

水田土壌の窒素肥沃度と無機化のしくみ

ジェイカムアグリ株式会社 東北支店

技術顧問 上野正夫

はじめに

全国には、約160万haの水田があり、地域の気象条件（太平洋側と日本海側のように冬場の積雪の有無）や土壌条件によって、有機物の分解と集積の関係が大きく変動することで、様々な窒素肥沃度の違う水田が存在しています。すなわち、日本海側等、冬、積雪に覆われるような地域では、有機物の分解が遅れ、施用した有機物の集積が凌駕し、有機物管理に応じて、窒素肥沃度の高い水田が維持されてきました。一方、太平洋側では、施用される有機物の分解が冬場も通して激しく、易分解性有機物の集積が下回り、窒素肥沃度が思うように高まらない水田も多く分布しています。水稲栽培は、まさに、こうした環境条件を把握した上で、その年の気象を考慮し、施肥対応を含め、適切な栽培管理を駆使してきたことにほかなりません。

(1) 充実した稲は地力窒素の充実から

地力窒素とは、土の中の有機物（有機態窒素：

稲わら、堆きゅう肥、小動物など腐朽堆積物）が時間をかけて微生物に分解された窒素（無機態窒素）のことで、作物が吸収・利用できるものです。水稲の反収が600kgとすると、水稲に含まれる窒素の量は約12kgです。この場合の窒素肥料と地力窒素の割合を図1に示しました。この図から水稲の生育の多くは地力窒素に頼っていることがわかります。すなわち、「10俵のうち約7俵は地力窒素からの窒素で、約3俵が肥料から供給された窒素」ということになります。

水田土壌は地道に有機物の投入を続ければ、地力窒素の供給源（可分解性有機態窒素）が蓄積されます。

また、図2は、土壌の窒素肥沃度と理想的窒素吸収パターンを示しました。つまり、窒素的地力の高い「滝山土壌」と地力の低い「農試土壌」で目標収量を600kgに設定し、そのための窒素吸収パターンを示しながら、過年度の無窒素区の窒素吸収実績（黒で塗りつぶし）を考慮し、その差を

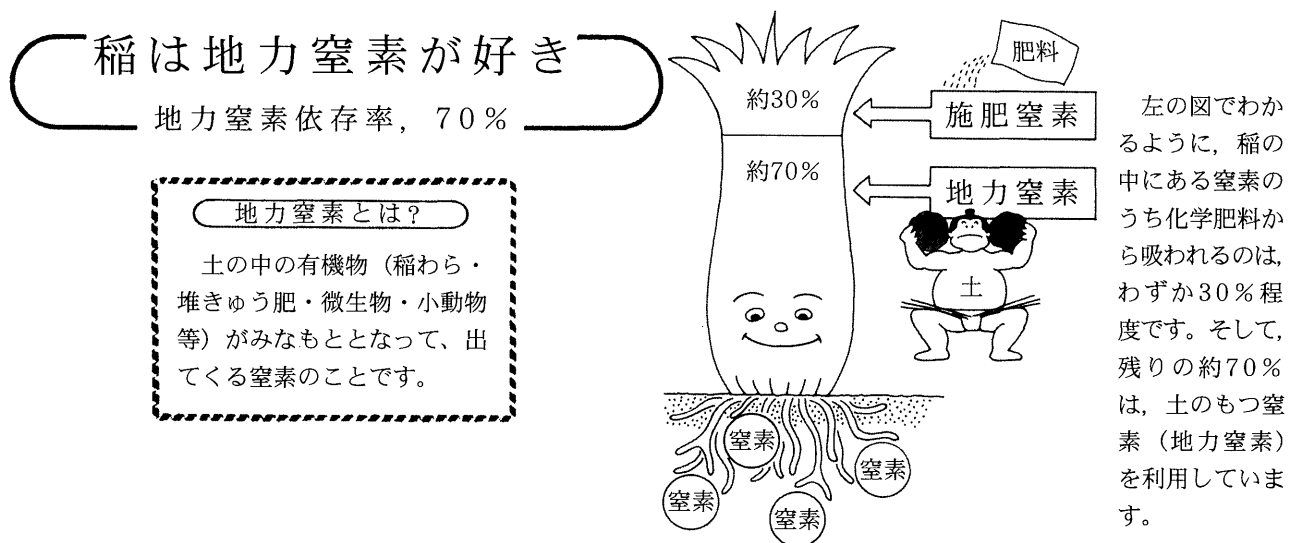


図1. 窒素吸収量の約70%が地力窒素、約30%が肥料からの窒素

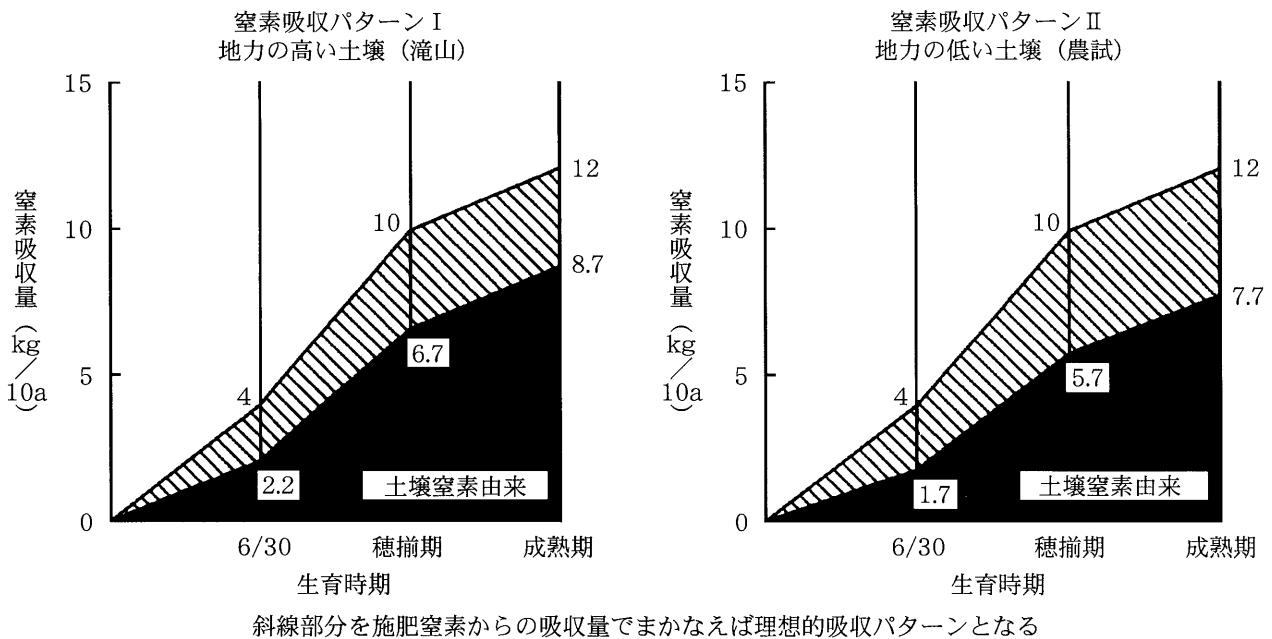


図2. 土壌の窒素肥沃度と理想的窒素吸収パターン（目標収量：10a当たり玄米600kg）

施肥窒素で補充する考え方を示しました。すなわち、図中の斜線の部分を施肥窒素からの吸収量でまかなうことができれば、地力の高い土壌でも、地力の低い土壌でも、600kgの収量が確保されることとなります。

つまり、窒素施肥量の算出方法は、目標収量に必要な窒素吸収量から天然供給量（土壌窒素由来吸収量）を差し引き、肥料の利用率から窒素成分量が求められます。

①地力窒素を増やすには

では、無機態窒素はどうやって増えるのでしょうか？有機態窒素は微生物の活動によって無機態窒素に変化（これを窒素の無機化といいます）しますので、微生物の活動が活発になれば、無機態窒素も増えると考えられます。微生物の活動が活発になる条件はいろいろありますが、ここでは基本的なものを紹介します。

ア. 土壌が乾燥した後、再び湿ったとき

－乾土効果－

土壌を乾燥させた後、水田や畑の水分にして保温すると、窒素が無機化してきます。これを「乾土効果」といいます。これは土壌有機物の一部が脱水作用で微生物に分解されやすい形になるためです。有機物の多い土壌で、春先、耕起後の土壌

乾燥が進むほど効果が大きいことがわかっています。また、水稻の生育、とりわけ初期生育は乾土効果と密接な関係にあります。

乾土効果発現量を推定するために、各土壌ごとに土壌含水比を変えた培養試験（30℃，2週間）を基に乾土効果回帰式を求め図3に示しました。それによると、供試土壌すべてにおいて、乾土効果開始水分変曲点が認められ、その含水比は供試土壌間で極めて大きな差が認められます。つまり、乾土効果開始水分点が高く、しかも回帰式の勾配が大きい土壌は、乾土効果発現量が大いに期待できるとともに、年次間差（春先の圃場の乾燥実態に応じて）が大きく、施肥適量の決定に大きな影響を及ぼします。一方、変曲点が低く、強乾燥でも乾土効果がほとんど期待できない土壌もあります。そうした圃場では、毎年施肥にたよらざるを得ません。

イ. 土壌がアルカリ性になったとき

－アルカリ効果－

土壌にアルカリ資材（ようりん、ケイカルなど）を施用し、その後、水を入れると有機態窒素が微生物に分解されやすくなり、地力窒素が増えます。これを「アルカリ効果」といい、有機物の多い土壌で効果が大きいといわれています。

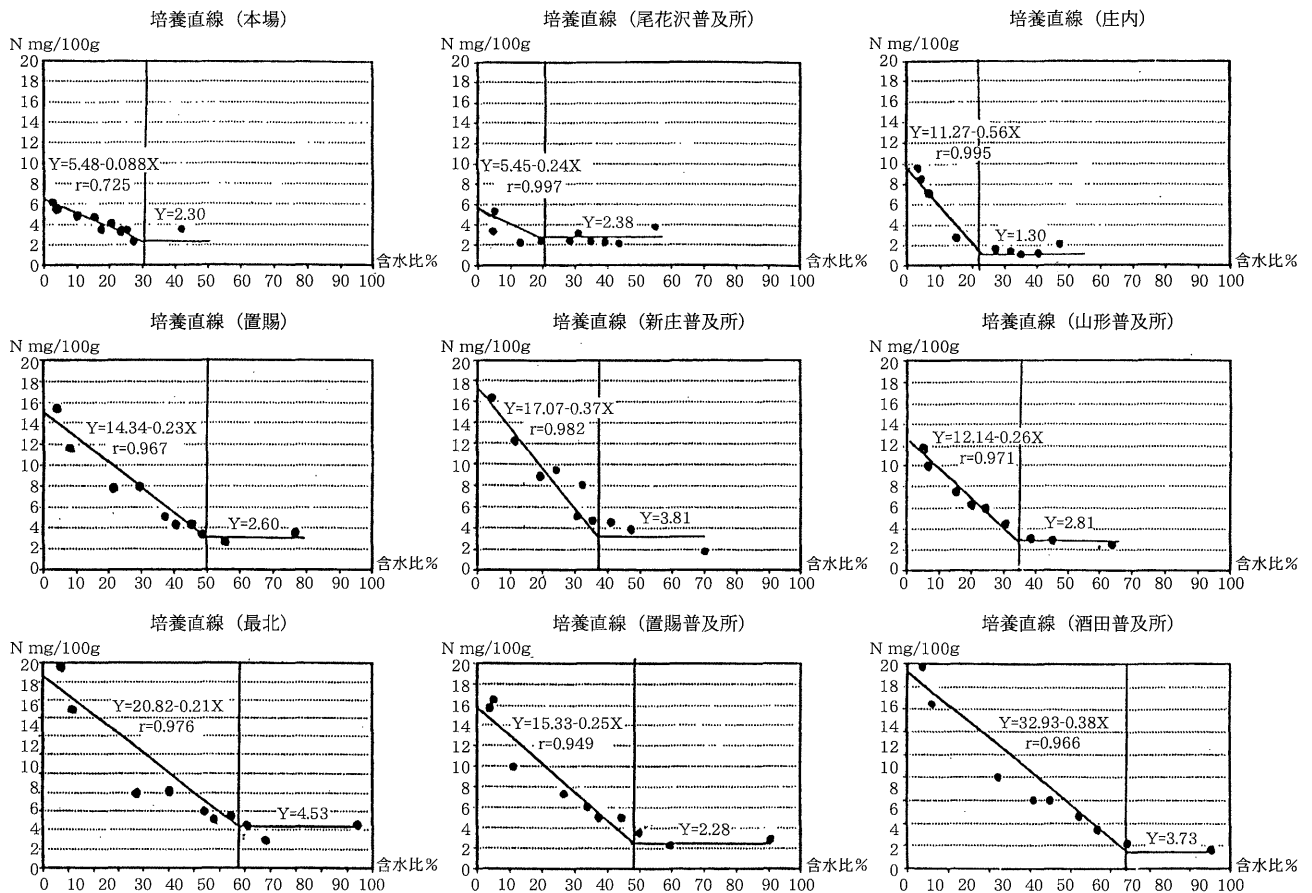


図3. 土壌含水比と土壌窒素無機化量の関係 (乾土効果回帰式)

ウ. 地温が上昇したとき —地温上昇効果—

窒素の無機化は低温よりも高温の方がより大きく、これを「地温上昇効果」といいます。水田土壌では6月中旬から盛夏にかけて、地温の上昇にともなって、無機態窒素が増えます。日照りが続いた年は、この効果で水田の無機態窒素が平年より増えます。

に利用される形態のものは、2~10%程度に過ぎません。私たちは、その量を、可分解性有機態窒素 (No) と呼んでおり、水田土壌窒素無機化量のポテンシャルとして最も重視しています。

可分解性有機態窒素 (No) の概念は、図4に示したように、速やかに無機化する画分 (Noq) と緩やかに無機化する画分 (Nos) の含量と考えて

(2) 土壌窒素発現予測技術

① 反応速度論的解析法による水田土壌窒素無機化予測技術

水田作土の全窒素量は、ほぼ0.2~0.5%です。したがって、10aで作土深10cmに換算すると200~500kgの窒素量に相当します。そのうち、実際に水稻

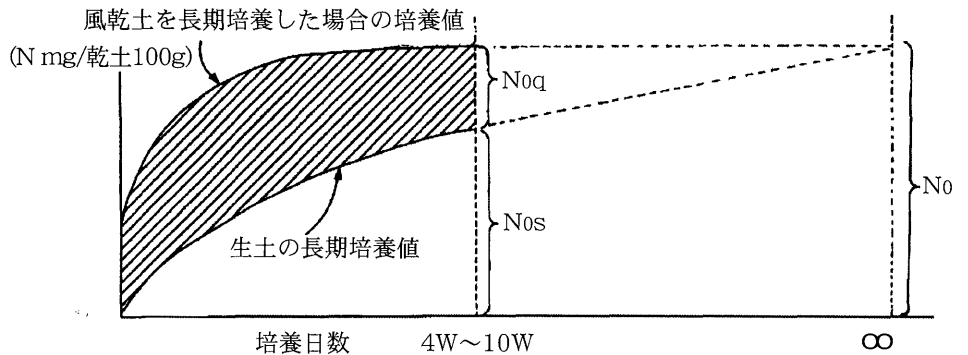


図4. 土壌窒素無機化パラメータと培養窒素との関係

います。実際の培養データでは、風乾土の長期培養値が (N₀)、生土の長期培養値が (N_{0s})、その差が (N_{0q}) とするモデルです。つまり、N₀ = N_{0q} + N_{0s} が常に成立します。

表1に代表的な土壌について、速度論的解析法で求めた無機化パラメータを示しました。

算)を1050℃と想定し、地温との関数で窒素無機化量を推定します。

**イ. リン酸緩衝液抽出による簡易測定法
ステップ1**

風乾土20gにpH7のリン酸緩衝液(表1)100ml加え、室温で1時間振とうし、静置する。

表1. 速度論的解析法により求めた土壌窒素無機化パラメータ

| 供試土壌 | 土壌窒素無機化パラメータ (風乾土) | | | | | | |
|--------------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| | k ₁ | k ₂ | Ea ₁ | Ea ₂ | N _{0q} | N _{0s} | N ₀ (N _{0q} +N _{0s}) |
| 北陸農試 (細粒強グライ土) | 0.204 | 0.0047 | 26000 | 25000 | 9.03 | 13.40 | 22.4 |
| 岡山農試 (中粗粒灰色低地土) | 0.190 | 0.0037 | 16000 | 25000 | 13.50 | 15.60 | 29.1 |
| 東北農試 (細粒灰色低地土) | 0.280 | 0.0069 | 25000 | 37000 | 12.70 | 13.60 | 26.3 |
| 山形農試 (中粗粒灰色低地土) | 0.350 | 0.0060 | 5000 | 29000 | 3.64 | 9.26 | 12.9 |
| 滝山土壌 (細粒灰色低地土) | 0.440 | 0.0058 | 17000 | 33000 | 6.15 | 6.74 | 12.9 |
| 畑谷土壌 (表層腐植質多湿黒ボク土) | 0.130 | 0.0048 | 8000 | 30000 | 5.56 | 9.39 | 15.0 |
| 川西土場 (細粒強グライ土) | 0.260 | 0.0090 | 16000 | 15000 | 15.40 | 12.80 | 28.2 |
| 村木沢土壌 (細粒灰色低地土) | 0.190 | 0.0080 | 12000 | 18000 | 4.84 | 7.88 | 12.7 |
| 最北支場 (表層腐植質多湿黒ボク土) | 0.144 | 0.0043 | 17000 | 20000 | 16.30 | 18.40 | 34.7 |
| 置賜分場 (細粒グライ土) | 0.216 | 0.0076 | 21000 | 18000 | 10.70 | 14.50 | 25.2 |

単純平行型モデル: $N = N_{0q}\{1 - \exp(-k_1 \times t_1)\} + N_{0s}\{1 - \exp(-k_2 \times t_2)\} + B$

- k₁: 乾土効果総量に対する無機化速度定数, k₂: 地温上昇効果総量に対する無機化速度定数
- Ea₁: 活性化エネルギー (k₁に対する係数), Ea₂: 活性化エネルギー (k₂に対する係数)
- N_{0q}: 乾土効果総量としてのポテンシャル (分解の速い画分)
- N_{0s}: 地温上昇効果総量としてのポテンシャル (分解の遅い画分)
- N₀: 可分解性有機態窒素量, B: 接辺 (定数)

「無機化パラメータからみた施肥のポイント」

- N_{0s} (地温上昇効果由来画分) の速度定数 (k₂) は、ほぼ0.006 (1日に無機化する量がN_{0s} × 0.6%) であるため、N_{0s}の70~80%が稲作期間に無機化し、その量は、ほぼ毎年一定量 (作付け期間の地温で変動するが、その幅は小さい) として捉えることができます。
- 一方、N_{0q} (乾土効果由来画分) の速度定数 (k₁) は、ほぼ0.1~0.4程度で、ほぼ5月下旬~6月上旬までに無機化し、水稻の初期生育に大きく関与します。無機化量は、現地圃場の春先の乾燥実態に応じて、平年の場合は、N_{0q}の30%、春先の圃場乾燥実態が強の場合は、N_{0q}の50%、春先の圃場乾燥実態が弱の場合は、N_{0q}の10%と推定することが可能で、普及技術にとって有益な情報となります。

②土壌窒素無機化予測技術の簡易測定法

ア. 生土を用いた培養法による簡易予測技術

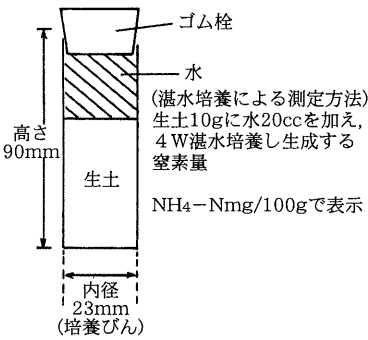
湛水培養による無機化量を $y = \alpha x^\beta$ にあてはめるが、稲作期間の有効積算地温 (15℃以上を積

ステップ2

その上澄液をろ過して抽出液とする (遠心分離後ならさらによい)。濁りが生じた場合には1日以上放置する。

「土壌窒素発現予測」
 ー有効積算地温の適用ー
$$Y = K1050 \left[\frac{(T-15) \cdot D}{1050} \right]^n$$

 Y：湛水期間Dにおけるアンモニア生成量
 T：湛水培養温度 (30℃)
 15：基準温度
 D：湛水開始からの日数
 K1050：定数, 生成量と比例 (30℃, 10Wのアンモニア生成量)
 n：定数, 生成型と関係する



(例) 庄内支場の土壌窒素発現予測式生土30℃湛水培養による実験値

| 湛水期間 | 有効積算地温 (T-15)・D | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| | 2W (210℃) | 4W (420℃) | 6W (630℃) | 8W (840℃) | 10W (1050℃) | 12W (1260℃) |
| NH ₄ -N生成量 (mg/乾土100g) | 3.26 | 5.43 | 7.56 | 9.21 | 10.95 | 12.94 |

X：有効積算地温
 Y：NH₄-N生成量とし両辺を対数変換することにより $Y = 0.054 X^{0.76}$ の実験式が得られる。
 X=1050を代入すればY=10.7
 したがって $Y = 10.7 \left[\frac{(30-15) \cdot D}{1050} \right]^{0.76}$ ……①式の予測式で表示される。

なお、簡易な方法としてnを求める場合は次式を利用する。

4W間後のアンモニア生成量をY₁
 10W " Y₂とすれば $n = \frac{\log Y_2 - \log Y_1}{-\log 420/1050}$ で求められ、

$$= \frac{\log 10.95 - \log 5.43}{-\log 420/1050} = 0.78$$

したがって $Y = 10.95 \left[\frac{(30-15) \cdot D}{1050} \right]^{0.78}$ で表示され、ほぼ上記①式に近似する。

ステップ3

この抽出液は黄～黄褐色に着色するので (色が濃いほど抽出窒素量が多い) 分光光度計により420nmの吸光度を測定する。

ステップ4

この吸光度と抽出窒素量 (ケルダール分解後, 蒸留法により測定) との間には高い相関関係があるので, 回帰式より抽出窒素量を求める。

おわりに

水田土壌の本質を知る上で, 土壌肥沃度, とりわけ, 土壌窒素肥沃度とその窒素無機化予測技術はもっとも基本的かつ重要な情報になります。

稲を栽培している農家の人は, 自分の圃場の窒素肥沃度を感覚的に理解しています。すなわち, 自分の圃場は, 水稻生育初期には土壌窒素量が多く, 初期生育は十分確保できるが, 生育後半はどうしても土壌窒素発現量が少なく凋落してしまうとか。生育後半の土壌窒素発現量が多すぎ, 年によって倒伏を助長するなど水稻栽培に決定的な影響を及ぼします。農家の人と面と向かって話を進める上で, こういった情報は極めて有意義, かつ信頼を勝ち得る情報になります。一度, 自分が担当する地域の水田実態を調査してみても良いでしょう。

pH7.0リン酸緩衝液の作り方

| 試 薬 | 1/15M 溶液 (g/l) | 混合 割合 (ml) |
|---|----------------------|------------------|
| リン酸一カリウム (KH ₂ PO ₄) | 9.078 | 390 |
| リン酸二ナトリウム (Na ₂ HPO ₄ ・12H ₂ O) | 23.883 | 610 |
| (Na ₂ HPO ₄ ・2H ₂ O) | 11.876 | |

※ 必ずpH調整を行うこと

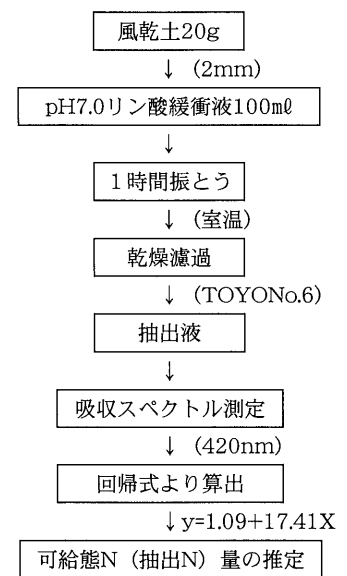
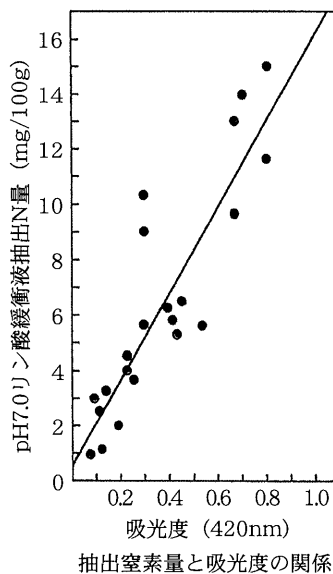


図5. pH7.0のリン酸緩衝液抽出法の測定フロー (小川)