、溶着片が堆積している。なお、高速側円筒の表面状態に関しては、いずれの場合も低速側円筒とほぼ同様であった。

摩擦面の潤滑状態は、油膜厚さと表面あらさの比（膜厚比）によって大きな影響を受けるものとされている。表4に垂直荷重 $W=2.43\text{kN}$ における膜厚比 λ 値⁽¹⁾の計算結果を示す。ここで、最小油膜厚さ h_{min} の計算にはDowsonの弾性流体潤滑の式⁽²⁾を用いた。

超仕上円筒の場合には $\lambda > 2.0$ となり、接触面の潤滑状態は弾性流体潤滑であると考えられる。一方、未処理円筒の場合には $0.7 \leq \lambda \leq 2.0$ となり、接触面の潤滑状態は混合潤滑であると考え

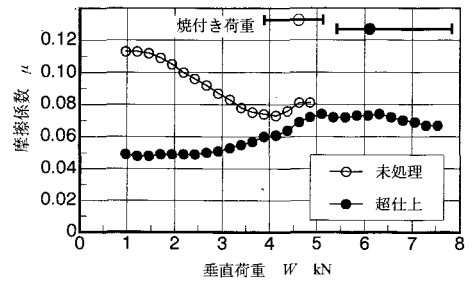


図3 摩擦係数と垂直荷重の関係および焼付き荷重

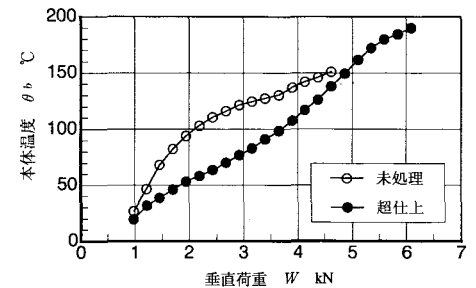


図4 低速側円筒の本体温度と垂直荷重の関係

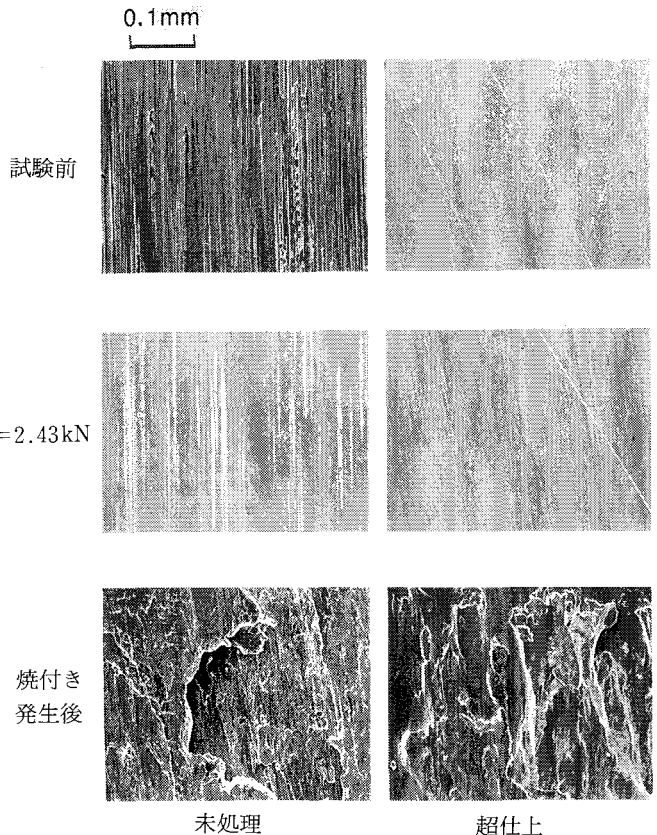


図5 低速側円筒表面の走査電子顕微鏡写真

られる。なお、超仕上円筒の場合には、垂直荷重 $W=4.87\text{kN}$ における計算結果も弾性流体潤滑の状態であった ($\lambda>3.2$)。

3. 4 焼付き臨界温度

表5に焼付き発生に対する接触面の臨界温度 θ_{cr} の計算値を示す。ここで、焼付き臨界温度 θ_{cr} は焼付き直前の低速側円筒の本体温度の測定値 θ_b と接触面の瞬間温度上昇の計算値 θ_f の和として表す。本研究で使用した表面あらしを考慮した瞬間温度上昇式⁽³⁾をつぎに示す。

$$\theta_f = 0.6564 \mu P_n^{3/4} E'^{1/4} R'^{-1/4} \times \frac{(|\sqrt{V_1} - \sqrt{V_2}|)}{B} \cdot \frac{1.27}{1.27 - R_{rms}}$$

ここで、

B : 熱接触係数 ($=\sqrt{K\rho c}$) $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{K})$

c : 円筒の比熱 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

E' : 円筒の等価縦弾性係数 Pa

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)$$

K : 円筒の熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

P_n : 単位幅当たりの垂直荷重 N/m

R' : 円筒の相対曲率半径 m

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

R_{rms} : 自乗平均平方根あらし μm

V : 円筒の円周速度 m/s

μ : 摩擦係数

ν : ポアソン比

ρ : 円筒の密度 kg/m^3

添字 1, 2 は、それぞれ低速側円筒、高速側円筒を表す。

摩擦係数としては焼付き直前の平均値を用い、表面あらし R_{rms} としては超仕上円筒の場合には垂直荷重 $W=4.87\text{kN}$ 、未処理円筒の場合には $W=2.43\text{kN}$ における低速側、高速側の円筒の平均値を用いた。また、円筒材料の熱的物性値については、 $K=2.40\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $\rho=7870\text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $c=461\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ とした⁽⁴⁾。

表5に見られるように、超仕上円筒の場合の焼付き発生に対する接触面の臨界温度は、未処理円筒の場合のそれに比べて約 50°C 高く現れる。この場合、表面あらしを考慮したことにより、

表5 焼付き臨界温度の計算

試 験 円 筒	超仕上	未処理
焼付き荷重 W kN	6. 0 4	4. 6 6
摩擦係数 μ	0. 0 7 7	0. 0 7 6
表面あらし R_{rms} μm	0. 0 5	0. 2 0
瞬間温度上昇 θ_f $^\circ\text{C}$	1 7 4	1 6 2
本体温度 θ_b $^\circ\text{C}$	1 9 0	1 5 1
焼付き臨界温度 θ_{cr} $^\circ\text{C}$	3 6 4	3 1 3

両試験円筒の瞬間温度上昇の差は小さくなり、瞬間温度上昇の差よりも本体温度の差が大きく現れる。なお、未処理円筒と超仕上円筒の焼付き臨界温度の比 ($=1.16$) は、焼付き発生時の最大ヘルツ応力 σ_H の比 ($=1.14$) にほぼ一致する。

§ 4 結 言

超仕上を施した円筒について、アムスラー摩擦試験機を用いて強制潤滑の状態で二円筒試験を行った。その結果からつぎのことが明らかになった。

- (1) 超仕上を施した円筒の場合の垂直荷重の増加に伴う摩擦係数の変化は、未処理円筒の場合のそれに比べてかなり異なり、未処理円筒の場合の初期の試験段階における摩擦係数が0.1以上であるのに対して、超仕上を施した円筒の場合のそれは約0.05のかなり低い値を示す。
- (2) 焼付き強さに及ぼす超仕上の効果はかなり認められ、超仕上を施した円筒の焼付き荷重は、未処理円筒のそれに比べて約1.3倍の値を示す。
- (3) 超仕上を施した円筒の場合の焼付き発生に対する接触面の臨界温度は、未処理円筒の場合のそれに比べて約50°C高く現れる。

文 献

- (1) Wellauer, E.J. and Holloway, G.A., *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **98**-2(1976), 626.
- (2) Dowson, D., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **182**-Pt.3A (1967-68), 151.
- (3) 寺内・灘野, 日本機械学会論文集, **44**-382 (1978), 2099.
- (4) 寺内・宮尾・灘野, 日本機械学会論文集, **39**-317 (1973), 404.

(平成5年11月22日受付)

アルゴン陽光柱プラズマへの不純物の影響

(電気工学科) 山 崎 勉

Influence of Impurity on an Argon Positive Column Plasma

Tsutomu YAMAZAKI

Results of the theoretical study on the positive column plasma of an argon glow discharge were presented. The electron energy distribution function were solved numerically from Boltzmann transport equation with two term approximation. Using the electron transport coefficients calculated, the population densities of four lower excited states of argon 4s and electron density were calculated as a function of discharge current ranging from 1 mA to 1 A, gas pressure 0.08 to 1.2 Torr. And the electric field intensity versus discharge current were also calculated for the positive column of 37 mm in diameter and 480 mm in length.

And the influence of impurity of the argon positive column plasma were investigated. Obtained results showed that when 0.1% of nitrogen and water contained in argon, it caused the increase of the electric field and the decrease of the population density of argon metastable state of $1s_5$.

§ 1 まえがき

いくつかある希ガスの内、アルゴンは安価であるため放電を利用した装置によく使用される⁽¹⁾。例えば、アーク溶接の雰囲気用に、また近年、電子部品や光学膜に代表される薄膜製造用スパッタリング装置の緩衝気体としても使用されている。これはアルゴンが他の不活性気体に比べ、電離電圧が低く放電が容易に得られることもその理由の一つと考えられる。

膜製造ではグロー放電が利用されることが多く、放電の陰極降下領域や陽光柱内で活性分子やイオンの生成が行われる。この放電は膜材料となる分子と緩衝気体との混合状態にあり、最も能率よく膜生成ができるようにいろいろな気体混合の組み合わせが利用されている。一般に放電の特性は放電気体の種類によって大きく異なり、混合気体の場合わずかの混入により大きく影響を及ぼすものもあり、その取扱いは大変重要である。そこで、その不純物の効果を見積もり、測定結果を修正する試みが行われている⁽²⁾。

これまで純度の低いアルゴンを使用して、ホローカソード放電の実験を行ってきた⁽³⁾。その発光スペクトル分布にはアルゴンの他に不純物や真空もれによる水や窒素の分子スペクトルも観測されていた⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの分子スペクトルとアルゴン励起原子との関係について実験的な検討を行ってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また以前にアルゴン陽光柱プラズマの電子エネルギー分布関数をボルツマン方程式より求め、それを

用いて陽光柱プラズマの特性について理論的に検討をした⁽⁷⁾。しかし、その計算結果は定性的にはよいが、いくつかの問題点も残った。今回計算結果の精度向上や計算モデルの修正を行い、再度陽光柱プラズマの特性計算を試みた。また、水や窒素が不純物として混入した場合についても計算を行ない、その影響について検討したものでここに報告する。

§ 2 アルゴン陽光柱プラズマの計算

低気圧グロー放電では電子エネルギー分布関数が熱平衡のマクスウェル分布と異なることが知られている。そこで、電子エネルギー分布関数の等方成分 f_0 と非等方向性成分 f_1 に対し、次式が成立する⁽⁸⁾。ただし、 $f_0(u) \gg f_1(u)$ 、 u は電子エネルギー。

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{3\sqrt{u}} \frac{d}{du} (uE \cdot f_1) &= \frac{1}{\sqrt{u}} \frac{d}{du} (\delta N_g Q_{ei} u^2 f_0) \\
 &\quad + N_g [Q_{ex}(u+U_{ex})\sqrt{u+U_{ex}} f_0(u+U_{ex}) - Q_{ex}(u)\sqrt{u} f_0(u)] \\
 &\quad + N_g [Q_i(u+U_i)\sqrt{u+U_i} f_0(u+U_i) - Q_i(u)\sqrt{u} f_0(u)] \quad \left. \vphantom{\frac{1}{\sqrt{u}} \frac{d}{du}} \right\} \dots\dots(1) \\
 f_1 &= -\frac{E}{N_g Q_t} \frac{df_0}{du}
 \end{aligned}$$

陽光柱プラズマ内の電界 E により電子は加速され、エネルギーを得る。アルゴン気体分子（気体分子密度 N_g ）との衝突により弾性散乱されたり、一部はアルゴンの励起や電離に使用され電子のエネルギー分布は特定の定常分布を形成する。各衝突の全衝突断面積をそれぞれ Q_{ei} 、 Q_{ex} 、 Q_i で表し、その和 $Q_t = Q_{ei} + Q_{ex} + Q_i$ とした。弾性衝突による電子の損失係数 $\delta = 2m/M$ 、ここで m は電子質量、 M はアルゴン原子質量である。 $U_{ex} = 11.55\text{eV}$ はアルゴンの第一励起エネルギーで、励起過程は直接励起のみ考え、すべての励起準位について同一励起エネルギーとして全励起断面積を用いた。 $U_i = 15.76$ は電離電圧で、直接電離による衝突過程のみを考え、二次電子については考えていない。計算に用いた各衝突断面積の近似式を次に示す。単位は $[A^2]$ ⁽⁹⁾

$$\begin{aligned}
 Q_{ei}(u) &= \begin{cases} 1.4118 u & 0 \leq u \leq 11.5 \\ 284/(u+6) & 11.5 \leq u \end{cases} \\
 Q_{ex}(u) &= 10.716 \ln[1 + (0.13(u+11.5) + 0.073(u-11.5)^2)u/38] / u \quad u \geq U_{ex} \\
 Q_i(u) &= 141 \ln[1 + 0.0001(u-15.9)u] / u \quad u \geq U_i
 \end{aligned}$$

低気圧グロー放電ではアーク放電などに比べるとその電子密度が低いため、前回採用した荷電粒子間のクーロン衝突は考えない。また不純物の密度が小さく、電子エネルギー分布関数への影響は少ないものと仮定する。同様に累積励起や累積電離についても省略する。

得られた電子エネルギー分布関数 f_0 は次の規格化条件を満足させた。

$$\int_0^\infty f_0(u) \sqrt{u} du = 1$$

また、電子輸送係数として、電子の移動度 b_e 、拡散係数 D_e 、平均エネルギー $\langle u \rangle$ を求めた。

$$\begin{aligned}
 b_e &= -\int_0^\infty \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2eu}{m}} \frac{f_1(u)}{E} \sqrt{u} du = \frac{v_d}{E} \quad D_e = \int_0^\infty \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2eu}{m}} \frac{f_0(u)}{N_g Q_t} \sqrt{u} du \quad \left. \vphantom{\int_0^\infty} \right\} \dots\dots\dots(2) \\
 \langle u \rangle &= \int_0^\infty u f_0(u) \sqrt{u} du \quad e : \text{電気素量}
 \end{aligned}$$

ここで v_d はドリフト速度。(1) 式は $f_0(u)$ に対する 2 階の微分方程式となるが非線形であるため、電子エネルギー分布関数は数値解析により求めた。Runge-Kutta-Mystrom 法により計算し、計算時のエネルギー刻み幅を前回より細かくし、 $\Delta u = 0.01 \text{ eV}$ 、規格化した分布関数の最小値を 1.3×10^{-19} とした。高エネルギー側から解いて行き、規格化、平均エネルギーがほぼ一定 (変動幅が 5×10^{-6} 以下) になるまでくり返し計算した。

陽光柱プラズマは円筒形でその軸方向に電界がかけられている。荷電粒子や励起原子の分布は軸方向には一様で径方向は零次のベッセル関数で近似できるものとする。粒子数平衡式から励起原子の占有密度を求めるためのエネルギー準位モデルとして、ネオンの場合と同様のモデルを採用する⁽⁷⁾。すなわち、4 つの最も低い準位 4s 軌道 (パッシュェン記法により下から $1s_5, 1s_4, 1s_3, 1s_2$ である) に対しその密度 N_s 。これらと強く光学変遷で結びつく 4p 軌道, 5p 軌道電子による各 10 こずつの準位に対し、それを代表して N_p および電子について考える。他の励起準位は省略する。

電子密度を N_e とすると、電子は直接電離 ($Z_{gi} N_g$) の他、4s 準位から電子衝突による電離 (累積電離 $Z_{si} N_s$) および 4s 準位の原子同士衝突による電離 (ペニング電離 α_p) の三つを発生項として考える。消滅項は、両極性拡散による径方向損失を考える。単位時間当たりの電子密度の変動は次式となる。

$$\dot{N}_e = Z_{gi} N_g N_e + \sum_s Z_{si} N_s N_e + \frac{1}{2} \alpha_p (\sum_s N_s)^2 - D_{am} N_e / A^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

両極性拡散係数 D_{am} 、拡散の特性長 A 。ここでアルゴンイオンの移動度を b_i 、電子エネルギー分布関数より得られた D_e, b_e より次の式が成立する。⁽¹⁰⁾

$$D_{am} = b_i D_e / b_e \quad b_i = 1460 [\text{cm}^2 / \text{Vs}]$$

また、 A は電子、励起原子のすべてに対し、陽光柱の長さ L と半径 R に対し次式で表される。⁽⁸⁾

$$\frac{1}{A} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{2.4048}{R}\right)^2}$$

電子衝突による i 準位から j 準位への励起は衝突確率 Z_{ij} で表し、電子エネルギー分布関数により次式で計算した。電子衝突励起の衝突断面積を $Q_{ij}(u)$ とした。

$$Z_{ij} = \sqrt{\frac{2e}{m}} \int_0^\infty Q_{ij}(u) \sqrt{u} f_0(u) \sqrt{u} du \quad \dots\dots\dots (4)$$

ペニング衝突は気体温度 T に依存し、衝突断面積 $\sigma_p \doteq 120 [\text{\AA}^2]$ を用いて次式で表す。⁽¹¹⁾

$$\alpha_p = \sigma_p \sqrt{\frac{16kT}{\pi M}}$$

4p, 5p の準位は電子衝突による直接励起と自然放射による 4s 準位への光学遷移、径方向拡散損失の平衡を考えた。

$$\dot{N}_p = Z_{gp} N_g N_e - \sum_s \alpha_{ps} N_p - D_{ex} N_p / A^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

励起原子の拡散係数はすべて準安定原子に対する測定値を適用し、 $D_{\text{exp}} = 45(T/300) \text{ cm}^2/\text{s}$ ここで P は気圧、単位は Torr を使用。⁽¹⁰⁾ $1\text{Torr} \approx 133\text{Pa}$ $T = 273\text{K}$ にて $N_g \approx 3.54 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ となる。自然放射の遷移確率は $4p-4s$ とそれを参考に推定した $5p-4s$ に対し、表1、表2にそれぞれ示す。⁽¹²⁾

表1 $4p-4s$ の遷移確率 10^6s^{-1} パッシェン記法

	$2p_{10}$	$2p_9$	$2p_8$	$2p_7$	$2p_6$	$2p_5$	$2p_4$	$2p_3$	$2p_2$	$2p_1$
$1s_5$	18	35	9.5	5.4	27.4	0	0.7	4.4	7.2	0
$1s_4$	5.3	0	21	26	4.6	44	0.02	8.9	1.9	0.24
$1s_3$	0.9	0	0	2.6	0	0	19	0	12.5	0
$1s_2$	0.19	0	1.4	1	5.3	0	13	23	17	45

表2 $5p-4s$ の遷移確率 10^6s^{-1} パッシェン記法

	$3p_{10}$	$3p_9$	$3p_8$	$3p_7$	$3p_6$	$3p_5$	$3p_4$	$3p_3$	$3p_2$	$3p_1$
$1s_5$	3.7	6.3	2	0.79	3.9	0	0.1	0.61	10.4	0
$1s_4$	1.1	0	4.4	3.8	0.65	9.2	0.003	1.2	0.27	0.05
$1s_3$	0.2	0	0	3.38	0	0	2.9	0	1.8	0
$1s_2$	0.04	0	0.3	0.15	0.87	0.76	2	3.2	2.5	9.3

$4s$ の準位は2つの準安定準位 ($1s_5$ と $1s_3$) と共鳴準位から構成される。共鳴準位は基底準位への放射遷移がある (A_{sg}) が、他の項は準安定準位と同様の平衡式となる。直接励起 ($Z_{gs}N_g$) 累積電離 ($Z_{s1}N_s$) および $4s$ 準位内の電子衝突による相互遷移 (Z_{ss1} , Z_{s1s}) を考えた。

$$\dot{N}_s = Z_{gs}N_gN_e + \sum_{s1} Z_{s1s}N_{s1}N_e + \sum_p A_{ps}N_p - \sum_{s1} Z_{s1}N_sN_e - \sum_{s1} Z_{ss1}N_sN_e - \frac{1}{2} \alpha_p N_s \sum_{s1} N_{s1} - D_{\text{ex}}N_s/A^2 - T_{sg}A_{sg}N_s \quad (6)$$

$4s$ から、 $4p$, $5p$ の累積励起は直接励起に比べ小さいと考えられるため省略した。共鳴放射は基底準位原子による再吸収があるため、その脱出係数 T_{sg} を考慮した。⁽¹³⁾

$$T_{sg} = \frac{1.60}{K_0 R \sqrt{\pi \ln(K_0 R)}} \quad K_0 = \frac{2}{\Delta\nu} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{g_s}{g_g} \frac{c^2}{\nu_0^2} \frac{A_{sg}N_g}{8\pi} \quad \frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{2\sqrt{\ln 2}}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M}}$$

K_0 は共鳴放射の吸収係数で、光速 c 、発光の中心周波数 ν_0 、そのドップラー幅 $\Delta\nu$ である。各共鳴線の遷移確率は $A_{4g}(1s_4) = 1.19 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $A_{2g}(1s_2) = 5.10 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ である。⁽¹⁾

定常状態において (3) (5) (6) 式を連立させて解くと各密度が求まる。計算を簡単にするため、(5) より N_p を求め (6) 式に代入し、電子密度 $x_1 = N_e/N_g$ 、占有密度 $x_2 = N_s(1s_5)/N_g$, $x_3 = N_s(1s_4)/N_g$, $x_4 = N_s(1s_3)/N_g$, $x_5 = N_s(1s_2)/N_g$ として $x_1 \sim x_5$ に対する5元連立2次方程式を得る。すなわち、

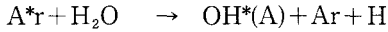
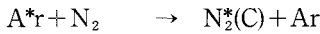
$$\frac{N_p}{N_g} = \frac{Z_{gp}N_g}{D_{\text{ex}}/A^2 + \sum_s A_{ps}} \frac{N_e}{N_g} = x_p$$

$$\dot{x}_1 = \nu_{g1}x_1 + \sum_s \nu_{s1}x_sx_1 + \frac{1}{2} \alpha_p N_g (\sum x_s)^2 - D_{\text{ex}}x_1/A^2$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_2 &= \nu_{g2}x_1 + \sum_p A_{p2}x_p + \sum_s \nu_{s2}x_s x_1 - \nu_{21}x_2 x_1 - \sum_s \nu_{2s}x_2 x_1 - \frac{1}{2} \alpha_p N_g x_2 \sum_s x_s - D_{ex} x_2 / \Lambda^2 \\
\dot{x}_3 &= \nu_{g3}x_1 + \sum_p A_{p3}x_p + \sum_s \nu_{s3}x_s x_1 - \nu_{31}x_3 x_1 - \sum_s \nu_{3s}x_3 x_1 - \frac{1}{2} \alpha_p N_g x_3 \sum_s x_s - D_{ex} x_3 / \Lambda^2 - T_{4g} A_{4g} x_3 \\
\dot{x}_4 &= \nu_{g4}x_1 + \sum_p A_{p4}x_p + \sum_s \nu_{s4}x_s x_1 - \nu_{41}x_4 x_1 - \sum_s \nu_{4s}x_4 x_1 - \frac{1}{2} \alpha_p N_g x_4 \sum_s x_s - D_{ex} x_4 / \Lambda^2 \\
\dot{x}_5 &= \nu_{g5}x_1 + \sum_p A_{p5}x_p + \sum_s \nu_{s5}x_s x_1 - \nu_{51}x_5 x_1 - \sum_s \nu_{5s}x_5 x_1 - \frac{1}{2} \alpha_p N_g x_5 \sum_s x_s - D_{ex} x_5 / \Lambda^2 - T_{2g} A_{2g} x_5
\end{aligned}$$

ここで ν_{ij} は衝突周波数で、(4) 式と、 $\nu_{ij} = Z_{ij} N_g$ の関係がある。この連立方程式の解法にはニュートン・ラフソン法を用いた。以上の粒子数平衡式系は不純物のないアルゴンの場合である。

不純物として窒素と水を考える。発光スペクトル分布には、窒素の第二正帯⁽⁵⁾、OH の分子スペクトルが強く現れていた⁽⁶⁾。これらは電子衝突またはアルゴン励起原子との第二種の衝突によるものと考えられる。後者は共鳴的エネルギー転移衝突のため、特定のエネルギー準位で大きな反応係数をもつ。



アルゴン励起準位 Ar^* として $4s$ 軌道を考え、窒素については $1s_5 \sim 1s_2$ に対しその反応係数 $\alpha = 0.36, 0.08, 0.16, 0.54 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ を、⁽⁴⁾ 水については $1s_5$ に対し $1.40 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ とした。⁽¹³⁾ これらの項を α_p と同様にしてそれぞれの粒子平衡式に代入し、占有密度等への不純物効果を計算できる。また放電電流は軸方向の電子ドリフト速度により次式より計算できる。これより放電電流依存性が求まる。

$$I_d = e \int_0^R N_e J_0(2.4048 \frac{r}{R}) 2\pi r dr v_d \approx 1.357 e N_e b_e E R^2$$

直接電離以外の衝突断面積は、次の経験式を用いた。

$$Q_{ij}(u) = \frac{Q_x}{Q_0} \left(\frac{U_x}{u} \right)^l \left(1 - \left(\frac{U_x}{u} \right)^m \right)^n \quad u \geq U_x, \quad Q_0 = \left(\frac{1}{1+mn} \right)^{1/m} \left(\frac{mn}{1+mn} \right)^n$$

U_x は励起閾値エネルギー、 Q_x は衝突断面積の最大値でこの時のエネルギーは $(1+n/l)^{1/m} U_x$ となる。表 3 に各励起・電離について U_x 、 Q_x 、 l 、 m 、 n の値を示す。超弾性衝突については詳細つり合いの定理より導出した。^(4s 軌道内)⁽¹⁴⁾

$$Q_{ji}(u) = \frac{g_i}{g_j} \frac{u + U_x}{u} Q_{ij}(u + U_x)$$

表 3 衝突断面積 ($m=1$ とした。⁽¹⁴⁾・⁽¹⁵⁾)

励起準位	$U_x [\text{eV}]$	$Q_x [\text{\AA}^2]$	l	n	累積励起	$U_x [\text{eV}]$	$Q_x [\text{\AA}^2]$	l	n
$1s_5$	11.548	0.30	0.75	1.5	$1s_5 \rightarrow \infty$	4.214	8.2	0.75	2
$1s_4$	11.624	0.08	〃	2	$1s_4 \rightarrow \infty$	4.136	8.4	〃	〃
$1s_3$	11.723	0.05	〃	1.5	$1s_3 \rightarrow \infty$	4.037	8.2	〃	〃
$1s_2$	11.828	0.336	〃	2	$1s_2 \rightarrow \infty$	3.932	8.3	〃	〃
4p	12.907~	0.0567	0.75	2	$1s_5 \rightarrow 1s_4$	0.165	108	1	1
	13.480				$\rightarrow 1s_3$	0.27	27	1	1
5p	14.465~	0.02	0.75	2	$\rightarrow 1s_2$	0.076	12	2	0.5
	14.739				$1s_4 \rightarrow 1s_3$	0.99	108	1	1
					$\rightarrow 1s_2$	0.204	27	2	0.5
					$1s_3 \rightarrow 1s_2$	0.105	108	2	0.5

4p $U_x = 12.907, 13.076, 13.095, 13.153, 13.172, 13.273, 13.283, 13.302, 13.328, 13.480$
 5p $U_x = 14.465, 14.500, 14.507, 14.525, 14.529, 14.577, 14.682, 14.6888, 14.6877, 14.739$

§ 3 計算結果とその検討

電子エネルギー分布関数は、電子と基底状態の原子との衝突のみ考えているため E/P または E/N_g により一通りに定まる。また、電子輸送係数 D_e , b_e , Z_{ij} も同様である。図1に電子エネルギー分布関数を示す。励起エネルギー付近から急激に減少する。 E/P の増加により高エネルギー側に分布が広がってゆく。これらの傾向は前回の結果⁽⁷⁾と一致し、衝突断面積が異なるにもかかわらずその差はほとんどない。わずかに高エネルギー側に広がっていた。

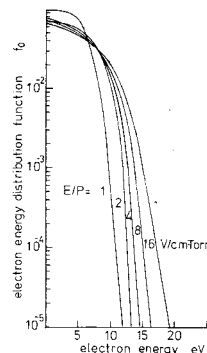


図1 アルゴングロー放電光柱内の電子エネルギー分布関数

ドリフト速度、平均エネルギーと特性エネルギー (D_e/b_e) の計算結果を測定値とともに図2と図3に示す。平均エネルギーは E/N_g の増加により 5eV から増加してゆく。特性エネルギーは前回の計算値より相当測定値に近づいた。⁽⁷⁾ドリフト速度も広い範囲で測定値に近づいている。⁽⁷⁾

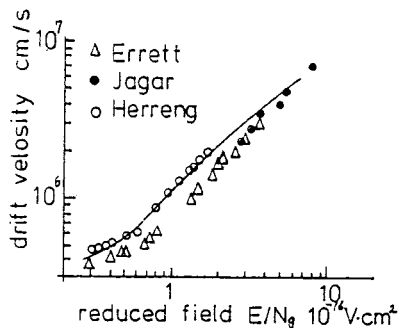


図2 ドリフト速度の換算電界依存性、測定値と計算値でよく一致している。

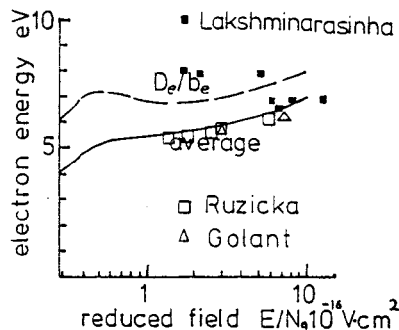


図3 平均エネルギーと特性エネルギーの換算電界依存性測定値に対し平均エネルギーはよく合っているが特性エネルギー (D_e/b_e) は近い値ではあるが E/N_g に対する変化はあまり合っていない。

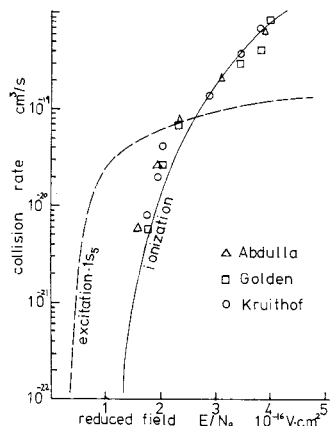


図4 電離能率、励起能率の換算電界依存性、電離能率は測定値によく合っている。

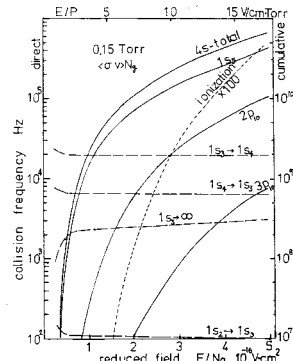


図5 電子衝突周波数の放電電流依存性、直接励起はアルゴン準安定準位 ($1s_5$) と $4s$ 軌道へ励起の和、 $2p_{10}$, $3p_{10}$ への励起周波数。点線は電離周波数100倍にして記入。破線は $4s$ 軌道間の電子衝突遷移で最大と最小が示してある。ただし $4s$ 励起原子密度の代わりに基底準位の密度で計算表示してある。また準安定準位から累積電離も示す。他の $4s$ 準位でもほぼ等しい値となる。

電離能率や準安定準位への励起能率を図4に示す。電子エネルギー分布関数が高エネルギー側に広がった分、計算値は測定値に近づいた。次に0.15 Torrにおける各衝突周波数を図5に示す。 $E/P=8$ から20V/cm・Torrの変化に対し、放電電流が1Aから数mAまで変化する。直接励起は E/P とともに増加する。上位の準位になるほど衝突周波数は小さくなる。累積励起・電離はほぼ一定、ただし $Z_{ij}N_g$ で計算しているため、実際の周波数はこの値に $N_s/N_g \leq 10^{-4}$ をかける必要がある。4 s軌道間の電子衝突遷移は最も大きな超弾性衝突($1s_4 \leftarrow 1s_3$)と小さい($1s_3 \leftarrow 1s_4$)で他はその中間にあった。

陽光柱プラズマの寸法 $L=48$ cm, $2R=3.7$ cm, ガス温度 $T=400$ K一定とした。初めに純アルゴンでの占有密度, 電子密度の計算結果を図6から図10に示す。放電電流依存性は, 電子密度は比例する。共鳴準位 $1s_2$, $1s_4$ は比例するが電流の大きい領域で飽和がみられ, 準安定準位 $1s_3$, $1s_5$ はほとんど一定に近く, わずかに電流とともに増加する。電子密度以外は気圧が低い方が占有密度は大きく, 大電流で特に著しい。

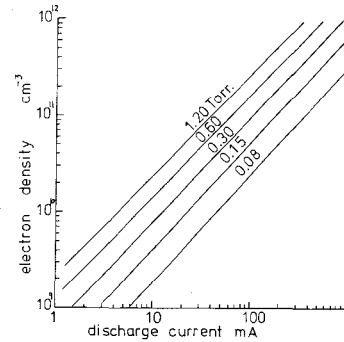


図6 電子密度放電電流依存性, 陽光柱プラズマ $L=48$ cm, $2R=3.7$ cm

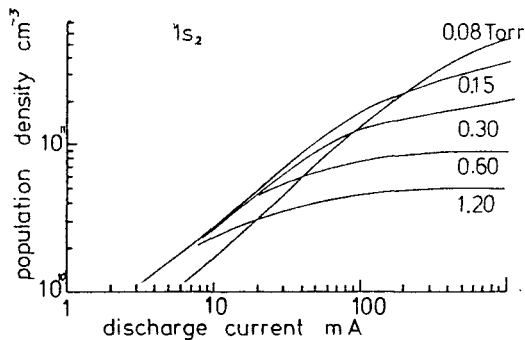


図7 アルゴン励起準位 (共鳴) 占有密度の放電電流依存性

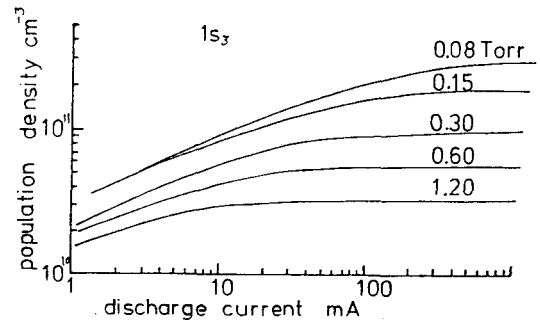


図8 アルゴン励起準位 (準安定) 占有密度の放電電流依存性

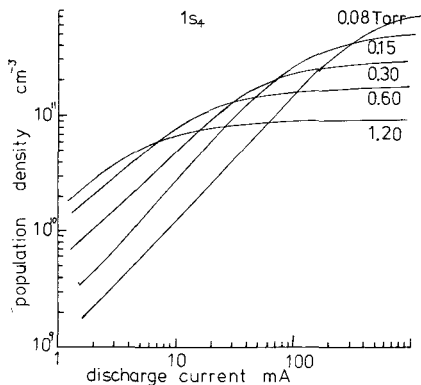


図9 アルゴン励起準位 (共鳴) 占有密度の放電電流依存性

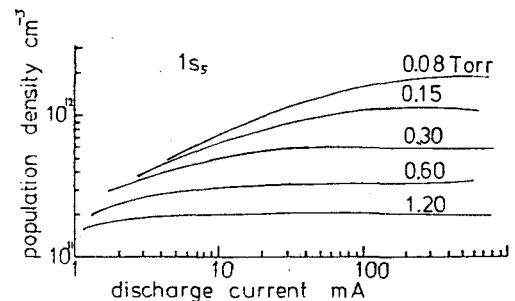


図10 アルゴン励起準位 (準安定) 占有密度の放電電流依存性

次に各気圧における占有密度，電子密度，電界強度の放電電流依存性を図11から図15に示す。各図中破線で表した量は不純物の窒素と水がともに0.1%含まれている場合を示している。0.15Torrの場合（図12）窒素のみ0.1%の時の占有密度を点線で描いた。水に比べるとその影響は小さい。

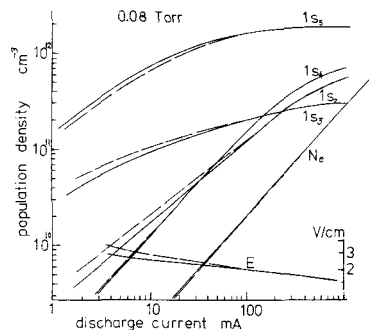


図11 アルゴン 0.08Torrでの占有密度，電子密度，電界の放電電流依存性。破線は窒素・水が0.1%含まれている場合。

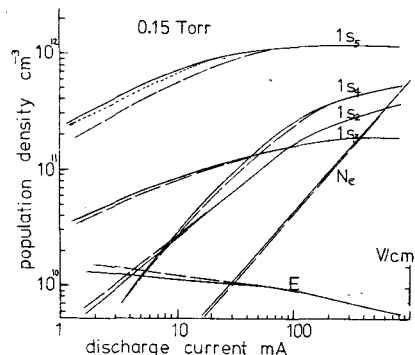


図12 アルゴン 0.15Torrでの占有密度，電子密度，電界の放電電流依存性。破線は窒素・水が0.1%含まれている場合。点線は窒素のみ0.1%含まれている場合。

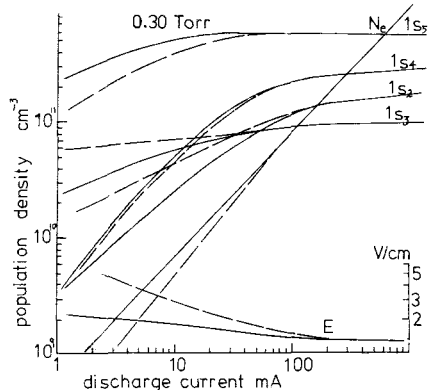


図13 アルゴン 0.30Torrでの占有密度，電子密度，電界の放電電流依存性。破線は窒素・水が0.1%含まれている場合。

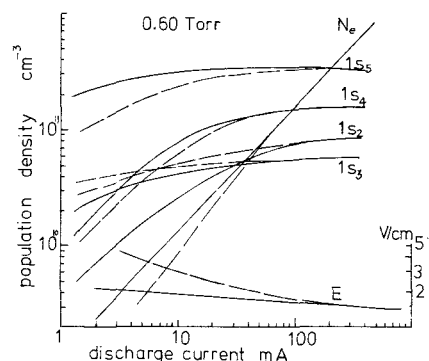


図14 アルゴン 0.60Torrでの占有密度，電子密度，電界の放電電流依存性。破線は窒素・水が0.1%含まれている場合。

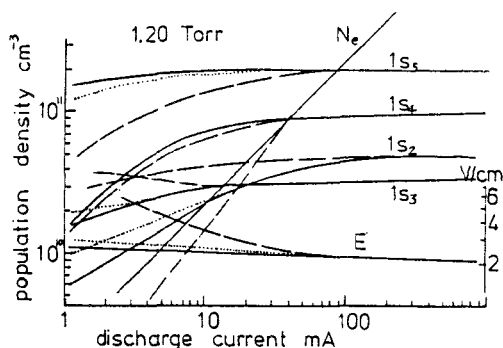


図15 アルゴン1.20Torrでの占有密度，電子密度，電界の放電電流依存性。破線は窒素・水が0.1%含まれている場合。点線は窒素のみ0.01%含まれている場合。

$1s_5$ にわずかに変化がみられるが他の準位では変化はみられなかった。気圧が高くなると不純物の影響は大きくなる。図15に1.2Torrの場合が示してあるが、点線で示した量は不純物密度0.01%の場合である。全般でみると不純物の影響は気圧が高く電流の小さい領域で著しい。特に $1s_5$ は大きく減少する。一方 $1s_2$ 、 $1s_3$ は逆に増加し、 $1s_4$ は $1s_5$ と関係が深いため増加と減少が平衡しているようである。この占有密度の変化はアルゴン $4s$ 励起準位と関係し、放電の電界電流特性に影響を与え、電界を上昇させている。これは本来累積電離に寄与していた $4s$

準位が不純物により減少するため放電維持に必要な電離数の減少をひきおこすことが原因していると考えられる。

水・窒素がアルゴン準安定原子と衝突する割合が図16に示してある。0.15Torr の場合（実線）と1.2Torr（破線）の場合で比較すると、電流依存性はほぼ同じであるが最大の現れている電流値は気圧が高い方が小さい。衝突数の値は気圧が高い方が低くなっている。この電流依存性は図11～図15に一致している。水と窒素では水の方が反応係数が大きいいためその衝突数も多く、大きな影響力をもつ。図に電子衝突による窒素分子の励起衝突を示している。この値は放電電流に比例して増加する。一方アルゴン励起原子との衝突による励起では窒素分子数が有限であるため最大に達した後減少している。

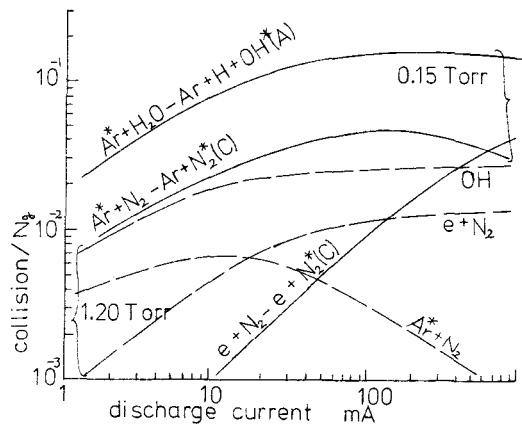


図16 アルゴン励起原子と窒素・水との衝突周波数

両衝突過程の和は、電流に比例するようで、この結果この励起準位からの自然放射、窒素第二正帯の発光は放電電流に比例して大きくなることが推定される⁽⁶⁾。水が解離して生じるOHの発光も同様に考えられるが、ここでは水の電子衝突解離の定量的評価をしていないが（衝突断面積不明のため）実験結果⁽⁵⁾と比較するとほぼ正しいようである。

以上のように不純物が少ない場合にはほぼ正しい結果を与えると考えられるが、実験による検証が重要でありそのための準備を現在進めている。（占有密度、電子密度、電界、不純物の影響などの放電電流依存性など）

§ 4 まとめ

アルゴン陽光性プラズマの諸特性の計算を行った。電子エネルギー分布関数をボルツマン方程式に二項近似を適用して数値解析により求めた。それを用いて電子輸送係数を算出し、分布関数の妥当性を確認した。アルゴンの4s軌道の4つの励起準位と電子の粒子数平衡式より、各占有密度を算出しその放電電流依存性を数mAから1Aの範囲、0.15Torrから1.2Torrの気圧の範囲で求めた。また陽光柱の電界電流特性を計算し、定性的にはグロー放電の特性を得ることができた。

次に、不純物として水や窒素が混入した場合について同様の特性を求め、純アルゴンの場合と比較した。その結果、不純物（0.1%）により電界は上昇し、その効果は気圧が高く電流が小さい領域で大きいことが明らかになった。また窒素より、水の方が大きな影響を与えることがわかった。これらの原因は、ここでとり上げた不純物がアルゴン4s励起準位と反応し、その密度を減少させるからで、そのため放電中の累積電離等に影響し電界を大きくさせたようである。

参考文献

- (1) 実用真空技術総覧編集委員会編：「実用真空技術総覧」1990年産業技術サービスセンター，第II部
- (2) 高木均他：昭和57年電気学会全国大会76
- (3) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.27(1) (1991) P 19-26
- (4) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.26(1) (1990) P 75-89
- (5) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.28(2) (1993) P 63-72
- (6) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.29(1) (1993) P 65-73

- (7) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.21 (2) (1986) p 39-50
- (8) 奥田孝美：「気体プラズマ現象」1964年，コロナ社，§ 14
- (9) R.Lagushenko 他： J.Appl.Phys. 55 (9) (1984) p 3293-3300
- (10) 電気学会：「放電ハンドブック」1973年，オーム社
- (11) S.N.Salinger 他： J.Appl.Phys. vol.39 (1968) p 4299
- (12) A.A.Radzig: "Reference Data on Atoms, Molecules, and Ions" (1985) Springer-Verlag
- (13) H.S.W.Massey: "Electronic and Ionic Impact Phenomena" (1971) Clarendon Press
- (14) Geoffrey R.Scheller 他： J.Appl. Phys. vol.64 (2) (1988) 598-606
- (15) C.M.Ferreira 他： J.Appl. Phys. vol.57 (1) (1985) 82-90
- (16) H.S.Porter 他： J.Chem. Phys. vol.65 (1976) p 154~
- (17) 山崎勉：呉高専研究報告 Vol.26 (2) (1991) p 21-33
- (18) L.R.Peterson 他： J.Chem. Phys. vol.56 (1972) p 6068~
D.Rapp 他： J.Chem. Phys. vol.43 (1965) p 1464~
J.S.Chang 他：「電離気体の原子・分子過程」1982年，東京電機大学出版局
- (19) J.T.Verdeyen: "Laser Electronics" 1981年，Prentice-Hall

(平成5年10月15日受付)

根系により補強された、まさ土のせん断特性の研究

(土木工学科) 小堀 慈久
 (愛媛大学) 八木 則男
 (鳥取大学) 榎 明潔
 (愛媛大学) 矢田部 龍一

A Study of shear strength of Decomposed Granite Soil reinforced by Roots

Shigehisa KOBORI
 Norio YAGI
 Meiketsu ENOKI
 Ryuichi YATABE

Decomposed Granite Soil distributed spread in Kure city environ. Every year, slope failure occur at rainy season. And we lost a lot of structure and person's life.

This study consider mechanical shear strength characteristic of Decomposed Granite Soil reinforced by roots. A kind of test at this study are triaxial test laboratory sheartesting, field oversized sheartesting and tensiletesting of soilmass.

This study produced next some results.

- (1) We obtain a yield point of stress-strain diagram by triaxial test
- (2) The apparent cohesion C_d increased in proportion to the roots content.
- (3) On the tensile test, The tensile strength of soil mass increased in proportion to the roots.

1.はじめに

近畿以西から瀬戸内沿岸部、四国、九州北部とかなり広い範囲で風化花崗岩、通常、まさ土と言われる特殊土が分布している。まさ土が分布する地域では春や梅雨の長雨、台風等の集中豪雨により急傾斜地災害、いわゆる地滑りや崖崩れが毎年、多数発生している。

一般的な、まさ土は図－1の粒径分布に示すように粒径0.01mm以上のものが90%から85%を占める砂質土からなっている。残る10%から15%は粒径0.01mm以下の砂質シルトから成っている。この0.01mm以下のシルト質土の粘着力はまさ土の構造組織の結合材として大きな働きをしている。まさ土における適度な含水量はサクションによる見かけの粘着力が働き、構造組織の結合を高める。この、まさ土の特質である締固め効果は道路建設の路盤、路床材、盛土材、造成地の地均し等、土木施工における土材料として広く用いられている。しかし降雨等の浸透により、まさ土地盤は急激に強度低下を来たし地盤災害をもたらす。その崩壊過程は次の通りである。降雨が地表から地中へ浸透し、地盤の含

水比が高まるとサクシンの低下とともに見かけの粘着力が減少する。そして地中の含水量が増加すると間隙水圧が発生し、さらに間隙水圧の上昇により粘着力が著しく減少し土の構造自体が不安定となる。また地下水流が起こり、それにともない細粒土の移動が始まる。さらに雨水の供給により傾斜地盤が飽和状態に近づき高含水比となる。粘着力が消失しそれとともに自重の増大したまき土の地盤が応力の増大により表層部が滑落する。これが、まき土斜面崩壊、とくに表層崩壊のメカニズムである。

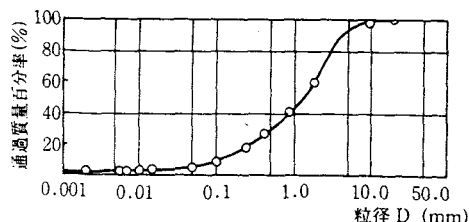


図-1 まき土試料の粒径加積曲線

この様なまき土の斜面崩壊を考えると植生による防災効果が従来から論議されている。根系の効果は特に表層崩壊と深い関わりがあると考えられる。まき土斜面災害の場合、地表面の草木が降雨の浸透や浸食から地表を保護したり、根系の緊縛力により表層土の強度増加が十分考えられる。しかし、土中の根の強さの定量化が困難で斜面災害と根系の関係は未解明な部分が多い。

これまでに知られている植生に関する研究を列举すると、陶山・原¹⁾は修正・無修正の根系試験片に対して引っ張り破壊試験を行い、根系の直径と引っ張り力の関係においてべき乗数回帰式を得ている。八木・大塚も同様の実験を行い²⁾、ほぼ同じ結果を得ている。中根ら³⁾はアカマツの根について枯死・腐朽に伴う引っ張り強度の低下について詳細な研究を行っており、直径1 cm以下の細根は7～8年で引っ張り強度が消失するとしている。抜根試験については北村・難波⁴⁾や岩本ら⁵⁾により多数行われており、抜根抵抗力は根元直径または材齢とともに放物線的増加の関係が存在し、伐採後の経年変化に対しては指数関数的に減少する事が見いだされている。

根系が土の強度増加に与える影響をはじめて実際に確認したのは、遠藤・鶴田⁶⁾で根系によるせん断強度の増加分は見かけの粘着力 c の増加として現れるとしている。他に高橋⁷⁾、岩本ら⁸⁾、八木ら⁹⁾、八木・大塚ら¹⁰⁾などの大型の一面せん断試験機を用いた多くの研究があるが、いずれも根系による補強効果は c の増加として現れ、根量に応じて増加するとしている。尚、著者の研究においても同様の結果を得ている。¹¹⁾

本報告書では崩壊例の多い広島県呉市周辺において大型現場一面せん断試験、室内における力学試験さらに、根系の引張試験、まき土塊の引張試験を行い、その他根含率等による土の強度定数と根系の関連を検討する。

2. 調査地域、及び実験方法

ここでは広島県呉市周辺を調査地域とし、根系を含むまき土不攪乱試料を採取し、三軸試験、室内一面せん断、及び土塊の引張試験を行った。また、崩壊例の多い呉市内5ヶ所において大型現場一面せん断試験、単位体積重量試験等の原位置試験を行った。

(1) 現地実験・調査地域

まき土分布地帯であり、また急傾斜地での土地利用の代表的な地域である広島県呉市市街地周辺を本研究の実験および調査地域として図-2に示す地域を選定した。この地域は風化残積土であるまき土の分布地であると同時に地形的には傾斜と起伏の激しい地域である。また戦前戦後、軍用地として役割を担い、人口増加とともに傾斜地の住居利用が盛んとなった。この急傾斜地域での斜面災害は、降雨期に毎年のように発生している。特に昭和20年、昭和42年、昭和60年には大規模な斜面災害が起きており多くの尊い人命と構築物を失っている。

次にこの地域の地質的分布を見ると瀬戸内海に沿った地域には、中世代白亜期に貫入したものと思

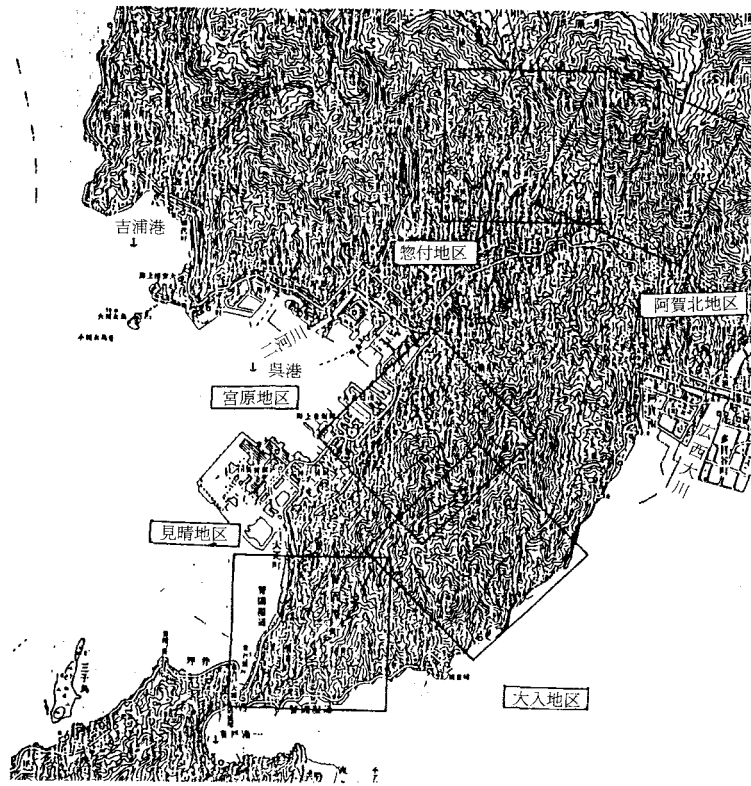


図-2 実験・調査地域 (広島県呉市)

われる花崗岩体が広く分布している。この花崗岩体は広島以东では海岸線に沿って、ほぼ東西に30～40kmの中を持って分布しているが広島、呉市付近を境にして急に南北方向の分布も示している。これらの岩体は広島花崗岩複合体と呼ばれ、一部の閃緑岩体を除けば全体としては黒雲母花崗岩を主体とする底盤からなっている (呉教委, 1969)。そしてこの底盤体は広島花崗岩体と名付けられている。広島花崗岩体中には多数の岩脈が発達しているが半花崗岩を除いてそれらは2大別される。その1つは広島市仁保町を中心として発達している斑岩を主体とする岩脈群と音戸の瀬戸を中心として発達している花崗斑岩を主体とする岩脈群いわゆる音戸岩脈と呼ばれているものである。休山付近にはこの音戸岩脈群がよく発達している。花崗岩類とこの岩脈類との関係を海岸地域から呉市休山へたどると休山の南方海岸観音岬では、両者の接触部ははっきりとせず混成層が形成されている。又、音戸の瀬戸付近の岩脈を休山方面にたどっていくと、壁岩の花崗岩がしだいに細粒になるにつれ、急冷相がよく発達し、その中に花崗岩の角礫が捕獲され、また岩脈自身にも何等変成作用を受けた形跡がみられない。このことは仁保岩脈群に見られる現象と同様に、音戸岩脈群は花崗岩類がまだ変成能力を持っていた時期に貫入してきたものと見られ、かつ細粒花崗岩は、粗粒花崗岩よりも早く固化し、変成能力を失っていたものと考えられる。

このような風化花崗岩、いわゆる力学的に脆弱な地盤となっている呉市市街地の中でも特に崩壊件数、崩壊土砂量の多い、見晴地区、宮原地区、大入地区、惣付地区、阿賀北地区の5ヶ所について現地実験および調査を行った。校内でも試験地盤を3ヶ所もうけ、まさ土の基本的な実験を行った。

(2) 試料の採取方法

三軸圧縮試験に用いる、まさ土の不攪乱試料の採取方法は表面の腐蝕土の部分を取り除き、まさ土

層を露出し、シンウォール・チューブを利用したサンプリング・リングで径7cm、長さ15cmの試料を一つの現場で12本程度をハンドトリミング法により採取した。持ち帰った資料は冷凍庫(-30℃)に24時間以上、凍結保存した。その後、解けやすいために何度かに分けて成形した。特に端面の成形は注意深く行った。成形は径5cm、高さ10cmの標準試料寸法とした。室内一面せん断試験の試料は同様に不攪乱試料としトリミングリングを静かに押し込みながら径6cm、高さ2cmの試料を採取する。又大型現場一面せん断試験試料は現地の地盤の不攪乱試料で保護枠(薄鉄板)を用い、やはりハンドトリミング法により縦25cm、横25cm、高さ14cmの試料が得られるように成形した。土塊の引張試験試料は同様に現場の不攪乱試料をブロックで採取し、室内で凍結の後(縦)30×(横)40×(高)7cmに成形し、試料とした。

(3)実験方法

三軸圧縮試験機は写真-1のように試料を設置し側圧を加える三軸セル部、垂直方向から荷重を加える圧縮載荷部、圧力調整を行う圧力計測調整部、排水量の増減から供試体の体積変化を測定する体積変化調整測定部等からなっている。実験は供試体の上下に口紙を入れ三軸セル中にセットする。供試体は飽和状態とし圧密排水試験(CD試験)で行った。軸変位速度は $1.67 \times 10^{-1} \text{mm/min}$ 、側圧は0.4, 0.6, 0.8kgf/cm²で行った¹²⁾。室内一面せん断試験は12時間の水浸条件と拘束圧による圧密を1時間させた後、水平変位速度は $3.3 \times 10^{-1} \text{mm/min}$ 、拘束圧は0.5, 0.75, 1.0kgf/cm²の低圧で行った。変位量は8.0mmとした。写真-2に示す大型現場一面せん断試験は十分給水させ湿潤状態で行った。水平変位速度は室内試験と同様に $3.3 \times 10^{-1} \text{mm/min}$ としたが拘束圧は載荷面(25×25cm²)の大きさから最大70kgfの荷重が限度であったので0.05, 0.075, 0.1kgf/cm²で行った。供試体の本数は三軸試験では約100本の不攪乱試料を採取し85本を実験した。室内一面せん断試験は48個の不攪乱試料を採取した。大型現場一面せん断試験は7ヶ所の現場で28回の現場試験を行った。根系試験方法と

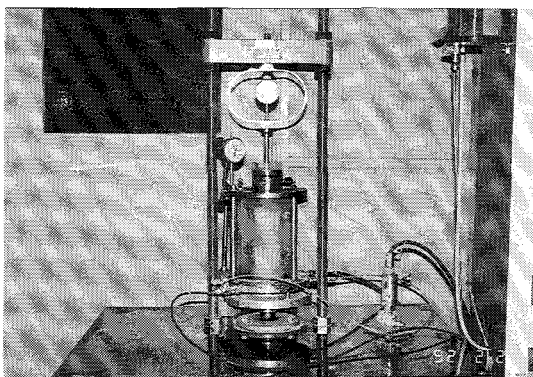


写真-1 三軸圧縮試験機 (三軸セル)

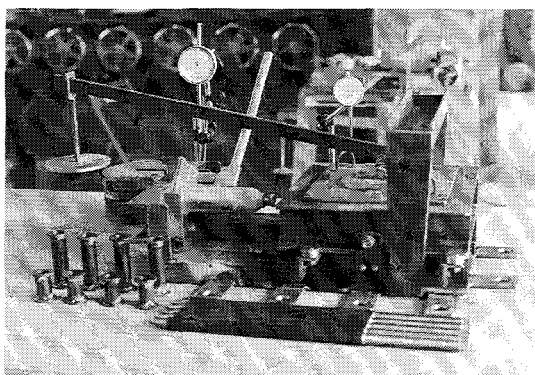


写真-2 大型現場一面せん断試験機(試作機)

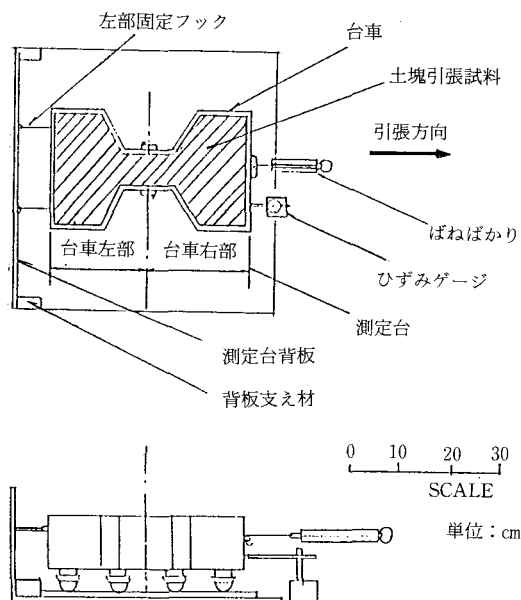


図-3 土塊の引張試験機 全体図

して、まず(1)根系の引張試験は根の直径により小型試験（径 0.7mm 以下）、中型試験（径 0.7～2.0mm 以下）、大型試験（径 2.0mm 以上）に分けて行った。(2)まさ土の引張試験は図－3 に示す様なローラーの付いた分割形の台車に I 字型に成型し試験機に乗せ、試料に十分給水させ、その後引張力を静かに懸けた。

3. 結果と考察

(1)物理的試験

土の物理的試験として比重試験、粒度分布試験、単位体積重量試験、等を行った。その他の試験として透水試験を行った。結果は表－1 に示す。現場の乾燥密度と間隙比および比重である。乾燥密度は砂置換法により各現場で行ったがその他にも三軸試験の供試体の密度や、一面せん断試験の供試体の密度からも検討した。試験地盤は密度を変えて地盤を作成し、まさ土の強度の相違を検討した。それにより乾燥密度は 1.50～1.72gf/cm³ となり、その平均が 1.68gf/cm³ となった。今回の 5ヶ所の実験及び調査対象地域を比較すると大入地区が 1.47gf/cm³ で最も大きく、また間隙比は $e=0.77$ である。次に見晴地区の 1.46gf/cm³、 $e=0.81$ となり、密度の小さい地区は惣付地区、阿賀北地区であり、阿賀北地区は 1.03gf/cm³ $e=1.56$ と最も緩い地盤となっている。一方比重 G_s は試験地盤の場合で 2.64 で調査地区では惣付地区の 2.68 が最も大きい。宮原地区が 2.59 と小さくなっているが全体的に大差はみられない。

次に図－4 に粒度を表す粒径加積曲線を示す。最も立ち上がりの急な曲線は試験地盤であり最も粒径の大きな砂質分の多いまさ土と言える。校内のハンドボール場横でのまさ土と見晴地区との曲線は似た傾向にある。0.1mm 粒径以下の粒径の量を見ると試験地盤で 13% で 0.1mm 粒径以上が 87% と砂質土であることが分かる。校内のハンドボール場横で 23% となり、他のグラフは 10% ずつ上昇し、大入、見晴、宮原、惣付、阿賀北、の順となっている。この傾向は間隙比の小さい順に並べると大入、見晴、宮原、惣付、阿賀北となり風化の進行したまさ土は細粒化し、シルト質な土となり、したがって間隙

表－1 現場の乾燥密度、間隙比、比重

現場名称	砂置換法によるもの		三軸圧縮試験によるもの		一面せん断試験によるもの		比重
	乾燥密度 (gf/cm ³)	間隙比	乾燥密度 (gf/cm ³)	間隙比	乾燥密度 (gf/cm ³)	間隙比	
試験地盤	1.68	0.57	1.584	0.666	1.424	0.856	2.640
ハンドボール場横	1.07	1.47	1.522	0.719	1.093	1.419	2.616
大 入	1.47	0.77	1.347	0.950	1.349	0.928	2.622
惣 付	1.38	0.91	1.217	1.207	1.222	1.200	2.682
阿 賀 北	1.03	1.56	1.122	1.340	1.118	1.349	2.623
宮 原	1.40	0.87	1.283	1.022	1.529	0.696	2.586
見 晴	1.46	0.81	1.410	0.871	1.414	0.864	2.635

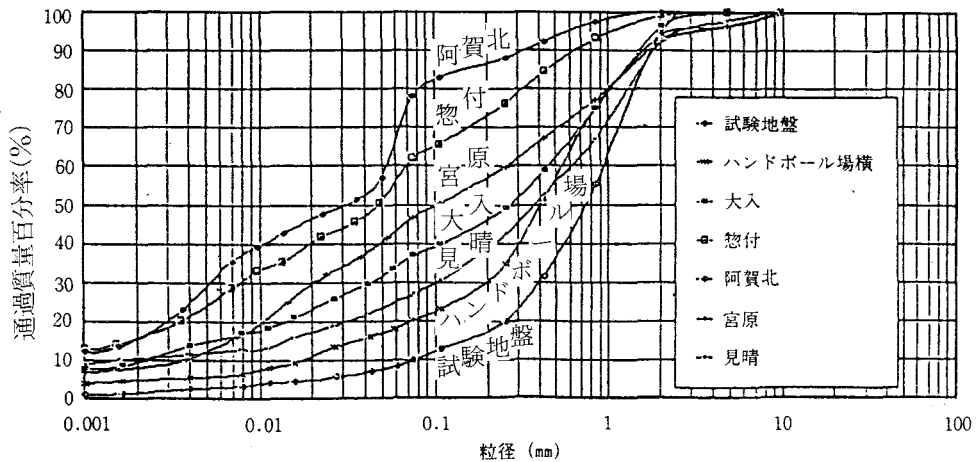
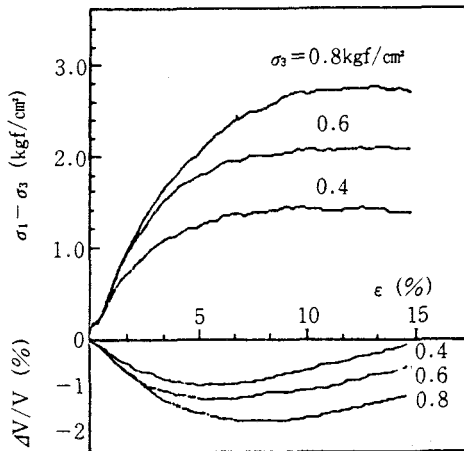
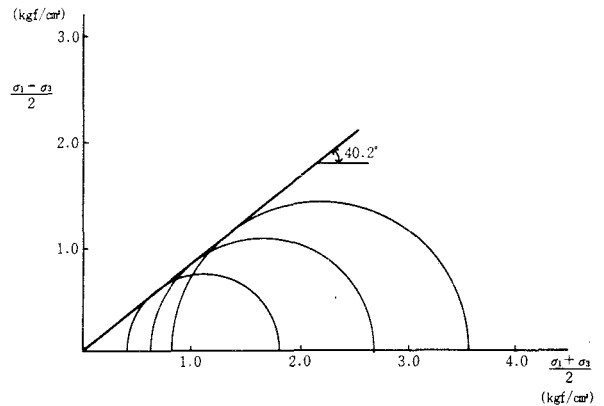


図-4 調査地域の粒径の加積曲線

図-5 試験地盤 ($e=0.54$) における、応力・ひずみ・体積変化曲線(試験地盤)図-6 モール・クローン破壊規準による破壊線
(試験地盤) (CD試験)

比も大きい。未風化のまき土は密度も大きく、間隙比が小さくなっており、よく性状が一致している¹³⁾。

(2)力学的試験

比較検討するためにいくつかの力学的試験を行った。試験地盤における三軸試験より強度定数を求めるため、間隙比を $e=0.67, 0.56, 0.54$ の三種類に設定した。図-5は密詰めの場合の $e=0.54$ 場合の応力・ひずみ・体積変化曲線である。側圧が大きくなるごとに応力・ひずみ・曲線が大きくなっている。またそれに伴って体積変化曲線も対応し拘束圧が大きくなると体積も大きく変化し、この場合、収縮しており、負のダイレイタンスが起きている。しかし、ひずみ量が7~8%付近から反転し、正ダイレイタンスが起きているのが分かる。図-6は(1)式のモール・クローンによる破壊基準より得られた破壊線を示す。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)/2 = c_d \cos \phi_d + (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \sin \phi_d \quad (1)$$

これより得られた土の強度定数は内部摩擦角 ϕ_d は 40.2° 、粘着力 c_d (kgf/cm²) は見られなかった。まき土等の砂質土の場合、圧密排水試験 (CD試験) が行われる。砂質土は粘土と異なり透水性が高い、

この性質が斜面等の地盤災害を起こさせる原因となっている。この事から砂試料の実験では飽和状態による排水実験を行いその強度定数をもって斜面等の施工設計を行う。先にも述べたように降雨浸透等により細粒土の流失、サクシンの消失により粘着力は無くなるため、飽和条件下では c_d は0に等しくなる¹⁴⁾。次に図-7は調査地域である大入地区の不攪乱試料から得た、応力・ひずみ・体積変化曲線である。側圧 σ_3 を0.8~1.2kgf/cm²とした。応力・ひずみ・曲線のピークと体積変化グラフの急激な体積膨張とよく一致し、正のダイレイタンシーがよく表れている。また、応力、ひずみ曲線グラフで、ひずみ硬化($\Delta\sigma/\Delta\epsilon > 0$)、ひずみ軟化($\Delta\sigma/\Delta\epsilon < 0$)現象がよく表れている。また、いずれの場合も側圧が大きいと応力も体積変化も大きい。図-8はモール・クーロンによる破壊線を示す。内部摩擦角 ϕ_d は47.6°、粘着力 c_d は0.15kgf/cm²と僅かに見られた。図-9は間隙比における破壊強度線の相違を表したものである。試験地盤の間隙比の最も小さい地盤の破壊強度線が大きな勾配を持ち強度定数である内部摩擦角が大きくなっている。いわゆる、密度が大きい地盤ほど土の強度が大きい

と言える。図-10は調査地域全体で、強度定数である内部摩擦角 ϕ_d と間隙比 e との関係を見たものである。 ϕ_d が大きいほど e が小さくなっている。図-9の関係を客観的に確認できる。

図-11の(a), (b), (c)は室内一面せん断試験の

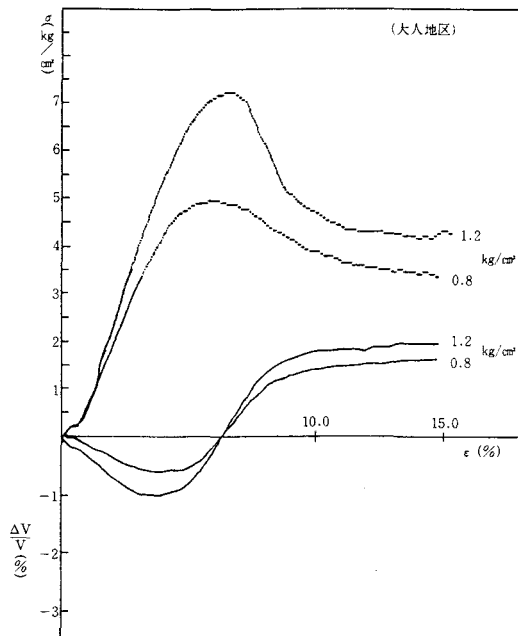


図-7 応力・ひずみ・体積変化曲線（大入地区）

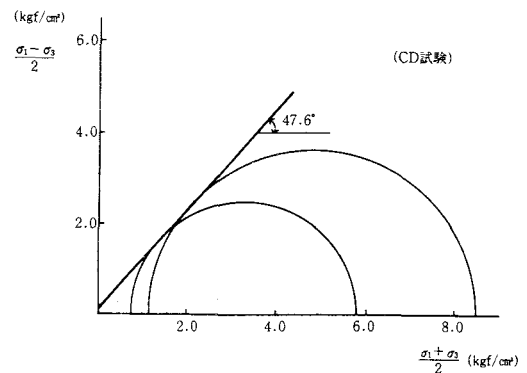


図-8 モール・クーロンによる破壊線
(大入地区) (CD試験)

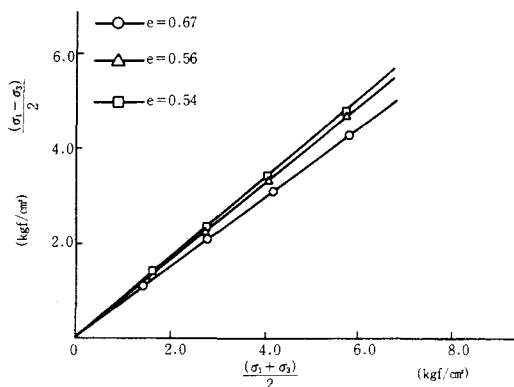


図-9 まさ土の破壊強度線（不攪乱）、(試験地盤)

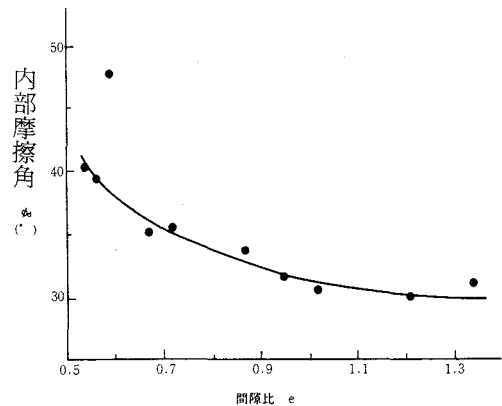


図-10 調査地域全体での ϕ_d と e の関係

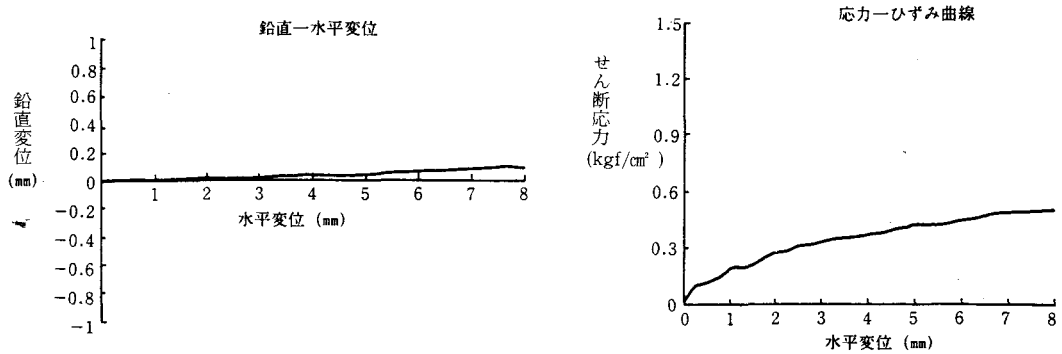


図-11(a) 室内一面せん断試験
応力・水平変位, 鉛直変位・水平変位の関係 (拘束圧 0.5 kgf/cm^2) (宮原地区)

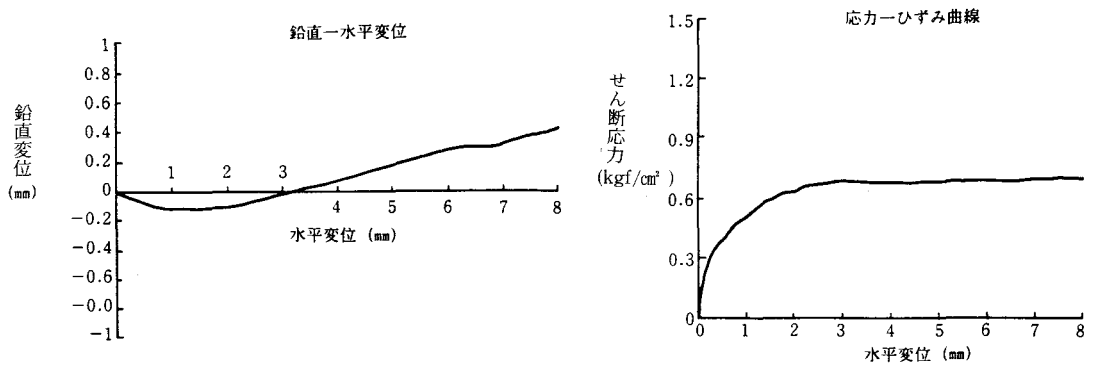


図-11(b) 室内一面せん断試験 (拘束圧 0.75 kgf/cm^2) (宮原地区)

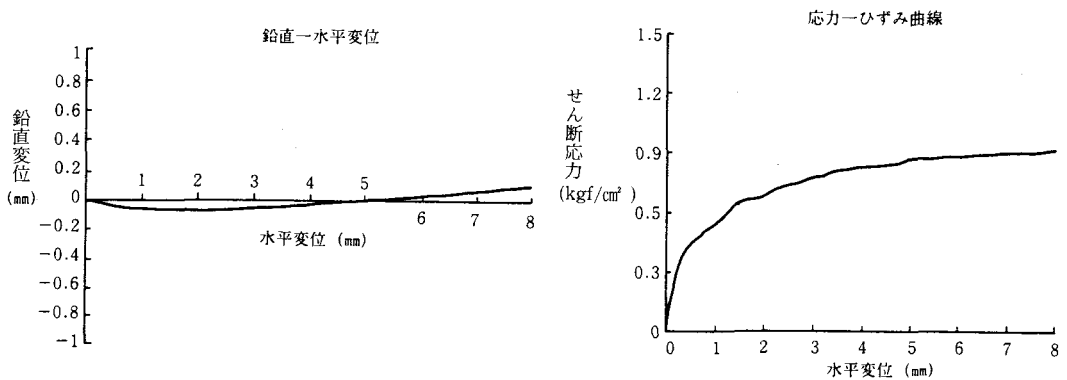


図-11(c) 室内一面せん断試験 (拘束圧 1.0 kgf/cm^2) (宮原地区)

結果である。不攪乱試料を12時間の水浸後拘束圧により1時間圧密した。(a)は 0.5 kgf/cm^2 により応力・水平変位関係, 及び鉛直変位・水平変位関係を示す。(b)は 0.75 kgf/cm^2 場合, (c)は 1.0 kgf/cm^2 の場合である。応力・水平変位関係は拘束圧が大きくなるに従って最大せん断応力 $0.5, 0.75, 0.9 \text{ kgf/cm}^2$ と増加している。鉛直変位・水平変位関係はいずれの場合も体積変化は正のダイレイタンスを示している。間隙比 $e=0.87$ である。図-12は図-11で得られた値を, せん断応力と垂直応力 (拘束圧) の関係に

プロットしたものである。内部摩擦角 $\phi_d 39^\circ$ ，粘着力 c は 0.1003 kgf/cm^2 である。

図-13の(a), (b)は大型現場一面せん断試験の結果である。縦×横×高さを $25 \times 25 \times 14 \text{ cm}$ に型枠を使って取り，十分給水し湿潤状態で行った。

(a)は拘束圧 0.1 kgf/cm^2 における応力・水平変位関係であり，(b)は鉛直変位・水平変位関係である。最大せん断応力は 0.25 kgf/cm^2 であり水平変位 15 mm 付近から正の鉛直変位となり体積膨張を示している。

図-14に破壊線を示す。内部摩擦角 ϕ_d は 43° ，粘着力 c は 0.178 kgf/cm^2 である。

表-2にせん断試験の結果をまとめる。内部摩擦角について各々のせん断試験を比較すると，大入地区，見晴地区，宮原地区が室内一面せん断値で 44° ， 38° ， 39° となり，三軸試験値で 32° ， 34° ， 31° で大型現場一面せん断値は一部のデータであるが見晴地区で 37° ，宮原地区で 37° となり各々のせん断試験結果に大きな相

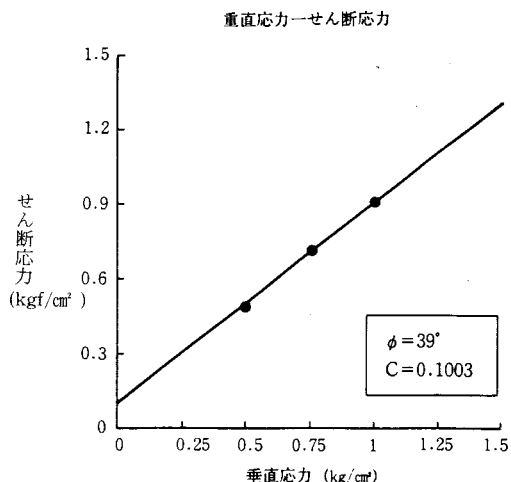


図-12 室内一面せん断試験の強度定数 (宮原地区)

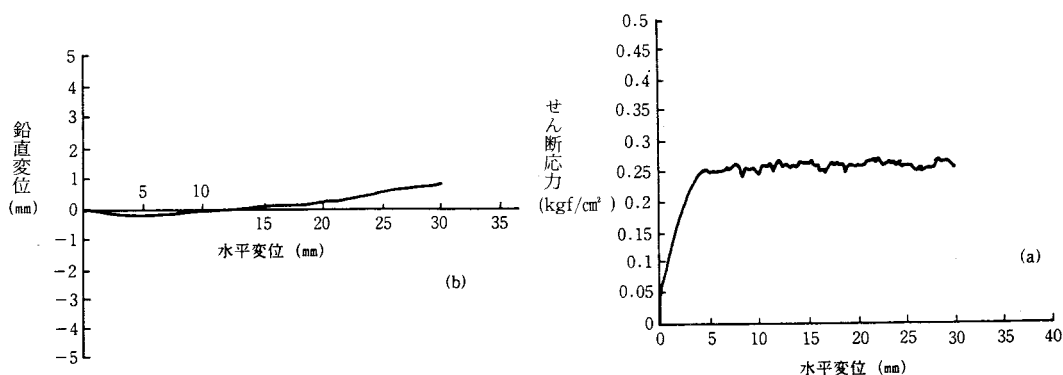


図-13 現場一面せん断試験の結果 (宮原地区)(a)(b)

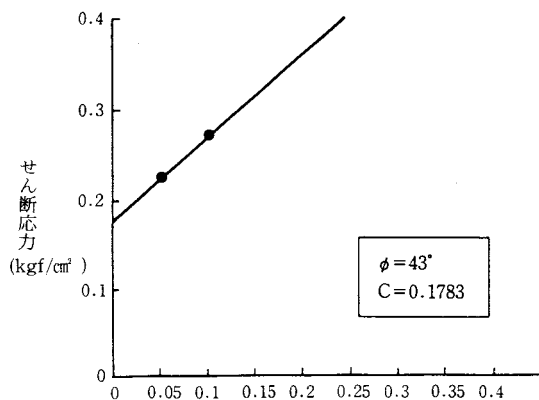


図-14 現場一面せん断試験の強度定数 (宮原地区)

表-2 内部摩擦角と粘着力の比較表 (飽和)

現場名称	一面せん断試験 (現場)		一面せん断試験 (室内)		三軸圧縮試験	
	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kg/cm ²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kg/cm ²)	内部摩擦角 (°)	粘着力 (kg/cm ²)
試験地盤	43	0.1062	41 (43)	0.0294 (0.0559)	38	0
ハンドボール場横	37	0.0561	35 (40)	0.0617 (0.0706)	36	0
大 入	—	0.0527	44 (32)	0.0678 (0.4973)	32	0
惣 付	—	0.2820	36 (35)	0.1104 (0.4709)	30 (30)	0 (0.01)
阿 賀 北	—	0.1028	32 (32)	0.2018 (0.4046)	31 (32)	0.06 (0.10)
宮 原	43	(0.1783)	39 (40)	0.1003 (0.6092)	31 (36)	0 (0.03)
見 晴	37	0.1334	38 (38)	0.1855 (0.2383)	34 (36)	0 (0)

() 内の数値は、不飽和の時の値である。

違はみられず同様の傾向がみられた。

同時に行った不飽和試験でも見晴地区、宮原地区は飽和試験とほぼ同じ傾向がみられたが大入地区については試料にばらつきがみられた。惣付地区、阿賀北地区は表のように若干低い値となった。やはり大型現場一面せん断値と、他の力学的試験で同じ傾向がみられた。これらは物理試験の粒径加積曲線からみた地区別の傾向とも一致した結果となっている。

(3)根系と土塊引張試験

根系試料を取った、まき土の物性値と強度定数を表-3、及び表-4に示す。原位置地盤は5ヶ所で行い、 $e=0.88\sim1.58$ 、初期含水比 $W_0=14.2\sim28.8\%$ 、乾燥密度 $\rho_d=1.22\sim1.42$ 、比重 $G_s=2.58\sim2.62$ 、 $U_c=70\sim375$ であった。三軸試験で得た強度定数で $\phi_d=30.2\sim43.2^\circ$ 、 $C_d=0$ である。

表-3 原位置地盤の物性値

	W_0 (%)	W (%)	γ_d (gf/cm ³)	U_{10}	U_c	G_s
試験地盤	7.6	15.6	1.66	0.074	27	2.613
大入地区	16.3	33.3	1.39	0.010	100	2.589
宮原地区1	17.8	33.6	1.38	0.0009	78	2.592
宮原地区2	28.8	53.8	1.22	0.005	240	2.581
見晴地区1	18.0	28.2	1.42	0.002	375	2.616
見晴地区2	14.2	24.2	1.26	0.016	70	2.619

表-4 原位置地盤の強度定数

	e	飽 和		不飽和	
		ϕ_d (°)	C_d (kgf/cm ²)	ϕ_d (°)	C_d (kgf/cm ²)
1) 試験	0.60	35.9	0	35.6	0.17
2) 大入	0.86	30.8	0	31.5	0.10
3) 宮原1	0.88	43.2	0	37.0	0.13
4) 宮原2	1.12	30.2	0	29.4	0.20
5) 見晴1	0.88	39.5	0	38.0	0.02
6) 見晴2	1.08	32.8	0	33.5	0.12

写真-3 は大型現場一面せん断試験後に得たまさ土試料を洗い出し根系選別し、10種類程度に分けた。根系の引張強度と根含率がせん断試験に影響を与えと考えられ、室内一面せん断の値にその傾向がある。図-15, 16, 17, 18, 19は根含率と強度定数の関係である。根含率が高くなると粘着力 C_d が大きくなる。又、飽和試験と不飽和とで値に差がみられ、不飽和の場合の方が、大きな値となり、

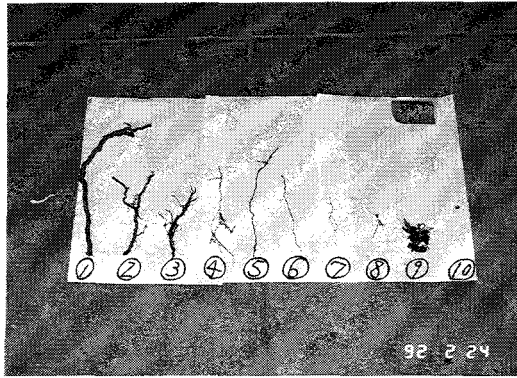


写真-3 大型現場せん断試験 試料より出た根系

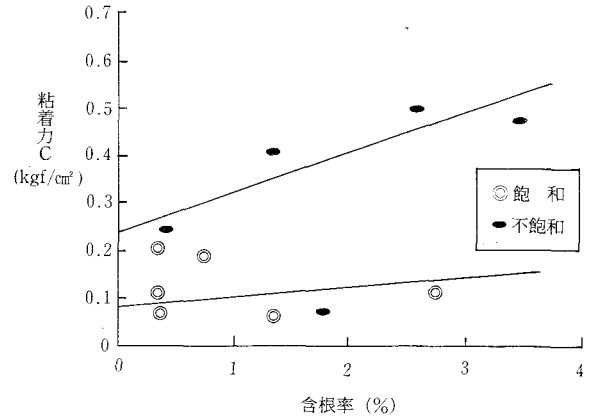


図-15 粘着力と根含率の関係（室内せん断試験）

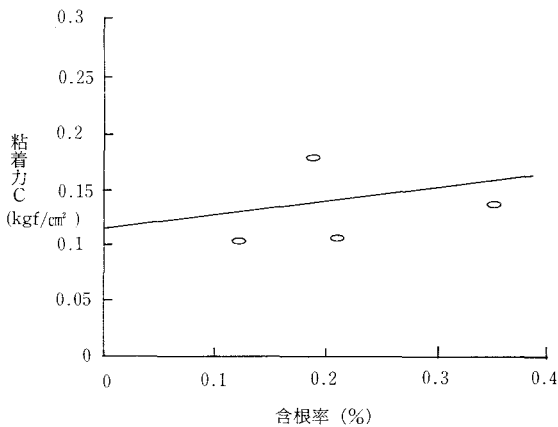


図-16 粘着力と根含率の関係（現場せん断試験）

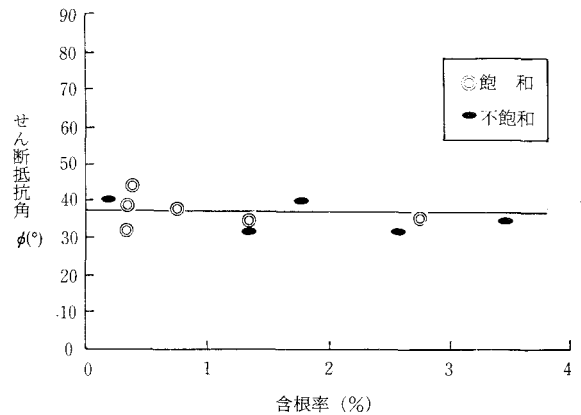


図-17 せん断抵抗角と根含率の関係（三軸圧縮試験）

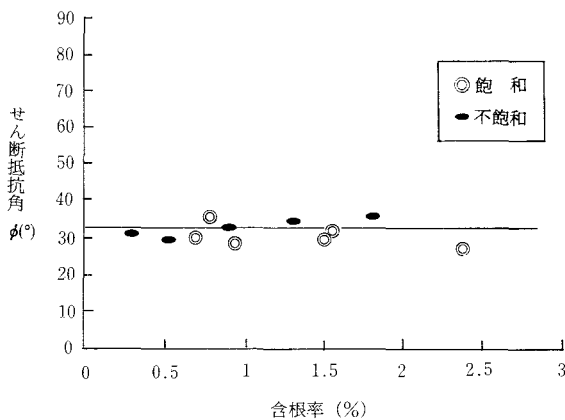


図-18 せん断抵抗角と根含率の関係（室内せん断試験）

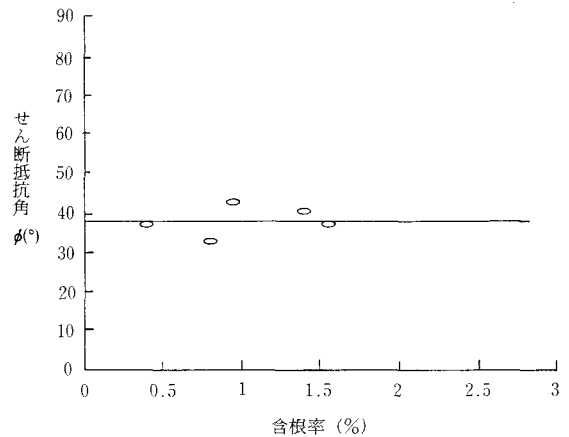


図-19 せん断抵抗角と根含率の関係（現場せん断試験）

根の摩擦が作用している事がわかる。しかし、せん断抵抗角 ϕ_d には変化は見られない。

原位置での大型現場一面せん断試験後の根系を選別し上記の方法で引張試験を行った。図-20に引張力と根径を示す。根径が大きくなると引張力も増大する事がわかる。また図-21に引張強度と根径系の関係を示す。ここで、根径が小さいものは強度に換算するため値が大きくなる事がわかる。

次に土塊の最大引張強度と含根率、及び含水比の関係について、原位置から取った板状(縦×横×厚 25×35×10cm)のまさ土不攪乱試料に、十分給水させ引張試験を行った。図-22に引張強度と含根率を見ると最大引張強度は宮原地区の資料で83gf/cm²である。含根率が高いほど、強度も増加している。原位置により含根率に差がある事が分かる。表-4、表-5から宮原地区〔2〕は強度 ϕ_d が小さく、Cdが比較してやや大きい。このような砂質シルトでは含根率が高いように思われる。図-23の含水比との関係ではデータ数が不足しているが含水比が大きいと見かけの粘着力の減少により引張強度は小さくなると思われる。又、抜根強度と含水比の関係については課題として残る。

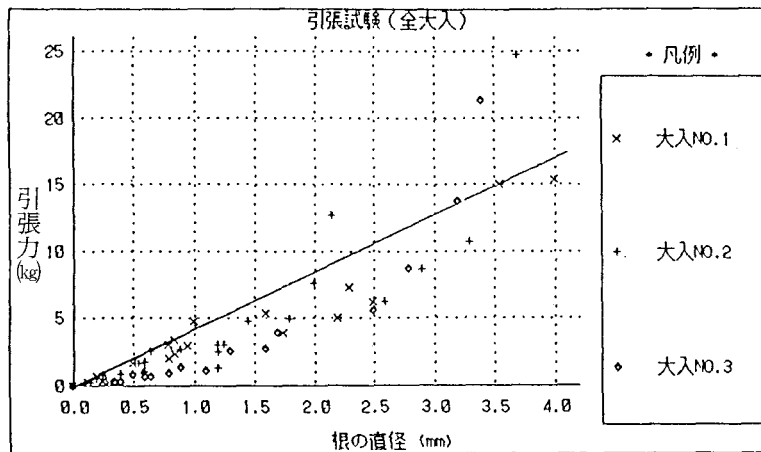


図-20 大入地区における根の直径と引張力の関係

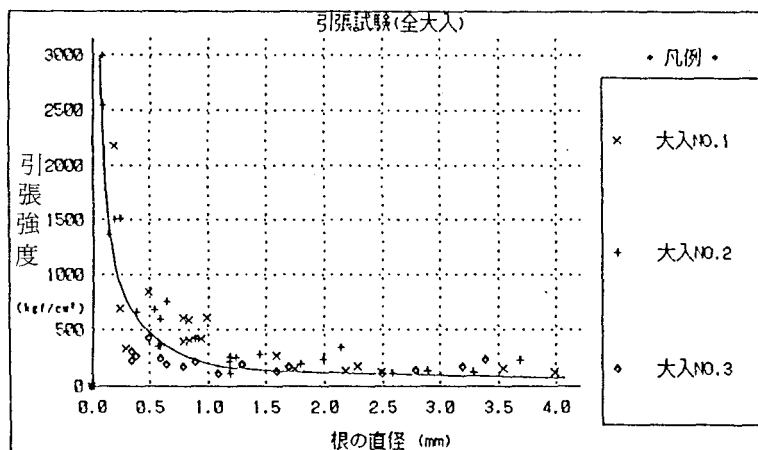


図-21 大入地区における根の直径と引張強度の関係

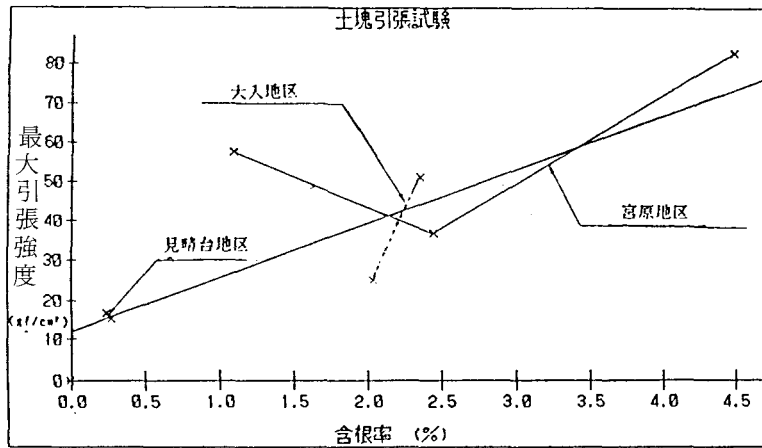


図-22 土塊の最大引張強度と含根率の関係

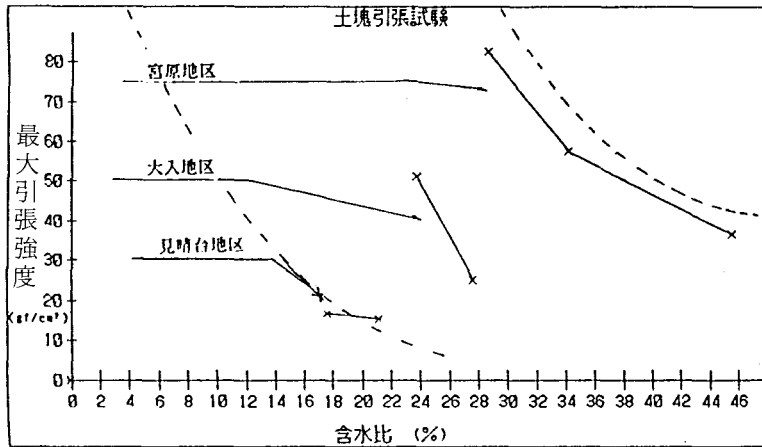


図-23 土塊の最大引張強度と含水比の関係

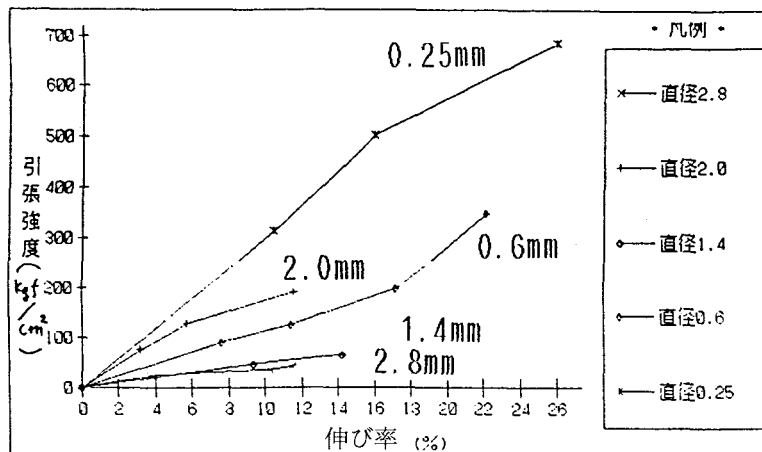


図-24 根系の引張強度と伸び率の関係

表-5 土の強度試験の結果 (飽和状態)

	大型現場一面せん断試験		三軸圧縮試験		土の引張り試験
	$\phi(^{\circ})$	$C(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	$\phi_d(^{\circ})$	$C_d(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	最大引張り強度(gf/cm^2)
標準砂	—	—	35.0(33.2)	0(0.02)	—
実験地盤No1	63	0.0110	36.0(35.0)	0(0.19)	—
実験地盤No2	—	—	35.8(36.2)	0(0.14)	—
大入地区No1	52	0.130	31.6(34.0)	0(0.11)	平均 38.14
大入地区No2	—	—	30.0(29.0)	0(0.09)	{ 51.20 25.08
宮原地区No1	58	平均 0.143	43.2(37.0)	0(0.13)	平均 59.8
宮原地区No2	37	{ 0.173 0.113	30.2(20.4)	0(0.20)	{ 36.86 82.74
見晴地区No1	43	平均 0.199	39.5(38.0)	0(0.02)	平均 16.06
見晴地区No2	32	{ 0.087 0.151	32.8(33.5)	0(0.12)	{ 15.36 16.76

※ () 内は不飽和試験

図-24の引張強度と伸び率の関係では根の直径が小さいほど、伸び率は大きい。なお、伸び率が全体的に大きく出ているのは、根系は屈曲部が多く載荷が進行するにつれ直線形状になる事と試料と挟込み部(チャック)とで若干の滑りも考えられる。また図-21の結果と同様に径が大きいほど、強度は低くなっている。

4. まとめ

まき土のせん断特性、及び根系により補強されたまき土の強度について検討した。その成果を要約すると次の通りである。

- 1) 根系による土の補強機構を力学的に検討すると、室内試験および現地試験からは、根系による補強効果はほぼ粘着力 c の増加として現れ、せん断抵抗角 ϕ との関連はみられなかった。
- 2) 補強効果の見られた粘着力 c と含根率の関連について、飽和状態と不飽和状態とを比較すると、不飽和状態の方が強度増加が大きい。
- 3) 根系の引張力と根の直径の関係は比例的に増加している。又、引張強度と直径の関係では反比例的な関係となり、径の増加とともに強度が低下し、径1mmまで急激な低下がみられる。
- 4) 根系を含む土塊引張試験において、最大引張強度と含根率の関係では、含根率の増加とともに強度も増えている。

又、含水率と強度の関係では反比例的な傾向がみられる。

最後に本研究を遂行するにあたり試験機の製作にあつては、呉高専・実習工場の山根光夫係長、宅明紘一技官に大変な協力いただいた事に感謝致します。

又、現場実験、及び室内試験を行うにあたり、卒業研究生であった有田哲也(室蘭工大)、垣内哲弘(東広島市)、中島英司(地域振興整備公団)、古田賢司(西松建設)、山田一臣(群馬大学)岩本敬照(広島ガス)、木曾忠幸(福井大学)、坂田智己(大阪大学)、末永宏之(不動建設)各氏の多大な協力を得た事を記して、感謝します。

尚、本研究の一部は平成4年度特定研究費によって行われた事を謝して付記する。

<参考文献>

- (1) 陶山正憲・原敏男：樹木根系の工学的評価に関する実験的研究Ⅰ，一木質根系の引張強度特性について—昭和61年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 246～249，1986.
- (2) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔・大塚俊二・牛尾 充：根系による砂質土の補強機構と強度特性，第27回土質工学研究発表会講演集，pp. 1865～1866，1992.
- (3) 中根周歩・中川勝範・高橋史樹：アカマツ根の山火枯死・腐朽に伴う引っ張り強度の低下，日本林学会誌65(5)，pp. 155～165，1983.
- (4) 北村嘉一・難波宣士：樹根の抵抗力に関する現地試験Ⅱ，第79回日本林学会大会講演集，pp. 360～361，1968.
- (5) 岩本賢・阿部和時：苗畑におけるスギの抜根試験結果Ⅱ，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集第3部，pp. 159～160，1983.
- (6) 遠藤泰造・鶴田武雄：樹木の根が土のせん断強さに与える作用（第一報），林業試験場北海道支場年報（1968）pp. 167～182，1968
- (7) 高橋敏男：森林の山崩れ防止機能に関する研究，静岡大学農学部研究報告，No18，pp. 85～101，1968.
- (8) 岩本賢・阿部和時：大型現地一面せん断試験による樹木根系を含む土層のせん断強度特性Ⅱ，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第3部，pp. 607～680，1986.
- (9) 八木則男・榎 明潔・矢田部龍一・岡山 孝：根系を含むまさ土のせん断特性，第22回土質工学研究発表会，pp. 1515～1516，1987.
- (10) 塩田耕司・八木則男・二神 治・榎 明潔・大塚俊二・小堀慈久：根系により補強された土の現地せん断特性，第28回土質工学研究発表会，pp. 2119～2120，1993.
- (11) 小堀慈久・有田哲也・古田賢司・中島英司：現場一面せん断強さと根系の関係について，第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp. 320～ 321，1992.
- (12) 畑土質工学会：風化残積土に関するシンポジウム発表論文集，pp. 85～212，1988.
- (13) 河野・八木・吉国：土の力学，技報堂出版，pp. 117～138，1991.
- (14) 八木則男・矢田部龍一：不攪乱まさ土のせん断特性と微視的考察，土木学会論文集，第364号，pp. 131～141，1985.

（平成5年11月22日受付）

鉄筋コンクリート耐震壁の終局耐力解析

(建築学科) 福 原 安 洋
(豊橋技術科学大学) 斎 藤 透

Ultimate Strength Analysis of Reinforced Concrete Shearwall

Yasuhiro FUKUHARA
Toru SAITO

The ultimate strength of reinforced concrete shearwall was analyzed by limit analysis theory using macromodel.

As the theory to analyze reinforced concrete shear members, Shohara's theory is used to get the ultimate shear strength. But this theory can be applied only to shearwalls with lateral-vertical reinforcing.

In this report the analyzing model by Shohara's theory was modified to apply to shear walls with diagonal reinforcing. This modified model was made by changing the shear resisting system of shear reinforcing by Shohara's model into the shear resisting diagonal bracings system.

These two analyzing models were compared with the results of tests.

After discussing the ultimate shear strength values by two analyzing models and the results of tests, it was showed that the analyzing with modified model was better agreed with test-results than Shohara's model in case of the shear wall with diagonal reinforcing.

§ 1 耐震壁の斜め配筋とマクロモデルによる解析について

耐震壁の耐力算定については、曲げ破壊やコンクリートせん断破壊などの破壊メカニズムについては後述する様々な解析法が発表され、かなり明らかになっている。しかしながら壁筋の補強効果については、そのメカニズムは複雑であり、不明な点が多く、特に壁筋を斜めに配した場合の考察は少ない。しかしながら、著者らの実験^{1,2)}によると、壁筋を45°方向などの斜め補強した場合は、一般的な補強方法である縦横配筋(0°と90°)の場合より、耐力が大きいうことが明らかである。

そこで本報告は、壁筋の補強効果について解析的な検討を行った。

耐震壁の最大耐力の計算には、①実験式②マクロモデルによる解析③ミクロモデル(FEM解析)による解析など多くの方法が提案されている。このうち①の実験式による方法には、広沢³⁾による方法があり、耐力推定に高い評価が得られている。

しかし、耐震壁を構成する材料強度や形状などの構成要素とこれらに起因する様々な破壊性状に対応するには、理論的な解析法が望ましく、これらには②のマクロモデルを用いたものが、いくつか発

表されている。また、③のマイクロモデルによるものは、応力分布の把握などには有効であるが、多くの計算機メモリーを必要とし、せん断耐力の負担機構を簡明に説明するには適していない。

本報告では、②のマクロモデルを用いた方法で耐震壁の負担機構の解析を試みる。

マクロモデルを用いた既往の研究には、称原⁴⁾、白石⁵⁾、南⁶⁾、塩原⁷⁾などによるものがあるが、いずれも縦横配筋を対象としており、本報告の対象とする壁板部を斜め配筋した耐震壁に対しては、壁筋のせん断耐力機構が異なるものである。そこで本報告では、壁筋の効果を分離できる称原の理論式をもとに、斜め配筋の効果を表せるよう修正したモデルを用いて解析し、実験結果と比較した。

§ 2 解析対象、および解析方法

2. 1 解析対象

解析の対象とする耐震壁は、前述の著者等が行った試験体である。その形状を図1に、また材料等を表1に示す。また、実験方法を図2に、実験の結果を、表2に示す。なお、斜め配筋のせん断補強筋比 ($p_w = a_w / (t \cdot \chi)$) は、鉄筋間距離を χ として求めた。

2. 2 解析方法

外力は図3のように想定した。また、本研究の解析対象の試験体では、 $k = 0.05 \sim 0.13$ である。

解析モデルは、図4、5、6に示す称原の解析モデルを基本にしている。

すなわち、このモデルでは、耐震壁のせん断耐力抵抗は、壁筋によるトラス作用によるもの (Q_w) と壁板コンクリート部分の圧縮ストラットによるアーチ作用によるもの ($t \cdot Q$) の和 ($Q_w + t \cdot Q$) によって表される。

しかしながら、斜め配筋をした耐震壁では、以下の2点が当てはまらない。

①斜め配筋の引っ張り方向筋は、直接側柱あるいは、梁などに定着されるので、圧縮ストラット断面の負担にならず、壁筋のトラス作用メカニズムのための壁板厚の低減の必要がない。

むしろ、斜め配筋の場合には、圧縮ストラット断面に対する強度の累加により壁厚の割り増しも場合によっては可能であると考えられる。

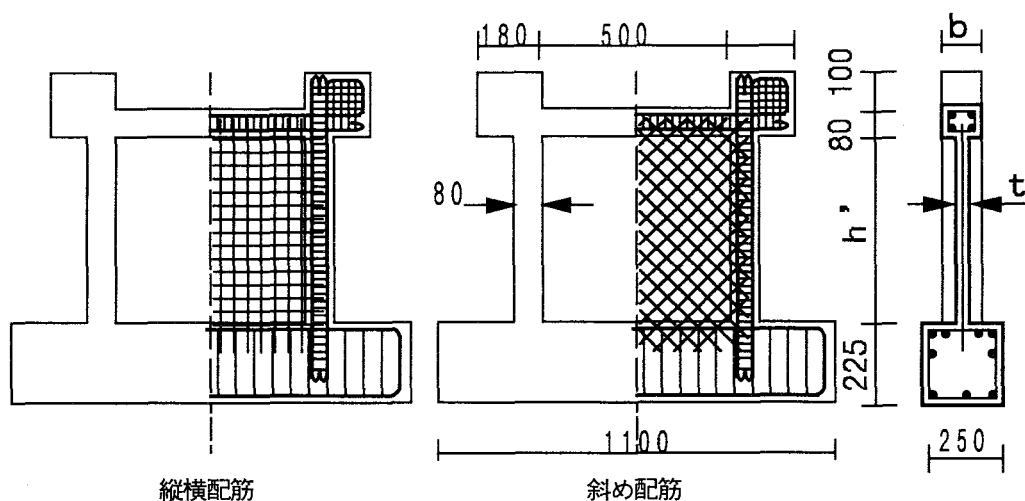


図1 試験体の形状

表 1 解析対象の試験体一覧表

試験体名	配筋 角度 (°)	せん 断ス パン 比 M/Qd	柱						壁板				コン クリ ート強 度 (F _c) kg/ cm ²
			断面		配筋				壁厚 t cm	配筋			
			b cm	D _c cm	主筋	p _s %	$\omega \sigma_s$ t/ cm ²	p _w %		壁筋	p _s %	$\omega \sigma_s$ t/ cm ²	
84-HV-1	0	1	10	8	6-D6	2.38	3.79	20.4	3.5	2-3.2φ@40	1.14	3.17	278
85-HV-3	0	1.5	10	8	10D6	4.00	3.32	21.8	3.5	2-3.2φ@40	1.14	5.63	245
86-HV-2	0	1.0	10	8	6-D6	2.38	3.33	17.0	3.5	2-3.2φ@40	1.14	2.01	289
88-HV	0	0.5	10	8	6-D6	2.38	3.33	30.5	3.5	2-3.2φ@40	1.15	2.01	325
89-HV-1	0	0.5	8	8	6-D6	3.00	3.77	37.7	1.5	2.6φ@40	0.88	6.33	614
90-HV-2	0	0.5	8	8	6-D6	3.00	3.77	28.8	2.0	2.6φ@40	0.66	6.33	664
84-D-1	45	1.0	10	8	6-D6	2.38	3.79	15.5	3.5	2-3.2φ@40	1.14	3.17	278
85-D-2	45	1.5	10	8	10D6	4.00	3.32	14.3	3.5	2-3.2φ@40	1.14	5.63	245
86-D-2	45	1.0	10	8	10D6	4.00	3.33	24.7	3.5	2-3.2φ@40	1.14	2.01	289
88-D	45	0.5	10	8	6-D6	2.38	3.33	31.0	3.5	2-3.2φ@40	1.15	2.01	325
89-D-1	45	0.5	8	8	6-D6	3.00	3.79	36.6	1.5	2.6φ@40	0.88	6.33	614
90-45-2	45	0.5	8	8	6-D6	3.00	3.79	29.7	2.0	2.6φ@40	0.66	6.33	664
90-30-2	30	0.5	8	8	6-D6	3.00	62.9	26.3	2.0	2.6φ@40	0.66	6.33	664

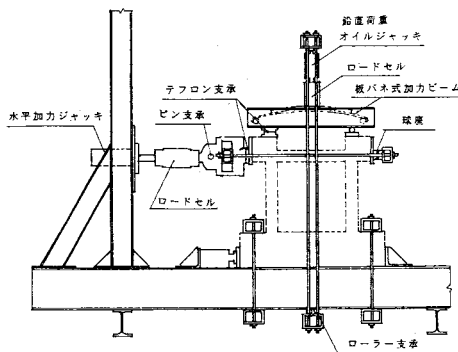


図 2 加力装置

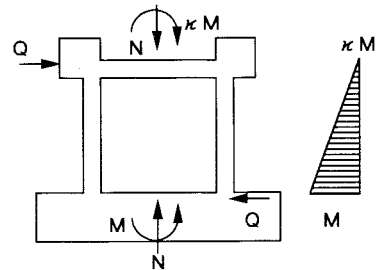


図 3 想定外力

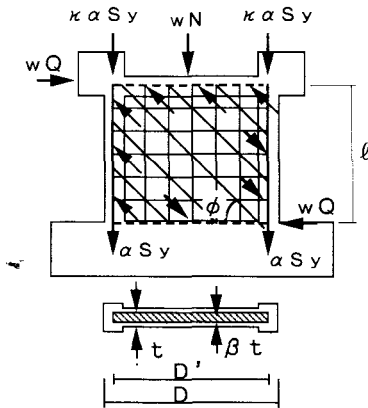


図4 セン断補強のシステムの
釣合モデル

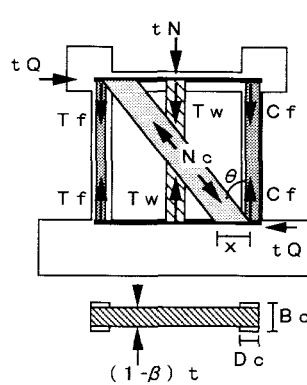


図5 圧力場の釣合モデル

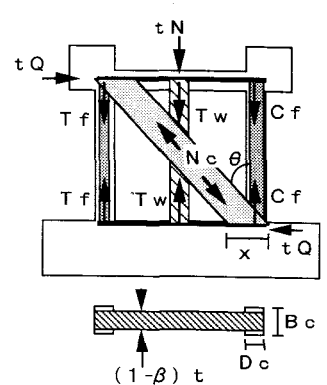


図6 圧力場の釣合モデル
($\chi + l \tan \theta \geq 0$ の場合)

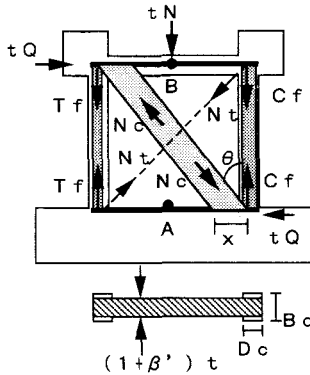


図7 斜め配筋のための圧力場の
釣合モデル
(修正モデル)

$$\beta' = 0$$

と仮定した。

②引張方向壁筋の引張力を対角線ブレース力 (N_t) = $p_w \cdot w \cdot \sigma_y \cdot t \cdot D$ とする。また、称原式の終局状態の形を基本的に変更しないために、このブレース力は終局時には、必ず降伏しているものとし、モデルの釣合機構に考慮するため、釣合式には外力として扱う。

③柱主筋耐力 (S_t) = $p_g \cdot b \cdot D_c \cdot \sigma_y$ 、柱圧縮耐力 (C_o) = $(b - t) D_c \cdot F_c$ とする。

④壁筋の鉛直方向の負担は考慮しない。 ($T_w = 0$)

⑤②における仮定から、水平耐力は、 $Q = t \cdot Q$ となる。

以上を考慮して、図7において、以下の釣合式が得られる。

ただし、 $s = \sin \theta$, $c = \cos \theta$, $\gamma = D'/D$ とする。

鉛直方向の力の釣合より、

$$tN + T_t + C_t + N_t \cdot s = N_c \cos \theta$$

水平方向の釣合より、

②曲げ変形機構から、曲げ回転の中心が圧縮柱脚部付近であると想定すると、圧縮ストラット方向の斜め配筋は曲げ回転に対して抵抗できない。

そこで、斜め配筋壁の場合、以下のように、解析モデルに修正を加え、これを修正モデルと呼ぶ。そのモデルを図7に示す。

①圧縮ストラットの方向は、壁配筋角度とほぼ一致しているものとし、斜め配筋のせん断補強筋は圧縮方向に抵抗することを考慮し、壁厚の割り増しを行うことができる。また、割り増した壁厚は、次式で表される。

$$t' = (1 + \beta')t, \text{ ただし, } \beta' = p_w \cdot w \cdot \sigma_y / F_c$$

しかしながら、解析の対象とした耐震壁の壁板のように鉄筋の被り厚の小さい断面では、引張りびわれや、終局時においての鉄筋とコンクリートとの付着破壊等により強度の累加はないのが一般的と考えられるので、ここでは、

(1)

$${}_tQ = N_c \sin \theta + N_t \cdot c \quad (2)$$

B点におけるモーメントの釣合より

$$(T_f - C_f - N_t \cdot c)/2 = N_c \cdot \cos \theta (2l \tan \theta + \chi - D)/2 + K \cdot {}_tM \quad (3)$$

A点におけるモーメントの釣合より

$$({}_tQ - N_t \cdot c)l + N_t \cdot s(D'/2) = (1 - \kappa) {}_tM \quad (4)$$

コンクリートの圧縮耐力

$$N_c = t' \cdot F_c \cdot \chi \cos \theta, t' = (1 + \beta')t, \beta' = p_w \cdot \sigma_y / F_c \quad (5)$$

(1)~(5)式より, ${}_tQ$ は, 以下の式で表される。

$${}_tQ = \{ \lambda N_o' / (1 - \kappa) - N_t \cdot c \} \cdot \frac{\sqrt{\{ ({}_tN + T_f + C_f + N_t \cdot s) N_o' + (T_f - C_f - N_t \cdot s) \gamma \cdot N_o' + 2 \lambda \cdot N_o' \cdot N_t \cdot c / (1 - \kappa) - \kappa / (1 - \kappa) \cdot \gamma \cdot N_o' \cdot N_t \cdot s - ({}_tN + T_f + C_f + N_t \cdot s)^2 - N_t^2 \cdot c^2 \} / \{ \lambda \cdot N_o' / (1 - \kappa) - N_t \cdot c \}^2 + 1 - 1}}{1} \quad (6)$$

以後の解法および終局状態の形式は, 称原式の原式と同様になる。

すなわち, ${}_tQ$ は, T_f , C_f の境界で最大になるので,

$$-S_f - C_o \leq T_f, C_f \leq S_f$$

従って, ${}_tQ$ を最大とする耐震壁の終局状態は, コンクリートストラットが耐震壁内に納まる場合の5個の終局破壊形が得られる。

状態I (称原式では, 状態I)

$${}_tN \leq (1 - \gamma)/2 \cdot N_o' - 2S_f = N_1, \quad T_f = S_f, \quad C_f = S_f$$

状態II (称原式では, 状態II)

$$N_1 < {}_tN \leq (1 - \gamma)/2 \cdot N_o' + C_o = N_2, \quad T_f = S_f, \quad C_f = (1 - \gamma)/2 \cdot N_o' - S_f - {}_tN$$

状態III (称原式では, 状態III, IV, V)

$$N_2 < {}_tN \leq (1 + \gamma)/2 \cdot N_o' + C_o = N_3, \quad T_f = S_f, \quad C_f = -S_f - C_o$$

状態IV (称原式では, 状態VI)

$$N_3 < {}_tN \leq (1 + \gamma)/2 \cdot N_o' + 2S_f + 2C_o = N_4, \quad T_f = (1 + \gamma)/2 \cdot N_o' - {}_tN + S_f + C_o, \quad C_f = -S_f - C_o$$

状態V (称原式では, 状態VII)

$$N_4 < {}_tN, \quad T_f = -S_f - C_o, \quad C_f = -S_f - C_o$$

また, $\chi + l \tan \theta - D \geq 0$ の場合は曲げ破壊形になるが, この場合も図6に示すような極限状態のモデルにおいて,

鉛直方向の力の釣合より

$${}_tN + T_f + C_f + N_t \cdot s = N_c \cos \theta \quad (7)$$

B点におけるモーメントの釣合より

$$(T_f - C_f - N_t \cdot s)D' = N_c \cdot \ell \sin \theta + 2 \kappa \cdot {}_tM \quad (8)$$

A点におけるモーメントの釣合より

$${}_tM = N_t \cdot s \cdot (D'/2) + (T_f - C_f)D'/2 + N_c \cdot \ell/2 \cdot \sin \theta \quad (9)$$

コンクリートの圧縮耐力

$$N_c = (D - l \tan \theta)t' \cdot F_c \cdot \cos \theta \quad (10)$$

などから, 3つの破壊形に応じた終局耐力が得られる。

すなわち,

状態VI (称原式では, 状態IV)

$$\begin{aligned} {}_tQ &= N_o' (1 - \lambda \tan \theta) / (1 + \tan^2 \theta) + 1 / (2\lambda') \cdot N_t \cdot s + N_t \cdot c \\ \tan \theta &= (\lambda'' - \lambda) N_o' / 2 \{ {}_tN + 2S_t + (1 - 5\kappa) / 2(1 - \kappa) N_t \cdot s + \lambda \cdot \lambda'' \cdot N_o' \} \\ &\quad \cdot [1 + \sqrt{4 \{ {}_tN + 2S_t + (1 - 5\kappa) / 2(1 - \kappa) \cdot N_t \cdot s + \lambda \cdot \lambda'' \cdot N_o' \} \cdot} \\ &\quad \{ N_o' - {}_tN - 2S_t - (1 - 5\kappa) / 2(1 - \kappa) \cdot N_t \cdot s \} / \{ (\lambda'' - \lambda) N_o' \}^2 + 1 }] \end{aligned}$$

状態VII (称原式では, 状態VII)

$$\begin{aligned} {}_tQ &= N_o' / 2 \cdot \{ \sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda \} + 1 / (2\lambda') \cdot N_t \cdot s + N_t \cdot c \\ \tan \theta &= \sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda \end{aligned}$$

状態VIII (称原式では, 状態VIII)

$$\begin{aligned} {}_tQ &= N_o' (1 - \lambda \tan \theta) / (1 + \tan^2 \theta) + 1 / (2\lambda') \cdot N_t \cdot s + N_t \cdot c \\ \tan \theta &= (\lambda'' - \lambda) N_o' / 2 \{ {}_tN - 2(S_t + C_o) - (1 + 3k) / 2(1 - k) \cdot N_t \cdot s - \lambda \cdot \lambda'' \cdot N_o' \} \\ &\quad \cdot [\sqrt{4 \{ N_t - 2(S_t + C_o) - (1 + 3k) / 2(1 - k) \cdot N_t \cdot s - \lambda \cdot \lambda'' \cdot N_o' \} \cdot} \\ &\quad \{ N_o' - {}_tN + 2(S_t + C_o) - (1 + 3k) / 2(1 - k) \cdot N_t \cdot s \} / \{ (\lambda'' - \lambda) N_o' \}^2 + 1 }] \end{aligned}$$

これらの式による修正モデルの解析の具体的な方法は, 文献(4)に示す称原モデルと同様であるので, ここでは省略する。

ただし, 式に用いた記号は以下の通りである。

<記 号>

- B_c : 側柱の幅
- c : $\cos \phi$
- C_t : 圧縮弦材応力
- C_o : 側柱の壁より出た部分のコンクリート圧縮応力
- D : 壁の全せい
- D' : 側柱主筋の重心間距離
- D_c : 側柱のせい
- F_c : コンクリート圧縮強度
- l : 壁高さ
- ${}_tM$: 曲げモーメント
- N : 軸力
- N_c : コンクリートストラット圧縮応力
- N_t : 斜め配筋の全壁筋の引っ張り降伏耐力
- N_o' : 鉄筋断面を等価させた壁のコンクリート圧縮耐力
- p_w : 壁せん断補強筋比
- Q : せん断力
- ${}_tQ$: 釣合モデルの負担水平せん断力
- Q_w : $p_w \cdot {}_w \sigma_y$
- s : $\sin \phi$
- S_t : 柱主筋引っ張り降伏耐力
- T_t : 引っ張り弦材の応力
- t : 壁厚
- κ : コンクリートストラットの水平幅

β : せん断補強のシステムに用いられるコンクリートの必要壁厚と実際の壁厚の比

β' : 斜め配筋のコンクリートへの換算壁厚と実際の壁厚の比

γ : D'/D

κ : 壁上端の下端に対するモーメント比

λ : l/D

λ' : l/D'

表2 計算値と実績値の比較

試験体名	配筋 角度 (°)	計算値 (t)							実験 値 (t)	比較		
		称原モデル			修正モデル			広沢式		TQ/ CQ ₁	TQ/ CQ ₂	TQ/ CQ ₃
		θ	χ	CQ ₁	θ	χ	CQ ₂					
84-HV-1	0	39.9	24.5	11.7	-	-	-	12.3	12.2	1.04	-	0.99
85-HV-3	0	30.5	19.7	10.7	-	-	-	12.9	13.4	1.24	-	1.04
86-HV-2	0	42.4	20.5	10.3	-	-	-	11.6	14.1	1.36	-	1.22
88-HV	0	54.1	30.7	16.6	-	-	-	14.8	16.8	1.01	-	1.14
89-HV-1	0	49.6	36.2	16.5	-	-	-	15.1	16.5	1.00	-	1.09
90-HV-2	0	55.0	29.5	18.4	-	-	-	17.0	17.9	0.97	-	1.05
84-D-1	45	39.9	24.5	11.7	42.4	26.1	15.3	12.3	14.2	1.21	0.93	1.15
85-D-2	45	30.5	19.7	10.7	28.0	32.4	14.4	12.9	14.6	1.36	1.04	1.14
86-D-2	45	38.3	27.0	13.3	39.7	28.2	17.0	12.5	19.5	1.47	1.14	1.56
88-D	45	54.1	30.7	16.6	56.3	33.3	20.7	14.8	19.6	1.20	0.96	1.33
89-D-1	45	49.6	36.2	16.5	52.4	40.6	21.2	15.1	18.0	1.09	0.85	1.19
90-45-2	45	55.0	29.5	18.4	56.9	32.2	22.6	17.0	18.7	1.01	0.83	1.10
90-30-2	30	55.0	29.5	18.4	57.0	30.4	20.8	17.0	19.0	1.03	0.91	1.12

$$\lambda'' : \frac{1+x}{1-x}$$

$$\theta : \text{圧力場の傾き}$$

$$r\sigma_y : \text{柱主筋の降伏応力度}$$

$$w\sigma_y : \text{壁筋の降伏応力度}$$

§ 3 解析結果とその検討

以上の称原式を修正したモデルによる解析法を本実験での縦横配筋の試験体 6 個と斜め配筋の試験体 7 個（うち、45° 配筋 6 個、30° 配筋 1 個を含む。）に適用して計算した結果を表 2 に示す。また、この表には、称原式による解析結果と、実験結果、およびこれらの比較、さらに前述した実験式である広沢式による計算値を示した。広沢式を以下に示す。

$$Q_u = \{0.0679p_e^{0.23}(F_c + 180)/\sqrt{M/QD + 0.12} + 2.7\sqrt{p_w\sigma_y} + 0.1N/(b_e \cdot D)\}b_e \cdot j$$

称原モデル、あるいは、修正モデルの場合は、いずれの試験体の場合も曲げ破壊耐力（状態Ⅱ、Ⅳ、Ⅷ）によって終局耐力が決まっているが、せん断破壊耐力（状態Ⅲ）の値とも近似しており、ほぼ同時と考えられる。

まず、称原モデルによる解析結果と実験値との関係を図 8 中に、縦横配筋のものを▲印で、斜め配筋のものを●印で示す。

この図より、縦横配筋のものは、計算値と実験値の対応がよいが、斜め配筋のものは、計算値が下回っている。このことは、広沢式と比較しても同様である。これらのことより、斜め配筋の場合には、縦横配筋の場合とは異なったせん断力負担機構を考える必要のあることを示している。

また、実験値、あるいは実験式である広沢式に対し、称原モデル、あるいは修正モデルの場合は、せん断スパン比の大きい（ l/D が大きい）試験体ほど実験値/計算値の値が大きくなっている。これは、壁板部のせん断応力度の度合いが増しひび割れや付着破壊の度合いが大きくなることによるものと考えられる。すなわち、称原モデルでは、壁板部分のひび割れや付着破壊に伴うコンクリートの強度低下を考慮していないためと考えられる。

そこで、斜め配筋の場合について、今回の修正モデルを用いて計算したものと実験値と比較したものが図 8 中の○印であるが、多少計算値が大きい、縦横配筋の場合の称原モデルの計算値とほぼ同等の評価をしたことが分かる。

しかしながら、壁厚が小さく高強度コンクリートを使用した試験体では実験値が小さくなっている。このことから、壁厚さや高強度コンクリートの使用などの場合には、ひびわれ損傷等に伴うコンクリートの強度低下を考慮する必要があることが考えられる。

§ 4 む す び

以上より、称原式とこれをもとに修正した修正モデルによる解析結果より以下のことが明らかとなった。

- 1) 縦横配筋の場合は、称原モデルによる計算値と実験値はよく一致する。
- 2) 斜め配筋の場合は、修正モデルによる計算値と実験値はよく一致し、斜め配筋の終局強度を的確に推定できる。
- 3) 壁板部の応力度が大きい場合、壁板の薄い場合、高強度コンクリートを使用した場合あるいはひ

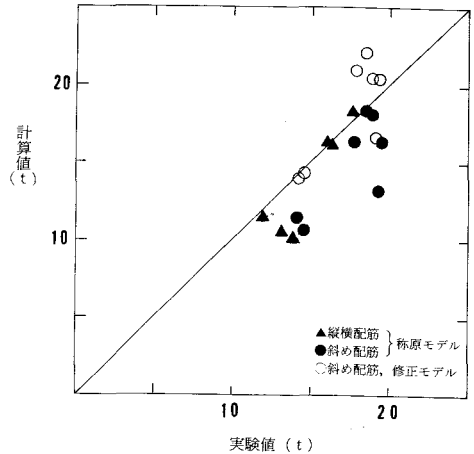


図 8 計算値と実験値

び割れ等による損傷の大きいことが想定される場合には、称原モデルでは、コンクリートの強度低下考慮が必要と考えられる。

〈文 献〉

- 1) 福原, 嶋津: 鉄筋コンクリート耐震壁による斜め配筋の効果に関する研究, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 1990. 12, PP. 1431-1436
- 2) 福原: 鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力負担に関する実験的研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第16巻, 1991. 3
- 3) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 (1990), PP. 401
- 4) 称原, 加藤: 鉄筋コンクリート連層耐震壁の終局耐力, 日本建築学会論文報告集, 第343号, 1984. 5
- 5) 白石, 狩野他: 鉄筋コンクリート造耐震壁の曲げ降伏後の最大耐力に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集第378号, 1987. 8
- 6) 南, 村上他: 水平集中荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断強度, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, 1985
- 7) 塩原: 塑性理論を応用した鉄筋コンクリート耐震壁の終局強度算定方法, 日本コンクリート工学, Vol.25, No.8, 1987. 8

(平成5年11月22日受付)

中国地方における建築用石材採石業について

(建築学科) 福 原 安 洋
 (車田建築設計事務所) 濱 本 昌 代
 (建築学科学生) 平 田 研 二

Stones for Architecture Quarried in Chugoku Districts

Yasuhiro FUKUHARA
 Masayo HAMAMOTO
 Kenji HIRATA

Many kinds of stones for architecture are being quarried in Chugoku districts.

In this report, the existing states of quarries in Chugoku districts are entirely investigated.

The investigation shows that stones for architecture in these districts are being produced at 20 quarries now and that the output is dropping year after year because of the increase of imported stones.

The reasons for the decline of quarrying in these districts are as follows.

- 1) The quarrying scale is too small for mass-production system.
- 2) It is difficult to get stones of uniform quality because the scale of quarry is small.
- 3) More colorful stones are got from overseas now.
- 4) The cost of production in Japan becomes higher because of the increase of wage.
- 5) Stones are imported at lower price with the increase of exchange rate of Yen.

§ 1 はじめに

現代のビル建築の内外装に石材の使用は増えてきている。しかしながら、これらの大半は国外から輸入されたものである。

一方わが国の石材業の歴史は古く、多種類の石材が産出するが、いずれの産地においても低迷しているようである。

中国地方においてもさまざまな石材が産出し、建築用石材としては瀬戸内地域の花崗岩、山口県の大理石、山陰地方の凝灰岩などが知られている。

そこで、これらの状況を踏まえ、中国地方における建築用石材の現状について、その発展性、地場企業としての問題点などを明らかにするために調査を行った。なお、一般に石材の用途としては、セメント用の石灰石などの工業用鉱石やコンクリート骨材などがあるが、この調査では建築仕上げ用、および墓石・灯籠・オブジェ用の石材を対象とした。

§ 2 建築用石材の概況

2. 1 わが国の石材の輸入、および、石材産業について

従来より、石垣や護岸、あるいは建築物の土台などに石材は多用されたが、最近ではこれがコンクリートや各種コンクリートブロック製品に代わりその利用は減っている。

しかし、一方では、高級イメージの建築物にするために、天然石材を仕上げ材として使用することが増え、その需要が大きくなっている。これらの石材には、アジア、西欧、アフリカ、南米などを産地とする輸入材が多用され、その原石の輸入量は、図2-1(a)原石の輸入量の推移（花崗岩石）、および、図2-1(b)原石の輸入量の推移（大理石）にみられるように急激な伸びを示している。また同図(b)でわかるように、86年以降では、板材に半加工したもののおよび、製品が増えてきている。これは、わが国での賃金等の加工経費が増大したことや、国外の採石場での機械化による加工が普及してきていることによるものと考えられる。

また、石材業は、採石業と加工業に分かれるが、わが国においては現在では採石業は不振であり、小規模な業者や石質に特徴がない産地の業者は大きなダメージを受けている。これらの採石業者は、閉山してしまう所や、輸入材を中心とする加工業を兼業している業者が多い。

また、輸入原石は、輸入材の荷下ろし港である名古屋近郊（岐阜県関ヶ原など）で、大規模な工場により板材への加工が行われ、各地方へ運送されるものも多い。従って、各地方での石材業は、一般には、板材の裁断や仕上げ加工、あるいは彫刻などの最終加工が中心となっている。

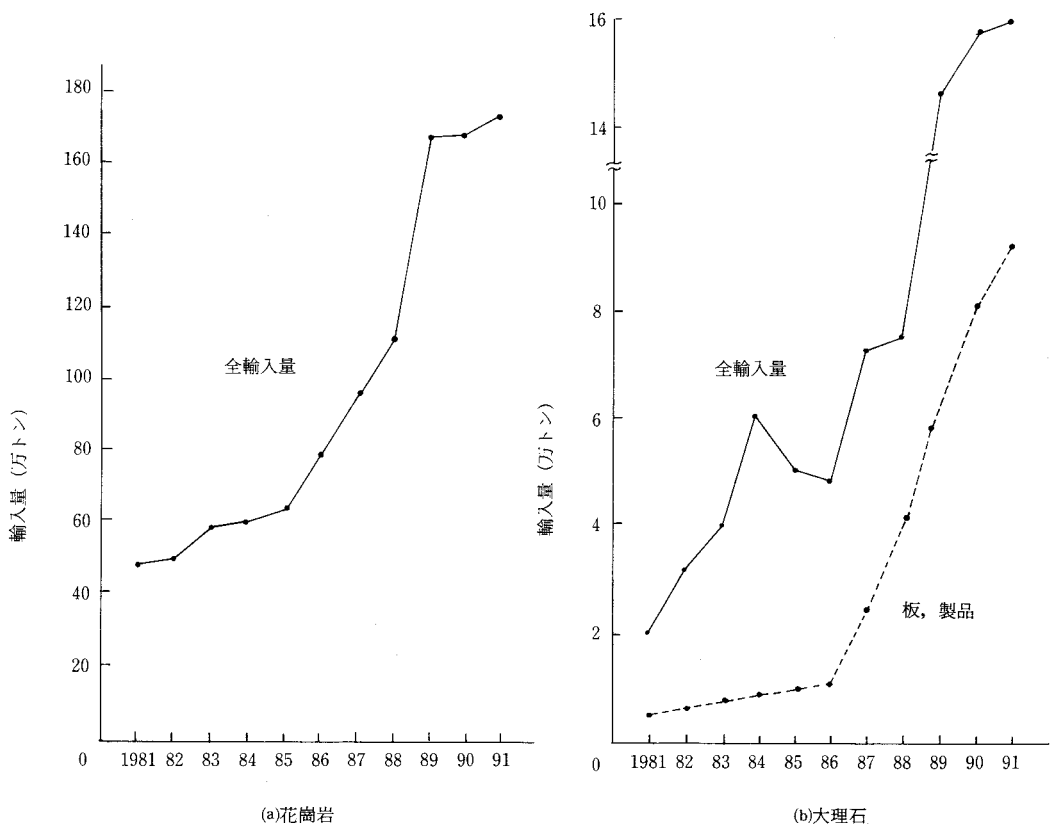


図2-1 原石の輸入量の推移

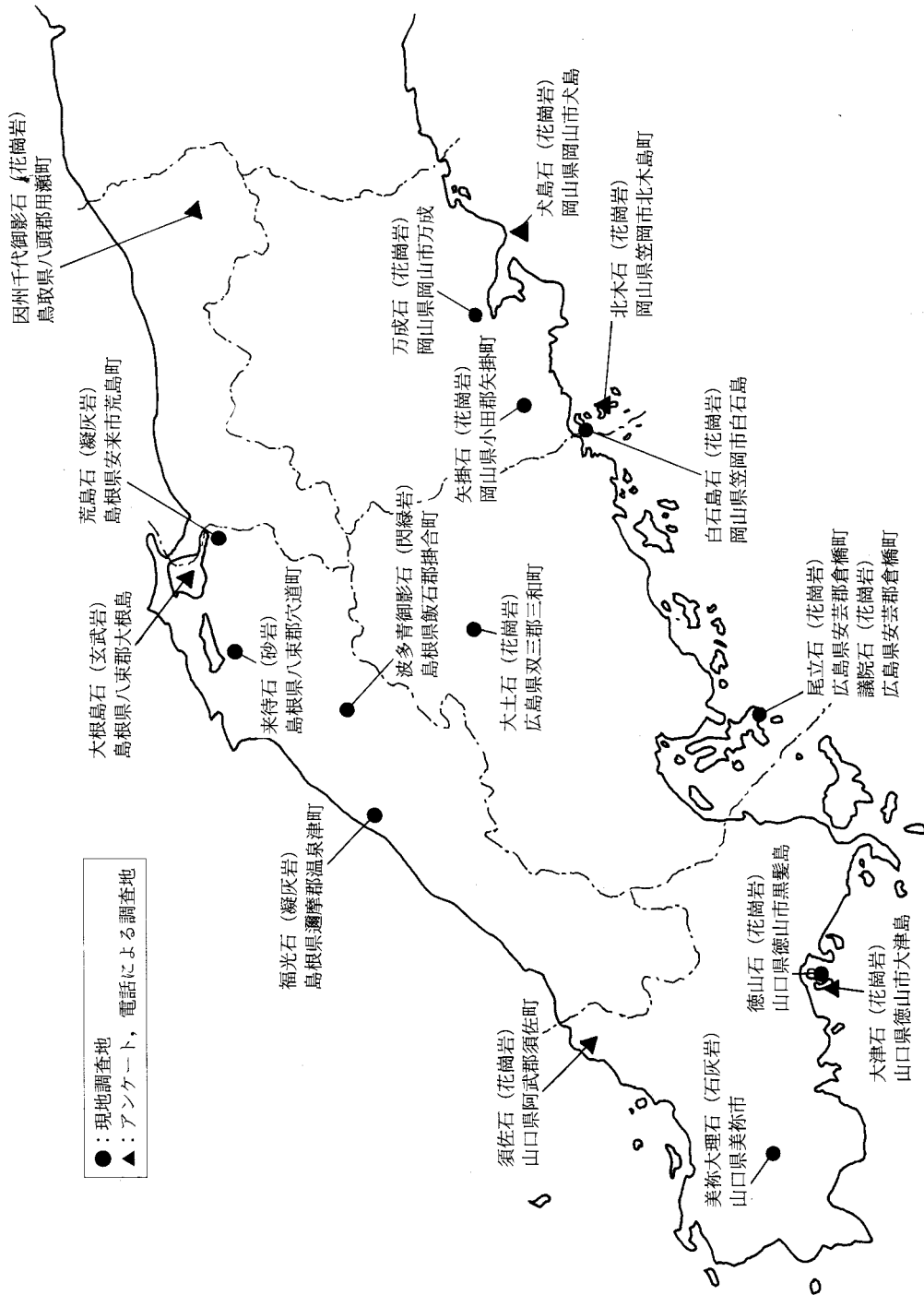


図 2-2 中国地方の建築用石材の産地

表2-1 中国地方の建築用石材一覧表

県名	石の種類	石材品名	産地	特徴	用途	現地調査
岡山県	花崗岩	北木石	笠岡市北木島	白色を主として少し赤味を帯びた、細目赤水晶を含むもの。	建築仕上材 灯籠 墓石 石彫材	○
		白石島石	笠岡市白石島	北木石よりも水晶が赤い。	建築仕上材 石塔 基礎石 石碑	×
		犬島御影石	岡山市犬島	石質は粗粒で特に優秀でない。大阪築城の際には大量に使われた。	護岸用	×
		万成石	岡山市万成	カリ長石により淡紅（ピンク）色である。明治神宮宝物殿に多量に使用。	建築仕上材 墓石 記念碑 インテリア小物	○
		矢掛石	小田群矢掛町	色は白っぽい白御影であり、月日を経てもあまり変色はしない。	墓石 塀材 敷石 地覆石	○
広島県	花崗岩	大土石	双三郡三和町	採石現場は大量の掘り出された石の中から庭石に適すものを選び採る。	庭石 敷石	○
		議院石	安芸郡倉橋町	良質で、色は桃色で褐色になることが無い。	建築仕上材	○
		尾立石	安芸郡倉橋町	色は淡褐色で変色するのが欠点であるが加工が比較的容易である。	建築仕上材	○
山口県	花崗岩	須佐石	阿武郡須佐町	表面に苔がつき、色が錆びている。	庭石	×
		徳山石（黒髪石）	徳山市黒髪石	石質は最良であり、色は青味を帯びている。風化、摩擦、摩滅の度が少ない。	記念碑 墓石 公園等の石工事	○
		大津石	徳山市大津島	色は白っぽい白御影で、大津白御影と呼ばれている。	建築用材 墓石 土木用材	×
	石灰岩	美祢大理石 あられ 薄白 雲鷹 新薄雲	美祢市大嶺町	化石を多く含み、ネズミ色の石灰石。サンゴの1～3cmの白い斑紋をもつ。 薄灰色～灰色の石灰岩で、方解石の細い脈が多い。	建築内装仕上材	○
島根県	玄武岩	大根島石	八束郡大根島	霜に強く、水分を含まない。	墓石 間知石	×
	閃緑岩	波多青御影石	飯石郡掛合町	青みがかって粒が細かい。	墓石 間知石	○
	砂岩	来待石	八束郡宍道町	石質が粒子緻密のため、色は黄緑色で風化すると茶褐色になる。	灯籠 敷石 庭園用小物	○
	凝灰岩	福光石	邇摩郡温泉津町	御影より青っぽい青手石とよばれ水に濡れるとその青さがよくわかる。	地覆石 敷石 建築仕上材 塀材	○
		荒島石	安来市荒島町	青、赤、白など多様な色彩と斑点があり暖かみのある色。耐火性大きい。	建築構造物 倉庫 築炉 仕上材	○
鳥取県	花崗岩	因州千代御影石	八頭郡用瀬町	山陽側の御影石と特徴にあまり違いがみられず、白色である。	墓石 建築用骨材 土木用骨材	×

表2-2 中国地方の建築石材調査一覧表

(1切=0.0278m²)

県名	石材名	業社数	生産量 (m ³)	従業員(人)				従業員 平均年齢 (事務外)	主な出荷先	出荷価格 (千円/切)
				採石	加工	事務	計			
岡山県	北木石	14	490	80		15	95	約50	全国	3.0~10.0
	白石島石	13	111	30	35	10	75	約30	北木島	3.7~7.8
	犬島御影石	1	110~140	1~3	1~3	1~3	6	50~54	京阪神	5.0
	万成石	5	840~1000	24			24	35~39	関東, 西日本	9.0~11
	矢掛石	4	140~170	12	9	4	25	45~49	京阪神	3.0
広島県	大土石	1	1852	3	0	2	5	55~60	京都, 中国地方	0.6
	議院石	1	1130	8	6	1	15	35~39	大阪, 福岡	4.2
	尾立石	1	1100	10	38	3	51	35~39	中国, 四国, 九州	0.3
山口県	須佐石	1	140	3		1	4	45~49	山口, 近畿地方	0.5
	徳山(黒髪)石	1	5600	91	33	25	149	45~49	九州, 中国地方	3.7~8.5
	大津石	1	3000	1~3	1~3	1~3	6	45~49	山口, 広島, 大分	4.0
	美祢大理石	3	6500	30			30	55~59	山口	0.3
島根県	大根島石	1	46	5	8	1	13	45~49	山口, 広島, 大分	6.0~7.0
	波多青御影石	1	420	8		2	10	45~49	関西方面まで	7.0~30.0
	来待石	12	840	30	150	20	200	45~49	全国	5.0~8.0
	福光石	1	450	4		1	5	50~54	北陸, 関東, 関西	3.0~3.5
	荒島石	1	30	3		1	4	40~44	全国	1.0
鳥取県	因州千代御影石	1	15~20	8		2	10	40~44	鳥取, 京都	7.0~15

2. 2 中国地域の石材および石材業者について

中国地域においても、一般に石材は土木用として、護岸や石垣などに多く用いられているので、採石場は各地にある。しかし、建築仕上げ用材としては、その美しさ、むらのなさ、板材に適する均一で大きい原石が採石できること、加工のし易さなどの条件などから限られてくる。

過去50年間程度における中国地域の建築用石材の種類とその産地は、有名なものについては、文献(1)~(4)に挙げられており、その種類は約30種類、産地は25箇所にもなる。これらの産出地を図2-2に、さらに、これらの主な特徴や用途の一覧を表2-1に示す。

この中には、国会議事堂の外壁に使用された、倉橋島の桜御影(議院石)があり、これは呉合資会社が大正11年から採石している。

また、今回の調査から推定すると地域内の採石業者数は、約50業者、および従業者数は300名、年間生産量約3万トンであるが、いずれの数も採石業の衰退とともに減少の傾向にある。

§ 3 調査内容および調査結果

3. 1 調査内容および、関係業者数

今回の調査では、前述の文献にある石材を基本にして、文末の〈資料〉に示す場所を中心に現状を調査した。また、12箇所の採石場については現地調査を行った。また、その他の産地については、次のような調査項目につき、アンケートと電話による調査を行った。

①事業内容 ②採掘現場の規模・採石方法 ③石材の用途 ④従業員の構成 ⑤出荷状況 ⑥事業の歴史 ⑦加入組合 ⑧その他

調査の結果を表2-2の調査一覧表に示す。

3. 2 調査の結果

(1)採石地域、石材の種類と特徴、およびその用途

瀬戸内側には、花崗岩が広く分布し推定される埋蔵量も大きい。一方、山陰側では玄武岩、砂岩、凝灰石など種類が多い。また花崗岩もあるが、その生産地域は山陽側と比べはるかに狭い。この他、山口県および中国産地では石灰岩が分布しているが、山口県美祢市付近で産するものの一部が建築用大理石として利用されており、その他の産地である岡山県新見市と広島県東城町の石灰岩は工業用石灰として出荷されている。

中国地域に分布する花崗岩には、一般的な白御影、赤っぽくピンク色の万成石の2種類の色があり、最近では、建築仕上げや墓石・オブジェ等以外にも河川的美観のための護岸用敷石、道路等の縁石など幅広く使用されている。

山陰側に堆積岩があり、そのうち島根県の来待石がある。これは、鉄分の多い砂岩で、古くより瓦用釉薬の原料としても知られており、風化しやすいという短所はあるが、一方で加工しやすく、苔が付きやすいことなどの長所から庭灯籠として利用されている。

また荒島石は、凝灰岩で耐火性、断熱性に優れており、耐火温度は1160℃程度で、かつては台所のかまどなどに多用された。一方風化が早く20年ぐらいで始まる。しかしながら加工し易く、軽量で輸送性があり、セメントとの接着がよいので、蔵建築や内装用として用いられている。蔵用には、模様や、色調の良い、比較的硬い石を選んで使用する。なお、材質的には大谷石と競合するが、蔵造りの技術があるので需要がある。

さらに、島根県の福光石も硬質の堆積岩で色に特徴があり濡れると青緑を呈し、青手石とよばれ木造家屋の土台や敷石などに用いられる。

山口県の大理石は、当初は建築に使うのが目的ではなく、配電盤用としてドイツから大理石を輸入

していたが、輸入材に代わり使い始めたものであり、美しい石の埋蔵量は少ない。また、碎石はテラゾーの原料として利用される。

(2) 業者規模、および採石量

瀬戸内海側の島嶼部では、良質の花崗岩が広く分布し、また海運輸送に適することから、多くの採石業があり、生産量も多い。一般には北木島、白石島のように同じ地区をいくつもの業者が採石しているが、これに対して、黒髪島では1社だけが採掘を行っている。また、黒髪島での生産量は中国地方で群を抜いている。山陰側では各種の採石にたずさわる業者は1社がほとんどであるが、来待石は、大規模な採石を行っている1社以外に古くから農家の副業として個人単位で採掘加工を行っているものが含まれている。また、来待石は埋蔵量は不明だが灯籠の需要が多いため、それに応じて生産量を増加している。



写真 2-1 美祢大理石 山口県美弥市

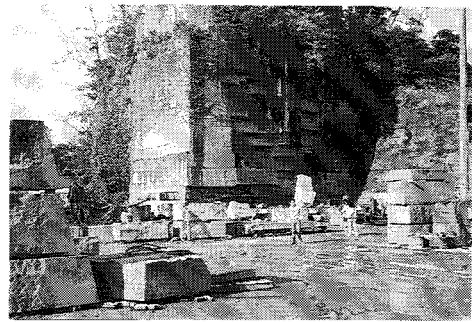


写真 2-2 来待石 島根県八束群穴道町

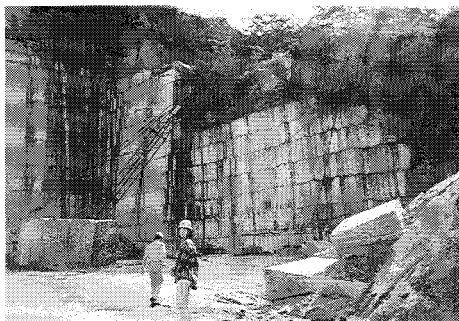


写真 2-3 議院石 広島県安芸群倉橋

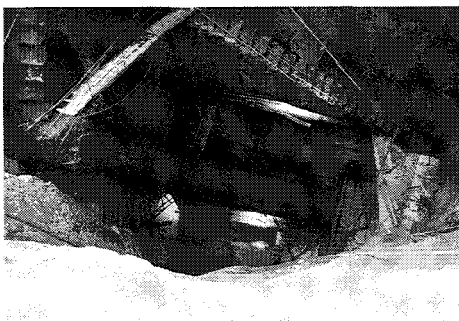


写真 2-5 荒島石 島根県安来市荒島町

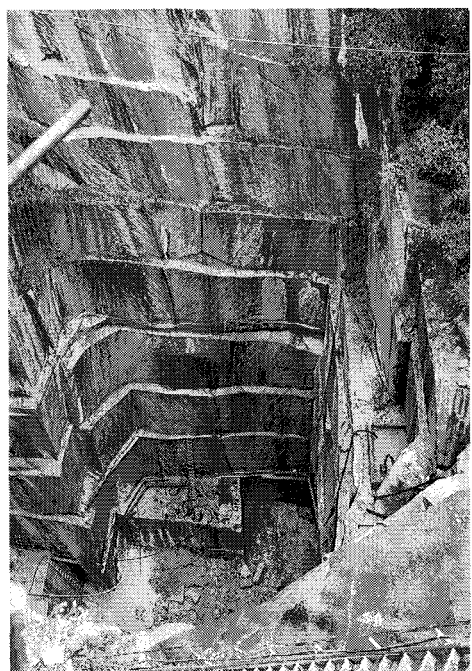


写真 2-4 北木石 岡山県笠岡市北木島

(3)採石方法など

一般にわが国の採石場は狭く小規模であり、しかも、小規模経営のため資金的にも難しい面がある。従って、10年前から加工場と採石場の機械化が行われたが、オートメーション化や作業環境など大規模な改善は遅れている。

また、採石現場の掘り方には露天掘りと坑内掘りがある。中国地域においては、前者が大半であり、鉱山を階段のように採掘していくベンチカットが通常である(写真2-1～2-3)。しかしながら、北木島などでは良質の花崗岩を採るため、深さ50メートル程度あるいはそれ以上まで縦穴状に掘り採石している場合もあり採石環境が極めて悪いものがある(写真2-4)。

また、後者には、荒島石のように縦穴からさらに横孔状に採取したい石のある層を掘り進むもので採取した原石の大半は製品として出荷できる(写真2-5)しかし、採石効率は良くない。

(4)流通など

1)流通について

島嶼部の花崗岩は、採石業が独立している場合が多いが、小規模な産地では、加工業さらには販売まで兼ねる場合が多い。

また、石材は受注生産する場合もあるが、様々な大きさや形状の原石を採石し受注を待つ場合が多い。受注生産の場合は、価格的には有利であるが、取引物件によってサイズも異なるために、計画的に生産できない面がある。

なお、小規模少量生産のため、同一品質の製品を大量に供給出来ないため、大量生産の国外材に負ける面がある。さらに、品質保証などのための検査を徹底して行うことは、時間的にも難しく、また、手間もかかるので行われていない。

荒島石では、1業者が1年で1～2軒分の蔵を請負う。必要な部材を工場で加工し、現地に運び、20日位で完成させる。

2)輸 送

島嶼部では原石の輸送は当然海上輸送であるが、加工された製品は陸上輸送される割合が増えてきている。また、他の採石は一般には、陸上輸送されている。

また、通常、石材の価格は、その製品の値段だけではなく需要者の現場までの運搬コストも含めた価格なので、需要者との距離が大きければそれだけ価格は上がる。

山口県の大理石は、輸入材と競合しているが、輸入材は、関ヶ原の加工場で板材に加工され送られ、名古屋から山口県までの輸送運賃が輸入材の価格に加えられるので、山口県内では輸入材と価格面で競争できている。

3)出 荷 先

中国地域産の建築用石材、敷石、塀材などは、主に九州、四国、京阪神が出荷先である。また、地覆石に用いられる福光石などは、その大半の需要先である北陸地方に出荷され、荒島石は、民家の蔵用に加工され西日本全体に職人とともに輸送される。

来待石の灯籠やオブジェなどは全国から発注があり、その出荷先が特定しない。

(5)労働力

どこの採石場でも若い職人が集まらず高齢化しており、近い将来、労働力不足になることは目に見えているという状態である。また、昭和53年頃から、硅肺、白ろう病、難聴などの職業病が問題になり、石工のなり手がいなくなり、閉山に追い込まれた山も多かったという。現在では、以前に較べかなり改善されたというが、花崗岩のガスバーナーによる切り出しの現場は、労働条件としては過酷で

ある。

過疎地である島根・鳥取県では、他の地域よりさらに、若い労働力が不足しており、人手不足・後継者問題がまず掲げられる。そのため、従業員は採石と加工の両方の作業を行い、社長自らも採石、加工、事務を行っており、従業員構成をそれぞれの部門にはっきり明記することはできない。黒髪石、白石島石などの採掘規模の大きいところでは、1992年のバブル崩壊後は若者の就職が増え、労働人数は充足している。

(6) そ の 他

採石は採算が合わないこともあり、採石業者も加工業に転身してきている。しかし、輸入材の場合は、荷揚げ港に近い地域が運送、配送に有利であり、岐阜県関ヶ原などの専門工場で、板への加工や仕上げが大規模に行われている。

ただし、来待石の灯籠や、荒島石の伝統的な石造蔵などのように、石の長所を生かした付加価値の高いデザインや技術を開発して活路を見いだすことも可能である。

§ 4 ま と め

(1) 資 源

現状では良質の石が減っているが、新しく採石場を開拓するには、多額の資金を必要とすることに加え、行政的な制約があり、業者は、国や県から採石許可を得る面倒があること、さらに、森林保護法により山の石を採った後は、もと通りに植林する必要があることなどの負担がかかる。

一方、輸入先の外国の採石場は大規模である。例えば、イタリアの大理石採石現場では、山そのものが良質な石の塊なのでワイヤーカット方式なども可能で、採石の大きさ、量は比較にならない。

(2) 事業形態

大半の採石業は、零細業者が多く、組合化などの組織化がほとんど行われていない。

また、採石部門は、韓国や中国からの同質で安価な花崗岩に押されており、中国材などの輸入材の加工部門に重点を移す業者が増えている。

(3) 問 題 点

1) 労 働 力

多くの石材業者は人手不足が深刻な問題である。その対策として、外国人労働者を安い賃金で雇うようにしたいという現地の意見もあったが、単に賃金対策として、他の厚生福利面や異質文化の受け入れ準備などを考えず、安易に外国人に頼る姿勢には問題である。日本人の若い労働力を確保するためには、加工場、採石場を清潔にし、機械化などに加え、若者が魅力を感じる職場、あるいは、町造りなどが重要であろう。

2) コスト低減

上記1)でも述べたように、従業員の賃金格差と石材の埋蔵量と採石規模の違いのためわが国の原石は安価な輸入材に対し価格ではとても競争にならない。

そういった状況の中で、最近では加工された商品なども大量に輸入され加工業も打撃を受けている。また、建築仕上げ材としては、他の仕上げ材料に比べ、施工費を加えるとかなり高価なため建築費に応じて需要が決まるのが現実である。

そこで、石材の需要を伸ばすためには、単に採石時の価格を下げるだけでなく、施工性を増すなどによるコスト低減の工夫が必要である。

また、地場では、最終加工のみになっている。しかしこれも建築物の設計業務の情報化などにより、地場加工という必然性が無くなることも考えられるので、そうならないよう前もって技術力や技術者の確保などの環境を整える必要がある。

公共施設に設置するオブジェ、集合住宅内の歩道の敷石、自然保護のため護岸用の角石など、石材利用の拡大のための工夫の動きもあるが、需要者の意識の普及が広がっていないため、その出荷量は全体の割合としてはまだまだこれからである。

§ 5 おわりに

わが国では、地場に定着してきた産業などが、近年の新材料の開発や海外との経済均衡の崩壊とともに衰退していったものも多い。石材産業もコンクリートという新材料や輸入品コストの低下の犠牲者の一つであるといえよう。

石材産業の発展は、天然石の良さを十分自覚し、積極的な利用をすること、また、その産業が地場という地域社会の活性化に貢献していることも理解した政策の実行などに懸かっているといえる。

最後に、本調査にご協力頂いたり、貴重な資料の提供を頂いた文末<資料>に挙げたそれぞれの事業所のかたがたに深く感謝致します。

<文献>

- (1)工藤晃：議事堂の石、(株)新日本出版社
- (2)日本石材振興会発行：日本石材史
- (3)中江：石材・石工業事典、鎌倉新書
- (4)日本石材工業新聞

<資料> 調査対象石材の産地、および、協力業者名 (○：現地調査)

- <北 木 石> 岡山県笠岡市北木島 北木石材組合、馬越道也石材店
- <白 石 島 石> 岡山県笠岡市白石島 田原石材店
- <犬 島 御 影 石> 岡山県岡山市犬島 東田石材店
- <万 成 石> 岡山県岡山市万成 浮田石材店
- <矢 掛 石> 岡山県小田郡矢掛町 西山石材店
- <大 土 石> 広島県双三郡三和町 川野石材店
- <議 院 石> 広島県安芸郡倉橋町 呉合資会社
- <尾 立 石> 広島県安芸郡倉橋町 倉橋石材工業株式会社
- <須 佐 石> 山口県阿武郡須佐町 松本商事
- <徳 山 石> 山口県徳山市黒髪島 黒髪石材株式会社
- <大 津 石> 山口県徳山市大津島 中野石材店
- <赤 間 石> 山口県厚狭郡楠町 赤間硯生産協同組合
- <美 祢 大 理 石> 山口県美祢市大嶺町 福田大理石
- <大 根 島 石> 島根県八束郡大根島 荒谷石材店
- <波 多 青 御 影 石> 島根県飯石郡掛合町 (旬)神田石材店
- <来 待 石> 島根県八束郡宍道町 勝部石材店
- <福 光 石> 島根県摩都温泉津町 坪内石材店
- <荒 島 石> 島根県安来市荒島町 仲佐石材店
- <因州千代御影石> 鳥取県八頭郡用瀬町 大田菊三商店

(平成5年11月24日受付)

編 集 委 員

今	井		勲
石	井	淳	二
深	澤	謙	次
脇	本	隆	之
丸	上	晴	朗
門	前	勝	明

呉工業高等専門学校

研 究 報 告

第29巻 第2号 (1994)

(通 巻 第53号)

平成6年2月 印刷

平成6年2月 発行

編集者
発行者

呉工業高等専門学校

〒737 呉市阿賀南2丁目2-11

電 話 (0823)71-9121(代)

印刷所

株式会社 ニシキプリント

〒733 広島市西区商工センター

7丁目5-33

電 話 (082)277-6954

MEMOIRS OF THE KURE NATIONAL COLLEGE OF TECHNOLOGY

Vol. 29, No. 2 (Cnsecutive No. 53)
February, 6th Year of Heisei (1994)

CONTENTS

1. Place—Names in Wales (2)	Junji ISHII	1
2. Frictional Characteristics of Superfinished Surface in Two Roller Test	Masaki KOHNO Hiromasa NADANO	15
3. Influence of Impurity on an Argon Positive Column Plasma	Tsutomu YAMAZAKI	21
4. A study of shear strength of Decomposed Granite Soil reinforced by Roots	Shigehisa KOBORI Norio YAGI Meiketsu ENOKI Ryuichi YATABE	31
5. Ultimate Strength Analysis of Reinforced Concrete Shearwall	Yasuhiro FUKUHARA Toru SAITO	47
6. Stones for Architecture Quarried in Chugoku Districts	Yasuhiro FUKUHARA Masayo HAMAMOTO Kenji HIRATA	57